

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

IDEA SOBRE EL ESTADO ACTUAL
DE LA COSMOLOGIA

DISCURSO

LEIDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN

POR EL

Rdo. P. ANTONIO ROMANÍA PUJÓ S. J.

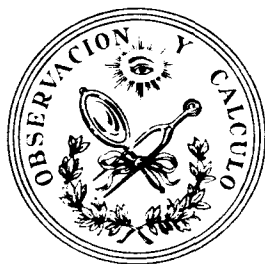
Y

CONTESTACION

DEL

Excmo. Sr. D. FRANCISCO DE A. NAVARRO BORRÁS

EL DÍA 25 DE MAYO DE 1966



MADRID

DOMICILIO DE LA ACADEMIA: VALVERDE, 22

TELÉFONO 221 - 25 - 29

1966

Depósito legal: T. 307 - 1966

SUGRAÑES HNOS. - Talleres en Tarragona - Conde de Rius, 9

DISCURSO

DEL

RDO. P. ANTONIO ROMAÑA Pujó, S. J.

TEMA:

IDEA SOBRE EL ESTADO ACTUAL
DE LA COSMOLOGIA

EXCMOS. SRES. ACADÉMICOS, SEÑORAS Y SEÑORES:

En el prefacio de sus *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques* dice Enrique Poincaré que el problema del origen y naturaleza del Mundo ha preocupado en todo tiempo a los hombres reflexivos. «Quizás —añade el ilustre matemático— para buscar una solución deberíamos esperar hasta haber reunido pacientemente suficientes elementos de juicio y tener de esta manera esperanza fundada de encontrarla. Pero si fuéramos tan razonables —continúa— si nuestra curiosidad no nos hiciese impacientes, es probable que nunca habríamos creado la Ciencia y nos habríamos contentado con vivir día a día nuestras vidas insignificantes. Por eso nuestro espíritu ha reclamado imperiosamente la solución aún antes de que estuviese madura e incluso cuando no poseía sino luces vagas que no le permitían propiamente alcanzarla, sino, a lo más, adivinarla». Esto se escribía en 1911 y claro está que, al emprender sus lecciones, creía su autor que el grado de perfección alcanzado por los métodos de la Mecánica Celeste y los datos acumulados hasta principio de siglo le permitían abordar el problema en mejores condiciones que sus predecesores. A medio siglo de distancia vemos cuán deleznable eran tales esperanzas. Y aun hoy día, cuando por un lado se han formulado tantas teorías cosmológicas y, por otro, nuestro acervo de conocimientos positivos sobre el Cosmos ha crecido tanto, que a nadie se le oculta que el progreso de la Astronomía y la Astrofísica puede competir con el de las más avanzadas ramas de la Ciencia y de la Técnica, es todavía problemático que nos podamos ir considerando adecuadamente equipados para acometer el problema con garantías de éxito. No obstante, una cosa creemos innegable y es que la naturaleza de las teorías formuladas a partir de la de Einstein y los progresos realizados de resultas de ellas en Astrofísica y Radioastronomía, parecen garantizarnos que nuestros actuales esfuerzos no pueden ser tildados de extrapolaciones temerarias; extrapolaciones, sí; pero situadas seguramente en el camino de la verdad, como tantas otras teorías físicas, que han tenido que ir admitiendo continuos retoques y complementos, pero que no por eso han dejado de jalonar la ruta que conduce al verdadero conocimiento de la Naturaleza.

Cuando, con gran sorpresa para mí, me comunicó, inesperadamente, nuestro querido y llorado compañero D. Pedro Puig Adam, que

me iba a proponer para ocupar, entre vosotros, este sillón que tan generosamente me habéis adjudicado, inmediatamente sentí el deseo de aprovechar la oportunidad para tratar a fondo una materia que desde mi juventud me preocupaba. Por desgracia, el cúmulo de obligaciones que me ha ido imponiendo la participación del Observatorio del Ebro en los trabajos del Año Geofísico Internacional primero, luego en el de Cooperación Geofísica y actualmente en los Años Internacionales del Sol en Calma, como Centro Mundial centralizador y, en parte también, coordinador de las observaciones de variaciones magnéticas y electrotelúricas rápidas, me ha ido obligando a diferir una y otra vez este trabajo; y aún ahora, al conseguir encontrar por fin el tiempo indispensable para realizarlo, ha sido a condición de ceñirme a una tractación de la materia mucho más superficial de lo que había proyectado. Os confieso que mi ambición, a todas luces desmesurada, había sido ofreceros como tributo de ingreso en vuestra Corporación un verdadero tratado de Cosmología y ello os explicará, aunque no llegue a justificarla, mi larga demora en entregar terminadas estas páginas... Olvidaba que, además de las dificultades exteriores, tenía que contar con mi propia limitación; en Cosmología no soy más que un aficionado; aunque precedente de Exactas, la trama de la vida me ha conducido a ocuparme primero de Heliofísica, luego de Geofísica y más en particular de Magnetismo Terrestre... Hay un refrán catalán que viene al caso: «Home de molts oficis —avisa—, pobre segur»; equivale, como veis, al castellano: «Quien mucho abarca, poco aprieta»... Y he tenido que convencerme de que, con lo poco que podía apretar, la realización de mi ensueño me habría exigido todavía años de elaboración, si es que no tenía que abandonarlo antes como inasequible para mí. Como veréis cuando hablemos de los Universos expansivos, en la carrera entre la expansión y la velocidad de la luz acaba siempre por vencer la primera. Pues bien, en mi caso, es también tan extraordinaria la proliferación, digamos la expansión, de las teorías cosmológicas y cosmogónicas en estos últimos años que, aunque mis fuerzas fuesen mucho mayores de lo que son y me permitiesen alcanzar una rapidez de trabajo que ya no poseo actualmente, lo más probable es que tampoco podría abarcarlas... Por esto me he decidido a reconocer lealmente mi incapacidad de llegar a más y ofreceros sin ulterior dilación una pequeña visión de conjunto del estado actual de nuestros conocimientos sobre la naturaleza del Universo: tras una breve enumeración de los esfuerzos realizados por los astrónomos de los siglos pasados hasta llegar a la visión que hoy día tenemos de la inmensidad y complejidad del Cosmos, procuraré bosquejar las imágenes de los principales modelos de Universo, excogitados no sólo para explicar la realidad lo más coherentemente posible, sino también para seguir investigando esta misma realidad; son, en efecto, no pocos los datos que exigen para su obtención y oportuna interpretación la elección previa de un modelo, a lo menos como hipótesis de trabajo. Entonces su múltiple diversidad nos hará ver la necesidad de criterios intrínsecos

que nos permitan enjuiciar su verosimilitud y la complejidad de los problemas que suscitan, pues bastantes de ellos están conectados con las ramas más inesperadas de la Física. Finalmente, vista la capacidad actual de los criterios de que hoy por hoy se dispone y las esperanzas que cabe abrigar para el futuro, me permitiréis os invite a echar una ojeada sobre posibles conexiones de las diferentes soluciones cosmológicas con algún problema teológico, de innegable interés para el investigador creyente y aun para todo pensador.

Y no os alarméis sobre la naturaleza de mis propósitos. Sobrado sé la prevención con que se suele mirar el paso de la Física a la Metafísica y la Religión y la repugnancia, justificada en muchos casos, por estas pretendidas implicaciones de las teorías físicas. Pero en esta ocasión hay una doble razón que abona el que se las considere. Por un lado mi carácter de sacerdote, además de astrónomo y geofísico, parece exigirlo, y aun sospecho que más de uno de vosotros quedaría defraudado si tal cosa no hiciese, a lo menos sumariamente; y por otro en esta materia la implicación, llamémosla así, está tan íntimamente enterañada en ella y brota tan espontáneamente de los hechos y teorías que se establecen para explicarlos, que en no pocas ocasiones ha sido la fuerza motiva, subconsciente tal vez, pero eficaz, para llevar a un autor a aceptar o rechazar un modelo de Universo y aun para construir otro nuevo. Y no hablo, naturalmente, de los que utilizan, directa o indirectamente, los conocimientos cosmológicos para apoyar sus elucubraciones filosóficas como, por ejemplo, Paul Laberrenne en su obra *L'Origine des Mondes*, texto del curso que ha profesado ya varios años en la Universidad Proletaria de París; me refiero precisamente a quienes quieren contribuir primariamente a la construcción del edificio científico. Así el conocido astrónomo soviético Fessenkov, en la Asamblea de Roma de la Unión Astronómica Internacional en septiembre de 1952, terminaba su magistral conferencia sobre *la radiación corpuscular como factor de la evolución del Sol y las estrellas* con estas palabras, no por lo concisas menos significativas: «Es necesario rechazar del modo más categórico la imposibilidad de resolver el problema cosmogónico al nivel actual de nuestros conocimientos. El problema del origen y evolución estelar puede y debe ser resuelto en nuestra época sobre la base de la generalización de todos los hechos proporcionados, no sólo por la Astronomía sino también por las ciencias vecinas, analizándolos en su conexión recíproca sobre la base de los métodos del materialismo dialéctico». Ahora bien, para cualquiera que conozca los postulados fundamentales del mismo, esta última afirmación equivale a la exclusión «a priori» de toda teoría cosmogónica que entrañe un principio absoluto y, por tanto, la creación. En sentido opuesto sostiene Milne en sus obras estrictamente científicas *Relativity, Gravitation and World-Structure* y *Kinematic Relativity* que, para comprender el estado actual del mundo, conviene partir de una época inicial, que es una singularidad completa, anterior a toda posible experiencia, un verdadero cero del tiempo que presenta todos los caracteres que sugiere el vocablo cris-

tiano creación. Tan clara es su postura que por ello solo creyó deber rechazar P. L. Worrall la teoría de Milne en su obra *Energy and Matter*. Pero lo injustificado de semejante actitud apriorística lo expresó el siguiente comentario de la conocida revista *Nature* en su número de 15 de octubre de 1949: «Las teorías físicas han de estar basadas, por completo, en la evidencia experimental y en la coordinación matemática de esta evidencia. Si están o no de acuerdo con la Teología o con el Materialismo dialéctico, es algo improcedente para juzgarlas. Los más de nosotros pensamos que fue monstruoso que las teorías astronómicas de Galileo fuesen condenadas por el Santo Oficio. Pero esto ocurrió hace trescientos años y ya está pasado de moda. En cambio, lo que sí es alarmante es que las teorías astronómicas del Prof. Milne sean condenadas por el Dr. Worrall, porque la escala cinemática del tiempo de Milne involucra un presupuesto teológico, a saber, un principio del tiempo y una supuesta creación del Universo. Esperamos que no vamos a tener que contemplar un nuevo No-Santo Oficio con poder, para obligar a retractarse de las teorías que pueden ser consideradas como base apta para la Teología».

Este punto de vista no puede ser más correcto; para juzgar una teoría cosmológica sólo cabe apoyarse en los datos de la experiencia y en su interpretación teórica físico-matemática. Pero una vez estos criterios le hayan dado carta de ciudadanía o de repudio, en nada disminuyen o aumentan su valor científico las consecuencias filosóficas y teológicas que de ella quepa deducir. No podría, pues, entrañar inconveniente alguno una breve consideración ulterior de las relaciones de las diversas teorías con un plano distinto de conocimientos, no por alejado de los métodos usuales de la Matemática y la Física, menos verdadero. Más aún, en cierto modo es muy posible que tal examen resultase beneficioso a la misma Ciencia, si no directamente, por lo menos a través del científico que las cultiva, pues como decía la conocida revista *The Observatory*, a principios de 1954, comentando la obra del célebre matemático y astrónomo de Edimburgo, Whitaker, *Space and Spirit*: «Sir Edmundo deplora el apartamiento del físico del reino de la Metafísica y los más de los lectores estarán de acuerdo con su punto de vista. La controversia metafísica está sin cesar ampliamente interesada en el conocimiento de lo que existe y la cooperación entre el físico y el metafísico es esencial. El sistema metafísico medieval estaba asociado con teorías físicas del mundo material muy defectuosas; pero ahora el conocimiento ciertamente aumentado de lo físico está asociado con una metafísica que parece inadecuada para interpretar la vida. Como resultado de esto, experiencias morales y religiosas del hombre son descartadas como ilusorias y nuestro desarrollo tiende a ser unilateral y desequilibrado», lo cual no puede menos de redundar en perjuicio del trabajo científico. «Tal vez —concluía la revista— el libro de Sir Edmundo Whitaker pueda ayudar a restablecer el equilibrio».

No obstante en esta ocasión no puede extenderse a tanto nuestro programa. ¡Ojalá algún día tengamos tiempo y oportunidad de ha-

cerlo! De momento nos contentaremos con examinar los puntos de contacto con el dogma de algunas teorías cosmológicas más en boga, y ello, no únicamente por el interés del problema en sí mismo, sino también para examinar cuál ha de ser la disposición de ánimo que tales conexiones puedan pedir al investigador católico que, sumiso sin duda alguna a las enseñanzas de la Iglesia, pero consciente no menos de la santa libertad de los hijos de Dios, desee profundizar sin prejuicios científicos, ni temores o cortapisas injustificados, estas intrincadas cuestiones cosmogónicas y cosmológicas que, quiérase o no, no pueden dejar de estar íntimamente vinculadas con el primer artículo de nuestro credo: «Creo en Dios Padre Todopoderoso, Creador del Cielo y de la Tierra».

ELOGIO DEL PROFESOR SANCHEZ PEREZ

Al llegar a este punto y antes de engolfarnos en la consideración de las teorías cosmológicas, no puedo menos de dedicar un tributo de recuerdo y admiración a mi predecesor inmediato en este sillón académico que habéis querido otorgarme, D. José-Augusto Sánchez Pérez. Y en esta ocasión, no sólo por imperativo del protocolo, sino porque sinceramente reconozco que para desempeñar mi cometido me habrían sido de gran ayuda sus eminentes dotes de historiador de las Matemáticas y en particular de la Astronomía, ya que astrónomos y astrólogos fueron, en su mayor parte, los matemáticos árabes españoles a los que tantos desvelos consagró. Cuán lejos, no obstante, me hallo de parecerme a él, basta para probarlo recordar que D. José Augusto presentó a la Academia su discurso de ingreso a los cinco días tan sólo de su elección... record que no creo superado por nadie y tanto más digno de encomio cuanto que se trataba de una obra maestra que congregó en este salón, no sólo a los matemáticos, sino a los filólogos y arabista de todo Madrid. No en vano era ya para aquella época, Sánchez Pérez, figura conocidísima y máxima autoridad en la historia de las Matemáticas en nuestra Patria.

Tuve el placer de conocer a Sánchez Pérez en 1927, en los modestos locales del Seminario Matemático de la calle de Sta. Teresa, cuando era él Secretario de la Real Sociedad Matemática Hispano-Americana y yo estaba cursando las asignaturas del doctorado en Exactas y buscaba tema para mi tesis doctoral. Y recuerdo que se me ofreció amablemente a guiarme, si así lo deseaba, por los intrincados caminos que él cultivaba. Motivos que no son del caso enumerar no me permitieron aceptar su ofrecimiento y por consejo del predecesor suyo y mío en este mismo sillón académico, el inolvidable D. José M.^o Plans y Freyre, me decidí por un tema de criterios de existencia de órbitas cerradas, que realicé bajo la dirección de don Esteban Terradas. Pero he de confesar que muchas veces me ha dolido no haber aceptado el ofrecimiento de Sánchez Pérez, dado que entre los matemáticos peninsulares del Medio Evo y el Renacimiento

no faltan astrónomos y cosmógrafos, cuyas doctrinas sobre el mundo por ellos conocido me habrían suministrado amplio campo de investigación en consonancia con mis aficiones. Un cuarto de siglo más tarde, siendo ya corresponsal de esta Academia, volví a encontrarme en sus salones con D. José-Augusto Sánchez Pérez que me encareció la importancia de la colaboración en la preparación del Diccionario Tecnológico que la Academia le había encomendado. Fruto de sus exhortaciones fue el que recabase y obtuviese del Comité Especial del Año Geofísico Internacional, durante la asamblea general de Barcelona de septiembre de 1956, que se confiase al comité nacional español la responsabilidad del vocabulario tecnológico en lengua castellana de Magnetismo y Electricidad Terrestre y Atmosférica y de Aeronomía.

Y he aquí los dos polos en torno a los cuales giró la obra científica de Sánchez Pérez, simultaneada con su labor docente en los Institutos de Baeza, Jaén y Guadalajara primero, y luego en el Instituto Escuela y en el Beatriz Galindo de Madrid, que siempre desempeñó con toda escrupulosidad. Ambas obras, la historia de las Matemáticas y la preparación del Diccionario Tecnológico, exigían una capacidad de trabajo y una consagración y una tenacidad y perseverancia en el mismo, que son patrimonio de muy pocos; ambas eran sólo realizables a base de un caudal de conocimientos matemáticos, históricos, lingüísticos y filológicos, que rara vez se encuentran aunados en la misma persona; y lo que todavía es más digno de encomio, ambas —como decía José M.^a Igual comentando su obra *Las Matemáticas en la Biblioteca del Escorial*— son de tal naturaleza que exigen «desinterés absoluto, porque esta clase de trabajos son siempre de escaso lucimiento personal». Afortunadamente Sánchez Pérez estaba preparado para esta labor, pues a sus estudios de Exactas, cursados brillantemente en las Universidades de Zaragoza y Madrid, en la que obtuvo el Doctorado en 1902, se juntaba su afición a la historia y al árabe, heredada de su padre, que fue fiel colaborador del arabista Rivera. Fue su padre, en efecto, quien le enseñó e hizo ejercitarse en la *aljamía*, escritura del castellano con caracteres árabes, copiando, en sus años mozos, los elementos de la Casa de la Infanta para su reconstrucción en el Museo Victoria y Alberto de Londres; y fue también él quien le indujo a estudiar latín, griego y árabe con profesor tan esclarecido como D. Miguel Asín Palacios. Así fue cómo, casi sin darse cuenta, quien había comenzado su vida científica con su *Memoria sobre los bicuaternios y n-cuaternios*, se fue desplazando hacia el cultivo de la historia del desarrollo de las Matemáticas en la Península al encontrarse con un bagaje cultural que le abría los secretos de tantos libros, códices y manuscritos guardados en la biblioteca de El Escorial, en la Nacional y en tantas otras.

Fruto de sus pacientes investigaciones fueron sus *Biografías de matemáticos árabes que florecieron en España* y *Las Matemáticas en la Biblioteca de El Escorial*, galardonadas, ambas, por esta Real Academia y publicadas como tomos I y VII de la 2.^a Serie de sus

Memorias; la *Biografía de Chaberben-Aflach de Sevilla* y el *Algebra de Abenbeder*; sus estudios sobre *San Isidoro de Sevilla y su cultura matemática*; sobre *Alfonso López de Corella* y, sobre todo, su *Mono-grafía sobre el matemático portugués D. Juan Bta. Labaña*, que constituyó su discurso de recepción en esta Corporación. Especial predilección sintió por el Rey Sabio, de resultados del hallazgo en la Biblioteca Nacional de un manuscrito bajo la signatura de *Obeidala* que él publicó con el título *El libro de las Ciencias que mandó traducir del árabe Alfonso X el Sabio*. A esta publicación siguió la de un estudio a fondo de su vida, que tituló *Una biografía alfonsina*; luego, *Alfonso X astrólogo* y *El libro del Tesoro falsamente atribuido a Alfonso X el Sabio*; y tan lejos llegó su entusiasmo por él que, aficionado como era a la pintura, eligió su figura como tema central de un tapiz; pero para asegurarse de que lo representaba lo más fielmente posible, tal como debía ser hacia 1271, comenzó por estudiar escrupulosamente todas las estatuas, cuadros, monedas y miniaturas que ostentasen su efigie, desechando las que no le parecían fidedignas y tomando datos de las que juzgaba seguras; todo este proceso lo explicó en su folleto *Un retrato de Alfonso X el Sabio*, en el que incluyó una reproducción en color de su pintura.

Todas estas ocupaciones y su constante colaboración a los trabajos de la Academia, como, por ejemplo, su magnífico discurso de inauguración del curso 1945-46 *Cabalgata histórico-matemática*, no le distrajerón de sus funciones docentes, y buena muestra son de su preocupación por la perfección de la enseñanza sus *Notas de Metodología Matemática*, presentadas en las Asambleas de Oporto y Salamanca de las Asociaciones Española y Portuguesa para el Progreso de las Ciencias de 1921 y 1923, y su *Tratado de Aritmética* y su *Idea de la Teneduría de Libros*. Y no menos aquella su pasión por los ficheros, que hacía decir donosamente a algunos de sus compañeros que Sánchez Pérez había nacido con una ficha en una mano y una pluma en la otra, y gracias a la cual disponía de un filón inagotable, no sólo de materiales para sus publicaciones, sino de datos y anécdotas con que amenizar sus clases e interesar a sus alumnos.

Pues Sánchez Pérez, además de intelectual y científico, era persona de trato sumamente agradable y ameno, de lo que puede dar fe todo otro grupo de publicaciones suyas, para algunos quizás inesperadas: así sus *Cien cuentos populares*, su *Mosaico baturro* y sus *Leyendas españolas*, en colaboración esta última con Malone; sus estudios sobre *El diablo cojuelo*, *El asombro de Turquía* y *valiente toledano* y *El ollero de Ocaña*; sus *Divertimientos matemáticos*, *Los inventos de Torres-Quevedo*, *Rasgos biográficos de Echegaray* y sus *Estudios sobre Lorenzo Hervás y Panduro*, etc., etc. Todo ello explica que en 1957 le confiase el Instituto de España el discurso anual de la Fiesta del Libro y desempeñase su cometido con el acierto de siempre, ponderando el primer libro relativo a las Ciencias Naturales escrito por un español *Las Cuestiones Naturales*, de Séneca. Citaré en último lugar un trabajo sobre *El culto mariano en España*, porque

él me da ocasión de recordar que Sánchez Pérez fue, asimismo, un modelo de caballeros cristianos y como tal, amante de los suyos, equánime, atento y bondadoso. Tiempo ha —confiamos— que el Señor le habrá acogido piadosamente en su seno y le habrá premiado su constante labor. El sí que pertenece a la categoría de los que han laborado esforzadamente hasta el último momento y sólo se dan por vencidos ante la necesidad estricta. La víspera de su muerte, tan sólo a última hora se decidía a excusarse de no poder asistir a la apertura de curso de la Academia «porque, por prescripción facultativa, se le había impuesto una semana de reposo forzoso en su domicilio». Al día siguiente había dejado esta vida mortal el infatigable investigador, que no más en su obra *Las Matemáticas en la Biblioteca de El Escorial*, había estudiado 1.462 autores diferentes y, de ellos, 403 más o menos relacionados con la Astronomía y Cosmografía: ¡Cuántos habrá entre los mismos que, como Juan Bta. Laba en su *Descripción del Universo* que tanto entusiasmaba a Sánchez Pérez, debieron tener concepciones amenas sobre el Mundo que, estudiadas bajo su dirección, me habrían podido proporcionar puntos de vista quizás interesantísimos sobre las ideas de aquellos tiempos acerca del Universo que habitamos! ¿Habrá algunos, inclusive, que hubiesen vislumbrado las concepciones actuales? Sea de ello lo que fuere, ha de quedar forzosamente para otros investigadores; por mi parte, conformándome con carecer de unos conocimientos que quizás pude poseer, pero que ciertamente no tengo, hora es ya de que presente a vuestra indulgente consideración esta modesta tentativa de sinopsis de las modernas teorías cosmológicas.

I PARTE

FORMACION GRADUAL DE NUESTRA IMAGEN DEL COSMOS

Las teorías cosmológicas y los modelos de Universo a que han dado lugar son tan antiguas como la Astronomía. No obstante, es claro que las únicas que ahora deberemos tomar en consideración son las formuladas a partir de la creación de la Mecánica Celeste. Antes, podrá haber habido atisbos geniales y aun ideas que hayan podido servir de base a ulteriores desarrollos; pero teorías cosmológicas en el sentido que hoy se da a esta palabra, no. Para comprender mejor cómo se ha llegado a sentir su necesidad y formularlas, bueno será comenzar por una ojeada inicial al Cosmos que nos rodea, a fin de ver cómo sus fronteras se han ido alejando cada vez más desde que entró la Astronomía por los cauces de la ciencia positiva moderna. No en vano ha escrito Whitrow que «la Cosmología —y lo mismo podríamos afirmar de la Astronomía y la Astrofísica— es una ciencia de horizontes cada vez más dilatados».

1. LA OBRA DE WILLIAM HERSCHELL

El primer gran paso se dio al concluir Copérnico con el geocentrismo. No obstante, propiamente hablando, al situar el Sol en el centro del Mundo no dilataba la teoría heliocéntrica las fronteras del Universo conocido; cambiaba tan sólo la ordenación de los astros, pero la esfera de las estrellas fijas continuaba siendo el fondo del cuadro y el límite inaccesible del que, por de pronto, no valía la pena de ocuparse. No faltaron, ciertamente, pensadores como Tomás Digges y el célebre Giordano Bruno que, sacando una consecuencia lógica del heliocentrismo, afirmasen que las estrellas eran otros tantos soles, pero situados a distancias inmensas, como lo probaba el que no se pudiese apreciar en ellas cambio alguno de perspectiva al describir la Tierra su órbita anual; pero, de hecho, nadie abordó en serio su estudio hasta la segunda mitad del siglo XVIII. Estaban los astrónomos tan ocupados con las consecuencias de las ideas copernicanas para el sistema planetario, que su estudio les absorbió por completo

durante los dos primeros siglos que siguieron a la publicación del *De Revolutionibus Orbium*. El mismo Newton, aunque participaba también de la opinión de que las estrellas eran semejantes al sol y en la primera de sus *Four Letters to Bentley*, publicadas en 1692, basado en su ley de la atracción universal, sostuvo que la materia de los cuerpos celestes tenía que ser infinita y constituir un número infinito de grandes masas, las estrellas, dispersas en un espacio euclídeo infinito, no les consagró especial atención y eso que, quizás sin darse cuenta, acababa de formular el primer esquema de modelo de Universo, como veremos más adelante.

El hombre providencial en este terreno fue William Herschell, músico de profesión, pero de afición óptico y astrónomo, que, por su pobreza, se tuvo que construir sus propios telescopios, hasta que sus éxitos resonantes y, en particular, el descubrimiento de Urano movieron al rey Jorge III de Inglaterra a crear para él la plaza que luego se ha hecho famosa de Astronomer Royal, unida a la dirección del Observatorio de Greenwich. Herschell había visto que de las observaciones de Halley de 1718 se deducía que tres estrellas por lo menos, Sirio, Arturo y Aldebarán, habían cambiado de posición respecto de la que les asignaba el catálogo publicado por Hiparco unos dos mil años antes, y que tal cambio no se explicaba por la precesión de los equinoccios; de ello deducía la necesidad de admitir que tales astros se habían desplazado sobre el fondo del cielo en dirección perpendicular a la visual, y como no era de presumir que su movimiento hubiese sido estrictamente tangencial, era natural concluir que su distancia había variado. Además si las estrellas se movían y el Sol era una de ellas, lo lógico era que se trasladase también por el espacio. Por otra parte conocía las nebulosas descubiertas por Maupertuis y que él describía como pequeñas manchas luminosas, apenas más brillantes que el fondo del cielo y con el rasgo común de su forma elíptica más o menos achatada. Siglo y medio antes, al dirigir por primera vez, Galileo un telescopio a la gran nebulosa que llamamos Vía Láctea, la había encontrado compuesta de innumerables estrellas, que sólo por su distancia y amontonamiento producen la impresión nebular. El constructor de instrumentos astronómicos Thomas Wright y el gran filósofo Emmanuel Kant, reflexionando sobre estos hechos, se habían inclinado a sostener que tales nebulosas eran, como la Vía Láctea, conglomerados de soles, apenas visibles por la distancia. Resultado de ello fue que Herschell se lanzase resueltamente a la resolución simultánea de los dos problemas de la determinación del movimiento del Sol entre las estrellas y de la forma y dimensiones de la Vía Láctea, considerada como el sistema estelar en que habitamos; y para ambos fines emprendió sus sondeos sistemáticos de la bóveda celeste, contando escrupulosamente todas las estrellas visibles en el campo de su telescopio, nada menos que en 1088 regiones distintas del cielo, convenientemente elegidas para poderse formar una idea adecuada de la distribución del conjunto.

Ciñéndonos al problema de la Vía Láctea, la falta de conoci-

mientos de datos seguros (distancias y luminosidades) la suplió Herschell con una triple hipótesis de trabajo: en primer lugar supuso que la densidad espacial de las estrellas, es decir, su número por unidad de volumen, era constante hasta los últimos límites de la Vía Láctea; luego admitió que todas tenían el mismo brillo real, de modo que sus diferencias de magnitud fuesen sólo consecuencia de sus diversas distancias; y finalmente supuso que no había en el espacio ninguna pérdida de luz ni materia absorbente, de modo que todas las estrellas se viesan con el brillo aparente debido a su alejamiento de nosotros. De hecho se sirvió casi exclusivamente de la 1.^a y 3.^a hipótesis, pues en sus recuentos tomó en consideración todas las estrellas de cada región, sin distinción de magnitudes, y sólo algunas veces tuvo éstas en cuenta para deducciones particulares. Hoy día sabemos lo erróneo de tales criterios y los falsos resultados a que habían de conducir para las estrellas individuales; pero para un estudio estadístico de conjunto el error era de menor importancia y de hecho los resultados a que Herschell llegó representan para su tiempo un avance extraordinario. En su empeño le sostuvieron y ayudaron dos resultados secundarios inesperados de su escrutamiento sistemático del cielo: el primero fue el descubrimiento de Urano, gracias al cual vio duplicarse linealmente las dimensiones del sistema solar y además recibió ayudas con que pudo construir telescopios de mayor potencia; y el segundo, fruto precisamente de estas ayudas, que con los nuevos telescopios pudo resolver en estrellas individuales alguna de las nebulosas contenidas en el catálogo publicado por Messier en 1783. Hoy es claro que lo que consiguió resolver no eran verdaderas nebulosas extragalácticas, sino tan sólo algunos de los enjambres globulares satélites de nuestro sistema; pero para Herschell el descubrimiento fue decisivo; si otras nebulosas del catálogo resistían a la resolución, sería tan sólo debido a hallarse a distancias mucho mayores. Calculando las distancias mínimas a que para ello tenían que encontrarse, Herschell concluyó que «el estupendo sistema sideral que habitamos, compuesto de muchos millones de estrellas, es con toda probabilidad una nebulosa aislada. Entre el gran número de nebulosas que hemos ya visto y que pasan de 900 hay algunas sin duda que con toda verisimilitud son tan extensas como la que habitamos».

En cuanto a la Vía Láctea misma en dos memorias presentadas en 1785 a la Royal Society de Londres sostiene que de sus sondeos se deduce que el número de estrellas que la constituyen oscila entre 75 y 100 millones, que están agrupadas en una especie de disco de cuya forma es un efecto óptico su aspecto aparente en el cielo y que el diámetro de tal disco es 850 veces la distancia de la Tierra a una estrella de 1.^a magnitud, como Sirio, y su grosor 155 veces la misma distancia; en cuanto al Sol lo situaba cerca del centro del disco y casi en su plano central, hecho este último del que daba como razón el que la Vía Láctea divide la bóveda celeste en dos partes casi iguales. Los valores que anteceden eran bien exigüos y el Sol, aunque está efectivamente cerca del plano central de la Galaxia, dista en cambio de su centro

los dos tercios del radio; pero esto no quita que todo el conjunto de la concepción herscheliana llame la atención poderosamente por lo acertado de su orientación. Respecto de Newton su concepción representaba un adelanto hacia los puntos de vista actuales; para ambos la materia era infinita; pero en tanto que Newton la concebía dividida en estrellas individuales esparcidas en un espacio infinito, prueba Herschell que se halla dividida sí en estrellas, pero concentradas éstas en sistemas gigantescos esparcidos a su vez por la inmensidad del espacio. Al hacerlo, formulaba por primera vez la idea de las nebulosas extragalácticas como piezas últimas del Universo que aún hoy día domina muchas concepciones cosmológicas. No obstante no ejerció de momento tal idea especial influjo en el desarrollo de los conocimientos astronómicos, debido en gran parte a que la opinión del mismo Herschell sobre el número y la importancia de tales sistemas fue evolucionando con el decurso del tiempo. En 1785 creía que en promedio las estrellas estaban uniformemente distribuidas en la Vía Láctea, y convencido de que todas las nebulosas eran agregados de estrellas, no dudaba haber conseguido sobrepasar en todas direcciones los límites de nuestro propio sistema estelar; pero a principios del siglo XIX tuvo que reconocer que la distribución de las estrellas en nuestra Galaxia era enteramente irregular y que las nebulosas se dividían en dos clases, una de las cuales consistía en materia difusa interior a la Vía Láctea; en fin en 1817 llegó al convencimiento de que su telescopio de 20 pies no siempre alcanzaba las profundidades de la galaxia y como con el de 40 pies veía más estrellas que con el otro, admitió que con ninguno de ellos alcanzaba los confines del Universo y que siempre quedaba un más allá inexplorado. En consecuencia, aunque todavía siguió admitiendo que algunas nebulosas eran sistemas estelares exteriores a la Vía Láctea y comparables con ella, el papel de esta última fue aumentando extraordinariamente de importancia a sus ojos y muchas nebulosas pasaron en su opinión a ser tan sólo sus componentes o sus satélites. Punto de vista muy real, sobre todo tratándose de las nebulosas entonces conocidas, pero que acentuado por su hijo John Herschell y sobre todo por Struve iba a hacer que el estudio de las nebulosas extragalácticas se demorase más de un siglo.

Todavía en otro sentido contribuyó también William Herschell a extender los confines de nuestro Universo, a saber, demostrando que las leyes newtonianas de la gravitación regían también los sistemas de estrellas dobles mucho más allá del sistema planetario. Con razón se grabaron en su epitafio aquellas palabras «Coelorum perrupit clautra». Antes de él, como ha escrito Sir Oliver Lodge, «las estrellas habían sido sólo observadas para fines prácticos... tratadas como piezas de un reloj o puntos de referencia... pero para ellas el viejo sistema ptolemaico podía ser todavía bueno: nada impedía que fuesen puntos luminosos en una vasta esfera cristalina, todas a una misma distancia y destinadas al servicio de la Tierra. Herschell lo cambió todo: en vez de monotonía, variedad; en vez de uniformidad

en el alejamiento, campos estelares sin límites y distancias sin fronteras; en vez de reposo e inacción, movimiento y actividad; en vez del estancamiento, la vida...».

2. LA PREPONDERANCIA DE LA VÍA LÁCTEA

Si nos hemos entretenido tanto en la obra de Herschell es por su excepcional importancia como adelantado de los estudios estelares y galácticos. Sus contemporáneos le achacaron que sus observaciones se reducían a la parte septentrional del cielo y que por tanto sus conclusiones eran por lo menos sospechosas de extrapolación injustificada. Para remediarlo su hijo John Herschell instaló en 1834 el mayor de los telescopios de su padre en Africa del Sur, y en cuatro años de perseverante trabajo y tras examinar 2389 regiones estelares australes, confirmó por completo sus ideas, advirtiendo tan sólo que el Sol no ocupaba en la Galaxia una posición tan céntrica como la que él había creído y añadiéndole la notable experiencia de que las 1700 nebulosas que llegó a catalogar parecían huir las más del plano fundamental de la galaxia y acumularse en sus polos. Esta última observación fue una de las que más influyeron en Struve para que se lanzase por la ruta iniciada por Herschell en sus últimos años y atribuyese tal importancia al papel de la Vía Láctea que su estudio polarizó casi por completo los esfuerzos de los astrónomos durante todo un siglo, sin que consiguiesen cambiar tal orientación ni siquiera descubrimientos como el de Lord Rosse que en 1845 halló con su famoso telescopio la primera nebulosa espiral, la tan conocida de los Perros de Caza. Struve estudió a fondo las memorias de Herschell y manteniendo su misma hipótesis de trabajo de igual luminosidad de todas las estrellas, de ellas y de sus observaciones dedujo que el conjunto entero de las estrellas con los enjambres globulares y las nebulosas formaban un solo sistema de espesor finito, pero de extensión infinita en el plano galáctico. La idea primitiva de Herschall de una Vía Láctea finita rodeada de otros sistemas estelares o universos-islas cayó por completo en desgracia y el mismo descubrimiento de John Herschell pareció una confirmación de que las otras nebulosas no eran sistemas independientes de la Vía Láctea, sino partes o satélites de ella. Concepción errónea, pero providencial, pues supuesta la dificultad fundamental con que se seguía tropezando en el cómputo de distancias celestes, fue mucho más útil fijar la atención en lo más cercano que esterilizarla intentando la consecución de metas inaccesibles.

Las hipótesis de trabajo de Herschell, aun enteramente aplicadas, no habrían podido conducir a resultados exactos; menos aún, supuesto que en la práctica prescindió de la segunda; pero para lo que sí ciertamente sirvieron fue para probar que las distancias en el sistema estelar eran inmensamente mayores que en el planetario. Basándose en la diferencia de brillo aparente de los astros, se había llegado a la conclusión de que la distancia que nos separa de las estrellas de primera magnitud es 28.000 veces la distancia del Sol a la Tierra. Hacia

1838 Bessel, Henderson y Struve consiguieron casi simultáneamente medir por medios trigonométricos la distancia de tres de las estrellas más próximas, la 61 del Cisne, α del Centauro y Vega de la Lira, que por cierto resultaron mucho más lejanas que cuanto se había previsto; pero las esperanzas que se fundaron en tan halagüeños resultados pronto se revelaron vanas, pues se vio que el número de estrellas asequibles por métodos trigonométricos era muy exiguo, tanto que al terminarse el siglo el número de paralajes estelares trigonométricas conocidas no llegaba siquiera al centenar y actualmente se sabe que todas las así medibles no pasan de algunos millares. Era, pues, indispensable seguirse apoyando en los métodos estadísticos y para su fecundo empleo fueron de capital importancia las mejoras aportadas por Seeliger y Kapteyn.

Reemplazó el primero la noción de Herschell de una luminosidad intrínseca única para todas las estrellas por la de una distribución estadística de las luminosidades verdaderas que se expresa por medio de una función de frecuencia de la luminosidad, formulando por primera vez el problema con precisión matemática; y luego, más a base de los catálogos que durante el siglo se habían ido publicando que de observaciones telescópicas directas, realizó entre 1884 y 1911, una porción de sondeos de distintas partes del cielo determinando las estrellas de las diferentes magnitudes visibles en cada una de ellas, con lo que consiguió determinar cómo disminuye el número de estrellas de cada magnitud al aumentar su distancia al centro del sistema estelar; y en la hipótesis de que se ha de fijar un límite superior de la luminosidad absoluta y asimismo una distancia más allá de la cual la densidad estelar se haga tan pequeña que se pueda hablar de un verdadero límite del sistema galáctico, llegó a un modelo de Galaxia más discoidal que el de Herschell, y con un diámetro de 23.000 años de luz y un espesor de unos 6000 años, valores entre 4 y 5 veces mayores que los de aquél.

La idea de Kapteyn fue todavía más fecunda. Volviendo a los sondeos directos de Herschell, proyectó la investigación exhaustiva de 206 regiones seleccionadas de 1° cuadrado de extensión (*selected areas*) y para ello pidió a todos los observatorios que quisieran cooperar a su estudio, catalogando todas las estrellas contenidas en cada una de ellas con todas sus particularidades, magnitud, tipo espectral, movimiento propio, velocidad radical y paralaje (caso de conocerse). Para interpretar los datos así obtenidos construyó una serie de modelos de distribución espacial de las estrellas, de la función de frecuencia de la luminosidad absoluta y de la materia absorbente interestelar y los fue modificando hasta que en cada área coincidían las estrellas efectivamente observadas con las que según la calidad del modelo debían observarse. Aunque la seguridad de la solución no pudiese ser completa, pues naturalmente los modelos suponían nuevas hipótesis, tomando como límite de la Vía Láctea la región en que la densidad estelar baja hasta 0.01 de la que existe en los alrededores del Sol, Kapteyn obtuvo también una distribución de forma parecida

a las de Herschell y Seeliger, pero con un diámetro de 55.000 años de luz y un espesor de 11.000. Pero además en los resultados de Kapteyn había algo mucho más importante; la observación sistemática de las *selected areas* había revelado la existencia de la materia absorbente interestelar y su presencia en grandes cantidades cerca del plano principal de la Vía Láctea: como resultado ya no era necesario asignar al Sol la posición central que hasta entonces había parecido ocupar en el mismo y quedaba además explicado por qué no se veían nebulosas en sus inmediaciones. Ambos resultados eran altamente satisfactorios: el primero porque descartaba los últimos restos del antropocentrismo que había dominado en las concepciones astronómicas ptolemaicas y que tan sospechoso se había ido haciendo desde los tiempos de Copérnico y sus sucesores; el segundo porque comenzaba a devolver las aguas a su cauce, esto es, a las primeras concepciones de Herschell y hacía que, además de la Galaxia, se fijasen otra vez los astrónomos en las nebulosas espirales y demás sospechadas como extragalácticas que en el entretanto se habían ido descubriendo. No se crea con todo que se abandonasen los estudios galácticos; nunca por el contrario habían tenido tanto empuje; y así en el primer tercio de este siglo culminaron en la determinación de la naturaleza espiral de nuestra nebulosa, lo mismo que en la de su rotación diferencial por Lindblad y Oort.

Pero volvamos a 1912: en aquel año Miss Leavitt iba a encontrar el nuevo método de medida de las distancias celestes gracias al cual iba a crecer 27 billones de veces el volumen del espacio dentro del cual una distancia estelar puede ser medida. En dicho año Miss Leavitt halló su célebre relación entre el periodo de variación de la luminosidad de las estrellas variables denominadas cefeidas y su magnitud aparente; y estudiadas las contenidas en las Nubes de Magallanes, pronto vio que la relación existía igualmente entre los periodos y las magnitudes absolutas o luminosidades intrínsecas de dichos astros; iba, pues, a ser posible en adelante determinar con precisión las distancias relativas y bastaría llegar a conocer la distancia absoluta de alguna para que el método pudiese servir para medir distancias absolutas con la misma seguridad que el trigonométrico. Por desgracia no hay cefeidas lo suficientemente próximas para permitir una determinación trigonométrica de su paralaje; fue menester contentarse con paralajes estadísticos, determinados por comparación de los movimientos propios de algunas de ellas con el fondo aparente inmóvil de las más lejanas. No obstante las inseguridades inherentes a tal procedimiento, Shapley consiguió establecer con la precisión suficiente la llamada curva de período-luminosidad absoluta. Y como las cefeidas abundan fuera de la Vía Láctea, pronto consiguió Shapley con su ayuda determinar las distancias de los enjambres globulares que la rodean y que resultaron distar entre 20.000 y 200.000 años de luz. El Sol quedaba cerca de un eje del sistema de los enjambres, cuyo centro geométrico se vio que caía en la dirección de Sagitario, donde las nubes de estrellas son más abundantes. Descubrió asimismo que

los enjambres estaban simétricamente distribuidos a un lado y otro del plano central galáctico y dedujo de ello que su sistema y la galaxia eran concéntricos y formaban un todo. Después de varias medidas y correcciones dio como distancia del Sol al centro de la Vía Láctea 30.000 años de luz y como dimensiones de la misma 80.000 años de luz de diámetro y unos 16.000 de grosor, con un diámetro de 130.000 años de luz para el sistema de los enjambres que la rodean. El número total de estrellas contenidas en todo el sistema se confirmó pasaban de los 100.000 millones.

3. LA VUELTA AL ESTUDIO DE LAS NEBULOSAS EXTRAGALÁCTICAS

Entre tanto la posibilidad de medir distancias exteriores a la Vía Láctea había despertado de nuevo el interés de los astrónomos por las nebulosas espirales y elípticas al parecer extragalácticas. Tras descubrir la de los Perros de Caza, todavía había conseguido Lord Rosse antes de su muerte hallar otras 14 del mismo tipo. Luego se había ido viendo que eran tan abundantes que al entrar en servicio en 1918 el gran telescopio Hooker de Monte Wilson su número se estimaba en medio millón. Con el nuevo instrumento de 252 cm de abertura y por el método de las cefeidas había probado definitivamente Hubble en 1924 que eran efectivamente exteriores a la Vía Láctea; las primeras medidas daban distancias de más de medio millón de años de luz; las dimensiones lineales del Universo quedaban más que quintuplicadas y se veía lo acertado de la primera concepción herscheliana de Universos-islas.

Al igual que antes con las estrellas, el primer problema que se planteaba era poder seguir determinando distancias. Mientras en una nebulosa fuese posible distinguir cefeidas la solución era fácil; pero tal cosa ocurría en un número relativamente pequeño de casos, casi solamente en las componentes del Grupo Local. ¿Qué hacer con las restantes? En las nebulosas ya bien medidas, estudió Hubble a fondo las estrellas invariables más brillantes, supergigantes azules, cuya magnitud absoluta bien calibrada oscila entre -6 y -8 . Suponiendo entonces que en todas las nebulosas las estrellas más importantes tengan la misma magnitud, empleó el criterio llamado de la estrella más brillante como módulo de distancia, advirtiendo que para disminuir los errores tomó como tal en cada nebulosa una estrella ficticia de magnitud igual a la media de las cuatro más brillantes de la misma, a la cual, estadísticamente asignó la magnitud absoluta -6.4 . Con este criterio pudo medir la distancia de otras 150 nebulosas o enjambres de nebulosas en que no se distinguen cefeidas, pero sí estrellas individuales, llegando por este procedimiento hasta los 10×10^6 años de luz: nuevo aumento espectacular de las dimensiones del Cosmos, máxime teniendo en cuenta que en la inmensa mayoría de las nebulosas no era posible distinguir estrella individual alguna y quedaban por lo tanto evidentemente más allá. Para éstas consiguió todavía Hubble poner a punto un tercer criterio basado en la repartición de las

magnitudes absolutas de las mismas galaxias. Para ello se valió del riquísimo enjambre de Virgo que a una distancia entre 7 y 8 millones de años de luz le ofrecía varios centenares de galaxias de todos los tipos. Viendo que la dispersión de sus luminosidades absolutas era pequeña, entre la mitad y el doble de la media, y que el valor de esta última era unas 1700 veces la de su estrella más brillante, supuso que esta distribución era la misma para todos los enjambres de nebulosas y dedujo que la magnitud media absoluta de la 5.^a nebulosa en brillo de cada enjambre era -16.4 . No era ello sino una generalización del método de la función de la luminosidad que Seeliger había aplicado a las estrellas y por cierto con mucho menos peligro de error, pues aquí es mucho menor la dispersión. Hubble aplicó el criterio hasta los últimos límites del telescopio de Monte Wilson y el resultado fue una escala de distancias que sobrepasó inmensamente todas las antiguas concepciones, por audaces que hubiesen podido parecer al ser formuladas. Y con todo, como veremos enseguida, la mayoría de tales distancias se midieron deficientemente y la menor corrección a que ha sido menester someterlas ha sido multiplicarlas por 2 o por 3.

Pero sigamos por pasos. El conocimiento de las distancias de las nebulosas llevó como de la mano al estudio de sus dimensiones y movimientos y consiguientemente de sus masas. Por lo que toca a las dimensiones los primeros resultados parecían indicar que todas las nebulosas extragalácticas eran mucho menores que nuestra Vía Láctea, lo que no dejaba de llamar la atención por lo que de antropocentrismo pudiese todavía haber en tales determinaciones. Pero la sorpresa fue mucho mayor al estudiar sus movimientos. Como a la distancia a que se hallaban no cabía pensar en la observación de sus movimientos propios, los esfuerzos se dirigieron al estudio de las velocidades radiales, creyendo hallar en ellas una dispersión tan grande como en el caso de las estrellas y aún quizá poderlas utilizar para la determinación del posible movimiento entre las nebulosas de nuestra Vía Láctea, como las velocidades radiales de las estrellas nos habían permitido determinar el movimiento en el espacio del Sol. Examinados con este fin sus espectros, en el segundo decenio del siglo descubrió en ellos Slipher corrimientos de sus rayas proporcionales a su longitud de onda y como se hacía en los demás cuerpos celestes en que tal fenómeno se observa lo interpretó como un efecto Doppler-Fizeau. El primer resultado indicaba que la nebulosa de Andrómeda se nos acercaba a la velocidad de 225 Km/seg; pero enseguida se vio que, excepto en otros dos casos, todas las velocidades medidas eran de recesión y cuando más tarde se conoció el movimiento de rotación de la Vía Láctea se vio que al hacer la corrección oportuna incluso aquellas tres nebulosas se alejaban de nosotros; en algunos casos estas velocidades de fuga llegaban a los 720 Km/seg.

Lo inesperado del descubrimiento movió a todos los observatorios dotados de material adecuado al estudio sistemático del fenómeno y a él se consagraron en particular Hubble y Humason con el gran telescopio de Monte Wilson hasta los últimos límites de sus posibili-

dades: espectros hubo cuya obtención les exigió exposiciones de 72 horas de la placa fotográfica en una serie de noches sucesivas. En pocos años se recogió el material suficiente para establecer un corrimiento progresivo hacia el rojo de los espectros que crecía con el debilitamiento de las imágenes y por lo tanto lógicamente con el aumento de la distancia de las nebulosas, y así en 1924 Hubble pudo formular su célebre ley de que dicho corrimiento crece linalmente con la distancia; dos años después Humason la comprobaba en las nebulosas del enjambre II de la Osa Mayor con un corrimiento de las rayas del espectro revelador de una velocidad de fuga de 42.000 Km/seg. La ley que en el momento de ser enunciada valía hasta 6 ó 7 millones de años de luz, se encontraba de pronto extendida hasta los 240 millones.

Con todo los entusiasmos suscitados por tal descubrimiento se enturbiaron pronto. Saltaba inmediatamente a la vista una primera complicación. El establecimiento de la ley de Hubble exigía dos pasos: ante todo había que establecer en cada caso la velocidad radial por el corrimiento hacia el rojo de las rayas espectrales y luego era preciso determinar las distancias de las nebulosas a que se refieren; pero éstas hemos visto que se determinaban por los brillos aparentes y como éstos a su vez están evidentemente afectados por el enrojecimiento del espectro, que hace que las estrellas aparezcan más débiles, es evidente que antes de calcular las magnitudes es menester corregir las imágenes del efecto de enrojecimiento; y aquí surge la dificultad; ¿hay que hacer una corrección sencilla o doble? Que hay que introducir la corrección es claro, pues el enrojecimiento es un hecho y no puede negarse que los fotones emitidos por la nebulosa nos llegan con su energía reducida por un factor $u = c \frac{d\lambda}{\lambda}$ Pero si el enrojeci-

miento es un verdadero efecto Doppler-Fizeau, significa ello que en el tiempo de 1 seg., en que los fotones recorren la distancia c , el cuerpo emisor se ha corrido una distancia V igual a su velocidad v , por lo tanto, el número de fotones, que, de estar la fuente luminosa inmóvil, habrían quedado diseminados en la longitud c , lo quedan ahora en la longitud $c + V$; y como por el efecto Doppler se tiene precisamente la proporción $d\lambda/\lambda = V/c$, se ve que $V = u$, o lo que es lo mismo que los fotones recibidos, reducidos en energía por el factor u , quedan también reducidos en número por el mismo factor. Dependerá, pues, de la concepción que nos hagamos del efecto Doppler, el que tengamos que aplicar una corrección sencilla o doble; y como que de que se aplique una u otra quedará modificada la distancia resultante, el establecimiento de la ley de Hubble parece estribar forzosamente en un círculo vicioso. Y no es esto todo: como veremos más adelante, muchos estudios galácticos y cosmológicos se fundan en recuentos de nebulosas hasta una magnitud determinada: ¿qué sentido pueden tener, si la asignación a las nebulosas de una magnitud u otra depende de la interpretación que al enrojecimiento se dé?

Otras dificultades se formularon casi al mismo tiempo: si el enrojecimiento era efectivamente un efecto Doppler, la velocidad de recesión de las nebulosas crecía a razón de 540 km/seg. por megaparsec. y si así era y las velocidades radiales se habían mantenido constantes, 1800 millones de años atrás, todas las nebulosas tenían que haber estado formando un enjambre sumamente denso alrededor de la Vía Láctea de la que se habrían separado en un momento dado, apartándose de ella en todas direcciones y con todas las velocidades posibles. Y como no es menos absurdo admitir un centro de repulsión que un centro de atracción, para evitar este galaxiocentrismo la solución forzosa era concluir que todo el sistema de nebulosas estaba en expansión y que, por tanto, el Universo no había podido existir en su estado actual más allá de unos 2.000 millones de años. Y por otra parte, aunque la dispersión de las magnitudes absolutas es mucho menor en las nebulosas que en las estrellas, cabría también preguntarse si es lícito admitir que la magnitud media absoluta de las más distantes es la misma que la de las más próximas, pues, al fin y al cabo, la luz de aquéllas recibida corresponde a una emisión de hace cientos de millones de años, en tanto que la de las otras es de una emisión relativamente moderna.

Las reacciones fueron diversas: a esta última objeción se hizo notar que los fósiles de los terrenos primarios de nuestro globo parecían probar que la radiación del Sol no había variado sensiblemente en varios cientos de millones de años; menos, por consiguiente, era de temer una variación sustancial en las nebulosas. En cuanto a la dificultad de la edad del Cosmos, demasiado corta a todas luces para poderla compaginar con los conocimientos que entre tanto se había ido adquiriendo sobre la evolución de los tipos de estrellas, formación y disolución de enjambres, equipartición de movimientos y masas en la Vía Láctea, etc., se contestó poniendo en duda que el enrojecimiento de los espectros de las nebulosas fuese un auténtico efecto Doppler. No obstante, las tentativas de Zwicky y otros para atribuirlo a una pérdida de energía de los fotones al atravesar los campos gravitatorios situados entre las nebulosas y nosotros no condujeron a ninguna explicación plausible, y así, al entrar en servicio el nuevo gran telescopio de Monte Palomar, los dos términos del dilema en que se concretaba esta dificultad seguían siendo los mismos que había enunciado Hubble veinte años antes: o el corrimiento hacia el rojo es un verdadero efecto Doppler y entonces es indispensable admitir la expansión con todas sus consecuencias, o es debido a otra causa y entonces nos hallamos ante una nueva ley de la naturaleza, desconocida todavía. Observemos de paso que Hubble se inclinaba a esto último; y por otra parte que, de admitirse la ley de Hubble como definitivamente establecida, los corrimientos al rojo constituían automáticamente un nuevo medio de medición de las distancias de las nebulosas.

4. LA ENTRADA EN SERVICIO DEL TELESCOPIO DE MONTE PALOMAR

En tales circunstancias entraba en servicio el telescopio Hale y su impacto en este continuo alejar cada vez más los hipotéticos límites del Universo no ha defraudado las esperanzas que en él se habían puesto. Humason, en efecto, no tardó en fotografiar dos galaxias del enjambre de la Hidra, cuya velocidad de fuga resultaba ser 61 000 km/seg., un quinto de la velocidad de la luz, lo que les daba una distancia que excedía en un 50 % a la mayor conocida antes, y en 1956 descubrió Baum otro enrojecimiento en el espectro de la nebulosa 1410 + 5224, que llevaba a una velocidad de fuga de 132 000 km/seg., es decir, 0.46 c; con lo que la distancia tenía que exceder de los 720 millones de años de luz: aun suponiendo que el corrimiento al rojo no tuviese su origen en un auténtico efecto Doppler, es evidente que el crecimiento proporcional de las distancias, respecto de las antes conocidas, seguía siendo indiscutible.

Pero hubo algo más. Aprovechando la potencia del nuevo instrumento decidió Baade llevar a cabo un estudio sistemático de Andrómeda y sus satélites y, con gran sorpresa, advirtió que no conseguía fotografiar en ella ninguna variable del tipo RR Lyrae, de magnitud 21.8, cuando era claro que con el aparato se tenía que alcanzar la magnitud 22.5. La única explicación satisfactoria era que la nebulosa se encontraba a mayor distancia de lo que se creía, lo que suponía un fallo en el patrón adoptado de distancias extragalácticas y la necesidad de repasar cómo se había establecido. La escala de Hubble se apoyaba, como explicamos, sobre las cefeidas, estrellas supergigantes raras y lejanas. Como ninguna de ellas estaba lo suficientemente próxima para que se pudiese medir su paralaje por medios trigonométricos, ya dijimos se había tenido que deducir del estudio estadístico de los movimientos propios de una docena de ellas, para lo que se había utilizado el Catálogo General Preliminar de Boss. Al descubrir Baade, como consecuencia del estudio de las variables tipo Mira Ceti que aparecían en sus clichés, que las cefeidas eran unas 4 veces más brillantes de lo que se había creído y que, por tanto, todas las distancias extragalácticas tenían que ser multiplicadas a lo menos por 2, se repasó el catálogo de Boss, y se hallaron en él imprecisiones que eran las responsables de que se hubiese adoptado una medida demasiado corta. Desde entonces H. R. Morgan y luego Blaauw han publicado nuevas listas de movimientos propios de cefeidas, mucho más exactas, con las que ha sido posible calibrar de nuevo la curva período-luminosidad. Como la corrección no afectaba a las medidas realizadas en el interior de la Galaxia y ni aun en las Nubes de Magallanes, ya que en ellas las variables utilizadas eran del tipo RR Lyrae y éstas no venían implicadas en las correcciones, consecuencia de la corrección de Baade era desaparecer la anomalía que tanto había preocupado de que los diámetros de las nebulosas resultaran siempre inferiores al de nuestra Galaxia; al duplicarse o triplicarse las distancias, otro tanto ocurría también con los diáme-

tros y la Vía Láctea quedaba convertida en una de tantas nebulosas. Además desaparecía también la diferencia que tanto había llamado la atención entre las novae extragalácticas, que nunca pasaban de la magnitud -5.7 y las galácticas que llegaban a la magnitud -7.4 . Y de golpe las nebulosas más distantes, que antes se creían estar a mil millones de años de luz, resultaban estar a dos o tres mil; y como las velocidades de fuga no se alteraban, el factor de Hubble se iba a tener que dividir por 2 ó por 3 y el tiempo durante el cual había podido tener lugar la expansión del sistema actual de nebulosas, si la velocidad de recesión se habían mantenido constante a través del tiempo, podía llegar a ser de 5 a 6000 millones de años.

Descubierta una nueva ruta, lo lógico es no detenerse. En 1956 un nuevo análisis de los corrimientos al rojo llevado a cabo por Humason, Mayall y Sandage, hizo sospechar que la expansión había sido más rápida al principio. En 1958 Hubble y Sandage llegaron a la conclusión de que había que corregir de nuevo los criterios de las cefeidas y de la estrella más brillante. Se probaba, en efecto, que no todas las cefeidas del mismo período tienen precisamente el mismo brillo absoluto y que la dispersión puede llegar a ser de 1,2 magnitudes para un período dado, lo que exige, en cada caso, comenzar por determinar si las cefeidas que se usan son superluminosas o infraluminosas. Y además Sandage aclaraba que algunos objetos del enjambre de Virgo, que Hubble había creído estrellas gigantes azules, eran asociaciones de tales estrellas con regiones de hidrógeno de luminosidad intrínseca unas 2 magnitudes mayor que la adoptada por Hubble, lo que obligaba a multiplicar por 4 la distancia de dicho enjambre. Parecía que, en consecuencia, la distancia de todas las galaxias situadas más allá de aquéllas en que se pueden apreciar cefeidas o supergigantes azules iba a tener que ser multiplicada quizás por 5 ó por 10. Según Sandage, la constante de Hubble se reducía a 80 ó 75 km/seg./megaparsec y, consiguientemente, la duración de la expansión podía subir hasta unos 13 500 millones de años. En opinión de Vaucouleurs las sorpresas no han terminado; por la distribución de los residuos en las velocidades internas de ciertos grupos de nebulosas, cree probable que todo nuestro grupo local no es sino parte de un superenjambre de enjambres con centro en Virgo. Zwicky, en cambio, discrepa de esta idea: a base de su catálogo de magnitudes de más de 40 000 galaxias de luminosidad superior a la magnitud 15, asegura que en su gran mayoría pertenecen a enjambres, pero sin que se adviertan huellas de superenjambres.

5. PERFECCIONAMIENTO DE LOS MÉTODOS DE MEDIDA

Todo ello ha llevado a esfuerzos inintermitidos para mejorar los métodos de medida y, naturalmente, para corregir los antiguos. Y la tarea no se ha revelado fácil. Ante todo para medir la magnitud de las galaxias es preciso disponer de buenas secuencias de

magnitudes estelares que puedan servir de puntos de referencia; y si bien tales secuencias hace tiempo que se conocen para los objetos más brillantes, para los más débiles ha sido menester crearlas hasta los límites de capacidad de los nuevos telescopios, y el trabajo está todavía en vías de realización en Monte Palomar. Además evaluar con precisión la magnitud de una galaxia no es problema fácil y lo que se va viendo con claridad es que las medidas antiguas no pasaban de aproximadas. El estudio de la forma de las galaxias ha probado que tienen grandes extensiones de débil brillo alrededor de la parte más brillante y que la contribución de esta especie de suburbios a la luminosidad total es mucho mayor de lo que se creía. El resultado es que en las galaxias cercanas, de diámetro aparente relativamente grande, se han eliminado, sin pretenderlo, estas áreas, porque, con frecuencia, quedaban fuera del campo de la placa fotográfica y, en consecuencia, las magnitudes absolutas han sido subestimadas. En cambio, en el caso de las lejanas, tales áreas han quedado ciertamente dentro del campo, pero sólo hace pocos años se las ha comenzado a tener en cuenta. Para medir, en efecto, correctamente la luminosidad de sus imágenes poco definidas, ha sido preciso idear una técnica especial: hoy día se recurre a un chasis fotográfico móvil que distribuye su luz sobre áreas cuadradas de dimensiones escogidas; al principio se tomaron los clichés en luz azul, amarilla y roja y se establecía sus magnitudes respectivas con ayuda de células fotoeléctricas comparándolas enseguida con las magnitudes-tipo de las secuencias: hoy día las fotografías se llegan a hacer en ocho colores diferentes, del infrarrojo al ultravioleta; muchas medidas antiguas han resultado tan heterogéneas que no son susceptibles de corrección alguna de conjunto y muchas se han recomenzado de nuevo.

Entre 1948 y 1954 Stebbins y Whitford descubrieron en las nebulosas elípticas el efecto relativo a su índice de color que lleva su nombre y en el que se cifraron grandes esperanzas como base de un nuevo método de determinación de distancias. Las nebulosas extragalácticas, en efecto, se dividen en los dos grandes grupos de nebulosas *regulares*, en rotación más o menos simétrica alrededor de su condensación central, e *irregulares*, en que falta esta modalidad; y las regulares a su vez en las dos grandes familias de elípticas y espirales. En rigor se ha visto que todas ellas pueden ordenarse en un solo diagrama de forma de Y: el tronco estará formado por los distintos tipos de elípticas con las globulares en la base y las más achatadas cerca de la bifurcación y en cada uno de los dos brazos van las espirales normales y las barradas, con algunas de tipo menos definido entre ambas: la diferencia entre estas dos clases está en que en las normales, los brazos arrancan de los extremos opuestos de la condensación central y en las barradas de los de una especie de barra nebulosa que atraviesa dicha condensación; unas y otras constituyen secuencias bien definidas, desde tipos con núcleo central brillante y brazos estrechamente adheridos al mismo hasta tipos con núcleo insignificante y brazos muy abiertos en el caso de las normales y, en

el caso de las barradas, desde tipos parecidos a la letra griega θ hasta otros que recuerdan la S latina mayúscula. Todos los tipos aparecen mezclados en las distintas regiones del espacio y, en conjunto, predominan las elipsoidales, por más que al principio se hubiese creído lo contrario. En cuanto a las espirales, unas dos terceras partes son del tipo normal.

Lo que interesa en las nebulosas es evidentemente su magnitud bolométrica, deducida de su radiación total; pero el elemento directamente observado son las magnitudes fotográficas aparentes, consecuencia de la fracción de la radiación total recogida por la placa fotográfica. Para pasar de la una a la otra hay que introducir varias correcciones y, ante todo, tener en cuenta que, de resultas del corrimiento hacia el rojo, la porción del espectro fotografiada en las distintas nebulosas usando varios filtros no es siempre la misma: es, pues, preciso introducir una corrección para reducir las medidas a un patrón común y como las galaxias elípticas forman una clase mucho más homogénea que las espirales, para evaluar la corrección se ha establecido la curva de energía de una nebulosa elíptica de las cercanas, M 32, el satélite elipsoidal de la gran nebulosa de Andrómeda. Stebbins y Whitford estudiaron con gran precisión los espectros de gran número de galaxias elípticas y hallaron que las galaxias lejanas, aun después de corregido su espectro del índice de color exigido por el corrimiento de sus rayas hacia el rojo, seguían presentando un exceso de índice de color tanto mayor cuanto mayor era el corrimiento de sus rayas hacia el rojo, pudiendo llegar a ser la variación de color realmente observada hasta tres veces la que daba el cálculo a base del decalaje del espectro. En las nebulosas espirales, por el contrario, no se encontraba exceso alguno. Este efecto pareció proporcionar un nuevo método de evaluar las magnitudes absolutas y, por lo tanto, las distancias, a lo menos de las nebulosas elípticas, y, por cierto, mucho más seguro que el basado en los corrimientos de las rayas hacia el rojo por no apoyarse en valores absolutos, sino en relaciones de intensidad de las rayas, independientes de no pocas hipótesis subyacentes en los otros métodos de medida. Con todo, pronto surgió una doble dificultad; por una parte, medidas más precisas del espectro de M 32, realizadas en 1957, redujeron considerablemente el valor del exceso; y además se vio que la repartición espectral de la energía en M 32 no es seguro que pueda considerarse como característica de todas las nebulosas elípticas; más probable parece que la distribución típica es la de las elípticas más tenues que presentan un espectro distinto, relativamente más débil en el ultravioletado próximo, cuya sola forma puede probablemente bastar para explicar la variación del exceso de color con la distancia, cuando los espectros resultan corridos por efecto del decalaje hacia el rojo. Por lo demás, si el efecto es real, parece que su explicación estaría en que las nebulosas elipsoidales poseyeron antiguamente gigantes rojas cuya vida se ha comprobado que es corta; actualmente ya no las tienen y como carecen de materia interestelar, pues son nebulosas claras, no tienen reservas de material

con que producir otras nuevas; no obstante en las nebulosas lejanas seguimos viendo la luz que emitieron tales gigantes antes de extinguirse. En las espirales, por el contrario, la formación continúa de nuevas estrellas a partir de la materia interestelar que contienen, produce un estado estacionario de sus características espectrales globales. Esta explicación, por atractiva que resulte, entraña una seria dificultad y es que arroja automáticamente una duda sobre la constancia de las magnitudes absolutas y consiguientemente sobre los módulos de distancia hasta el presente establecidos. ¿Se habría sorteado Scyla para caer en Caribdis?

Como se ve, cada paso adelante supone hoy esfuerzos, precauciones y gastos incalculables; basta pensar en los gigantescos telescopios indispensables para tal trabajo. Pero los sudores no son vanos; cada vez se van conociendo con mayor precisión las profundidades del espacio y por ejemplo cada día se cuenta con más puntos seguros en la curva «corrimiento al rojo-luminosidad». En el verano de 1963 en su informe a la Asamblea de Hamburgo de la Unión Astronómica Internacional, comunicaba Lindblad, Presidente de la Comisión de Galaxias, que Baum había conseguido fijar tres nuevos puntos a base de 31 galaxias de tres enjambres que acusan velocidades de fuga de 12.800, 13.200 y 51.900 Km/seg y que estaba explorando la posibilidad de establecer una relación exacta entre los decajes al rojo y los diámetros aparentes.

Un hecho parece a todos bien establecido y es que hay una diferencia esencial entre el Universo estelar y el galáctico; aparte otras discrepancias, dos notas principales los diversifican: en tanto que los movimientos estelares son al azar, las nebulosas acusan el extraordinario fenómeno de una recesión proporcional a la distancia; en tanto que la densidad estelar disminuye hasta anularse a ciertas distancias, la de las nebulosas no presenta en ninguna dirección ni a ninguna distancia disminución alguna que nos pueda sugerir la proximidad de una frontera... ¿no parece ello inducirnos a concluir que el mundo de las nebulosas es en verdad el último fondo del Universo? De aquí el afán con que se quieren conocer sus características, tanto del conjunto, como de las nebulosas en particular, y en éstas de sus componentes las estrellas y la materia interestelar. Imposible dar de ello ni una somera idea; sería menester un curso completo de Astrofísica. Me limitaré, pues, a decir unas palabras sobre la masa de las nebulosas, por la importancia que para las diversas teorías cosmológicas tiene la densidad media de la materia en el espacio. En cuanto a cuestiones asimismo de importancia tales como la estructura interna y evolución de las galaxias y los tipos de población estelar con las cuestiones referentes a la fuente de energía de sus estrellas y su evolución y el origen y distribución cósmica de los elementos preciso será dejarlas de lado o tocarlas a lo más brevemente en el momento indispensable para el desarrollo de nuestro discurso.

6. LAS MASAS DE LAS NEBULOSAS Y DE LA MATERIA INTERGALÁCTICA

El cálculo de las masas de las nebulosas no es asunto fácil, pues los métodos basados en las leyes de Newton y Kepler, que se emplean para la obtención de las de los planetas y estrellas dobles, no son utilizables en este caso. En unas nebulosas en efecto las masas no están prácticamente concentradas en el centro, como en el sistema solar, y su campo gravitatorio es también distinto del de un sistema discoidal continuo dotado de un giro análogo al de una rueda de carro: cierto que los núcleos parecen girar de esta manera y en ellos la velocidad lineal en un punto es proporcional a su distancia al centro; pero en las regiones exteriores los estudios espectroscópicos ponen de manifiesto una rotación diferencial y la velocidad varía, disminuyendo rápidamente hacia el extremo del radio. Con todo, como estas velocidades son evidentemente consecuencia de la distribución de las masas en las galaxias, cabe también calcular éstas a partir de aquéllas, procurando obtener una repartición de la masa de acuerdo con la distribución del brillo y deducir de ella velocidades de rotación que luego se comparan con las observadas. Por este procedimiento encontró Hubble para la nebulosa de Andrómeda una masa equivalente a 3.500 millones de veces la solar; pero hoy día sabemos que sólo pudo observar las partes centrales. Cálculos modernos le asignan 140.000 y hasta 300.000 millones de masas solares; como la calculada para nuestra Vía Láctea oscila entre 100 y 200 mil millones de masas solares, se desvanecen las dificultades que provenían de encontrarnos habitando la mayor de las galaxias.

Otro modo de calcular la masa de las galaxias es considerar los movimientos individuales de los miembros de un enjambre y calcular la atracción necesaria para mantenerlos unidos y que el enjambre no se deshaga; de este modo se puede obtener la masa total y deducir luego la media de las componentes. Este método se aplicó por primera vez en 1936 a 32 galaxias del enjambre de Virgo, el más cercano al local, y resultaron masas del orden de $200 \times 10^9 \odot$; después de la corrección de Baade, un nuevo análisis de este enjambre lleva a masas cuatro veces mayores; en el más remoto de los enjambres de Coma Berenices la masa de una galaxia media resulta igual a $400 \times 10^9 \odot$. Todos estos cálculos suponen que los enjambres han alcanzado un estado estacionario, para lo que se requeriría un tiempo enorme; para el de Coma Berenices II unos 100.000 millones de años, es decir diez veces el tiempo que habría podido durar la actual evolución del Cosmos, de ser ciertos los valores del factor de Hubble últimamente encontrados.

Existen todavía procedimientos a base de las velocidades relativas de las galaxias dobles: éstos conducen a una división bastante marcada entre galaxias gigantes, de masa alrededor de $150 \times 10^9 \odot$ y galaxias enanas de masa alrededor de $5 \times 10^9 \odot$. Schwarzschild ha distinguido en las galaxias dobles entre las elípticas y las espirales

y asegura que en tales sistemas la masa media de las elípticas es $70 \times 10^9 \odot$.

Todos estos datos son interesantes, pero para formarse una idea de la masa total del Universo, no es posible olvidar la materia intergaláctica que de día en día se cree más abundante. Ya los recuentos de galaxias en las inmediaciones de ciertos enjambres presentan la anomalía de que al llegar a magnitudes más altas viene un momento en que el fondo del cielo se revela más rico en galaxias que el centro del enjambre; esto naturalmente no puede explicarse sino por la presencia de materia oscura en el interior del enjambre que oculta parte de las nebulosas del mismo; pero además las fotografías recientes han ido revelando la presencia entre las galaxias de grandes chorros de materia brillante que se escapan de ellas como efectos de marea; según Zwicky en cada placa de la gran cámara Schmid de Monte Palomar que sirve de piloto al gran telescopio de Hale y cuyo campo abarca 40° cuadrados, hasta la magnitud límite 18 se pueden contar una docena de sistemas dobles o triples con puentes de materia intergaláctica. A base de todos los datos hasta entonces disponibles calculó Oort en su comunicación al Symposium sobre la estructura y la evolución del Universo celebrado en Bruselas en 1958 que la densidad media de la materia teniendo en cuenta solas las galaxias se podía calcular en $3,1 \times 10^{-31}$ gr/cm³. La materia intergaláctica tenía que cambiar forzosamente este valor, pero su cómputo es difícil. Con todo teniendo en cuenta que en algunos enjambres ricos su ausencia es casi absoluta y que en cambio en otros, como el de Virgo, para llegar a la masa indicada por la aplicación al mismo del teorema de las fuerzas, la masa de la materia intergaláctica ha de superar 25 veces la de las galaxias, parece que un factor 10 no es un despropósito y que al menos de momento se puede considerar con gran probabilidad que la densidad total de la materia en el Universo es aproximadamente $3,1 \times 10^{-30}$ gr/cm³.

7. LA APORTACIÓN DE LA RADIOASTRONOMÍA

Imposible cerrar esta parte de nuestro trabajo sobre la manera cómo se han ido alejando las fronteras de nuestro Universo con movimiento cada vez más acelerado sin hacer una referencia a las informaciones que sobre el mundo de las nebulosas nos proporciona la Radioastronomía, tanto más cuanto que, aunque menos precisos, sus datos nos pueden traer noticia del estado actual del Cosmos a distancia varias veces mayores que el máximo alcance del gran telescopio de Monte Palomar. El gran inconveniente con que aquí se tropieza es la tendencia de las radiofuentes a solaparse y la dificultad de identificar las radiofuentes con las galaxias no menos que el peligro de tomar por radiofuentes de gran potencia, debilitadas solamente por su extraordinaria lejanía, radiofuentes de poca intensidad situadas en el interior de nuestra Vía Láctea o en sus inmediaciones; baste pensar en las discrepancias entre los dos primeros catálogos de

radiofuentes, de Cambridge y Sydney, y la consiguiente polémica entre Ryle y Mills y sus respectivos colaboradores. Ciertamente que muchas han desaparecido en los nuevos catálogos como el 3C de Cambridge y el del Instituto Tecnológico de California; pero, para vislumbrar el tipo de dificultad con que para la precisión de las medidas se tropieza, baste notar que para que la abertura de un radiotelescopio tuviese respecto de las longitudes de onda correspondientes a las frecuencias más habituales en dichos Catálogos la misma proporción que la del telescopio de Monte Palomar tiene respecto de las de las ondas visuales más largas, es decir, las rojas, debería ser del orden de decenas de millones de kilómetros (!). De aquí la necesidad de trabajar lo más posible sobre casos de identificación segura si se quiere evitar el riesgo de fallos lamentables. Volveremos sobre el particular al tratar de los tests radioastronómicos para discriminar modelos del Universo.

La primera radiofuente individual que se descubrió sobre el fondo continuo de emisión relativamente intensa del cielo fue la designada con el nombre de Cisne A por estar localizada en dicha constelación. Muy poco después en 1949 se consiguió identificar dos de las seis radiofuentes hasta entonces conocidas, las de Virgo A y Centauro A, con las dos galaxias NGC 4486 y 5128: era el primer éxito que hacía concebir las más lisonjeras esperanzas. Tres años más tarde las radiofuentes discretas pasaban ya de varios centenares y un estudio estadístico de su distribución en dirección e intensidad llevó a Mills a distribuir las en dos grandes grupos: unas más intensas, concentradas alrededor del plano fundamental de la Vía Láctea y pertenecientes con toda seguridad a ella, y otras por lo general más débiles e isotrópicamente distribuidas y que tanto podían ser extragalácticas lejanas como galácticas cercanas. Hoy día, conseguidas ya unas 140 identificaciones y de ellas 42 con precisión que llega en algunos casos a los segundos de arco, se tiene el convencimiento de que tales radiofuentes, si no en su totalidad, en su gran mayoría se identifican con nebulosas extragalácticas muy lejanas, pero preciso es confesar que, de un modo general, de seguridad absoluta todavía no puede hablarse. El golpe espectacular fue el hallazgo en 1954 por Baade y Minnowski de una de las galaxias más anormales precisamente en la posición exacta de Cisne A, la más intensa de las radiofuentes descubiertas: se trataba de una galaxia doble o por mejor decir de dos galaxias al parecer en colisión directa, con fuertes rayas de emisión y dispersión interna de velocidades de unos miles de kilómetros por segundo; las medidas del corrimiento al rojo de sus rayas le asignaban una distancia de unos 300 millones de años de luz y su emisión total en ondas de radio era del mismo orden que su emisión total en ondas luminosas.

Pero en cambio otros éxitos, que de momento conmovieron también a los astrónomos, han tardado más en consolidarse, lo cual por lo demás no se ha de lamentar, ya que gracias a ello se han realizado progresos inmensos tanto en métodos como en aparatos. El descubrimiento en 1951 de la raya de emisión de 21.1 cm del hidrógeno

atómico había resultado de importancia capital para el conocimiento de la estructura espiral y de los movimientos de nuestra Vía Láctea; por esto resultó también sensacional el descubrimiento en 1956 por Lilley y Mc Clain de la misma raya en la radiofuente del Cisne afectada de un corrimiento hacia el rojo que iba a permitir medidas de velocidades de recesión, que, si coincidían con las obtenidas por medios ópticos, iban a resultar de valor decisivo; pero cuatro años más tarde tuvieron que reconocer los dos investigadores que su hallazgo no era seguro ya que ni ellos ni otros conseguían obtener de nuevo tal raya en el espectro de Cisne A. Sólo en 1963 pudieron anunciar con seguridad su hallazgo, aunque esta vez en absorción, Robinson, Van Damme y Kohler en la nebulosa M87 del enjambre de Virgo; era la primera vez que se hallaba en un enjambre.

Como consecuencia de los trabajos de crítica y depuración de los datos contenidos en los Catálogos más recientes han podido llegar Mills y Bolton a la conclusión de que la mitad por lo menos de las radiofuentes contenidas en ellos están ciertamente asociadas a galaxias de magnitud superior a la 20.^a y todavía no identificadas; de las otras el 15 % se han podido identificar con nebulosas de brillo superior a la magnitud 17 y el resto son casos ambiguos. Entre las identificaciones más interesantes figura la realizada por Minkowski de la radiofuente 295 del Boyero del Catálogo 3C de Cambridge con una de las galaxias del enjambre más distante encontrado hasta ahora, el 1410 + 5224, en el que la velocidad de fuga llega a ser igual a 0,46c. Otras no menos importantes son las de las radiofuentes 3C 48, 147, 186, 273, 286, 15 B, 245 y MSH 14-121 con los llamados *quasares*, objetos ópticos de apariencia estelar; pero que son verdaderas galaxias, como lo prueba el hecho de que en ellos u llega a valer 0,16 y 0,37 y los movimientos propios del correspondiente, por ejemplo, a C273, no llegan a valer 0,003" por año. Posteriormente, es decir, en 1964 Matthews y Schmidt han hallado una velocidad de recesión igual a 0,54c en la galaxia identificada con la radiofuente 3C 147, que, por esto mismo, es hoy por hoy el más lejano de los cuerpos celestes cuya distancia se ha podido medir en alguna forma. Al tratar de los tests radioastronómicos volveremos sobre la importancia de este descubrimiento.

Si a base de las identificaciones establecidas con seguridad se quieren conocer las características de las radiogalaxias, hay que reconocer que no parecen constituir una clase homogénea de objetos y que las únicas características en que coinciden es la de ser galaxias gigantes, de magnitud absoluta — 20,8 y que las radiofuentes se extienden siempre sobre áreas más extensas que las fuentes luminosas, de ordinario unas tres veces más. En cambio la proporción de la emisión radio a la emisión luz varía en ellas de 10.000 a 1 y dentro de un mismo objeto puede resultar muy diversa la distribución de la intensidad de ambas emisiones. Asimismo sus formas son muy distintas. La mayoría de las últimamente identificadas por Mills y Bolton parecen ser galaxias elípticas de tipo E, o intermedias de tipo SO y

bastantes presentan rayas de emisión; pero hay también numerosos casos de colisiones de galaxias o de galaxias con chorro u otras particularidades, sin que falten tampoco algunas sin ninguna particularidad óptica. Los observatorios de Sydney, Parkes, Manchester, California, Nançay y Great Malvern se han esforzado por determinar sus diámetros mediante observaciones interferométricas; las dimensiones de los de las más intensas parecen ser del orden de unos 240.000 años de luz, aunque no falten otras muchos menores; y conviene notar en favor de tales medidas, que de ellas se deduce una función de luminosidad en buen acuerdo con la encontrada ópticamente. En cuanto a sus espectros en las radiofuentes más intensas se extienden de los 20 a los 10.000 Mc/seg.; y prescindiendo de las partes próximas a los 20 Mc/seg., que algunas veces muestran indicios de un crecimiento de forma simple, probablemente debido a H II en absorción, los espectros de las radiogalaxias quedan expresados dentro de la inseguridad experimental por una función exponencial. En muchas radiofuentes débiles el espectro es más restringido y según Whitfield el exponente puede variar de una galaxia a otra.

La más valiosa aportación de la Radioastronomía parece ser hasta ahora, fuera del descubrimiento de los cuasares, el haber permitido, merced a la raya de 21 cm. del H neutro, un conocimiento mucho más perfecto de la estructura de los brazos espirales de nuestra Vía Láctea y el haber llamado la atención sobre la existencia y frecuencia de las colisiones de galaxias, lo mismo que sobre galaxias unidas entre sí por puentes de materia fuertemente polarizada o dotadas simplemente de chorros de materia, constituidos por partículas con velocidades enormes, aceleradas en un campo magnético, es decir, en radiación sincrotónica. Todas estas observaciones y otras que cabría enumerar hacen barruntar la increíble liberación de energía que ha de tener lugar para que el núcleo de una galaxia emita radiación equivalente a cien veces la radiación normal de todas las estrellas juntas de una galaxia de las dimensiones de Andrómeda... Al mismo tiempo inmensas cantidades de materia y partículas de energía elevadísima son eyectadas produciendo los efectos tan diversos que se observan. Es evidente que estamos en presencia de un nuevo mecanismo de una potencia tremenda. Y lo extraordinario es que todos los indicios son de que una parte importante de los varios miles de radiofuentes individuales conocidas son galaxias sometidas a explosiones gigantes de este tipo.

8. LA IMAGEN DE CONJUNTO DEL UNIVERSO

¿Cuál es, pues, en breves palabras el aspecto de conjunto de nuestro Universo? En cualquier dirección que profundicemos en las lejanías con los modernos métodos de observación, más allá de los cientos de miles de millones de estrellas que constituyen nuestra Vía Láctea, encontramos el espacio poblado por una multitud aparentemente innumerable de nebulosas extragalácticas organizadas, las más,

en enjambres y quién sabe si éstas a su vez en superenjambres, extendiéndose sin interrupción hasta distancias cuyo límite no se vislumbra y apartándose, al parecer, de nosotros con velocidades proporcionales a su distancia y que se acercan, cada vez más, a la de la luz. Aunque para las magnitudes menos elevadas, reveladoras de astros más próximos, haya en esta distribución alguna disimetría, fruto de hallarnos en las cercanías de algún enjambre especialmente copioso, en llegando a la magnitud 19 y hasta el límite actual de percepción ($m = 23$) toda heterogeneidad en la distribución desaparece. 500 millones de galaxias entran en nuestros recuentos y con estos números tan grandes —como dice Couderc— «la homogeneidad de la población del espacio adquiere ya valor significativo. Macroscópicamente la distribución de las galaxias se nos presenta como uniforme, lo mismo en dirección que en profundidad. Ninguna desviación significativa... nos permite creer que en alguna dirección nos aproximamos a un centro de acumulación o por el contrario al borde del sistema. La imagen más apropiada todavía es la de un espacio euclidiano poblado regularmente de galaxias, con desigualdades de detalle, eso sí, pero homogéneo en conjunto». Es en rigor la primitiva sugestión newtoniana, pero con galaxias en lugar de estrellas. Naturalmente esta concepción ha sido y sigue siendo muy discutida, como veremos bien pronto en la continuación de nuestro trabajo; pero como imagen inicial sobre la que apoyar los postulados de homogeneidad e isotropía y los principios cosmológicos que todas las Cosmologías postulan más o menos explícitamente en sus comienzos, la podemos ciertamente admitir; lo que en otras palabras equivale a decir que podemos tomar la parte del Universo en que nos hallamos como *típica* y representativa del conjunto. Y lo que en ella vemos no presenta ni sombra de monotonía y falta de vitalidad; por el contrario, tanto las galaxias como las estrellas que las integran, aparecen de tipos variadísimos y sometidos a incesantes procesos de formación, evolución y disociación. Toda la Astrofísica y sus múltiples ramas son de ello la mejor prueba. En este conjunto de cuerpos celestes se halla una nebulosa, la Vía Láctea, que hace tiempo se sabe no es ninguna nebulosa excepcional, como al principio se había imaginado; y en ella, entre sus cientos de miles de millones de estrellas, un astro, el Sol, alrededor del cual gravita un planeta en el que habita el Hombre que intenta explicarse todo este mecanismo.

Poincaré se preguntaba si se podría hallar la solución al tener suficientes datos; yo me atrevería a decir que de cuantos más datos se disponga más difícil será la solución. Por eso el haberse lanzado, desde ahora, a formular una y el esforzarse por perfeccionarla de día en día, si bien por un lado puede ser tildado de audacia, revela quizás por otro prudencia y sabiduría: Kepier halló sus leyes gracias a lo imperfecto de las observaciones de su tiempo; con observaciones de la precisión moderna quizás jamás las habría descubierto. No sé si es de esperar que en un futuro próximo, algún descubrimiento inesperado haga dar a los conocimientos astronómicos un nuevo salto com-

parable al que nos ha llevado de los límites de la Vía Láctea a los actuales confines del Universo, si confines cabe llamar a lo que está alejándose de día en día; tal vez la Radioastronomía, al mejorarse sus instrumentos, y aún mejor las observaciones del cielo desde satélites artificiales y quién sabe si desde otros astros, nos depare una de tales sorpresas. Pero aunque ello fuese así, no estarían menos justificados los esfuerzos ya realizados para explicar el mecanismo del Cosmos, máxime que algunos de ellos pueden servir y en la práctica han servido para promover y alentar orientaciones de la observación. El temor de errar no ha de detener al investigador; solamente hacerlo más atento para enmendar el yerro dondequiera que se advierta; lo contrario llevaría al inmovilismo. Decía un gran pensador que a la par era un gran realizador, al que muchos de vosotros conocisteis, el P. Pérez del Pulgar, que cuando una cosa merece ser hecha, vale la pena de hacerla, aunque sea preciso al principio contentarse con realizaciones imperfectas; por aproximaciones sucesivas se podrá llegar a la perfección. Atenerse a la disyuntiva entre la realización perfecta desde el primer ensayo o la abstención absoluta, so capa de prudencia, es las más de las veces esterilizante; pues sólo en las fábulas mitológicas nace Minerva de un golpe, armada de todas armas, de la cabeza de Júpiter...

II PARTE

LAS TEORIAS COSMOLOGICAS

1. CONCEPTO DE LA COSMOLOGÍA

En lo que antecede hemos procurado trazar una imagen del Universo tal como aparece a nuestra vista. Y lógicamente, suscitadas por ella, se presentan en tropel a nuestra mente un gran número de cuestiones. ¿Hasta dónde se extiende el Cosmos? ¿es lógico esperar que al aumentarse la potencia de los telescopios y los radiotelescopios el número de los enjambres de galaxias siga aumentando indefinidamente? ¿o se va a llegar a una frontera más allá de la cual no encontremos ya otras? Y en caso de que así ocurra ¿podemos pensar que los enjambres de nebulosas son el último trasfondo del Cosmos? ¿o bien cabe sospechar que todo cuanto vemos no constituye sino un superenjambre de galaxias y que más allá de un vacío, ulterior a la última frontera de nuestro Universo, existen otro u otros en todo comparables a él? Pero ¿este vacío, más allá de tal frontera, existe realmente o es un simple juego de nuestra imaginación? Y no es eso todo. El mismo mundo que contemplamos ¿cómo es en realidad? Pues naturalmente, dado que sólo lo conocemos a través de la luz y las ondas hertzianas y que la velocidad de éstas es finita, los datos que poseemos y que se presentan a nuestra consideración como simultáneos, corresponden a épocas totalmente diversas: el enjambre de galaxias que vemos a mil millones de años de luz de distancia estaba allí ubicado en el momento de la emisión de esta luz hace mil millones de años, pero ¿dónde está ahora de hecho? ¿sigue siendo tal enjambre, o se ha descompuesto en varios parciales? ¿No se habrán quizás formado otros entre tanto en sus inmediaciones? ¿Podemos, pues, llegar a formarnos una imagen adecuada del Universo, a trazar su mapa tal como es en un momento dado? Y si la expansión del Universo es real y la velocidad de recesión de las galaxias crece proporcionalmente a su distancia, del mismo modo que se cree haber ya encontrado velocidades de fuga del orden de la mitad de la velocidad de la luz, se encuentran en el futuro, como parece ser posible con los medios radioastronómicos actuales, velocidades de recesión equivalentes a los $\frac{4}{5}$ de la de la luz y aun quizás un día iguales a

la misma, ¿qué ha de ocurrir con estas galaxias? Y si así es ¿qué pensar de otras galaxias tal vez escapadas definitivamente a toda posibilidad de ser observadas por nosotros? ¿Se pueden o deben seguir considerando como partes integrantes del Universo?, iba a decir: de «nuestro Universo»; pero preciso es corregirse, pues si se trata del Universo, es decir, del todo, ¿qué sentido puede tener «nuestro Universo» como contradistinguiéndolo de algo que existiese y no formase parte de él?

Como se ve, el problema cosmológico es sumamente complejo y quizás lo primero que hay que hacer al abordarlo es comenzar por definir qué entendemos por Universo y cuál es el objetivo concreto que nos proponemos en nuestra investigación.

No hay unanimidad en la definición del primero: unos entienden por tal el máximo grupo de objetos a los que se pueden aplicar nuestras leyes físicas, es decir, las leyes que hemos deducido del estudio de la materia a nuestro alrededor; en cambio para otros es el máximo grupo de objetos con significación física, seanles o no aplicables las leyes de nuestros micro y macrocosmos, pues no hay que olvidar que existen propiedades de la materia que sólo a gran escala se manifiestan, por ejemplo la gravitación, que evidentemente ha de afectar también a lo infinitamente pequeño, pero lo hace en tal forma que no se nota y, por lo tanto, no es imposible que a escala grandísima aparezcan leyes que ni siquiera a escala de la Vía Láctea se manifiestan, por ejemplo, la repulsión cósmica. Pero enseguida cabe preguntar si cuando decimos objetos «con significación física», nos referimos a todo absolutamente cuanto existe o nos hemos de reducir a cuanto de una manera u otra, directa o indirectamente, puede ser objeto de observación.

A nuestro juicio habría que distinguir quizás entre cuanto existe, y esto sería *el Universo*, y cuanto de una manera u otra nos puede afectar, y esto sería *nuestro Universo*: evidentemente sólo este último puede ser objeto directo de nuestro estudio; respecto del otro podemos sin duda emitir también algunas afirmaciones, basadas en deducciones o analogías, pero difícilmente lo podemos considerar objeto de la Cosmología, considerada como parte de la Física o Ciencia de ella derivada, a no ser que pensemos en aquellas partes del Cosmos que en algún tiempo han podido formar parte de nuestro Universo e influir en las demás, aunque luego hayan quedado definitivamente separadas del mismo, por ejemplo, galaxias cuya velocidad de fuga haya rebasado la de la luz, supuesto que contra el postulado einsteiniano, ambas velocidades se compusieran. En todo caso, si son objeto de la Cosmología si la entendemos en el sentido escolástico, como emparentada con la Metafísica. Si nos limitamos a nuestro Universo, nos hemos de preguntar todavía si se comporta como un todo, obedeciendo a determinadas leyes, o no es sino un conglomerado de objetos, coexistentes, pero inconexos en su comportamiento entre sí.

La dificultad de este estudio es muy grande, pues incluso es difícil ver qué se quiere decir cuando uno se pregunta si el Universo

obedece a ciertas leyes, pues la deducción del contenido de cada ley en Física supone el estudio de casos particulares y la abstracción de los caracteres comunes a que todos ellos obedecen y que nos permitirán formular la ley; pero ¿qué ley cabe abstraer cuando el objeto que se considera es único?, y es evidente que, tanto si se trata de cuanto existe, como de cuanto podemos observar, el Universo que considramos es por naturaleza único; si hubiese dos, ninguno de ellos sería «el Universo», ni siquiera «un Universo». Y además, supuesto que forzosamente cuanto vemos corresponde a épocas muy diferentes, es imposible pensar en el comportamiento del Universo como un todo sin prestar atención a su posible evolución con el tiempo y consiguientemente a su origen y, por lo tanto, a los conceptos de tiempo y espacio con él tan íntimamente ligados.

Bondi cree que preocuparse de cómo es el Universo actual es un problema secundario; que lo primario es estudiar qué entraña el concepto de Universo y ver cuantas soluciones teóricas se le podrían dar. Nos parece mucho más acertado el punto de vista de McCrea cuando afirma que el objeto de la Cosmología es producir un modelo teórico de Universo, cuyo comportamiento reproduzca lo más posible el de nuestro Universo tal como lo vemos. Creemos que acierta; la Cosmología es una ciencia del tipo de la Heliofísica o la Geofísica en que no tanto queremos ver cómo puede ser el Sol o un planeta, cuanto cómo de hecho son nuestro Sol o la Tierra; y si en ellas pergeñamos «modelos», no es por los modelos mismos, sino para encontrar uno cuyo comportamiento reproduzca y, por tanto, explique los fenómenos que observamos en el Sol o en nuestro Globo.

Creo, pues, que podemos afirmar que el objeto de la Cosmología es el estudio de nuestro Universo como un todo o, por mejor decir, de cuantos objetos cósmicos conocemos, en cuanto los consideramos como partes integrantes de un todo, a fin de ver si podemos llegar a deducir cuáles son las leyes a que, en su conjunto, obedecen y si de ellas podemos deducir su estructura actual y sus modificaciones con el tiempo, lo que vale tanto como decir su origen y evolución.

Al querer construir un modelo de Universo capaz de dar razón de las particularidades del que habitamos, tropezamos desde el principio con un problema de método, pues es evidente que por la unicidad del objeto no se puede aplicar aquí el método inductivo habitual de la Física; ni cabe la experimentación en el laboratorio en el sentido propio de la palabra ni aun siquiera la predicción de los fenómenos que se han de realizar, como puede hacerse en el caso de la gravitación; a lo más se puede predecir lo que ha de haber ocurrido y consiguientemente los datos que nos ha de dar la observación, ya que en el caso de que efectivamente se comprueben, será señal evidente de que en la construcción del Cosmos se ha ajustado la Naturaleza a las leyes o principios o, si se quiere, al modelo de Universo en que tal predicción del pasado se apoya.

Ahora bien a la construcción de tal modelo se puede llegar por dos vías diferentes: una, partiendo de las leyes físicas que rigen los

fenómenos en nuestro entorno, ir las extendiendo a dominios cada vez más extensos, hasta llegar a aplicarlas a todo el Universo; es un método de generalización y extrapolación, en el que hay que tomar todo género de precauciones por el peligro que entraña el querer extender las leyes a objetos enormemente distantes, máxima dado que no siempre los fenómenos en gran escala son consecuencia de los pequeños, y como en el microcosmos también en el macrocosmos puede haber discontinuidades. La otra vía, inversa de la primera, consiste en buscar algunos principios generales de los que se deduzcan modelos de Universo en que nuestras leyes físicas se cumplan y aun se puedan basar; es un procedimiento deductivo, en el que está más o menos implícita la idea de que el Universo a gran escala ha de ser sencillo, como otros sostienen que ha de ser también simple la materia a escala suficientemente pequeña, y que la complicación es algo propio del escalón intermedio en que nos encontramos. En la práctica muchos siguen una línea intermedia y establecidos algunos principios y postulados fundamentales, buscan la manera de construir modelos generalizando a la vez leyes conocidas; en todo lo cual, como veremos, se presentan grandes discrepancias.

Con todo, el que así ocurra no puede menos de beneficiar la investigación, pues demasiada conformidad rara vez llevará a progresos de importancia. Sea cual sea el método que se emplee, todos están de acuerdo en el principio de que hay que economizar hipótesis y evitar, sobre todo, la multiplicación de postulados *ad hoc*: es lo que los escolásticos expresaban con su célebre éfato *non sunt multiplicanda entia sine necessitate*; pero también en esto cabe pecar por exceso de precaución y temer que sea introducir una nueva hipótesis lo que en el fondo no es sino reemplazar una hipótesis por otra; así cuando en la teoría del estado estacionario se postula la creación continua de la materia, en rigor no se hace otra cosa que sustituir por ella el principio de Lavoisier de la conservación de la misma materia, que en el fondo es tan hipotético y tan postulado como el nuevo que se introduce; sólo que a fuerza de repetirlo se ha acabado por mirarlo como un hecho de experimentación, cuando en su origen no era sino una hipótesis de trabajo. Este peligro de tomar como cosas comprobadas simples afirmaciones hipotéticas a las que uno se ha acostumbrado, es un peligro contra el que hay que precaverse, cualquiera que sea el método empleado. Por lo demás es claro que en todos ellos se admite como punto de partida un cierto número de hipótesis comunes, que citaremos en primer lugar.

2. LOS PRINCIPIOS COSMOLÓGICOS

Salvo caso de decirse explícitamente lo contrario, todas las teorías cosmológicas están acordes en considerar el espacio como homogéneo e isótropo, es decir, que en él todos los lugares y direcciones equivalen, sin que haya ningún lugar o dirección preferente. Pero además admiten asimismo prácticamente todos por lo menos el Principio

Cosmológico, según el cual, una vez se prescinde de las irregularidades locales, en un momento dado, el Universo ha de ofrecer el mismo aspecto a todos los observadores posibles, sea cual fuere el lugar en que se encontraren; por eso se suele enunciar también el Principio Cosmológico estableciendo la equivalencia de todos los observadores fundamentales, es decir, de los observadores indisolublemente unidos a alguna de las partículas del fluido uniforme en que se considera convertida toda la materia del Universo. Es interesante observar que la primera formulación de este Principio se debe al célebre Cardenal Nicolás de Cusa, Regiomontanus, el cual, a mediados del siglo xv describió el Universo como «una esfera con su centro en todas partes y sus circunferencias en ninguna». La frase se encuentra ya dos siglos antes en el pseudo-Hermético *Libro de los XXIV Filósofos*, como definición de la Divinidad. Lo notable de Regiomontano fue trasladar el concepto al Universo. La idea no tardó en esfumarse y Kepler, entre otros, colocaba el centro del Universo en el Sol; con todo, no faltaron quienes la recordasen de tiempo en tiempo y entre ellos Giordano Bruno que la defendió con entusiasmo y ya casi en nuestros mismos términos: en una carta a Tomás Hariot, de 21 de junio de 1610, le atribuye Sir Guillermo Laver a Giordano Bruno, particularmente, la opinión de que «colocado el ojo en cualquier parte del Universo, la apariencia sería siempre la misma que para nosotros aquí».

No sé si el Principio Cosmológico podrá parecer a alguno sorprendente. De hecho fijémonos que lo están admitiendo implícitamente todos los físicos y químicos, cuando postulan la posibilidad de repetir cuantas veces convenga en el laboratorio un experimento en idénticas condiciones; aun suponiendo que se trate del mismo local, por lo menos su ubicación espacial ha cambiado considerablemente dada la velocidad de la Tierra en su revolución alrededor del Sol, de éste en su movimiento propio y arrastrado por la rotación de la Vía Láctea, y de ésta en el pequeño enjambre de nebulosas que constituyen el Grupo Local, etc. Al postularse la posibilidad de repetición de los experimentos se afirma implícitamente que todas las ubicaciones en el espacio se comportan del mismo modo. Además el Principio Cosmológico fluye fácilmente del aserto copernicano de que la Tierra no ocupa una posición privilegiada; de aquí a afirmar que ocupa una posición típica hay sólo un paso; pues si a la afirmación de Copérnico se añade el hecho evidente de observación de que el Universo a nuestro alrededor nos parece tener simetría esférica, se ve sin más, intuitivamente, (y en 1944 Walker lo probó rigurosamente) que, como un Universo heterogéneo sólo podría parecer esféricamente simétrico a observadores en posiciones especiales, si no estamos en tal posición y el Universo se nos presenta esféricamente simétrico e isótropo, ha de ser forzosamente homogéneo u equivalente para todos los observadores. Finalmente es claro que el Principio Cosmológico está perfectamente de acuerdo con el postulado de simplicidad y que en nuestra ignorancia del estado real del Universo es mucho más fácil

progresar postulando, aunque no sea sino como hipótesis de trabajo, que el Universo en gran escala es lo más simple posible y, por tanto, uniforme.

Hasta tal punto el Principio Cosmológico parece justificado que no es fácil imaginar que el Universo en conjunto no sea homogéneo e isótropo; ciertamente se han formulado otras hipótesis y en el curso de nuestros trabajos nos ocuparemos también de universos más o menos heterogéneos; pero preciso es reconocer que entonces hay que suplir la homogeneidad e isotropía con otras hipótesis que resultan bastante artificiales. Por lo demás la homogeneidad e isotropía no exige de manera absoluta que toda la materia del Universo se considere pulverizada y reducida a un substrato homogéneo: un Universo jerarquizado como el de Charlier, con estrellas agrupadas en nebulosas, éstas en enjambres, éstos de superenjambres de primer orden, éstos en otros de segundo y así sucesivamente, también sería en cierto sentido homogéneo e isótropo y el Principio Cosmológico se podría ser satisfecho en él. Hemos dicho anteriormente que prácticamente todas las Cosmologías admiten *por lo menos* el Principio Cosmológico, porque el grupo de las Cosmologías del estado estacionario no se contentan con él y postulan el Principio Cosmológico Perfecto, según el cual el que el Universo tenga que ofrecer el mismo aspecto a todos los observadores posibles se ha de verificar *siempre*, es decir, que se postula la perfecta equivalencia de los observadores, no sólo respecto del espacio, sino también respecto del tiempo.

En cuanto a otros postulados o hipótesis relativos a la manera de considerar el espacio, el tiempo, la inercia, etc., varían naturalmente en cada caso y será más sencillo y claro exponerlos al tratar las diversas teorías o, por mejor decir, los distintos modelos de Universo que a base de tales teorías se han elaborado.

3. COSMOLOGÍAS PRERRELATIVISTAS

Como ya se ha indicado anteriormente, la primera tentativa de explicación del conjunto del Universo fue formulada por Newton en 1692, en la primera de sus *Four Letters to Bentley*. Creyó que su teoría de la gravitación entrañaba como consecuencia necesaria que las estrellas tenían que existir en número infinito y estar uniformemente distribuidas en un espacio infinito también. «Me parece —escribía— que si la materia de nuestro Sol y de los planetas y toda la materia del Universo está igualmente dispersada por todos los cielos y el espacio entero en que esta materia está diseminada es finito, como toda partícula experimenta una gravedad natural respecto de todo el resto, la materia situada hacia el exterior de este espacio se dirigirá por la gravedad hacia la situada en lo interior y acabará por caer en el centro del espacio entero y formar allí una gran masa esférica. Pero si está igualmente dispersada en toda la extensión de un espacio infinito, no podrá nunca juntarse en una sola masa, sino que una parte se condensará en una masa y otra en otras, constituyendo

así un número infinito de grandes masas dispersas, a gran distancia unas de otras por toda la infinitud del espacio». No hay que olvidar que para Newton todas estas estrellas estaban en reposo unas respecto de otras o poseían, a lo más, movimientos relativos despreciables y que su brillo era prácticamente invariable, es decir, se mantenía en promedio en el mismo en el decurso del tiempo.

La primera impugnación de la posibilidad de esta explicación vino de una parte enteramente inesperada; fue la célebre paradoja de Olbers, que éste formuló en 1826, basada en un fenómeno tan vulgar como es la oscuridad del cielo nocturno. Probó en efecto que, si se adoptaba la distribución espacial de las estrellas propuesta por Newton y se consideraba el espacio como una esfera de radio infinito con centro en el observador, se podría suponer ésta dividida en una serie de capas concéntricas de radio creciente y espesor constante; el número de estrellas de cada capa sería naturalmente igual a su volumen por el número medio de estrellas por unidad de volumen y el flujo luminoso del conjunto de las estrellas de cada capa recibido en una superficie de 1 cm^2 , situada en el centro de la esfera, debería ser el producto del número de tales estrellas por su luminosidad media dividido por el cuadrado de su distancia al centro. Ahora bien, al verificar las operaciones se ve que esta cantidad es una constante independiente del radio de la capa y que, por lo tanto, si éstas se suceden en número infinito, la luz total recibida en la superficie central supuesta deberá ser también infinita; y bien claro está que no es así. El mismo Olbers intentó zafarse de la dificultad imaginando un gas tenuísimo y por lo mismo no observado hasta ahora, que absorbiese la mayor parte de la radiación durante su trayecto de la estrella a nosotros. Pero ¿cómo evitar que la energía absorbida llegase a calentar el gas hasta ponerlo incandescente, con lo que la dificultad seguía en pie, simplemente trasladada de sitio? Hoy día se sabe que la solución la puede dar el corrimiento hacia el rojo de las rayas del espectro, cualquiera que sea su origen; pero en 1826 tal explicación era inconcebible y de resultas durante casi cien años la paradoja de Olbers fue la cruz de los cosmólogos.

A fines de siglo Neumann y Seeliger llegaron al mismo resultado negativo por un camino enteramente diverso. Ambos trataron de explicar la estructura del Universo por la ley de la gravitación newtoniana, tomando como postulados de base que la materia uniformemente distribuida por el espacio tiene una densidad no nula y que además puede considerarse en reposo, mirándose como despreciables sus movimientos al azar. Llegaron a una ecuación del movimiento que no admite solución alguna en el caso de cumplirse las dos condiciones previstas. Suponer nula la densidad no parecía una solución viable, pues equivalía a suprimir la materia y con ella el Universo que se trataba de explicar; pero no debería haber ocurrido lo mismo con la hipótesis de la ausencia de movimientos sistemáticos. Sin embargo, como a fines del siglo pasado no se pensaba en tal cosa, Neumann y Seeliger buscaron una solución mediante la introducción en

la expresión de la fuerza del campo gravitatorio newtoniano de un término proporcional a la distancia e independiente de la densidad que sólo dejaría sentir su influencia a distancias cósmicas, siendo enteramente inapreciable a las distancias del sistema planetario o de la Vía Láctea. Era una solución precursora de la adoptada más tarde por Einstein al introducir en sus ecuaciones de campo el término cosmológico; pero entonces todavía pareció un *deus ex machina* más violento que la λ einsteiniana. Consiguientemente la tentativa de Neumann y Seeliger pareció no haber conducido a otro resultado que haber confirmado la insuficiencia de la ley de la gravitación de Newton para explicar el Cosmos.

Sólo en 1921 logró Charlier un resultado positivo explotando la idea formulada en 1761 por Lambert en sus *Kosmologische Briefe*, en que se imaginaba el Universo constituido por una serie ascendente de sistemas cada vez mayores de astros y tales que cada uno estuviese animado de un movimiento de revolución en el sistema de orden superior. Supuesto que cada N_1 estrellas constituyan una galaxia G_1 de radio R_1 y masa M_1 y cada N_2 galaxias G_1 una supergalaxia G_2 de radio R_2 y masa M_2 y así sucesivamente, con lo que, naturalmente, la masa M_{i+1} y la luminosidad L_{i+1} de un sistema de orden $i + 1$ es igual al producto de la masa y luminosidad M_i y L_i de los sistemas de orden i por el número N_{i+1} de éstos que integran el sistema considerado, demostró Charlier que, tanto si se supone el observador en el centro como en el borde de todo este sistema de galaxias o en otro punto cualquiera, la luz que recibirá será siempre finita con tal que la razón de los volúmenes de las galaxias de órdenes sucesivos aumente más deprisa que la de sus masas, pues entonces la densidad media de la materia y radiación decrecen rápidamente. Por igual camino resolvió la dificultad con que había tropezado Seeliger de que en un Universo infinitamente extenso de masa infinita, como había imaginado Newton, supuesta la validez estricta de la ley de la gravitación universal, la intensidad del campo gravitatorio en una esfera de radio creciente tenía que crecer con el radio y como el centro de tal esfera podría suponerse en cualquier parte, el potencial debería ser infinito en todas, resultando por tanto la fuerza de atracción, igual al gradiente del potencial, totalmente indeterminada.

La solución de Charlier mereció poca atención en su tiempo; llegaba simplemente demasiado tarde. En aquel momento Einstein había ya dado a conocer su teoría de la Relatividad General y los modelos de Universo basados en su teoría de la gravitación, polarizaban la atención de los estudiosos. Además se habían medido las primeras velocidades radiales de nebulosas extragalácticas y nada había que hiciese verosímil la hipótesis subordinacionista. Hoy las ideas cosmológicas de Einstein, aunque siempre muy estimadas como punto de partida de todas las investigaciones cosmológicas actuales, son rechazadas o por lo menos discutidas en no pocos puntos; en cuanto a la subordinación de sistemas de galaxias y supergalaxias piensa

Vaucouleurs, como ya hemos visto, que nuestro Grupo Local no es sino parte de un superenjambre de enjambres con centro en Virgo... Quizás, pues, no sea aventurado pensar que algunos de los puntos de vista de Charlier podrían alcanzarse, con el tiempo, la boga que no consiguieron al ser publicados.

4. LA LEY EINSTEINIANA DE LA GRAVITACIÓN

En 1915 había dado a conocer Einstein su teoría de la gravitación, deducida, o aun mejor diríamos, identificada con su teoría de la Relatividad Generalizada. Pronto se vio que, integradas en primera aproximación, sus célebres ecuaciones de campo llevaban como caso límite a los mismos resultados que las newtonianas, con lo que la teoría gravitatoria de Newton aparecía como un caso particular de la mucho más general de Einstein y ésta se apuntaba en su haber todos los éxitos de la primera en el campo de la Mecánica Celeste; si a ello se añade que a tal resultado se había llegado con sólo aplicar el principio de covariancia universal al hecho de experiencia de que siempre y en todas partes la masa gravitatoria y la masa inerte valían lo mismo y que además se conseguía explicar con la nueva teoría la predicción del corrimiento hacia el rojo de las rayas del espectro de ciertas estrellas, la flexión de los rayos luminosos por el campo gravitatorio solar y la precesión secular del perihelio de Mercurio, fenómenos de que la teoría clásica no había podido llegar a dar razón satisfactoria, no es de maravillar que se la considerase enseguida como la teoría gravitatoria más perfecta y la mejor representación a escala macroscópica de las propiedades locales del Universo. ¿No era, pues, lógico que se la tomase también como punto de partida al querer buscar el esquema general del mismo, que con la teoría de Newton no se había podido conseguir? Esto es lo que comenzó a hacer el mismo Einstein ya desde 1916.

Sabido es que una partícula material en movimiento, abandonada a sí misma en una región galileana del espacio donde no exista ningún campo electromagnético ni gravitatorio, describe una línea recta o, por mejor decir, una geodésica o línea de mínima distancia que, si se trata de un espacio euclidiano, euclideo o pseudo-euclideo, será una recta. La órbita que un astro, planeta, cometa o simple astrolito, describe alrededor del Sol se mira en la teoría de Newton como resultado de la composición del movimiento libre inicial de dicha partícula con el que le imprime la fuerza atractiva central ejercida sobre ella por el Sol, o, si se prefiere, como consecuencia del campo gravitatorio que crea en el espacio circundante la masa solar y en el que la partícula considerada está sumergida. Para Einstein la trayectoria es simplemente el movimiento de la partícula (trátase de un planeta o de un astrolito) en libertad en una región de su espacio, el cual es de tal índole que las geodésicas que tales partículas espontáneamente describirán son de tal forma que traducen las órbitas planetarias. Como se ve, es una geometrización de la gravitación, que

quizás a primera vista se le antoje a alguno simple juego matemático de hallar variedades geométricas cuyas geodésicas coincidan con las curvas que interesan; pero, bien mirado, hay en ello algo mucho más profundo, a saber, el dejar explicado por qué, si se dejan libres en el vacío y en la superficie de la Tierra cuerpos tan heterogéneos como un kilogramo de platino, una bola de plomo y una pluma, caen todos con la misma aceleración y, si las condiciones iniciales son las mismas, describen la misma trayectoria; este problema, verdadero enigma en la teoría clásica, queda aquí fácilmente aclarado.

Explicar cómo llegó Einstein a este concepto de la gravitación equivaldría a exponer todo el proceso de gestación de su teoría de la Relatividad General, lo cual excede evidentemente los límites de nuestro cometido. Algo diremos con todo, en particular sobre el papel que en sus ideas desempeñaron su concepción del espacio y el tiempo, por el continuo uso que de tales conceptos tendremos que hacer, no sólo al exponer sus teorías cosmológicas, sino también las de Milne, Bondi y Hoyle entre otros, máxime que no se trata de ideas que nos sean en cierto modo connaturales, como las del tiempo y espacio absolutos de Galileo y Newton, y es por tanto sumamente conveniente recordar lo que por ellas se entiende para facilitar a los no familiarizados con la materia la inteligencia de cuanto sigue.

Una vez establecida en la Relatividad Espacial la equivalencia de los sistemas de referencia inerciales que se encuentran entre sí en movimiento relativo rectilíneo uniforme, se vio que no era indispensable esta restricción y que se podía extender la equivalencia a sistemas de referencia en movimiento relativo acelerado cualquiera. Merced a su célebre ejemplo del hombre que experimenta la intensidad de la gravedad en el interior de un ascensor situado en una región del espacio, en que no hubiese campo alguno gravitatorio creado por cuerpos exteriores, probó Einstein que, tanto si se rompía el cable como si con él se ejercía una tracción constante que imprimiese a ascensor y observador un movimiento uniformemente acelerado, dependería de la situación del sistema de referencia y del observador poder apreciar la realidad o creerse en un campo gravitatorio uniforme parecido al terrestre. Resultaba, pues, relativa la noción de fuerza gravitatoria y que toda pequeña región de un campo gravitatorio en que los cuerpos caen con una aceleración g se comporta como un sistema que se mueve con un movimiento uniformemente acelerado con aceleración g respecto de otro sistema inercial dado. Por otra parte, como según la Relatividad restringida cada observador tiene su espacio y tiempo propios, la única manera de unificar los acontecimientos en el Universo había sido acudir al llamado espacio-tiempo de Minkowski, variedad geométrica plana pseudo-euclídea de cuatro dimensiones, en que cada punto o *suceso* quedaba determinado por la coordenada temporal t , que llamaremos x^0 , y por las tres coordenadas espaciales euclídeas x , y , z , que llamaremos x^i ($i, k, l, \dots = 1, 2, 3$) y por razones de homogeneidad escribiremos ordinariamente divididas por la velocidad de la luz c , es decir expresadas en años de luz. No

nos detendremos en la consideración del espacio-tiempo de Minkowski porque propiamente no se pretendió con él solución alguna del problema cosmológico; pero sí haremos notar el papel destacado que desempeñó como preparación para la geometría de la parte espacial de la concepción einsteiniana del Cosmos. Lo característico del espacio-tiempo de Minkowski es que si x^i, y^i ($i, x, \lambda \dots = 0, 1, 2, 3$) son las coordenadas de dos sucesos cualesquiera en el sistema de referencia de un observador, la cantidad

$$s^2 = (x^0 - y^0)^2 - \frac{(x^1 - y^1)^2 + (x^2 - y^2)^2 + (x^3 - y^3)^2}{c^2}$$

es un invariante, es decir que si otro observador ha de asignar al mismo suceso en su sistema respectivo otras coordenadas y calcula s^2 , el valor que hallará será el mismo. Si en vez de sucesos cualesquiera se trata de sucesos muy próximos, se tendrá

$$\begin{aligned} ds^2 &= (dx^0)^2 - \frac{(dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2}{c^2} = \\ &= \sum_{i=0}^3 \sum_{z=0}^3 \gamma_{i:z} dx^i dx^z = \gamma_{i:z} dx^i dx^z \end{aligned} \quad [1]$$

adoptando el convenio de Einstein de sobreentender los símbolos de sumación correspondientes a los sufijos literales (aquí i, z) que aparecen dos veces en un mismo término; su simple repetición, una vez como índice inferior y otro como superior, indicará que se ha de verificar su sumación para los valores 0, 1, 2, 3. Las $\gamma_{i:z}$ forman el sistema de componentes que se llaman *covariantes* del ente matemático denominado tensor métrico fundamental, que podemos resumir en la matriz siguiente:

$$\gamma_{i:z} = \begin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{c^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{c^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{c^2} \end{array} \quad [1a]$$

Al ds definido en [1] se le da el nombre de intervalo de *tiempo propio*. Propiamente hablando Einstein, a lo menos al principio, no concibió ds como intervalo de tiempo, sino como intervalo de espacio y en vez de la coordenada temporal x^0 o t , utilizó su producto por la velocidad de la luz multiplicada por $\sqrt{-1}$, con lo que por una parte tal coordenada representaba un espacio y por otra se significaba la diferencia de esta coordenada espacial *sui generis* respecto de las otras tres euclideas normales, las cuales entonces ya no se consideraban divididas por c , es decir, expresadas en años de luz, o mejor, segundos-luz; asimismo a los sufijos i, z les atribuyó los valores 1, 2,

3, 4 en vez de 0, 1, 2, 3 y al tiempo le asignó el sufijo 4 y no 0 como nosotros. Pero como más tarde, varios de los autores de que nos ocuparemos, comenzaron a considerar el intervalo ds como tiempo y este uso prevalece en la actualidad lo mismo que el de atribuir a los sufijos los valores 0, 1, 2, 3, nos ha parecido mejor adoptarlo ya desde aquí por razones de uniformidad.

Es claro que se puede extender este esquema, diciendo que, en ausencia de campos gravitatorios, siempre será posible a un observador que se mueve arbitrariamente escoger cuatro coordenadas generales curvilíneas ξ^i : funciones de las rectilíneas x^i : antes mencionadas, de tal manera que, no obstante su carácter particular, coincida con todos los otros posibles observadores, que hayan hecho otro tanto, al calcular el valor del intervalo que separa dos sucesos próximos, es decir, que reemplazando las antiguas coordenadas por las nuevas, la expresión del intervalo tomará la forma

$$ds^2 = g_{ix} d\xi^i d\xi^x \quad [2]$$

en donde las nuevas componentes g_{ix} del tensor métrico fundamental ya no serán constantes como las η_{ix} de [1 bis], sino funciones del punto x^i o ξ^i , según se trate de coordenadas rectilíneas o curvilíneas generales. Ahora bien, la Relatividad General postula que la igualdad [2] se cumpla siempre, haya o no campos gravitatorios, y ello tanto si las funciones g_{ix} son tales que el espacio que determinan sea euclidiano, como si no. La necesidad de acudir a esta generalización la explicó Einstein probando que, si se tienen dos observadores coincidentes, pero referidos a sistemas tales que el de referencia del uno esté en rotación respecto del otro, es imposible que la Geometría euclidiana valga a la vez para ambos. Ahora bien, como el principio de la Relatividad General exige que las leyes de la naturaleza revistan la misma expresión para todos los observadores posibles, o lo que es lo mismo, que sean invariantes o covariantes (según sean ecuaciones de carácter escalar o bien vectorial) para cualquier transformación de coordenadas de espacio y tiempo, vio Einstein la necesidad de acudir a un tipo de geometría más general que la euclidiana, eligiendo para ello la Geometría diferencial de Riemann, basada en la posibilidad de definir el intervalo o distancia entre dos puntos próximos, admitiendo que las leyes o métrica capaces de establecerla no dependen de las características de un espacio absoluto preexistente, sino de las fuerzas de cohesión entre los cuerpos sumergidos en él. O mejor aún, de estos mismos cuerpos, pues propiamente hablando para Einstein sin materia no hay espacio, como para Mach sin materia no hay inercia; y el espacio no consiste sino en la serie de propiedades, tanto cualitativas como cuantitativas, a que quedan sometidos los movimientos, desde la propagación de la luz a las órbitas estelares, en cuanto aparecen la materia y la inercia. Todas estas propiedades las representa Einstein por medio de una variedad geométrica de cuatro dimensiones, cuyas geodésicas sean precisamente

las trayectorias de los rayos luminosos y de las partículas materiales sometidas a acciones que en el lenguaje newtoniano llamaríamos gravitatorias. Ahora bien, la naturaleza de esta variedad geométrica, es lo que habrá que determinar por medios de las funciones $g_{\alpha\beta}$, las cuales dependerán, por tanto, no solamente de la presencia y distribución de la materia, sino también de la geometría particular que en cada caso queramos imponer y cuya métrica constituyen; por esto estas funciones reciben el nombre de *potenciales gravitatorios*, porque de su determinación resultará la ley einsteiniana de la gravitación, contrapartida relativista de la ley newtoniana de la inversa del cuadrado de la distancia, derivable, como es sabido, de la función única que constituía el potencial escalar clásico. En el caso einsteiniano será preciso un potencial de carácter tensorial cuyo sistema de componentes sean las funciones $g_{\alpha\beta}$ antes dichas, las cuales tendrán que ser tales, que en la variedad geométrica que definan la forma de las geodésicas coincida con la de las órbitas planetarias. Resultaba necesario el recurso a este género de potenciales, porque con ningún otro método de cálculo era posible obtener unas leyes covariantes respecto de cualquier cambio de coordenadas, incluso no lineal, conforme el principio de la Relatividad General exigía. Afortunadamente la herramienta poderosa con que Einstein iba a obrar maravillas en el manejo de tales potenciales gravitatorios de índole tensorial, estaba preparada y no era otra cosa que el cálculo diferencial absoluto o análisis tensorial que poco antes habían desarrollado Ricci y Levi-Civita.

En la teoría de Newton la masa produce el campo gravitatorio y éste queda determinado en cuanto se conoce su potencial V que satisfaga a la ecuación de Laplace $\Delta V = 0$ en el vacío o a la de Poisson $\Delta V = 4\pi G\rho$ en un espacio de densidad variable ρ , siendo G la constante de la gravitación ($G = 6.7 \times 10^{-8} \text{ gr}^{-1} \text{ cm}^3 \text{ seg}^{-2}$). Para que la nueva expresión tensorial equivalente a la de Laplace conservase su estructura, no debería contener derivadas del potencial de orden superior al 2.º, por lo que el tensor que debía constituir su primer miembro sólo podría tener como componentes los del potencial $g_{\alpha\beta}$ y sus derivadas primeras y segundas, respecto de las coordenadas, combinadas de modo homogéneo y lineal por lo que toca a las últimas. El tensor más sencillo que satisfacía esta condición era el de 4.º orden llamado de Riemann-Christoffel $G_{\alpha\beta\lambda\mu}$ definido por la expresión

$$G_{\alpha\beta\lambda\mu} \equiv g_{\alpha\mu} \left(\frac{\partial \Gamma_{\lambda\alpha}^{\nu}}{\partial z^{\beta}} - \frac{\partial \Gamma_{\lambda\beta}^{\nu}}{\partial z^{\alpha}} - \Gamma_{\beta\sigma}^{\nu} \Gamma_{\lambda\alpha}^{\sigma} + \Gamma_{\beta\sigma}^{\nu} \Gamma_{\lambda\alpha}^{\sigma} \right) \quad [3]$$

siendo por definición los llamados símbolos de Christoffel de 1.ª especie $\Gamma_{\alpha\beta}^{\lambda}$ en función del tensor métrico fundamental

$$\Gamma_{\alpha\beta}^{\lambda} \equiv \frac{1}{2} g^{\lambda\mu} \left(\frac{\partial g_{\alpha\mu}}{\partial z^{\beta}} + \frac{\partial g_{\beta\mu}}{\partial z^{\alpha}} - \frac{\partial g_{\alpha\beta}}{\partial z^{\mu}} \right) \quad [3a]$$

en donde las $g_{\lambda\mu}$ con superíndices son las componentes del mismo tensor fundamental dado en forma contravariante y constituyen la matriz inversa de la de las componentes covariantes, o sea tal que se tenga $g^{\alpha\kappa}g_{\kappa\lambda} = \delta_{\lambda}^{\alpha}$, siendo $\delta_{\lambda}^{\alpha}$ el llamado símbolo de Kronecker, cuyas componentes constituyen, como se sabe, la matriz unidad

$$\begin{aligned}\delta_{\lambda}^{\alpha} &= 0 \text{ para } \lambda \neq \alpha \\ \delta_{\lambda}^{\alpha} &= 1 \quad \gg \quad \lambda = \alpha\end{aligned}$$

Estos mismos símbolos de Christoffel son los que permiten escribir la ecuación diferencial de la geodésica, que se obtiene con sólo tratar por el método de Euler-Lagrange la ecuación variacional

$$\delta \int ds = 0 \quad [4]$$

con el ds dado por [2]. Tomando como parámetro de derivación el mismo tiempo propio, resulta

$$\frac{d^2\xi^{\lambda}}{ds^2} + \Gamma^{\lambda}_{\alpha\kappa} \frac{d\xi^{\alpha}}{ds} \frac{d\xi^{\kappa}}{ds} = 0 \quad [4 a]$$

Por desgracia halló Einstein que la anulación de las componentes de este tensor conducía a una variedad pseudo-euclídea, cuyas geodésicas eran rectas; para que fuesen cónicas tuvo que recurrir al llamado tensor contraído de Riemann-Christoffel o tensor de Ricci

$$G_{\alpha\lambda} = g^{\kappa\mu} G_{\alpha\kappa\lambda\mu} \quad (\alpha, \lambda, \mu = 0, 1, 2, 3) \quad [4 b]$$

De aquí que Einstein postulase que las ecuaciones a que deberían satisfacer sus potenciales gravitatorios en el vacío debían ser de forma

$$G_{\alpha\kappa} = 0 \quad (\alpha, \kappa = 0, 1, 2, 3) \quad [5]$$

Este sistema de diez ecuaciones en derivadas parciales de 2.º orden, una para cada uno de los componentes $g_{\alpha\kappa}$, es sumamente complicado; escritas explícitamente de modo general cada una tiene más de doscientos términos. Afortunadamente Schwarzschild y Birkhof, consiguieron resolverlo en el caso de suponer que la distribución de la materia no varía con el tiempo, presenta simetría esférica y no se extiende el campo gravitatorio hasta el infinito; es una simplificación que se puede considerar representa las condiciones existentes en el sistema planetario con suficiente aproximación, con tal que se introduzca una constante que representa la masa del Sol.

Para un espacio lleno de materia era necesario encontrar las ecuaciones equivalentes a la de Poisson; para ello pensó Einstein, que la presencia de la materia se tendría que expresar en el 2.º miembro, no ya mediante el escalar ρ , que no es invariante ni aun para las transformaciones de Lorentz, sino mediante un tensor físico de 2.º orden

que fuese covariante respecto de un cambio cualquiera de coordenadas y diese cuenta del contenido físico del espacio-tiempo, es decir, de la densidad de masa o energía, la densidad del momento lineal y el tensor de tensiones; lo denominó tensor energético de la materia y lo representó por T_{ik} . Las componentes de este tensor, también llamado tensor de tensión-energía o tensor de energía-momento, para el caso sencillísimo de un fluido perfecto y en reposo respecto al sistema de referencia, son

$$\left. \begin{aligned} T_{00} &= \rho \\ T_{0i} &= T_{i0} = 0 \\ T_{ik} &= -\frac{p}{c^2} g_{ik} \end{aligned} \right\} \quad (i, k = 1, 2, 3) \quad [6]$$

siendo ρ y p la densidad y presión ordinarias. Naturalmente por ser un tensor físico T_{ik} tenía que satisfacer los principios clásicos de conservación de la masa, energía y cantidad de movimiento o el principio relativista de la covariancia del cuadvectores energía-momento, el cual se traduce en concreto en la anulación de su divergencia, que, en este caso, habrá que expresar mediante sus derivadas covariantes en la forma

$$\frac{DT_{ik}}{D\xi^k} = 0 \quad [6 a]$$

El signo de igualdad en la ecuación relativista sustitutiva de la de Poisson

$$G_{ik} = \text{const.} \times T_{ik} \quad [5 a]$$

que pretendía Einstein escribir inspirándose en la [5] sustitutiva de la de Laplace, exigía que el tensor del primer miembro, aunque geométrico, revistiese el mismo carácter que el del segundo y que, por tanto, su divergencia fuese también nula. Como esto no era posible con el tensor de Ricci, pareció necesario introducir en él algunas modificaciones; la más sencilla era la formación a partir de él por simples operaciones algebraicas de otros tensores de 2.º orden, como, por ejemplo $G_{ik}^* = G_{ik} + a g_{ik} G$, en el que a es una constante y G el escalar de curvatura llamado invariante de Riemann $G = g^{ik} G_{ik}$; aunque es un cálculo laborioso, no es difícil de probar que la condición para que la divergencia de G_{ik}^* sea idénticamente nula es que la constante a valga $-\frac{1}{2}$. En consecuencia, como ecuación equivalente a la de Poisson adoptó Einstein

$$G_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} G = -\kappa T_{ik} \quad [7]$$

en la que κ es su constante de la gravitación, ligada con la newtoniana por la relación $\kappa = 8\pi G$. Es de notar que en la forma original de las

ecuaciones de Einstein aparece $\kappa = \frac{8\pi G}{c^2}$; pero es ello debido a lo que

ya se ha advertido anteriormente respecto a su modo de interpretar el intervalo ds como espacio y no como tiempo propio. Naturalmente esta modificación ha tenido como consecuencia lógica, una situación distinta del factor c^2 en las formas que usaremos de varias de las expresiones primitivas de Einstein.

Lo notable de esta ecuación tensorial [7] es que se puede interpretar en los dos sentidos, tanto de izquierda a derecha, mostrando en qué forma queda afectada la Geometría por la presencia de la materia, como de derecha a izquierda, haciendo ver cómo la energía y el momento tienen que cumplir las leyes bien conocidas de conservación de resultados de su conexión con magnitudes geométricas que se conservan automáticamente. La tan ponderada elegancia de estas ecuaciones está precisamente en esta combinación de la ecuación de Poisson y las leyes de conservación de la dinámica clásica, quedando así patentizada la conexión de dos leyes de la Naturaleza, consideradas siempre antes como enteramente independientes la una de la otra. Si se considera que como ya hemos advertido antes, a ello se había llegado con sólo aplicar el principio de covariancia universal al hecho de experiencia de que siempre y en todas partes la masa inerte y la masa gravitatoria valen lo mismo y a ello se añaden los éxitos ya mencionados de la nueva teoría en la explicación de los mismos fenómenos que había explicado la clásica ley de Newton y de varios otros, ante los que ésta había resultado impotente, a nadie maravillará el gran crédito que enseguida cobraron y que, consideradas como la mejor interpretación de las propiedades locales del Universo a escala de los sistemas estelares, se mirasen como el mejor punto de partida para intentar su explicación a escala de las nebulosas extragalácticas.

5. EL UNIVERSO CILÍNDRICO DE EINSTEIN

El primer problema con que se tuvo que enfrentar Einstein fue el mismo que ya había preocupado a Newton, aunque trasladado a escala mucho mayor, a saber, cómo podían mantenerse en equilibrio en el espacio las nebulosas extragalácticas, sin aglutinarse de resultados de su atracción mutua, pues no hay que olvidar que en aquel tiempo nadie sospechaba sus movimientos de recesión. Aunque en la concepción de Einstein el espacio real tenía que presentar necesariamente heterogeneidades, pues es claro que la geodésica representativa de la órbita de un planeta no podía ser igual alrededor de una estrella doble que del Sol, las despreció en primera aproximación y supuso toda la materia del Universo como pulverizada y uniformemente distribuida por el espacio, como un fluido homogéneo e isótropo, de la misma manera que cuando se considera la esfericidad de la Tierra se hace abstracción de sus accidentes orográficos; postuló además que

los movimientos de estrellas y nebulosas eran despreciables comparados con la velocidad de la luz.

Comprobó entonces, con Seeliger, que la materia no podía llenar todo el espacio euclídeo infinito; pero probó, además, que tampoco podía estar en él como una especie de isla, porque por el teorema de Boltzman relativo a las densidades en los distintos puntos de un espacio en que una distribución de partículas se agita al azar, una densidad nula en la frontera la exigiría también en todos los puntos interiores. Luego al no poder ser el Universo infinito ni poder tener límites fijos, preciso era concluir que el espacio ocupado por él no podía ser euclídeo; y como por considerarse despreciables las irregularidades locales, en todos sus puntos debía tener las mismas propiedades, tendría que ser el espacio real o bien un espacio hiperbólico de Lobatchewski o bien un espacio esférico de Riemann de curvatura constante y positiva en todos sus puntos, es decir, el equivalente tridimensional de una superficie esférica. Einstein se pronunció por éste último por cumplir la condición de ni ser infinito ni presentar límites finitos. Así como una superficie esférica carece de límites, pero su área es finita y cualquiera de sus puntos puede ser mirado como centro y como origen de coordenadas, así también el espacio esférico cerrado carece de límites en las tres dimensiones que nos son familiares, pero tiene volumen finito y cualquiera de sus puntos puede ser considerado como centro de simetría. Con esto quedaba resuelto el peligro de la condensación de la materia en el centro, ya que cualquiera de sus puntos podía tener carácter de tal.

Geométricamente no ofrece ello ninguna dificultad; sólo imaginativamente tropezamos con el inconveniente de que no nos podemos representar cómo se cierra sobre sí mismo un espacio tridimensional, porque no nos podemos representar la cuarta dimensión indispensable para que se cierre el espacio de tres dimensiones, como en el espacio de tres, gracias a la tercera dimensión, se cierra la superficie esférica de dos; la dificultad no se escapó al mismo Einstein, pero creyó que tal imposibilidad de formarnos la correspondiente imagen no podía ser obstáculo mayor, como no lo sería para el cierre de la superficie el que no fuesen capaces de imaginarse la tercera dimensión unos seres infinitamente delgados que sobre ella habitasen y se moviesen; por medios indirectos sí podrían deducir la existencia de la tercera dimensión y de igual manera podríamos nosotros deducir la cuarta.

No obstante esta esfericidad de su parte espacial, es de notar que al complejo espacio-temporal denominado Universo de Einstein no se le suele aplicar el epíteto de esférico, sino de cilíndrico, porque a las hipótesis de la homogeneidad e isotropía del espacio, añadió la de la independencia de su métrica respecto del tiempo (es decir, que ni la densidad media ni las distancias varían sistemáticamente con él) y la de la existencia como caso límite en todo dominio suficientemente pequeño sin demasiada materia de un Universo euclidiano tan-
gente, traducción de nuestra experiencia local cotidiana, en que la geometría clásica y la Relatividad restringida se presentan como sa-

tisfactorias y que en última instancia significa que el intervalo ds se reducirá al del espacio-tiempo de Minkowski, cuando las distancias consideradas sean pequeñas y el campo gravitatorio despreciable. Para traducir estas hipótesis adoptó Einstein como expresión del intervalo [1]

$$ds^2 = dt^2 - \frac{R^2}{c^2} [d\theta^2 + \sin^2 \theta (d\chi^2 + \sin^2 \chi d\Phi^2)] \quad [8]$$

en que R es una constante que expresa el radio de curvatura del Universo y aparece bajo la forma R/c como expresada en años de luz y θ , χ , Φ , son las coordenadas angulares de cada punto del espacio esférico tridimensional. El tiempo no entra en esta fórmula sino en el término dt^2 ; queda, pues, explícito y desligado de toda constricción de las coordenadas espaciales; fluye libremente, hecho que se expresa llamándolo rectilíneo y es precisamente esta dimensión temporal no curvada del espacio-tiempo de Einstein, la que le ha valido el calificativo de cilíndrico. Ahora bien imponamos a los potenciales gravitatorios dados por la métrica [8], la condición de satisfacer a las ecuaciones de campo [7]. Ordenadas las variables t , θ , χ , Φ como ξ^i con $i = 0, 1, 2, 3$, respectivamente, las componentes no nulas del tensor métrico diagonal dado por [8] serán de la forma covariante

$$\begin{aligned} g_{00} &= 1 & g_{11} &= -\frac{R^2}{c^2} \\ g_{22} &= -\frac{R^2}{c^2} \sin^2 \theta & g_{33} &= -\frac{R^2}{c^2} \sin^2 \theta \sin^2 \chi \end{aligned} \quad [8 a]$$

Por simple derivación, según las expresiones [4a], [3], [3a], obtendremos de este tensor métrico el tensor de Ricci que, en este caso, por estar separada la coordenada temporal de las espaciales y constituir éstas un espacio esférico de radio R/c , toma la forma sencillísima

$$G_{02} = G_{20} = 0 \quad G_{ik} = \frac{2c^2}{R^2} g_{ik}$$

y el escalar de curvatura resulta

$$G = g^{iz} G_{iz} = g^{ik} \frac{2c^2}{R^2} g_{ik} = \frac{6c^2}{R^2}$$

El tensor métrico del primer miembro de la ecuación de campo [7] tiene, pues, por componentes

$$\begin{aligned} G_{00}^* &= -\frac{3c^2}{R^2} & G_{oi}^* &= G_{io}^* = 0 \\ G_{ik}^* &= \frac{2c^2}{R^2} g_{ik} - \frac{3c^2}{R^2} g_{ik} = -\frac{c^2}{R^2} g_{ik} \end{aligned}$$

y el tensor físico del segundo miembro en la hipótesis del fluido perfecto y en reposo tiene según [6] las componentes

$$-\kappa T_{oo} = -\kappa\rho \quad -\kappa T_{oi} = -\kappa T_{io} = 0 \quad -\kappa T_{ik} = +\kappa \frac{p}{c^2} g_{ik}$$

Las ecuaciones de campo [7] implican por consiguiente

$$-\frac{3c^2}{R^2} = -\kappa\rho \quad -\frac{c^2}{R^2} = +\frac{\kappa p}{c^2} \quad [9]$$

de donde, restando la primera de la segunda, después de dividir aquella por 3 y ambas por κ ,

$$\frac{p}{c^2} + \frac{\rho}{3} = 0 \quad [9a]$$

Ahora bien, para que esta última expresión pudiese quedar satisfecha habría sido necesario suponer una presión negativa inicial constante en todo el espacio de la que no se veía explicación física alguna. Entonces fue cuando, para evitar este inconveniente, modifiqué su ley de la gravitación, agregando al primer miembro de su ecuación de campo un nuevo término con la constante cosmológica Λ , con lo que la diferencia entre ambos miembros, en vez de anularse, resulta igual a $g_{\alpha\alpha} \Lambda$, valor prácticamente nulo para distancias como las del sistema solar, la Vía Láctea e incluso la Metagalaxia interior, pero que empieza a adquirir significación a distancias cósmicas propiamente tales. Sus ecuaciones [7] toman entonces la forma

$$G_{\alpha\alpha} - \frac{1}{2} g_{\alpha\alpha} G + \Lambda g_{\alpha\alpha} = -\kappa T_{\alpha\alpha} \quad [10]$$

y las [9] serán ahora

$$-\frac{3c^2}{R^2} + \Lambda = -\kappa\rho \quad -\frac{c^2}{R^2} + \Lambda = \frac{\kappa p}{c^2} \quad [10a]$$

de donde, despreciando la débil presión de radiación p ,

$$\Lambda = \frac{c^2}{R^2} \quad \rho = \frac{2c^2}{\kappa R^2} = \frac{\Lambda}{4\pi G} \quad \frac{R^2}{c^2} = \frac{1}{4\pi G\rho} \quad [11]$$

y teniendo en cuenta que el volumen de la hiperesfera, es $V = 2\pi^2 R^3$, se obtendrá sin dificultad para la masa del Universo, a base de dicha expresión y de las [11],

$$M = \frac{4\pi^2 c^3}{\kappa \Lambda} \quad [12]$$

Es casi increíble el mar de tinta provocado por la agregación de este término de la constante cosmológica. Mientras unos la consideran genial, para otros (y entre ellos el mismo Einstein que nunca consiguió

tranquilizarse sobre los móviles de su acto) fue una especie de *deus ex machina* inventado, exclusivamente, para salir de un impasse. A medio siglo de distancia, la inclusión del término cosmológico no parece en modo alguno desafortunada. Si se considera el aspecto matemático, el escalar de curvatura de Riemann G , no es el único invariante escalar que se puede deducir linealmente de las funciones g_{ix} y sus derivadas de los primeros órdenes; el escalar de tipo más general que posee esta propiedad es de la forma $b_1 G + b_2$, siendo b_1 y b_2 dos constantes de las que la primera es un simple factor de proporcionalidad dependiente del sistema de unidades y del que, por tanto, es fácil prescindir considerando $G + \frac{b_2}{b_1}$ en vez de $b_1 G + b_2$. No se ve entonces que sea ilógico introducir en las [7] en vez de G esta forma más general, y si entonces se hace $\frac{b_2}{b_1} = -2\Lambda$, resultan inmediatamente las [10]. Si a esto se añade que la dificultad hallada por Einstein se ha podido luego obviar por otros procedimientos, se ve que el calificativo de *ad hoc* aplicado al término cosmológico, si al principio pudo tener visos de verisimilitud, carece en realidad de fundamento.

Es interesante cómo concibió Einstein la introducción de Λ . Einstein estaba plenamente convencido del principio de Mach, según el cual la inercia no es sino la expresión de una acción mutua entre todas las masas del Cosmos, o en otras palabras, el campo de inercia definido por los potenciales gravitatorios g_{ix} debería quedar plenamente determinado por la distribución de las masas y energía en el Universo. Es claro que su primera ecuación tensorial de campo [7] podía ser considerada como un sistema de ecuaciones diferenciales que daban las g_{ix} en función de las propiedades de la materia, representadas por el tensor T_{ix} y que probaban por tanto, de manera indudable, que los potenciales gravitatorios g_{ix} , es decir, la inercia, estaban afectados por el tensor T_{ix} , es decir, la materia; pero como las [7] no son sino ecuaciones diferenciales, dichos potenciales no quedaban determinados si no se fijaban condiciones de contorno en el infinito. Einstein creyó que era imposible fijar estas condiciones de modo que los potenciales gravitatorios quedasen determinados por el tensor energía-momento y por esto, para soslayar esta dificultad en el infinito, introdujo el término cosmológico, pues para valores positivos de Λ las [10] admitían una solución en que la densidad de la materia era uniforme, sus velocidades al azar nulas y en que el espacio se curvaba de modo que, aunque ilimitado, era finito, es decir, se suprimía el infinito donde se hallaban las dificultades de contorno. En cambio se equivocó, como veremos más tarde, al creer que para valores positivos de Λ no existen soluciones de [10] en el espacio vacío, o sea, para $T_{ix} = 0$. Y precisamente mediante estos dos asertos creía haber incorporado definitivamente el principio de Mach a su teoría, pues habría sido una consecuencia directa del principio de la relatividad

de la inercia el que no pudiese existir inercia alguna en ausencia total de la materia.

Prescindiendo, por el momento, de que más tarde repudiase Einstein el término cosmológico, veamos ahora algunas propiedades características de este su primer modelo de Universo, del que tantos otros han procedido. La relación del radio de curvatura del Universo con la densidad media de la materia, que nos revela la segunda de las expresiones [11] hace que la extensión total del espacio quede determinada por la cantidad total de materia. Si se admite como valor de ρ el de la densidad media observada en nuestras inmediaciones, 10^{-28} gr cm^{-3} , y se recuerda el valor de la forma que hemos adoptado de la constante de Einstein $\kappa = 8\pi G = 1,67 \times 10^{-6}$ gr¹ cm^{-3} seg⁻²

resulta para el radio de curvatura $R = c \sqrt{\frac{2}{\kappa\rho}} = 3,28 \times 10^{27}$ cm,

es decir, 3460 millones de años de luz. Si toda la substancia del Universo fuese agua, el valor de R no podría pasar de los 300 millones de kilómetros. Una consecuencia curiosa de esta conexión del radio con la densidad es que cualquier aumento de ésta ha de producir inevitablemente una contracción de aquél, razón por la cual, al no poderse variar la densidad, es forzoso concluir que tal Universo contiene cuanta materia es capaz de contener y que, por lo tanto, está totalmente lleno. Cuál sea la masa total del Universo, supuesto admitidos los valores de R y ρ antes dados, es fácil calcularla recurriendo a la expresión [12] anteriormente obtenida; resulta $M = 7 \times 10^{55}$ gr. Otra propiedad interesante del Universo de Einstein es que en él los rayos luminosos podrían, en principio, circularlo y, al cabo del lapso de tiempo necesario, converger primero en el punto antipodal del de origen y luego en el de origen mismo; se vería, de resultas, una estrella en el punto antipodal y una estrella-fantasma en el lugar ocupado por la estrella real en el momento de la emisión, del que entre tanto ella se habría, evidentemente, desplazado. No es probable que en el Universo real puedan converger los rayos con la precisión suficiente para producir tales imágenes; pero no estará de más recordar la posibilidad de que, si el modelo de Einstein fuese el que expresase de hecho la realidad del mundo en que vivimos, algunos de los objetos que contemplamos en la bóveda celeste podrían no ser otra cosa que meros espejismos ópticos. Bueno es notar, con todo, que esta posibilidad, incluso teórica, le pareció tan paradójica al mismo Einstein que para eliminarla sugirió que la parte espacial del Universo, en vez de un hiperespacio esférico tenía que ser tal vez un espacio elíptico, idéntico en muchas de sus propiedades métricas locales al primero, pero de topología global diferente, del tipo de una superficie de Möbius, pero en tres dimensiones, por lo que su volumen vale sólo la mitad del del esférico de igual radio.

A la concepción einsteiniana se objetó, con el tiempo, que con ella se restablecían para el Universo, como un todo, las nociones de espacio y tiempo absolutos. A ello respondió Eddington que la relati-

vidad no niega la realidad de un tiempo absoluto, sino que éste se pueda deducir de ningún dato experimental conocido y que no hay que desconcertarse por ver reaparecer tal noción en una teoría de los fenómenos a escala cósmica, sobre la que no hay todavía datos experimentales: «Así como cada observador limitado tiene su propia distinción particular de espacio y tiempo, un ser coextensivo al Universo entero podría tener también una distinción especial de espacio y tiempo que le fuese connatural: a este tiempo de este ser no habría dificultad en llamarlo absoluto». En cuanto a las dificultades que también se le opusieron haciendo notar que la cantidad total de materia en un Universo de radio dado quedaba determinada por la ley de la gravitación, repuso el mismo Einstein que, precisamente, tal concepción estaba en estrecha armonía con el principio de Mach, según el cual el conjunto de masas del Universo es la causa de la inercia. Todavía otro inconveniente se objetó al Universo de Einstein y esta vez fue el mismo Eddington quien lo propuso: de resultados de la relación antes expuesta entre el radio y la densidad, el equilibrio del Universo es inestable, a la menor perturbación tenderá a contraerse o dilatarse indefinitivamente y, por lo tanto, no es posible considerar tal modelo como forma representativa del Universo físico homogeneizado tomando la media estadística de las observaciones sobre la distribución de la materia, sino a lo más como imagen de su estado inicial en una época pasada. Esta dificultad es válida y cabe por tanto concluir que, como por las irregularidades locales el Universo real no habrá podido coincidir nunca con dicho modelo, cada vez se habrá ido apartando más de él y, por tanto, el modelo einsteiniano no lo puede representar de modo permanente; con todo, es verosímil que en épocas pasadas haya estado más cerca de él que en la actualidad.

6. EL UNIVERSO OBSERVABLEMENTE LIMITADO DE DE SITTER

Muy poco después de publicar Einstein su teoría, el astrónomo holandés De Sitter, siguiendo las inspiraciones de Ehrenfest, demostró la posibilidad de otro Universo estático en que quedasen satisfechas las ecuaciones einsteinianas del campo gravitatorio y en el que el tiempo no fuese ya independiente del espacio, sino que estuviera íntimamente ligado a él, revalorizándose la noción estricta de espacio-tiempo. Para Einstein no tiene en rigor sentido hablar de materia contenida en el espacio, ya que sin ella el espacio métrico y la topología global ni siquiera existen y es ella la que determina su geometría. Para De Sitter el espacio tiene estructura propia independientemente de la materia que contenga, la cual no desempeña en él otro papel que el de las partículas testigo en un campo eléctrico, sin influjo alguno sobre él. Como intervalo tomó De Sitter

$$ds^2 = \cos^2 \theta dt^2 - \frac{R^2}{c^2} [d\theta^2 + \sin^2 \theta (d\chi^2 + \sin^2 \chi d\Phi^2)] \quad [13]$$

con cuyos potenciales gravitatorios se satisfacen las ecuaciones [10] con tal que se tenga $\Lambda = \frac{3c^2}{R^2}$. Como se ve, la parte espacial tridi-

mensional que se deduce de este intervalo para $t = \text{const.}$ es un universo esférico cerrado de tres dimensiones igual al del caso einsteiniano; pero ahora el tiempo ya no es independiente del espacio, sino que su medida en un punto depende de su distancia al observador y la velocidad de la luz ya no aparece como constante, sino igual a $c \cdot \cos \theta$, como se ve fácilmente en [13] comparándola con la [8] para $ds = 0$. No significa ello que tal velocidad no sea de hecho constante; más aún, medida en cualquier punto será siempre igual a c , como lo es en nuestro sistema para los puntos próximos al origen, para los que $\theta = 0$; lo que significa es que, medida en un punto desde otro situado a distancia angular θ , resultará igual a $c \cdot \cos \theta$. Este tiempo ligado a la distancia a que está del origen de coordenadas el lugar en que ocurre un suceso, introduce una nueva curvatura en el complejo espacio-temporal de De Sitter, el cual ya no podrá ser llamado cilíndrico como el de Einstein, en el que el tiempo fluía libremente, sino que recibirá el nombre de hiperbólico.

Esta curvatura de la coordenada temporal lo mismo que su plena equivalencia con las espaciales en el Universo de De Sitter se aprecia mejor realizando el simple cambio de coordenadas t, θ en ζ, ω dado por

$$\sin \theta = \sin \zeta \sin \omega \qquad \text{tg } \frac{it}{R} = \cos \zeta \text{tg } \omega$$

con lo que el elemento de arco tomará la forma

$$ds^2 = -\frac{R^2}{c^2} [d\omega^2 + \sin^2 \omega \left\{ d\zeta^2 + \sin^2 \zeta (d\chi^2 + \sin^2 \chi d\Phi^2) \right\}] \quad [13 a]$$

que corresponde a una hipersfera de cuatro dimensiones inmersa en un espacio de cinco de coordenadas polares $(\frac{R}{c} \omega \zeta \chi \Phi)$. Al medir ζ desde azimutes θ se realiza la operación equivalente a la de la rotación del eje del tiempo en el Universo de Minkowski, con lo que se ve que ya no hay ningún tiempo absoluto y el principio de relatividad está plenamente satisfecho.

Con todo para nuestro propósito las propiedades del Universo de De Sitter se deducen mejor del análisis de la expresión [13]. Cerca del origen de coordenadas presenta las propiedades de un espacio-tiempo galileano; pero a medida que aumenta la distancia al origen, el Universo de De Sitter va presentando con mayor claridad sus propiedades esféricas y el intervalo ds entre dos sucesos, digamos el tiempo propio, el que se mediría en este punto, comienza a ir más despacio que la coordenada temporal dt que se mide desde el origen de coordenadas; tanto que a la distancia $\theta = \frac{\pi}{2}$, es decir, al llegar a los puntos

del ecuador de la hiperesfera respecto de los observadores situados en el origen como polo, el tiempo se detiene; en cualquier punto que se fije, ds resulta nulo, por más largo que sea dt : por más que espere-mos, nada puede ya allí ocurrir. Naturalmente se trata de un fenómeno aparente, como vgr el del arco iris y es claro que el flujo del tiempo experimentado por cualquier observador situado en este —digamos— «horizonte», será el mismo que el que experimenta en su inmediato alrededor el observador situado en el polo; más aún, para un observa-dor situado en un punto de dicho «horizonte», será en el «horizonte» que pase por su antiguo polo donde el tiempo parecerá detenido; habrá, pues, una completa falta de correspondencia entre el curso del tiempo en los dos sitios. En este Universo no puede ya darse la formación de imágenes antipodales ni fantasmales de astros como en el Univer-so de Einstein, dado que la luz se ve evidentemente constreñida a pararse al llegar a la zona en que el tiempo se detiene y no puede dar la vuelta al mundo: la región situada más allá de la distancia $\frac{R\pi}{2c}$ a que

se encuentra el «horizonte» se comportará, por tanto, como si no existiese para nosotros.

La consecuencia más interesante de la teoría de De Sitter fue que, mediante ella, se creyó poder explicar satisfactoriamente los movimien-tos de recesión de las galaxias, que a poco de su publicación se co-menzaron a observar. Como la medida del tiempo depende de $\cos \theta$, las vibraciones de los átomos parecerán más lentas al observador si-tuado en el origen de coordenadas al disminuir $\cos \theta$; de resultas las rayas espectrales estarán tanto más desplazadas hacia el rojo cuánto más distante se encuentre el objeto, y como tal desplazamiento se puede interpretar como un efecto Doppler-Fizeau, los objetos celestes lejanos parecerán forzosamente animados de una velocidad de fuga. Este mismo efecto se puede poner de manifiesto de otra manera. Mediante un cambio adecuado de coordenadas se puede hacer que en el intervalo dado por [13] el tiempo sea independiente de las coordenadas espacia-les y que sean en cambio éstas las que queden afectadas por él; en-tonces los potenciales gravitatorios deducidos de esta nueva forma del intervalo ya no serán independientes de t y, por consiguiente, si en un Universo de De Sitter se introduce, a la vez, un observador en el origen de coordenadas y una partícula material libre e inerte, ésta apa-recerá inmediatamente en movimiento respecto de él y la trayectoria que describirá volverá su convexidad hacia el origen, exactamente como si éste fuese un centro de repulsión y la repulsión tanto más intensa cuanto más alejado esté el objeto. Bien mirado, es lógico que así su-ceda: en el Universo de Einstein la fuerza repulsiva, representada por Λ y la fuerza atractiva gravitatoria se equilibraban. Al establecer De Sitter que la curvatura es una propiedad del espacio y no depende en modo alguno de la materia, prescinde de ella, hasta tal punto que al calcular las componentes del tensor energía-momento supone nulas tanto la presión p , como la densidad ρ . No es, pues de maravillar que,

suprimiendo así de rechazo la fuerza atractiva, la repulsión se dejó sentir prevalentemente. Al principio se creyó que era proporcional al cuadrado de la distancia; sólo más tarde se advirtió que la proporcionalidad se daba tan sólo respecto de la distancia simplemente tal; lo que no ofrecía dudas era que en un Universo de De Sitter los objetos lejanos tenían que parecer alejarse a grandes velocidades; supuesto que las primeras pocas velocidades radiales de galaxias que se fueron conociendo eran efectivamente de recesión y muy superiores a las de las estrellas, ¿iba a resultar que el Universo real se parecía más al modelo de De Sitter que al de Einstein? La respuesta no era fácil; pues si por un lado la explicación de la recesión de las galaxias era tentadora, por otra la innegable presencia en nuestro Universo de la materia y presión de radiación patentizaban lo utópico de un modelo de Universo vacío como el de De Sitter.

Y además ¿no era ociosa la consideración de un Universo vacío? ¿Qué podría representar? Pronto se vio, con todo, el interés que podía tener estudiarlo como caso límite; y además si la materia existente en el Universo se podía considerar tan exigua respecto de su volumen que la densidad resultante fuese despreciable, cabría decir que la curvatura que su presencia introduciría en el espacio podría ser algo así como la curvatura que puedan añadir las montañas al elipsoide terrestre, despreciable, por tanto, en primera aproximación, como las heterogeneidades en la distribución espacial de la materia en el modelo de Einstein. Un principio de unificación en el estudio de ambos modelos se halló en el hecho de que si la constante cosmológica del Universo einsteiniano de radio R_E/c vale $\Lambda = \frac{c^2}{R_E^2}$ y en otro de De Sitter de radio R_S/c tiene por expresión $\Lambda = \frac{3c^2}{R_S^2}$ unificando ambas

expresiones resulta $R_S = \sqrt[3]{3} R_E$. Se ve, pues, que una región del Universo de Einstein en que se fuese haciendo el vacío mediante una disminución local de la densidad de poca importancia, iría perdiendo su curvatura; de aquí que creyese poder concluir Robertson que «un Universo que se fuese dilatando indefinidamente debería tender al modelo vacío de De Sitter y su destino sería un estado tal, que cada unidad física llegase a ser la única existente en el interior de su propio Universo observable».

7. LOS MODELOS EXPANSIVOS DEL UNIVERSO

Por cuanto antecede se ve que el Universo de De Sitter sólo a medias era estático: de aquí que pudiese servir de transición de las ideas de Einstein a las de Friedmann. Si en aquella época se hubiese conocido ya el fenómeno de la recesión, al menos aparente, de las galaxias, naturalmente habrían buscado los cosmólogos soluciones de las ecuaciones de campo por la vía de los Universos en expansión; pero las dos o tres velocidades de fuga que se conocían eran más pronto

una curiosidad; de aquí que cuando Hubble encontró su ley no hiciese otra cosa que encontrar una confirmación experimental de lo que ya la teoría había señalado, confirmación que, naturalmente, espoléó a los investigadores por el camino emprendido, pero confirmación al fin, no idea inicial. De Sitter había buscado y hallado su solución examinando si las ecuaciones einsteinianas de campo podrían quedar satisfechas por potenciales derivados de una métrica en que el tiempo fuese función del espacio; Friedmann pensó en la recíproca, es decir, en buscar soluciones a base de una métrica en que el espacio fuese función del tiempo. Su idea básica consiste en suponer que la parte espacial tridimensional del Universo se expansiona continuamente y con ella, naturalmente los sistemas de coordenadas a ella solidariamente unidos: gracias a ello la distancia de dos puntos, que estén en reposo respecto de un sistema de coordenadas de esta índole, podría, no obstante, ir creciendo sin cesar: es lo que ocurriría con unos puntos incrustados en una superficie elástica de goma en la que se hubiese trazado una cuadrícula; aunque al dilatarse uniformemente la goma a cada punto le seguirían correspondiendo las mismas coordenadas, de hecho se iría alejando de su origen y de los otros puntos a una velocidad que sería función de la ley de crecimiento de la cuadrícula con el tiempo y proporcional a la distancia que lo separa del origen a cada momento, ya que si la distancia inicial era r_0 y la distancia al cabo de cierto tiempo $r = R r_0$, siendo R una función del tiempo, la velocidad con que se habrían ido separando sería, designado por H la constante que da la ley del crecimiento $H = \frac{dR/dt}{R}$,

$$V = \frac{dr}{dt} = \frac{dR}{dt} r_0 = Hr \quad [14]$$

Equivale ello a ensayar la posible solución de las ecuaciones de campo a base de una métrica

$$ds^2 = dt^2 - \frac{R^2}{c^2} d\sigma^2 \quad [15]$$

en que $R(t)$ sea una función exclusivamente del tiempo y $d\sigma$ el intervalo de una variedad espacial de tres dimensiones. Friedmann consiguió probar que los potenciales gravitatorios dados por las [15] satisficían las ecuaciones de campo de la Cosmología de Einstein [10] con tal que la curvatura de la variedad definida por $d\sigma$ fuese uniforme en todo el espacio. No se prejuizgaba el signo; pero en su trabajo de 1922 se limitó el caso de curvatura constante positiva, sirviéndose del caso de curvatura nula como introducción. El primero en considerar la posibilidad de una curvatura constante negativa fue Heckmann bastantes años más tarde. El intervalo adoptado por Friedmann fue de la forma

$$ds^2 = dt^2 \frac{R^2}{c^2} \frac{(d\xi^1)^2 + (d\xi^2)^2 + (d\xi^3)^2}{\left[1 + \frac{z}{4} \left((\xi^1)^2 + (\xi^2)^2 + (\xi^3)^2 \right)\right]^2} \quad [16]$$

siendo z un parámetro que puede valer $+1, 0, -1$. La isotropía del espacio quedaba asegurada por el papel idéntico de las tres coordenadas ξ^i . Si se calcula la curvatura de este espacio definido por [16], se ve que para $z = 0$ es nula y el espacio resulta euclidiano; en cambio si $z = +1$, tal curvatura es constantemente positiva e igual a $\frac{c^2}{R^2}$, razón

por la cual se acostumbra a mirar $\frac{R}{c}$ como el radio expresado en unidades de tiempo de la hiperesfera representativa del elemento espacial del Universo de Friedmann. Las ecuaciones de campo [7], con los potenciales gravitatorios dados por las [16], considerando despreciable la presión de radiación p , revisten la forma siguiente:

$$\frac{zc^2}{R^2} + \left(\frac{R'}{R}\right)^2 + 2\frac{R''}{R} = 0 \quad \frac{zc^2}{R^2} + \left(\frac{R'}{R}\right)^2 - \frac{1}{3}\kappa\rho = 0 \quad [17]$$

escribiendo por brevedad R' y R'' en lugar de $\frac{dR}{dt}$ y $\frac{d^2R}{dt^2}$ y siendo $z = +1, 0, -1$. Al igual que en el caso einsteiniano, de las [17] se obtiene por simple sustracción

$$\frac{R''}{R} + \frac{1}{6}\kappa\rho = 0 \quad [17 a]$$

que confirma que no pueden existir soluciones sin término cosmológico, pues como $\frac{R}{c}$ y ρ son por definición positivas, R'' no puede ser igual a cero, como lo tendría que ser si R/c fuese constante e independiente del tiempo. Friedmann consideró primero el caso $z = 0$, es decir, de curvatura nula. Si se sustituye R'/R por el factor representativo de la ley de expansión del Universo H , las [17] tendrán entonces la forma

$$2H' + 3H^2 = 0 \quad H^2 - \frac{1}{3}\kappa\rho = 0 \quad [18]$$

expresiones de gran importancia, porque de la 2.ª, reemplazando la constante einsteiniana de la gravitación por la newtoniana, se puede obtener el valor de la densidad $\rho_E = \frac{3H^2}{8\pi G}$ correspondiente a un espacio tridimensional euclideo; y la primera, por integración directa, en función de H , el tiempo transcurrido desde el principio de la expansión

$$t = \frac{2}{3} \frac{1}{H} \quad [19]$$

Si $z = \pm 1$, la [17a] manifiesta que $R(t)$ no puede tener mínimos ni puntos de inflexión, ya que R'' no podrá ser nunca ni positivo ni nulo. Si $z = +1$, el radio del Universo $R(t)$ oscilará indefinidamente entre cero y un valor máximo; si $z = -1$, crecerá indefinidamente, aunque en este caso de curvatura negativa sólo impropriamente se puede hablar de radio del Universo, ya que entonces es abierto y con puntos en el infinito. Se ve sin dificultad integrando la 1.ª de las [17]. Mediante el sencillo artificio de considerar el tiempo función de R y reemplazar $1/t'$ por una nueva variable, se obtiene fácilmente

$$R'^2 = \frac{R_0 - zR}{R} \quad [20]$$

en donde R_0 es una constante de integración positiva. Como R'^2 no puede ser negativo, si $z = +1$, R tendrá que oscilar entre R_0 y 0 al crecer t , sin que los pasos por el valor nulo se tengan que mirar como un principio o un fin absolutos, pues puede haber estados anteriores y posteriores; si $z = -1$, entonces el numerador se convierte en $R_0 + R$ y al crecer R indefinidamente con el tiempo, R' decrecerá regularmente y tenderá al límite $+1$; pero como R'' ha de ser siempre negativo, la concavidad de la curva representativa de la función $R(t)$ estará constantemente vuelta hacia abajo. R'' tiende a cero al hacerse nula ρ ; entonces $R' = 1$, lo que significa que, si la densidad disminuye, el espacio va tomando, cada vez más, los caracteres del caso límite, es decir, de curvatura nula.

Por lo que precede se ven los distintos modelos de Universo a que puede conducir la idea de Friedmann de suponer el espacio función del tiempo; pero de hecho la plétora de modelos a que su concepción conduce es todavía más numerosa, pues no partió él de las simples ecuaciones de campo [7], sino de las ecuaciones con término cosmológico [10]. Al introducir en ellas los potenciales gravitatorios dados por [16], la forma que toman es la siguiente:

$$\frac{zc^2}{R^2} + \left(\frac{R'}{R}\right)^2 + 2\frac{R''}{R} = \Lambda - \frac{\kappa\rho}{c^2} \quad \frac{zc^2}{R^2} + \left(\frac{R'}{R}\right)^2 = \frac{\Lambda}{3} + \frac{1}{3}\kappa\rho \quad [21]$$

con lo que la equivalente de la [17 a] es ahora

$$\frac{R''}{R} - \frac{1}{6}(2\Lambda - \kappa\rho) = 0 \quad [21 a]$$

si, como allí, suponemos despreciable la presión de radiación p . Entonces una discusión análoga a la de antes, en que, además del signo de z y, por tanto, del de la curvatura del espacio, se tenga también en cuenta el de la constante cósmica, lleva, por de pronto, a las nueve posibilidades siguientes:

Λ \ z	> 0	$= 0$	< 0	Espacio
+ 1	oscilante o en expansión	oscilante	oscilante	cerrado finito
0	en expansión	en expansión	oscilante	euclideo
- 1	en expansión	en expansión	oscilante	abierto infinito
Predominio de	repulsión cósmica	modelos de Friedmann-Einstein	atracción cósmica	

La complejidad es todavía mucho mayor; pues varios de estos casos admiten varios subcasos, por ejemplo, que Λ , manteniéndose mayor que 0, sea $\geq \Lambda_F$, llamando Λ_F al valor de la constante cosmológica en el Universo estático de Einstein o que varíe el valor inicial de R (ver el cuadro de la pág. 66). Pero además, si en las [21] no se prescinde del valor de p , como se había hecho en la primera discusión de las ecuaciones de Friedmann, en cada uno de los casos anteriores se puede introducir la posibilidad de ser $p \geq 0$ (dado que ya se sabe que una presión negativa inicial en todo el espacio carece de sentido físico); y como además en estos universos el radio es función del tiempo, se puede considerar como una nueva constante susceptible de ser tomada en consideración en la discusión R_0 , ya se entienda por tal el valor inicial del radio o su valor en el momento presente. Quien tomó por primera vez en consideración todas estas posibilidades fue Robertson, el cual en su magnífico trabajo de 1932, en que unificó y dedujo de una manera lógica general todos los tipos de universo propuestos en el periodo que algunos han llamado relativista ortodoxo, anterior a la irrupción de los modelos newtonianos tardíos, relativistas heterodoxos y estacionarios, se guió por las consideraciones siguientes. En el supuesto de que la energía total del Universo (incluyendo, por tanto, la energía de la materia de acuerdo con la ley relativista $E_m = Mc^2$) sea siempre mayor que cero, de que se tenga $p \geq 0$ y que, considerada la presión como función del radio R/c , sea monótona decreciente o estacionaria al irse expansionando el Universo (o creciente, si se contrae), es decir, que se tenga $dp/dR \leq 0$, obtiene para $\Lambda > 0$ y $z = +1$, los subcasos del cuadro de la pág. 68.

A	> 0						0	< 0
	$> \Lambda_E$	$R_0 < R_E$	$R_0 = R_E$	$R_0 > R_E$	$R_0 < R_1$	$< \Lambda_E$ $R_0 > R_2$		
z								
+ 1	Universo monótonamente creciente en expansión, con principio en un momento 0 con radio $R \geq 0$ (M_1)	Monótonamente creciente, acercándose asintóticamente al estado de Einstein (A_1)	Estado de Einstein	Monótonamente creciente a partir de un estado de Einstein (A_2)	Universo oscilante ○	Universo monótonamente creciente a partir de un radio mínimo R_2 , hasta el que se había previamente contraído (M_2)	Universo oscilante ○	Universo oscilante ○
0, -1	Universo M_1						Universo M_1	Universo ○

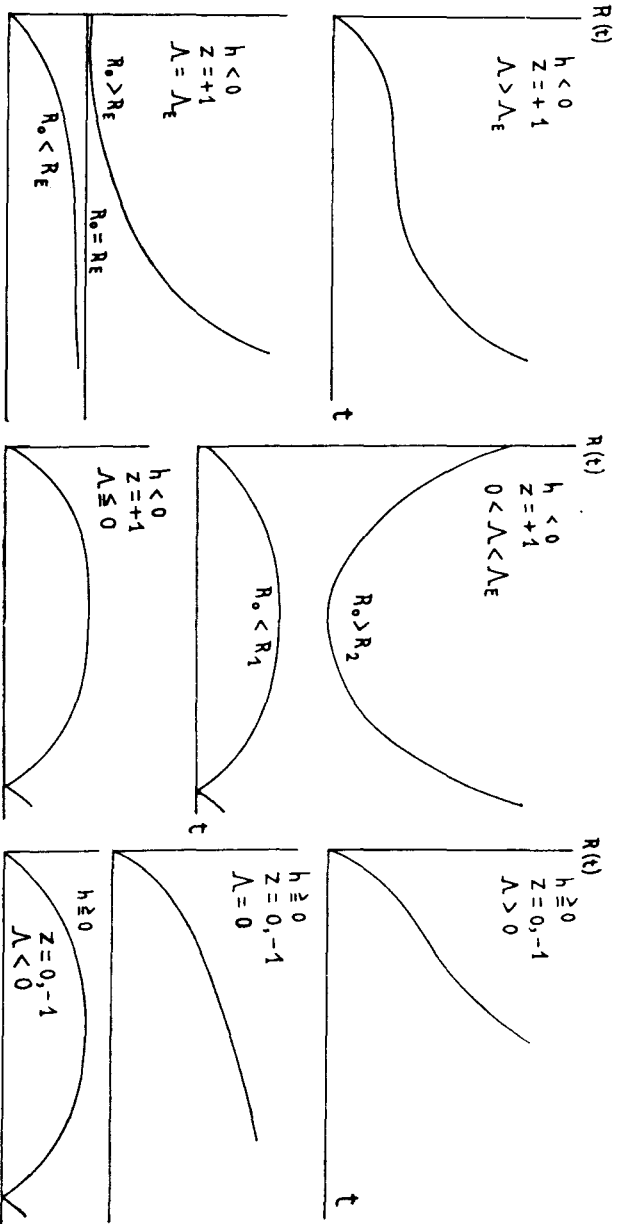


Fig. 1. ~ Tipos cualitativos de la variación de la función $R(t)$ en los diversos modelos de Universo de Friedmann (valores de λ, z) y newtonianos (valores de λ, h).

z	E	Λ	R_0	Tipo de universo	Autores y notas
+ 1	0	> 0	Arb.	Universo de De Sitter	Forma de Lanczos con $R = \cosh [c(t - \bar{t})/a]$
	> 0	$> \Lambda_E$	Arb.	Monótono creciente M_1	Tipo anterior con $ds^2 = dt^2 - \frac{e^{2ct/a}}{c^2} \times (dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2)$
		$< R_E$		Asintótico A_1	Con $\Lambda = \frac{1}{R^2}$ $k\rho c^2 = \frac{2}{R^2}$
		$= \Lambda_E$	R_E	de Einstein	Universo de Einstein
		$> R_E$		Asintótico A_2	Caso de Lemaitre
		$< \Lambda_E$ > 0	$> R_2$	Monótono creciente M_2	Como en $> \Lambda_E$
		$< \Lambda_E$	$< R_1$	Oscilante	$\Lambda = 0$ Caso de Einstein
0	0	0	Arb.	De Sitter - Einstein	Universo de Minkowski
		> 0	Arb.	de De Sitter	Forma estacionaria del Universo de De Sitter
	> 0	> 0	Arb.	Monótono expansivo M_1	Tendiendo a la forma estacionaria de De Sitter
		0	Arb.	Monótono expansivo M_1	Casos de Einstein y De Sitter
		< 0	$< R_1$	Oscilante	
- 1	0	> 0	Arb.	De Sitter	Forma de Lanczos con $R = \sinh [c(t - \bar{t})/a]$
		0	Arb.	De Sitter - Einstein	Espacio de Minkowski $R = ct$
		< 0	$< R_1$	De Sitter	Forma de Lanczos con $R = b \sin [c(t - \bar{t})/b]$
	> 0	> 0	Arb.	Monótono expansivo M_1	Tendiendo a la forma de Lanczos $R = \sinh [c(t - \bar{t})/a]$
		0	Arb.	Monótono expansivo M_1	Tendiendo a espacio de De Sitter - Einstein
		< 0	$< R_1$	Oscilante	

Si se prescinde de la condición $dp/dR \leq 0$, es decir, si se supone que p ya no es función monótonamente decreciente de R , para cualquier valor positivo de Λ menor o igual a Λ_E existen universos de tipo A_1 o de tipo O o bien de tipo A_2 o M_2 según las hipótesis complementarias que se hagan. Entonces la desviación del estado de equilibrio einsteiniano no se hace según la ley exponencial $e^{\pm ct}$ que rige en los casos antes considerados, sino según una ley más complicada en que se reemplaza la infinidad logarítmica por otra de orden superior. Si la curva representativa del valor de R deducido de la primera de las ecuaciones [21] tiene un mínimo verdadero, hay entonces un Universo einsteiniano correspondiente a dicho valor del radio y el correlativo de Λ , que sería estable; para valores algo mayores de Λ podría existir un Universo oscilante estrictamente periódico, ninguno de cuyos estados límites sería el antes mencionado; para valores mayores de Λ este universo se convertiría en asintótico en uno de sus extremos... Como se ve, las posibilidades se pueden multiplicar indefinidamente y un cuadro sinóptico de todas no parece fácil de hacer por la sencilla razón de que aún hoy día se van ensayando nuevas hipótesis, que por lo demás, muchas veces han tenido vida e influencia efímeras. Así, por ejemplo en 1930 Tolman quiso sustituir la condición de la homogeneidad del espacio por la simple condición de que el tensor materia-energía fuese de la forma

$$T^{\alpha\beta} = \left(\rho_m + \frac{p_m}{c^2} \right) v^\alpha v^\beta - g^{\alpha\beta} \frac{p_m}{c^2}$$

siendo ρ y p funciones de t solamente y en 1931 y 32 inició una derivación del planteamiento de las condiciones iniciales hacia los dominios de la Termodinámica; y lo mismo cabría decir de otras tentativas. Por este motivo nos limitaremos a reproducir el cuadro de los modelos de universo en que se considera $p = 0$ y la energía $E \geq 0$ se conserva rigurosamente, por haber sido los más ampliamente estudiados por sus autores y gozado de mayor influjo.

8. EL ÁTOMO PRIMITIVO DE LEMAITRE

En la imposibilidad de estudiar pormenorizadamente las características ni siquiera de los más importantes de estos modelos de universo, nos fijaremos en las del más célebre de todos ellos, el de Lemaître. Entre 1927 y 1930 sin previo conocimiento del trabajo de Friedmann y con mutua independencia en sus esfuerzos toda una pléyade de cosmólogos había ido orientando sus investigaciones hacia los universos de radio variable con el tiempo. No todos desarrollaron por igual sus teorías; la más completa fue la del profesor de la Universidad de Lovaina Georges Lemaître. Publicada primero en los *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* pasó prácticamente inadvertida

hasta que en 1930 publicó Eddington la suya en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Lemaître le hizo notar entonces que él había desarrollado el tema tres años antes, e incluso, con mayor profundidad. Entonces Eddington, dando un magnífico ejemplo de probidad científica, no sólo reconoció la prioridad de su corresponsal, sino que reprodujo íntegramente su trabajo traducido al inglés en *Monthly Notices* y se convirtió en su mejor propagandista y amigo. Y segundo pormenor digno de mención: excepto Eddington, ninguno de los otros autores era astrónomo de profesión ni conocía los datos que se iban publicando relativos a las velocidades de fuga de las galaxias; llegaron a sus conclusiones por meras elucubraciones teóricas, aunque claro está que al ir conociendo tales datos las trabajaron con nuevo impulso.

En su memoria de 1927 consideró Lemaître el modelo de Einstein como el estado inicial del Universo; como se ha visto, era preciso que hubiese en él un perfecto equilibrio entre el radio del Universo y la densidad de la materia; pues bien, del examen de la expresión general de Friedmann [21 a] dedujo Lemaître que tal equilibrio es inestable como el de un cono sobre su punta; si la densidad experimenta cualquier alteración estará definitivamente perdido; no se comportará como un péndulo que desviado ligeramente de la vertical vuelve a su posición de equilibrio, sino como un andamiaje frágil que se desmorona. Lemaître concluyó que el modelo de Einstein no podía ser sino un estado límite o fortuito y transitorio, del que enseguida se saldría o por dilatación o por contracción; de hecho en su opinión se salió por dilatación, aunque no podía dar razón de por qué había ocurrido así. Tal vez para evitar esta indeterminación poco airosa, en una nueva formulación de su teoría en 1931 se inclinó al estado inicial casi puntual, solución que se ha hecho célebre con el nombre de *teoría del átomo primitivo*. A esta hipótesis de la expansión y de que por consiguiente el corrimiento hacia el rojo de las rayas espectrales de las nebulosas era un efecto cósmico de la misma, añadió todavía Lemaître otras dos hipótesis: que la evolución se opera manteniéndose la masa del Universo constante y que la presión en el conjunto del Cosmos es nula. Esta última hipótesis significa que se prescinde tanto de la agitación de la materia, trátase de estrellas o de polvillo cósmico, como de la presión de radiación que reina en el espacio, lo cual en rigor no corresponde a la realidad; pero claro está que a lo menos en primera aproximación el influjo de la presión de radiación en la energía del Cosmos se puede considerar despreciable al lado del de la materia y la hipótesis, por lo tanto, es admisible. En cuanto a la otra hipótesis, que combinada con la primera suposición equivale a postular que la masa del Universo es la del modelo de Einstein, es en opinión de Couderc la más arbitraria de todas y sólo justificable por el éxito, máxime que implica la elección de un valor concreto de la constante cosmológica y la aceptación de que el espacio es cerrado. A base de estas hipótesis y recordando las

expresiones [10 a] y [11] de Einstein, se ve que la 2.^a de las ecuaciones [21] de Friedmann toma aquí la forma

$$\frac{3c^2}{R^2} + 3H^2 = \frac{c^2}{R_E^2} + \frac{2c^2R_E}{R^3} = \Lambda + \frac{2c^2R_E}{R^3} \quad [22]$$

(recordando que en este caso prescindiendo de un factor de proporcionalidad se tiene por hipótesis $\rho_E R_E^3 = \rho R^3$), siendo $H = \frac{R'}{R}$

la constante de la expansión y R_E el radio del universo de Einstein. Según la forma de la teoría de Lemaitre de que se trate, R_E es el radio del estado inicial del Universo real en su evolución o de uno de los estados transitorios por que atraviesa, aunque especialmente característico. En el primer caso, tras una permanencia en el estado de Universo de Einstein, el Universo real, quizás de resultas de la floculación de una capa de gas en estrellas y galaxias u otra causa parecida, perdió en un momento dado su equilibrio y se lanzó por el camino de la expansión, como habría podido hacerlo por el de la contracción. En el segundo, después de haber estado reunida toda la materia en un bloque inicial muy denso (Lemaitre pensaba en un átomo o neutrón inicial de radio ligeramente inferior al de la órbita de Marte y densidad 10^{14} gr/cm³, cien millones de toneladas por cm³) habría tenido lugar una explosión enorme radiactiva que habría dado origen a una expansión asimismo violentísima en la misma época en que habría comenzado la expansión en el primer caso, la cual en breve tiempo habría llevado el radio del Universo a valores muy próximos al valor R_E del radio del modelo de Einstein. No obstante como la atracción tenía que superar entonces de mucho a la repulsión cósmica, la expansión tuvo que verse frenada desde el principio, y el Universo habría podido volverse a contraer, si hubiese llegado al estado de equilibrio de Einstein con una velocidad de expansión nula; pero, de hecho, de resultas de la gran impulsión inicial, llegó con una velocidad residual no nula y así, después de atravesar dicho estado, pudo llegar a otro en que la repulsión cósmica fuese prevalente y seguir entonces expansionándose, incluso con velocidad creciente. Como las condiciones actuales serían las mismas en ambos casos, nada permitiría pronunciarse por uno u otro, si no fuese porque un gran número de indicios independientes entre sí y sin relación con esta teoría sugieren la existencia en un pasado remoto de un estado hiperdenso del Cosmos. En todo caso el orden de magnitud de la velocidad de fuga de las galaxias parece indicar que la expansión tiene que estar bastante avanzada y que el radio actual del Universo debe ser un múltiplo apreciable del radio inicial de la actual etapa de expansión. Recordando que la evolución se hace según Lemaitre permaneciendo constante la masa y comparando la densidad media actual estimada por Oort con la calculada para el modelo einsteiniano, se ve que ésta habría disminuido unas 400 veces, lo que exigiría que el radio hubiese crecido unas siete veces y media.

Hasta poco antes de las últimas correcciones de Baade se estimaba por otro procedimiento, que dicho crecimiento era de unas diez o doce veces y que, por tanto, el volumen habria aumentado, por lo menos, unas mil veces; dada la inseguridad todavía reinante sobre el valor actual de ρ , no hay dificultad en admitir este valor al considerar el interesante problema que ya mencionamos a propósito de los universos de Einstein y de De Sitter: la máxima distancia alcanzable por los rayos luminosos que actualmente se emiten y correlativamente la máxima distancia de que pueden provenir los que recibimos. En el modelo de Einstein cabía la posibilidad de que tales rayos diesen la vuelta entera al Universo y convergiesen, al cabo de un cierto tiempo, en el punto antipodal del de origen y luego, en este mismo, formando en ellos imágenes de la fuente emisora. En el modelo de Lemaître tal posibilidad dependerá del momento en que se produzca la emisión, pues a partir de un cierto instante el grado de la expansión será tal que ya no podrán llegar nunca los rayos a dar la vuelta completa al Universo y a partir de otro ni siquiera lograrán alcanzar el punto antipodal. Contra lo que cabría suponer, es fácil demostrar que el máximo arco describable por un rayo de luz es independiente de la velocidad de expansión H y sólo depende de la razón Q del radio del Universo en el instante de la emisión al radio inicial. Y viceversa que a cada arco que puede llegar a describir la luz corresponde un valor preciso de la razón q . Realizando los cálculos se ve que para que el arco descrito pueda llegar a valer 2π , el valor de Q no puede exceder de 1,003, y que para que pueda llegar a valer π , Q no puede pasar de 1,073. Es decir, sólo pueden dar la vuelta entera al Universo los rayos emitidos mientras el proceso de expansión no pasaba del 3‰ y sólo pueden alcanzar los antipodas los emitidos antes de que tal proceso llegue al 7,3 %. Supuesto que ahora Q valga aproximadamente 10, la máxima porción de arco de círculo máximo que podrán cubrir los rayos que actualmente se emiten no podrá pasar del 17 % de la longitud de dicho círculo. Si tomamos como valor inicial del radio $R_0 \simeq 10^9$ años de luz, la máxima distancia alcanzable será ahora de 1.700 millones de años de luz; los objetos más alejados serán definitivamente inalcanzables para nosotros. Recíprocamente, supuesto que hayamos llegado a este grado de expansión, los únicos rayos emitidos en el punto donde ahora estamos, que podrían llegar a converger en él, serán los emitidos antes de que la expansión llegase al 2,5‰ y los únicos procedentes de nuestros antipodas los emitidos antes de que la expansión llegase al 6,1 %. Quiere ello decir que, si un día tal convergencia se daba, podríamos ver el estado del punto en que nos hallamos y de nuestro punto antipodal casi al principio de la expansión. En cuanto a la máxima distancia 0,17 alcanzable por los rayos que ahora emitimos, tanto se aplica al caso de ser el arco descrito único, como al de estar compuesto por una serie de idas y venidas, como ocurriría si pudiésemos comenzar a intercambiar señales con una nebulosa lejana. Si, por ejemplo, nos pudiésemos poner en comunicación con los hipotéticos habitantes de un planeta de al-

guna de las estrellas de una nebulosa de la Osa Mayor, que dista unos 130 millones de años de luz, supuesto $Q \simeq 10$, tal distancia viene a ser 0,013 del radio del Universo; basta multiplicar este valor por 14 para ver que ya pasa del fatídico 0,17 antes mencionado; luego quiere ello decir que les podríamos enviar, a lo más, seis mensajes y recibir de ellos seis respuestas; la respuesta al primer mensaje la habríamos tenido que aguardar 260 millones de años; para la respuesta al sexto la espera sobrepasaría los mil millones; la contestación al séptimo no nos podría llegar nunca. Se ha supuesto q aproximadamente igual a 10; lo único que cabe afirmar es que probablemente $Q \leq 15$; pero sea de ello lo que fuere, lo seguro es que en la competencia entre un rayo de luz y la expansión del Cosmos, tarde o temprano acaba ésta por dominar. Así se ve mejor el sentido que tenía estudiar las posibilidades de un Universo vacío tipo De Sitter; lógicamente si el proceso expansivo de Lemaître se está efectivamente realizando, llegará un momento en que cada nebulosa sea el único objeto que exista en la parte del Universo observable desde ella: a menos de estar informados por los testimonios del pasado, los hipotéticos astrónomos de aquel entonces se podrán creer solos en un Universo que, no obstante, sabemos estará ocupado por un número de nebulosas superior a cuanto puede crear la imaginación.

El Universo de Lemaître es un caso particular de Universo de Friedmann en que hemos supuesto que la masa no sólo se mantenía constante durante la evolución, sino que su valor era precisamente el que tenía en el modelo de Einstein dado por la [12] $M_E = \frac{4\pi^2 c^3}{\kappa \Lambda}$.

Variando las hipótesis obtendríamos otros modelos cuyo estudio presentaría no menores curiosidades que el de Lemaître. ¿Qué ocurriría, por ejemplo, si la masa fuese mayor o menor que la del caso einsteiniano, es decir, si en vez de un Universo de masa, digamos, normal, lo tuviésemos de masa excesiva o deficiente? En el primer caso la función $R(t)$ se prueba fácilmente que no podría tener ningún máximo ni mínimo, es decir, que el radio del Universo crecería indefinidamente a partir de su valor inicial, pero la expansión no se haría a velocidad constante, sino que se iría frenando y ella sí pasaría por un mínimo, tanto más importante cuanto mayor fuese el exceso de M sobre M_E . Se ha calculado a qué valor del radio tendría lugar dicho mínimo para

cada valor de la masa y se ha encontrado la relación $R/R_E = \sqrt[3]{M/M_E}$, es decir, que para un Universo de masa ocho veces la einsteiniana, el mínimo en la velocidad de expansión se presentaría al pasar el radio por el valor doble del de R_E . En cambio, en un Universo de masa deficiente habría dos valores del radio, $R_1 < R_2$, entre los que la derivada $R'(t)$ sería imaginaria; quiere ello decir que si tal Universo comenzaba a evolucionar con un radio igual a R_1 sólo se podría contraer, y si comenzaba con un radio R_2 sólo se podría expandir; pero si se expandía con un radio $R < R_1$ al llegar a este valor crítico el proceso

se tendría que invertir y comenzaría a contraerse y viceversa, si se estuviese actualmente contrayendo con un valor del radio $R > R_2$, al llegar a este valor se produciría también la inversión del proceso y se comenzaría a expandir.

Otra curiosidad es el estudio del consumo de energía que supone el eventual trabajo de la expansión y su procedencia.

Tampoco se trata ya tan sólo del Universo de Lemaître, sino en general de un Universo de Friedmann. Recordando la expresión de la energía propia de todas las masas del Universo, la densidad de energía en el mismo viene dada por la expresión $\rho c^2 = \rho_U$. Substituyendo entonces ρ por ρ_U en la segunda ecuación de las [21], derivándola respecto del tiempo e introduciendo en el resultado la diferencia que proviene de restar de la primera esta misma segunda ecuación de las [21] se llega a la expresión.

$$\frac{d\rho_U}{dt} + \frac{3}{R} \frac{dR}{dt} (\rho_U + p) = 0 \quad [23]$$

Si entonces se representa por V el volumen del Universo ($V = 2\pi^2 R^3$), su energía total E será

$$E = V\rho_U = 2\pi^2 R^3 \rho_U \quad [23 a]$$

Diferenciando esta expresión, transformándola a vista de la [23] y simplificando, resulta finalmente

$$dE + p dV = 0 \quad [23 b]$$

expresión verdaderamente curiosa, pues nos dice que en el Universo, como si se tratase de un gas que se expande, el consumo de energía viene dado por el producto de la presión por el cambio de volumen.

Una última curiosidad. Las ecuaciones de Friedmann contienen naturalmente como caso especial el posible estado de equilibrio del Universo, para lo que basta suponer en ellas constante el radio y por lo tanto nulas sus derivadas primera y segunda respecto del tiempo. Tomarán entonces la forma, haciendo $z = +1$,

$$\frac{c^2}{R^2} = \Lambda - \frac{\kappa p}{c^2} \quad \frac{3c^2}{R^2} = \Lambda + \kappa \rho \quad [24]$$

Como se ha hecho notar al tratar de los universos de Einstein y De Sitter, se puede pensar en dos casos extremos de equilibrio: o bien un universo lleno de materia, pero sin radiación, o por el contrario un universo con radiación, pero sin materia. Al primer caso se llega haciendo en las ecuaciones [24] $p = 0$; al segundo, según una bien conocida relación de la Física teórica, haciendo $3p = \rho_U$. En el primer caso se llega a las ya conocidas ecuaciones [11] del caso einsteiniano, y se sabe que la masa total del Universo vale $M_E = \frac{4\pi^2 c^3}{\kappa \Lambda}$.

En el segundo caso las [24] se convierten en

$$\frac{c^2}{R^2} = -\frac{\kappa\rho}{3c^2} + \Lambda \quad \frac{3c^2}{R^2} = \kappa\rho + \Lambda = \frac{\kappa\rho_U}{c^2} + \Lambda \quad [25]$$

de las cuales se deduce por simple adición, después de multiplicar la primera por 3,

$$\frac{3c^2}{R^2} = 2\Lambda \quad [26]$$

y combinando esta expresión con la primera de las [25]

$$\rho_U = \frac{\Lambda c^2}{\kappa} \quad [27]$$

Y para la masa del Cosmos resultaría en este caso

$$M_s = \frac{3 \sqrt[3]{3\pi^2 c^3}}{\kappa \sqrt[4]{2\Lambda}} \quad [28]$$

Si designamos por R_E y R_S los valores del radio del Universo en ambos casos se obtiene asimismo sin dificultad, con ayuda de la primera de las [11] y la [26]

$$\frac{R_S}{R_E} = \sqrt[4]{\frac{3}{2}} \simeq 1.225 \quad [29]$$

y entonces la relación de las masas en ambos casos extremos resulta ser, recordando la [12],

$$\frac{M_S}{M_E} = \frac{3 \sqrt[3]{3}}{4 \sqrt[4]{2}} \simeq 0.919 \quad [30]$$

Con lo que se llega al sorprendente resultado, sobre el que ya Eddington llamó por primera vez la atención, de que en los dos casos extremos de equilibrio, al parecer tan diversos, coinciden dentro de un límite del 10 %, los valores resultantes para la masa total del Cosmos. La paradoja es realmente inesperada y notable; aunque por lo demás normal, si hubiese tenido lugar, como supone Lemaître una evolución a masa constante desde un estado de Einstein a un estado de De Sitter.

9. MODELOS QUE PRESCINDEN DEL PRINCIPIO COSMOLÓGICO

Todos los modelos hasta aquí examinados suponen siempre que las leyes gravitatorias de la Relatividad General se complementan con el principio cosmológico de la distribución homogénea de la materia; con el decurso del tiempo no han faltado tentativas de prescindir de este último, alegándose ser ello más conforme con la realidad. Aunque

la utilidad de tal convención sea harto discutible, pues, como dice Bondi, parece aumentar más el número de los problemas que el de las soluciones, es interesante exponer aquí las líneas generales de alguno por lo menos de tales sistemas, antes de pasar a otros tipos de soluciones, para dejar más completo el cuadro de las contribuciones deducidas de la ley einsteiniana de la gravitación a la solución al problema cosmológico. Como tipo de ellos daremos una idea del propuesto por Omer en 1949 basado en los postulados siguientes: a) el comportamiento mecánico del modelo ha de permitir el empleo de coordenadas *comóviles*, es decir, la materia local ha de poder servir de vehículo del sistema de coordenadas y encontrarse por tanto en reposo respecto del mismo; b) la distribución de la materia posee simetría esférica y el observador se encuentra provisionalmente cerca del centro de simetría; c) la presión puede considerarse prácticamente nula, es decir, las interacciones de marea y la presión de radiación entre nebulosas son despreciables comparadas con sus fuerzas gravitatorias. Como se ve, la eliminación de la hipótesis de la distribución homogénea de la materia no es tan radical como cabría imaginarse; pero es claro que ciertas hipótesis simplificadoras son indispensables si se han de poder establecer ecuaciones diferenciales que, aunque ahora ya no puedan ser lineales, no obstante sean todavía abordables. Con las hipótesis anteriores probó Omer que las ecuaciones del campo quedan satisfechas por los potenciales gravitatorios dados por la métrica.

$$ds^2 = dt^2 - \frac{1}{c^2} \left[\left(\frac{\partial Y}{\partial R} \right)^2 dR^2 + Y^2 d\theta^2 + Y^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right]$$

en donde Y es una función de R y t, que sea solución de la ecuación no lineal en derivadas parciales

$$\left(\frac{\partial Y}{\partial t} \right)^2 = c^2 f + \kappa \frac{h}{Y} + \frac{1}{3c^2} \Lambda Y^2$$

siendo f y h funciones arbitrarias de R; y κ y Λ las constantes de la gravitación y cosmológica. A una distancia R y para un tiempo t dados, la densidad ρ valdrá

$$= \frac{1}{8\pi} \frac{\frac{dh}{dR}}{Y^2 \frac{\partial Y}{\partial R}}$$

Fácil es de ver la complicación que se introduce en los cálculos. En este modelo la distancia entre dos puntos varía no solamente en función del tiempo, sino de la misma distancia; en él la expansión es general, pero en cada momento tanto su velocidad como la densidad de

la materia difieren de un punto a otro; en cada punto comienza en un medio muy denso y luego el modelo va tendiendo a un universo vacío tipo De Sitter en un tiempo infinito. Un horizonte óptico en el que el corrimiento al rojo $\Delta\lambda/\lambda$ llegue a valer 1 se sitúa a unos 1.200 millones de años de luz; más allá ningún instrumento óptico puede esperar detectar objeto alguno visible. Basándose en las mejores observaciones de que en su tiempo se disponía, obtuvo Omer para la densidad local $\rho = 10^{-29}$ gr/cm³; para la constante cosmológica $\frac{\Lambda}{c^2} = 8,8 \times 10^{-19}$ (años de luz)⁻²; para el radio de curvatura local $iR = 10^{10}$ años de luz y para el tiempo transcurrido en nuestros alrededores desde el comienzo de la expansión $3,6 \times 10^9$ años; naturalmente, como anteriores a las correcciones de Baade, todos estos valores deberían ser hoy calculados de nuevo.

10. MODELOS NEONEWTONIANOS

El éxito de las Cosmologías relativistas se debió en buena parte a la convicción de que, después de los fracasos de Neumann y Seeliger para solucionar la paradoja de Olbers, sólo la teoría gravitatoria de Einstein, como la más perfecta hasta entonces conocida, era capaz de llevar a una solución del problema del Universo como un todo; pero precisamente en el momento de mayor pululación de modelos de Universo de radio variable con el tiempo, demostraron Milne y Mc Crea la posibilidad de construirlos sin apartarse de la ley gravitatoria de Newton y las nociones clásicas de espacio y tiempo. Bastaba para ello agregar a las hipótesis de la homogeneidad no nula de la materia, la de que dicha materia no está en reposo, sino dotada en conjunto de un movimiento de expansión. Suponiéndola al igual que en el caso de Einstein pulverizada y convertida en una especie de fluido en movimiento distribuido homogéneamente por el espacio, Milne y Mc Crea en 1931-34 y Heckmann en 1942 probaron que partiendo de las ecuaciones habituales de la Hidrodinámica completadas con la de Poisson, se podía representar el movimiento del conjunto de las nebulosas y llegar prácticamente a las mismas soluciones que ofrece la teoría de la Relatividad, con la ventaja de haberlas obtenido con aparato matemático mucho menos complicado y por lo mismo de comprensión más general y asequible.

Algunos como Vogt creyeron que la hipótesis de la expansión podía ser pura y simplemente admitida como un hecho de observación; otros, como Milne y Bondi, prefieren admitir como postulado que la materia no está en reposo y demostrar entonces que los únicos movimientos compatibles con la homogeneidad e isotropía son los de dilatación o contracción uniforme, algo así como un vaivén regido por un factor dependiente del tiempo. En todo caso la velocidad media de este movimiento es radial y la densidad y la presión dependen sólo del tiempo. Asimismo como consecuencia de la hipótesis de homoge-

neidad, la deformación del sistema, de resultados de la expansión, ha de ser homotética; de modo que, como las nebulosas, según la expresión [14], se alejan de nosotros con velocidad proporcional a la distancia, si R_0 y ρ_0 son el radio y la densidad iniciales, se ha de tener en todo momento, prescindiendo de un factor de proporcionalidad,

$$\rho_0 R_0^3 = \rho R^3 \qquad \frac{\rho_0}{\rho} = \frac{R^3}{R_0^3} \qquad [31]$$

Esto supuesto, es claro que cada nebulosa se aleja asimismo de cada una de las restantes situadas a distancia r con una velocidad [14] y que por tanto cada una de ellas presentará respecto de las otras una aceleración $a = (H^2 + H')r$. Ahora bien, como la materia del Universo está sometida a la gravitación, lo obvio es examinar si con ella sola se puede explicar este fenómeno. Pues bien, si la distancia de una nebulosa al observador viene dada por la expresión

$$r = \frac{r_0}{R_0} R(t) \qquad [32]$$

siendo $\frac{r_0}{R_0}$ una constante propia de cada nebulosa que da su distancia en el momento t_0 , es fácil ver que $R(t)$ satisface a una ecuación de la forma

$$\left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{8\pi G \rho_0 R_0^3}{3R} + h \qquad [33]$$

de la cual se deduce inmediatamente la integral newtoniana más general del movimiento. h es la llamada constante de la energía, la cual, como luego veremos, determina el carácter general de la solución. En efecto la ecuación del movimiento y la de Poisson dan en este caso, llamado \vec{F} a la intensidad del campo gravitatorio,

$$\vec{F} = \vec{r} [H'(t) + H^2(t)] \qquad \text{div } \vec{F} = -4\pi G \rho \qquad [34]$$

y por tanto (por ser $\vec{F} = \frac{1}{3} \vec{r} \text{div } \vec{F}$)

$$3[H'(t) + H^2(t)] = -4\pi G \rho$$

o lo que es lo mismo, poniendo explícitamente la función $R(t)$ y sus derivadas,

$$R^2 \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{4\pi G}{3} \rho_0 R_0^3 = 0 \qquad [35]$$

cuya integral primera es la [33]. Enseguida se ve que si R es constante, no puede haber solución estática, a menos de ser $\rho = 0$. Es la dificultad de que ya se hizo mención al mencionar las tentativas de

solución newtoniana anteriores a Einstein. Como ahora se admite que el Universo está en expansión (y que igualmente habría podido estar en contracción) tal dificultad desaparece y según sea la constante h , negativa, nula o positiva, resultará un Universo con movimientos de carácter elíptico, parabólico o hiperbólico. En el primer caso se expansionaría con velocidad cada vez menor hasta un determinado máximo y se contraería luego con velocidad creciente; en el segundo se expansionaría indefinidamente, pero con velocidad decreciente tendiendo a cero; y por último en el tercero se expansionaría también indefinidamente, pero con velocidad tendiendo a un valor finito distinto de cero. Para poder obtener la solución estática sería necesario modificar la ley de Newton añadiendo a la expresión de la aceleración un término proporcional a la distancia e independiente de la densidad, equivalente al término cosmológico de Einstein. La expresión de dicha aceleración es entonces

$$\vec{F} = -\frac{4}{3} \pi G \rho r \vec{r} + \frac{1}{3} \Lambda r \vec{r} \quad [36]$$

con lo que la ecuación [35] se transforma en

$$R^2 \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{4}{3} \pi G \rho_0 R_0^3 - \frac{1}{3} \Lambda R^3 = 0 \quad [37]$$

y finalmente la [33] toma la forma

$$\left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{8\pi G \rho_0 R_0^3}{3R} + h + \frac{1}{3} \Lambda R^2 \quad [38]$$

Ahora bien, esta ecuación es la misma que se obtiene en las Cosmologías relativistas, como se ve fácilmente haciendo en las [21] $p = 0$, por ser p despreciable ante ρ , multiplicándolas por R^3 y restándolas; resultará una expresión análoga a la [35] que integrada lleva a una ecuación equivalente a la [38]. La [38] puede ser integrada por funciones elípticas; pero para nuestro propósito basta una integración cualitativa aproximada, como se verá. Lo mismo que en el caso relativista, no hay absoluta necesidad de introducir este término correctivo en la ley de Newton, supuesto que no se buscan soluciones estáticas; pero tanto aquí como allí es innegable que su introducción presente notables ventajas y en particular aumenta las posibilidades de modelos de Universo tan ricos como las soluciones relativistas, correspondientes a las hipótesis de ser $\Lambda \gtrless 0$ en cada uno de los casos antes indicados correspondientes a $h \gtrless 0$; h , como se ve, desempeña ahora el papel de la constante z . No repetiremos aquí los cuadros de los casos posibles; creemos será más interesante agruparlos según el comportamiento de la función $R(t)$. Λ_F representa, como es obvio,

el valor de Λ correspondiente al universo relativista einsteiniano. He aquí los casos principales:

a) Universos en que R oscila entre cero y un valor finito; son los casos correspondientes a $h > 0, \Lambda < 0$; $h = 0, \Lambda < 0$; $h < 0, \Lambda \leq 0$, o bien $0 < \Lambda < \Lambda_E$

b) Un modelo en el que R disminuye desde un valor infinito a otro finito y luego vuelve a crecer indefinidamente; es una solución sin puntos singulares, en la que el Universo no necesita pasar por un estado de densidad infinitamente grande y corresponde al caso $h < 0, \Lambda > 0$.

c) Modelos en que R en un momento dado parte de $R = 0$ y crece indefinidamente. Son los casos $h > 0, \Lambda > 0$; $h > 0, \Lambda = 0$; $h = 0, \Lambda > 0$; $h = 0, \Lambda = 0$; $h < 0, \Lambda = \Lambda_E$. En los casos primero, tercero y quinto dR/dt pasa por un mínimo; en los otros, no.

d) El modelo estático e inestable de Einstein ($h < 0, \Lambda = \Lambda_E$).

e) Un modelo en el que R en el pasado se acerca asintóticamente a un valor finito y para el futuro crece indefinidamente con velocidad creciente. Es el modelo de Eddington-Lemaître ($h < 0, \Lambda \geq \Lambda_E$).

f) Un modelo en que R partiendo de cero crece con velocidad decreciente y así se acerca asintóticamente a un valor finito ($h < 0, \Lambda \leq \Lambda_E$).

Cualitativamente, estas soluciones son las mismas que se presentan en las Cosmologías relativistas, sólo que allí a la constante z , que desempeñaba el papel que tiene aquí h , sólo se le atribuyen los valores 1, 0, -1 . Hay que notar asimismo que, en rigor, las ecuaciones anteriores sólo valen para el fluido que Milne llama *substrato*, es decir, los elementos de una materia que llene todo el espacio distribuida uniformemente. Para poderlas aplicar también con suficiente aproximación al movimiento de un sistema de condensaciones materiales, deberían las distancias r ser muy grandes respecto de la distancia mutua de dos masas vecinas, pues en los alrededores de una condensación de materia la función $H^2 + H'$ que servía para definir las aceleraciones mutuas de dos nebulosas ya no es independiente de r , dado que al crecer la distancia al centro de condensación irá apareciendo con mayor intensidad la repulsión correspondiente al término en Λ . Una consecuencia de esta teoría clásica es que nuestro Universo estaría limitado a la distancia en que la velocidad de fuga de las galaxias llegase a igualar a la de la luz, pues todo lo que esté más allá quedaría prácticamente inalcanzable para nosotros.

El hecho de que con sola la teoría newtoniana se pueda llegar a soluciones formalmente iguales en la práctica a las proporcionadas por las elucubraciones de Einstein podría hacer mirar éstas últimas como inútiles. En realidad no es así; pues, como observa Bondi, tales soluciones en bastantes casos sólo se justifican de modo aproximado; y sobre todo, las consecuencias que se deducen de ellas, relativas al aspecto que ofrecería el sistema de los observadores situados en el interior del Universo, se tendrían que basar forzosamente en las con-

cepciones newtonianas referentes a la propagación de la luz; ahora bien, hoy día se sabe que no pocas de éstas son insostenibles y exigen, por lo mismo, ser complementadas con ideas y procedimientos post-newtonianos. De aquí que las soluciones que acabamos de exponer, aunque complementen y aclaren las encontradas por Einstein, no puedan pretender reemplazarlas del todo.

11. MODELOS DE UNIVERSO DEDUCIDOS DE PRINCIPIOS UNIVERSALES

Los modelos de universo en cuya consideración entramos ahora, son fruto de concepciones enteramente diferentes de las que han presidido a la formación de los expuestos hasta aquí. Estos, en efecto, eran hijos de teorías que se esforzaban por construirlos partiendo de la validez anteriormente reconocida de determinadas leyes naturales en vigor en nuestras inmediaciones, como la atracción universal de Newton o las consecuencias gravitatorias de la Teoría de la Relatividad. El proceso es ahora unas veces inverso y otras fruto de preocupaciones enteramente distintas. Inverso, cuando la teoría da forma axiomática a principios lo más generales posible y de ellos procura deducir las leyes de la naturaleza destinadas a justificar los fenómenos locales, y aun de manera más general, de tales principios se quieren derivar las distintas ramas de la Física. Distinto, cuando los autores de tales sistemas se han sentido fuertemente impresionados por la consideración de ciertas relaciones que existen o parecen existir entre las constantes cosmológicas y las de la Física Atómica y creyendo ver en ello, no una coincidencia fortuita, sino una relación intrínseca de causa a efecto, se han esforzado por dar con un modelo de universo capaz de explicar la existencia de tales relaciones. No es fácil seguir el orden cronológico en la exposición de tales sistemas y menos aún hacer una relación exhaustiva de los mismos; pues no sólo han ido apareciendo entremezclados entre sí y con los que hemos denominado relativistas ortodoxos, sino que han sido tantos que su exposición exigiría un tiempo y espacio mayores que aquéllos de que disponemos. Por este motivo nos limitaremos a dar cuenta de los que en cada grupo han alcanzado mayor notoriedad, a saber, los de Milne, Whitrow, Gold y Bondi, Hoyle y McCrea en el primero y en el segundo los de Eddington, Dirac y Jordan.

12. EL CONCEPTO MÚLTIPLE DEL TIEMPO Y EL UNIVERSO CINEMÁTICO MILNE

Las ideas básicas de la teoría de Milne han sido muy diversamente expuestas; a nuestro juicio dos son los conceptos que impregnan todas sus concepciones. El primero que la característica esencial del Universo es la expansión, hasta tal punto que para armonizarlas con ella revisa una tras otra las partes de la Física, la Dinámica, la Gravitación, el Electromagnetismo, las teorías de las partículas elementales: precisamente da a su Cosmología el epíteto

de *cinemática* porque en su base se encuentra este elemento cinemático en que la expansión se traduce. Y en segundo lugar, el concepto del tiempo como flujo, tan importante también, que para Whitrow llega a ser el concepto primordial, pues, según él, la expansión no es para Milne sino la manifestación suprema del flujo del tiempo. En eso se separa resueltamente Milne de la concepción ordinaria del tiempo que podríamos llamar «geométrica», según la cual en los procesos físicos no expresa otra cosa que la duración, el «entre», y puede considerarse reversible; para Milne es esencial el «antes» y el «después», es decir, la característica que en la Física clásica presenta el tiempo en el segundo principio de la Termodinámica; al hacerla suya, se resignaba de antemano a todas las antipatías y oposiciones con que la entropía tropieza. En este aspecto no le habían faltado precursores, pues, tres años antes, en su ensayo *Archimedes or the Future of Physics*, había hecho notar Whyte, que en cada una de las grandes teorías físicas del siglo aparecidas hasta su época el papel fundamental estaba desempeñado por una de las llamadas constantes de la Naturaleza: por la velocidad c de la luz en la de la Relatividad y por la constante de Plank h en la de los quanta; tras lo cual sugería que el próximo progreso debería estar asociado a una nueva constante fundamental y profetizaba que ésta sería, probablemente, el tiempo como flujo.

Pero no es ésta la única modalidad nueva introducida por Milne en la consideración del tiempo; para él no puede existir una medida fija del mismo. El orden de sucesión de dos acontecimientos para un observador dado sí es fijo, el mismo en cualquier escala del tiempo que pueda adoptar; pero, en cambio, la velocidad a que se suceden, el lapso de tiempo entre ambos, no. Milne cree que muchos fenómenos naturales pueden servir de base para el establecimiento de escalas de tiempo que sean físicamente significativas y, no obstante, no sean uniformes, es decir, tales que dos sucesos dados no se sucedan a intervalos iguales respecto de ambas. Todo fenómeno que se repite, una vibración luminosa, un astro que describe una órbita, puede servir de reloj; pero como no es posible comparar directamente intervalos de tiempo transcurridos en épocas distintas, es imposible hablar sin más del «flujo uniforme del tiempo». Hay que recurrir a los relojes y para que dos relojes físicos diferentes (por ejemplo un reloj atómico y otro dinámico) vayan uniformes, es obvio que deberían conservar, en todo momento, la misma razón de sus períodos; ahora bien es claro que si aumenta la longitud de onda y , por tanto, disminuye la frecuencia de una vibración luminosa, o diversas causas frenan o aceleran la rotación del globo, tal correspondencia no podrá subsistir; por esto cada fenómeno ha de tener su medida propia del tiempo, y como consecuencia los grandes números sin dimensiones que podemos hallar como expresión de la relación entre las llamadas constantes naturales, tales como, por ejemplo, la razón entre las fuerzas gravitatorias y eléctricas del electrón y el protón, o la relación entre el quantum eléctrico elemental y el quantum de acción, cuyo tiempo

propio es para Milne el «atómico», medidos en tiempo «dinámico», propio de los fenómenos macroscópicos del mundo que nos rodea, como las oscilaciones del péndulo, pueden variar lentamente. La Relatividad Cinemática niega que, de hecho, tal variación se verifique. Esta posibilidad de utilizar varias escalas es de capital importancia en la teoría de Milne; lo esencial para emplearlas es que dos escalas se puedan relacionar matemáticamente, es decir, que entre los relojes ajustados a una y otra pueda tener lugar una *regraduación*.

En cuanto a la medida del espacio, la utilización de la regla rígida la condiciona Milne a que se tenga un criterio de aplicación simultánea de sus extremos y éste lo busca en la conciencia que tiene el observador del flujo del tiempo y en la transmisión de señales luminosas; este método que cuando lo formuló, muchos tacharon de ilusorio (no obstante, haber sido ya preconizado por Poincaré en 1906), nos parece hoy natural, pues no es otro que el empleado para medir distancias por medio del radar; y en opinión de Bondi es mucho más perfecto que el de la regla rígida de las otras teorías, ya que se sirve del mismo fenómeno que, de hecho, usamos en la práctica para la medición de distancias celestes. También admite Milne la apreciación de distancias por medida de ángulos, sobre todo entre rayos de luz, con ayuda de instrumentos del tipo teodolito.

Esto, supuesto el principio cosmológico que establece Milne, como punto de partida de su teoría, lo formula afirmando que las observaciones que puede llevar a cabo cualquier observador fundamental con ayuda de su reloj y su teodolito resultan siempre iguales a las realizadas en el mismo instante por cualquier otro observador fundamental dondequiera que se halle. Enseguida se ve que este principio es menos general que el de equivalencia en que se apoyan las teorías relativistas e incluso las newtonianas, pues en ellas se postula la equivalencia de todos los observadores, con independencia de su posición y movimiento relativo. En cambio aquí no se va tan lejos: la equivalencia se afirma tan sólo entre los observadores que se llaman *fundamentales*, esto es, los que se hallan en tales circunstancias que tengan el mismo golpe de vista del Universo y, así, por ejemplo, si la gravitación es una consecuencia de la distribución general de la materia en el Cosmos, sólo serán equivalentes los observadores que se hallen en igual situación, respecto de esta distribución general de la materia.

Entrando ya en la exposición del sistema, Milne reemplaza los sistemas de coordenadas comóviles por los observadores que pueblan el Universo. Asimila para ello el Cosmos a un gas uniforme que denomina *substratum*, cuyas partículas llevan consigo observadores ideales, cada uno con su sistema de referencia propio: son los llamados observadores *fundamentales*; como todos tienen la misma visión del Universo, son equivalentes y por hipótesis pueden cambiar información entre sí. Algunos piensan que con este punto de partida Milne renuncia de un golpe a la realidad objetiva del espacio y el tiempo y se mete por las sendas del idealismo: no compartimos esta opinión: lo único que hace Milne es una antropomorfización de los sistemas de

coordenadas inanimados. Si un observador O_1 emite una señal en un instante t_1 a otro observador O_2 y éste la devuelve instantáneamente a O_1 que la recibe en el instante t_2 , la distancia entre ambos queda definida por la relación $r = 1/2c(t_2 - t_1)$, consecuencia inmediata de la equivalencia de los observadores. Como la propiedad básica del Universo es la expansión, cada observador se aleja de los otros con movimiento rectilíneo y a velocidad constante en el sistema de referencia de cada uno de ellos; eligiendo convenientemente el origen del tiempo, es claro que sus distancias mutuas serán proporcionales al tiempo absoluto t . Al cabo de cierto tiempo todo el sistema de observadores fundamentales acabará por encontrarse animado de velocidades de alejamiento mutuo según la ley de Hubble; y como al separarse disminuye el efecto gravitatorio, acabarán por moverse libremente y las mismas velocidades relativas tenderán a ser uniformes. Milne examina entonces si un observador puede regraduar su reloj de modo que marque el mismo tiempo que el de otro y resuelta afirmativamente la cuestión, se pregunta si es posible que un grupo completo de observadores coincidan en tiempo universal, es decir, quiere comprobar el Principio Cosmológico, según el cual el resultado de las observaciones de cualquier observador fundamental es idéntico al resultado correspondiente de las de otro, o dicho de otro modo, establece la invariancia del Universo respecto de los cambios de observador; y para pasar del sistema de referencia de un observador al de otro prueba que basta recurrir a la transformación de Lorentz.

Se ha atacado mucho este concepto de substratum, sobre todo porque en un paso ulterior identifica Milne sus partículas con los núcleos de las nebulosas, alegándose que, si el substratum es continuo, tal identificación de sus elementos con objetos forzosamente discretos no puede tener sentido. Fuera de que la objeción igualmente se podría formular contra cualquier Cosmología que prescindiera de las irregularidades locales en la distribución de la materia, es de lamentar que tales impugnaciones se hayan producido a veces en tal forma, que hayan provocado en los censurados un efecto de inhibición y como menosprecio de toda crítica, reacción siempre lamentable, pero más tratándose de una teoría de carácter tan eminentemente deductivo, en que es de primordial importancia poder apreciar con exactitud todo paso menos riguroso del raciocinio; el resultado ha sido que desgraciadamente la teoría ha quedado en algunos aspectos inacabada.

Como que el movimiento relativo de los observadores fundamentales acaba por ser uniforme, vale entre ellos una relación de distancia-velocidad, equivalente a la [14], que podemos escribir $v = r/t$. Como se ve, en ella aparece explícitamente el tiempo, que puede ser considerado como la edad del sistema, de modo que a dos valores distintos de t correspondan dos configuraciones diferentes del conjunto de observadores fundamentales. Además de este tiempo t , especialmente adaptado a los fenómenos electromagnéticos y atómicos y en particular a la expansión, para los observadores macroscópicos y fenómenos de la vida corriente es preferible según Milne el que

llama tiempo dinámico τ , que a la vez resulta el más apropiado para los desarrollos de la Mecánica clásica. El paso de una escala a otra o sea la graduación del tiempo se define por la expresión

$$\tau = t_0 \log_e \frac{t}{t_0} + t_0 \quad [39]$$

siendo t_0 la época actual en la escala t que comporta un origen $t = 0$. En el momento presente los dos tiempos coinciden por hipótesis; pero cuando nos apartamos de él divergen tanto más cuanto más nos alejamos hacia el pasado o el futuro. De la [39] se deduce que en la escala τ el pasado es infinito; y si la diferenciamos, la igualdad

$$\frac{dt}{t} = \frac{d\tau}{t_0} \quad [40]$$

nos dice que en el instante actual para $t = t_0$, $\frac{dt}{d\tau} = 1$ y por tanto coinciden también los dos intervalos $dt = d\tau$; pero al apartarnos de él en cualquier sentido la discrepancia mutua de los dos tiempos crece por año a razón de una parte sobre 13.000 millones ya que al ser $t = t_0 + 1$, $\frac{dt}{d\tau} = \frac{t_0 + 1}{t_0}$, y t_0 se admite que vale $1,3 \times 10^{10}$ años; los

modernos progresos en la construcción de relojes atómicos y nucleares dejan entrever la posibilidad de poder comprobar un día directamente el aserto. En sus desarrollos Milne prefiere usar el tiempo t , porque no involucra la constante t_0 , pero todo cuanto establece podría ser descrito asimismo en tiempo τ . Ciertamente que las dos escalas son tan diferentes que con ellas se obtienen dos representaciones enteramente diversas del Cosmos, aunque íntimamente asociadas y cada una fundamental para ciertos grupos de fenómenos. Por lo demás no hay que maravillarse demasiado de que así ocurra. Como la velocidad de la luz es finita, es claro que lo que en un momento dado vemos no es el Universo tal como existe, sino una especie de superposición simultánea de cuadros correspondientes a estados sucesivos anteriores. Si queremos construir un mapa del Cosmos tendremos que corregir estos decalajes de tiempo y naturalmente las imágenes resultantes dependerán de la escala del tiempo adoptado. Si cambiamos de escala, nuestro mapa del Cosmos cambiará automáticamente; lo interesante es que tal vez dos o tres representaciones del Universo pueden tener sentido físico a la vez, como lo pueden tener dos cartas geográficas de la superficie terrestre en proyecciones distintas y será la utilidad la que determinará en cada caso a cuál se debe dar la preferencia. La idea de Milne es que con el empleo de sus dos escalas se obtienen representaciones del Cosmos que mutuamente se complementan y ambas son de capital importancia.

Comenzando por su modelo de partículas en expansión, las considera todas coincidentes en un instante particular correspondiente a la

época $t = 0$, que mira como un punto singular, origen del tiempo para el sistema, con anterioridad al cual la expansión carece de sentido; Milne lo identificó con el instante de la creación y sólo a partir de él consideró sus partículas como existentes. En cada dirección, en perfecta concordancia con el postulado de Weyl, se encontraría siempre una sola partícula que se desplaza a una velocidad cualquiera inferior a la de la luz; los rayos luminosos describen rectas. Al cabo de un tiempo t las partículas ocuparán el interior de una esfera de radio ct y las más lejanas parecerán alejarse con una velocidad tan próxima a la de la luz como se quiera. Como por el Principio Cosmológico para cualquier observador fundamental situado en cualquier partícula el aspecto y la historia del sistema han de ser los mismos, es necesario que el número de partículas sea infinito, pues de lo contrario tendría que haber un borde desde el cual el aspecto del sistema no podría ser el mismo que desde el interior; además a cada observador fundamental que pretenda trazar un mapa del Cosmos le ha de parecer que se halla en la época t_0 en el centro de una esfera limitada a la distancia ct_0 por una barrera material de densidad infinita. Esta representación, imposible de obtener con las fórmulas clásicas, es asequible mediante las de Lorentz; a la distancia ct se tendrá un efecto aparente de densidad infinita debido al factor de contracción de Fitzgerald-Lorentz. Como la transformación de Lorentz se aplica sobre todo a los fenómenos electromagnéticos, Milne opina que la escala del tiempo más adecuada a su medida es la del tiempo t y que por tanto un reloj electromagnético marcaría este tiempo; y como es presumible que lo mismo ocurra con los guardatiempos atómicos, tales como por ejemplo la frecuencia propia de una raya espectral, el tiempo propio de éstos ha de ser también el tiempo t .

Cuando se pasa al tiempo τ o, si se prefiere, cuando se hace la regraduación de la escala del tiempo mediante las fórmulas [39] y [40], la imagen que se obtiene del Universo es tan distinta que Whitrow la llega a considerar como otro modelo de Universo diferente, por más que en la mente de Milne estén tan íntimamente asociados como puedan estarlo dos representaciones cartográficas distintas de la superficie terrestre. Baste considerar que habiendo asegurado en sus trabajos de 1931 que la propiedad característica del Universo es la expansión, la escala de tiempo τ , que descubrió y comenzó a utilizar en 1936, le dio manera de describir el Universo como estático. Nada mejor para apreciar el aserto de Whitrow que la contraposición de algunas de las principales características del Universo en ambas escalas

Tiempo cinematográfico t

- El Universo está en expansión.
- Los observadores fundamentales se hallan en movimiento relativo uniforme.
- El volumen del Universo es

Tiempo dinámico τ

- El Universo es estático.
- Los observadores fundamentales están en reposo.
- El volumen del Universo es

finito y el substratum llena en cada momento una esfera de radio cr creciente con la velocidad de la luz.

- Hay un origen del tiempo, un momento inicial de creación equivalente al cero absoluto en la temperatura, anterior a toda experiencia posible.
- La distribución de la densidad es simétrica alrededor de cada observador y su valor medio disminuye monótonamente con el tiempo, pero crece monótonamente con la distancia, tendiendo a infinito al tender el valor del radio a ct .
- El espacio es euclídeo.
- Todas las longitudes crecen con el tiempo en la razón t/t_0 , todo se traslada uniformemente y cada observador fundamental ve fluir radialmente el substratum a velocidad constante.
- Las frecuencias atómicas son constantes.
- El momento angular y la constante de la gravitación, crecen según la razón t/t_0 .
- El potencial se propaga con la velocidad de la luz.
- Las órbitas planetarias son espirales equiangulares.

infinito y el substratum lo llena por entero.

- No hay origen del tiempo, sino que al cero del tiempo t corresponde el $-\infty$ de la escala τ .
- La densidad media es uniforme y constante.
- El espacio es hiperbólico lobatschewskiano.
- Las longitudes se mantienen constantes y todos los observadores fundamentales están en reposo relativo.
- Las frecuencias atómicas crecen constantemente.
- El momento angular y la constante de la gravitación se mantienen invariables.
- El potencial se propaga instantáneamente.
- Las órbitas planetarias son elípticas.

Para probar que las dos representaciones del Universo tienen sentido físico asocia Milne cada una de sus escalas del tiempo a guardatiempos naturales determinados; el tiempo t , a las vibraciones de una fuente luminosa-patrón de color dado; en esta escala los intervalos de tiempo entre las crestas sucesivas de las ondas luminosas son uniformes; el tiempo τ , al reloj patrón de la dinámica clásica, del que las oscilaciones del péndulo y la rotación de la Tierra son guardatiempos suficientemente aproximados. A este modo de representación no llegó a priori, sino que al desarrollar una dinámica del modelo en expansión en tiempo t y trasladarla luego a tiempo τ , encontró que las leyes que iba hallando coincidían con las de Galileo y Newton.

por lo que asimiló el tiempo τ al medido por el péndulo y la rotación de la Tierra.

En ambos casos tenía que explicar el corrimiento hacia el rojo de las rayas espectrales de las nebulosas. Como en el modelo en expansión en tiempo t las nebulosas efectivamente se alejan, puede recurrir sin más a la explicación clásica por el efecto Doppler. En cambio es preciso acudir a otra explicación en el modelo estático en tiempo τ . Como las vibraciones luminosas patrón guardan el tiempo t , los intervalos entre dos crestas de onda sucesivas no podrán ser uniformes en el tiempo τ ; aparecerá por tanto al medirlas en este tiempo un aumento gradual de la frecuencia o número de oscilaciones en cada intervalo-unidad de tiempo τ y consiguientemente irá disminuyendo la longitud de onda; en consecuencia la luz emitida en una nebulosa lejana por un átomo patrón nos parecerá desplazada hacia el rojo respecto de la de una fuente situada en el laboratorio porque la luz que recibimos de la nebulosa fue emitida hace mucho tiempo cuando su longitud natural de onda era mayor. Se ve, pues, que también en esta manera de medir el tiempo tiene el fenómeno explicación adecuada.

Es interesante notar de paso que la teoría de Milne es fecunda en consecuencias para la solución del problema de la evaluación de distancias de las nebulosas. Como se recordará, se basa ésta en la hipótesis de que estadísticamente se las puede considerar todas de igual magnitud absoluta, con lo que su magnitud aparente puede servir de criterio de distancia. El problema crucial consiste en encontrar una regla precisa que relacione las distancias con las magnitudes aparentes. Ahora bien ya se vio que esta regla dependía forzosamente del estado de quietud o movimiento de las nebulosas; pues si se las considera estacionarias, hay que atribuirles distancias mayores que si se admite que se alejan de nosotros, ya que por el hecho de la recesión se reduce la cantidad de luz que recibimos por unidad de tiempo. Es sabido que la energía de un fotón es el producto de su frecuencia ν por la constante de Planck h . Como la frecuencia aparente de la luz irradiada por una nebulosa que se aleja queda reducida por el efecto Doppler, Hubble deduce que tanto el número de fotones recibidos por unidad de tiempo de una nebulosa en fuga como su energía quedan disminuidos y de resultas se produce dos veces la misma reducción de brillo aparente; en el sistema de Milne por el contrario como h crece con el tiempo, se compensa la reducción de ν , con lo que sólo subsiste la reducción del número de fotones recibidos en la unidad de tiempo; luego el efecto de la recesión sobre la magnitud aparente es sólo la mitad de lo que vale en la teoría de Hubble; y consiguientemente, si las nebulosas efectivamente se alejan, según Milne estarán más lejos actualmente de lo que supone Hubble y no habrá por tanto el amontonamiento en el espacio y en el tiempo que éste cree encontrar y le retrae de admitir el alejamiento real de las nebulosas y consiguiente expansión del Universo.

Para completar su sistema tenía que dotarlo Milne de una teoría

de la gravitación. Conviénesse generalmente en que la concibe en conexión con la existencia en el Universo de partículas materiales libres aceleradas, distintas del substratum, y tales que sus aceleraciones en primera aproximación se deben deducir de la ley gravatoria de Newton. Lo que no es tan claro es cómo hay que llegar a su establecimiento y justificación, ya que ésta es precisamente la parte de su teoría que Milne dejó sin terminar. Milne siguió su propio camino para establecer las ecuaciones del movimiento del conjunto de las partículas libres respecto del substratum y lo consiguió en un espacio euclideo y mediante una regraduación del tiempo en un espacio-tiempo de Minkowski; Robertson, Walter y McVittie probaron que a base de las ideas de Milne era posible apelar a una métrica que en la forma coincidiese con la de las Cosmologías relativistas para el caso de un espacio hiperbólico, aun cuando la significación de las constantes que intervienen en las expresiones sea diferente en ambos casos. Quiere ello decir que en el fondo el Universo de Milne puede admitir ecuaciones de campo diversas y que por tanto bien mirado, sus modelos de Universo no son sino otra manera de explicar tipos ya encontrados por otros caminos.

En su explicación Milne se ciñe al tipo de espacio-tiempo de Minkowski y restringe el principio cosmológico a los cambios de coordenadas obtenidos mediante transformaciones de Lorentz. Superimpuesto al substratum considera un sistema estadístico de partículas *libres*, es decir, no fundamentales, sometido a las leyes siguientes: a) la aceleración de cada partícula libre es un invariante para las transformaciones de Lorentz que aseguran la equivalencia de las partículas del ecuaciones de campo diversas y que por tanto bien mirado, sus sistema fundamental; b) la evolución del sistema estadístico en su conjunto parece la misma desde cualquier punto; c) las partículas del sistema estadístico no son equivalentes con las del sistema fundamental ni entre sí. Bajo estas hipótesis deduce Milne que cada observador fundamental puede describir el movimiento de una partícula libre mediante un sistema de tres ecuaciones diferentes de 2.º orden que expresan su aceleración en función de sus coordenadas, velocidad y tiempo; vectorialmente podrá escribirse

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f}(\vec{r}, \vec{v}, t) \quad [41]$$

Como por el principio cosmológico la forma funcional de f tiene que ser la misma para todos los observadores fundamentales, mediante transformaciones de Lorentz se da a la expresión anterior la forma siguiente

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = (\vec{r} - \vec{v} t) \frac{Y}{X} G(\xi) \quad [42]$$

Siendo

$$X = t^2 - \frac{\vec{r}^2}{c^2} \quad Y = 1 - \frac{v^2}{c^2} \quad Z = t - \frac{\vec{v} \cdot \vec{r}}{c^2} \quad \xi = \frac{Z^2}{XY} \quad [43]$$

y G una función arbitraria de su argumento que define el sistema estadístico de partículas considerado. En rigor, en virtud de la transformación de Lorentz, G resulta ser función de X , $\frac{Z^2}{Y}$; pero Milne,

apelando a una hipótesis adicional que él llama *dimensional*, arguye que, como la [42] expresa las propiedades de un sistema tan simple como el substratum, para cuya definición no se hizo referencia a ninguna constante fundamental, G no puede depender de ningún argumento de dimensiones de tiempo o de longitud y que por tanto ha de ser función exclusivamente de ξ , ya que la combinación de X y $\frac{Z^2}{Y} = \xi X$ que da ξ es el único argumento posible sin dimensiones

para G . La parte vectorial de [42] determina la dirección de la aceleración \vec{f} : estará dirigida a lo largo de la línea que une la partícula libre a la fundamental dotada de la misma velocidad; como X e Y son positivos, dependerá del signo de G que el sentido sea acercándose a la partícula libre a la fundamental o al revés. En el primer caso, que se verifica cuando G es negativo, el sistema es estable y las velocidades relativas de las partículas libres respecto de las fundamentales tienden a disminuir; en el segundo caso es inestable. De hecho Milne prueba que se tiene $G \leq -1$. Dando un paso más, investiga Milne si un enjambre de partículas libres de distintas posiciones y velocidades superpuesto al substratum podría satisfacer el Principio Cosmológico y ofrecer el mismo aspecto para cada observador fundamental. Para la resolución de este problema Milne introduce una función de distribución $\Psi(\xi)$ cuya conexión con la función aceleración $G(\xi)$ viene dada por la expresión

$$G(\xi) = 1 - \frac{C}{(\xi - 1)^{3/2} \Psi(\xi)} \quad [44]$$

siendo C una constante de integración. Milne interpreta la [44] como una ley de gravitación ya que determina las aceleraciones en función de la distribución de las partículas; admite, con todo, que no se puede tratar de una ley general, sino sólo para las distribuciones de masas que satisfagan el Principio Cosmológico; identifica el primer término con el efecto gravitatorio del substratum solo y el segundo con el de la distribución estadística de las partículas libres. Un punto débil de la teoría está en que si la aceleración dada por la [42] es realmente la gravitatoria, de ella se ha de poder deducir el valor de la constante de la gravitación, que estará involucrada en ella. Ahora bien, Milne consigue probar que para un observador fun-

damental en reposo en el origen de coordenadas, el movimiento de una partícula libre, definido por [42], resultará, efectivamente, el debido a la ley de la inversa del cuadrado de la distancia, con tal que la gravitación G varíe de manera directamente proporcional al tiempo t transcurrido. De lo que se seguirá que la constancia de G es ilusoria y su valor ha de haber ido variando proporcionalmente al tiempo transcurrido desde el principio de la expansión del sistema de las partículas fundamentales. Como este aserto está tan en pugna con la idea familiar de la constancia de G , Milne acudió al recurso a que ya hemos aludido antes de probar que la [42] resulta una ley newtoniana propiamente tal, con valor constante de G , con tal de realizar el simple cambio de variable dado por la [39], es decir, regraduando el tiempo t en tiempo τ . Milne lo justifica afirmando que los observadores fundamentales en todo momento de su tiempo propio t , para medir aceleraciones gravitatorias, emplean de hecho el tiempo τ . La constante C da entonces la relación entre los números de partículas y sus masas gravitatorias efectivas. Muchos consideran este resultado como el gran éxito y la consagración de la teoría de Milne, e incluso en algunas de las dificultades que se presentan, como el aumento del momento angular que se hace proporcionalmente al tiempo t , vieron un argumento convincente más, ya que ayudó a Milne al establecimiento de su teoría sobre la formación de los brazos de las nebulosas. El resultado fue que alentado con este éxito, mediante ulteriores desarrollos, aplicó también Milne sus concepciones a los campos electromagnéticos y nucleares.

Ello no impide que a todo este proceso deductivo se le puedan formular serias objeciones. Y en primer lugar ¿de dónde salen las partículas del sistema estadístico, cuya presencia no está, en modo alguno, exigida por el sistema fundamental, que es el que se identifica con el Universo realmente existente? ¿Podrá acaso, existir un Universo lleno de materia en el que no ocurra ningún fenómeno gravitatorio? Además el argumento por el que se hace depender la función G exclusivamente de ξ , con exclusión de X , no es demasiado claro. Y finalmente la introducción del tiempo τ , haciendo que un mismo observador emplee una escala de tiempo para los fenómenos cósmicos y otra para los gravitatorios, está en franco desacuerdo con la práctica cotidiana de los observadores terrestres. Quizás por este motivo Robertson, Walker y McVittie han querido cimentar por otro camino la teoría del campo gravitatorio en el universo de Milne, recurriendo a los procedimientos empleados en las teorías relativistas, comenzando por una definición adecuada del intervalo ds . Adoptando una expresión análoga a la [16] escriben

$$ds^2 = dt^2 \frac{R^2(t)}{c^2} \frac{d\bar{x}^2 + d\bar{y}^2 + d\bar{z}^2}{\left[1 + \frac{z}{4}(\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2)\right]^2} \quad [45]$$

siendo \bar{t} arbitrario y \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} las coordenadas de los observadores

fundamentales. Para que el tiempo \bar{t} coincida con el tiempo t de Milne, es menester regraduarlo de modo que el movimiento resulte uniforme, o sea que se tenga $R(\bar{t}) = \bar{t}$. Entonces el espacio cuatridimensional resultante sólo es euclidiano si se tiene $z = -1$, es decir, si la parte espacial tridimensional es hiperbólica. Como también se puede hacer la conversión en tiempo τ , resulta que el intervalo ds puede revestir las formas siguientes

$$\begin{aligned}
 ds^2 &= \bar{d}t^2 - \bar{t}^2 \frac{d\bar{x}^2 + d\bar{y}^2 + d\bar{z}^2}{\left[1 - \frac{1}{4}(\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2)\right]^2} = \\
 &= dt^2 - \frac{dx^2 + dy^2 + dz^2}{c^2} = \quad [45 a] \\
 &= e^{\frac{2\tau}{t_0}} \left[d\tau^2 - t_0^2 \frac{d\bar{x}^2 + d\bar{y}^2 + d\bar{z}^2}{\left[1 - \frac{1}{4}(\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2)\right]^2} \right]
 \end{aligned}$$

siendo las fórmulas de transformación

$$\begin{aligned}
 t &= \bar{t}^2 \frac{1 + \frac{1}{4}(\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2)}{1 - \frac{1}{4}(\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2)} \\
 x &= \frac{c \bar{x} \bar{t}}{1 - \frac{1}{4}(\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2)} \quad \tau = t_0 \log \left(\frac{\bar{t}}{t_0} \right)
 \end{aligned} \quad [45 b]$$

Ya se han hecho notar los terribles antagonismos suscitados por la teoría de Milne. Se le ha achacado conceder una importancia exorbitante a los movimientos rectilíneos y uniformes y a la transformación de Lorentz, imponiendo el modelo euclidiano de Minkowski, sin otra necesidad, al parecer, que la de facilitar los desarrollos matemáticos. Además, supuesta la existencia de tiempos intrínsecos diferentes, ¿por qué limitarse a dos? La línea divisoria de los campos de aplicación de ambos queda indeterminada y, según Lemaitre, por necesidad, ya que los fenómenos físicos se solapan. Se ha creído incluso hallar una contradicción interna en la explicación del corrimiento al rojo en la escala τ . En ella, en efecto, las dimensiones son invariables por hipótesis; pero si las frecuencias atómicas crecen, los radios de las órbitas de los electrones tendrán que decrecer; los átomos caracterizados por estas órbitas se contraerán y, por tanto, el metro-patrón se acortará. También se le ha achacado introducir, subrepticamente, una atracción gravitatoria entre su substratum y las partículas libres

y se ha afirmado que no es posible identificar el grupo de Lorentz de seis parámetros de la escala t , con el grupo gravitatorio de diez parámetros de la escala τ , lo que quiere decir que la regraduación del tiempo oculta lagunas fundamentales. Robertson ha demostrado que el intervalo ds de Milne se identifica con el de Friedmann, relativo a un espacio hiperbólico de Lobatschewsky, de lo que se quiere deducir que los trabajos de Milne afectan sólo a un caso muy particular de los universos de Friedmann, el de un espacio-tiempo euclidiano, vacío, con observadores ideales. Couder le achaca el reemplazar las condiciones de nuestro conocimiento por convenciones artificiales, en particular la técnica de medir, y el sustituir el decalaje espectral por la pretensión de poder leer un reloj en las galaxias lejanas, no menos que el pasar del substratum uniforme continuo a los núcleos de las galaxias. Quizás la más sincera de todas las dificultades e incluso la raíz oculta de que se le hayan buscado y objetado tantas otras, incluso a veces bien poco específicas suyas, sea la que formula el mismo Couder cuando dice: «En su conjunto esta Cosmología presenta a cara descubierta caracteres específicamente idealistas: la comunicabilidad de los resultados entre los observadores se antepone en ella a las solicitaciones del mundo exterior; Milne no vacila en afirmar que su trabajo, al mismo tiempo que da cuenta de la inmortalidad del Mundo, conduce a su causa primera, al Creador Divino, al *milagro* de la creación». Ya hemos dicho al principio de nuestro trabajo el juicio que merece esta última clase de dificultades, análogas a las objetadas por Worrall y tan severamente juzgadas por *Nature*. En cuanto a las restantes, muchas tiene fácil solución, como la relativa al método de medida de distancias, que el radar ha venido a canonizar, y las que se refieren a la homogeneidad y continuidad del substratum que se podrían oponer a cualquier otra teoría cosmológica. Más fundadas parecen otras, como las que formula Bondi al insistir en que, para la utilización que Milne hace del Principio Cosmológico, no basta una formulación estadística del mismo, sino que se necesita otra más estricta, lo que llevaría a problemas de interpretación muy difíciles; y asimismo cuando observa que si de resultados de la fórmula [44], las partículas libres se han de aglomerar alrededor de las fundamentales, cabe preguntar qué puede significar tal aglomeración si las fundamentales forman un continuo.

Pero sea lo que fuere de su viabilidad práctica, no hay duda que los trabajos de Milne encierran méritos innegables que es forzoso reconocerle. Así, en la génesis de sus ideas, el descubrimiento de la posibilidad de soluciones newtonianas análogas a las relativistas, que reconcilió con las teorías cosmológicas a los adversarios de todo espacio real no euclideo; más tarde la introducción de su modelo en expansión uniforme, tentador por su simplicidad y que hay que distinguir de sus otras elucubraciones posteriores; asimismo su idea del tiempo como flujo y de la posibilidad de diferentes escalas del mismo en la naturaleza, antes apenas tomadas en consideración y ciertamente nunca estudiadas de modo tan profundo; y más que nada el

haber roto el círculo de ideas en que parecía haberse encerrado la Cosmología y haber patentizado la posibilidad de buscar soluciones por caminos diversos de los que, a partir de Einstein, parecían definitivamente consagrados. En este sentido su ejemplo fue fecundo y no sólo seguido, sino ampliamente superado.

13. ELUCUBRACIONES SOBRE LAS RELACIONES ENTRE EL MACRO Y EL MICROCOSMOS

Quizás a alguno de vosotros la exposición de las teorías, en cuya consideración ahora entramos, le haga preguntarse si han resucitado las preocupaciones de la cábala o las relaciones secretas que en los números buscaba la filosofía pitagórica. Y preciso me es confesar que no le faltaría razón, pues la misma impresión experimenté la primera vez que me enfrenté con tales sistemas. Pero quizás sería precipitado tildar su presentación de inútil o, a lo menos, inoportuna. Aparte la categoría de sus autores, que naturalmente en la balanza pesa mucho, bueno es atender a las razones que alegan antes de juzgar la cuestión; quizás convengáis entonces conmigo en que no sería lógico pasarlos por alto.

En 1936 se sintió Eddington preocupado por el hecho de que Dirac, aunque había conseguido unificar la Relatividad Restringida con la Teoría de los Quanta, había fracasado al intentar unificar con ésta última la Relatividad General. Ya en 1928 se encontró éste, en efecto, con que en la teoría del electrón aparecían expresiones invariantes respecto de ciertos tipos de transformaciones que era imposible obtener por los métodos del cálculo tensorial. Ahora bien, como escribió Eddington, «en el Cálculo Tensorial se había creído poseer una herramienta ideal para tratar cualquier forma de invariancia. ¿Por qué, pues, este tipo le escapaba?», y añadía, citando a Darwin: «es decepcionante comprobar que alguna cosa se ha deslizado entre las mallas de la red». Eddington opinó que la dificultad estaba emparentada con los problemas más profundos de la estructura de la materia y que, de acuerdo con el principio de Mach, sólo sería posible una solución satisfactoria abordando las posibles relaciones de su composición con la totalidad de la materia del Cosmos. En la investigación de los procesos macrofísicos del Universo se tropieza en efecto, sobre todo, con cuatro constantes fundamentales naturales que intervienen prácticamente en todos: la constante de la gravitación G , la velocidad de la luz c , la constante de Hubble H y la densidad media de la materia ρ . En el extremo opuesto de la escala, al investigar el mundo de las partículas elementales, aparecen también cierto número de constantes, de papel no menos relevante, entre las que ocupan lugar destacado el quantum eléctrico elemental e , la masa del electrón m_e , la masa del protón m_p , y el quantum de acción de Plank h . Pues bien, entre las constantes de uno y otro grupo existen ciertas relaciones sencillas, expresables por números puros sin dimensiones, que no pueden menos de llamar la atención a primera vista.

Así entre la atracción electrostática y la atracción gravitatoria existentes entre el electrón y el protón vale la relación $\frac{e^2}{Gm_p m_p} \simeq 2,3 \times 10^{39}$; entre el radio de la parte observable del Universo y el radio del electrón vale, asimismo, el cociente $\frac{c H^{-1}}{e^2 m_e^{-1} c^{-2}} \simeq 2,3 \times 10^{39}$; entre la masa del Universo y la masa del protón o neutrón, $\frac{\rho_0 c^3 H^{-3}}{m_p} \simeq (2,3 \times 10^{39})^2$; la energía gravitatoria potencial del conjunto del Universo en el campo de una partícula elemental de masa m se puede expresar «grosso modo» en función de la masa M del Cosmos y su radio R por $V = \frac{GmM}{R} = Gm\rho_0 c^2 H^{-2}$; como la energía de la masa en reposo de la misma partícula es mc^2 , la relación entre ambas viene dada por la expresión $G\rho_0 H^{-2} \simeq 1$; y aun cabría citar otras parecidas. La impresión producida por estas relaciones en Dirac se reflejaba bien en estas frases que escribió en 1937 la primera y en 1938 la segunda: «Todos los grandes números del orden de 10^{39} , 10^{78} ,... que aparecen en las teorías físicas, abstracción hecha de sus coeficientes numéricos, son exactamente iguales a p , p^2 ,..., siendo p la época actual expresada en unidades atómica»; y «Todo par de grandes números sin dimensiones, que se presentan en la Naturaleza, están ligados entre sí por unas relaciones matemáticas sencillas en que los coeficientes son del orden de la unidad». Y Schrödinger escribía en 1939: «La Mecánica Ondulatoria impone «a priori», una razón para que el espacio sea cerrado, a saber, que entonces sus vibraciones propias son discontinuas y proporcionan una descripción adecuada de la atomicidad observada en la materia y la electricidad», y relacionaba el radio del Universo con la longitud de onda de Compton λ_c y el número de protones en el Universo (10^{80}), mediante la expresión $\lambda_c = R / \sqrt{N}$, la cual indica el error sobre la posición del centro de gravedad de N partículas distribuidas al azar en un espacio cerrado. Como ya hemos anteriormente advertido, a nadie maravillará que, en opinión de muchos, tales coincidencias, fuera de que sólo valen hasta un cierto grado de aproximación, sean puramente casuales. Pero, en cambio, otros ven en ellas indicios, al menos, de nexos profundos entre la Física Atómica y la Cosmología y piensan que se puede deducir de ellas que el Universo es cerrado y finito. Nosotros confesamos que tales elucubraciones nos recuerdan, a primera vista, los esfuerzos consagrados, año tras año, por Kepler para penetrar lo que él llamaba el «misterio cosmográfico», cuando quería relacionar las órbitas de los planetas, en su tiempo conocidas con las figuras de los poliedros regulares y las notas fundamentales de la escala musical. Ahora bien, teorías deductivas que pretenden probar que hechos conocidos por la observación son consecuencia necesaria de procesos mentales, se hacen inmediatamente sospechosas de idea-

lismo y exigen, en quien las estudia, espíritu especialmente crítico para descubrir cualquier infiltración espuria de datos experimentales o adaptaciones insensibles de las premisas para que fluyan de ellas las consecuencias deseadas. Y bastará, naturalmente, que se pueda encontrar alguna discrepancia entre los valores observados y los deducidos por tales razonamientos para que se vuelva muy precaria la confianza en ellas. Pero esto no obstante, no creemos inútil su estudio, pues aun prescindiendo de nuestro plan de exponer todos los principales sistemas propuestos para la explicación del Cosmos, de facetas francamente diferentes, al fin y al cabo no hay que olvidar que sin los esfuerzos de Kepler por penetrar el «mysterium cosmographicum» no habría poseído el siglo XVII sus leyes del movimiento planetario, gracias a las cuales pudo construir Newton su teoría de la gravitación universal. Y también en este terreno los esfuerzos de estos investigadores modernos han producido sus frutos: bástenos citar, como ejemplo, la Teoría Fundamental y el Cálculo Tensorial de Ondas, desarrollados por Eddington en sus últimos años, construcciones matemáticas de extraordinaria belleza a juicio de todos, aunque tan ardua y difícil que pocos son los que se han atrevido en ellas a seguirle: Bastin y Kilmister en 1952 y 1958 y tal vez algún otro. Las otras teorías, en efecto, que reseñamos en este grupo no son ulteriores desarrollos de la de Eddington, sino esfuerzos en diversas direcciones, emparentados con los suyos sólo por la preocupación sobre las relaciones de las constantes atómicas con las cósmicas.

14. EL URANOIDE DE EDDINGTON

Eddington fue, pues, el primero en emprender esta ruta. Ya en 1922, al dar a conocer en Inglaterra la teoría de la gravitación de Einstein, se había pronunciado Eddington en favor de la idea de un Universo finito que aquél sustentaba, por un argumento en esta línea de ideas: la razón de la fuerza eléctrica a la fuerza gravífica entre dos electrones es un número puro extraordinariamente grande del orden de 4×10^{42} ; ahora bien, la aparición en el orden de la Naturaleza de un número de esta índole de orden de magnitud tan distinto de la unidad le parecía inverosímil, a menos que dicho número estuviese relacionado con el número total de partículas del Universo; y como tal relación no sería posible si dicho número no fuese finito, concluyó que se imponía la finitud del Universo. Lo más curioso es que, dos años antes, el modelo einsteiniano le había parecido casi inaceptable, porque en él la cantidad total de materia quedaba, en cierto modo, determinada por la ley de la gravitación y la constante cosmológica Λ le parecía un pegote; pero luego, bajo el influjo de Weyl, fue cambiando de opinión y, en 1934, llegó a afirmar que Λ expresaba una relación de escala entre dos tipos diferentes de fenómenos, como, por ejemplo, los radios del electrón y del Universo; y como para él la existencia de tal relación era esencial, se opuso siem-

pre, en consecuencia, a la supresión de Λ , pues a su juicio habría sido ello equivalente a la negación de tal relación.

Para hallar el lazo de unión entre el Cosmos y el átomo recurrió Eddington a un problema que pudiese ser resuelto, a la vez, por la Relatividad Generalizada y la Mecánica Quántica: el estado de equilibrio de un sistema aislado, constituido por un número extraordinariamente grande, pero finito, de partículas y desprovisto de radiación. Considerándolo como un «ejercicio» de Física Cósmica, adoptó provisionalmente la solución dada por Einstein en 1917, a saber, $\frac{GM}{c^2} = \frac{1}{2} \pi R$, siendo, naturalmente, R y M el radio y la masa del Universo, y G y c la constante de la gravitación y la velocidad de la luz; analizando entonces la composición de M , la reemplazó por $\frac{1}{2} N m_p$, siendo m_p la masa del protón y $\frac{1}{2} N$ el número total de protones del sistema; en rigor debería haber incluido asimismo la suma de las masas de los electrones, pero la despreció por ser 1840 veces menor; en cuanto a los neutrones no eran todavía conocidos en aquella época y las únicas piezas fundamentales de la materia eran entonces para Eddington el electrón y el protón. Dio, pues, a la [12] la forma

$$\frac{GNm_p}{c^2} = \pi R \quad [46]$$

y a un Universo de Einstein así constituido lo designó con el nombre de *Uranoide*.

En Mecánica Quántica, de un sistema estable sin radiación se dice que está en su «estado fundamental», es decir, que su estado energético es el más bajo posible. Como además, por el principio de exclusión de Pauli, en un sistema atómico en cada nivel de energía no puede haber más que una partícula, al querer resolver ahora Eddington el problema del Uranoide como un «ejercicio» de Mecánica Quántica, como en el Uranoide no hay radiación, tuvo que suponer las N partículas que lo constituyen en los N estados de energía más bajos posibles. De ello dedujo la energía total del Uranoide en función de N , R y las constantes de la Física Atómica. Por otra parte, Einstein, había demostrado que en todo sistema de masa total M y energía total E , se tiene la relación $E = Mc^2$. Combinando esta expresión con la [46], dispuso de un sistema de dos ecuaciones que dan la masa y el radio del Uranoide en función de las constantes fundamentales de la Naturaleza. Eddington se esforzó toda su vida en perfeccionar este cálculo y acabó basándolo sobre un nuevo tipo de teoría de la Relatividad; pero para nuestro objeto basta tratarlo como lo expuso por primera vez en 1931. Lo esencial de su raciocinio es la idea de que la masa del electrón está determinada no solamente por su carga, sino también por la existencia de todas las demás partículas del Uranoide. Eddington dedujo de ello la relación

$$\frac{e^2}{m_e c^2} = \frac{R}{\sqrt{N}} \quad [47]$$

El primer miembro, a excepción de un factor 2/3, es aproximadamente la expresión clásica del radio del electrón; en cuanto al segundo lo dedujo Eddington mediante una aplicación ingeniosa del principio de indeterminación de Heisenberg, tomando como origen del sistema fundamental de referencia del Uranoide, no una partícula, cuya posición le es forzosamente desconocida, sino el centro de gravedad de las N partículas que lo constituyen, cuya incertidumbre de posición se puede expresar en función de su radio y del número de tales partículas. Combinando esta expresión con la [46] y despejando N se obtiene

$$N = \frac{\pi^2 e^4}{G^2 m_p^2 m_e^2} \quad [48]$$

en donde sustituyendo e, G, m_p y m_e por sus valores en unidades c.g.s., es decir, haciendo $G = 6,67 \times 10^{-8}$, $m_p = 1,67 \times 10^{-24}$, $m_e = 9,1 \times 10^{-28}$ y $e = 4,77 \times 10^{-10}$, resulta que el orden de magnitud de N es 10^{79} y, por lo tanto, el de M, de 10^{55} gr., de donde se deduce que el valor de R ha de ser del orden de 10^9 años de luz. Esta tentativa de pesar y medir el Universo, a partir de los datos de la Física Atómica, no deja de ser uno de los *tours de force* más espectaculares de la Cosmología moderna. Por lo demás en 1946 probó por su parte Whitrow que el orden de magnitud encontrado por Einstein para la masa total del Cosmos se podía obtener, asimismo, por otra vía a base, en buena parte, de la Mecánica newtoniana. Según ésta, la energía gravitatoria de una esfera homogénea de masa M y radio R es $E_g = \frac{2GM^2}{5R}$, valor en general muy inferior al de la energía

de inercia de Einstein $E_i = Mc^2$. Pero como por una parte, según el principio de Mach, la inercia de un cuerpo es debida a la influencia global de todo el Cosmos y, por otra, por el principio de equivalencia de Einstein, la gravitación y la inercia son la misma cosa, la influencia gravitatoria global de todo el Universo será equivalente a su influencia de inercia y, por consiguiente, aunque para la mayor parte de los cuerpos físicos sean muy distintos E_g y E_i , no es improcedente que, si se admite que una cierta esfera homogénea pueda ser considerada como una primera aproximación de todo el Universo, se admita también que para una esfera tal los valores E_i y E_g sean iguales, de donde se seguirá que la masa y el radio estarían ligados por la expresión $\frac{GM}{c^2} = \frac{5}{3} R$. Esta expresión es la misma antes utilizada, deducida de [11] y [12], que caracteriza el universo de Einstein, con la sola diferencia de que el coeficiente de R que aquí vale 5/3 (= 1,67) era allí $\pi/2$ ($\simeq 1,57$). Si se supone que R es del orden de 10^9 años de luz,

se sigue que M es del orden de 10^{55} gr., o bien 10^{79} protones o nucleones.

Una vez establecida la relación entre la Física Atómica y la Cosmología, Eddington creyó poder deducir de ella todas las leyes de la Física. Con este objeto, prosiguiendo los trabajos de Dirac, generalizó más aún el Cálculo Tensorial y, a base del mismo, construyó una nueva teoría de la Relatividad en que el número N desempeña un papel fundamental; en vez de ser una simple curiosidad astronómica, su evaluación exacta permitiría, según Eddington, la evaluación de la mayor parte de las constantes fundamentales de la Física. En particular es notable que a base de las relaciones que hemos expuesto anteriormente, entre el principio de indeterminación de Heisenberg y la Teoría de Errores, llegó a evaluar, partiendo del radio del Uranoide, la relación entre las masas del protón y el electrón, encontrando el valor 1834.34; el dado por la experiencia es 1834.27. Asimismo interpretando N en un espacio esférico como el número de tipos posibles de ondas que se pueden asociar a las partículas elementales, evaluó su número en $3/2 \times 136 \times 2^{256} \simeq 10^{79}$, y partiendo del valor de c y de las constantes de Faraday y Rydberg para el hidrógeno, calculó correctamente, con una aproximación de cinco milésimas, varias otras constantes fundamentales, como la constante de la gravitación G y la de Plank h.

El Uranoide de Eddington es un universo de Einstein lleno de hidrógeno a 0° absolutos, ya que el átomo de hidrógeno es el que contiene un protón y un electrón. Este sistema es inestable; sometido a la más ligera perturbación ha de comenzar enseguida a dilatarse o contraerse; los datos actuales hacen pensar en una expansión, sobre todo comparando el valor calculado para la densidad media ρ del Uranoide 10^{-27} gr/cm³ con el deducido de las observaciones de Hubble, cien veces menor. En su memoria póstuma de 1944 estimaba Eddington que en la actualidad el radio del Universo tiene unas cinco veces el valor inicial correspondiente al modelo einsteiniano. Su cálculo se fundaba en los valores entonces admitidos de la constante de Hubble, estimada en 540 km/seg. por megaparsec. En el Uranoide la velocidad de fuga por unidad de distancia está dada por la expresión

$$\frac{c}{R_0} \sqrt[3]{1 - \frac{3}{Q^2} - \frac{2}{Q^3}} \quad [49]$$

siendo c la velocidad de la luz, R_0 el valor inicial del radio del Universo y Q la razón del valor actual R del radio al inicial. De acuerdo con esta fórmula y la determinación teórica de R según las ideas de Eddington, la velocidad límite de recesión al crecer indefinidamente Q, es decir, al reducirse la [49] a $c/R_0 \sqrt[3]{3}$, no podría exceder de unos 572 km/seg/Mp. Al tenerse que introducir las correcciones de Baade, Slate llamó la atención sobre un desliz matemático que había encontrado unos años antes en la determinación teórica de R y de resultas

del cual la velocidad de fuga se tenía que multiplicar por el factor $4/9$, con lo que el límite de la velocidad señalado por Eddington quedaba reducido a 254 km/seg/Mp . Si el valor de la constante de Hubble es de unos 180 km/seg/Mp , el de Q , dado por Eddington, se tendrá que reducir todavía más, a cosa de la mitad; y si se confirma el dado últimamente por Sandage, 80 km/seg/Mp , Q se acercará, fuertemente, a la unidad con no pocas dificultades de interpretación para el tamaño del Uranoide. Esto confirma la opinión de muchos de que, no obstante la audacia y el mérito intrínseco de sus cálculos, difícilmente ha de poder sobrevivir una teoría que se apoya tanto en coincidencias numéricas que cada nuevo descubrimiento no puede menos de afectar; sin ir más lejos, desde los tiempos de Eddington se han ido descubriendo muchas otras partículas subatómicas para las que no parece haber lugar en sus razonamientos. Quizás haya, pues, que concluir que, más que como artifice de una obra consumada, Eddington debe ser admirado como artista inspirado, cuyas ideas geniales han excitado el interés y el entusiasmo de muchos y han servido de impulso poderoso para dirigir su atención hacia la posible unificación de conceptos antes inconexos. Por lo demás, los méritos de Eddington como astrónomo y astrofísico y, no menos, como cosmólogo (recuérdese su intervención destacada en los primeros trabajos sobre la expansión del Universo) son tan indiscutibles que su fama no tiene que temer mengua alguna porque haya quedado probablemente en sueño lo que fue el ensueño de sus últimos años.

15. LOS MODELOS DE UNIVERSO DE DIRAC Y JORDAN

Como se ha indicado, lo que impulsó a Eddington a proponer su Uranoide fue lo que él creía ciertas insuficiencias de la teoría de Dirac; no es, pues, de maravillar que al formular también éste su teoría cosmológica, de acuerdo con su línea de pensamiento, resulte diferente y aun, en ciertos puntos, contrapuesta a la de Eddington. Si se considera, en efecto, artificial el Cálculo Tensorial de Ondas y todo el restante aparato matemático de éste, pierden de golpe significación los valores de las constantes naturales que encuentra, lo mismo que sus coincidencias, y es claro que, como éstas de hecho existen, habrá que atribuir las a algún otro factor latente en todos los razonamientos. Dirac opina que este factor es la edad del Universo computada en tiempo atómico, esto es, tomando como unidad el tiempo que invierte la luz en recorrer el radio del electrón en el átomo de hidrógeno. Como éste es de 0.95×10^{-23} segundos, si se calcula las unidades de tiempo atómico transcurridas desde el comienzo de la expansión del Universo, en unos 7×10^9 años, sale una cifra del orden de 2.3×10^{39} que denominaremos p . Y precisamente en esto funda Dirac la afirmación antes citada de que «todos los grandes números del orden de 10^{39} , 10^{78} , ... que aparecen en las teorías físicas, abstracción hecha de sus coeficientes numéricos, son exactamente iguales a p , p^2 , ... siendo p la época actual expresadas en unidades atómicas». Según esto,

pues, todas las grandes cifras implicadas en aquellas relaciones tienen sus valores actuales y presentan sus coincidencias solamente de modo accidental; cuando en un futuro lejano la edad atómica del Cosmos sea, por ejemplo, del orden de 10^{50} unidades, las relaciones dichas serán también, según Dirac, de dicho orden. De esta variación por un lado y de las relaciones entre dichas constantes por otro, se sigue que o bien, si la masa del Universo y la constante de la gravitación son realmente constantes, la masa del protón ha de disminuir proporcionalmente a $\frac{1}{p^2}$ y la magnitud $\frac{e^2}{m_p m_e}$ ha de crecer proporcionalmente a p , o bien, si las magnitudes atómicas son las constantes, la masa del Universo ha de crecer proporcionalmente a p^2 y la constante de la gravitación ha de disminuir proporcionalmente a $\frac{1}{p}$. Es claro que negando especial significación a los grandes números del orden de p , p^2 , ... la teoría de Dirac está en franca oposición con la teoría de Eddington y no menos con la de Milne y aun con las que luego expondremos de Bondi y Hoyle, ya que no sólo supone que cambia el Universo, sino con él las mismas constantes de la Física Atómica.

Examinando las dos posibilidades anteriores y analizando la segunda, es decir, que la masa del Universo tenga que crecer proporcionalmente a p^2 , Dirac busca la solución en una Cosmología con espacio plano infinito y masa igualmente infinita. Para justificarlo nota ante todo que la razón del recíproco de la constante de Hubble (que en sus primeros trabajos tomó igual a 1.8×10^9 años) a la unidad atómica de tiempo, $\frac{e^2}{mc^2} = 0.95 \times 10^{-23}$ seg. es del orden de la edad

del Universo en unidades naturales y estima su valor en $p = 6 \times 10^{39}$; advierte, por lo demás, que bastaría escoger otra unidad atómica de tiempo para encontrar otro valor que difiriese de éste en varias potencias de 10 por lo menos. Recuerda entonces el principio también anteriormente citado de que «cada par de grandes números sin dimensiones que se presentan en la Naturaleza, están ligados entre sí por una relación matemática sencilla en que los coeficientes son del orden de la unidad» y expresa luego la densidad media en el espacio

ρ en protones por unidad atómica de volumen $\left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^3$, siendo

la cifra que se obtiene del orden de p^{-1} . Esto equivale a escribir la primera y la última de las relaciones entre las constantes cosmológicas y atómicas citadas en el núm. 13 en la forma siguiente:

$$\frac{e^2}{Gm^2} \simeq p \qquad G\rho_0 H^{-2} \simeq 1 \qquad [50]$$

Tomando como antes $R(t)$ como factor de escala de la expansión y suponiendo que se conserve la masa ($\rho R^3 = \text{const.}$), la identificación

de la densidad y la constante de Hubble lleva a las relaciones de proporcionalidad

$$\rho_0 \sim R^{-3}(t) \sim p^{-1} \sim R'(t)/R(t) = H \quad [51]$$

de donde se sigue que

$$R(t) \sim t^{1/3} \quad [52]$$

y por tanto

$$H = R'(t)/R(t) = 1/3t \quad [53]$$

esto es, la edad del Universo en unidades atómicas es solamente un tercio del recíproco de la constante de Hubble. Para evitar contradicciones con las edades que se suelen atribuir a las estrellas, se podría decir que los procesos nucleares, comparados con los atómicos, ocurrieron más de prisa al principio que ahora. Dirac no considera improbable la explicación, pero no examina sus implicaciones.

Volviendo a la cuestión de la naturaleza del espacio, nota Dirac que el desarrollo anterior exige que los espacios $t = \text{const.}$ sean planos, pues si no lo fuesen, cualquier curvatura positiva del espacio tridimensional definiría un radio de curvatura cuya longitud sería proporcional a $R(t)$; el producto del cubo del radio de curvatura por la densidad media de la materia definiría una masa que sería constante, como antes se ha notado, en virtud de la ley de la conservación de la masa; el número de partículas elementales que la constituyen se definiría por medidas astronómicas y atómicas y sería muy grande; en virtud del principio de Dirac tendría que estar unido por una relación sencilla con otros números enormes parecidos a $\frac{e^2}{Gm_g m_p}$; pero como esto

es imposible, porque estos últimos cambian continuamente en tanto que el primero es constante, se ve por reducción al absurdo que los espacios tridimensionales $t = 0$ no pueden tener curvatura positiva. Mediante un argumento parecido, aunque algo más complicado, excluye también la curvatura negativa; luego no queda otra opción que la curvatura nula y, por tanto, un espacio infinito euclídeo.

Tras eso se ocupa Dirac de determinar el movimiento de una partícula libre bajo la acción del campo gravitatorio del Universo como un todo; y para ello observa que, dado que la Relatividad General explica tan bien los fenómenos gravitatorios locales, es de esperar que de alguna manera se pueda aplicar al conjunto del Cosmos. Es de advertir con todo que este recurso a la Relatividad no es fácilmente justificable en este sitio. No hay que olvidar en efecto que la razón $\frac{e^2}{Gm_g m_p}$

de la atracción eléctrica a la gravitatoria entre el protón y el electrón, de acuerdo con el principio de Dirac, ha de variar proporcionalmente a la edad del Universo p ; por otra parte se sabe que en unidades atómicas dicha fuerza eléctrica permanece constante; luego la que tendrá que variar es la gravitatoria y como se halla en el denominador lo tendrá

que hacer de forma inversamente proporcional a la edad del Cosmos, es decir, g deberá ser proporcional a p^{-1} ; ahora bien, en Relatividad General ni la fuerza gravitatoria ni la masa puede experimentar cambio alguno. Para salvar este escollo y poder afirmar su constancia, Dirac acude a un segundo sistema de unidades, cuya razón con las antiguas varíe con el tiempo: así respecto de ellas la constante de la gravitación podrá permanecer invariable y las ecuaciones de la Relatividad General serán válidas. Estas nuevas unidades de medida del tiempo p^* tendrán que ser tales que se tenga

$$p^* = \frac{p^2}{2p_0} \quad [54]$$

y la escala se ha de elegir de manera que las razones de paso de la una a la otra coincidan para $p = p_0$. Se puede entonces probar que

$$R^*(p^*) \simeq pR(p) \sim p^{4/3} \sim p^{*2/3} \quad [55]$$

Mediante una reducción al absurdo como la anterior, se puede probar que se ha de tener $\Lambda = 0$. Y entonces las fórmulas de la Relatividad General llevan a una presión nula y a una densidad de masa positiva y de magnitud razonable. Se llega, pues, a un modelo de Universo del tipo del encontrado en las Cosmologías relativista ortodoxa y neoneutoniana para z o $h = 0$, $\Lambda = 0$. Como se observa que la presión es mucho menor que la densidad, estará de acuerdo con las observaciones. El punto débil de esta línea de argumentación está en que

como $\frac{e^2}{Gm_e m_p}$ por ser un número $\simeq p$ se considera variable, la carga e

tiene que variar, puesto que ahora G y m permanecen constantes; pero la conservación de la carga eléctrica es una parte tan esencial de las ecuaciones de Maxwell, como lo es para la Relatividad General la ley de la conservación de la masa; resulta, pues, que ninguna teoría en

que $\frac{e^2}{Gm_e m_p}$ se considere variable se podrá conciliar bien con la Relatividad General.

En cambio si se prescindiese del cambio de escala del tiempo y se admitiese que la constante de la gravitación cambiaba efectivamente con el tiempo, como dicha constante está involucrada en la conocida relación masa-luminosidad de las estrellas, también ésta y por consiguiente la luminosidad por ejemplo del Sol debería variar con la edad del Universo; y como no sería difícil probar que hace unos 300 millones de años el valor de G debió exceder al actual en un 10 %, se seguiría que en tal época la radiación solar debería haber sido tan intensa que los océanos habrían hervido, lo que sabemos está en contradicción con todos los datos geológicos y paleontológicos. Claro está que estos cambios de G habrían podido quedar contrarrestados por otros cambios en otros factores, tales como la composición química y la opacidad del Sol; pero ya se ve la arbitrariedad de soluciones de este género.

Además, al revés de lo que ocurre con el principio cosmológico

perfecto, que, como veremos, es un principio de simplificación, el de Dirac hay que reconocer que lo es de complicación, pues no sólo implica la evolución del Cosmos como un todo, sino el que se realice en íntima conexión con un esquema de autoevolución de las leyes fundamentales de la Naturaleza, con lo que en el fondo introduce una especie de nueva dimensión en el campo de las posibilidades de cambio de la evolución cósmica. Esto no obstante, como tampoco se puede decir que esté en contradicción franca con la observación, el principio de Dirac sigue teniendo partidarios que creen desarrollará todas sus potencialidades el día en que todas las teorías atómicas y cósmicas sean formuladas de nuevo expresando todas las variables y en particular las de longitud, tiempo y masa en forma de cantidades sin dimensiones. En opinión de estos autores hay que conservar entre tanto la Cosmología de Dirac como una promesa para el futuro.

Una segunda teoría basada en las consideraciones de Dirac es la de Jordan; mucho más trabajada por cierto y harto ingeniosa, aunque preciso es reconocer que alguna de sus consecuencias no acaban de estar de acuerdo con las observaciones. Buscando las combinaciones de las constantes fundamentales de la naturaleza que sean coeficientes numéricos puros sin dimensiones, constata que todas ellas son del orden de la unidad. Y como a su juicio tal coincidencia no puede ser fortuita, concluye que ha de ser el resultado de leyes profundas subyacentes a las que pretende remontarse y entre las que figura para él en primera línea la expansión del Universo. Para Jordan las constantes universales en que se basa nuestro conocimiento del mundo macroscópico son las seis siguientes: la velocidad de la luz c ; la constante de la gravitación κ ; la edad máxima de los astros A ; la constante de Hubble H ; la densidad media de la materia en el Universo ρ ; y una constante que según él interviene en todos los censos de galaxias débiles y que traduce su rarefacción respecto de un volumen euclídeo uniformemente poblado; no es difícil ver que, si el Universo es hiperesférico, tal constante es su radio de curvatura R , pero de momento Jordan le atribuye un significado puramente empírico. Pues bien, prueba Jordan que sólo existen tres combinaciones independientes de estas constantes sin dimensiones, a saber, HA , R/cA y $\kappa\rho A^2$ y que los valores a que llevan son respectivamente 1,7, 1 y 1,8. Dada la inseguridad de alguno de los datos empleados en el cálculo, Jordan concluye que los tres valores son $\cong 1$. Esta coincidencia extraordinaria Jordan la interpreta como sigue: $R = cA$ significa que R , que aquí mira ya como el radio de curvatura del Universo crece con la velocidad de la luz, o dicho en otra forma, que la periferia del Universo se expansiona a la velocidad de la luz. $HA \cong 1$ confirma esta interpretación: el Universo está en expansión y su radio fue nulo hace unos 3 ó 4000 millones de años. Para interpretar la tercera hay que comenzar por algunas transformaciones previas. Si M es la masa del Universo, es claro que $\rho \cong \frac{M}{R^3}$ y recordando que $cA = R$, podremos

escribir

$$\kappa \rho A^2 = \kappa \frac{M}{c^3 A^3} A^2 = \frac{\kappa}{c^2} \frac{M}{R} = 1,8 \quad [56]$$

Siguese que $KM \cong Rc^2$ y como R crece con la edad del Universo, uno u otro de los factores del primer miembro o ambos varían con la edad. Si se reemplaza κ por su expresión en función de G y se multiplican ambos miembros por M , resulta

$$\frac{8\pi GM^2}{R} \simeq Mc^2 \quad [57]$$

El segundo miembro es la energía de la materia presente en el Universo; el primero, prescindiendo del factor 8π es la expresión newtoniana de la energía potencial de gravitación del Universo como un todo, cuyo valor, como se sabe, es negativo. Jordan concluye de ello que la energía total del Universo es nula, dado que la energía de la materia (positiva) tiene el mismo valor que la energía gravitatoria (negativa) del conjunto de los astros. Esto indica que el Universo al evolucionar ha ido pasando por una secuencia de estados en cada uno de los cuales su energía total se ha de conservar nula; según ello las nuevas masas que puedan ir apareciendo lo tendrán que hacer a expensas de la energía potencial; en esta forma asegura Jordan la ley de conservación de la energía. Recuerda entonces que la razón de la atracción eléctrica a la gravitatoria entre un protón y un electrón es del orden de $2,3 \times 10^{39}$ y que también lo es la razón del radio del Universo al del protón o electrón. Es claro que la segunda razón ha de ir creciendo al aumentar R ; luego, si la equivalencia de las dos razones se ha de conservar, también ha de crecer la primera, y para ello, como la atracción eléctrica permanece invariable, ha de ir disminuyendo la fuerza gravitatoria y por tanto G en razón inversa del radio y por tanto de la edad del Universo A . Si κ es proporcional a $1/A$, la relación $M \cong R$ prueba que la masa del Universo tiene que crecer proporcionalmente al cuadro de su edad A^2 .

Dirac no se había atrevido a aceptar esta consecuencia por temor a violar la ley de la conservación de la energía; pero Jordan cree que no hay tal violación en virtud de su explicación de la igualdad [57]. Este crecimiento de la masa o del número N de partículas del Cosmos lo explica, como luego veremos lo hacen Gold y Bondi, por medio de una creación continua; pero en cuanto al modo de esta creación Jordan lo concibe totalmente diverso mediante la inyección súbita y espontánea en el Cosmos de *gotas* o paquetes de partículas materiales tan pesadas que el principio de conservación de la energía en el sentido explicado anteriormente vale para toda la gota como un todo; tales paquetes se difunden por explosión y aparecen como supernovas. Estas gotas no pueden tener otra densidad que la del núcleo atómico y esto requiere que su tamaño sea función de la constante de la gravitación en el momento en que aparecen. Como ésta ha de ir disminuyendo en

razón inversa de la edad del Cosmos, la masa de estas estrellas nuevas será función de esta edad y por consiguiente tanto mayor cuanto más tarde hayan sido producidas, de modo que para Jordan debería ser posible deducir aproximadamente la edad de las estrellas de su masa. El límite superior hoy día conocido de ésta es de unas 50 veces la masa solar y estas estrellas enormes contienen alrededor de 10^{60} masas de protones. Este número lo interpreta Jordan como la potencia $3/2$ de la edad del Universo en unidades de Dirac ($p^{3/2}$) y lo considera fruto de la acción de leyes cosmológicas más que de leyes astrofísicas, no obstante la opinión general de que éstas explican bien la distribución observada de las masas.

Lo que llama la atención en esta Cosmología es esta forma de aparición de la materia: ¿de dónde salen las supernovas? ¿dónde se forman antes de hacerse visibles? Jordan sugiere que por un corte de nuestro Universo cuatridimensional se puede obtener espacios tridimensionales enteramente incomunicados entre sí, como por el corte de un cono completo por un plano paralelo al eje se pueden obtener las dos ramas de una hipérbola, también incomunicadas entre sí. Ahora bien una rama del Universo, enteramente separada de la parte principal del mismo en que nos hallamos, podría ser llamada a juntarse con ella por un giro en la cuarta dimensión. Si se supone que en este pequeño mundo la densidad permanece constante y que la constante de la gravitación κ varía en razón inversa del cuadrado de su edad, por la [57] se conservará en él la energía; durante el curso de su evolución este pequeño mundo puede alcanzar un estadio en que su valor de κ coincida con el que κ tiene en la parte principal del Universo; si esto ocurre cuando esta pequeña rama tridimensional se junta con la parte principal del Cosmos, la materia contenida en ella aparecerá como una estrella embrionaria en el Universo mayor. Esta concepción proporciona a Jordan una oportunidad de confrontar su teoría con la observación, pues considerando proporcional a $p^{1/4}$ tanto el número de estrellas por galaxia como el número de galaxias en el Universo, deduce la velocidad media de aparición de las supernovas y concluye que ha de verificarse a razón de algo más de una por galaxia y por año. De hecho esto está en contradicción flagrante con la observación, que da tan sólo una supernova por galaxia cada dos o trescientos años, si bien las observaciones radioastronómicas reducen la discrepancia, ya que parecen indicar una frecuencia de estrellas nuevas diez veces mayor. Jordan procura explicarlo afirmando que los valores observados se refieren solamente a las galaxias viejas, en tanto que en las jóvenes la razón de producción ha de ser muy superior al valor del promedio; pero preciso es reconocer que la dificultad subsiste, pues también estas novas tendrían que ser observadas y no podrían pasar inadvertidas. Al mismo tiempo que las estrellas, afirma Jordan que ha de ir apareciendo una cantidad proporcional de radiación cósmica, cuyas partículas conservan sus grandes velocidades por medio de campos eléctricos en la envoltura expansiva de las supernovas. En cuanto a la formación de estrellas múltiples, cúmulos estelares y

sistemas de estrellas, trata Jordan de explicarla mediante la hipótesis de que la producción estelar se produce preferentemente en la cercanía de las estrellas ya preexistentes, porque allí encuentra circunstancias energéticas más favorables. El desarrollo matemático de su teoría lo apoya Jordan en una generalización de la Relatividad que llama Relatividad Proyectiva y es originariamente obra de Kaluza que considera el Universo como un continuo de cinco dimensiones. Desarrollada ulteriormente por varios autores, entre ellos el mismo Jordan, en ella el tensor materia tiene 15 componentes en vez de las 10 clásicas: de ellas diez corresponden al campo gravatorio, cuatro al electromagnético y la restante a la constante de la gravitación, variable, que, como ya antes se ha indicado, desempeña en toda la teoría un papel principal.

Como las teorías de Eddington y de Dirac también la Jordan ha sido muy combatida, no sólo por las rarezas de su explicación de la aparición de las supernovas, sino también porque muchos juzgan inadmisibles su interpretación del principio de la conservación de la energía. Preciso es reconocer lo justificado de estas críticas; pero ello no obstante, repetimos, como ya hemos dicho anteriormente, que no se puede negar a todas estas tentativas de explicación el gran mérito de haber enriquecido la Cosmología y la Física Atómica con nuevos puntos de vista y haber contribuido a fortalecer la esperanza de poder encontrar por fin este campo unitario que podría dar fórmulas «universales» para explicar todos los procesos del Cosmos.

16. EL UNIVERSO ESTACIONARIO DE LA ESCUELA DE CAMBRIDGE. TEORÍAS DE GOLD Y BONDI. HOYLE Y MCCREA

En 1948 Gold y Bondi primero y algo más tarde Hoyle formularon una teoría del Universo enteramente distinta de todas las propuestas hasta entonces; todas las anteriores en efecto habían respetado el principio de la conservación de la masa y energía; al introducir el concepto de creación continua de la materia, las teorías llamadas del estado estacionario entrañaban una revolución de los postulados fundamentales de la Física. Todas las teorías precedentes se basaban además en el principio cosmológico de homogeneidad, según el cual el Universo debía presentar el mismo aspecto para todo observador o por lo menos para todo observador fundamental fuese cual fuese su posición en el Cosmos; la idea de Bondi fue extender el principio cosmológico al tiempo y afirmar que el aspecto del Universo tenía que ser el mismo para cualquier observador *siempre*, es decir, con independencia no sólo del lugar, sino también del momento de la observación, lo que equivalía a afirmar que el Universo en gran escala no cambia nunca de aspecto. Esto en rigor podría obtenerse de tres maneras: o con un universo estático, sin movimientos sistemáticos apreciables de las nebulosas y conservación de la masa y energía; o con un universo en expansión y producción continua de nueva materia

para mantener constante la densidad; o con un universo en contracción y aniquilación de materia no menos continua para mantener asimismo la densidad constante. Ahora bien como por todos los indicios el Universo está en expansión y por tanto las nebulosas se van alejando y dejando vacío el lugar que ocupaban, la única manera de conseguir que su aspecto no varíe es ir colmando los huecos con materia nuevamente creada; al expansionarse el Universo su volumen aumenta, pero gracias a esta creación continua de materia aumenta de la misma manera su masa y su densidad permanece invariable; en cuanto a la nueva materia así producida se condensa en el decurso del tiempo en el espacio intergaláctico hasta formar nuevas nebulosas que vayan reemplazando a las antiguas.

Ya se puede suponer qué enorme oposición tenía que esperar teoría de este tipo desde el primer instante; y sin duda por ello, antes de exponer las características del modelo de Universo que presentaban, se creyeron en el caso sus autores de comenzar por justificar su punto de partida, su Principio Cosmológico Perfecto. Fuera de que, según Bondi, todas las razones que se pueden aducir para admitir el Principio Cosmológico en su forma clásica valen también para el Principio Cosmológico Perfecto, es un hecho que todas las elucidaciones cosmológicas se apoyan en la hipótesis de que nuestro conocimiento experimental del mundo físico, las leyes físicas, son aplicables a todo el Universo; ahora bien esto supone que las condiciones físicas reinantes han de ser sensiblemente las mismas en todas partes, pues es evidente que lógico Perfecto, es un hecho que todas las elucidaciones cosmológicas a sitios en que la presión o la temperatura media fuesen de millones de atmósferas o de grados o por el contrario vecina esta última al cero absoluto o en que la inercia fuese francamente distinta de la gravitación. Pero si suponemos que el Universo ha cambiado en el decurso del tiempo y que en un pasado remoto existió de modo general un estado hiperdenso, es evidente que al considerar que nuestras leyes físicas han valido siempre caemos en el defecto anterior, pues las aplicamos a circunstancias cuyos efectos desconocemos por completo. En cambio, estos inconvenientes se evitan con el Principio Cosmológico Perfecto, pues con él desaparecen las ambigüedades en la aplicación de las leyes físicas en todas partes y en todo tiempo. En segundo lugar es preciso observar que, aunque el Principio Cosmológico Perfecto establece un Universo estacionario, en modo alguno supone un Universo estático; es algo como lo que ocurre en Hidrodinámica con un río en régimen permanente en que la velocidad del agua es sólo función de la posición y del tiempo; podrá parecer estacionario y presentar siempre el mismo aspecto; ello con todo no quita que cada partícula se desplace, sufra aceleraciones, pase de sitios de menor velocidad a otros de velocidad mayor, sea engullida por un remolino, etc., etc. No obstante el aspecto del río siempre es el mismo y permanece inalterado.

Otra razón milita todavía en favor del Principio Cosmológico Perfecto y es que con él se explica mucho mejor el estado evolutivo del

Cosmos al producirse precisamente la expansión como consecuencia de no hallarse el Universo en equilibrio termodinámico y evitarse por otra parte la muerte térmica del mismo al contrarrestarse el efecto de la degradación de la energía por la creación continua de nueva materia. Pues, como advierte explícitamente Bondi, por creación de la materia no hay que entender producción de la misma a partir de la radiación, sino realmente *ex nihilo*, de la nada; de otro modo el efecto de la entropía no quedaría compensado, fuera de que la densidad de radiación ha de permanecer también inalterada con el tiempo y tal densidad depende por un lado de la energía liberada en promedio en los procesos estelares por unidad de masa y de tiempo, lo que tiende a acrecentarla, y por otro de la velocidad de la expansión que por su conexión con el efecto Doppler tiende a disiparla. Finalmente, bien mirado, la creación continua *ex nihilo* no ofrece especial dificultad para nuestras ideas sobre la conservación de la masa; pues en rigor la ley de su conservación no es sino una extrapolación de nuestras observaciones, las cuales, dentro del límite de nuestras medidas, nunca han podido comprobar ninguna aparición ni desaparición de materia. Ahora bien, la creación de materia indispensable para conservar inalterable el valor medio conocido de la densidad del Universo, ha de compensar el aumento de volumen producido por el crecimiento del radio de acuerdo con la ley de Hubble y para ello basta que se haga a lo más a razón de 10^{-46} gr/cm³/seg., es decir, a razón de un átomo de hidrógeno por litro cada medio billón de años; se ve, pues, que cae fuera de toda posibilidad de observación directa y por tanto nuestra ley de conservación de la masa en primera aproximación sigue siendo enteramente válida. Más aún, no falta quien sostenga que en cierto modo la ley de la conservación de la masa se cumple mejor en esta teoría, en que el número de átomos o de nebulosas se mantiene constantemente el mismo en un volumen real dado, que en la teoría de Lemaître y Friedmann, en que la constancia de la masa sólo se refiere a un volumen coordenado dado, pues lo primero responde mejor que lo segundo a nuestra concepción habitual. Podrán o no convencer estas razones, pero prueban a lo menos que la admisión del Principio Cosmológico Perfecto no es más arbitraria ni menos científica que la de los otros principios que la fuerza de la costumbre nos hace mirar sin desconfianza y quizás, bien examinados, resultaría que entrañan dificultades no menores que el ahora establecido.

Admitida, pues, la legitimidad de su estudio ¿cuál puede ser el aspecto de un Universo en estado estacionario? ¿pueden otros modelos de Universo ser compatibles con el Principio Cosmológico Perfecto? y en caso afirmativo ¿hasta qué punto pueden quedar definidos por él sin necesidad de recurrir a teorías incompatibles con la creación continua de materia? Bondi y Gold creyeron que la solución se debía buscar a partir del modelo de Universo de Milne, por parecerles su substratum la base más adecuada para construir su representación del Cosmos. La investigación matemática la realizaron Robertson y Walker, quienes partiendo del Principio Cosmológico clásico, de las pro-

piedades fundamentales de la propagación de la luz y de la definición del substratum de Milne completada con el postulado de Weyl, demostraron que la métrica de este modelo de Universo tenía la forma

$$ds^2 = dt^2 - \frac{R^2(t)}{c^2} \frac{dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\Phi^2}{\left(1 + \frac{1}{4} z r^2\right)^2} \quad [58]$$

siendo r , θ , Φ las coordenadas constantes de las partículas del substratum, t su tiempo propio, y las trayectorias de los rayos luminosos geodésicas nulas. $R(t)$ es una función arbitraria del tiempo y z una constante positiva, negativa o nula. Como se ve, esta expresión no es otra cosa que la [16] ó [45] en coordenadas polares, cosa natural puesto que hasta aquí no se ha tenido aún en cuenta el carácter estacionario del Cosmos. Al introducirlo, se va a parar a la métrica de De Sitter. En efecto, como el Universo se expansiona, $R(t)$ ha de ser una función de t creciente con el tiempo; el cuadrado del radio de curvatura del espacio tridimensional definido por las coordenadas r , θ , Φ es zr^2/R^2 , cantidad observable, ya que influye en la proporción del aumento del número de nebulosas con la distancia, y como por el principio cosmológico perfecto este número tiene que ser constante, siguese que z ha de ser nulo. La función $R(t)$ no es directamente observable; es verdad que su crecimiento con el tiempo implica que la distancia de cada nebulosa individual cambia también con t ; pero esto no está en contradicción con el estado estacionario, ya que éste afecta sólo al aspecto del Universo como conjunto. Por el contrario, la razón $R'(t)/R(t)$ que da la ley del crecimiento sí es observable, característica del movimiento de conjunto de las nebulosas y ha de permanecer constantemente igual a la constante de Hubble H ; la única manera de lograrlo es que $R(t)$ sea una función exponencial de tipo $R \simeq e^{Ht}$. Recordando que z ha de ser nulo, la expresión [58] se convierte entonces en

$$ds^2 = dt^2 - \frac{1}{c^2} (dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\Phi^2) e^{2Ht} \quad [59]$$

la cual, es fácil ver, coincide con la métrica general de De Sitter, de la que la [13] no representa sino el caso particular por él primeramente considerado y obtenido mediante un cambio de variable del tipo $r = R \operatorname{tg} \theta$, $R = e^{\frac{1}{\sqrt{3}} t}$. Esta métrica, a la que en Cosmología Relativista se le objeta que las ecuaciones de campo exigen represente un espacio vacío, aquí, en cambio, no tropieza con este escollo por no haber recurrido a las ecuaciones de campo propias de la Relatividad Generalizada por implicar éstas la conservación de la materia. Tiene además la ventaja de ser una métrica relativamente sencilla en que es fácil calcular las relaciones entre las cantidades observables. En cuan-

to al valor de t puede ir de $-\infty$ a $+\infty$, siendo arbitraria la elección del punto cero.

El proceso por el cual el aspecto general del Cosmos permanecería estacionario sería el siguiente: supuesta la creación en forma de aparición de nuevos átomos, como su objeto es conservar la densidad media del Universo, ha de guardar proporción con la velocidad de expansión, regida por la constante de Hubble y , por tanto, ésta, además de su valor cósmico, cobra también significación atómica; las nuevas nebulosas se condensan a partir de esta materia aparecida entre las nebulosas preexistentes en los espacios intergalácticos; con el tiempo se forman estrellas, las cuales a su vez se desarrollan y evolucionan; de resultas de la expansión, todas las nebulosas simultáneamente formadas se apartan unas de otras; pero en los espacios intermedios se van formando nuevas nebulosas a medida que nueva materia va siendo creada y así sucesivamente. Las nebulosas antiguas están lejos unas de otras y la probabilidad de encontrar una es pequeña. Posiblemente, habiendo tenido tiempo de producir efecto su atracción gravitatoria, forman enjambres. En la visión de conjunto del Universo como un todo, la edad de cada nebulosa, en particular, es un atributo puramente estadístico. Su valor $1/3H$, partiendo de los datos sobre las nebulosas más jóvenes reconocibles como tales, se calcula igual a 4×10^9 años; pero esto no impide que una galaxia en particular pueda ser mucho más antigua; así no faltan indicios de que nuestra Vía Láctea se acerque a los 10^{10} años. El enjambre más cercano de edad semejante debería distar de nosotros unas veinte veces más que la distancia media entre nebulosas, lo que concuerda bien con la observación. Las nebulosas cuya edad excede de unos 30×10^9 años se han de hallar en esta teoría más allá del horizonte óptico, pues a tal edad habrán tenido que alcanzar ya la distancia en que su velocidad de fuga llega a valer la de la luz. En este modelo de universo no puede haber ni momento de creación ni explosión catastrófica inicial y , por lo tanto, los elementos pesados hay que atribuirlos a procesos especiales, como los que tienen lugar en las supernovas, a menos que se prefiera admitir que la creación continua no sólo es de hidrógeno, sino de todos los elementos; parece, no obstante, a sus autores que esto sería complicar indebidamente las cosas, ya de suyo suficientemente arduas.

En cuanto al régimen de tal creación, opina Bondi que no puede variar sensiblemente de un lugar a otro, ni siquiera como varía la densidad de la materia, porque si así ocurriese y la creación fuese, por ejemplo, proporcional a la densidad de la materia en cada sitio, se produciría, sobre todo, en el interior de las estrellas y a tal velocidad que cada 3×10^9 años doblarían su masa. Ahora bien esto sería contra la exigencia de la teoría de que las nuevas nebulosas se formen en los espacios crecientes que van quedando vacíos entre las nebulosas antiguas al apartarse. Parece, pues, que la cantidad de materia creada en un espacio cuatridimensional ha de ser tan sólo proporcional al volumen del mismo, siendo el factor de proporcionalidad el triple

del producto de la constante de Hubble H por la densidad media ρ de la materia en el Universo; este factor o es una constante universal o varía lentamente en el espacio y el tiempo, a tenor, puede decirse, del potencial gravitatorio total. La materia, pues, según Bondi, ha de ir apareciendo por creación continua en el espacio intergaláctico más o menos vacío. Esto entraña una consecuencia importante; pues si únicamente fuese creada en presencia de otra materia, sería lógico que apareciese dotada del movimiento y velocidad de ésta; pero si puede aparecer en cualquier parte, será preciso establecer si lo hace en reposo o en movimiento, y admitido esto último, definir su velocidad y dirección. Gold y Bondi las identifican con la del substratum, es decir, de los observadores fundamentales de Milne. En cuanto a las restantes condiciones iniciales de la materia nuevamente creada, según Gold y Bondi, no es posible decidir entre una temperatura inicial elevada, con velocidades al azar disipadas en colisiones capaces de conducir a una radiación del espacio intergaláctico mayor que la observada, o una temperatura ya desde el principio baja. En cambio, de resultas de la ausencia de todo efecto observable de cargas eléctricas, creyeron poder afirmar que su régimen de producción había de ser nulo o, por lo menos, muy bajo, y consiguientemente que la creación debía producirse en forma de átomos neutros de hidrógeno, o bien de protones y electrones en igual proporción o incluso neutrones. Hoy naturalmente, introducido el concepto de carga leptónica, no hablarían probablemente estos autores en la misma forma.

No obstante cuanto antecede, McCrea ha vuelto a proponer recientemente la posibilidad de la producción de la materia exclusivamente en el interior de las galaxias y ha demostrado que también de esta manera se puede llegar a obtener un modelo perfecto de Universo estacionario. Como base de su teoría establece el postulado siguiente: «Toda materia es promotora potencial de la creación de nueva materia. La materia está normalmente toda en las galaxias y consiguientemente, la creación de nueva materia produce normalmente el crecimiento de las galaxias. A veces un fragmento de materia se desprende de su galaxia y se hace promotor potencial de nueva creación; si realmente resulta tal, se convierte en embrión o núcleo de una nueva galaxia. Existe, además, algún proceso crítico que limita el crecimiento de cada galaxia en particular». McCrea cree preferible concebir de este modo la creación continua porque a su juicio sólo así se presta a ser tratada por los métodos aplicados a los otros procesos físicos. Más aún, Abdus Salam ha insinuado que el proceso puede estar asociado con alguna interacción debilísima entre los núcleos atómicos que tal vez algún día se pueda descubrir y permita formular las leyes de procesos que pidan la creación continua. Además hace notar McCrea que de hecho en la explicación de Bondi no se prescinde de la materia anteriormente existente, dado que se admite para la nuevamente creada, una velocidad y dirección preferentes coincidentes con las del substratum. Finalmente opina McCrea que con su explicación se evita el tener que admitir una masa y una temperatura

para la materia intergaláctica que no sólo habría escapado hasta ahora a toda observación, sino que parecen estar en contra de todos los indicios actuales.

Bajo ciertos puntos de vista la teoría del estado estacionario, tal como la proponen Gold y Bondi, no puede menos de considerarse incompleta por no contar con un grupo de ecuaciones del campo gravitatorio; ellos, no obstante, lo juzgan más pronto una ventaja, porque a su juicio ello facilita el que algún día puedan formularse en consonancia con el principio de Mach. Sabido es, en efecto, que hasta ahora la gran dificultad para incorporar este principio a las leyes de la Física y expresar la conexión de la materia muy distante con los fenómenos locales estaba precisamente en no hallar el modo de formular la relación entre un Universo evidentemente sometido a mutaciones por un lado y por otro un comportamiento necesariamente estacionario como no puede menos de ser el de la *totalidad* de la materia que nos rodea. Ahora bien esta dificultad se desvanece o, por lo menos, se reduce considerablemente desde el momento en que el Universo se mira también como estacionario.

Como no hay ecuaciones de campo, la teoría no da la densidad media de la materia en el espacio, pero es posible deducirla de consideraciones relativas a la formación de las condensaciones. Finalmente, desde un punto de vista psicológico, un poderoso atractivo de la teoría del estado estacionario es, a juicio de sus autores, que tiene que satisfacer a muchos más interrogantes que cualquier otra, ya que no puede recurrir a suponer en el pasado procesos distintos de los actuales.

Hoyle admite todos los aspectos expuestos de la teoría del estado estacionario, pero prefiere apoyarlos en una modificación de las ecuaciones de campo de la Relatividad General. Su esfuerzo se dirige a encontrar un grupo de leyes físicas que conduzcan al estado estacionario como consecuencia. Aunque en el decurso del tiempo ha ido perfilando el modo de conseguirlo, en substancia su raciocinio consiste en que al examinar las ecuaciones de Einstein observa que, tanto si contienen el término cosmológico como si no, sólo sirven para sistemas en que esté satisfecho el principio de conservación de la materia y energía. Ahora bien, como es claro que para Hoyle tal principio no tiene validez, no encuentra dificultad en modificar dichas ecuaciones de modo que tengan aplicación al admitirse el Principio Cosmológico Perfecto, sólo que al hacerlo reconoce que habrá que tener cuidado de respetar las ideas básicas de la Cosmología y una de ellas es para Hoyle el postulado de Weyl, según el cual las líneas de universo de las nebulosas forman un haz de geodésicas que divergen a partir de un suceso localizado en el pasado a distancias finita o infinita, por lo que la geodésica que une cada punto P con O estará, en general, definida unívocamente. En otras palabras equivale ello a afirmar que en cada punto del espacio-tiempo hay una dirección y velocidad privilegiadas y que, por tanto, no todos los observadores ven el Universo de la misma manera, sino sólo los observadores fundamentales. Para tenerlo en cuenta introduce en las ecuaciones [7] o [10] un nuevo

tensor simétrico C_{ix} representativo de la creación continua, con lo que el principio de conservación deja de valer y, en cambio, queda expresada la creación de nueva materia para mantener inalterable la densidad. Esta creación, que según él ha de obedecer a leyes tan precisas como las de la gravitación, la termodinámica y la física atómica, he aquí cómo la define. Sea C una función escalar de posición, proporcional por definición a la distancia geodésica OP ; si O estuviese en el infinito, se establecería que la diferencia entre los valores de C en los puntos P y Q fuese proporcional a distancia PQ . En un substratum uniforme C coincide con el tiempo cósmico; pero la definición de Hoyle vale también cuando hay condensaciones. La primera derivada C_i de C define un campo universal de vectores de longitud constante y dirigidos en cada punto P a lo largo de PO ; la segunda C_{ix} define un campo tensorial simétrico. Hoyle pone como ecuaciones de campo modificadas

$$G_{ix} - \frac{1}{2} G g_{ix} + C_{ix} = -\kappa T_{ix} \quad [60]$$

y demuestra que admien la métrica [59] de De Sitter de que antes se ha hecho mención con tal que la longitud constante definida por C_i sea $3H$; más aún, prueba que esta solución es estable y que toda otra solución tiende a ella asintóticamente. En esta métrica la densidad media de la materia en el espacio no es nula, sino que vale $\frac{4\pi G\rho}{H^2} \simeq 1,5$.

El término C_{ix} es del mismo orden de magnitud que el término en Λ en las cosmologías relativistas y, por lo tanto, carece de importancia cuando se consideran condensaciones locales densas de materia. Evidentemente no hay ahora conservación de energía y materia, ya que las divergencias, expresadas con derivadas covariantes, dan

$$-\kappa \frac{DT^{ix}}{D\xi^x} = \frac{DC^{ix}}{D\xi^x} \neq 0 \quad [61]$$

y que esta no-conservación sea de hecho una creación continua de nueva materia se sigue de la métrica de De Sitter que para H positiva da un Universo en expansión, mientras que, por otra parte, se sabe que su densidad ha de permanecer constante.

La solución considerada por Hoyle es una de las soluciones posibles de las ecuaciones de campo tal como las escribe y goza de todas las ventajas expuestas a propósito de la teoría de Bondi y Gold, a la que supera en presentar un grupo perfectamente definido de ecuaciones de campo. En cambio tiene el inconveniente de que estas mismas ecuaciones se hacen sumamente complicadas en cuanto se introducen en el cálculo heterogeneidades actuales, porque entonces para construir el campo del escalar C es necesario conocer su historia pasada por entero; no obstante, la estabilidad del sistema es tan grande, que, si uno se contenta con cierto grado de precisión, basta limitarse a considerar solamente un pasado finito, ya que las heterogeneidades

del campo C debidas a perturbaciones desaparecen rápidamente. Consideraciones semejantes muestran que la multiplicidad de valores de C debida a las intersecciones que puedan ocurrir de los haces de geodésicas es también de poca importancia; pero así y todo asegura Bondi que las ecuaciones de Hoyle no se pueden considerar útiles en la práctica. Otro mérito de la teoría de Hoyle es llevar a un valor definido de la densidad media del Universo, cosa que no ocurre en la forma de Bondi. Finalmente pondera Hoyle el soporte que representa su teoría para el principio de Weyl que en Cosmología relativista, no obstante la veneración que por él sentía Einstein, juega sólo un papel incoloro por no entrar en las ecuaciones de campo; en cambio aquí las informa de una manera perfectamente definida «tendiendo —según él— los rieles sobre los que circula el Universo».

17. LA CONCEPCIÓN COSMOLÓGICA DE FANTAPPIÉ

Sería un error creer que con lo hasta aquí expuesto hemos agotado todas las teorías cosmológicas; prescindiendo de las distintas modificaciones de las teorías expuestas que las hacen ramificar hasta el infinito, orientaciones modernas sugieren otros caminos para explicar la configuración del Universo. Quizás una de las más interesantes es la debida al conocido geómetra italiano Fantappié y desarrollada por sus discípulos Castelnuovo y Arcidiacono. Las diversas teorías y modelos de Universo se suelen tratar, como se ha visto, a partir de las ecuaciones einsteinianas del campo gravitatorio, las cuales establecen una relación entre la distribución de la materia y la naturaleza geométrica del espacio-tiempo, o tomándolas a lo menos como piedras de toque. Fantappié aborda el problema desde el punto de vista mucho más amplio de la teoría de grupos. Supuesto que fenómenos iguales deben ser evidentemente regidos por las mismas leyes, siguese que el concepto de ley sólo tiene significado claro cuando existe un criterio preciso de igualdad y éste a su vez se expresa matemáticamente por la condición de que un cierto conjunto de operaciones constituyan un grupo. Si ahora con la palabra «Universo» significamos un sistema no caótico, sino ordenado y por tanto regido por leyes, se llega a la consecuencia de que a cada grupo corresponderá un modelo de Universo, cuyas leyes pueden ser determinadas por vía matemática a partir del grupo en cuestión. Ciertamente que los grupos que ofrece la matemática son infinitos y por tanto infinitos también en teoría los modelos de Universo; pero no se trata aquí de perderse en elucubraciones sin fin. Los modelos de Universo newtoniano y de la Relatividad restringida corresponden, respectivamente, a los grupos de Galileo y de Lorentz; ahora bien, de estos dos grupos el primero es caso límite del segundo y ambos son de diez parámetros y su cronotopo es un espacio de cuatro dimensiones; los dos modelos se pueden, pues, considerar como dos aproximaciones sucesivas del verdadero Universo físico. Fantappié se propuso investigar si no había algún otro grupo, también de diez parámetros y con cronotopo de cuatro dimensiones,

del que el de Lorentz fuese caso límite, como el de Galileo lo es del de Lorentz. Mediante un razonamiento geométrico basado en la teoría de los grupos topológicos demostró que sí y, lo que todavía es más interesante, probó además que tal grupo no es a su vez caso límite de otro ulterior, sino que es grupo simple o final, por lo cual el modelo de Universo en él basado es una ulterior aproximación de la realidad física y fuera de él y los dos anteriores no puede haber otro modelo que dependa sólo de diez parámetros y cuyo cronotopo sea cuadrimensional; a este modelo de Universo se le ha llamado Universo de Fantappiè o de la Relatividad Final. Y lo notable es que el modelo de Universo a que se llega es precisamente el de De Sitter, sin el inconveniente de tener que estar «vacío», como ocurre cuando a él se llega por el razonamiento del astrónomo holandés, sino pudiendo contener sin dificultad materia, ya que la presencia o ausencia de ésta no entra para nada en su deducción. En cuanto a las leyes de este Universo, se podrán determinar recordando que han de cumplir la doble condición de ser invariantes para el grupo de Fantappiè y reducirse a las leyes del Universo de Minkowski cuando R tiende a infinito, lo mismo que el de Minkowski se reducía al de Newton cuando en el grupo de Lorentz se hace tender a infinito c . Veámoslo más en particular.

En la Física clásica se imagina el Universo en un instante dado como un espacio euclídeo tridimensional y, por tanto, infinito e ilimitado. Superponiendo espacios de este tipo como las páginas de un libro, se obtiene un espacio de cuatro dimensiones o cronotopo «estratificado»: en él espacio y tiempo son absolutos y las medidas espaciales son independientes del estado de movimiento del observador. Como grupo de movimientos que hagan pasar de un punto del cronotopo a otro del mismo se tiene el de Galileo. Este resulta formado por el producto de las cuatro operaciones siguientes: a) las rotaciones del espacio tridimensional alrededor de un punto (individuada cada una por tres parámetros, los ángulos de Euler); b) los deslizamientos a velocidad constante respecto del sistema llamado «de inercia» (también tres parámetros); c) las traslaciones en el espacio (grupo de tres parámetros); d) las traslaciones en el tiempo (grupo de un parámetro). Cuando se pasa de la Física clásica a la relativista, el cronotopo ya no tiene una estructura estratificada, sino que espacio y tiempo resultan fundidos en un continuo único cuadrimensional y el grupo de Lorentz resulta formado por el producto de estas dos operaciones: a) rotaciones del cronotopo alrededor de un punto (que forman un grupo de seis parámetros); b) traslaciones del cronotopo (grupo de cuatro parámetros). En este grupo de Lorentz aparece una constante universal que se interpreta como la velocidad de la luz en el vacío; juega un papel esencial en la Física y respecto de los fenómenos mecánicos ordinarios se la puede considerar como infinita, con lo que el grupo de Lorentz se convierte en el de Galileo y entonces las rotaciones del cronotopo se descomponen en las rotaciones espaciales y en deslizamientos y las traslaciones del cronotopo en las traslaciones espaciales

y temporales. Por esto el grupo de Lorentz y la Relatividad restringida se pueden considerar como un perfeccionamiento del grupo de Galileo y de la Física clásica.

En estas condiciones se plantea Fantappiè el problema de si el grupo de Lorentz se puede a su vez considerar como caso límite de un nuevo grupo y si el modelo de Universo de Minkowski no resulta perfeccionable a su vez. Ante todo hay que observar que tal modelo, si existe, tendría que ser todavía de cuatro dimensiones y el nuevo grupo de 10 parámetros, pues por ser enteros estos dos números, no pueden cambiar al pasar al límite. Pues bien, estas dos solas condiciones bastan para llegar al resultado, pues según un conocido teorema de Geometría diferencial, un espacio de cuatro dimensiones que admite un grupo de movimientos en sí mismos de diez parámetros tiene que tener curvatura constante. Y como los dos modelos anteriores tenían curvatura nula, el nuevo tendrá curvatura constante $1/R^2$, siendo R el radio, grandísimo, del cronotopo. El grupo buscado sería entonces el de las rotaciones de un espacio de cinco dimensiones alrededor de un punto. Se va a parar así al modelo de Universo de De Sitter, pero con la diferencia, como ya hemos advertido, de que mientras De Sitter llegaba a él a partir de las ecuaciones gravitatorias de la Relatividad generalizada, con la condición de que no hubiese materia, Fantappiè lo obtiene por un razonamiento independiente de la Relatividad Generalizada, y su modelo puede, por tanto, contener materia. Recordemos que el Universo de De Sitter era un espacio de cuatro dimensiones de curvatura constante, cerrado según sus tres dimensiones espaciales y abierto según la temporal. Este Universo curvo sería percibido por sus habitantes como si fuese plano, y por esto en Relatividad Final es preciso distinguir entre el Universo «real» de De Sitter, en el que ocurren los fenómenos, y los infinitos Universos «fenoménicos» de Castelnuovo, espacios tangentes al Universo de De Sitter, en los que cada observador localiza los acontecimientos físicos, que por lo mismo le aparecen deformados a gran distancia. Cada observador se encuentra a cada instante en el centro de su Universo fenoménico y como no puede captarse la cuarta dimensión, cabe desarrollar la Relatividad Final utilizando sistemáticamente los universos fenoménicos, apelando a la Geometría Proyectiva, en la cual pierden toda significación las medidas de los intervalos cronotópicos que conservan, en cambio, en la Relatividad un valor absoluto: los infinitos universos fenoménicos pueden ser representados por un espacio proyectivo único de cuatro dimensiones (cronotopo de Castelnuovo), al que corresponde el grupo de Fantappiè, el cual, por ser proyectivo, implica el uso de cinco coordenadas homogéneas. Ya se ve que la Relatividad Final ha de ser una Física «proyectiva». En el grupo de Fantappiè entran dos constantes universales, c y R ; esta última permite reunir en una sola operación (rotación de un espacio de cinco dimensiones alrededor de un punto) la rotación y la traslación del cronotopo. La quinta dimensión es consecuencia de ser *proyectivo* el cronotopo y necesitarse, por tanto, para su descripción cinco coorde-

nadas homogéneas. Este grupo es simple, es decir, no se puede descomponer en otros grupos de menos parámetros y, por tanto, se llama «final»; pero esto sólo significa que no existen otros modelos de Universo de cuatro dimensiones y diez parámetros que sean perfeccionamiento del de De Sitter, pero no que no pueda haberlos con tal de aumentar el número de dimensiones y parámetros. Cuando las distancias y duraciones son pequeñas, la constante R se puede considerar prácticamente infinita, con lo que el grupo de Fantappiè se reduce al de Lorentz y el Universo real coincide prácticamente con el fenoménico y de aquí con el de Minkowski; por esto en la Relatividad restringida no había falta distinguir entre Universo real y fenoménico. Parece, pues, poderse afirmar que, así como la Física relativista es apta para tratar fenómenos en que entran en juego velocidades comparables a la de la luz, la Relatividad Final sirve para los fenómenos de naturaleza cosmológica en que intervienen distancias del orden de R y duraciones del orden de R/c. Y si examinamos la estructura de los tres grupos, vemos que en ellos tienen especial importancia los grupos de rotaciones: pues mientras el grupo de Galileo contiene como subgrupo las rotaciones del espacio de tres dimensiones y el de Lorentz las del espacio de cuatro dimensiones, el de Fantappiè es del tipo de las del espacio de cinco dimensiones.

Volviendo ahora a la investigación de las leyes del Universo de De Sitter en cuanto hallado por Fantappiè, ya hemos hecho notar que han de cumplir la doble condición de ser invariantes respecto del grupo de Fantappiè y reducirse a las del Universo de Minkowski al tender R a infinito. Las transformaciones del grupo de Fantappiè en el caso de dos variables x y t y un parámetro T (traslación espacial) son las siguientes:

$$x' = \frac{x + T}{1 + Tx/R^2} \quad t' = \frac{t \sqrt{1 + T^2/R^2}}{1 + Tx/R^2}$$

que para $R \rightarrow \infty$ se reducen a las traslaciones ordinarias

$$x' = x + T \quad t' = t$$

Quizás toda esta deducción parezca pecar de idealística. Para persuadirse de su carácter físico puede verse cómo se traducirán en la Relatividad Final las leyes de Maxwell del campo electromagnético. Examinando el comportamiento de las ecuaciones que las expresan respecto del grupo de las rotaciones, se halla que tales ecuaciones son susceptibles de revestir una forma tensorial independiente del número de dimensiones del espacio en que se las considera; en otros términos, las mismas ecuaciones referidas al espacio tridimensional euclídeo coinciden con las de la Electrostática; en el espacio tridimensional proyectivo de Castelnuovo (descrito por cinco coordenadas homogéneas) expresan un campo más general; al tender R a ∞ se descomponen en dos sistemas de ecuaciones respectivamente coincidentes con las del campo electromagnético y la Hidrodinámica relativista de Eisen-

hart, Synge y Lichnerowitz; resulta, pues, que ambos campos, tal como se presentan en la Relatividad restringida, pueden considerarse en el ámbito de la relatividad final como casos límites de una estructura más general que los comprendería a los dos y que se podría interpretar como la del campo magneto-hidrodinámico de Alfvén, punto sumamente interesante por el papel cada día más destacado que la magneto-hidrodinámica desempeña en las modernas investigaciones cosmológicas.

Si se quiere ver cómo la Relatividad Final concuerda con las más modernas teorías cosmológicas, comencemos por recordar a grandes rasgos las líneas fundamentales de las de Milne, Lemaître-Tolman y Bondi-Hoyle. Milne, como vimos, sostiene que el Universo puede ser descrito de dos modos distintos equivalentes entre sí, adoptando dos escalas distintas del tiempo. Con el tiempo cinemático t , el Universo comenzó hace t_0 años, su radio actual es ct , las galaxias se apartan de nosotros, las longitudes de los objetos rígidos resultan proporcionales al tiempo t y las frecuencias espectrales son constantes; en cambio, con el tiempo dinámico τ , no hay expansión, las frecuencias espectrales son proporcionales al tiempo y la luz se enrojece por envejecimiento. Con la escala t el espacio es euclídeo y el pasado finito; con la escala τ el espacio es hiperbólico y el pasado infinito. Según Lemaître, el Universo se originó mediante la explosión de un átomo primitivo, lo que explica el estado de expansión del Universo y el principio de la degradación de la energía: la expansión lleva a una pulverización creciente de la materia y de la energía. Tolman introdujo como hipótesis complementaria una fuerza interna de atracción, destinada a contrabalancear la expansión más pronto o más tarde: se llega así a un universo «pulsante». Finalmente, para Bondi y Hoyle, el Universo es estacionario e idéntico a sí mismo siempre; para compensar la fuga de las galaxias es necesaria la creación continua de nueva materia; así se respeta el Principio Cosmológico Perfecto, según el cual el Universo ha de presentar siempre, desde todas partes, el mismo aspecto. Este principio es indispensable, según estos autores, para que existan leyes físicas invariables con el tiempo. Aunque todos estos puntos de vista parecen contradictorios, es notable cómo se agrupan mediante la teoría de Fantappiè. Veamos cómo. Ya hemos visto que como perfeccionamiento del modelo de Universo de Minkowski se obtiene el de De Sitter, con curvatura no sólo del espacio, sino también del tiempo. Ahora bien, cuando se pasa de un espacio-tiempo de curvatura nula a otro de curvatura constante no pueden menos de ocurrir varios hechos que es menester examinar en detalle. En tanto que nosotros podemos ver un espacio tridimensional euclídeo tal como es, no podemos ver un espacio tridimensional esférico, porque resulta inimaginable por implicar una cuarta dimensión: de resultas lo veremos como si fuese plano y localizaremos los sucesos, no en su verdadera posición, sino en el espacio plano tangente al esférico en el punto en que nos hallamos, es decir, en el «universo fenoménico», el cual no será otra cosa que la representación geodésica del espacio

esférico sobre el espacio tangente, así llamada porque hace corresponder a las geodésicas del espacio esférico las rectas del espacio tangente. Y he aquí cómo nos hallamos por la fuerza de las cosas con una doble escala, no sólo temporal, sino también espacial, análoga a la introducida por Milne: *racionalmente* se puede describir el Universo esférico mediante una estructura geométrica hiperespacial, sin representación sensible, pero que puede ser tratada sistemáticamente por la geometría de los hiperespacios y la teoría de los grupos; pero en términos *sensibles* nos podemos valer de los universos fenoménicos, en los cuales, por medio de la representación geodésica de Beltrami, queda eliminada la curvatura del espacio y del tiempo. Un estudio más a fondo de la cuestión permite afirmar que la curvatura del espacio se traduce en el universo fenoménico en una dilatación de las longitudes, creciente con la distancia, y la curvatura del tiempo en una contracción de las duraciones. Resulta así que, en tanto que el Universo de De Sitter es de hecho cerrado en el espacio y abierto en el tiempo, deberá parecer a los observadores infinito en el espacio y finito en el tiempo. Operando con el grupo proyectivo de Fantappiè, que permite pasar de la descripción del Universo hecha por un observador O a la hecha por otro O', se encuentra una ley del tipo de la de Hubble en la teoría de la expansión

$$v = \frac{c}{R} x$$

que nos dice que en el universo fenoménico las galaxias han de presentar una velocidad de fuga v proporcional a su distancia x . La constante de Hubble no sería sino la relación entre la velocidad de la luz c y el radio del cronotopo R . En tanto que en Física relativista la velocidad de un cuerpo es siempre menor que c , aquí es siempre menor que c la velocidad de aproximación, pero puede superar a c la de fuga. Y aparece entonces, naturalmente, un «horizonte espacial», pues en cuanto la distancia de una galaxia sea mayor que R , su velocidad de fuga superará a c y no podremos verla más. La curvatura del tiempo produce, en cambio, la aparición de un «horizonte temporal», ya que a partir del grupo de Fantappiè se llega a una duración límite R/c análoga a la velocidad límite c de la Relatividad restringida. Y entonces los sucesos que en el modelo de De Sitter ocurren en un intervalo de tiempo infinito, en el cronotopo fenoménico quedan contraídos dentro del intervalo *finito* $-R/c$ y $+R/c$. Además, el grupo de Fantappiè nos lleva a un Universo puntual al apartarnos hacia el pasado o el futuro $-R/c$ o $+R/c$. Con lo que se llega a la importante conclusión de que, si se quiere describir el Universo en términos «sensibles», es decir, sin recurrir a la curvatura en el espacio ni en el tiempo, hemos de ir a parar necesariamente a una descripción del tipo de las de Lemaitre-Tolman: el Universo tuvo un origen puntual hace $-R/c$ años, su radio ahora es R y se reducirá de nuevo a un punto dentro de $+R/c$ años. El carácter *explosivo* de su evolución viene precisamente de que se

embute el tiempo infinito en un intervalo finito. Las dos constantes c y R dan así lugar a otras dos constantes fundamentales R/c (edad aparente del Cosmos) y c/R (constante de Hubble). Si se parte de $c = 3 \times 10^{10}$ cm/seg y $R = 3,3 \times 10^{27}$ cm, se llega a los valores $R/c = 1,1 \times 10^{17}$ seg $= 3,5 \times 10^9$ años y $c/R = 9 \times 10^{-18}$ seg, ambos suficientemente de acuerdo con los datos cosmológicos más recientes. Incluso se deduce del grupo de Fantappiè que el aspecto del Universo resulta siempre el mismo para cualquier observador; el hecho parecerá menos raro recordando que también en la Tierra a cualquier observador le parece que está en el centro del horizonte y los objetos lejanos le parecen empequeñecidos y apretados. Lo mismo sucede en el Universo, en donde, además de un horizonte espacial, hay otro temporal que produce una aceleración aparente del curso de los acontecimientos: así es como vemos las galaxias no sólo alejadas en el espacio, sino también en el tiempo. Queda así automáticamente satisfecho el principio de Bondi-Hoyle, lo que es consecuencia en el fondo de que en la Relatividad Final se trata de un espacio-tiempo de curvatura constante que admite un grupo de movimientos en sí mismo con el mayor número posible de parámetros y está, por tanto, dotado de la máxima simetría compatible con sus cuatro dimensiones. Finalmente ya hemos hecho notar la unificación que la Relatividad Final ofrece a la Mecánica e Hidrodinámica por una parte y al Electromagnetismo por otra, cosa importantísima, ya que los más recientes estudios sobre la Magneto-hidrodinámica y el plasma han demostrado que estas dos grandes teorías de la Física deben tener una profunda conexión, pues los fluidos ionizados o los fluidos conductores, como el mercurio, sumergidos en un campo magnético, revelan con su extraño comportamiento un «acoplamiento» interesante de los campos magnético e hidrodinámico, nacido de que el movimiento del fluido provoca la creación de campos electromagnéticos y de corrientes que modifican el comportamiento hidrodinámico del fluido mismo. Tales conexiones, inexplicables en la Relatividad restringida, se explican lógicamente en la Relatividad Final; ya hemos dicho, en efecto, que si imponemos a las ecuaciones del Electromagnetismo la invariancia respecto del grupo de Fantappiè se encuentra automáticamente toda la teoría relativista del campo hidrodinámico que se viene a fundir íntimamente a escala cosmológica, con el campo electromagnético y así ofrece una síntesis más natural y sencilla. Si tenemos, además, presente que la Relatividad Final resulta perfeccionable ulteriormente en una nueva y más amplia Relatividad «conforme» (con grupos de 15 parámetros), la cual, a su vez, está íntimamente ligada con la Física cuántica, porque introduce en el grupo la constante de Plank, y si observamos asimismo que la inclusión en el grupo conforme de los movimientos uniformemente acelerados nos podrá quizá permitir comprender mejor la estructura del campo gravitatorio, se ve que esta nueva manera abierta por Fantappiè de estudiar los modelos de Universo puede revelarse muy prometedora y fecunda y, por lo mismo, hacerse acreedora a mayor consideración que la que se le ha prestado hasta ahora.

III PARTE

LAS PRUEBAS DE LAS TEORIAS COSMOLOGICAS

1. EL EXAMEN EXPERIMENTAL DE LOS MODELOS COSMOLÓGICOS

La rápida ojeada que acabamos de arrojar sobre los modelos de universo más significativos suscita, naturalmente, el deseo de saber si alguno de ellos corresponde efectivamente al mundo en que vivimos. La respuesta se puede intentar desde diversos puntos de vista.

En un estadio puramente especulativo cabría examinar si alguno de los modelos excogitados contiene en sí mismo elementos contradictorios, es decir, si mediante un desarrollo racional de sus elementos llegamos a algún absurdo; pues en tal caso, en virtud del principio de lógica de que de lo verdadero solamente se pueden seguir consecuencias verdaderas, habría que rechazarlo sin ulterior averiguación. Lo contrario, en cambio, no nos daría por sí solo seguridad; ya que caben construcciones lógicas perfectas y, no obstante, enteramente ajenas a la realidad física; bajo este aspecto es interesante el trabajo de McCrea demostrando que a todos los modelos se puede llegar por raciocinios claros con tal de establecer con precisión un cierto número de principios bien justificados y fijar asimismo determinadas condiciones iniciales.

Otro camino más directo consiste en someter los distintos modelos al test de la experiencia. Es lo que estaba en el ánimo de los astrónomos cuando al inaugurar en 1948 el gran telescopio de Monte Palomar proclamaban que su lema había de ser «entre todos los universos posibles averiguar cuál y cómo es el nuestro». La idea es magnífica, pero realizarla no es tarea fácil. En primer lugar muchos de los elementos que entran en los modelos descritos no son directamente observables; es, pues, preciso comenzar por encontrar su nexo con las variables que pueden ser objeto inmediato de observación y describir los modelos en función de estos nuevos elementos. Y luego hay que contar con que los instrumentos sean suficientemente potentes para sondear el Universo hasta distancias en que lleguen a ser significativas las discrepancias entre los datos de la observación y los resultados que teóricamente haya que esperar hallar según sea verdadero uno u otro modelo de Universo. Y es mucho de temer que por dificulta-

des técnicas o por la naturaleza misma de los fenómenos choquemos con barreras infranqueables antes de alcanzar las distancias precisas. Así, por ejemplo, si para nuestro objeto fuese indispensable poder obtener espectrogramas de objetos celestes de magnitud 23 ó 24, la solución sería imposible, aun con telescopios situados fuera de la atmósfera en vehículos espaciales; pues de un objeto de magnitud 22 recibimos ya tan sólo 100 fotones por segundo por metro cuadrado; ahora bien, para obtener imágenes ópticas con una precisión del 1 % es indispensable recibir a lo menos 10 000 fotones por segundo por metro cuadrado. Claro que a donde no puede llegar la Astronomía óptica lo puede hacer seguramente la Radioastronomía y con el tiempo pueden ir apareciendo otras técnicas; pero éstas chocarán también con dificultades propias, nacidas precisamente de su misma capacidad de una mayor penetración en el Cosmos, como veremos luego a propósito de los tests radioastronómicos. Esto no obstante, tales inconvenientes no han de ser óbice para acometer la empresa y sacar de ella el mayor partido posible. Con razón se ha dicho que muchas de las pruebas propuestas, si no pueden enseñarnos cómo es nuestro Universo, pueden a lo menos servirnos para decirnos cómo no es; y ya se sabe que también a fuerza de exclusiones es posible ir precisando nuestros conceptos.

Las pruebas aducidas se pueden clasificar en dos grupos. Constituyen el primero las que tienden a comprobar directamente la métrica del Universo y sus variaciones con el tiempo, según sea uno u otro el modelo cósmico al que de hecho nuestro Universo se conforme; estos efectos que podríamos llamar «efectos cósmicos» pueden ser calculados teóricamente y comparados después con las observaciones. Las del segundo grupo se refieren a los que se han llamado «efectos de objeto» y consisten en la comprobación de la frecuencia o del desarrollo de ciertos fenómenos que constituyen como la historia individual de objetos celestes íntimamente unidos con la evolución del conjunto del Cosmos; así, por ejemplo, efectos postulados por las distintas teorías sobre la formación y evolución de las galaxias, sobre la formación y abundancia relativa de los elementos, sobre las distintas fuentes de energía estelar, sobre la materia intergaláctica, etc. Naturalmente un modelo que se presentase incompatible con teorías de esta naturaleza que vayan quedando sólidamente establecidas, es evidente que no podría ser viable. Por la índole de este trabajo expondremos con mayor detención las pruebas del primer grupo y por lo que toca a las del segundo la relativa a la edad del Cosmos por su íntima conexión con muchos de los parámetros empleados en el primer grupo. En cuanto a las demás, nos limitaremos a breves indicaciones sobre su naturaleza y utilización. Fuera de que su fuerza probativa es un tanto indeterminada, su exposición a fondo exigiría poco menos que un curso entero de Astrofísica.

Entre los datos directamente observables figuran el número y frecuencia de cuerpos celestes de distintas categorías, su luminosidad y sus diámetros aparentes, el corrimiento hacia el rojo de las rayas

de su espectro; indirectamente observables, en cuanto se pueden deducir de los elementos precedentes, lo son la densidad media del Cosmos, a lo menos en la región en que nos hallamos, su factor de expansión, e. d., la constante de Hubble, y el factor de aceleración o deceleración de la misma expansión. Antes de analizar ningún modelo, es forzoso comenzar por examinar si se pueden expresar todas estas magnitudes en función de la métrica y ecuaciones fundamentales del mismo. Prescindiendo de los modelos expuestos en los números 13-15 de la 2.^a parte (por la sencilla razón de que sus espacios tridimensionales y aun sus espacio-tiempos coinciden siempre con los de alguno de los modelos estudiados en primer lugar y lo que los individualiza es la manera de llegar a establecerlos), podemos afirmar que todos los distintos modelos o se basan en las leyes gravitatorias de la Relatividad (con o sin factor cosmológico) o en las clásicas de Newton (en este caso evidentemente con Λ) o en la Relatividad Cinemática de Milne o en la creación continua de Bondi, Hoyle y McCrea. Pues bien, en todas estas teorías se pueden calcular las magnitudes que nos interesan a base de los datos observables y sus ecuaciones fundamentales se pueden poner en función de estas mismas magnitudes. Aunque cabría ir las deduciendo a medida que se presentan en la exposición de los distintos tests que estudiamos, será más claro comenzar por exponer la especial relación de las ecuaciones de campo en su forma más general de Friedmann [21] con el parámetro de expansión de Hubble H dado por [14] y el ya mencionado parámetro de deceleración q que expresa que la expansión se ha de ir frenando y según Sandage y Hoyle queda definido por la expresión

$$q = - \frac{R''}{RH^2} \quad [62]$$

Este parámetro tiene extraordinaria importancia porque, como patentizaremos enseguida, de su valor y signo depende la curvatura y por lo tanto la forma del espacio; de aquí que a conocerlo con precisión se encaminen muchos esfuerzos de los cosmólogos. Las dos determinaciones que del mismo se han llevado a cabo son las realizadas por Humason, Mayall y Sandage en 1956 a base de 18 enjambres, suponiendo que su luminosidad intrínseca no variaba con el tiempo, y por Baum en 1957 y más tarde en 1961 con solos 7 enjambres, pero entre los que se contaba el 3C295 de Minkowski, y con una técnica mucho más refinada. El valor obtenido por los primeros fue $q_0 \simeq 2.45 \pm 0.8$, en tanto que el del último es $q_0 \simeq 1 \pm \frac{1}{2}$; este valor es evidentemente más fidedigno y lo que parece seguro es que q_0 no puede ser mayor que 3 y está probablemente comprendido entre 2 y 0 (siempre suponiendo que $\frac{dL}{dt} = 0$, lo cual evidentemente no pasa de ser una hipótesis por lo demás muy plausible, a lo menos durante el tiempo ne-

cesario para que los enjambres estudiados hayan alcanzado las distancias a que los observamos).

2. EXPRESIÓN DE LAS ECUACIONES DE CAMPO EN FUNCIÓN DE MAGNITUDES DIRECTA O INDIRECTAMENTE OBSERVABLES

Restando la segunda de las [21] de la primera y suponiendo $\Lambda = 0$, se obtiene, como se sabe

$$\frac{R''}{R} + 4\pi G \left(\frac{p}{c^2} + \frac{\rho}{3} \right) = 0 \quad [63]$$

y ésta, con ayuda de la [62], se puede escribir en la forma

$$\rho + \frac{3p}{c^2} = \frac{3qH^2}{4\pi G} \quad [64]$$

Esta ecuación liga la densidad media más la presión de la materia y radiación con la constante de Hubble y el parámetro de deceleración. Dando a H su valor actualmente considerado como más probable, a saber, $H_0 = 75$ km/sec/Mpc, se obtendrá para todos los valores actuales ρ_0 , p_0 , q_0 la relación siguiente

$$\rho_0 + \frac{3p_0}{c^2} = 2,06 \times 10^{-29} q_0 \text{ gr/cm}^3 \quad [64 a]$$

indicando el sufijo $_0$ que los valores se refieren al momento de la observación. Se ve sin más que, si se puede determinar q_0 , se puede conocer el primer miembro.

A un resultado no menos interesante se llega introduciendo $H_0 = \dot{R}'_0/R_0$ en la segunda de las [21] y suponiendo asimismo $\Lambda = 0$; se obtiene

$$\frac{zc^2}{R_0^2} = \frac{8\pi G \rho_0}{3} - H_0^2 \quad [65]$$

expresión asimismo de gran importancia, ya que si se pudiese conocer ρ_0 nos daría automáticamente el radio de curvatura con su signo y por lo tanto la naturaleza del espacio. Combinada con la [64] da

$$\frac{zc^2}{R_0^2} = \frac{4\pi G}{3q_0} \left[\rho_0(2q_0 - 1) - \frac{3p_0}{c^2} \right] \quad [66]$$

la cual confirma que la geometría intrínseca del espacio, dada por su curvatura, queda determinada por el contenido en energía del Universo, dado por su densidad y presión totales. Para usar estas ecuaciones conviene tener en cuenta los valores de p_0 y ρ_0 . ρ_0 es la suma de la presión de radiación $\frac{a T_0^4}{3}$ (siendo a la constante de Stefan)

y de la presión resultante de los movimientos al azar de las galaxias,

que se puede computar en $2/3 \rho v^2$, siendo v su velocidad media radial al azar, inferior a 300 kg/sec. En cuanto a ρ_o es la suma de la densidad de la materia $\rho_{o,m}$ más la de la materia equivalente a la densidad de radiación $\frac{a T_o^4}{c^2}$. Sustituyendo en [64], obtenemos

$$\rho_{o,m} + \frac{2 a T_o^4}{c^2} + \frac{2 \rho_{o,m} v^2}{c^2} = \frac{3 H_o^2 q_o}{4 \pi G} \quad [64 b]$$

Con los valores que se suelen admitir actualmente, a saber,

$$\rho_{o,m} \simeq 10^{-31} \text{ gr/cm}^3 \quad \frac{a T_o^4}{c^2} < 10^{-33} \text{ gr/cm}^3$$

y advirtiendo que el tercer sumando es también despreciable respecto del primero, se obtiene en definitiva

$$\rho_o = \frac{3 H_o^2 q_o}{4 \pi G} = 2,06 \times 10^{-29} q_o \text{ gr/cm}^3 \quad [67]$$

Igualmente de la [66] se obtiene con las mismas sustituciones

$$\frac{z c^2}{R_o^2} = H_o^2 (2 q_o - 1) \quad [68]$$

la cual manifiesta que será suficiente conocer q_o para conocer $\frac{z}{R_o^2}$ y por tanto la índole del espacio. De aquí que para todos los tests propuestos, como veremos enseguida, sea de capital importancia la previa determinación de q_o y a falta de su conocimiento exacto, haya que valerse de numerosas hipótesis sobre su valor.

Del examen de la [68] se ve en seguida que si $q_o > \frac{1}{2}$, z tiene que ser positivo y la curvatura del espacio, por tanto, positiva (espacios cerrados, elípticos); si $q_o = \frac{1}{2}$, la curvatura será nula y el espacio euclideo; finalmente, para $0 \leq q_o < \frac{1}{2}$, la curvatura será negativa y el espacio abierto, hiperbólico. Se pone el límite inferior 0, porque de la ecuación [64] se deduce que para $q_o = 0$, ρ_o debe ser también nulo y asimismo ρ_o , es decir, el Universo ha de quedar vacío; si se tuviese $q_o < 0$, como ρ_o no puede ser negativo, lo debería ser ρ_o , lo cual es absurdo. Es decir, que para los universos expansivos (para los que vale la [64]) el límite inferior de q_o es 0. Para el modelo estacionario q_o vale -1 .

Con las fórmulas anteriores se dispone de medios suficientes para la discusión de las pruebas basadas en las relaciones entre las magni-

tudes, corrimientos al rojo, números de nebulosas y diámetros angulares de las mismas; pero no así para la discusión de los tests basados en la edad del Universo. Es claro que en la actualidad podemos considerar nula la presión de radiación, y por eso en cuanto antecede hemos supuesto con frecuencia $p = 0$, con lo que se ha prescindido del término $\frac{8\pi G p}{c^2}$; pero otra cosa es si en los modelos expansivos se consideran estadios antiguos de la evolución, en que, evidentemente, ya no se puede prescindir de p .

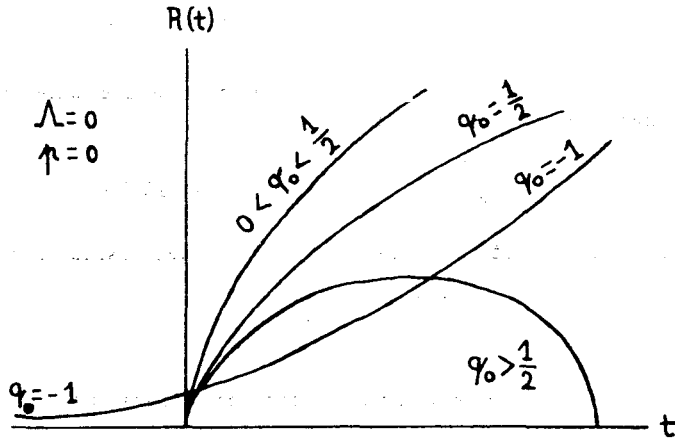


Fig. 2. — Tipo de la variación de la función $R(t)$ para distintos valores de q_0 en los modelos de Universo con $\Lambda = p = 0$.

En una expansión adiabática la presión de radiación, aT_0^4 , que podemos llamar w , decrece más aprisa que la densidad de materia ρ_m . Consideraciones de tipo general muestran, en efecto, que mientras T varía en razón inversa de R , ρ_m lo hace en razón inversa del cubo de R ; de donde se sigue que el término que traduce la radiación ha de variar en razón inversa de R^4 ; y esto, para valores pequeños de R , hace que $\frac{aT^4}{c^2}$ sea resueltamente mayor que ρ_m . Cuando tal cosa ocurría, es decir, muy al principio de la expansión, toda la densidad y la presión debieron ser efectivamente debidas a la radiación sola e iguales respectivamente a $\frac{w}{c^2}$ la primera y a $\frac{w}{3}$ la segunda, siendo $w = aT^4$. Entonces la [64] debió tomar la forma

$$\frac{2aT_0^4}{c^2} = \frac{3G_0H_0^2}{4\pi G} \quad [64c]$$

con lo que las equivalentes de la [66] y de la [68] serán, respectivamente:

$$\frac{zc^2}{R_0^2} = \frac{8\pi Gw}{3q_0 c^2} (q_0 - 1) \quad [66a] \qquad \frac{zc^2}{R_0^2} = H_0^2 (q_0 - 1) \quad [68a]$$

indicando el sufijo $_0$, como ya se ha dicho, que los valores se refieren al momento de la observación. Esta última nos indica que en un universo lleno de radiación se debe tener $q_0 > 1$ para $z = +1$; $q_0 = 1$ para $z = 0$; y $0 < q_0 < 1$ para $z = -1$. Cotejando estos valores con los deducidos de la discusión de la ecuación [68], se ve que la correspondencia no es exactamente la misma que en un universo en que predomine la materia.

3. LA RELACIÓN ENTRE LOS NÚMEROS DE NEBULOSAS Y SU MAGNITUD APARENTE

El test más obvio y el primero que se le ocurrió al mismo Hubble a raíz de sus descubrimientos sobre la distancia y velocidades de recesión de las galaxias fue el basado en el cómputo de los números de galaxias visibles hasta distancias cada vez mayores a fin de deducir de ellos la forma del espacio en que nos encontramos. El razonamiento es muy sencillo. Si se consideran las galaxias uniformemente distribuidas en el espacio y suponemos que con centro en nosotros vamos trazando esferas de radio creciente, el número de galaxias comprendido en cada esfera será proporcional a su volumen. Si el espacio es euclídeo, tales volúmenes crecerán proporcionalmente al cubo del radio; pero otra cosa ocurrirá si nuestro espacio real es un espacio cerrado esférico de tres dimensiones, que limita un hiperespacio de cuatro, del mismo modo que la superficie esférica de dos dimensiones limita un espacio de tres. Para mejor comprender lo que ocurre en dicho espacio, comencemos por ver lo que sucede con las circunferencias concéntricas trazadas sobre esta superficie esférica, con radio creciente y centro común en un punto de la misma y con las áreas por ellas encerradas. Si se tratase de un plano, las longitudes de tales circunferencias valdrían $2\pi r$ y las áreas de los círculos limitados por ellas πr^2 , y se daría, por tanto, indefinidamente una proporcionalidad de las primeras con los valores del radio y de las segundas con sus cuadrados. Pero tal superficie no es un plano: unos seres infinitamente delgados que habitasen sobre dicha superficie esférica, que ellos tomarían por un plano, trazarian sus circunferencias desde un origen O como centro con radios crecientes, que ellos creerían rectas, pero que serían, en realidad, arcos de círculo máximo de longitud $r = R\theta$, siendo R el radio de la esfera limitada por dicha superficie y θ el ángulo en el centro de la esfera, correspondiente a cada arco-radio r , medido en radianes. Al principio, para valores pequeños de r , la proporcionalidad parecería existir como en el caso del plano; pero a medida que r creciese comenzaría a fallar; más aún, cuando r llegase a va-

ler $\frac{\pi R}{2}$, la circunferencia descrita sería el diámetro de la esfera

correspondiente al polo O, y si r seguía aumentando, la circunferencia descrita con este radio comenzaría a disminuir, hasta reducirse a un punto cuando el radio r alcanzase el valor $R\pi$. Algo correlativo ocurriría con las áreas de los presuntos círculos y, en realidad, casquetes esféricos encerrados por dichas circunferencias; el crecimiento no sería proporcional al cuadrado del radio y pasada la distancia $\frac{R\pi}{2}$, su

incremento comenzaría a decrecer y no podría exceder tal área el valor correspondiente al área total de la superficie esférica $4\pi R^2$. Con una dimensión más, podremos imaginarnos lo que ocurre en nuestro Universo y el test descrito. Si el espacio es euclídeo, los radios crecientes con que describimos las esferas serán rectas; pero si es esférico, tales radios no serán rectas, sino arcos de circunferencia $r = R\theta$. Las esferas descritas por ellos tienen áreas iguales a $4\pi R^2 \sin^2 \theta$, en vez de $4\pi R^2 \theta^2$, como tendrían las esferas euclídeas descritas con radio $R\theta$; sus volúmenes serán también menores que los de las correspondientes esferas euclídeas. Al llegar al valor $r = \frac{R\pi}{2}$, el área terminal de la

esfera descrita pasa por un máximo; si r sigue aumentando, los volúmenes crecen todavía, aunque a un ritmo menor, pero las áreas terminales decrecen; al valer $r = R\pi$, el área terminal de la esfera será nula, la distancia lineal máxima posible entre dos puntos será πR y el volumen del Universo resultará igual a $2\pi^2 R^3$, unas seis veces menor que el de una esfera euclídea de radio πR . Si las galaxias están uniformemente distribuidas en el espacio, su número ha de ser proporcional al volumen que ocupan: haciendo, pues, recuentos de las mismas hasta distintas distancias y viendo cómo su número aumenta, ha de ser posible ver también en qué forma varían los volúmenes y consiguientemente deducir de ella si el espacio es euclídeo o no.

Con todo, este método, a primera vista tan sencillo, tropieza en la práctica con enormes dificultades que lo llegan a hacer del todo inaplicable. Y la primera de todas es que es utópica la posibilidad de contar galaxias hasta diferentes distancias por la sencilla razón de que no conocemos estas últimas directamente; hay que limitarse a contar nebulosas de luminosidad aparente l superior o igual a la de una magnitud m dada, tomando tal luminosidad como índice de distancia. Ahora bien, para que la luminosidad aparente l pueda ser tal índice, o bien se ha de conocer en cada caso la luminosidad absoluta L o bien se ha de poder establecer que la distribución de L no depende de la distancia a nosotros, o todavía, dado que las porciones de Universo examinadas son relativamente pequeñas, se ha de poder considerar su valor medio como constante. Por desgracia, ninguna de estas condiciones se cumple y la dispersión de los valores conocidos de L es tan grande que ni en primera aproximación cabe considerarlas realizadas. Y otra dificultad no menor es que incluso con el telescopio de Monte

Palomar apenas se alcanza a fotografiar las magnitudes aparentes mínimas a que es necesario llegar para empezar a encontrar entre el cálculo y la observación diferencias verdaderamente significativas para poder discriminar los distintos modelos de Universo. Quizás a más de uno le parezca que en estas condiciones es ocioso conceder a este test más atención; pero, aparte de que algunos de los cálculos que exige se aplican luego a los otros, es interesante desarrollarlo, siquiera sea someramente, para que se pueda apreciar por un lado la complicación que comporta cualquier comprobación experimental que se quiera realizar con suficiente grado de garantía y, por otro, la enormidad de las distancias a que es preciso llegar para que las pruebas discriminatorias puedan tener éxito.

Hay que comenzar por determinar los volúmenes encerrados en las esferas de radio creciente definidas por la distancia media de las galaxias de magnitud aparente decreciente en el momento de la observación t_0 . Para ello conviene comenzar por notar que la distancia espacial sin dimensiones σ , independiente del tiempo y definida en [15] se puede deducir fácilmente de [16] reemplazando las coordenadas cartesianas por polares esféricas $r \theta \Phi$. Se obtiene sin dificultad

$$ds^2 = dt^2 - \frac{R^2(t)}{c^2} \frac{dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\Phi^2}{\left(1 + \frac{zr^2}{4}\right)^2} \quad [16a]$$

Mediante una oportuna modificación de la coordenada radial r , legítima por ser aquí las coordenadas puramente convencionales y estar relacionadas con la distancia verdadera sólo por la métrica, Robertson da a la expresión del intervalo la forma

$$ds^2 = dt^2 - \frac{R^2(t)}{c^2} \left[\frac{dr^2}{1 - zr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\Phi^2) \right] \quad [16b]$$

que él prefiere y retendremos nosotros aquí por ser la utilizada por Bondi, Mayall, Sandage y gran parte de los contemporáneos, aunque otros, como por ejemplo McVittie, prefieran la [16a]. $d\sigma$ se identificará con la raíz cuadrada del coeficiente de $\frac{R^2(t)}{c^2}$ en [16a] o [16b].

Estos intervalos que definen los radios de las esferas cuyos volúmenes buscamos coinciden, naturalmente, con las trayectorias de los rayos luminosos que nos llegan de las galaxias de menor magnitud aparente en ellas comprendidas. Como tales rayos describen siempre por definición una geodésica nula y para ellos θ y Φ son constantes, tendrán, naturalmente, $ds = d\theta = d\Phi = 0$ y de resultas definen la distancia métrica σ deducida de [16b] como

$$\sigma = \int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{R(t)} = \text{una función independiente del tiempo} \quad [69]$$

t_1 es el instante de emisión de la luz en una galaxia y t_0 el de su recepción en el origen. En cuanto a la conexión de σ con r nos la da la integral

$$\sigma = \int_0^{r_1} \frac{dr}{(1 - zr^2)^{1/2}} = \begin{cases} \text{arc sin } r_1 \\ r_1 \\ \text{arc sinh } r_1 \end{cases} \quad \text{según que } z = \begin{cases} +1 \\ 0 \\ -1 \end{cases} \quad [70]$$

siendo r_1 la coordenada radial de la nebulosa en el espacio tridimensional de métrica $d\sigma^2$. La distancia métrica a cada nebulosa en el instante t_0 vendrá dada por $rR(t_0)$. El volumen buscado será, pues,

$$V = 2R_0^3 \int_0^{r_1} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \frac{dr \cdot r^2 d\theta \cdot \sin \theta d\Phi}{(1 - zr^2)^{1/2}} = 2R_0^3 \int_0^{r_1} \frac{r^2 dr}{(1 - zr^2)^{1/2}} \\ \int_0^{\pi/2} \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\Phi = 4R_0^3 \int_0^{r_1} \frac{r^2 dr}{(1 - zr^2)^{1/2}} \quad [71]$$

Según el valor y signo de z resultan las soluciones siguientes:

$$V = \begin{cases} 2\pi R_0^3 [\text{arc sin } r_1 - r_1 (1 - r_1^2)^{1/2}] \\ \frac{4}{3} \pi R_0^3 r_1^3 \\ 2\pi R_0^3 [r_1 (1 + r_1^2)^{1/2} - \text{arc sinh } r_1] \end{cases} \quad \text{para } z = \begin{cases} +1 \\ 0 \\ -1 \end{cases} \quad [72]$$

Para que estas expresiones puedan ser utilizadas para los cálculos de galaxias hasta distancias sucesivas crecientes, es indispensable que estén en función sólo de magnitudes conocidas; como tales tomamos las magnitudes bolométricas aparentes m_b , directamente medibles y el parámetro de deceleración q_0 antes definido. Sin embargo, ya tal como están, permiten deducir de ellas una consecuencia interesante. De las [70] se deduce inmediatamente

$$r_1 = \Psi(\sigma) = \begin{cases} \text{sin } \sigma \\ \sigma \\ \text{sinh } \sigma \end{cases} \quad \text{según sea } z = \begin{cases} +1 \\ 0 \\ -1 \end{cases} \quad [73]$$

La distancia métrica en el momento de la emisión del fotón es $r_1 R(t_1)$, teniendo r_1 el valor que le corresponda por la [73], es decir, siendo una función $\Psi(\sigma)$. El volumen encerrado dentro de la hipersfera de radio $R_1 r_1$ en el momento de la emisión de la luz será por tanto, suponiendo el caso $z = +1$ y expresándolo en función de σ

$$V(\sigma) = 2\pi R_0^3 (\sigma - \text{sin } \sigma \cdot \text{cos } \sigma) \quad [74]$$

que para valores pequeños admite el desarrollo en serie

$$V(\sigma) = \frac{4\pi R_0^3 \sigma^3}{3} \left(1 - \frac{\sigma^5}{5} + \dots\right) \quad [74 a]$$

Para que se puedan apreciar diferencias significativas con el caso euclídeo dado por $z = 0$ y en que el volumen viene dado por $\frac{4}{3} \pi R_0 \sigma^3$, es indispensable que los términos entre paréntesis tengan valores apreciables y para ello los valores de σ han de ser próximos a la unidad, pues de lo contrario sus potencias serían despreciables. Ahora bien cuando se considera la relación entre el corrimiento al rojo y la magnitud, se encuentra que para que σ valga prácticamente la mitad, es preciso que también alcance dicho valor $u = \frac{d\lambda}{\lambda}$ y ello por sí solo patentiza las enormes distancias a que hay que llegar para conseguir resultados seguros.

Volviendo a las expresiones [72] ya hemos indicado que en ellas el volumen $V(\sigma)$ se ha de reemplazar por el número de galaxias $N(m)$ de magnitud $\geq m$ que ha de quedar contenido en el mismo, supuesto que estén uniformemente distribuidas a razón de n por unidad de volumen. En cuanto a la distancia espacial sin dimensiones σ , como tampoco es directamente medible, se ha de sustituir por las sucesivas magnitudes bolométricas m_i , decrecientes, para lo cual nos es necesario conocer la conexión entre σ y la luminosidad aparente l de las galaxias y a través de ésta entre σ y m . Si L es la cantidad total de energía emitida por una galaxia en la época t_1 , la recibida l (luminosidad bolométrica aparente) en la época t_0 se demuestra que es

$$l = \frac{L}{4\pi R_0^2 \Psi^2(\sigma) (1 + u)^2} \quad [75]$$

El factor $4\pi R_0^2 \Psi^2(\sigma)$ mide el área del frente de onda de radiación que avanza desde la galaxia que la emite y que, por no ser euclídea la geometría en los casos $z = \pm 1$, no puede ser ya simplemente igual a $4\pi R_0^2 \sigma^2$; en cuanto a los factores $(1 + u)$ corresponden a los que Hubble denomina «efecto de energía» y «efecto de número».

La solución general de las ecuaciones de campo, en coordenadas polares, cuando se supone $p = \Lambda = 0$, $z = +1$, reviste la forma

$$R = \frac{4\pi G \rho R^3}{3c^2} (1 - \cos \alpha) \quad t = \frac{4\pi G \rho R^3}{3c^3} (\alpha - \sin \alpha) \quad [76]$$

debiéndose recordar que ρR^3 es una constante. En cuanto a α es el ángulo de giro del círculo que describe la cicloide representada por las [76] y que da la ley de variación de $R(t)$ con t . Como se ve, $R(t)$ se anula cada vez que α vale $2\pi n$, siendo n entero; corresponde, pues, a un modelo de universo oscilante que alternativamente se expansiona y se contrae. Para los otros valores posibles de z , en vez de las [76] se tendrá

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{4\pi G\rho R^3}{3c^2} (\cosh \alpha - 1) \\ t &= \frac{4\pi G\rho R^3}{3c^3} (\sinh \alpha - \alpha) \end{aligned} \right\} \text{para } z = -1 \quad [76 a]$$

$$R = (6\pi G\rho R^3)^{1/3} t^{2/3} \quad \gg \quad z = 0$$

Cuando $z = +1$, por las [76] junto con la [69] y la [70] se tiene $r = \sin \alpha$; y si α_1 es el valor de α en el instante t_1 y α_0 en el t_0 , se tendrá

$$r = \Psi(\sigma) = \sin(\alpha_0 - \alpha_1)$$

y reemplazando en la [75]

$$l = \frac{L}{4\pi a^2 (1 - \cos \alpha_0)^2 \sin^2(\alpha_0 - \alpha_1) (1 + u)^2} \quad [75a]$$

designando por a el coeficiente de R en la primera de las [76]. En forma logarítmica

$$\log l = \log L - \log 4\pi - 2 \log [a (1 - \cos \alpha_0) \sin(\alpha_0 - \alpha_1) (1 + u)]$$

y recordando la relación de Pogson, $m = -2,5 \log l + \text{const.}$, se tiene finalmente

$$m = 5 \log [a (1 - \cos \alpha_0) \sin(\alpha_0 - \alpha_1) (1 + u)] + 2,5 \log 4\pi - 2,5 \log L \quad [77]$$

expresión en la que todavía entran los ángulos α_0 y α_1 que desconocemos. Recordando que según [14] se tiene por definición $H = R'/R$, en el momento t_0 de llegarnos la luz de una nebulosa, el valor de H_0 será

$$H_0 = \frac{R'_0}{R_0} = \frac{c}{a} \frac{\sin \alpha_0}{(1 - \cos \alpha_0)^2} \quad [78]$$

como se ve derivando respecto de t las [76]. Calculando para la misma época t_0 el parámetro de deceleración q_0 , resulta ser igual a

$$q_0 = -\frac{R''_0}{H_0^2 R_0} = \frac{1 - \cos \alpha_0}{\sin^2 \alpha_0} \quad [79]$$

y asimismo es fácil probar, como se verá en el número siguiente, que el valor de $(1 + u)$ se puede expresar por

$$1 + u = 1 + \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{R(t_0)}{R(t_1)} = \frac{1 - \cos \alpha_0}{1 - \cos \alpha_1} \quad [80]$$

Llevados todos estos valores a la [75a], después de una serie de reducciones sumamente laboriosas, obtuvo Mattig finalmente para los modelos con $q_0 > 0$

$$m_{\text{bol}} = 5 \log q_0^{-2} \{ q_0 u + (q_0 - 1) [(2q_0 u + 1)^{1/2} - 1] \} + C \quad [81]$$

siendo

$$C = 2,5 (\log 4\pi - \log L) + 5 \log \frac{c}{H_0} \quad [82]$$

Si fuese $q_0 = 0$, la [81] tomaría la forma

$$m_{bol} = 5 \log u \left(1 + \frac{u}{2} \right) + C \quad [81a]$$

Para $z = 0$ y $z = -1$ se obtendrían resultados análogos.

Esto supuesto, eliminando a en la [77] por medio de la [78], escribiendo el resultado en forma exponencial, definiendo una nueva cantidad observable

$$A \equiv 10^{0,2(m-C)} \quad [83]$$

teniendo C el valor dado por la [82] y eliminando finalmente las funciones trigonométricas recurriendo a la [79], se obtiene

$$r = \sin \sigma = \frac{A(2q_0 - 1)^{1/2}}{1 + u}$$

y reemplazando al denominador por su valor deducido de la [81]

$$r = \frac{A(2q_0 - 1)^{1/2}}{q_0(1 + A) - (q_0 - 1)(1 + 2A)^{1/2}} \quad [84]$$

que da la expresión de la distancia fotométrica de la nebulosa de una magnitud bolométrica dada. Expresando entonces R_0 en función de H_0 y q_0 por medio de la [68], las [72] toman por fin la forma

$$N(m) = \begin{cases} \frac{2\pi n c^3}{H_0^3 (2q_0 - 1)^{3/2}} \left[\arcsin P - P \sqrt{1 - P^2} \right] & + 1 \\ \frac{4\pi n A^3 c^3}{3H_0^3} \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + A + (1 + 2A)^{1/2} \right] \right\}^{-3} & \text{para } z = 0 \\ \frac{2\pi n c^3}{H_0^3 (1 - 2q_0)^{3/2}} \left[P \sqrt{1 + P^2} - \operatorname{arcsinh} P \right] & - 1 \end{cases} \quad [85]$$

recordando que n es el número de nebulosas por unidad de volumen y designando por P el 2.º miembro de la igualdad [84].

Para el caso de un universo estacionario, Bondi y Gold han calculado una expresión parecida, aunque dejándola en función de u , a saber

$$N(m) = \text{const} \times \left[\lg(1 + u) - \frac{u(2 + 3u)}{2(1 + u^2)} \right] \quad [86]$$

Combinada con la expresión equivalente de las [81] y [81a] para el caso del Universo estacionario.

$$m_{bol} = 5 \log u + 5 \log(1 + u) + \text{const} \quad [87]$$

puede servir la [86], no menos que las [85] para tabular $N(m)$ en función de m y de q_0 .

Aunque las [85] y [86] están ya expresadas en función solamente de cantidades observables, todavía tienen que sufrir otros retoques antes de que sus resultados se puedan comparar directamente con los de la observación; basta fijarse en la presencia en las [81], [81a] y [87] de constantes cuyo valor hay que determinar.

Para ello se adaptan las ecuaciones a las observaciones de que se dispone de las magnitudes brillantes. Utilizando los miembros más brillantes de los enjambres de galaxias, hallaron Humason, Mayall y Sandage que la relación entre el corrimiento al rojo u y la magnitud fotográfica o visual corregida del efecto de dicho corrimiento para la galaxia más brillante de cada enjambre era

$$m_v - k_v = 5 \log u + 20,676 \quad m_F - k_F = 5 \log u + 21,576 \quad [88]$$

pues es claro que a las magnitudes m observadas utilizando una región del espectro mediante filtros hay que agregarles un término correctivo k que tiene por objeto corregir las magnitudes heterocromáticas observadas fotográficas m_F o visuales m_v del efecto de enrojecimiento de la curva de distribución de la energía del astro de resultas de la banda de transmisión de cada filtro. Como esta corrección k es muy pequeña para corrimientos al rojo de valor $u < 0,5$, es lógico que los recuentos en el futuro se hagan a base de magnitudes determinadas en la región roja de longitud de onda entre 6200 y 7500 Å. De aquí que convenga determinar los valores de la función $N(m)$ para un sistema de magnitudes m_R definido para la región roja del espectro. Para definirlo se sirvió Sandage de un fotocátodo S20 con un filtro Schott RG2 o bien de una placa Eastman 103a-F con el mismo filtro RG2. En un sistema de esta índole se puede admitir que los índices de color $m_F - m_R$ están relacionados con los normales $m_F - m_v$ mediante la transformación aproximada $m_F - m_R \simeq 1,5 (m_F - m_v)$. Los índices de color normales de las galaxias elípticas E valen aproximadamente $m_F - m_v \simeq 0,87$, razón por la cual en este sistema de magnitudes rojas de Sandage resulta $m_F - m_R \simeq 1,31$. En consecuencia, para este sistema de magnitudes, en vez de las [88], se tendrá

$$m_R - k_R = 5 \log u + 20,266 \quad [89]$$

En los recuentos de galaxias, más que galaxias de enjambre se usan galaxias aisladas o de campo, razón por la cual la constante de [89] no podrá ser ya 20,266, porque la magnitud absoluta media de tales galaxias suele ser más débil que la de las más brillantes de los enjambres. Sandage determinó su nuevo valor considerando la distribución de una muestra de 768 galaxias del Catálogo de Shapley-Ames de brillo superior a la magnitud 13; su índice de color medio normal resulta igual a $m_F - m_v = 0,731$. Admitiendo que, por las precauciones tomadas en la selección y tratamiento de las galaxias de la muestra, este valor sea representativo del de las galaxias del campo general, su índice medio en el sistema de magnitudes rojas será $m_F - m_R \simeq$

1,5 (0,731) \simeq 1,10. Como que la diferencia en magnitud absoluta entre las galaxias más brillantes de los enjambres y las galaxias medias de campo, en el catálogo de los corrimientos al rojo, es, según Hubble, Mayall y Sandage, $\Delta m_F = 2,04$, la expresión [89] tendrá que ser ahora

$$m_R - k_R = 5 \log u + 22,516 \quad [89a]$$

con lo que el parámetro A definido en [84] tendrá ahora la forma

$$A = 10^{0,2 (m_R - k_R - 22,516)} \quad [84a]$$

Para que los resultados de las expresiones [85] y [86] puedan ser directamente comparados con las cifras resultantes de los recuentos de galaxias es todavía necesario determinar el valor global de sus constantes, haciendo que en las magnitudes brillantes para $u < 1$ se adapten al valor

$$\log N(m) = 0,6 m_F - 8,87 \quad [90]$$

dado por Holmberg como consecuencia de sus correcciones al sistema de magnitudes del catálogo de Shapley-Ames. Como el sistema de magnitudes allí empleado y el utilizado por Sandage están en la relación $m_F - m_R \simeq 1,10$, la condición a que se tendrán que adaptar las constantes será finalmente

$$\log N(m) = 0,6 m_R - 8,21 \quad [90a]$$

Por fin se está en condiciones de utilizar las expresiones [84a], [83], [85] y [86] para tabular $N(m)$ para distintos valores de q_0 . Es de advertir que para valores pequeños de P y u se facilita el cálculo de la primera y tercera de las [85] y de la [86] mediante el empleo de desarrollos en serie:

$$\left. \begin{aligned} \text{arc sin } P - P \sqrt{1 - P^2} &= \frac{2}{3} P^3 + \frac{1}{5} P^5 + \frac{3}{28} P^7 + \dots \\ P \sqrt{1 + P^2} - \text{arc sinh } P &= \frac{2}{3} P^3 - \frac{1}{5} P^5 + \frac{3}{28} P^7 - \dots \\ \lg(1 + u) - \frac{u(2 + 3u)}{u(1 + u)^2} &= \\ = \frac{1}{3} u^3 - \frac{3}{4} u^4 + \frac{6}{5} u^5 - \frac{10}{6} u^6 + \frac{15}{7} u^7 - \frac{21}{8} u^8 + \dots \end{aligned} \right\} [91]$$

Para valores mayores, se pueden usar directamente las Tablas de arc sin P, arc sinh P y $\lg(1 + u)$.

Sandage ha calculado la tabla $N(m)$ tomando como argumento $m_R - k_R$ desde la magnitud 8 a la 40, para ocho valores de q_0 correspondiente uno al estado estacionario ($q_0 = -1$) y siete a modelos evolutivos: con espacio hiperbólico de densidad nula ($q_0 = 0$); con espacio euclideo de densidad $\rho_0 = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$ ($q_0 = \frac{1}{2}$); y cinco universos ce-

rrados oscilantes. de radio de curvatura igual a $R_0 = \frac{c}{H_0 n_1}$, pudiendo ser $n_1 = 1, 2, \dots, 5$ (según que se tenga $q_0 = 1, 2\frac{1}{2}, 5, 8\frac{1}{2}, 13$). Al hacer los cálculos se nota que en todos los modelos con $q_0 > 1$ aparece un máximo de $N(m)$, que, dada la significación de $N(m)$, carece de sentido físico, ya que el número total de fuentes luminosas por grado cuadrado no puede tener que disminuir al ir avanzando hacia magnitudes más débiles. La explicación debe buscarse en la periodicidad de las expresiones empleadas para su cálculo. Es algo parecido a lo que ocurre con la del área de un casquete esférico sobre una esfera de radio R en función de la distancia r contada sobre dicha esfera a partir de un punto O

$$S(r) = 2\pi R^2 \left(1 - \cos \frac{r}{R}\right)$$

Cuando r se hace mayor que πR el área comienza a disminuir; lo que el máximo indica es que la distancia r ha alcanzado el polo opuesto a O y que el vector distancia comienza a volver hacia el observador. Para tener el valor correcto de $N(m)$ en este caso hay que poner

$$N_c(m) = 2N(\text{máx.}) - N(m) \quad [92]$$

por analogía con lo que se hace en el caso del ejemplo citado en que se evita la periodicidad expresando que el área total contada desde

$$r = 0 \text{ hasta } r > \pi R \text{ es } 8\pi R^2 - 2\pi R^2 \left(1 - \cos \frac{r}{R}\right) = 2S(\text{máx.}) - S(r).$$

Los valores corregidos $N_c(m)$ resultantes, que son los que de hecho se espera observar con el telescopio, han sido también tabulados y en ellos no aparece ya máximo alguno. En cuanto a saber para qué magnitud pasa $N(m)$ por el máximo, o en otras palabras, de qué magnitud se presentan las nebulosas situadas en el antipolo, basta notar que para que $N(m)$ pase por un máximo, también ha de pasar por él P y por lo tanto se deberá tener $\frac{dP}{dA} = 0$. Diferenciando la expresión [83] se ve que tal condición se cumple para

$$A = \frac{(2q_0 - 1) + q_0 \sqrt{2q_0 - 1}}{(q_0 - 1)^2} \quad [93]$$

Estos valores han sido también calculados y tabulados para los distintos valores de q_0 . Resulta que para valores de q_0 comprendidos entre $1/2$ y $+1$ no se alcanza nunca el antipolo, aunque se trate de modelos cerrados de universo; y además el hecho de que $N(m)$ tienda asintóticamente a un límite para todo modelo con $q_0 > 0$ muestra que en cada caso se alcanza un horizonte observacional más allá del cual ninguna información es posible.

Si se representan gráficamente los valores de $N_c(m)$ obtenidos con tanto trabajo, se ve que trágicamente toda esta imponente preparación no ha conducido a otro resultado práctico que el de probarnos que, a lo menos con los medios ópticos de que hoy disponemos, el test no puede poner nada en claro. Es indispensable en efecto contar con la capacidad de precisión de que es capaz el telescopio de Monte Palomar. Para obtener $N_c(m)$ en función de las magnitudes observa-

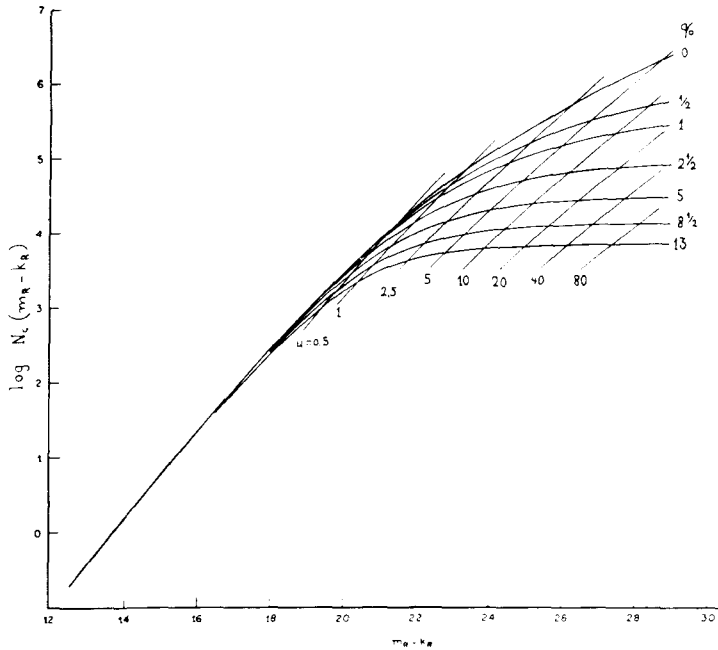


FIG. 3. — Variación de la función $\log N_c(m_R - k_R)$ para distintos valores de q_0 según las tablas calculadas por Sandage. Las líneas correspondientes a los distintos valores de u indican a qué magnitud corresponde un mismo valor del corrimiento al rojo según el valor del parámetro de deceleración.

Las curvas

das m_R es necesario comenzar por afectar tales magnitudes de una corrección de valor k_R , cosa relativamente fácil de hacer cuando se conoce k_R en función de u ; si no se conoce, se puede uno contentar con una corrección aproximada, pues el error no pasará de 0,2 de magnitud. Pero al trazar las curvas resultantes, se ve que la diferencia entre los valores de $N_c(m)$ para un valor dado de m correspondiente a dos valores de q_0 , por ejemplo $q_0 = 0$ y $q_0 = +1$, es mínima incluso en la magnitud 22; la diferencia $\Delta \log N(m)$ no pasa para ella de 0,12; interpretada como diferencia de magnitudes, equivale a $\Delta m_R = 0,28$, valor que entra de lleno en los errores probables de ob-

servación. La extraordinaria dificultad de determinar la magnitud de las galaxias débiles es bien conocida y errores sistemáticos, debidos por ejemplo al efecto de abertura, pueden alcanzar fácilmente 0,28 m. El resultado será hacer juzgar falsamente que un universo es cerrado o abierto, estático u oscilante. Y lo mismo ocurre con los modelos del estado estacionario ($q_0 = -1$) y dos modelos del estado evolutivo ($q_0 = 1/2$ y $q_0 = 2 1/2$) incluso en la magnitud 23. Parece, pues, que hoy

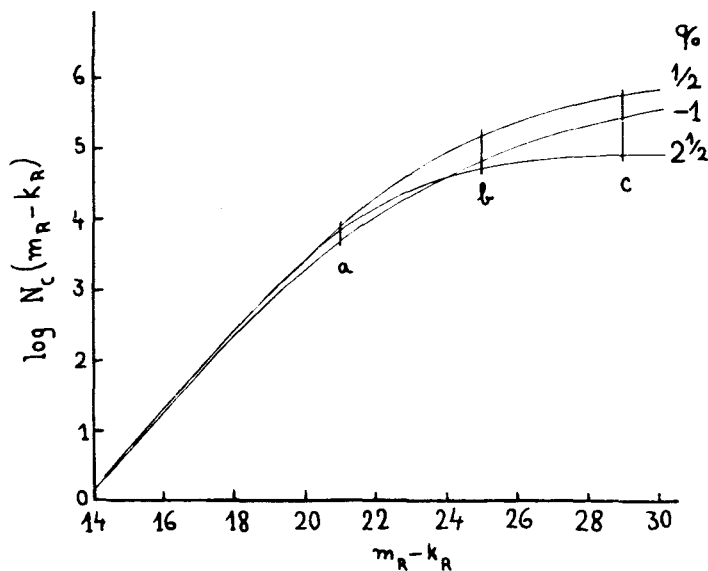


FIG. 4. — Variación de $\log N_c(m_R - k_R)$ para tres valores de q_0 correspondientes al estado estacionario ($q_0 = -1$) y a dos universos evolutivos. A una misma magnitud correspondan valores muy diversos de u según los de q_0 . Así, los tres puntos de intersección de a corresponden de abajo a arriba a $u = 0,36, 0,62, 0,45$; los tres de b a $u = 5,34, 1,34, 2,42$; y los tres de c a $u = 41,5, 3,98, 13,6$.

por hoy este test no puede conducir a ningún resultado seguro y que por consiguiente las tentativas de recuentos no pueden ser sino una pérdida de tiempo y energías, máxime que las hipótesis en que se apoyan no siempre están plenamente justificadas por la tendencia de las galaxias a constituir enjambres. Pase que a gran escala se puedan considerar distribuidas homogéneamente; pero aun entonces las fluctuaciones inevitables en las áreas forzosamente pequeñas que se han de ir seleccionando constituyen una dificultad casi insuperable. Y además que no se puede pasar por alto el cambio progresivo de la luminosidad de las galaxias con la evolución de su tipo, cosa de que de momento se ha prescindido. Finalmente no hay que olvidar que la magnitud absoluta de las galaxias medias de campo ha de ser forzosamente menor que la que se ha adoptado para el cálculo y que por tanto las

discrepancias reales entre los valores de $N_c(m)$ para los diferentes modelos de universo para las magnitudes 22 y 23 todavía han de ser menores que lo que se ha dicho.

La situación es menos precaria cuando de los recuentos de galaxias se pasa a los recuentos de radiofuentes. La Radioastronomía en efecto permite alcanzar objetos que en Astronomía óptica se presentarían de magnitud 28; pero en cambio tropieza con el gran inconveniente de que hoy por hoy no se han podido medir con seguridad los corrimientos al rojo en la parte del espectro que estudia ni tampoco la luminosidad absoluta de las radiofuentes; más aún no raras veces sobre todo al principio era difícil estar seguro de que se trabajaba sobre radiofuentes distintas por el poco poder separador de los radiotelescopios. Consecuencia de ello es que el empleo de las radiofuentes como test de los distintos modelos cosmológicos haya tenido que revestir modalidades propias, razón por la cual parece preferible exponerlo por separado, una vez terminada la consideración de los basados en los datos y métodos de la Astronomía clásica.

4. LA RELACIÓN ENTRE LA MAGNITUD APARENTE Y EL CORRIMIENTO AL ROJO DEL ESPECTRO

Los mayores esfuerzos se consagran hoy día, por parecer mucho más prometedores, a los tests basados en el corrimiento al rojo de las rayas espectrales, o si se prefiere, las velocidades de fuga de las galaxias, buscando su relación con la distancia a que éstas se hallan, determinada una vez por sus magnitudes aparentes y otra por sus diámetros aparentes, ya sean métricos, ya isofóticos. Sobre todo en el primer caso lo ordinario es apoyarse no tanto en nebulosas aisladas cuanto en enjambres, evidentemente más luminosos.

La correlación entre las magnitudes aparentes y el corrimiento al rojo de las rayas espectrales se estableció primero empíricamente, como resultado de numerosas series de medidas de tal corrimiento en los espectros de las nebulosas. La observación es muy difícil, tanto por lo difuso de la fuente emisora como por la debilísima intensidad de la luz recibida, y sólo gracias a verdaderas maravillas de la técnica desarrolladas por Humason le ha sido posible a este observador lo mismo que a Sandage y Mayall extender sus observaciones hasta galaxias de magnitud 18 y 19. En promedio el corrimiento de las rayas del espectro hacia el rojo queda bien expresado por una ecuación de este tipo

$$\log u = 0.2 m - X \quad [94]$$

siendo u , como se ha dicho, el corrimiento debido al efecto Doppler $\frac{d\lambda}{\lambda}$, m la magnitud aparente de la nebulosa y X una constante entre 4.7 y 5. Si el corrimiento hacia el rojo se interpreta como una velocidad de recesión v y la magnitud como un indicador de distancia r , la relación anterior se puede escribir en la forma

$$v = \frac{r}{T} = r H \quad [14a]$$

siendo T aquí una constante relacionada con X que depende asimismo de la luminosidad intrínseca media de las nebulosas; su recíproco es la llamada constante de Hubble y la expresión anterior equivale a la [14]. Cuando se trata de nebulosas muy lejanas hay que agregar un término correctivo de segundo orden, con lo que la [14] se transforma en la expresión

$$v = Hr + kr^2 \quad [95]$$

que conduce a resultados diferentes según la geometría no euclídea que se aplique y permite por consiguiente discriminar los distintos modelos de Universo; sólo en el caso de Universo estacionario no tiene utilidad alguna porque allí resultó $k = 0$. La razón de la aparición de este término es sencilla. Como la velocidad de la luz es finita, no nos es posible observar todas las partes del Universo simultáneamente, sino que forzosamente vemos los objetos escalonados en el tiempo. Por tanto si la velocidad de la expansión variase con éste, acelerándose o por el contrario decelerándose, tendría que aparecer una desviación de la linealidad de la relación entre la distancia o la magnitud bolométrica y el corrimiento al rojo, a lo menos cuando observamos objetos situados a distancias suficientemente grandes para que puedan acusar el cambio; si la velocidad de expansión fue mayor en el pasado, las galaxias más distantes, de las cuales nos llega la luz emitida en una época también mucho más lejana, han de menifestar una velocidad de recesión mayor que la dada por la relación lineal deducida de las más próximas; y como varios modelos de Universo permiten predecir cambios de tal velocidad con el tiempo, de aquí que tal relación pueda servir de base para examinar cuál de ellos se acomoda a la realidad.

También teóricamente puede establecerse esta relación entre la distancia y la velocidad de recesión, representadas respectivamente por la magnitud aparente y el efecto Doppler, (m, u). Adoptaremos la expresión [16] del intervalo expuesta en el número anterior. Supuesto el observador en el origen ($r = 0$), en virtud de la simetría esférica todo rayo de luz radial ha de tener las coordenadas θ y Φ constantes; y por tanto, como todo rayo luminoso describe una geodésica nula, para él $ds = d\theta = d\Phi = 0$. Despejando, pues, en [16b] e integrando, se tendrá

$$c \int_{t_0}^{t_1} \frac{dt}{R(t)} = \int_0^{r_1} \frac{dr}{(1 - zr^2)^{1/2}} = \sigma \quad [96]$$

expresión mediante la cual el tiempo de emisión t_1 de un rayo luminoso desde un punto P_1 de coordenada radial r_1 queda conectado con r_1

y el tiempo t_0 de recepción en el origen. Una galaxia de coordenada radial invariable r_1 emite una cresta de onda luminosa de longitud λ correspondiente a una raya del espectro en el instante t_1 y la cresta siguiente en el $t_1 + dt_1$; los momentos respectivos de recepción en la Tierra serán t_0 y $t_0 + dt_0$. Por ser σ invariable, la [96] da

$$\int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{R(t)} = \int_{t_1 + dt_1}^{t_0 + dt_0} \frac{dt}{R(t)} = \frac{\sigma}{c} = \text{const} \quad [97]$$

Pero como

$$\int_{t_1 + dt_1}^{t_0 + dt_0} \frac{dt}{R(t)} = \int_{t_0}^{t_1} \frac{dt}{R(t)} + \int_{t_0}^{t_0 + dt_0} \frac{dt}{R(t)} - \int_{t_1}^{t_1 + dt_1} \frac{dt}{R(t)}$$

reemplazando en el segundo miembro de [97] se obtiene

$$\frac{dt_0}{R(t_0)} = \frac{dt_1}{R(t_1)} \quad [98]$$

o lo que es lo mismo

$$\frac{dt_0}{dt_1} = \frac{R(t_0)}{R(t_1)} \quad [98a]$$

Como las longitudes de onda emitida y recibida son por definición

$$\lambda_e = c dt_1 \quad \lambda_r = c dt_0$$

la [98a] revestirá la forma

$$\frac{R(t_0)}{R(t_1)} = \frac{\lambda_r}{\lambda_e} = \frac{\lambda_e + \Delta\lambda}{\lambda_e} \quad [99]$$

Luego si en las galaxias los átomos emiten y absorben radiación a la misma longitud de onda λ_0 que en el laboratorio

$$1 + \frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} = 1 + u = \frac{R(t_0)}{R(t_1)} \quad [100]$$

Esta expresión, obtenida por primera vez por Lemaitre, manifiesta que habrá siempre corrimiento de onda hacia el rojo si $R(t)$ crece con el tiempo.

Sea ahora una onda emitida en un punto P_1 de coordenadas $(r_1 + dr_1, 0, 0)$ que llegue al origen al mismo tiempo t_0 que la primera onda anteriormente considerada. La distancia $d\sigma$ entre P_1 y P'_1 en el momento t_1 será

$$d\sigma = \frac{R(t_1) dr_1}{(1 - zr_1^2)^{1/2}} \quad [101]$$

y la velocidad de la luz en P_1 en el momento t_1 valdrá, evidentemente,

$$c = d\sigma/dt$$

Como ambos rayos luminosos llegan simultáneamente al origen, el segundo habrá tenido que dejar P'_1 en el instante $t_1 - \frac{d\sigma}{c}$. Y por tanto, si designamos por u' el efecto Doppler en la luz procedente de P'_1 tendremos

$$u' = \frac{R(t_0)}{R\left(t_1 - \frac{d\sigma}{c}\right)} - 1 \simeq u + \frac{R(t_0) R'(t_1) \frac{d\sigma}{c}}{R^2(t_1)} \quad [102]$$

y de resultas

$$\frac{du}{d\sigma} = \frac{1}{c} \frac{R'(t_1)}{R(t_1)} \cdot \frac{R(t_0)}{R(t_1)} \quad [103]$$

expresión que da la variación del efecto Doppler con la distancia de la fuente luminosa. Cuando la diferencia $(t_0 - t_1)$ es lo suficientemente pequeña para que el factor $R'(t_1)/R(t_1) = H$ se pueda considerar constante (como ocurre de hecho con las nebulosas actualmente alcanzables con los medios ópticos de que hoy se dispone) en la expresión anterior se puede hacer $t_1 \simeq t_0$ y entonces se tiene prácticamente

$$\frac{du}{d\sigma} = \frac{1}{c} \frac{R'(t_0)}{R(t_0)} = \frac{1}{c} H_0 \quad [103a]$$

enteramente equivalente a la [14a]. Si $(t_0 - t_1)$ no es pequeño, las sustituciones anteriores no son admisibles y en la relación [14a] tienen que aparecer términos de orden superior, es decir, ha de resultar la [95].

Esto supuesto, el problema de expresar la relación entre el corrimiento al rojo y la magnitud aparente puede ser abordado con diferentes grados de precisión y consiguientemente de complejidad. Robertson y McVittie emplean un desarrollo en serie de la expresión [100] o su equivalente

$$u = \frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{R(t_0)}{R(t_1)} - 1 \quad [100a]$$

el cual tiene la ventaja de no exigir el conocimiento de la forma de la función $R(t)$, bastando que se conozca su valor actual R_0 y el de sus dos primeras derivadas R'_0 y R''_0 . Se presupone, naturalmente, que $R(t)$ es una función regular que puede ser desarrollada en serie de Taylor entre t_0 y t_1 , de modo que partiendo de su valor en la época actual t_0 podamos llegar al conocimiento del que tenía en el momento t_1 de emisión de la onda luminosa por una galaxia. La [100] o la [100a], que definen evidentemente una relación entre el corrimiento

al rojo u y el tiempo de emisión de la onda, nos permiten entonces obtener u en función de $R(t_0)$ y sus primeras derivadas y de la duración del recorrido de la luz ($t_0 - t_1$). Eliminando t_1 entre esta expresión y la [96], cuyo integrando admite asimismo el desarrollo en términos de $(t_0 - t_1)$, Robertson llega a la expresión

$$u = R'_0 \left(\frac{\sigma}{c} \right) + \frac{1}{2} \left(R_0'^2 - R_0 R_0'' \right) \left(\frac{\sigma}{c} \right)^2 + \dots \quad [104]$$

Como la σ no es conocida, es necesario reemplazarla por un indicador de distancia directamente medible, y como tal se toma, según se ha dicho antes, la luminosidad l o la magnitud aparente m de la nebulosa estudiada, dada por la expresión [75], con cuya ayuda la [104] se transforma en una relación entre l , u y las derivadas de R_0 respecto de t , es decir, H_0 y q_0 . El cálculo detallado puede verse en los trabajos de Robertson, Heckmann y McVittie. Ciñéndonos a los pasos principales y al método de Robertson, se comienza por expresar la [75] en magnitudes bolométricas mediante la fórmula de Pogson y explicitar en la constante la magnitud absoluta M_1 de la nebulosa en el tiempo t_1 . Reemplazándola luego por su valor aproximado en el momento de la observación deducido del desarrollo en serie $M_1 = M_0 + (t_0 - t_1) M'_0 + \dots$, se obtiene la expresión

$$m = M_0 - 45,06 + 5 \log \frac{R_0 u}{R'_0} + 1,086 \left(1 + \frac{R_0 R_0''}{R_0'^2} - 2\mu \right) u + \dots + \text{const} \quad [105]$$

siendo $\mu = 0,46 M'_0 \frac{R_0}{R'_0}$ un parámetro justificado por la posible absorción intergaláctica y una no menos posible evolución de la magnitud M_0 . Finalmente, explicitando H_0 y q_0

$$m = 5 \log \frac{u}{H_0} + 1,086 (1 - q_0 - 2\mu) u + \dots + \text{const} \quad [105a]$$

sirviendo esta última para fijar el cero en la escala de magnitudes.

De manera más precisa se puede buscar esta relación determinando la forma de la función R_0 mediante la integración de las ecuaciones de campo [21]. Claro que el proceso resulta más complicado; pero presenta la ventaja de que los valores resultantes de q_0 quedan inmediatamente conectados con los distintos modelos de universo en virtud de la relación [68]. Por lo demás, el recurso a las ecuaciones de campo no se puede tampoco eludir en el método aproximado explicado anteriormente cuando se quiere determinar el significado de q_0 en función de la curvatura z/R_0 y la densidad ρ_0 del modelo. La diferencia está en que el recurso a tales ecuaciones en el segundo caso ha de preceder a la determinación de la forma de la relación entre la

magnitud bolométrica y el corrimiento al rojo y en el primero basta que le siga.

Sandage prefiere el segundo método porque con él la relación entre m y u se puede obtener con mayor generalidad que por medio de desarrollos en serie, que sólo pueden ser válidos para $u < 1$. De las expresiones [96], [75], [97] y [100a] es posible deducir la relación buscada. Se puede considerar primero por sencillez el estado estacionario ($z = 0$, $\Psi(\sigma) = \sigma$). Recuérdese que en este caso H ha de ser independiente del tiempo y $R(t)$ tiene la forma $R(t) \simeq Be^{Ht}$, siendo B una constante. Introduciendo este valor en la [96], se tiene

$$\sigma = c \int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{Be^{Ht}} = \frac{c}{H} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_1} \right) = \frac{cu}{HR_0} \quad [106]$$

Llevado este valor a la [73], resultará

$$l_{bol} = \frac{LH_0^2}{4\pi c^2 u^2 (1+u)^2} \quad [107]$$

y pasando a magnitudes bolométricas, encontramos la [87] ya antes empleada

$$m_{bol} = 5 \log u + 5 \log (1+u) + C \quad [87]$$

entrando en C , además de $4\pi c^2$, L y H_0^2 ; por lo que C sólo es verdaderamente constante cuando L es la misma para todas las galaxias del enjambre.

Pasando a los modelos evolutivos con Λ , la forma de $R(t)$ se obtiene integrando las [21]. Mediante el raciocinio anteriormente expuesto al tratar de los recuentos de galaxias, y recurriendo, como allí se ha dicho, a una serie de reducciones elegantes, pero sumamente laboriosas, obtuvo Mattig para $q_0 > 0$ la expresión [81], ya allí encontrada

$$m_{bol} = 5 \log q_0^{-2} \{ q_0 u + (q_0 - 1) [(2q_0 u + 1)^{1/2} - 1] \} + C \quad [81]$$

Para el caso especial de ser $q_0 = 0$, se obtiene

$$m_{bol} = 5 \log u \left(1 + \frac{1}{2} u \right) + C \quad [81a]$$

La constante C se puede determinar adaptando las ecuaciones a las observaciones de que se dispone sobre magnitudes brillantes.

Al revés de lo que ocurre en el test anterior, ya se ha indicado que aquí, cuando se pretenden fines cosmológicos, se prefiere utilizar para las observaciones galaxias pertenecientes a enjambres en vez de galaxias aisladas o de campo; en primer lugar, en los enjambres es siempre posible seleccionar la parte más conveniente de la función general de luminosidad de las galaxias y consiguientemente se puede

restringir mejor el estudio a galaxias que tengan sensiblemente la misma luminosidad intrínseca L ; fuera de que, como L tiende a la saturación para un límite superior prácticamente del orden de 10^{44} erg/seg., y en los enjambres se trabaja siempre con galaxias próximas al mismo, también por esta parte la constancia parece más asegurada; y además el trabajo se facilita porque las galaxias más brillantes de los enjambres suelen tener luminosidades absolutas más intensas que las galaxias medias de campo. Humason, Mayall y Sandage han calculado que la relación entre u y las magnitudes corregidas fotográficas y visuales cuando se trata de la galaxia más brillante de un enjambre es, cuando $u < 1$,

$$m_v - k_v = 5 \log u + 20,676 \quad m_F - k_F = 5 \log u + 21,576 \quad [108]$$

Al igual que se ha dicho al tratar de los recuentos de nebulosas, lo más probable es que en las observaciones futuras se use una banda roja entre los 6200 y 7500 Å, porque siempre que se tiene $u < \frac{1}{2}$, la corrección k_R resulta prácticamente nula para toda la amplitud de u . De aquí que Sandage haya adoptado el sistema de magnitudes rojas antes explicado y haya establecido que para dicho sistema de magnitudes las expresiones resultantes tengan la forma [89]. Por lo tanto, para la galaxia más brillante de un enjambre del modelo del estado estacionario la [87] revestirá la forma

$$m_R - k_R = 5 \log (1 + u) + 20,266 \quad \text{siendo } q_0 = -1 \quad [87a]$$

y si se trata de un modelo evolutivo con $\Lambda = 0$, la [81] y la [81a] serán ahora

$$m_R - k_R = 5 \log q_0^{-2} \left\{ q_0 u + [(q_0 - 1) (\sqrt{2 q_0 u + 1} - 1)] \right\} + 20,266 \quad \text{para } q_0 > 0 \quad [81b]$$

$$m_R - k_R = 5 \log u \left(1 + \frac{1}{2} u \right) + 20,266 \quad \text{para } q_0 = 0 \quad [81c]$$

Para poder tabular estas funciones como en el test anterior, es conveniente tratar las magnitudes como variables independientes y u como incógnita. Despejando u en las ecuaciones [87], [81] y [81a] se obtiene

$$1 + u = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A}}{2} \quad \text{con } q_0 \left\{ \begin{array}{l} = -1 \\ > 0 \end{array} \right. \quad [109]$$

$$1 + u = q_0 (1 + A) - (q_0 - 1) \sqrt{1 + 2A}$$

siendo $A = 10^{0,2 (m_R - k_R - C)}$

lo que manifiesta que u es función solamente de A y q_0 , y que por tanto, si se ha da alterar la constante de las [81b], [81c], [87a], etc., o de resultados de nuevas observaciones o por cambiarse el paso de la banda utilizado, no hace falta calcular la tabla de nuevo, sino que

basta correr el argumento. Así para pasar de las magnitudes m_R a las visuales m_v basta aumentarlo en 0,41 magnitudes.

La tabla la ha construido Sandage tomando las diferencias $(m_R - k_R)$ como argumento y los valores de q_0 como parámetro; para cada grupo de ellos la tabla da $A \cdot 1 + u$ y $\log cu$ desde la

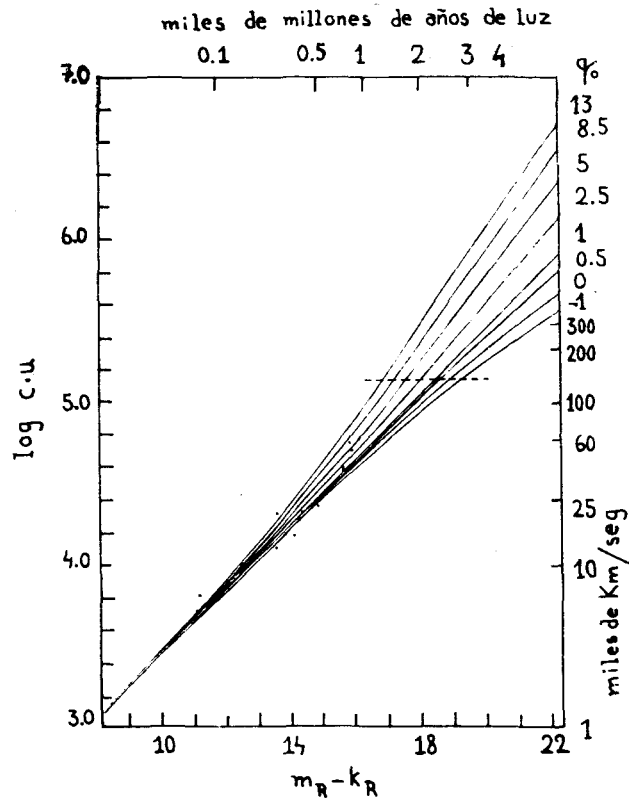


FIG. 5. — Variación de $\log cu$ en función de $m_R - k_R$ para distintos valores de q_0 según las tablas de Sandage. Los puntos corresponden a los 18 enjambres utilizados por Humason, Mayall y Sandage para el cálculo de q_0 ; la línea de trazos indica el valor de $\log cu$ correspondiente al enjambre 3C295 cuya magnitud no se conoce todavía con seguridad.

magnitud 8 a la 23, que cae ya en el límite de las posibilidades del telescopio de Hale.

La tabla se puede traducir gráficamente tomando como ordenada $\log cu$ y $m_R - k_R$ como abcisa. Atribuyendo valores distintos a q_0 , se obtienen curvas diferentes. Aunque menos acentuadas, se tropieza también aquí con dificultades parecidas a las encontradas al tratarse de

los recuentos de nebulosas; no obstante aquí, aunque con dificultad, son superables. Para valores de q_0 entre -1 (modelo del estado estacionario) y $+\frac{1}{2}$ (modelo euclídeo explosivo), las diferencias sólo

comienzan a ser apreciables con seguridad para magnitudes elevadas, no inferiores a la 19; así para un corrimiento al rojo de valor $u = 0,5$, entre estos dos modelos habrá una diferencia de 0,7 magnitudes. Ahora bien, según Minkowski con el espectrógrafo del primer foco del telescopio de 200 pulgadas es posible determinar valores de u de este orden, pero no en cualquier momento, sino sólo cuando las condiciones de observación son poco menos que perfectas, lo cual ocurre muy pocas veces; en cuanto a la diferencia de 0,7 magnitudes es también posible observarla con tal que se consiga eliminar los efectos de medida de las diferentes aberturas en el equipo fotométrico. No es cosa fácil, pues de resultas del mismo enrojecimiento, el diámetro angular que contiene la misma fracción de la luminosidad total para galaxias próximas y lejanas ya no es una función simple de la magnitud aparente; afortunadamente se puede determinar su forma y Sandage lo ha hecho. Todavía hay que atender a la posible influencia del llamado efecto-Scott, es decir, al peligro de que las galaxias más alejadas resulten en promedio de luminosidad intrínseca más elevada por la necesidad de escoger enjambres cada vez más luminosos para que sean visibles y más aún para que se pueda obtener su espectro. No obstante, este riesgo queda disminuido como ya hemos dicho por el hecho de existir probablemente un límite superior de luminosidad, al que se llega en cuanto el número de galaxias de un enjambre es ≥ 30 . Hay, pues, gran probabilidad de que $M \simeq M_L$ en cuanto se trabaja con enjambres de este género. Por último hay que tener en cuenta la posible corrección impuesta por el efecto de evolución de las galaxias; las más distantes brillan con la luminosidad que tenían cuando la luz salió de ellas, y si tal luminosidad es función del tiempo, habrá que corregir adecuadamente las magnitudes observadas. La teoría de la evolución de las estrellas individuales ha adelantado mucho estos quince años últimos y de resultas parece que no estamos lejos del día en que podamos disponer de una teoría de la evolución del sistema completo de galaxias. Cuando tal teoría nos permita conocer con seguridad dL/dt , podremos corregir la tabla de los efectos de evolución y ver que, una vez introducidas todas estas correcciones, el método es realmente útil para decidir entre varios modelos de Universo con tal de disponer de numerosos valores de u aproximadamente iguales a 0,5. Esto solo prueba que hoy por hoy se está todavía lejos de tal objetivo.

Continuamente debemos hacer referencia a los valores atribuidos a q_0 . Como ya se ha dicho en el núm. 1 de esta 3.^a parte, hasta ahora sólo se han podido hacer dos determinaciones de su valor, prescindiendo ambas veces del efecto de selección. Humason, Mayall y Sandage, con 18 enjambres de magnitud entre la 8 y la 18 obtuvieron el

valor $q \simeq 2,45 \pm 0,8$; hay con todo numerosas razones para hacer mirar este valor como meramente provisional. Baum con una técnica fotométrica más refinada, basada en el estudio fotográfico en ocho colores de 7 enjambres entre los que se cuenta el 3C295 de Minkowski, halló en 1957 y luego en 1961 $q_0 = 1 \pm \frac{1}{2}$, siendo perfectamente ve-

rosímil el caso euclideo con $q_0 = \frac{1}{2}$. Lo que parece bastante seguro

es que $q_0 < 3$ y que lo más probable es que esté comprendido entre 2 y 0; si esto se confirmase, quedarían automáticamente excluidos tanto el modelo estacionario como los evolutivos con constante cosmológica no nula, pues en todos ellos se ha de tener $q_0 = -1$. En la última determinación de Baum se utilizó tanto la galaxia centrada en la radiofuente 3C295, con un corrimiento al rojo $u = 0,46$, determinado a base de la raya de emisión $\lambda_0 = 2727\text{\AA}$ del OII, de magnitud visual $\simeq 21$, como otros dos enjambres hallados por Humason y Sandage en 1956, para los que Baum encontró enrojecimientos $u = 0,29$ y $u = 0,35$. De los tres consiguió encontrar Baum datos fotométricos anteriores y todos los indicios parecen llevar a la conclusión de que q_0 es igual a la unidad o ligeramente mayor por lo que el modelo del estado estacionario parece cada vez más improbable por este capítulo. No obstante si se considera que en todos los cálculos se ha prescindido del efecto de selección y se ha supuesto $\frac{dL}{dt} = 0$,

enseguida se ve la inseguridad de una tal conclusión y la necesidad de afinar mucho más la determinación de q_0 . De hecho en dos trabajos publicados en 1961 ha sostenido Sandage, después de aplicar todas las correcciones verosímiles posibles que el valor de q_0 se podría reducir a $q_0 \simeq +0,2 \pm 0,5$. Es claro, pues, que no estamos al fin, sino al principio de un largo camino y que es todavía muy grande el campo de trabajo que aguarda al telescopio de Monte Palomar en esta parte. A título de curiosidad y para que se vea el influjo de los valores de q_0 y H_0 en los resultados dio Sandage en 1962 los resultados que se seguirían de admitir $q_0 = +0,2$, $H_0^{-1} = 13 \times 10^9$ años: a) z valdría -1 y el espacio sería por tanto abierto e infinito; b) la expansión estaría en franca deceleración con $R'' < 0$; c) el radio actual de curvatura del Cosmos valdría $1,6 \times 10^{28}$ cms ($= 17 \times 10^9$ años de luz); d) la densidad media de la materia más la de la radiación sería 4×10^{-30} gm/cm³; e) la expansión continuaría para siempre.

Un descubrimiento de estos últimos años puede jugar un papel decisivo para la aplicación de este test; nos referimos al descubrimiento de la verdadera naturaleza de los quasares, que desde que fueron observados por primera vez tenían desconcertados a los astrónomos y de los que ya hicimos mención en la primera parte, pero que, por su conexión con la materia que exponemos, exigen aquí mayor atención. Quien logró tal resultado fue Maarten Schmidt al conseguir explicar tras muchos tanteos en 1963 el espectro de uno de ellos, el

3C273, mediante un corrimiento al rojo tal ($u = 0,16$) que suponía en él una velocidad de recesión de 47.000 km/seg. Desde entonces se han identificado los espectros de una quincena más. Lo que hasta entonces se había creído estrellas, eran evidentemente galaxias, aunque de una naturaleza especial. Estudiado cuidadosamente el 3C273, se vio que se componía de dos radiofuentes unidas a un objeto de apariencia estelar y acompañadas de un chorro que salía de una de ellas y tenía unos $9''$ de longitud por $1''-2''$ de anchura. Gracias a tres ocultaciones sucesivas de dicho cuasar por la Luna, se pudo fijar su posición con el gran telescopio de Parkes en tres frecuencias distintas (136, 410 y 1420 Mc/s) con una precisión superior al medio segundo de arco y medir las dimensiones aparentes de sus partes componentes. Como el corrimiento al rojo daba una distancia de unos 1600×10^6 años de luz, resultaba para su núcleo principal un diámetro de sólo algo más de 4000 años de luz y como el flujo de él recibido en frecuencia de 100 Mc/s es de $6 \times 10^{-26} \text{ w m}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$, si la radiación se consideraba de origen térmico, resultaba que el objeto tenía que estar a una temperatura de 4×10^9 grados Kelvin con una densidad electrónica de 10^5 electrones/cm³ y una masa aproximada de un billón de masas solares. Parecía, pues, tenerse que acudir a una radiación sincrotónica, pero entonces tendría que admitirse una envoltura de gas ionizado de densidad electrónica muy alta ($N \simeq 10^7/\text{cm}^3$) que absorbiese las frecuencias bajas o bien que el espectro energético de los electrones relativistas presentase un corte en las energías bajas, por ejemplo alrededor de $2 \times 10^9 \text{ eV}$ si el campo magnético del cuasar es del orden de 10^{-5} gauss. En el 3C48 el valor de u llegaba a 0,37 y por tanto la velocidad de recesión debía ser de 111.000 km/seg; en el 3C47, a 0,425, correspondiente a una velocidad de 127.000 km/seg; en el 3C147 sería $u = 0,544$ y por tanto la velocidad de fuga llegaría a 162.000 km/seg, siendo además de advertir que su diámetro sería de más de un millón de años de luz, por lo que resultaría, del tamaño de las mayores radiogalaxias y tendría una luminosidad óptica y eléctrica 40 veces mayor que las de brillo más intenso. Finalmente el valor de u en el 3C9, si se confirma la interpretación que parece más probable de su espectro, llegaría a 2,0: a primera vista su velocidad de recesión llegaría a ser el doble de la de la luz (!), aunque claro que en este caso la expresión [14] no es ya aplicable y debería entrar en juego la [95]...

Estas características tan extraordinarias han hecho pensar si el corrimiento de las rayas hacia el rojo no sería de origen gravitatorio y si en tal caso no se podría tratar de objetos mucho menores arrojados por nuestra propia galaxia a alguna de las vecinas con velocidades próximas a la de la luz. Pero entonces resultarían cosas no menos desorbitadas: masas de hasta un millón de veces la solar en el volumen de una esfera de pocos kilómetros de diámetro, energías cinéticas del orden de 10^{60} ergios, enteramente comparables a la energía de inercia y que no se ve qué mecanismo podría producirlas, presencia en el espectro de fuertes rayas de emisión de transiciones pro-

hibidas que sólo se pueden presentar en los espectros de gases muy diluidos... tendrían que presentar un movimiento propio apreciable y no obstante en 14 placas fotográficas tomadas entre 1887 y 1963 sólo se llega a encontrar uno de una milésima de segundo de arco por año... Todo ello ha hecho renunciar a la hipótesis de que se pueda tratar de estrellas próximas y se ha admitido que se trata de nebulosas de un tipo especial, sumamente distantes y que son sin contradicción hoy por hoy los objetos más brillantes del Cosmos. De aquí su importancia capital para el test que nos ocupa.

Se ha visto que en substancia la idea que lo presidía era la siguiente. Si dispusiésemos de un objeto de magnitud absoluta conocida M que se alejase indefinidamente y tal que, por muy distante que estuviere, lo pudiésemos observar, nos suministraría datos suficientes para poder conocer con exactitud la forma del espacio; pues a medida que se alejase iría disminuyendo su magnitud aparente m y aumentando el corrimiento al rojo u de las rayas espectrales, y como la relación entre m y u varía con las teorías cosmológicas, observando su relación en el objeto en cuestión podríamos seleccionar la verdadera o por lo menos descartar las falsas. Por desgracia no se ha dispuesto hasta ahora de objetos de esta índole y lo único que ha cabido hacer ha sido fiarse de objetos semejantes, las galaxias, situados a distancias diversas. Pero ni se ha podido tener la seguridad de su igualdad ni las galaxias asequibles llegan a estar suficientemente alejadas para que las diferencias sean suficientemente significativas; a la distancia a que se tendrían que hallar para ello ya no son visibles; les falta luminosidad. Pues bien los quasares, suministrando una nueva categoría de cuerpos celestes de características muy parecidas y unas 40 veces más luminosos que las más brillantes galaxias (en ocasiones hasta cien veces), pueden permitir esta comprobación que hasta ahora era imposible. Se conoce hoy el corrimiento al rojo de unos 16; los valores de u van desde 0,16 para el 3C 273 hasta nada menos que 2,0 para 3C9: las diferencias teóricas de la relación entre m y u resultan ya suficientemente grandes para que haya lugar a una discriminación; el día en que se conozca con seguridad el valor de u para un centenar de ellos (supuesto que existan), se podrá formar un juicio bastante seguro; pero ya desde ahora y aunque la dispersión es muy grande, cabe señalar que los valores conocidos son contrarios al modelo del estado estacionario.

5. LA RELACIÓN ENTRE EL CORRIMIENTO AL ROJO Y LOS DIÁMETROS DE LOS ENJAMBRES

Tal vez de todos los tests propuestos sea éste el más prometedor y la razón es que en su aplicación ya no es preciso contentarse con simples diferencias de valores, siempre susceptibles de estar influenciadas por errores o efectos desconocidos, sino que en ella se presenta un auténtico «efecto» discriminatorio. Cierto que hoy por hoy las magnitudes en que comienza a ser apreciable quedan más allá de las posi-

bilidades del telescopio de Monte Palomar y además sólo se aplica a los diámetros reales y no a los isofóticos; pero esto no quita que el método en sí dé buenas esperanzas para el día en que se sorteen estos inconvenientes.

Lo primero que se necesita conocer para saber cuál es el diámetro lineal verdadero de un objeto de diámetro aparente dado, es su distancia. Una fuente luminosa de diámetro lineal D que en el momento de la emisión t_1 se halla a una distancia métrica $R_1\Psi(\sigma)$, presentará evidentemente un diámetro aparente Δ_o dado por la igualdad

$$\Delta_o = \frac{D}{R_1\Psi(\sigma)} \quad [110]$$

Como que de [100] se sigue que $R_1 = R_o/(1 + u)$, la [110] se podrá escribir

$$\Delta_o = \frac{D(1 + u)}{R_1\Psi(\sigma)} \quad [111]$$

y ésta es claro, como se ha explicado al tratar de los tests anteriores, que se puede expresar en función de las cantidades observables u y m y aun de m sola. Mattig probó que para los modelos evolutivos se tiene la igualdad siguiente, siendo $q_o \geq 0$

$$r_1 = \Psi(\sigma) = \frac{c}{R_o H_o q_o^2 (1 + u)} \left[q_o u + (q_o - 1) (1 + 2q_o u)^{1/2} \right] \quad [112]$$

Introduciendo este valor en [111] y simplificando con ayuda de [81], [82], [83] y [84a], resulta

$$\Delta_o = \text{const} \times \frac{(1 + u)^2}{A} \quad [113]$$

En el caso estacionario, cuando $q_o = -1$, recordando que en él $R_o\Psi(\sigma) = R_o\sigma = \frac{cu}{H_o}$, se obtiene inmediatamente de [111]

$$\Delta_o = \text{const} \times \frac{1 + u}{u} \quad [113a]$$

Δ_o es el diámetro angular subtendido por una regla rígida de longitud D a la distancia caracterizada por el corrimiento al rojo u . Estos ángulos son los llamados diámetros métricos. Para minimizar el efecto de dispersión de los diámetros se suelen utilizar galaxias de enjambre en vez de galaxias de campo; por tanto, aquí $C = 20,266$. Tomando como argumento $m_R - k_R$ o u , se pueden tabular los valores de Δ_o , para los distintos valores de q_o . Es notable que aquí el diámetro angular métrico para todos los modelos evolutivos ($q_o \geq 0$) de resultados de las propiedades del espacio esférico cuadrimensional pasa por un mínimo para una magnitud dada y vuelve a crecer para las magnitu-

des más débiles, en tanto que para el estado estacionario Δ_0 disminuye asintóticamente hacia el valor de la constante en la expresión [113a] al tender $u \rightarrow \infty$. Precisamente esta propiedad es la que hace que este test revista especial importancia.

Por desgracia, como ya hemos adelantado, este mínimo no se presenta sino en magnitudes que exceden las posibilidades del telescopio de Monte Palomar, de modo que parece no quedar más remedio que

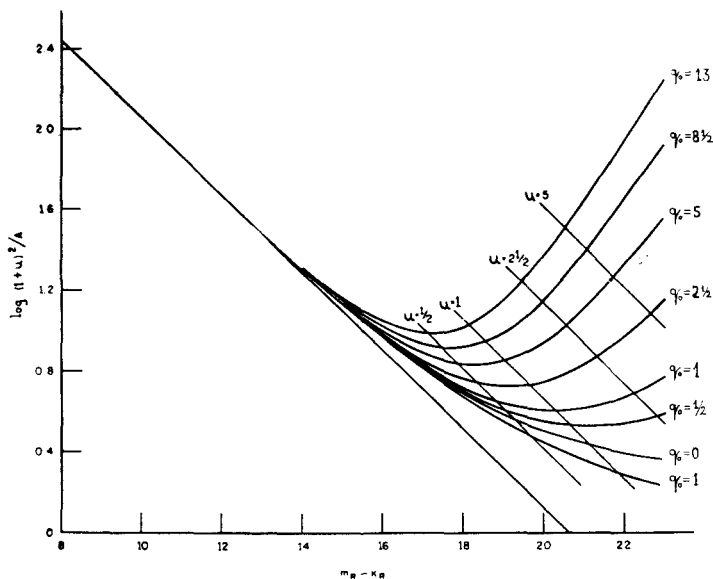


FIG. 6. — Variación de los valores de $\log(1+u)^2/A$ en función de $m_R - k_R$ para distintos valores de q_0 según las tablas de Sandage. Los distintos valores de u manifiestan las enormes distancias necesarias para que el efecto de mínimo sea apreciable en los modelos de Universo correspondientes a los valores más probables de q_0 .

acudir para apreciarlo a los datos radioastronómicos. En efecto, para ver la capacidad de dicho telescopio es preciso comenzar por corregir de $k_R = f(u)$ las curvas que se obtienen a base de los valores tabulados como acaba de decirse; para facilitar la operación suelen calcularse las líneas correspondientes a los distintos valores de u . El límite de la placa para recuentos de nebulosas es la magnitud $m_R \approx 21$; ahora bien, para dicha magnitud la diferencia en $\log \Delta_0$ entre el estado estacionario ($q_0 = -1$) y el modelo con $q_0 = +1$ no pasa de 0,195; admitiendo diámetros constantes D , la relación entre $\Delta_{0,+1}$ y $\Delta_{0,-1}$ no pasa de 1,57. Y aún quizá por otro capítulo se vea todavía más clara la dudosa capacidad del telescopio Hale para la aplicación del test, a saber, por la necesidad de poderse apoyar en galaxias más débiles para determinar el tamaño de los enjam-

bres: es posible que haya que llegar a $m_R = 23$ ó 24 , y ciertamente estas magnitudes exceden las posibilidades del Hale. Además, para la validez del test es preciso asegurarse de que la dispersión de los diámetros verdaderos no sea tan grande que enmascare los resultados, y para ello no queda más remedio que estudiar los enjambres brillantes para encontrar la dispersión en las partes mejor conocidas de la función, que son las que se refieren a magnitudes de mayor brilla, y ver así si la inseguridad de las observaciones es menor que las diferen-

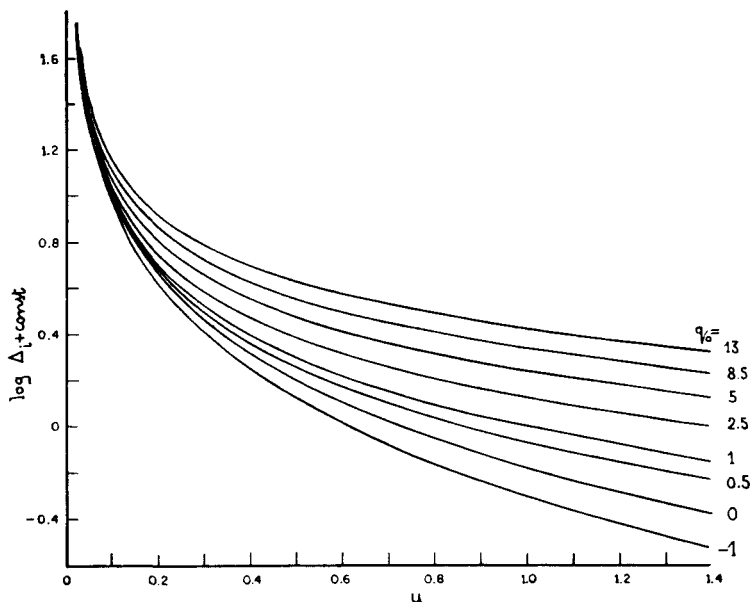


FIG. 7. — Variación de los diámetros métricos de las nebulosas en función del corrimiento al rojo para distintos valores de q_0 .

cias predichas. Para acabar de ver las posibilidades y limitaciones del telescopio de Monte Palomar es útil estudiar la representación de $\log \Delta_0$ en función de u . Los mínimos comienzan a presentarse alrededor de $u = 0.6$ para valores de q_0 iguales a 13, 8.5 y 5; para valores más acordes con las observaciones, tales como $q_0 = 2.5$ y 1, el mínimo se corre a $u = 0.9$ o $u = 1.0$. Ahora bien, el límite del telescopio de Monte Palomar parece ser $u = 0.6$. El máximo valor suficientemente seguro de u hallado hasta el presente con él es el encontrado por Mattheus y Schmidt en el espectro del quasar 3C147 con un valor de $u \approx 0.56$; como se ve, se está absolutamente en el límite. Y además, para $u = 0.6$ la diferencia entre $\log \Delta_0$ con $q_0 = +1$ y $\log \Delta_0$ con $q_0 = -1$, es sólo de 0.21, es decir, la razón $\Delta_{0,+1} / \Delta_{0,-1} = 1.62$; es problemático que esta diferencia sea suficiente para permitir una decisión entre los diferentes modelos de Universo.

Otra dificultad mayor aparece todavía en el test de que nos estamos ocupando, y es que cuanto llevamos dicho se refiere a los diámetros métricos de las galaxias. Ahora bien, los diámetros de que disponemos son los determinados por medio de la fotografía, y éstos no son casi nunca los métricos, sino los deducidos de sus líneas isótopas de contorno. Y, por desgracia, estos diámetros no se pueden comportar como aquéllos, porque en un universo en expansión el brillo de una superficie no es constante, sino que varía con $(1 + u)^{-4}$. Sea D el diámetro de una parte de la galaxia. Se ha visto que a la distancia $\Psi(\sigma)$, su diámetro angular Δ_0 está dado por la [111] y que si la luminosidad absoluta de la parte considerada es L , su luminosidad aparente l viene dada por la [73]. Si la relación $\frac{L}{D^2}$ la suponemos constante, el brillo B con que veremos una superficie será

$$B = \frac{l}{\Delta_0^2} = \frac{L}{4\pi D^2 (1 + u)^4} = \frac{\text{const}}{(1 + u)^4} \quad [114]$$

Esta expresión vale para todos los universos en expansión que cumplan las condiciones anteriores y por tanto para todos los valores de q_0 , incluyendo el del estado estacionario. Esta ecuación, que había sido hallada por primera vez por Hubble y Tolman, fue echada luego en olvido, hasta ser revalorizada por Stock y Schücking al discutir las magnitudes deducidas de los diámetros isofóticos.

Para obtener estos últimos, se puede imaginar el siguiente experimento. Supongamos conocido el tamaño angular de los contornos isofóticos de la nebulosa M31 a una distancia Δ_i del núcleo, correspondiente a un diámetro lineal D_i ; y sea B_i el brillo de su superficie a dicha distancia. Supongamos trasladada M31 a la distancia necesaria para que el corrimiento al rojo de sus rayas espectrales valga u . Según [114], el brillo de su superficie a la distancia D_i del núcleo vendrá ahora afectado por el factor $(1 + u)^{-4}$. Consiguientemente, para hallar en la M31 «trasladada» la región en que el brillo de la superficie presente el valor original B_i , tendremos que correrlos hacia el núcleo hasta el sitio en que en la M31 sin trasladar el brillo de la superficie sea $B_i (1 + u)^4$. Llamemos D_j a la distancia de esta región al núcleo y sea $\Delta_j(u)$ el ángulo que subtende. Los brillos de la superficie estarán relacionados así

$$B_j(u) = B_i(0) \quad B_j(0) = B_i(0) (1 + u)^4 \quad [115]$$

Significa ello que en una galaxia en movimiento con corrimiento al rojo u la isófota que pasa por el punto D_j equivale en brillo superficial a la que pasa por D_i en una galaxia idéntica en reposo, estando en esta última B_i y B_j relacionados por el factor $(1 + u)^4$; luego los contornos de igual brillo superficial se desplazan en una galaxia hacia el núcleo al crecer u , haciendo que los diámetros isofóticos sean me-

nores que los métricos para $u > 0$. Para hallar la relación exacta entre ambos, admitiremos con Hubble que la distribución del brillo de la superficie sobre la cara de una galaxia típica E es

$$B = \frac{B_0}{\left(\frac{\Delta}{\alpha} + 1\right)^2} \quad [116]$$

siendo α un parámetro angular de escala; si Δ_i es el diámetro angular isofótico correspondiente a un brillo dado B_i de la superficie, en los contornos isofóticos débiles será $B_i < B_0$ y se podrá escribir con suficiente aproximación

$$\Delta_i = \alpha \sqrt{\frac{B_0}{B_i}} \quad [117]$$

Supóngase B_i fijado por la observación y busquemos la variación de Δ_i con u . La ecuación [114] prueba que el brillo central B_0 varía con u . Es claro que el parámetro angular α no es un diámetro isofótico, sino métrico y que obedece a las ecuaciones de los diámetros métricos [113] y [113a], es decir, que α es el ángulo a que el brillo observado B baja hasta una fracción fija (aquí 1/4) del valor central B_0 . Introduciendo los valores deducidos de [113] y [114] en la [117] y reuniendo las constantes en una sola, se obtiene

$$\log \Delta_i = \text{const} - 0,2 m - 0,5 \log B_i \quad [118]$$

y finalmente con ayuda de la [107]

$$\Delta_i = \frac{\text{const}}{A} \quad \text{para } q_0 \geq 0 \quad [119]$$

Del mismo modo se procedería para $q = -1$ y se iría a parar al mismo resultado, con la advertencia, no obstante, de que A es ahora $A = u(1 + u)$. Resulta, pues, que los diámetros isofóticos varían en razón inversa de A para todos los modelos considerados. Esto supuesto, y considerando la constante del numerador igual a 1, se puede construir una tabla de valores como en los casos precedentes. Si se toma como argumento $m_R - k_R$, todos los valores de q_0 conducen a la misma relación $\Delta_i = f(m_R - k_R)$, porque $m_R - k_R$ es función de A solo. En cambio, si se toma u como variable independiente, entonces $\Delta_i = f(u)$ depende de q_0 , y se obtiene una separación entre los distintos modelos de universo; pues u es función de A y q_0 . Como era de esperar, para una u dada, el diámetro isofótico es siempre menor que el diámetro métrico; pero además la función Δ (isofótica) no tiene ningún mínimo para ningún valor finito de u , al contrario de lo que ocurre con la función Δ (métrica), pero tiende a cero al tender $u \rightarrow \infty$. Por lo tanto no se puede emplear la propiedad de mínimo con los diámetros isofóticos para decidir entre los distintos modelos. Pero esto no obstante como de hecho las más de las

veces hay que contentarse con los diámetros isofóticos, es preciso ver cómo pueden utilizarse.

A primera vista su determinación parece muy sencilla. Si se obtiene en una misma noche una serie de fotografías de distintos enjambres con u diferente y con idéntica exposición, y el fondo del cielo es constante, los diámetros medidos visualmente en las placas han de ser isofóticos; pero no se pueden comparar con los valores antes tabulados porque en los datos de observación entra el término de corrección k_R en tanto que los valores tabulados son monocromáticos. Supóngase una foto hecha con placas rojas Eastman 103a-F filtro Schott RG2 ($\lambda = 6800 \text{ \AA}$): las isófotos de las galaxias próximas co-

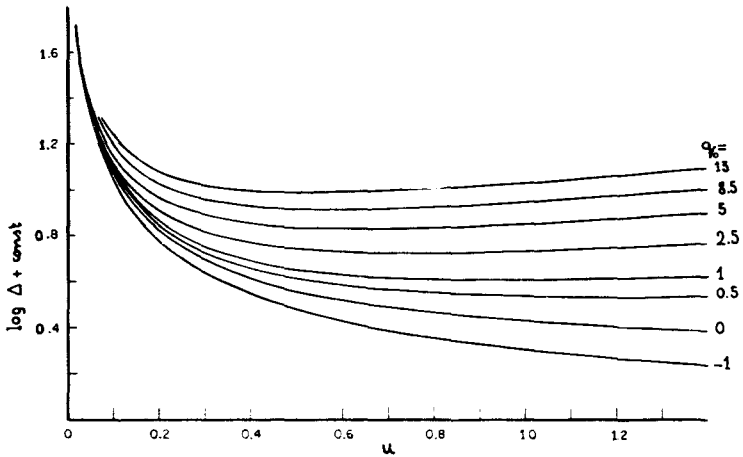


FIG. 8. — Variación de los diámetros isofóticos en función del corrimiento al rojo para distintos valores de q_0 según Sandage. Al contrario de lo que ocurre con los diámetros métricos no aparece aquí efecto alguno de mínimo. En la fig. 6 la variación de los diámetros isofóticos en función de $m_R - k_R$ está representada por la línea recta para todos los modelos de Universo con $q_0 > 0$.

rresponden a longitudes de onda centradas en 6800 \AA ; pero para galaxias con $u = 0,5$ se refieren a la radiación de origen $\lambda = 4540 \text{ \AA}$ y como la distribución de energía $I(\lambda)$ varía con λ , este corrimiento de la longitud de onda introduce una variación en el cómputo de la intensidad intrínseca de la fuente luminosa. Para corregir este efecto k_R será preciso conocer, no sólo $I(\lambda)$, sino también $B(\Delta)$ deducida de [116] y para ello es preciso tener en cuenta la distribución de la energía según las distintas longitudes de onda para las galaxias de los distintos tipos, unas en reposo y otras con u diferentes, y desplazarse sobre la superficie de la galaxia observada ángulos iguales a la relación en que están los valores de la energía en la onda recibida y en la emitida. Las correcciones pueden ser computadas y aplicadas

a la tabla de valores calculados, preparada para su comparación con los observados pero para ello es necesario conocer muy bien las funciones $I(\lambda)$, $k(u)$ y $B(\Delta)$ y por desgracia parece prematuro quererlas determinar en tanto no estén terminadas las observaciones sistemáticas emprendidas por Oke entre otros para conocer las particularidades de la función $I(\lambda)$. Resulta, pues, que de momento las observaciones de los diámetros isofóticos no parecen utilizables, aunque es de esperar puedan serlo en el futuro.

6. LOS TESTS RADIOASTRONÓMICOS Y SUS DIFICULTADES

La clara insuficiencia del más potente telescopio para proporcionar datos capaces de resolver el problema cosmológico ha hecho que la atención de los investigadores se volviese cada vez más en otras direcciones y en primer lugar al campo de la Radioastronomía. Hoy día ya no es dudoso que sus métodos permiten alcanzar galaxias mucho más alejadas que las visibles con el telescopio de Monte Palomar; con éste es muy probable que se haya llegado a un límite ópticamente infranqueable, a lo menos en tanto no se perfeccionen los telescopios electrónicos o bien observaciones realizadas desde satélites más allá de la atmósfera no permitan alcanzar resultados inasequibles desde el suelo; pues desde éste el centelleo y el brillo de fondo del cielo equivalentes a una luminosidad del orden de un objeto de magnitud 22, imposibilitan la observación de objetos de brillo más débil. Pero aun desde arriba de la atmósfera ópticamente se ha de tropezar, como ya hemos indicado antes, con el límite impuesto por la energía del fotón individual: ya se ha dicho que de un objeto de magnitud 22 en todo el dominio óptico sólo se recibe la centésima parte de los fotones indispensables para que sus imágenes fotográficas alcancen la precisión del 1%. Afortunadamente cuando se recurre a la Radioastronomía se está todavía lejos de este límite en varias potencias de 10 y hay quien asegura que la única barrera con que en esta parte se tropieza es hoy por hoy la económica; de aquí que una de las tareas más urgentes en este campo sea el fomento y desarrollo de nuevas ideas para la construcción de antenas y receptores suficientemente potentes dentro de costes no demasiado elevados.

Tal vez, con todo, esta visión de las cosas sea demasiado optimista y en realidad haya en este campo otros *handicaps* de consideración. Así, por ejemplo, la tendencia de las radiofuentes a solaparse hace extraordinariamente difíciles sus recuentos; luego las inseguridades de identificación, de resultados de las cuales no siempre es fácil discernir si se trata de radiofuentes potentes, cuya intensidad aparece debilitada por la distancia, o de radiofuentes débiles relativamente cercanas. Aun cuando se consiga salir de esta duda, tropieza todavía la Radioastronomía con el inconveniente de no poder medir aún con sus medios actuales corrimientos al rojo en los espectros ni tampoco luminosidades absolutas; ya hemos visto anteriormente que los corrimientos que Lilley y McClain habían creído encontrar en 1956 en la radio-

fuelle del Cisne A para la raya de 21 cm del H no se habían confirmado. Y quizás haya todavía algo intrinsecamente más grave nacido de la misma naturaleza del espacio y de la capacidad de la Radioastronomía para alcanzar distancias muchísimo mayores que las observables ópticamente. Bajo el nombre de «horizonte de partículas» designa Rindler el límite entre los objetos observables y los no observables en el momento presente por un observador situado en el substratum. Esta definición implica que los objetos en el horizonte presentan un corrimiento al rojo infinito y que los vemos como si se hallasen en el instante cero. Algunos modelos de Universo no tiene

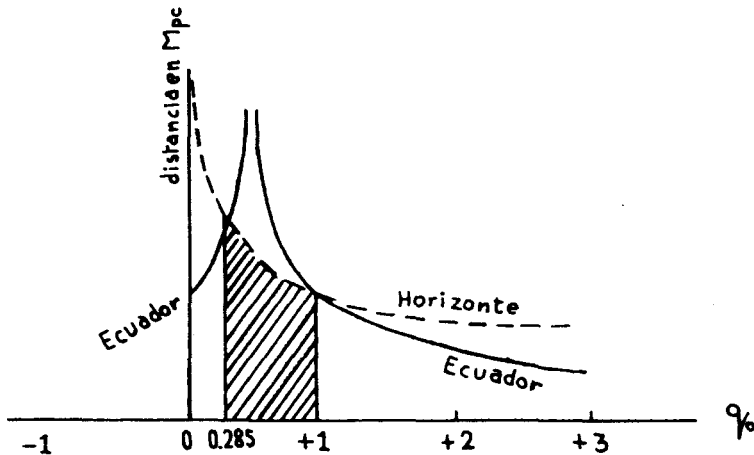


FIG. 9. — Posición relativa del ecuador del Universo y del horizonte de observabilidad en modelos de universo con curvatura constante positiva. El ecuador resulta inobservable en los modelos correspondientes a valores de q_0 entre +0.285 y +1.

horizonte, por ejemplo los modelos relativistas con $q_0 = 0$ y los del estado estacionario. Ahora bien los dos principales problemas cosmológicos se relacionan con la estructura del espacio y la edad de los objetos situados en él; y cuando se hacen observaciones es imposible separar estos dos aspectos, pues cuanto más lejos alcanzamos en las profundidades del espacio tanto más atrás en el tiempo se nos presentan los objetos observados. Cuanto mayores instrumentos construimos, más conseguimos acercarnos al horizonte de partículas, a lo menos en los modelos de universo para los que $q_0 > 0$, pues en ellos la historia entera del mundo yace dentro del horizonte; pero para darnos cuenta de la forma del espacio, lo que importaría, sería acercarnos a su ecuador, caso de que exista, y para conocer que así ocurre sería necesario que dentro de la parte observable se presentase un notable aumento de curvatura. Pues bien, no siempre puede ocurrir así y por consiguiente cosmológicamente es de importancia capital esta pregunta: ¿con qué nos vamos a encontrar primero, con el horizonte o

con el ecuador? Si el Universo es elíptico, sabemos que el ecuador se presentará en el valor $\sigma = \frac{\pi}{2}$. Pues bien, en tal caso el ecuador se

encuentra más allá del horizonte para todo valor del parámetro de deceleración q_0 comprendido entre 0,285 y 1; pero para valores mayores de q_0 se presenta el ecuador antes que el horizonte. Y no es esta dificultad la única. Como al crecer la distancia de los objetos observados, crece también el valor del corrimiento al rojo de su espectro, puede ocurrir que u llegue a ser tan grande que desaparezca por completo del campo de observación la parte conocida del espectro y nos hallemos ante el problema de interpretar rayas absolutamente desconocidas. Así para observaciones que lleguen hasta la magnitud 19, límite óptico actual de la espectroscopía, el valor de u que podemos esperar oscila entre 0,4 para $q_0 = -1$ y 0,7 para $q_0 = 5$; si llegamos a la magnitud 22, límite óptico actual de detección de los objetos, que parece coincidir con el del Catálogo 3C de radiofuentes, u oscilará en las condiciones de antes entre 0,9 y 4,5; para las más recientes medidas de Ryle (con una densidad de flujo de $\dot{S} = 0,8 \times 10^{-26} \text{ wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$ como límite), entre 1,8 y 8,0; a la distancia alcanzable con una antena parabólica de unos 50 metros de diámetro, en la banda de 3 cm y con un maser de 20° K, entre 2,5 y 14; finalmente con una antena de gran tamaño capaz de alcanzar 3×10^5 radiofuentes por estereorradián, hallaremos valores de u comprendidos entre 4 y 35 según sea el valor de q_0 ; hay siempre un punto de discontinuidad en el crecimiento de los valores de u para el valor $q_0 = 0$.

No obstante todas estas dificultades, no se ha dejado de recurrir a la Radioastronomía, cada vez con mayor despliegue de trabajo y de medios; y como se va a ver, los resultados han comenzado a ser esperanzadores, si bien los esfuerzos que exigen y las precauciones que en su realización hay que adoptar son verdaderamente ingentes.

7. LOS RECUENTOS DE RADIOGALAXIAS

La idea que los preside es la misma que en Astronomía óptica inspira los recuentos de galaxias ordinarias. Aunque prácticamente todas las galaxias son radiofuentes, no todas alcanzan la categoría de radiogalaxias. Sabido es, en efecto, que después de un detenido estudio de todas las radiofuentes individuales conocidas hasta entonces, Mills las dividió en dos clases, la primera compuesta de radiofuentes galácticas, situadas cerca del plano galáctico, y la segunda de radiofuentes distribuidas isotrópicamente por todo el firmamento y que tanto podían ser galaxias lejanas como objetos galácticos relativamente próximos. Hoy día puede darse por probado que la mayoría de éstos, por no decir su casi totalidad, son radiogalaxias lejanas, es decir, galaxias muy distantes dotadas de un poder de emisión, sobre todo en ondas métricas, superior en varias potencias de 10 al de las galaxias ordinarias. Supuesto que la mayoría de las que se han podido

identificar con objetos ópticos son galaxias en colisión y la frecuencia de tales colisiones está en función de la densidad de las galaxias en una región dada, es claro que el número de radiogalaxias en las distintas partes del cielo constituirá una medida de dicha densidad de las mismas. Gracias a esto, con sus recuentos se pretende llegar a establecer si nuestro Universo corresponde a alguno de los modelos evolutivos newtonianos o relativistas o bien al modelo del estado estacionario; discriminar a cuál entre los varios del primer grupo ni siquiera se intenta de momento; se ve, pues, que el objetivo perseguido es más modesto que el que animaba a los primeros investigadores con el telescopio de Monte Palomar. Si se quisiese llegar, como ellos, a determinaciones más precisas de la forma del Universo, sería preciso comenzar por hallar fórmulas análogas a la [85] y [86] que nos den la manera de expresar el número de radiogalaxias de intensidad superior o igual a una intensidad de emisión dada S que se ha de hallar por unidad de ángulo sólido, es decir, por estereorradián en los diversos modelos de Universo. Para los modelos evolutivos da Sciamia la siguiente expresión:

$$\log N = C_0 - \frac{3}{2} \log S - (3H + \mu) KS^{-1/2} + \\ + (12H^2 + \frac{3}{10} \frac{z}{R^2} + \frac{3}{2} qH^2 + \mu') K^2 S^{-1} + \dots \quad [120]$$

en la que C_0 es una constante que envuelve la densidad del número de radiofuentes y su luminosidad absoluta S_0 , μ se refiere a una posible absorción intergaláctica y a una posible evolución de S_0 , K es una constante que involucra S_0 y μ' puede contener las dos primeras derivadas de S_0 respecto de t . Si se trata del modelo estacionario, la expresión es

$$\log N = C_0 - \frac{3}{2} \log S - \frac{21}{4} HKS^{-1} + 35H^2 K^2 S^{-1} + \dots \quad [121]$$

Los dos primeros términos dan la distribución en el caso de un Universo estático euclídeo; los restantes expresan la disminución del valor de N de resultas del efecto Doppler-Fizeau; como éste disminuye la intensidad aparente de cada radiofuente, resulta que, para cada S dada, se ve hasta menor distancia en el espacio que para el caso euclidiano, y por tanto el número de radiofuentes que se divisa es menor. Hay que tener en cuenta, no obstante, que si las radiogalaxias son colisiones de nebulosas, como éstas fueron más frecuentes en el pasado cuando la densidad de las nebulosas era mayor, su número ha de aumentar con la distancia y, por lo tanto, la disminución aparente debida al efecto Doppler-Fizeau ha de quedar contrarrestada por este mayor número de radiogalaxias. Como se ve, la interpretación no puede ser sencilla, y no menos la derivación de los valores de H_0 y q_0 del de N ; pero la mayor dificultad con que tropiezan estas ecuaciones es que se han deducido considerando S_0

prácticamente constante y, de hecho, tan sólo en las radiogalaxias identificadas se han encontrado discrepancias del orden de 1 a 10.000.

De aquí que, como hemos indicado, la única diversidad que cabe determinar actualmente por los recuentos de nebulosas sea ver si su distribución es uniforme y de densidad constante, como exigiría la teoría del estado estacionario, o si presenta alteraciones con la distancia, como establecen los modelos evolutivos. Naturalmente, la distancia se sustituye aquí, como se hizo en el caso óptico, por intensidades de la emisión recibida de las distintas radiogalaxias expresada en vatios por metro cuadrado referida a la banda de 1 ciclo por segundo. Los flujos así observados son debilísimos, del orden de $S = 10^{-23}$ a $10^{-26} \text{ wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$.

En el caso de un Universo euclídeo estático y, por tanto, de densidad constante, el número N de radiogalaxias por unidad de ángulo sólido de intensidad no inferior a una intensidad de emisión dada S , aumentará a medida que S disminuya de manera inversamente proporcional a su potencia $\frac{3}{2}$, es decir, que se tendrá

$$N = \frac{4}{3} \pi n_0 W_0^{3/2} S^{-3/2} \quad [122]$$

siendo n_0 la densidad de radiofuentes por unidad de volumen y W_0 la potencia emitida por cada radiofuente por unidad de anchura de banda por estereorradián. Representando esta expresión con $\log N(S)$, es decir, número de radiofuentes de intensidad $\geq S$ por estereorradián, como ordenada, y $\log S$ como abscisa, se ve que $N(S)$ representa una recta de pendiente -1.5 . Si la distribución no fuese regular, dicha inclinación variaría. Ryle aplicó este método a las 1906 radiofuentes de pequeño diámetro angular (del orden de 1' o menos), consideradas como radiogalaxias, contenidas en el primer catálogo de Cambridge de 1955. La curva resultó francamente distinta de una recta y el número de las más débiles muy superior al exigido por una distribución uniforme. Para asegurarse de que no se caía en errores de identificación de las radiogalaxias, atribuibles al escaso poder de resolución del interferómetro empleado, demostró Scheuer la posibilidad de obtener información segura sobre su distribución, estudiando la envolvente de la zona de interferencias producida por el instrumento, pues a menos de haber curvas intensas que produzcan confusión, la probabilidad de distribución de un gran núcleo de radiofuentes débiles ha de ser una distribución de Rayleigh. Comparada la curva de probabilidad de distribución derivada del primer catálogo de Cambridge con las calculadas para una densidad espacial uniforme de radiofuentes, se vio quedaba confirmado el resultado obtenido por Ryle.

Este y Scheuer creyeron ver en ello una prueba decisiva contra el Universo estacionario, y así se habría juzgado efectivamente si poco después Mills y Slee no hubieran puesto en duda tal deducción por el hecho de haber llegado a resultados muy distintos con instrumentos de otro tipo, sitios en Australia: en ellos desaparecía el exceso

de radiofuentes débiles encontrado por los investigadores de Cambridge y la curva que se obtenía no parecía necesitar ningún especial presupuesto cosmológico para su explicación. Mills y Slee habían trabajado con la célebre «cruz de Mills», cuyo poder de resolución llega a los $40' \times 50'$, en tanto que el área delimitada por el interferómetro de Cambridge no podía bajar de $2^\circ \times 16'$. Al clasificar las 1658 radiofuentes captadas en la frecuencia de 85 Mc/s, Mills obtuvo una curva muy próxima a una recta de pendiente efectivamente igual a $-1,5$. Pero lo más grave no era precisamente esto. Para comparar mejor los dos resultados, se eligió la región del cielo limitada por $+10^\circ$ y -20° de declinación y 00^h y 08^h de ascensión recta, común a los dos catálogos. De las 227 radiofuentes de la lista de Cambridge y de las 383 de la de Sidney contenidas en ella, sólo 62 coincidían; las demás discrepaban. Si los dos catálogos hubiesen sido absolutamente independientes, el número de coincidencias casuales no debería haber pasado en ningún caso de 42; al encontrarse 62, cabía afirmar sin más que ambos contenían un cierto número de observaciones genuinas de radiofuentes reales. Pero, por lo que tocaba al conjunto de las mismas, y más aún a los casos individuales, la duda se imponía, y como lo lógico era atribuir las diferencias a causas instrumentales, es claro que antes de seguir adelante se imponía repetir las observaciones esforzándose por aumentar la precisión.

Lowell y su equipo de Jodrell Bank, después de un detenido estudio del asunto, llegaron a la conclusión de que las discrepancias tenían que provenir probablemente de alguno de los motivos siguientes: diversidad de la técnica fundamental empleada, interferómetro por un lado y radiotelescopio de haz pinceliforme por otro; diferencias en la anchura de los haces de los radiotelescopios; diversidad del ángulo zenital de las áreas comparadas en el cielo; y finalmente diversidad de observadores. La cuestión esencial era, evidentemente, saber si las dos causas mencionadas en primer lugar permitían llegar a resultados consistentes, caso de poderse eliminar las otras causas de discrepancia. Para aclararlo se empleó el radiotelescopio gigante de Jodrell-Bank de 73 m de diámetro utilizándolo alternativamente, o solo, como radiotelescopio de haz pinceliforme, o en combinación con otro menor, como interferómetro en la banda de 81,5 Mc/s. El ángulo sólido barrido por el haz era de 7,5 grados cuadrados, y el abarcado por el interferómetro, 12,5 grados cuadrados; por lo tanto, áreas mucho mejor comparables entre sí que las de los catálogos de Sydney y Cambridge, en donde eran, respectivamente, de 0,55 y 11,8 grados cuadrados. Además, el campo visual quedaba restringido a la zona abarcable por el radiotelescopio y cubría una faja de declinación Norte entre los 26° y los 80° . Un ángulo sólido de 4250 grados cuadrados resultaba común a los dos levantamientos; sólo se examinaron radiofuentes contenidas en esta región, y las observaciones las hacía el mismo observador. El análisis de los resultados dio 83 radiofuentes en los registros radiotelescópicos y 104 en los interferométricos, con 39 coincidencias en la posición, dentro de los límites experimentales de error. Caso de

haber sido las dos listas totalmente independientes, las coincidencias no deberían haber pasado de once. Quedaban 41 radiofuentes en los registros de haz estrecho y 61 en los interferométricos sin coincidir. ¿Qué pensar de ellas? Un análisis concienzudo hizo ver que en las radiofuentes intensas no había discrepancia alguna y que de las restantes sólo 10 del registro radiotelescópico y 38 del interferométrico quedaban sin posible identificación en el otro; las demás o se llegaron a identificar con trazas o quedaban en regiones en que uno de los dos registros era confuso o, por estar en las inmediaciones de otras de gran intensidad, fácilmente eran confundibles con éstas. Una cosa quedó en claro, y es que se pueden dar radiofuentes que aparezcan en los registros radiotelescópicos y no en los interferométricos o por efectos de confusión o por tener grandes diámetros; en cambio, lo contrario es imposible y, por lo tanto, cuando ocurre, se ha de tratar de efectos espurios. Una investigación ulterior probó que las discrepancias se presentaban siempre por debajo de $S = 60 \times 10^{-26} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$ y que el factor más importante para determinar los efectos de confusión para una intensidad de flujo dada es el número medio de radiofuentes por anchura de haz a este nivel de flujo: así, un interferómetro con un campo de 12,5 grados cuadrados resulta imposible de utilizar con una densidad de 11 radiofuentes cada 3500 grados cuadrados, o sea 1 radiofuente cada 25 anchos del campo. En el catálogo de Cambridge esta densidad se presenta para $S = 56 \times 10^{-26} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$; la pendiente, pues, de la curva que relaciona $\log N$ y $\log S$ por debajo de este nivel se ha de mirar como muy dudosa. En cambio, en el catálogo de Sidney la misma densidad de radiofuentes se da para $S = 14 \times 10^{-26} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$, y de resultas, la pendiente de la curva por encima de este valor se puede mirar con confianza.

Aunque cuanto antecede prueba que los registros interferométricos dan peor resultado que los radiotelescópicos cuando se trata de radiofuentes débiles, todavía se puso más de manifiesto este resultado con el nuevo registro llevado a cabo en Cambridge en 1959 por Edge y varios otros después de modificar el interferómetro para trabajar en la banda de 159 Mc/s en vez de la de 81,5 Mc/s antes empleada: en su nueva forma, la zona registrada abarcaba una superficie de 8×1 grados con franjas de interferencia en dos planos en ángulo recto, como antes.

De 143 radiofuentes comprendidas en el catálogo primero de 81,5 Mc/s entre 40° y 50° de declinación Norte, sólo 35 aparecieron en el nuevo catálogo, indicando que el nivel original de utilización de las densidades de flujo para identificación se había situado demasiado bajo y debía ser aumentado hasta $40 \times 10^{-26} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$ en el catálogo de 81,5 Mc/s. Se obtuvieron datos para las regiones comprendidas entre $+37^\circ$ y $+52^\circ$ de declinación y 00^{h} y 24^{h} de ascensión recta y entre -10° y $+10^\circ$ de declinación y 00^{h} y 08^{h} de ascensión recta, siendo de notar que esta última era común al registro original de Cambridge y al de Sidney. La concordancia entre los dos registros de Cambridge no resultó mejor que entre el primero de Cam-

bridge y el de Sidney, pero en cambio sí resultó mejor entre este último y el segundo de Cambridge. El grado de esta concordancia se vio ser función de la densidad de flujo, pues mientras para $S > 30 \times 10^{-26} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$ el número de coincidencias era once veces el que podía esperarse del azar, y para $S > 20 \times 10^{-26} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$ todavía casi cuatro veces mayor, para densidades de flujo menores, su número era simplemente igual al que podía esperarse de la casualidad.

La curva representativa de $[\log N, \log S]$ para esta región común era ahora sensiblemente una recta y su pendiente -2.7 ; la del primer catálogo para esta misma región era -2.5 ; para todo el conjunto, -3 . La pendiente del nuevo catálogo en las otras regiones es -2.2 . Comparando estos resultados con los del catálogo de Sidney, se ve que ahora la representación de sus resultados en escala logarítmica $[\log N, \log S]$ son sensiblemente rectas, indicadoras de leyes exponenciales, pero de inclinación diferente: en tanto que la de la recta representativa de la distribución de las radiofuentes en el catálogo de Mills es, como se dijo, -1.5 , la del catálogo 3C es -2.0 . Edge y sus colaboradores, comparando las radiofuentes individuales en la región común a los dos catálogos, opinan que la discrepancia puede venir, sobre todo, de haberse excluido en el catálogo 3C de Cambridge las radiofuentes de gran tamaño angular y baja temperatura de brillo, a las cuales se ha dado entrada en el de Mills. Sin negar que su exclusión o inclusión pueda afectar las estadísticas, lo que no ofrece duda es que hace falta mayor acopio de datos para formarse un juicio seguro.

En efecto, de lo que antecede creyeron de momento había que concluir que hasta entonces por lo menos no había evidencia definida de que la distribución de las radiogalaxias se apartase de la distribución con exponente $-3/2$; y si era así, la explicación más sencilla era que la distribución de las radiogalaxias era uniforme hasta más allá del límite de observación del grueso de las mismas y que este límite quedaba suficientemente cercano para que no hubiese que temer dentro de él implicaciones cosmológicas.

Pero deducir de ello la validez del modelo del estado estacionario ya no era lícito, pues Mc Vittie hizo notar que los resultados podían ser asimismo coherentes con otra distribución de radiogalaxias muy intensas, análogas a la Cisne-A, con tal que su densidad de flujo se viese fuertemente reducida por los efectos cosmológicos, como por ejemplo, el corrimiento al rojo. Y en tal caso la ley de exponente $-3/2$ implicaría un fuerte aumento o de su densidad espacial o de su emisión media con la distancia. De donde se seguía que dicha ley podía ser también apta para representar un Universo evolutivo.

Vista la necesidad de lograr datos más precisos, a conseguirlos tendió un nuevo esfuerzo de Ryle, con un interferómetro de nueva concepción instalado asimismo en Cambridge en el Mullard Observatory y con el que se obtenía un poder de resolución mucho mayor, a base de dos antenas, una de 1450×65 pies orientada de Este a Oeste y otra mucho menor de 190×65 pies, situada a 2600 pies de

la primera y montada sobre una vía de 1000 pies orientada de Norte a Sur sobre la que se podía deslizar a fin de quedar en distintas posiciones respecto de la primera. Tal método de trabajo ha sido llamado de síntesis de aberturas. Gracias a la rotación de la Tierra, el instrumento barre cada 24 horas una franja de cielo de 4° de amplitud, que se puede seleccionar combinando la elevación relativa de las dos antenas. En cada serie de observaciones se coloca la antena móvil en el extremo Norte de los rieles y se observa en esta forma durante 24 horas; luego se desplaza una distancia aproximadamente igual a su propia anchura y se realiza una nueva serie de observaciones; al cabo de 25 días se tiene toda la información necesaria para dibujar el mapa de la franja entera de 4° de latitud galáctica. Ello supone unos 250.000 cálculos que se llevan a cabo con computador electrónico.

El cálculo se hace en hojas que permiten obtener las posiciones e intensidades de las radiogalaxias y la precisión alcanzada es la misma que si se trabajase con dos antenas de 800×500 pies cada una. Toda clase de precauciones se tomaron para evitar errores y ante todo para determinar la intensidad de emisión de las radiofuentes por tres métodos diferentes, a fin de tener una base para predecir el número relativo de radiofuentes lejanas que podemos esperar hallar de cada intensidad dada, sin que las observaciones queden desnaturalizadas por el número posiblemente grande de radiofuentes débiles, situadas a poca distancia, o en nuestra propia galaxia o en alguna de las vecinas. Un primer análisis, en el que se prescindía por completo de la naturaleza de las radiofuentes observadas, y dentro de ciertos límites de densidad de flujo se relacionaba su número con el poder de emisión por unidad de ángulo sólido de la emisión de fondo del cielo y con la distribución isotrópica de las radiofuentes alejadas del plano galáctico, probó que sólo un pequeño porcentaje de las radiofuentes débiles era interior a la Vía Láctea y que la gran mayoría eran ciertamente exteriores a la misma y que su emisión era por lo menos unas mil o diez mil veces más intensa que la de nuestra galaxia. Si se supone asimismo que las más de ellas representan galaxias de luminosidad óptica normal, este brillo límite se puede asociar con cada radiofuente y utilizarse para atribuirle una distancia mínima y de ella deducir un valor mínimo de su función de radioluminosis, siendo lo más probable que su poder de emisión sea de hecho mayor que el así calculado. Otro método, basado en la medida de sus diámetros angulares, llevó asimismo a intensidades de hasta 10 a 100.000 veces la de la emisión de la Vía Láctea. Antes de realizar el cómputo del número de radiofuentes de cada intensidad se juzgó todavía necesario prevenir el peligro de que algunas radiogalaxias se presentasen en enjambres y prever el riesgo del efecto de los lóbulos secundarios del sistema de antenas ante las emisiones de las radiofuentes más intensas.

Desbrozado así el terreno y estudiada la manera de extender las observaciones hasta las densidades de flujo más débiles posible, se decidió realizar varios levantamientos de radiofuentes. El primero debía cubrir la mayor parte del cielo observable, desde — 5° a 60° de

declinación con el aparato dispuesto de modo que pudiese ser utilizado a la vez como radiotelescopio de haz de $14' \times 4'6$ y como interferómetro E-W de 465λ de abertura; un segundo levantamiento se ceñiría a cuatro áreas, cada una de 24 horas en AR y 4 o 5° en δ , entre $50-54^\circ$, $48-52^\circ$, $40-44^\circ$ y $16^\circ30'-21^\circ30'$, utilizando el aparato tan sólo como interferómetro de 465λ de abertura y resolución primaria del orden de $25'$ en AR y $35'$ en δ . En el primer caso se observaron todas las radiofuentes de intensidad $S > 6 \times 10^{-26} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$ y en el segundo se llegó incluso a las de intensidad tres veces menos. En el primer recuento se examinaron 910 radiofuentes, de las cuales 629 tenían latitud galáctica $|b|$ superior a 20° y en el segundo el área total examinada con latitud $|b| > 20^\circ$ era de 0,6 estereorradián con un número de radiofuentes suficientemente grande para que los errores estadísticos resultasen pequeños comparados con los recuentos de radiofuentes más intensas de todo el cielo. Realizados cuatro levantamientos completos por este último procedimiento, los recuentos obtenidos en los cuatro no presentaron entre sí diferencias notables para las áreas de latitud $|b| > 20^\circ$ y consiguientemente sus resultados fueron combinados con los relativos a todo el cielo obtenidos por el otro método. Trazando entonces las curvas representativas de la relación entre los logaritmos de los números de radiogalaxias observadas hasta distintas intensidades y de los que se hallarían en un Universo euclídeo estático y comparándolas con las curvas correspondientes predichas por el modelo del estado estacionario, a base una vez del más bajo valor admisible del poder de emisión deducido de las observaciones y otra del deducido de las identificaciones con datos ópticos, se encontraron de nuevo, como cuando se utilizo el 1.^{er} Catálogo de Cambridge, discrepancias tan grandes que en modo alguno se podían atribuir a errores de observación o interpretación y parecían por tanto excluir definitivamente el modelo del estado estacionario: cuando se considera el menor valor posible de S el número N de radiogalaxias con intensidad de radiación $0,5 < S < 2 \times 10^{-26} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$ es $3 \pm 0,5$ veces mayor que el previsto en dicho modelo; y si se admite la función de radioluminosisidad deducida de las identificaciones ópticas, el exceso llega a ser de 11 ± 2 veces los valores predichos por dicha teoría. Con todo el asunto no quedó zanjado, pues Hoyle y Narlikar han hecho notar que habría habido que comenzar por probar que el aspecto de una distribución isotrópica en un universo euclídeo estático reproducía la de un universo estacionario y que de hecho esto no era así, pues en éste se pueden introducir elementos discretos sin alterar su carácter, por ejemplo, posibles condensaciones de galaxias, las cuales naturalmente modificarían la pendiente de la curva representativa de la relación $[\log N, \log S]$. También puede influir en ésta el hecho de que dependiese de la edad de las galaxias la probabilidad de su transformación en radiogalaxias. Bastaría, según ellos, que tal probabilidad, para galaxias de edad comprendida entre H^{-1} y $2,5 \times H^{-1}$ años fuese cien veces mayor que para las más jóvenes y que las condensaciones primarias del modelo del estado estacionario tengan unas dimensiones

iniciales del orden de 30 Mpc para que la pendiente de la recta representativa de la relación $[\log N, \log S]$, pueda ser mucho mayor que la correspondiente a una distribución uniforme de radiofuentes en un espacio euclideo. Cada condensación primaria contendría unas 10^5 galaxias, que en su mayor parte se alejarían luego unas de otras por efecto de la expansión consiguiente.

En análogo sentido se han pronunciado estos últimos años Hanbury Brown por un lado y Sciamia por otro, aunque por distintos motivos. Sostiene el primero que dentro de la gama de densidades de flujo cubierta por los actuales catálogos de radiogalaxias, la pendiente de la curva $[\log N, \log S]$ puede quedar sencillamente afectada por posibles irregularidades existentes en la distribución espacial de las radiofuentes situadas a menos de 100 Mpc de nuestra galaxia, fuera de que los trabajos más recientes sobre la forma y dimensiones angulares de las radiofuentes mejor conocidas indican que la resolución en radiofuentes individuales dentro de esta región es muy compleja y difícil de estimar. Tomando un modelo burdo, pero posible, de estas irregularidades y un valor razonable para la función de luminosidad, prueba que se obtiene una pendiente de la curva $[\log N, \log S]$ como la que obtiene Ryle y Clarke y que a este resultado se puede llegar tanto partiendo de modelos de Universo de Einstein y De Sitter como de Bond y Hoyle; por lo cual concluye que la exclusión del modelo del estado estacionario a base de simples recuentos de radiogalaxias es prematura y que no es posible llegar a resultados seguros mientras no conozcamos mejor el tamaño, estructura y luminosidad de las radiofuentes, a lo menos dentro de una esfera de 100 Mpc de radio con centro en nuestra Vía Láctea. El argumento aducido por Sciamia es de otra naturaleza: en vez de aceptar como los anteriores el aserto de Ryle de que la mayoría de las radiofuentes de escasa luminosidad aparente son radiogalaxias exteriores a la Vía Láctea, y discutir luego detalles de interpretación, comienza por negar tal afirmación y propone una distribución de las radiofuentes en que el número de las galácticas y extragalácticas para cada valor de la densidad del flujo es aproximadamente el mismo, antes de introducir las correcciones exigidas por el corrimiento al rojo y las irregularidades locales verosímiles en su distribución. Calculados los parámetros básicos de esta distribución a base de los datos suministrados por el catálogo de Ryle y Scott, y de los efectos del corrimiento al rojo exigidos por el estado estacionario, prueba que los resultados son consistentes con todos los datos que se poseen en la actualidad y en particular lo aplica al catálogo de Ryle y Neville a fin de demostrar que tal modelo es consistente incluso para densidades de flujo entre 1,2 y $0,25 \times 10^{-26} \text{ w m}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$. Posteriormente hasta ha propuesto un mecanismo astrofísico apto para producir la distribución de las radiogalaxias que propone: consiste en la inestabilidad rotacional de las estrellas de masa pequeña que se contraen por la gravitación y la conversión consiguiente de la energía rotacional en energía magnética y de partículas relativistas; advierte que tal mecanismo sólo puede actuar en determinadas condi-

ciones que puntualiza, a saber, si el 80 % de la emisión de fondo del cielo es debida, no al gas interestelar, sino a radiofuentes discretas, si la distribución de radiofuentes de intensidad $S < 0,1 \times 10^{-26} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$ es fuertemente anisótropa y si la materia acumulada en las radiofuentes es aproximadamente el máximo permitido por los argumentos dinámicos relativos a la «falta de materia» en la Vía Láctea; pero asegura que cree que las observaciones futuras probarán la exactitud de sus asertos.

En sentido contrario se pronunció Davidson. Tras un nuevo examen del último Catálogo de Ryle y Clarke, concluyó que, si los datos eran correctos y se confirmaba la casi completa ausencia de enjambres de radiogalaxias no era dudoso que el estado estacionario quedaba definitivamente excluido. Pero yendo más allá sostuvo que en las hipótesis físicas más plausibles, tampoco podía ajustarse a las observaciones de Cambridge ningún modelo de Universo evolutivo a menos que la densidad de flujo S de las radiogalaxias disminuyese con el tiempo. Para una distribución logarítmica gaussiana de S calculó que, cuando el número de radiogalaxias es proporcional al de galaxias, el poder de emisión de la radiogalaxia media en la época actual ha de disminuir a razón del 1,4 % cada 10^8 años. Si la proporcionalidad estuviese entre la densidad del cuadrado del número de radiogalaxias y la del cuadrado de galaxias (como podría ocurrir si el origen de las primeras es cinético), la disminución tendría que producirse a razón de 0,2 % cada 10^8 años. Dando un paso más buscó un modelo de Universo que cumpliera estas condiciones y para ello consideró una familia de modelos cosmológicos con espacio euclidiano en que el factor de expansión sea del tipo $R(t) = t^n$, siendo n constante; demostró que para un valor de n ligeramente inferior a $\frac{2}{3}$ la curva

$[\log N, \log S]$ que se obtiene está en completo acuerdo con las observaciones de Cambridge. El modelo resultante tiene un parámetro de deceleración $q_0 = -0,5$, el cual concuerda bien con las observaciones más recientes de Baum; suponiendo $H^0 = 1,3 \times 10^{10}$ años, su edad actual sería de $8,7 \times 10^{10}$ años; y en la época correspondiente al máximo de la curva $[\log N, \log S]$ el valor medio de S debió ser unas diez veces mayor que el actual.

En toda esta cuestión sería de gran importancia poder llegar a conocer con precisión lo que se podría llamar la emisión típica de una radiogalaxia por más que las grandes discrepancias en el poder de emisión de las pocas bien conocidas indiquen que tal valor no pueda pasar de ser un indicador de orden. Se ha hablado de los esfuerzos realizados en este sentido por el grupo de Ryle. Por su parte Mills en 1960 procuró abordar el problema partiendo de la distribución estadística observada de los valores de $m_{1,9} - m_F$, siendo $m_{1,9}$ las radiomagnitudes de Mills definidas para ondas de 1,9 m de modo que se tenga $m_{1,9} = -53,4 - 2,5 \log S_{1,9}$, siendo $S_{1,9}$ la densidad de flujo en onda de 1,9 m, y m_F las magnitudes fotográficas aparentes: dada

la función de radioluminosis, la distribución espacial de las galaxias y el espectro de las radiogalaxias, es posible computar, para un modelo cosmológico dado y en el supuesto de que no se producen cambios de S y W por evolución, la forma de la variación de $\log N$ con $\log S$ para las radiogalaxias de cada una de las magnitudes $m = m_{1.9} - m_F$ y en los recuentos totales incluyendo todas las clases. Comparando los resultados de estos cálculos con los de la observación se ve que los primeros resultan inferiores a los segundos en un factor del orden de 2. Esto sugiere que la función de luminosidad propuesta es correcta, pero incompleta; por lo que todavía en 1961 creían Pawsey y Hills que, no obstante los avances realizados, no se estaba aún en condiciones de llegar a ninguna conclusión cosmológica a base de los resultados actuales de la Radioastronomía. Una cosa resultaba evidente y es que con densidades de flujo limitadas a $10^{-26} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$ en la banda de 85 Mc/s los efectos cosmológicos sólo destacaban cuando se trataba de radiogalaxias potentes y que cuando se hacían recuentos de toda clase de radiofuentes los efectos de éstas quedaban muy diluidos en el conjunto.

No obstante todas estas dificultades y quizás precisamente a causa de ellas los esfuerzos realizados estos últimos años han sido verdaderamente grandes y no menores, relativamente por supuesto, los resultados conseguidos. La necesidad de mayor número de datos y precisión en los mismos ha hecho emprender la construcción de más potentes radiotelescopios e interferómetros y excogitar más eficaces técnicas de observación. Al mismo tiempo se han seguido completando y mejorando los catálogos existentes y se ha emprendido la publicación de otros nuevos, a la par que se han conseguido nuevas identificaciones de radiofuentes y más exacta determinación de su función de luminosidad. El esfuerzo en vías de desarrollo es tan intenso que raro es el número de las revistas astronómicas, tanto las de investigación estricta como las de vulgarización en las que no se encuentren uno o más artículos sobre estas materias. Y por lo que a los aparatos y técnicas de observación toca es interesante señalar la celebración de reuniones internacionales dedicadas a la consideración de las exigencias de los estudios cosmológicos en Radioastronomía, como por ejemplo, el Symposium de la O C D E sobre antenas gigantes celebrado en París en diciembre de 1961. Especial interés ofrecen las siguientes consideraciones de Hoerner sobre las condiciones mínimas que ha de reunir un radiotelescopio para ser realmente eficiente para la discriminación de los efectos que hemos denominado cósmicos. Así, para poder distinguir entre los modelos evolutivo y el del estado estacionario ha calculado que el número mínimo de radiofuentes por estereorradián que se ha de poder alcanzar con el radiotelescopio es de 3×10^5 ; en Astronomía óptica esto significaría poder contar galaxias hasta la magnitud 28; aquí quiere decir que se han de poder observar las radiofuentes hasta una densidad de flujo $S = 2 \times 10^{-28} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$ en una frecuencia de 159 Mc/s. Para saber qué dimensiones ha de tener el aparato capaz de este alcance, hay que tener en cuenta que el número de

radiofuentes por estereorradián observables con una antena se puede expresar por la fórmula.

$$N_{\text{obs}} = 524 \times \frac{\lambda^{0,45}}{T^{1,5}} \times A^{1,5} \quad [123]$$

siendo λ la longitud de onda en metros, T la temperatura del ruido total del receptor y de la emisión de fondo del cielo en grados Kelvin y A la superficie efectiva receptora de la antena en m^2 . Se prescinde de las limitaciones impuestas por la atmósfera en los dos extremos del espectro y se parte del hecho que la pendiente del diagrama [$\log N$, $\log S$] no difiere demasiado de $-1,5$ y que las densidades de flujo varían aproximadamente según la potencia $0,8$ de la longitud de onda. En la expresión [123] se ha puesto un nivel de ruido igual a 5, un tiempo de integración de 10 segundos y una anchura de banda del 5 por ciento de la frecuencia. En estas condiciones para alcanzar las 300.000 radiofuentes por estereorradián se ha de tener.

$$A > 69 \frac{T}{\lambda^{0,3}} \quad [124]$$

Como que una discusión del límite de resolución permite probar que es necesario tener a lo menos 75 áreas de haz por radiofuente, para alcanzar la cifra de antes la anchura de haz β no ha de pasar de $49''$ y la línea de base b ha de pasar de 5040λ . Si se desea que el instrumento pueda trabajar bien en los dos límites, de brillo y de resolución, sin que queden partes inutilizadas de la superficie de la antena o del área de la base, como entonces las perturbaciones se adicionan, los valores numéricos antes dichos han de ser

$$A = 110 \times \frac{T}{\lambda^{0,3}} \quad \beta = 25'' \quad b = 7.100\lambda \quad [124a]$$

La Cruz del Benelux recientemente construida queda muy por encima del límite de brillo y llega justo al de resolución de estas exigencias. Con una antena de esta índole se podría llegar al ecuador del Cosmos en un modelo con $q_0 > 1,6$; ello supone que se podrían alcanzar por lo menos la mitad de todas las radiogalaxias del tipo de la Cisne - A.

Los aparatos recientemente construidos no alcanzan tanta potencia; pero representan mejoras muy substanciales sobre los más antiguos. Ya hemos hablado del interferómetro de Ryle que continua siendo a estas horas uno de los más eficientes del mundo. El mejor radiotelescopio de antena parabólica semimóvil es en estos momentos del observatorio radioastronómico de Green Bank, West Virginia, Estados Unidos; en servicio desde fines de 1962. El diámetro del paraboloide es de 91 metros y sólo tiene movimiento en altura alrededor de un eje normal al meridiano; opera en las dos frecuencias de 750 y 1400 Mc/s. En la misma estación se está completando una antena menor de 42 m

de diámetro que podrá trabajar en frecuencia hasta de 8000 Mc/s. Tendrá montaje ecuatorial, lo que hará que sea el mayor equipo así montado existente en la hora actual en el mundo. También en 1962 entró en servicio en Australia un gran radiotelescopio con paraboloide de 64 m de diámetro, sito en el observatorio Parkes, en Nueva Gales del Sur; tiene movimiento en azimut y altura y pertenece a los Laboratorios de Física del C.S.I.R.O., pudiendo trabajar en seis longitudes de onda entre 10 y 220 cm. Una nueva cruz de Mills ha sido instalada en Hokintown con brazos NS y EW de una milla de largos y 12 m de ancho, que podrá trabajar en frecuencias de 408 Mc/s con una anchura de haz de 2,8', y de 111 Mc/s con un haz de 10' de ancho. En Cambridge, en el Observatorio Mullard, se ha instalado asimismo un nuevo radiotelescopio que en frecuencia de 408 Mc/s puede alcanzar una resolución de 1,5' en la mayor parte del cielo del hemisferio Norte. Y cabría asimismo citar el radiotelescopio de Arecibo, Puerto Rico, cuya antena es un casquete de una esfera de 265 m de radio, constituido por una malla metálica apoyada directamente en el terreno previamente excavado en la forma conveniente, y los que funcionan con el principio del celóstato, como son los de Nançay en Francia y el de Pulkovo en la URSS. El primero está constituido por dos espejos enfrentados, normales al meridiano, uno plano, de 40 × 40 metros, capaz de girar alrededor de un eje horizontal y otro esférico, de 560 metros de radio, con una abertura de 300 m de ancho por 35 m de alto; entre ambos se halla la antena activa constituida por un paraboloide de pequeñas dimensiones en el que son concentradas por el segundo espejo las ondas reflejadas por el primero, el cual se puede apuntar a todas las declinaciones. En cuanto al segundo, la radiación es recogida por una faja de paraboloide de 3 m de altura y 140 m de distancia entre los extremos y reflejada horizontalmente por 90 placas orientables hacia la antena receptora provista de un pequeño reflector cilíndrico paraboidal situado en el foco del gran receptor. Otros son la gran cruz de Benelux ya mencionada, el gran interferómetro de Saint Michel, en Provenza, el reflector fijo de abertura rectangular de Vermilion River Observatory, en Illinois, etc.

También es ingente la labor realizada en la confección de nuevos catálogos de radiofuentes o en la revisión de los antiguos con el fin de evitar todas las causas de error o imprecisión que los hacían de utilización menos segura. En primer lugar, a base de observaciones realizadas con los nuevos radiotelescopios de Cambridge en frecuencia de 178 Mc/s, Bennett ha llevado a cabo la completa revisión del catálogo 3C, de Edge *et alii*, el cual puede considerarse ahora completo (salvo en algunos casos de escaso brillo superficial) para todas las radiofuentes de flujo superior a $9 \times 10^{-26} \text{ w m}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$, situadas por encima de los 5° de declinación Sur. Para asegurar su exactitud, además de las observaciones directas realizadas con este fin, su autor ha tenido en cuenta todas las otras observaciones llevadas a cabo por distintos observadores desde 1957 a 1962 en Cambridge mismo y en Australia con distintos instrumentos y en diversas frecuencias. Natu-

ralmente, al disminuir las ambigüedades que en el levantamiento original del 3C provenían de los efectos debidos a los lóbulos secundarios, se ha puesto especial cuidado en no perder precisión en las posiciones. Sólo en las inmediaciones del límite inferior de densidad de flujo han resultado discrepancias de algún relieve con el 3C original. En éste 307 radiofuentes quedaban por encima del flujo de $10 \times 10^{-26} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$, que era el límite allí adoptado, y 129 por debajo. 93 de las primeras y 107 de las segundas no aparecen en el Catálogo revisado, muchas veces porque se había sobreestimado su densidad de flujo y otras por haberse confundido con efectos espurios de los lóbulos secundarios; en cambio se han añadido 90 nuevas radiofuentes, bastantes muy próximas al límite inferior de flujo. En 1964 Pilkington y Scott han publicado un catálogo de 1219 radiofuentes con $S \geq 2 \times 10^{-26} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$ en 178 Mc/s, hecho con el gran interferómetro de Ryle cuya instalación y método de trabajo denominado de síntesis de aberturas se han descrito antes. Cubre la región del cielo comprendida entre los 20° y 40° de declinación Norte y da las posiciones de las radiofuentes más débiles con una precisión de $3'$ en declinación y $0,5'$ en ascensión recta. Junto a éstos han aparecido los dos grandes catálogos publicados en Australia como resultado de observaciones con el gran telescopio Parkes, el primero en 1964 por Bolton, Gardner y Mackey de las radiofuentes comprendidas entre -20° y -60° de declinación Sur y el segundo en 1965 por Price y Milne de todas las de declinación Sur superior a los 60° . Realizados ambos en frecuencia de 408, 1410 y 2650 Mc/s, no sólo dan la densidad de flujo y la posición de las radiofuentes con una precisión de $1,5'$ en la región de declinación inferior a los -75° y de $2,5'$ en la comprendida entre los -75° y los -90° , sino que además indican las identificaciones ópticas, los radioespectros y los datos preliminares de polarización. Hasta los -75° comprenden todas las radiofuentes de $S \geq 0,5 \times 10^{-26} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$ y entre los -75° y -90° las de intensidad $S \geq 1 \times 10^{-26} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$.

Junto a estos catálogos generales tienen también gran interés otros de pequeñas regiones en los que se ha pretendido primariamente llegar a las radiofuentes más débiles posible. Por el método de síntesis de aberturas de Ryle, éste y Neville han conseguido catalogar las radiofuentes hasta una densidad de flujo $S = 0,25 \times 10^{-26} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$ con una precisión, para todas las de $S \geq 0,5 \times 10^{-26} \text{wm}^{-2} (\text{c/s})^{-1}$, de $\pm 15''$ en cada coordenada; por los métodos ordinarios habría sido necesario para esto disponer de un paraboloide de unos 1100 metros de diámetro. El catálogo comprende 87 radiofuentes de declinación superior a los 87° N y ha sido sumamente útil para extender la relación entre los logaritmos del número de radiofuentes y de su densidad de flujo.

También en estos últimos años se han multiplicado las listas de identificaciones, como por ejemplo las publicadas por Shakeshaft y

Longair en febrero y por De Vaucouleurs en abril de 1965, utilizando los primeros el catálogo polar de radiofuentes de Ryle y Neville y el último el 3C revisado por Bennet y el de Mills, Slee y Hills, asimismo revisado por sus mismos autores en 1960 y 1961. Se han realizado notables progresos en el conocimiento de los efectos de la agrupación en enjambres de las radiogalaxias sobre la relación entre su número y su densidad de flujo, comprobándose que eran de poca monta, y asimismo en la determinación de la función de luminosidad; hoy día ya apenas nadie duda de que las radiogalaxias tienen de ordinario densidades de flujo del orden de $S \simeq 10^{25}$ ó $10^{26} w (c/s)^{-1} \text{ster}^{-1}$ en la frecuencia de 178 Mc/s y que por tanto se han de hallar las más a distancias próximas a los diez mil millones de años de luz.

A base de todos estos datos se ha estudiado de nuevo con mayor profundidad la relación $[\log N, \log S]$. El 3C revisado por Bennett lleva a una recta de pendiente $-1,9$ para las densidades de flujo comprendidas entre 10 y $50 \times 10^{-26} w m^{-2} (c/s)^{-1}$ y está en buena concordancia con los resultados de Scott y Ryle en 1961. También el catálogo de Parkes lleva a una recta de pendiente $-1,7 \pm 0,3$, que, como hacen notar Price y Milne, concuerda bien con los resultados de Scott y Ryle y se presenta como válida hasta densidades de flujo inferiores a $0,5 \times 10^{-26} w m^{-2} (c/s)^{-1}$. En cuanto al catálogo de Mills, Slee y Hills después de su primera revisión en 1958 llevó a una relación que se traducía en una recta de pendiente $-1,8$; parecía, pues, ahora en concordancia con los resultados de Ryle; pero revisado de nuevo teniendo en cuenta los efectos de radiofuentes extensas y las posibles sobreestimaciones de las densidades de flujo muy débiles, se vio en 1960 que la pendiente de su recta representativa volvía a ser $-1,5$. En vista de ello se emprendió un estudio comparativo mucho más profundo de este catálogo con los restantes, y en particular con el 3C revisado por Bennett, y se puso en claro que en las listas de Mills aparecía un cierto número de radiofuentes de gran densidad de flujo que de hecho no eran tales, sino grupos de radiofuentes mucho menos intensas, y que, por otra parte, tenía muchas lagunas en las radiofuentes de $S < 12 \times 10^{-26} w m^{-2} (c/s)^{-1}$. Si se consideraban solas las radiofuentes de $S \geq 12 \times 10^{-26} w m^{-2} (c/s)^{-1}$ debidamente corregidas del catálogo de 1960, la pendiente de la recta representativa de la relación $[\log N, \log S]$ deducida del catálogo de Mills se acercaba mucho a la del 3C corregido.

8. EL RUIDO DE FONDO DEL CIELO

Se ve, pues, que todas las observaciones parecen favorecer los resultados de Ryle; pero como se ha visto que su interpretación misma ya no parecía una prueba apodíctica, se ha acudido a otros criterios, como el basado en la emisión de fondo del conjunto del cielo y la distribución de los diámetros de las radiofuentes; los resultados, sin embargo, no han sido mucho más alentadores.

En Astronomía óptica, la oscuridad del cielo entre las estrellas se vio era la prueba más inmediata contra la posibilidad de un Uni-

verso euclídeo, infinito y estático. También aquí las radiofuentes se destacan sobre el fondo del cielo de mucho menor brillo radioeléctrico y si se llegase a poder determinar la parte de este brillo de fondo debido a las radiogalaxias débiles irresolubles, variable evidentemente con los modelos de Universo, ello constituiría un gran paso para la comprobación de las teorías cosmológicas. Pero de hecho esta observación es muy complicada de resultados del deficiente conocimiento que tenemos de la radioemisión de la corona de nuestra propia galaxia, lo cual dificulta las observaciones de la misma manera que la luz del cielo nocturno hace difíciles las observaciones ópticas. En 1955, Baldwin hizo varias estimaciones especulativas de la componente residual extragaláctica a base de varios modelos de la corona galáctica; para la frecuencia de 81 Mc/s encontró que no llegaba a la mitad del brillo en las partes menos brillantes del cielo; en 1959, Schain, con frecuencias más bajas, de hasta 20 Mc/s, y técnicas basadas en el oscurecimiento del fondo extragaláctico producido por una extensa región de H II situada fuera de nuestra galaxia, encontró que la contribución de la componente extragaláctica es menor que el 50 % y a veces sólo el 20 % del brillo en las partes del cielo menos brillantes en la frecuencia de 20 Mc/s. Recientemente se han emprendido nuevos estudios sistemáticos en Jodrell Bank con el telescopio gigante y en frecuencia de 408 Mc/s, a fin de poder comparar los resultados con los de Sidney en 85 Mc/s y los de Leiden en 1390 Mc/s. Los resultados hasta ahora obtenidos confirman, por una parte, la ya conocida imposibilidad de un modelo euclidiano, infinito, estático; pero por otra parte, preciso es reconocer que tampoco aportan elementos suficientes para pronunciarse en pro o en contra de los distintos modelos evolutivos o estacionarios. En cuanto a los esfuerzos para determinar los diámetros angulares, y a ser posible los lineales de las radiofuentes, su finalidad es la de poder facilitar, por un lado, los recuentos, ayudando a precisar en cada caso si se trata de una sola radiofuente o de varias (o por ser una múltiple o por estar varias superpuestas), y asimismo a fijar su distancia. Aunque en estos últimos años se han realizado bastantes progresos, su determinación tropieza con tantas o más dificultades que las indicadas a propósito de la radioluminosidad. Un estudio muy ponderado de los resultados hasta entonces conocidos ha sido publicado en 1962 por Allen, Hanbury Brown y Hazer. Lo que es evidente es que para utilizar provechosamente todos estos datos, lo que urge es multiplicar lo más posible las identificaciones de radiofuentes con objetos ópticos conocidos, medio el más seguro de poder precisar su distancia. Y el caso es que hasta fines de 1964, de las 1159 radiofuentes del catálogo de Mills y de las 328 del revisado por Bennett sólo 70 habían sido identificadas con certeza con objetos visibles. De aquí que represente una contribución extraordinaria la identificación de otras 21 en 1965 a que antes hemos hecho referencia y que sean cada día mayores los esfuerzos que a este fin se consagran; sin ellas, en efecto, no parece pueda ser eficaz la contribución de la Radioastronomía a los tests que hemos denominado «refec-

tos cósmicos» encaminados a discriminar unos de otros los distintos modelos de Universo.

9. LOS TESTS DEL GRUPO DE «EFECTOS DE OBJETO». LA EDAD DEL UNIVERSO

Como ya hemos indicado antes, dada la multiplicidad y la índole de estas pruebas, apenas podemos hacer aquí otra cosa que dar de ellas una enumeración y explicación somera. Haremos, no obstante, una excepción con la de la edad del Universo, por la importancia que se le ha dado y por su conexión con muchos de los cálculos anteriormente expuestos.

Como ya se ha indicado, este test se funda en el hecho evidente de que, si por medios del todo independientes de las teorías cosmológicas, como, v. gr., el cálculo de la edad de las estrellas a base de las modernas ideas sobre su evolución y producción de la energía estelar, se llega para ciertos cuerpos celestes a edades muy superiores a la que se deduce para el conjunto del Cosmos de una teoría cosmológica determinada, es claro que tal teoría o ha de ser desechada o sometida por lo menos a fuertes retoques. Lo cual no quiere decir que, si los resultados son compatibles, quede ya sin más una teoría cosmológica canonizada; lo único que se habrá probado es que por este capítulo no repugna y con razón se la puede someter a ulteriores pruebas.

La conveniencia de recurrir a este test no se planteó hasta adquirir carta de ciudadanía la hipótesis base de los modelos de Universo evolutivos y admitirse la explicación del corrimiento al rojo de las rayas espectrales como un efecto Doppler genuino. Ni en el modelo primitivo de Einstein ni en el de De Sitter desempeñaba el tiempo papel discriminante; entró en juego al admitirse la métrica [16] de Friedmann, la cual se distinguía de la [8] de Einstein no sólo por ser R función del tiempo, sino también por la aparición del denominador, fruto de la hipótesis de tener que existir en todo momento un espacio euclídeo tangente en el que la distancia al origen viene dada por $r^2 = (\xi^1)^2 + (\xi^2)^2 + (\xi^3)^2$. Como se recordará, la solución de Friedmann fue una manera de evitar la introducción de la constante cosmológica Λ ; además, excepto en la solución de Eddington y la primera de Lemaître, en que se identificó el estado inicial del proceso evolutivo del Universo con el modelo de Einstein, se acostumbró a identificar el momento inicial $t = 0$ con un valor inicial nulo del radio del Universo, es decir, se hizo $R(0) = 0$.

La interpretación de las ecuaciones [17] a que se llegaba por adopción de la métrica [16] es clara. El término $\frac{zc^2}{R^2}$ define la curvatura riemaniana del espacio en el tiempo t ; el segundo término no es otra cosa que el cuadrado de H (fórmula [14]), que, como se recordará, define la ley de crecimiento o decrecimiento del Cosmos y es la constante o mejor parámetro de expansión de Hubble; en cuanto al

tercer término de la primera de las [17], $\frac{2R''}{R}$, está especialmente relacionado con el factor de deceleración $q_0 = \frac{-R''}{RH^2}$ y ya sabemos tiene especial importancia para el conocimiento del signo de z y consiguientemente de la verdadera forma del Cosmos.

Ya se vio que reemplazando $\frac{R'}{R}$ por H y suponiendo, como Friedmann, el caso más sencillo $z = 0$, las [17] tomaban la forma [18]. Integrando la primera de estas últimas respecto del tiempo, vimos se obtenía sin dificultad $t = \frac{2}{3} \frac{1}{H}$ [19]. Vimos igualmente que dando a H el valor generalmente admitido antes de las correcciones de Baade, a saber, $1,8 \times 10^{-17} \text{sg}^{-1}$, el valor resultante para la edad actual del Universo t_0 era tan sólo de $1,2 \times 10^9$ años. Aun atribuyendo a H el valor que actualmente le asigna Sandage de $0,24 \times 10^{-17} \text{seg}^{-1}$, t_0 no llega todavía a 1×10^{10} años (sólo $8,9 \times 10^9$). Como se conocen actualmente estrellas cuya edad excede sin duda alguna de 2×10^{10} años, salta a la vista la incompatibilidad de ambas cifras. Y no se soluciona con suponer $z \neq 0$. Para encontrar en tal caso el valor de t_0 , habrá que acudir a la segunda de las [17] escrita en la forma

$$\frac{zc^2}{R^2} + \left(\frac{R'}{R}\right)^2 - \frac{8\pi G\rho}{3} = 0 \quad [17a]$$

y convendrá expresar, como antes se ha indicado, t_0 y $R(t_0)$ en función de H_0 y q_0 solamente. Por lo que toca a $R(t_0)$ de la [68] y la [68a] se deduce

$$R(t_0) = \frac{c \sqrt{z}}{H_0 \sqrt{2q_0 - 1}} \quad \text{o bien} \quad R(t_0) = \frac{c \sqrt{z}}{H_0 \sqrt{q_0 - 1}} \quad [68b]$$

según se pueda despreciar la presión de radiación p o la densidad de masa ρ en comparación de esta radiación. En cuanto a t_0 , despejando $R'(t)$ en la [17a] y reemplazando ρ por $\frac{Q}{R^3}$, por disminuir ρ inversamente al cubo de R , se tiene

$$R'(t) = \sqrt{\frac{8\pi GQ}{3R(t)} - zc^2} = \frac{dR(t)}{dt} \quad [125]$$

o bien

$$dt = \frac{RdR}{\sqrt{\frac{8\pi GQ}{3} - zc^2 R^2}} \quad [126]$$

la cual, integrada, según cual sea el signo de z , da como resultado

$$\begin{aligned}
 t_0 &= \frac{8\pi GQ}{6c^3} \left[\arcsin \left(\frac{6c^2 R_0}{8\pi GQ} - 1 \right) + \frac{\pi}{2} \right] - \\
 &\quad - \frac{1}{c^2} \sqrt{\frac{8\pi GQR_0}{3} - c^2 R_0^2} \quad \text{para } z = +1 \\
 t_0 &= \frac{1}{c^2} \sqrt{\frac{8\pi GQR_0}{3} + c^2 R_0^2} - \frac{8\pi GQ}{6} \\
 &\quad \left\{ \lg \left[\sqrt{\frac{8\pi GQR_0}{3} + c^2 R_0^2} + cR + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{8\pi GQ}{6c} \right] - \lg \frac{8\pi GQ}{6c} \right\} \quad \text{para } z = -1
 \end{aligned} \tag{127}$$

Si se tiene $z = 0$ se va a parar a la expresión

$$R^{3/2} = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{8\pi GQ}{3}} t \tag{128}$$

que mediante la introducción en la misma de las expresiones [14] de H y [125] de R' , lleva a la [19] antes hallada. Utilizando las [68], [65] y [14], las [127] toman definitivamente la forma

$$\begin{aligned}
 H_0 t_0 &= \frac{1}{1 - 2q_0} + \frac{q_0}{(2q_0 - 1)^{3/2}} \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{q_0 - 1}{q_0} \right] \\
 &\quad \text{para } z = +1 \\
 H_0 t_0 &= \frac{1}{1 - 2q_0} - \frac{q_0}{(1 - 2q_0)^{3/2}} \lg \left[\frac{1 - q_0}{q_0} + \frac{|1 - 2q_0|}{q_0} \right] \\
 &\quad \text{para } z = -1
 \end{aligned} \tag{129}$$

que manifiestan cómo en estos casos se puede expresar también t_0 en función exclusivamente de H_0 y q_0 .

En este test tienen especial importancia las consideraciones expuestas antes relativas al caso en que $p \neq 0$. Pues es claro que al calcular la edad del Universo no se puede dejar de tomar en consideración en un Universo evolutivo los primeros momentos de la expansión y no hay duda que en ellos para valores pequeños de $R(t)$ la densidad de radiación ha de superar a la de la materia y la presión de radiación no puede menos de desempeñar un papel importante en las ecuaciones fundamentales del campo. A primera vista cabría pensar que el valor de t_0 debería quedar por ello notablemente afectado; pero ello no

obstante es fácil probar que el error que por este capítulo se pueda cometer en el cálculo de t_0 en función de H_0 y q_0 no influye prácticamente en los resultados que nos interesan. Basta recordar que entonces la expresión [68] toma la forma [68a] y que ahora para expresar t_0 en función de H_0 , q_0 , en vez de partir de la forma simplificada de las ecuaciones de campo [17], habrá que hacerlo de las [21], igualando no obstante de momento Λ a cero. Recordando que la densidad de la materia equivalente a la densidad de radiación es $\frac{aT_0^4}{c^2}$ y que la presión de radiación es $\frac{aT_0^4}{3}$ y notando asimismo que aT_0^4 varía de modo inversamente proporcional a $R^4(t)$, las [21] toman la forma

$$\left. \begin{aligned} \frac{zc^2}{R^2} + \left(\frac{R'}{R}\right)^2 + \frac{2R''}{R} + \frac{8\pi GQ}{3c^2R^4} &= 0 \\ \frac{zc^2}{R^2} + \left(\frac{R'}{R}\right)^2 - \frac{8\pi GQ}{3c^2R^4} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad [130]$$

siendo Q una constante del tipo de la que interviene en las expresiones [125] y siguientes.

Por los mismos pasos de antes, recordando tan sólo que en vez de la [68] hay que utilizar ahora la [68a], se hallan las soluciones

$$\left. \begin{aligned} t_0 &= \frac{1}{c^2} \left[\sqrt{\frac{8\pi GQ}{3c^2} - c^2R_0^2} - \sqrt{\frac{8\pi GQ}{3c^2} - c^2R_0^2} \right] \\ &\quad \text{para } z = +1 \\ t_0 &= \frac{1}{c^2} \left[\sqrt{\frac{8\pi GQ}{3c^2} + c^2R_0^2} - \sqrt{\frac{8\pi GQ}{3c^2}} \right] \\ &\quad \text{para } z = -1 \end{aligned} \right\} \quad [131]$$

de donde se sigue

$$\left. \begin{aligned} H_0 t_0 &= \frac{|\overline{q_0} - 1}{q_0 - 1} & \text{para } z = +1 & \quad q_0 = 1 \\ H_0 t_0 &= \frac{1 - |\overline{q_0}|}{1 - q_0} & \text{para } z = -1 & \quad 0 < q_0 < 1 \end{aligned} \right\} \quad [132]$$

Si se hace $z=0$, $q_0 = 1$ se obtiene tan fácilmente como en el caso anterior

$$H_0 t_0 = \frac{1}{2} \quad [133]$$

Los valores de $H_0 t_0$ computados a partir de los que se vayan atribuyendo a q_0 a base de las [132] son muy parecidos a los obtenidos con las [129]. En ambos casos, si $q_0 = 0$, $H_0 t_0$ vale la unidad; por lo tanto, si se atribuye a H_0 el valor hoy más probable de 75 Km/seg/Mpc, resulta para t_0 13×10^9 años; para $q_0 = 0.5$ valdría 8.67×10^9 años en un universo lleno de materia y 7.61×10^9 en otro lleno de radiación; para $q_0 = 1$, 7.42×10^9 y 6.50×10^9 , respectivamente; en fin, para $q_0 = 1.3$, $t_0 = 3.19 \times 10^9$ y 2.82×10^9 años. Luego todas estas expresiones se pueden emplear sin riesgo para computar la edad del Universo. Se ha objetado que en rigor en todo este razonamiento hay latente una falacia, pues es imposible que se llegue a cumplir la condición $R(t) = 0$ para $t = 0$, entre otras razones por la imposibilidad de que la densidad inicial sea infinita; pero esto no impide que las consideraciones antes expuestas se puedan utilizar para estimar el orden de magnitud de $H_0 t_0$. En vez de edad del Universo basta hablar de tiempo transcurrido desde la formación de las galaxias, y para ello basta retroceder hasta el momento en que la densidad de la materia precondensada fue igual al valor de la densidad media actual de una galaxia típica. Tal densidad es ciertamente inferior a 10^{-20} gr/cm³; si la densidad media actual es del orden de 10^{-29} gr/cm³, bastará suponer que $R(t)$ se reduce a su milésima parte para que la densidad quede multiplicada por 10^9 . Y en tal forma las ecuaciones fundamentales son ciertamente válidas.

Cotejando estos resultados teóricos con los datos de la observación, se puede tomar para H_0 el valor de Sandage $H_0 = 75$ Km/seg/Mpc y para q_0 un valor comprendido entre 0 y 3, con gran probabilidad de que sea $q_0 = 1 \pm \frac{1}{2}$. Con $z = +1$ resulta para $H_0 t_0$ un valor de

0.571 ± 0.1 y por tanto para t_0 7.4×10^9 años; forzando un poco se puede hablar de 10^{10} años. Ahora bien, como la edad de las estrellas más viejas de nuestra galaxia, como ya lo hemos notado antes, según los más recientes cómputos de Hazelgrove y Hoyle, no puede bajar de 2×10^{10} años, síguese que la relación que debería existir entre los dos miembros de la expresión evidente: « $t_0 \equiv$ tiempo transcurrido desde el principio del actual ciclo de la expansión \geq edad de las estrellas más viejas» continúa estando violada a lo menos por un factor 2 y tal vez mayor. No faltan autores, Sandage por ejemplo, que no juzguen tan clara esta conclusión y piensen que el valor de H_0 haya de ser nuevamente corregido o bien duden de que la incertidumbre que todavía hay en las teorías para calcular las edades estelares impliquen un factor del orden observado. Con todo esta manera de eludir la dificultad no parece del todo convincente: de ser verdad lo primero y tenerse que aplicar una nueva corrección substancial a H_0 , conduciría ello a dificultades mayores que las presentes. Llamaba en efecto la atención antes de las correcciones de Baade que todas las galaxias lejanas resultasen pequeñas respecto de nuestra galaxia y nuestra vecina Andrómeda. Las correcciones de Baade hicieron ver que todos los diámetros nebulares eran del mismo orden. Si ahora se vuelven a

duplicar o triplicar las distancias, automáticamente se afirma que todos los diámetros reales de las nebulosas distantes se han de multiplicar por 2 o por 3 y consecutivamente todas ellas resultarán mucho mayores que la Vía Láctea y las demás nebulosas del grupo local, cosa que parece asimismo del todo improbable. Mayor probabilidad hay en el recurso a la inseguridad de la determinación de las edades de los modelos de estrellas. No obstante, lo lógico es considerar la dificultad como si fuese realmente válida y ver cómo puede resolverse.

Si se quiere mantener la hipótesis $\Lambda = 0$, cabe recordar que una de las soluciones posibles es la de un Universo oscilante, evitando llegar al valor $R(t) = 0$, como lo han propuesto Heckmann y Schucking. Como entonces la actual etapa de expansión habría estado precedida por otra de contracción, no habría en rigor dificultad en que algunos objetos celestes, preexistentes a la etapa actual, tuviesen edad mayor que la duración de la actual expansión del Cosmos. Pero esta solución dista de ser plenamente satisfactoria, pues probablemente en el caso oscilante todas las galaxias que actualmente observamos se habrían tenido que condensar después del último mínimo, pues como el hidrógeno se va poco a poco convirtiendo en helio en las estrellas, si hubiese habido infinitas oscilaciones después de la condensación de las galaxias todo el hidrógeno estaría ya transformado, a menos que hubiese un proceso de regeneración. Ahora bien, este proceso, caso de ser posible (sobre ello tiene la palabra la Física Nuclear) exigiría temperaturas y densidades muy elevadas, sólo concebibles si toda la materia del Universo se hallase reunida; y por lo tanto en la fase de mínimo no habrían podido existir galaxias separadas, por lo que se habrían tenido que formar después. La antinomia con la edad de los modelos de Universo continúa, pues, sin resolver.

Otro recurso es acogerse a la teoría del estado estacionario; naturalmente en ella no hay posibilidad de antinomia por no haber entonces principio del Universo como un todo; podemos hallar sin contradicción galaxias y estrellas de cualquier edad. Con todo no es difícil probar que la mayoría de las que podemos observar deberían ser más jóvenes que nuestra galaxia y que las más viejas sólo raramente podríamos alcanzarlas. En efecto, en esta teoría $R(t)$ ya no es el radio del Universo, sino un mero factor de escala del entramado constituido por las nebulosas; sea ρ_s la densidad constante de las existentes en un momento dado dentro de un volumen $V(t)$; las dimensiones lineales de $V(t)$ serán proporcionales al cubo de $R(t)$, de modo que se tendrá

$$\frac{V'(t)}{V(t)} = 3 \frac{R'(t)}{R(t)}$$

Por la expansión la densidad ρ_s decrecería según la ley $3\rho_s \frac{R'}{R}$ y por tanto para que se mantenga constante han de crearse $3\rho_s \frac{R'}{R}$ nuevas nebulosas por unidad de volumen y de tiempo. Recordando que en

este caso $R(t)$ ha de revestir la forma $R(t) \sim e^{Ht}$, la ley de crecimiento revestirá la forma

$$\mu_s = 3\rho_0 H \quad [134]$$

siendo μ_s la nueva masa que se ha de producir por unidad de tiempo y de volumen. En la época $t - \alpha$ el valor de la función $V(t)$ era evidentemente $V(t - \alpha)$; de aquí que del material $\rho_s V(t)$ presente en la época t , en la época $t - \alpha$ estuviese presente $\rho_s V(t - \alpha)$. Y por consiguiente, la fracción del material nebuloso de edad mayor que α será

$$\frac{V(t - \alpha)}{V(t)} = \left(\frac{R(t - \alpha)}{R(t)} \right)^3 = \frac{e^{3H(t - \alpha)}}{e^{3Ht}} = e^{-3H\alpha} \quad [135]$$

Consiguientemente la fracción que tenga edad comprendida entre α y $\alpha + d\alpha$ será

$$3He^{-3H\alpha} d\alpha \quad [136]$$

y de ésta se sigue por integración que la edad media de las galaxias en cada región vale $\frac{1}{3H}$. Dado el valor corriente de H , es del orden de 4×10^9 años. Por lo tanto en la teoría del estado estacionario la mayoría de las galaxias observadas han de ser más jóvenes que la nuestra, cuya edad se computa con gran probabilidad en unos 10^{10} años, y además como al ser la época $t > H^{-1}$ la densidad ρ_s disminuye en cada región rápidamente, no es fácil poder observar más de una galaxia de edad superior a H^{-1} . Es de advertir que este raciocinio es válido para todos los objetos celestes que, una vez formados, permanecen en su ser; pero no para los que «se desvanecen», como las radiofuentes: en éstos la desaparición y consiguientemente la creación ha de ser más rápida que $3\rho_s H$ y por lo tanto cuando el desvanecimiento tiene lugar en un tiempo mucho menor que $(3H)^{-1}$, el nacimiento de nuevas radiogalaxias ha de ir controlado más por el desvanecimiento natural que por la expansión. Según lo que antecede tampoco con la teoría del estado estacionario se explica del todo satisfactoriamente la antinomia que nos ocupa. Fuera de que, por otra parte, dicha teoría tropieza con la dificultad todavía más seria de exigir para el parámetro de deceleración el valor $q_0 = -1$ y ya hemos dicho que el valor más probable de q_0 parece estar comprendido entre 0 y +3.

Sandage sugiere el recurso a modelos de universo con $\Lambda \neq 0$, es decir, a universos del tipo general de Eddington-Lemaître. Comparando las curvas que en este caso se obtienen para $R(t)$ en función de t con las que resultan cuando $\Lambda = 0$, se ve que al principio la diferencia es pequeña, pero cuando $R(t)$ va siendo suficientemente grande, en las ecuaciones [21] predomina el término en Λ por tender a cero el

término $\frac{8\pi G\rho}{3}$ por ser $\rho \simeq \frac{Q}{R^3}$. Si se supone $z = 0$, de la segunda de

dichas ecuaciones se obtiene inmediatamente

$$\lim R(t) = \text{const} \times e^{\sqrt{\frac{\Lambda}{3}}ct} \quad \text{para } t \longrightarrow \infty \quad [137]$$

La escala del tiempo depende, pues, de Λ ; si R'' llega a ser positivo, t_0 se hace mayor que H_0^{-1} y puede llegar a ser tan grande como se quiera, variando el valor de Λ . Ahora bien, esta explicación tropieza con el hecho de que, hoy por hoy, todas las observaciones sugieren que $R''(t)$ es negativo. Y además según esta teoría todas las galaxias se tuvieron que formar al pasar el crecimiento del radio del Universo por un mínimo y deberían tener de resultas edades del mismo orden que la Vía Láctea. Si se demostrase por tanto que existen galaxias más jóvenes que la nuestra, el recurso a la hipótesis $\Lambda > 0$ perdería automáticamente su fuerza. Ahora bien ¿qué datos nos ofrece la observación respecto a las edades de las galaxias? ¿las hay efectivamente formadas recientemente?

La respuesta depende en parte de que se admita o no la evolución en los distintos tipos de galaxias. Si éstos se consideran fijos, cada tipo se ha de producir separadamente; y precisamente adoptando este punto de vista Baade y Bock se han pronunciado contra la teoría del estado estacionario, basándose en que no hay indicio alguno de formación de nuevas galaxias elípticas gigantes del tipo E. Pero si se admite una evolución en los tipos, el problema cambia de aspecto, pues entonces cada tipo procedería de otro anterior más sencillo y sólo las galaxias del tipo más rudimentario se tendrían que formar directamente. Morgan sugiere que las E pueden proceder de las Sa, éstas de las Sb y éstas de las Sc, las cuales a su vez procederían de un tipo todavía poco identificado, correspondiente a una pequeña condensación inicial, al que se podría denominar A. La edad media de las galaxias elípticas gigantes de tipo E se calcula del orden de 4×10^9 años; pero no hay contradicción alguna en que algunas de sus estrellas exijan antigüedades del orden de 20×10^9 años, porque pueden haber durado otro tanto en cada uno de los estadios anteriores, y aunque su edad fuese todavía algo superior, no habría dificultad en poner ambas magnitudes de acuerdo mediante un ligero aumento de la primera, lo que no llegaría a tener el inconveniente de establecer la desigualdad de diámetro a que hemos hecho antes referencia. Morgan aduce en favor de su teoría evolutiva los espectros integrados de las galaxias; Hoyle afirma que otro tanto puede argüirse de los colores. Las estrellas de los núcleos de los tipos espirales Sb y Sa parecen de naturaleza semejante a las de las galaxias elípticas E, pero los colores integrados se hacen cada vez más rojos a lo largo de la secuencia Sb, Sa, E. Crampin y Hoyle han demostrado que teóricamente el color de un grupo de estrellas se ha de hacer cada vez más rojo con la edad; pero con todo no hay que atribuir a esta concordancia un valor que no es seguro tenga, pues los colores de los núcleos de las espirales pueden estar afectados por los halos de las estrellas típicas de los enjambres globulares azules. Por tanto por este capítulo hay que aguardar a

que se alcance mayor precisión tanto en la observación como en la teoría.

Otros indicios de evolución los suministra el que las galaxias elípticas presentan sistemáticamente mayor masa y luminosidad que las espirales, como si hubiese un proceso continuo de crecimiento a lo largo de su secuencia. Es un aspecto común del campo galáctico que las espirales se suelen encontrar formando pequeños grupos y como dominadas por una o dos elípticas gigantes, lo cual hace acudir a la mente la idea de que se han condensado del medio intergaláctico por la acción de tales elípticas. Hoyle y Burbidge han formulado incluso un posible mecanismo de tal formación. Suponiendo que efectivamente se realice, habrá que examinar si hay alguna evidencia de la formación en número suficiente de galaxias de tipo primitivo, sobre todo de masa pequeña. El catálogo de objetos raros encontrados por Vorontsov y Velyaminov en la carta celeste fotográfica de Monte Palomar del que se hizo mención en la primera parte nos da la sorpresa de que el número de tales objetos celestes es mucho mayor de lo que uno habría esperado: más allá de la 15 magnitud llegan a representar el 3 ó 4 por ciento del número total de galaxias que podríamos llamar normales. Si se considera que la duración de tales objetos no puede pasar mucho de 10^8 años, se sigue que el número de los que nacen en un tiempo de 4×10^9 años debe ser del orden del número total de galaxias. Nada se sabe hoy por hoy de su magnitud absoluta y su distancia, excepción hecha de que no son gigantes, antes al contrario, débiles y relativamente apelotonados. ¿Se tratará de las galaxias tipo A antes mencionadas? Sea de ello lo que fuere, no faltan argumentos de otra clase en pro de la existencia de galaxias jóvenes, por ejemplo, el que deducen los esposos Burbidge del estudio dinámico de un enjambre de galaxias predominantemente espirales en la constelación de Hércules. Presenta la forma de una V mayúscula, lo que indica que es joven. Las velocidades de las galaxias separadas muestran que el enjambre está en estado de disolución, a menos que tales galaxias tengan masas individuales muy grandes o el enjambre contenga una masa enorme de gas difuso, cosas ambas poco probables. Ahora bien, si está en disolución, su estructura de conjunto no puede ser demasiado antigua. Al igual que los anteriores, se ve que tampoco este criterio está suficientemente maduro para suministrar el modo seguro de discriminar con certeza los distintos modelos de Universo.

10. LOS RESTANTES CRITERIOS DE «EFECTOS DE OBJETO»

Nos referiremos a los más estudiados, tales como la materia intergaláctica, la formación y distribución de los tipos de galaxias, la formación y distribución de los elementos y los indicios de un pasado del Universo de densidad más elevada que la actual.

Respecto del primero, repetidas veces se ha indicado lo mucho que importaría conocer con una aproximación conveniente el valor de la densidad ρ de la materia en el conjunto del Cosmos para discriminar

los distintos modelos de Universo. A lo más, partiendo de las masas, no demasiado bien determinadas, de las galaxias cabía llegar a fijar un límite inferior de ρ , que se calculaba aproximadamente igual a 10^{-30} gr/cm³, valor demasiado pequeño para alcanzar significación cosmológica. Una revisión de las masas galácticas y el descubrimiento por Zwicky de numerosas galaxias débiles hicieron elevar este límite un poco, pero nada permitía esperar que se pudiese llegar en breve a un conocimiento de ρ adecuado. De pronto el descubrimiento entre 1957 y 1958 de la materia intergaláctica hizo concebir grandes esperanzas, pues por un lado parecía que su densidad debía exceder en mucho a la de la materia contenida en las galaxias y por otro parecía asimismo que tal densidad se iba a poder determinar. Era ello fruto de los trabajos de Zwicky y Field: el primero acababa de hallar en las placas de Monte Palomar varios pares de galaxias unidas entre sí por puentes de materia luminosa (hoy se sabe que no constituyen ninguna rareza) y el segundo había puesto de manifiesto en el espectro de Cisne - A la raya en absorción de 21 cm, debida al influjo del hidrógeno en los alrededores de la radiofuente; posteriormente se ha ido hallando también en los espectros de M 87, del mismo enjambre de Virgo, y de M 51, lo mismo que en los de otras 27 galaxias examinadas por el Observatorio de Harvard y 30 estudiadas por los de Green Bank y Jodrell Bank, fuera de varias observadas por el de Parkes, en Australia. Los primeros estudios de Field le llevaron a la conclusión de que, si sólo un pequeño porcentaje de hidrógeno intergaláctico está ionizado, se puede calcular que la densidad total del hidrógeno neutro asimismo intergaláctico es del orden de 5×10^{-29} gr/cm³, esto es, unas cincuenta veces mayor que la de las nebulosas; pero si el grado de ionización es mayor (por ejemplo $\geq 10\%$), no se puede dar cifra alguna con seguridad. Ahora bien, es de temer que esto último sea lo más probable. La razón es que la vida media de un protón hasta recombinarse en las condiciones intergalácticas es del mismo orden que la constante de Hubble para una ancha gama de temperaturas cinéticas. De aquí que, si la materia está ionizada en gran parte, como parece ha de estarlo de resultas de las altas temperaturas que han de prevalecer en las primeras fases de los modelos explosivos o las exigidas por la creación continua, permanecerá ionizada durante un lapso de tiempo de orden cosmológico. Ciertamente puede ocurrir que se produzcan fluctuaciones en la densidad del hidrógeno neutro que pueden servir de indicio de la existencia de condiciones locales especiales, por ejemplo, de bajas temperaturas o densidades elevadas; y así las observaciones de Dieter sobre la raya de 21 cm en el espectro de M 33 sugieren la existencia de una cantidad considerable de hidrógeno neutro independiente de toda galaxia, que quizás se pueda interpretar como gas intergaláctico que se ha recombinado de resultas del aumento de densidad inducido por la acción gravitatoria de M 33. Pero esto no obstante si la mayor parte del hidrógeno está ionizado, va a ser casi imposible detectarlo, a menos que se halle modo de hacerlo desde algún satélite artificial. Se ve, pues,

que las esperanzas puestas en el descubrimiento de la materia intergaláctica para alcanzar un conocimiento bastante aproximado de ρ y consiguientemente del tipo de Universo en que nos hallamos, a lo menos por ahora, no parecen haber de conducir a resultados apreciables. No hay que negar con todo que los estudios de Field y Zwicky y de cuantos los han seguido en este camino hacen esperar que nos hallamos en los comienzos de una nueva rama de la Astrofísica y que es posible que al desarrollarse consiga resultados fidedignos sobre la materia intergaláctica y las consiguientes implicaciones cosmológicas.

Por lo que toca a la formación y distribución de las galaxias, se ha visto que en todas las teorías cosmológicas se suponía homogénea su distribución en el espacio; es claro que tal suposición viene impuesta por las exigencias de la tractación matemática, pero que en la práctica es sólo estadística. Se suele decir que se supone la homogeneidad en una región suficientemente grande: ¿qué dimensiones ha de tener para que la hipótesis quede justificada? ¿Tiene que ser tan grande que quede afectada por los conceptos de mapa e imagen del Universo? Pues es claro que mientras la hipótesis de homogeneidad, no menos que la de isotropía, se refieren al mapa del Cosmos, los tests que se puedan imaginar para comprobarlas se tienen que practicar forzosamente sobre la imagen, excepción hecha de la teoría del estado estacionario, ya que en ella mapa e imagen coinciden. Hoy por hoy no se puede determinar teóricamente cuál ha de ser la extensión de una región para que un test resulte adecuado.

En todo caso en cualquier modelo hay irregularidades locales, por ejemplo, enjambres o superenjambres cuyas particularidades podemos conocer. Y es evidente que cada teoría ha de poder dar razón de cómo han llegado a formarse; en su capacidad o incapacidad para proporcionar la solución adecuada se ha querido buscar un nuevo criterio para aceptar o descartar los distintos modelos de universo.

Basándose en los modelos evolutivos se han formado varias teorías para explicar la formación de las galaxias; así por ejemplo la de Lemaitre en 1949, la de Gamow en 1949 y 1953, la de Layzer en 1954, etc. Según todas ellas hubo un tiempo especialmente apto para este proceso, razón por la cual la mayoría tuvieron nacimiento en él y han de ser por tanto en su mayor parte aproximadamente de la misma edad. Naturalmente cuanto más lejana veamos una galaxia, más joven se nos ha de mostrar. La gran dificultad de estas teorías está en que las perturbaciones pequeñas progresivamente crecientes del estado homogéneo inicial no pueden llegar a formar galaxias en el lapso de tiempo de que se dispone y por esta razón tienen que recurrir a suponer la existencia de perturbaciones grandes. Ahora bien, este recurso tropieza con dos dificultades, una técnica y otra de principio. La técnica es que hasta ahora nadie ha sabido cómo discutir la formación de condensaciones gravitatorias en presencia de los movimientos compresores de gran turbulencia que son necesarios para producir fuertes fluctuaciones de la densidad, máxime teniendo en cuenta que en ellas el gas intergaláctico no puede estar muy caliente.

En ellas, en efecto, se viene de una fase inicial de alta densidad en que la temperatura cinética T_K y la de radiación T_R debieron ser iguales, ya que en las altas densidades hay una relación estrecha entre materia y radiación; al expansionarse el Universo, T_K tuvo que decrecer tanto o más que T_R , por lo cual al llegar a los estadios más recientes debía ser $T_K < T_R$, y como actualmente T_R es inferior a 10° Kelvin, ningún valor apreciable de T_K puede haber sobrevivido; quizás en alguna estrella aislada T_K alcanzase unos miles de grados, pero para la formación de las nebulosas se habrían necesitado millones. La de principio consiste en que las características de estas perturbaciones no están determinadas por la teoría, sino que se consideran como condiciones implícitas en el estado inicial del Cosmos en la época $t \simeq 0$. Estas dos dificultades han detenido, de hecho, a los investigadores en el cálculo detallado de las propiedades de las galaxias que deberían resultar de la teoría para poderlas comparar con la observación.

La teoría del estado estacionario puede evitar ambas dificultades. Es verdad que siguen haciendo falta perturbaciones que alteren fuertemente la densidad del medio en algunos puntos; pero como en ella han existido *siempre* galaxias, éstas pueden perturbar gravitatoriamente el gas intergaláctico de manera sistemática y producir así grandes aumentos locales de densidad sin que se originen a la vez movimientos violentos de turbulencia. En cuanto a la segunda dificultad, tampoco se presenta aquí, porque en esta teoría no hay principio ni, por tanto, condiciones iniciales. Los autores de esta teoría no tanto pretenden discutir en detalle la formación de las galaxias, cuanto probar que las exigencias del estado estacionario llevan a resultados definidos sobre las propiedades medias de las galaxias que concuerdan con los datos de la observación. Recordando lo que se ha dicho a propósito de la edad del Cosmos, se han de poder hallar galaxias de todas las edades en cualquier momento y en cualquier lugar, desde recién formadas hasta algunas de edad tendiendo a infinito. Con todo, como los enjambres de galaxias, desde el momento que se forman, comienzan a expansionarse, las más antiguas se habrán alejado más y, por tanto, la posibilidad de observar alguna de edad muy avanzada será sumamente pequeña; se recordará que la edad media de las que observamos ha de ser $(3H)^{-1}$, que, dado el valor actual de H , es de unos 4×10^9 años. Los cálculos realizados bajo las hipótesis del estado estacionario llevan al resultado de que la masa media de una galaxia ha de estar comprendida entre 2×10^{43} y 6×10^{44} gr, y su distancia media ha de oscilar entre 4 y 10×10^{23} cm; el número máximo de galaxias de un enjambre será de 10.000, y en promedio habrá 10 galaxias por enjambre, quedando un 10 % de galaxias aisladas; así, en una esfera de 10^8 años de luz de radio habrá 100.000 enjambres con un total de un millón de galaxias; sólo cien enjambres contendrán mil galaxias o más y sólo diez podrán contener 10.000. Aunque alguno de estos valores pueda tener que ser corregido de resultas de los nuevos puntos de vista de Hoyle y Narlikar a que

nos hemos referido en el núm. 7, en conjunto están lo suficientemente acordes con los datos de la observación, para que por este lado no se pueda crear especial dificultad al estado estacionario; lo cual, no obstante, no quiere decir que constituyan una prueba positiva del mismo.

Como se ha dicho también al tratar de la edad del Cosmos, Haro y Münch sostienen que hay evidencia de la existencia de galaxias jóvenes, reputando por tales algunos objetos extragalácticos muy azules con estrellas de tipos primitivos y compuestos en su mayor parte de gas no condensado. Pero aunque sea así, no constituye ello una prueba decisiva en favor del estado estacionario, a menos de ser muy numerosas, pues está probado que también en los modelos evolutivos algunas se pueden formar tardíamente. De aquí que se haya querido formular bajo otro aspecto el argumento que se puede deducir de la formación de las galaxias. En el modelo del estado estacionario, las galaxias se originan en el medio intergaláctico. Ahora bien, como existen muchos tipos de galaxias, la cuestión es saber si hay o no evolución de uno a otro, pues si no lo hay, es claro que han de nacer galaxias de todos los tipos. Si así ocurre, como no se pueden observar galaxias elípticas E jóvenes, Baade y Bock opinan que de ello se deduce la falsedad del estado estacionario. Pero si se da evolución, es claro que basta constatar la formación de galaxias de tipo A, es decir, de condensaciones iniciales pequeñas. Las razones en pro y en contra de ambas opiniones se han expuesto al tratar de la edad del Cosmos, y a ellas nos remitimos. Sea cual sea la opinión que de ello podamos formarnos, aquí conviene añadir que tampoco por este camino se puede llegar a conclusiones definitivas; pues aunque es cierto que, según el principio cosmológico perfecto, no puede darse tal cambio sistemático de propiedades y que, por tanto, si se da, el estado estacionario queda excluido, en cambio, si no se da, no por eso queda justificado, pues todos están acordes en que $2 \text{ ó } 4 \times 10^9$ años es un lapso de tiempo demasiado corto para estar seguros de que los posibles cambios sean apreciables.

Un nuevo argumento se ha buscado estos últimos años en las diversas teorías sobre la formación de los elementos. Inspirado por la famosa frase de Eddington *go and find a hotter place*, sostuvo Gamow, por primera vez, en 1946 que este horno ultracaliente, apto para explicar la formación de todos los elementos, no era otro que el Universo considerado como un todo en su época inicial $t \simeq 0$; pues entonces la densidad y la temperatura tuvieron que ser lo suficientemente elevadas para permitir explicar la formación de todos los elementos a partir del hidrógeno por medio de reacciones termonucleares. La teoría fue ampliada y formulada el 1948 por Alpher, Bethe y Gamow, lo que motivó se la denominase teoría α - β - γ , y más tarde modificada en 1953 y 54 por Alpher y Hermann. Su finalidad era hallar un conjunto de condiciones de densidad y temperatura, consistente con las ecuaciones de Einstein, que junto con las velocidades conocidas de las reacciones nucleares llevase a la distribución que se observa de abundancia de elementos en la Naturaleza. No obstante

el amplio margen de libertad dejado por las ecuaciones de Einstein, la teoría chocó con dos dificultades capitales. Fue la primera la inestabilidad de los núcleos de peso atómico 5 y 8, la cual produjo un estrangulamiento en el proceso de formación de los elementos y, no obstante las tentativas realizadas para evitarlo, todavía hoy sigue impidiendo la formación de un número apreciable de elementos más pesados que el helio. Y luego, en contra de la hipótesis de que todos los elementos pesados se habrían formado en los primeros minutos de la evolución, se ha llegado posteriormente al convencimiento de que la formación de un buen número de elementos es posterior a la de la Vía Láctea. Así, por ejemplo, en 1952 Merrill descubrió en las estrellas de tipo S el tecnecio, el elemento que faltaba, de número atómico 43 y peso atómico 99, cuyo isótopo más longevo tiene una vida media de unos 200.000 años, razón por la cual tiene que haberse formado en estas mismas estrellas. Asimismo algunas estrellas jóvenes contienen mayor concentración de elementos pesados que las viejas, lo cual indica que la concentración interestelar de elementos pesados crece con el paso del tiempo.

Estas dificultades hicieron buscar otro camino, procurando explicar la actual distribución de abundancias de los elementos a base tan sólo de los procesos nucleares en los varios tipos conocidos de estrellas. Por supuesto que la teoría del estado estacionario requiere en absoluto esta explicación, inspirada en unas primeras tentativas de Farkes, Hartek y Pokrowski en 1931, como la anterior lo había sido en las ideas de Eddington de 1926. Esta teoría se ha desarrollado tan rápidamente que la Nucleogénesis constituye hoy una rama bien definida de la Astrofísica; entre sus cultivadores más conspicuos cabe citar a Ahrens, Aller, los esposos Burbidge, Cameron, Greenstein, Fowler y Hoyle, Minnaert, Salpeter, etc. Un éxito que da confianza en su desarrollo es la predicción de Hoyle en 1954 de que el núcleo C^{12} debía tener un estado excitado a 7,70 MeV a fin de explicar la abundancia relativa del He^4 , C^{12} y O^{16} . Cuando Hoyle formuló su predicción parecía ello imposible; Guggenheimer, Heitler y Powell habían podido llegar a encontrarlo al nivel de 7,3 MeV, mientras otros no lo habían hallado en absoluto. Después de la predicción de Hoyle, toda la investigación se rehizo y se encontró de hecho tal estado a niveles de energía prácticamente iguales al predicho. Hay que notar, con todo, que si esta nueva teoría se va confirmando y todos los detalles de la curva de abundancias de los elementos van quedando explicados por la formación de elementos en las estrellas, no por eso los modelos evolutivos quedarán descartados, pues se pueden elegir probablemente condiciones iniciales en estos modelos para las cuales sólo una pequeña parte de formación de elementos tiene lugar en los primeros momentos. En cambio, si resulta que la síntesis en las estrellas es una fuente inadecuada de formación de elementos, la teoría del estado estacionario ha de quedar descartada. No queda, pues, más remedio que aguardar a que esta nueva ciencia se vaya consolidando y permita llegar a soluciones seguras.

El último argumento que vamos a exponer se refiere a los indicios que se pueden hallar en el Cosmos de haber atravesado éste en el pasado un estado de densidad mucho mayor que el presente, lo cual, de ser cierto, bastaría para descartar los modelos del estado estacionario. Muchos son los indicios que se han ido citando en el decurso del tiempo; pero aquí nos limitaremos a presentar los aducidos recientemente por Hoyle y que, por lo visto, le han parecido tan fuertes que, en vista de ellos, se ha creído en el caso de modificar su posición respecto de la creación continua todavía no hace muchos meses. Son tres observaciones de tipo muy diverso, pero que conducen las tres, a juicio del célebre cosmólogo, a la existencia de un pasado cósmico superdenso. En primer lugar, Penzies y Wilson han observado un ruido de fondo emanado del conjunto del cielo en la frecuencia de 4300 Mc/s de una intensidad entre 10 y 100 veces mayor que la atribuible a todo el conjunto de las radiofuentes, lo que sugiere que el Universo tiene un fondo de radiación de origen térmico correspondiente a unos 3,5 grados Kelvin. Para estar seguros de que así es, habría que realizar observaciones en otras dos frecuencias, y de hecho las están planeando Dicke y Princeton. Pero, si se confirma, no se ve ningún proceso astrofísico de los conocidos hasta ahora capaz de explicar esta radiación. De aquí que ambos investigadores hayan creído poder asegurar que el Universo ha tenido que ser diferente en el pasado y en particular mucho más denso que en la actualidad. Lo mismo se deduce de la consideración de la proporción del helio al hidrógeno en las estrellas y nebulosas gaseosas de la Vía Láctea. Varía entre 0,08 y 0,18 y parece ser la misma en las estrellas viejas que en las jóvenes; ahora bien, la proporción que cabría esperar encontrar, deducida de la actividad estelar normal, es sólo 0,01. De ello se sigue que, o bien la actividad en la galaxia fue mucho mayor en el pasado o bien la producción del helio no se puede explicar exclusivamente a partir del hidrógeno mediante reacciones termonucleares en el interior de la galaxia. El que de hecho no se encuentren estrellas o nebulosas con un contenido de helio menor parece probar esta segunda explicación. Es posible demostrar que, si la materia en el Universo ha salido de un estado de temperatura superior a 10^{10} grados K, la proporción del helio al hidrógeno debería ser 0,14, y este valor coincide casi, precisamente, con el promedio de los encontrados en la Vía Láctea. ¿Es ello una prueba clara de que la actual concentración de helio procede de este estado supercaliente y superdenso? Hoyle dice que, de ser así, no se deberían encontrar valores inferiores al 0,14; pero añade que es un indicio fuerte y que es necesaria investigación ulterior para aclarar si la coincidencia es casual o no.

Un tercer argumento en favor de un estado pasado mucho más denso puede sacarse del origen de las galaxias elípticas. Hoy parece evidente que las galaxias espirales se han condensado a partir desde una forma difusa: están, en efecto, en rotación y es su momento de giro el que las preserva de verse progresivamente comprimidas hasta formas más compactas. También se había creído que las elíp-

ticas achatadas estaban en rotación y que se habían formado como las espirales por un proceso de condensación. Ahora bien, no se ha conseguido comprobar nunca tal giro y todos los indicios apuntan hoy hacia una formación por expansión desde un estado hiperdenso. En efecto, estas galaxias son extraordinariamente amorfas; la distribución estelar en todas sus partes está enteramente limada; su brillo crece rápidamente de los bordes al centro casi según una ley del inverso del cuadrado de la distancia; en la región central hay puntos extraordinariamente brillantes. Supongamos que el universo se expande desde una densidad mucho mayor, por ejemplo, de 10^{-12} gr/cm³, y que al principio de la expansión el gas no estaba enteramente uniformado, sino que dentro de él existían ya algunos grumos o nudos, centros de condensación. Tales grumos pueden restringir la expansión del gas en un grado perfectamente calculable; así, un nudo de masa igual a $10^9 \odot$ puede obligar a una masa de $10^{12} \odot$ a quedar encerrada dentro de las dimensiones de la Vía Láctea; un nudo de masa $10^7 \odot$ puede restringir en la misma forma una masa igual a $5 \times 10^{10} \odot$. Y aquí está el punto crítico de la cuestión: es posible calcular el brillo de las agregaciones de materia que así resultan, suponiendo que se forman estrellas, y el resultado es, sin ninguna ambigüedad, una ley del inverso del cuadrado de la distancia, justamente lo que se observa. Ahora bien, en tanto que este crecimiento del brillo hacia el centro es lo que pide un proceso de expansión, es del todo ininteligible en el caso de una condensación. Para Hoyle es lógico esperar hallar un nudo de esta índole en el centro de cada galaxia elíptica. Y son precisamente estos nudos de condensación los que las transforman en radiogalaxias. Y con la gran ventaja de no estar sujetos a la dificultad que presentaban los núcleos extraordinariamente macizos que algunos, entre otros el mismo Hoyle y Fowler, postulaban en el interior de las galaxias para explicar su transformación en radiogalaxias. Se les objetaba cómo habrían podido formarse. Pues bien, estos nudos, para Hoyle, no se forman; son simplemente vestigios de una fase mucho más densa del Universo, que se han ido consumiendo durante los tiempos de vida de las galaxias; son sistemas dotados de un alto grado de estabilidad; cuando alguna inestabilidad se presenta, una explosión violenta sirve para restablecer su estabilización.

La consecuencia de todo esto es para Hoyle que su teoría del Universo en estado estacionario con creación continua de materia para mantener la densidad constante corre gran peligro de tener que ser descartada. Pero, a su juicio, aunque así fuese, la idea directriz de su teoría continuaría siendo válida. Lo que pretendió al formularla era completar las leyes de la Física, a fin de evitar que contuviesen una singularidad que las afectase a todas. Para esto se esforzó durante años en encontrar un operador matemático que, como se acostumbra en Física, partiese de un principio de acción: el resultado fue poder representar la creación de la materia por la introducción de un nuevo campo, tal como se ha explicado en el núm. 16. Este campo

se puede tratar como todos los otros, con la sola diferencia de que el motivo de estudiarlo no es explicar experimentos u observaciones, sino evitar una singularidad universal. Una vez desarrollada la estructuración matemática del nuevo campo, se vio que se evitaban todas las singularidades, con completa independencia de si se daba o no la creación continua de materia. Luego esto significaba que los modelos con que se evitaban los puntos singulares abarcaban mucho más que los de la teoría del estado estacionario; lo lógico es, por tanto, acudir a ellos. He aquí el más sencillo de todos. Existe el nuevo campo, pero no hay creación de materia. Entonces se puede obtener un Universo finito y oscilante, del tipo de los presentados por las otras teorías; pero difiere de ellos en que el paso de la expansión a la contracción se explica por la gravitación y el de la contracción a la expansión por el nuevo campo. Naturalmente, un modelo así concuerda bien con todos los datos de que se dispone; pero, con todo, es menos simplista de lo que parece, pues contiene en sí los gérmenes del paso de un ciclo al siguiente. Pues cuando su expansión se detenga y retroceda hasta un estado de densidad tan elevada que las estrellas se evaporen, los núcleos de los elementos pesados se desgarran y la materia salga de él con la producción de helio en la relación antes descrita de 0,14 respecto del hidrógeno, lo más seguro es que en tal estado la homogeneidad no sea completa: las galaxias y enjambres preexistentes darán lugar inevitablemente a heterogeneidades, y éstas serán los núcleos de condensación que darán nacimiento a las nuevas galaxias; también los campos magnéticos persistirán de un ciclo a otro. Hoyle se da cuenta de que a toda esta explicación se le puede objetar que el nuevo campo es un *deus ex machina*, inventado precisamente *ad hoc* y, por lo tanto, tan discutible o más que el término cosmológico de Einstein. Además que, a menos de no haber disipación alguna, lo que parece del todo inverosímil, la amplitud de estas oscilaciones del Cosmos irá disminuyendo gradualmente hasta llegarse a un estado estático en reposo. A ello responde que precisamente por esto importa estudiar los modelos con creación de materia, pero advirtiéndole que quizá no hay que tomar como valor de la densidad el actual, sino otro mucho mayor. Al hacerlo, Hoyle y Narlikar han considerado el caso en que se diesen fluctuaciones de homogeneidad de una región a otra; hallaron que en ciertas condiciones la creación de materia puede cesar en una región determinada y que entonces se darán en ella oscilaciones del tipo descrito, que poco a poco se irán amortiguando hasta volver dicha región a la situación anterior; incluso puede ello ocurrir en varias regiones a la vez, separadas unas de otras por regiones en estado estacionario. etc. Más aún, dejando correr todavía más la imaginación, dice que tal vez los grandes números sin dimensiones que relacionan entre sí ciertas constantes naturales y que tanto preocupan, como vimos, a Dirac, Jordan, McCrea y otros, por no citar a Eddington, podrían depender de la peculiaridad de hallarnos en una de estas regiones en un estado de oscilación determinado y que si nos fuese dable pasar de una a otra de estas

regiones podría ocurrir que tales razones fuesen en la segunda diferentes y, por tanto, distintas también las propiedades de la materia, y con ella diferentes las ciencias positivas como la Física y la Química... No hace falta seguir: aunque formuladas por un cosmólogo de la categoría de Hoyle y en revistas tan serias como *Nature*, por ejemplo, tales sugerencias no pueden menos de dar vértigo y aun hacer pensar sin querer en «Alicia en el país de las maravillas».

* * *

Una conclusión parece poderse deducir de todos los tests expuestos. Aunque sin una evidencia apodictica, es muy fuerte el peso de los argumentos e indicios, cada día más y más fuertes, en contra del estado estacionario. En cuanto a los restantes modelos, hoy por hoy no hay manera de discriminar los unos de los otros y no hay más remedio que aguardar a que nuevos adelantos técnicos hagan posible la realización de aquellos tests que, como hemos ido indicando al exponerlos, son susceptibles de llevarnos a una comprobación más segura y consiguiente discriminación.

IV PARTE

IMPLICACIONES TEOLOGICAS DE ALGUNAS TEORIAS COSMOLOGICAS

Antes de dar por terminado este trabajo menester es examinar, como ya anunciamos al principio, algunas posibles implicaciones teológicas de las distintas teorías cosmológicas. No con espíritu apolo-gético y con ánimo de refutar las impugnaciones que, tomándolas como plataforma, han dirigido algunos contra la Fe y la Religión, sino con deseo de contribuir a esclarecer la posición que el científico cristiano y más particularmente el católico puede adoptar con la conciencia tranquila ante las nuevas explicaciones del Cosmos.

Y no es que no nos diese pie para lo primero la actitud de algunos cosmólogos, incluso de primera fila, que, abusando de la autoridad que les confiere ante el público el prestigio de la Ciencia y la casi imposibilidad en que el creyente medio se halla para descubrir la falacia de sus argumentaciones, no sólo han atacado algunos dogmas más o menos relacionados con la Cosmología, por ejemplo el de la creación, sino otros tan alejados de ella como el de la inmortalidad del alma y su suerte en la vida futura; así procedió vgr. Hoyle en sus célebres conferencias por la BBC, que tanta popularidad le dieron, y en su obra *The Nature of the Universe*, en que las resumió y de la que sólo en diez años, de 1950 a 1960, se hicieron 14 ediciones y reimpressiones. Y si se quiere un ejemplo del otro lado del telón de acero, las publicaciones de Meliuchin sobre *la lucha de la Astro-nomía soviética contra el idealismo y la religión*, en *Konsomolskaja Pravda* en septiembre de 1954, también ampliamente difundidas por la radio. De entonces acá podríamos multiplicar los ejemplos.

Pero así y todo no creemos propio de este lugar entrar en este terreno. Hacerlo a fondo nos exigiría un tiempo de que no dispone-mos; y hacerlo superficialmente nos haría caer en el mismo defecto que censuramos en tales astrónomos y podría ser además contrapro-duciente, pues, como hacía notar con razón en 1957 la *Revue des Questions Scientifiques*, a propósito de la anterior polémica suscitada por Hoyle y las refutaciones de sus contendientes, no es pequeño el riesgo de ciertas argumentaciones simplistas que parecen creer dejar

demostrada la realidad de la creación en el sentido cristiano de la palabra mediante la explosión inicial del Cosmos de la teoría del átomo primitivo, o el fin del Mundo apelando a la muerte termodinámica del Universo o a la destrucción de la Tierra por la conversión del Sol en estrella nueva; pues, «una vez hechas estas afirmaciones, —decía— que venga un astrónomo que niegue la posibilidad de tales hipótesis, y cuantos no posean una fuerte cultura religiosa, podrán sentirse tentados a rechazar las doctrinas de la fe, que se les ha enseñado imprudentemente a reducir a meras proposiciones científicas». Lo cual no quiere decir que la exposición apologética no sea útil en si y deba evitarse; nada de eso; pero hay que hacerla de manera rigurosa y consiguientemente encuadrada en un marco filosófico-teológico ajeno a nuestros propósitos.

Nuestro objetivo es mucho más modesto, aunque en cierto sentido pueda parecer a algunos más ambicioso. Los sistemas cosmológicos pueden dividirse en dos grupos: los que admiten un principio absoluto del Universo y los que específicamente lo rechazan. Es evidente que los del primer grupo (por ejemplo, el primero de Milne o el de Lemaitre) son compaginables con el concepto tradicional de creación; en cambio los del segundo (por ejemplo, los del estado estacionario y las teorías del Materialismo dialéctico) o lo rechazan en absoluto o reemplazan la creación inicial por la creación continua de la materia. Las implicaciones que de ello pueden seguirse, unas miran a la existencia misma del Creador y otras a la naturaleza y modo del acto de creación: vgr. a la época de su realización, a la forma en que se realizó o se sigue realizando, etc. ¿Puede libremente el científico cristiano defender en el campo científico puro cualquiera de estas teorías? ¿o tiene que sentirse coartado por su fe y obligado por su conciencia a rechazar una u otra? Es claro que no puede sostener teorías como la del Materialismo Dialéctico que comienza por establecer como primer postulado «la única realidad del Mundo es la materia; para Dios no hay lugar». Pero éste no es el caso de que tratamos. La Cosmología emanada de los principios del Materialismo Dialéctico no es tanto una estructuración matemática o astrofísica, cuanto filosófica; y aquí no tratamos de la adhesión a una teoría filosófica, sino científico-positiva. Las teorías cosmológicas y cosmogónicas de los científicos soviéticos en su parte fisico-matemática igual se pueden exponer prescindiendo de tales postulados que admitiéndolos y en este sentido entran también en nuestra inquisición; pues entonces las dificultades que pueden plantear vienen a coincidir con las emanadas de los otros sistemas; así la infinidad y eternidad de la materia, que es el segundo postulado del Materialismo Dialéctico, no plantea problemas distintos que la eterna e infinidad de la materia exigidas por los sistemas de Hoyle y Gold y Bondi.

El problema que queremos eximinar es el relativo a la actitud respecto de teorías de las que, como consecuencia más o menos espúrea, se deduce la negación del Creador (por ejemplo la de Hoyle) o en las que se afirman cualidades del acto de creación, su realización

ab æterno o su continuación hasta nuestros días, que pueden estar más o menos en pugna con algunas enseñanzas de la Religión.

Y comenzando por la negación de la existencia del Creador, contra lo que parecería a primera vista, no creemos haya especial dificultad en sostener un creyente las teorías de las que tal negación pretenden deducir sus autores; pues lo cierto es que tal consecuencia no fluye de las premisas y es una extrapolación al campo de la Metafísica que nada tiene que ver con las teorías físicas y matemáticas propiamente tales. Tal ocurre con Hoyle, por ejemplo, cuando con sus ideas sobre el campo de creación, análogo al gravitatorio o al eléctrico, etc., cree haber racionalizado de tal manera el concepto de creación que el recurso al Creador quede excluido. Nada menos exacto. El motivo por él mismo admitido que en el caso de un comienzo brusco absoluto del Universo impone la admisión del Creador es el principio de causalidad de que «no puede darse efecto sin causa». En la teoría de la creación continua, como ésta se realiza cuando ya existe materia, Hoyle cree poder explicar dicha creación con su primer postulado del campo creador «en presencia de la materia aparece nueva materia». Pero ¿cómo aparece? ¿es fruto de ciertas interacciones entre los átomos preexistentes o de una conversión en materia de la energía que contienen? Desde el primer momento responden tanto él como Gold y Bondi, etc., que no, sino que esta nueva materia aparece realmente donde antes no había absolutamente nada; de lo contrario no cumpliría su fin de mantener invariable la densidad media del Cosmos, pues no sería algo nuevo que se viniese a añadir a la materia preexistente. Luego, si es así y no se debe a interacciones entre las partes de la misma, son éstas meros espectadores o a lo más condiciones, si se quiere, del suceso, pero éste es una producción tan *ex nihilo* como podría serlo la producción global en un momento inicial, y por tanto exige también un Creador para que no se dé un efecto sin causa. Hemos dicho que la materia preexistente podría ser a lo más condición de la creación de la nueva materia en el caso de existir el campo de creación, porque podría suponerse en la actividad del Creador un decreto análogo al que tiene establecido para la creación del alma humana: así como la creación de ésta tiene lugar siempre y sólo cuando se consuma la unión de un espermatozoide y un óvulo, de la misma manera cabría suponer que creaba un átomo de hidrógeno, vgr. siempre y sólo cuando se cumpliesen determinadas condiciones en la materia preexistente.

La pretensión de Hoyle de haber eliminado al Creador por haber formulado la teoría del campo de creación, que él llama el *nuevo campo*, es confundir la causa de un fenómeno con la intelección del modo de producirse. Su pretensión, enunciada por Bondi en el capítulo XII de su *Cosmology*, es bien clara: «De ahora en adelante la Cosmología nueva hace del concepto de creación un concepto físico; permite estudiarlo por métodos físicos, en tanto que hasta ahora las otras Cosmologías se contentaban con enviar a la Metafísica toda cuestión que pudiese formularse sobre este punto». La confusión no

puede ser más palmaria. Aunque pueda describir por medio de ecuaciones según qué leyes se realiza la creación y pueda llegar a predecirla (todo lo cual, no obstante, no pasa de simples hipótesis y no está en modo alguno demostrado), no puede dar la explicación de por qué, cuando tales y tales condiciones se verifican, la creación se produce; y si alguien insistiese en preguntas de esta índole, no le quedaría a Hoyle más recurso que remitirlo a la Metafísica exactamente igual que los demás cosmólogos. Además la negación del Creador exigiría un campo de naturaleza completamente distinta de la de los demás campos, vgr. el gravitatorio o el eléctrico: todos ellos son maneras de explicar las acciones y reacciones que se ejercen entre entidades preexistentes y, mientras no existan por lo menos cuerpos de prueba en que se manifiestan sus efectos, un campo no pasa de ser una potencia o una capacidad de acción. En todo campo hay interacción entre sus distintas partes o por lo menos acción de unas sobre otras. En este campo de creación sin Creador no ocurriría esto; supuesto que la presencia de la materia preexistente no es causa de la creación de la nueva, sino a lo más condición *sine qua non* o incluso exigencia, la acción creadora que se termina en la materia nuevamente creada no se sabe de qué provendría; no de una virtualidad oculta de la Naturaleza todavía no descubierta, como vimos insinuaba, aunque tímidamente, Abdus Salam, porque ésta tendría que radicar en alguno de los seres preexistentes y entonces la nueva materia ya no provendría de la nada, sino de alguna actualización de la energía preexistente en el Cosmos, contra lo que en la teoría se establece; luego el nuevo campo tendría necesariamente que suponer una interacción entre la materia recién creada y la nada, que carece por completo de sentido. Puede, pues, decirse que el campo de creación, si existe, lejos de excluir al Creador, refuerza su existencia, pues en vez de un acto de creación pone innumerables, cada uno de los cuales no puede menos de exigir un Creador tanto como el acto único inicial que pretende substituir. De lo contrario, como con razón escribía ya en 1950 Dingle, Profesor de Historia y Filosofía de las Ciencias en la Universidad de Londres y Presidente de la Royal Astronomical Society, enjuiciando precisamente la teoría de Hoyle: «La hipótesis de la creación continua de materia nos exime, es verdad, de postular un único milagro inicial, pero a condición de que admitamos una serie continua de ellos... Sea cual sea la hipótesis sobre la creación continua que escojamos, el proceso mismo... no puede ser considerado sino como un puro milagro... La aparición pura y simple de la materia se supone sin más... Los antiguos alquimistas buscaban cómo transformar el plomo en oro mediante la piedra filosofal, Hoyle, al suponer la creación de la materia en esta forma, se olvida ante su piedra filosofal incluso del plomo...»

Visto, pues, que la creación continua de la materia, si se admite, no puede eliminar en modo alguno, aunque afirmen lo contrario algunos de sus autores, la necesidad del Creador, antes la refuerza, pasemos a examinar las posibles implicaciones que puedan derivarse

de la afirmación de que el Universo permanece perpetuamente igual a sí mismo y que por lo tanto ha existido siempre, lo que equivale a afirmar que, aunque creado, es eterno, y asimismo de sostener que la creación no ha tenido lugar de un golpe, sino que se sigue produciendo sin cesar. Respecto de esto último, bueno es advertir, aunque no sea sino a título de curiosidad, que la creación continua de materia exigida por la teoría, a primera vista insignificante, cosa de un átomo de hidrógeno por decímetro cúbico cada medio billón de años, es en realidad una cantidad enorme; pues dado el volumen atribuido al Cosmos, pasa nada menos que de 100 quillones de toneladas por segundo (en gramos 1 seguido de 38 ceros): la masa de un Universo de Einstein, a este ritmo, quedaría duplicada en 30.000 millones de años. Pero, como decía, es esto una mera curiosidad; el problema es el mismo tanto si se trata de esta masa enorme para nosotros como de unos pocos átomos o partículas subatómicas. Ahora bien por esta parte no se ve conflicto alguno con el dogma; pues, como ya hemos dicho, es doctrina común de los teólogos que cada alma humana es creada inmediatamente por Dios cada vez que se consuma la fecundación de un óvulo femenino por un espermatozoide masculino y por tanto no se ve qué dificultad podría haber en que Dios crease nueva materia cada vez que se realizasen ciertas condiciones. Antiguamente se quiso demostrar lo contrario acudiendo a textos de la Escritura como el del 2.º capítulo del Génesis «...y el día séptimo descansó (Dios) de toda la obra que había realizado» o el del *Eclesiástico* (XVIII, 1) «El que vive eternamente lo creó todo a la vez», *simul*. Pero ya el Papa San Anastasio II en su epístola *Bonum atque iucundum* a los Obispos de las Galias de 23 de agosto de 498 refutó a los que en virtud de estos textos se creían obligados a afirmar que las almas debían preexistir de algún modo antes de la concepción de cada individuo y en particular por lo que toca a la palabra *simul* explica Santo Tomás que no se refiere precisamente a simultaneidad en el tiempo, sino a unidad en el plan divino de la creación.

Muy otra es la dificultad de la creación del Mundo *ab æterno* y menester es detenernos en su consideración. En Teología se distingue ante todo entre su posibilidad y el que de hecho así se haya realizado. Por lo que toca a la primera es célebre su discusión en todas las fases de la Escolástica, tanto medieval como renacentista y del neoescolasticismo. Y tanto en pro de una opinión como de la contraria se pueden citar nombres tan esclarecidos como los de San Alberto Magno, San Buenaventura, Toledo, Valencia, Petavio y de los neoescolásticos Tongiorgi y Palmiéri entre los que niegan su posibilidad y Santo Tomás, Cayetano, Duns Scoto, Suárez, Vázquez, Molina, Liberatore y Urráburu entre los que la afirman o aseguran que por lo menos no repugna. Hacen con todo éstos últimos una doble advertencia. En primer lugar que la eternidad de que hablan no es la propia de Dios, la eternidad estrictamente entendida que excluye todo concepto de sucesión, en la que no puede haber *antes ni después*, anterior o posterior, sino que, como dice Boecio, es *intermina-*

bilis vitae tota simul ac perfecta possessio, posesión íntegra simultánea y perfecta de una existencia sin términos; eternidad, hablando del Mundo, la entienden de una duración sucesiva sin límites, una duración por tanto de carácter temporal, pero perpetua, de modo que el Cosmos haya existido siempre. Y luego suelen advertir que limitan dicha posibilidad a los seres inanimados, en contraposición de los seres vivos que por su naturaleza exigen evolución y sucesión.

Y la razón que aducen en pro de su opinión afirmativa es que para la creación *ab æterno* de los primeros no se da repugnancia ni de parte de Dios, poder infinito, ni de parte de la acción creativa, que no dice sucesión alguna, ni de parte del término que, dado que era posible desde toda la eternidad, desde toda la eternidad pudo haber sido creado, y no exigiendo por su naturaleza evolución ni sucesión, ni siquiera por este aspecto tropezaría con la repugnancia tal vez entrañada en la existencia de un número actualmente infinito, como tendría que existir de haber sido creados desde toda la eternidad los seres vivos que tal evolución y sucesión exigen.

Ahora bien, como para muchas teorías cosmológicas y en particular las que postulan la perpetuidad del Mundo, el Universo, aun en su parte material, consta de seres, estrellas, galaxias, enjambres, que continuamente se forman, evolucionan y se disgregan, parece que *a priori* debería quedar excluida la posibilidad de su creación *ab æterno*; y no menos por el hecho de poderse señalar en él instantes respecto de los cuales hay ciertamente *antes* y *después*; es decir, sucesión, pues ello lleva a la necesidad de admitir la existencia de una multitud de estados sucesivos actualmente infinita. Respecto de lo primero no se les ofreció esta dificultad a los escolásticos porque para ellos el Mundo era algo permanente e incorruptible, como las esferas celestes, y además se referían explícitamente a la materia inanimada que ellos creían podía permanecer siempre en la misma forma. Hoy día quizás admitirían poderse aplicar el concepto al conjunto del Universo como un todo, pues, aunque sus partes individuales evolucionen, supuesta la hipótesis del estado estacionario de que el Mundo se presenta siempre igual a cualquier observador desde cualquier punto y en cualquier momento que lo observe, se le puede llamar en cierto modo permanente e inmutable y admitir que en su totalidad no tiene en su duración ni *antes* ni *después*; podrá tenerlos respecto de un observador que lo refiera a sí, como también *mutatis mutandis*, se puede decir que en la vida de Dios hay *antes* y *después* respecto de mí, dado que, por ejemplo, puedo decir «Dios existía antes de mi nacimiento» y «existirá después de mi muerte»; pero en sí mismo considerado, estos adverbios carecen de sentido, como de él carecen en la vida intrínseca de Dios.

En cuanto a lo segundo ya se sabe que Santo Tomás no se llegó a formar opinión firme sobre la posibilidad o imposibilidad de la multitud actualmente infinita y por esto, por esta parte, no vio dificultad en la posibilidad de la eternidad del mundo, con tal que dicha eternidad no fuese la propia de Dios, sino una participación de la misma

en sentido lato, una duración sin principio ni fin, pero en la que se podría dar y de hecho se daría la sucesión; así vgr. en la cuestión XLVI de la 1.ª parte de la Suma Teológica, artículo II, contestando a la 5.ª dificultad dice que «aunque el Mundo hubiese existido siempre, sin embargo no sería igual a Dios en la eternidad, como dice Boecio, porque el Ser divino es ser todo a la vez y sin sucesión; y no ocurre así con el Mundo».

Una vez, pues, asentado que en el orden de la posibilidad no chocaría con las enseñanzas de la Teología el cosmólogo que defendiese la perpetuidad del Universo, el punto que conviene dilucidar es si hay algo en la Fe católica que se oponga a la afirmación, no ya de que el Universo podría haber sido creado desde toda la eternidad, sino de que efectivamente ha sido así, tal como lo tienen que propugnar teorías como las del estado estacionario o los universos pulsantes. A esto se suele responder que efectivamente así es y que es doctrina católica y aun de fe definida que el mundo fue creado en el tiempo y no es por tanto eterno ni siquiera en el sentido de perpetuo. Dice en efecto la constitución dogmática «*de Fide Catholica*» aprobada en la sesión III del Concilio Vaticano I en su capítulo 1.º: «Este solo verdadero Dios por su bondad y poder omnipotente, no para aumentar su felicidad ni para adquirir alguna perfección, sino para manifestar la que posee mediante los bienes que da a las criaturas, con libérrima determinación «*simul ab initio temporis utramque de nihilo condidit creaturam, spiritualem et corporalem, angelicam videlicet et mundanam ac deinde humanam quasi communem ex spiritu et corpore constitutam*», es decir, «simultáneamente desde el principio del tiempo creó de la nada una y otra criatura, la espiritual y la corporal, es decir, la angélica y la mundana, y luego la humana como constituida por algo común de espíritu y materia». Y estas palabras están tomadas a la letra del capítulo I de la profesión de fe católica definida en 1215 en el Concilio Lateranense IV, duodécimo de los ecuménicos, contra los errores de los Albigenses y herejes afines.

Recorriendo los tratados de Teología (véase por ejemplo el del P. Sagüés, en el vol. 90 de la B.A.C., uno de los más completos y modernos), se ve que los Doctores católicos han interpretado casi unánimemente las palabras que anteceden como una definición y así no han vacilado en atribuir en los manuales a la tesis que afirma que el Mundo no es eterno la censura de *fide definitiva*. Y en el mismo sentido se expresan teólogos que eran a la vez científicos, como el P. Stein, Director de la Specola Vaticana, y el P. Puigrefagut, antiguo Astrónomo de la misma Specola y del Observatorio del Ebro. Dice el primero en su artículo *Creazione senza Creatore?* publicado en 1951 en la «*Civiltà Cattolica*»: «Si se pregunta si se puede admitir una creación continua entendida en el sentido genuino y ortodoxo de la palabra, es preciso responder que no, ya que para ser verdaderamente continua debería ser también *ab æterno*. Y esto para un católico está sin más excluido. Prescindiendo de razones contrarias de índole científica y filosófica, la creación de hecho *ab æterno* contradice

la fe. Según el Concilio Lateranense IV las palabras del Génesis: «En el principio creó Dios el cielo y la tierra» se han de entender en el sentido de que el mundo ha sido creado *ab initio temporis*, proposición que fue confirmada en el Concilio Vaticano I y también aducida en la encíclica *Humani Generis*. Naturalmente un científico católico es libre de retener con Santo Tomás que no se puede probar la imposibilidad de una creación *ab æterno* con sola la razón, con tal que con el mismo Santo Doctor admita como artículo de fe que la creación ha tenido lugar en el tiempo». Y el P. Puigrefagut en su eruditísimo trabajo sobre *La Ciencia Moderna y el Problema de la creación* (*Pensamiento* 1954), al hablar de la realización de la creación en el tiempo afirma que «ha existido siempre unanimidad respecto del hecho, contenido en las fuentes de la revelación y definido como dogma de fe —según el común sentir de los teólogos— en los Concilios Lateranense IV y Vaticano». En fin, por no prolongar las citas, en su admirable discurso a la Pontificia Academia de Ciencias sobre *Las pruebas de la existencia de Dios a la luz de la ciencia natural moderna* se expresaba así el gran Pontífice Pío XII al inaugurar el curso de 1951 a 1952: «Es verdad que de la creación en el tiempo no son argumentos decisivos los hechos hasta aquí mencionados, como lo son, por el contrario, los tomados de la Metafísica y la Revelación en cuanto a la simple creación, y de la Revelación sola si se trata de la creación en el tiempo»; y antes había escrito en 1950 en la encíclica *Humani Generis*: «Se niega que el mundo haya tenido principio y se pretende que su creación es necesaria... lo cual ciertamente se opone a las declaraciones del Concilio Vaticano».

Puede, pues, parecer que la cuestión se debe dar por definitivamente juzgada y el cosmólogo católico tiene que atenerse a este modo de ver; lo cual por lo demás no le habrá de parecer difícil, si considera la tendencia de los resultados de la casi totalidad de los tests propuestos y la espectacular *voltafaccia* del mismo Hoyle a la que antes hemos hecho referencia. Y ni que decir tiene que por nuestra parte a este modo de ver nos atenemos.

Pero aunque que así sea, no podemos dejar de pensar en el caso hipotético de un investigador creyente que estuviese convencido de la fuerza de las razones en pro de los universos expansivos en estado estacionario o bien sometidos a alternativas perpetuas de expansión y contracción. ¿No habrá manera de salvar su libertad científica y coonestar el que *tuta conscientia*, con conciencia tranquila, pueda sostener tales teorías? Es lo que vamos a tratar de aclarar en lo que sigue y a ello nos sentimos impelidos, no sólo por honorabilidad científica, sino por la misma actitud de la Iglesia en estos últimos tiempos, en que claramente se ha visto, no sólo en las manifestaciones conciliares, sino también en los discursos de los Sumos Pontífices, su tendencia a buscar no tanto lo que puede separar cuanto lo que puede unir. Lejos de nuestro ánimo censurar con ello la posición de cuantos han resuelto este problema diversamente; las circunstancias eran otras e imponían una actitud defensiva y de extrema cautela que hoy día

no parece tan oportuna; las circunstancias, repetimos, han cambiado y nuevos elementos de juicio han irrumpido en el campo de nuestros conocimientos y por ello no es injustificado que se pueda hoy desear se analicen de nuevo con todo cuidado expresiones que antes, por no haber sido menester prestar atención a estas nuevas posibilidades, pareció se podía tomar sin peligro en su sentido vulgar e inmediato. Por lo demás el mismo Concilio Vaticano II parece invitarnos a ello cuando termina con estas palabras el capítulo dedicado al sano fomento del progreso cultural en la Constitución sobre la Iglesia en el mundo actual: «Para que puedan llevar a buen término su tarea debe reconocerse a los fieles, clérigos o laicos, la debida libertad de investigación, de pensamiento y de hacer conocer, humilde y valerosamente, su manera de ver en el campo de su competencia».

Hemos dicho anteriormente que la interpretación dada de las palabras del Concilio Vaticano I por parte de los autores católicos era casi unánime, porque de hecho no había faltado la excepción. Y así, hace más de veinte años, cuando todavía no se pensaba en universos estacionarios, un teólogo de tanta autoridad y ortodoxia tan indudable como el P. Sertillanges, se expresaba como sigue en su obra *L'idée de création et ses réentissements en Philosophie*, publicada en París en 1945: «Si la posición que Santo Tomás dice que puede sostenerse en Filosofía fuese mencionada en nuestros documentos religiosos y excluida, no cabría duda alguna. Mientras esto no tenga lugar, vacilo y por lo que a mí hace no condenaría al físico que dijese: No hay límite en la regresión del curso de los fenómenos, ya que todo fenómeno se explica por otro antecedente del cual procede». Según Sertillanges, Teilhard de Chardin, entre otros, era también de esta opinión; y yo personalmente he pensado a veces si con ella no simpatizaría en el fondo el antes mencionado P. Puigrefagut, ya que el citarla en su trabajo se contenta con decir de ella que «suena a novedad y aun a audacia», pero sin censurarla más fuertemente, cosa digna de ser tenida en cuenta por tratarse de un hombre precavidísimo y que pesaba mucho sus expresiones, como bien saben cuantos le conocieron y fueron sus discípulos o compañeros.

Además tampoco hay que olvidar la opinión tan clara de San Agustín de que la Sagrada Escritura en ninguna parte pretende enseñarnos las ciencias positivas. Así en el cap. 9 del libro II de su obra *De Genesi ad litteram* dice textualmente: «Se suele preguntar cuál es la forma y la figura del cielo que hay que creer según nuestras Escrituras... Brevemente diré que... el Espíritu Santo que habla por ellos (los autores inspirados) no quiso enseñar a los hombres estas cosas que no son provechosas para su salvación»; y más gráficamente en su tratado contra los Maniqueos, cap. 23: «No se lee en el Evangelio que dijese el Señor: Os envío el Espíritu Santo para que os enseñe el curso del Sol y de la Luna. Porque quería hacer cristianos, no matemáticos». Que éste sea también el sentir de Santo Tomás es sobradamente conocido, y otro tanto podría decirse de los grandes autores eclesiásticos. Por no multiplicar las citas, baste por todos

Baronio, tan conocedor de la tradición eclesiástica medieval, cuando donosamente escribe: «Dios no nos ha querido enseñar cómo va el cielo, sino cómo se va al cielo» y por su autoridad máxima León XIII que en su encíclica *Providentissimus Deus*, la carta magna de la primera modernización de los estudios bíblicos, fundamenta la interpretación de los fenómenos naturales de que en la Biblia se habla en la frase de San Agustín que acabamos de citar en primer lugar.

Ahora bien, si es el común sentir que en la Sagrada Escritura no ha pretendido el Espíritu Santo revelarnos verdades físicas, parece lógico que tampoco se lo habrá propuesto en las definiciones conciliares, máxime constando que no se contiene en ellas ninguna nueva revelación, sino sólo explicitación de las verdades contenidas ya por lo menos implícitamente en las fuentes de la Revelación, la Tradición y la Escritura. Y esto supuesto, no deja de llamar la atención que en los textos que hemos aducido de los Concilios Lateranense IV y Vaticano I se contenga esta revelación precisa de un hecho puramente físico. Ciertamente que algunos opinan que mediante la creación en el tiempo se patentiza mejor que mediante una creación *ab æterno* la total dependencia del Mundo respecto de Dios y de esta manera se justificaría la definición de un hecho de esta índole que, además de físico, resultaría de este modo religioso; pero a ello opondría Sertillanges que la idea de creación no pone una cuestión de prioridad en la duración, sino una cuestión de dependencia total de todo cuanto existe respecto de la Causa Primera y que por lo tanto que la creación se haya hecho en el tiempo o *ab æterno* no añade nada a tal dependencia.

En vista, pues, de todo ello, creemos no estará injustificado un examen más detenido de los textos conciliares para ver si el inciso *desde el principio del tiempo* pertenece realmente a lo que en ellos se quiere definir o no pasa de ser «una de las razones invocadas o ideas consignadas accesoriamente en el texto, que —como dice H. Pinaud en su magnífico estudio sobre la Creación del *Dictionnaire de Théologie Catholique* (vol. 3, columna 2184)— no tienen ni unas ni otras, a diferencia de todo lo que es palabra formal de la Iglesia, la garantía de la infalibilidad: *inserta, non asserta*». Pues es claro que si la temporalidad del mundo está realmente definida, las teorías contrarias no pueden ser verdaderas y el cosmólogo católico las debe rechazar sin más, seguro de acertar al hacerlo, dado que sabemos por el mismo Concilio Vaticano I que no puede haber contradicción entre la Ciencia y la Fe, es decir, entre los resultados ciertos de la Ciencia y los dogmas ciertamente de fe, porque al provenir ambos órdenes de conocimientos de una misma fuente, la Verdad infinita de Dios, no pueden ser entre sí contrarios. Pero también es claro que, si el hecho de la perpetuidad del Cosmos se llegase a demostrar físicamente con certeza, no podría estar en modo alguno definido lo contrario por el mismo motivo y no habría duda alguna de que el inciso *ab initio temporis* contenido en las definiciones de los dos Concilios no forma parte de lo propiamente definido en ellos y no podría menos de perjudicar a la fe en el ánimo de muchos deficientemente instruidos

en Religión haberse empeñado en seguir dando como dogma de fe sin ulterior consideración, una vez suscitado ya el problema, lo que luego se tuviese que reconocer que no lo era. Como dijo con razón en el Concilio el Cardenal Suenens, a la Iglesia le basta con un caso de Galileo.

Por lo que toca al Concilio Vaticano I a nuestro modesto juicio hay serios indicios de que es por lo menos dudoso que tal inciso forme parte de la definición. Se encuentra en el capítulo I de la Constitución Dogmática *De fide catholica* aprobada en la sesión III. Dicho capítulo trata *De Deo rerum omnium creatore* y consta de tres párrafos en que se contiene la doctrina de la Iglesia y a ellos responden cinco cánones en que se condenan los errores opuestos. Que éstos sean definiciones en el sentido riguroso de la palabra, no ofrece duda alguna. En cuanto a los capítulos es sentencia generalmente admitida que contienen también verdaderas definiciones ya que comienzan con expresiones tales como «*Sancta Catholica Apostolica Romana Ecclesia credit et confitetur...*», «*eadem Sancta Mater Ecclesia tenet et docet...*» y otras análogas, a lo que se puede añadir que, habiendo pedido uno de los Padres en la Congregación XLV que se agregase al preámbulo una refutación explícita de los que afirmaban que sólo se debía considerar como definido en los capítulos lo que tiene su correspondencia en los cánones, se opuso a ello el Relator como inútil, por considerar ya suficientemente claro que entre unos y otros no había sino una diferencia de matiz, positivo en los capítulos y negativo en los cánones, «*prima (doctrina) edicit quid sit de fide tenendum, altera vero quid sit de fide vitandum et damnandum*» (Acta, p. 234). Esto no obstante tiene su interés advertir las diferencias que entre capítulos y cánones pueda haber, pues, como dice Pinard, dado que se corresponden como las dos caras de una misma cuestión, tesis y antítesis, conviene compararlos para que se aclaren y completen. Y en particular quizás puedan servir para distinguir las frases que llama Pinard *inserta, non asserta* de las definidas propiamente en los capítulos.

Esto supuesto, la primera duda se nos ofrece al comparar el texto del párrafo 2.º del capítulo I, en que se contiene la cuestión del origen temporal del mundo, con el canon 5.º que le corresponde. Son los números 1783 y 1805 del universalmente conocido en todas las escuelas teológicas *Enchiridion Symbolorum* de Denzinger-Bannwart y helos aquí en su texto original a doble columna:

1783 *Hic solus Deus bonitate sua et omnipotenti virtute non ad augendam suam beatitudinem, nec ad adquirendam, sed ad manifestandam perfectionem suam per bona, quae creaturis impertitur, liberrimo consilio «simul ab initio temporis utramque de nihilo condidit*

1805 *Si quis non confiteatur mundum resque omnes quae in eo continentur et spirituales et materiales, secundum totam suam substantiam a Deo ex nihilo esse productas aut Deum dixerit non voluntate ab omni necessitate libera, sed tam necessario creasse*

creaturam, spiritualem et corporalem, angelicam videlicet et mundanam, ac deinde humanam quasi communem ex spiritu et corpore constitutam». *quam necessario amat seipsum, aut mundum ad Dei gloriam conditum esse negaverit, anathema sit.*

Como se ve, en el canon se van reasumiendo una tras otra todas las afirmaciones contenidas en el párrafo correspondiente del capítulo; la única idea casi a la que no se hace alusión en el canon es el inciso *simul ab initio temporis*. Luego parece que hay motivo para sospechar que no se pretendió incluirlo en la definición y que la razón de haberlo puesto en el capítulo es por haber querido citar a la letra el texto entre comillas del Concilio Lateranense IV. El antes citado Pinard, en el *Dictionnaire de la Foi Catholique*, no opina ciertamente así. Dice textualmente: «El principio temporal del mundo está definido por las palabras *ab initio temporis*. Es la cuestión de hecho, afirmada contra el materialismo y el panteísmo (Actas, pág. 520, nota 5); la cuestión real de la posibilidad de una creación *ab aeterno* y la cuestión lógica de la posibilidad de resolver este problema por la razón sola continúan siendo problemas libres». Debemos, por tanto, acudir a esta nota 5 que cita. Trata de las aclaraciones propuestas por la misma Comisión de teólogos que lo había preparado al primer esquema de la Constitución Dogmática, que entonces estaba concebido en otro orden lógico, casi inverso del aprobado en la redacción definitiva. Dice la nota 5: «Después de haber expuesto suficientemente el error, se le de la constitución dogmática, que entonces estaba concebido en otro opone la verdad que se ha de profesar, y en primer lugar acerca de Dios Creador de todas las cosas según se contiene en el símbolo del Concilio Lateranense IV; sólo que se añaden las palabras *liberrimo consilio*, para que así como la *creatio de nihilo* y hecha *ab initio temporis* se opone directamente a la evolución o a la emanación eterna afirmada por los panteístas, así la *libertad* de la creación se oponga a la necesidad que ellos propugnan». Ciertamente, por esta nota se ve que las palabras *ab initio temporis* no son un simple inciso para citar la frase completa del Lateranense IV, sino que están deliberadamente aducidas para refutar la evolución y emanación eternas propugnadas por los panteístas. Pero esta nota representa el modo de pensar de los teólogos de la Comisión preparatoria; la cuestión es saber si este modo de pensar fue recogido por los Padres conciliares y pasó a la definición.

De suyo, lo natural es que así sea y es lógico suponerlo a menos que haya razones de peso en contra. ¿Las hay en este caso? En la presentación del esquema a la Congregación General hecha por el Relator de la Comisión, que fue el Arzobispo de Estrigonia y Primado de Hungría, todo el esfuerzo se dirige a que quede bien claro mediante la verdadera noción de creación que el Universo, tanto tomado en conjunto como en cada uno de los seres que lo componen, no forma parte de la Esencia Divina, lo que se patentiza afirmando que todas

las cosas, tanto espirituales como materiales, fueron creadas de la nada por Dios; y asimismo a refutar a los que calumniaban a la Iglesia asegurando que al decir que el fin de la creación era la gloria de Dios lo entendía en el sentido de que Dios había creado el Mundo para su propia utilidad y satisfacción y no precisamente por bondad y en bien de las criaturas. A lo de la creación en el tiempo no hace referencia alguna; a lo más, pues, se podría decir que la sobrentiende, ya que para mejor afirmar la trascendencia de Dios sobre el Mundo puede ser un argumento *a fortiori*.

De las enmiendas propuestas por los Padres a esta primera presentación del esquema, sólo la 27 roza nuestro asunto. Dice así: «Como conclusión de este capítulo se propone la adición siguiente: «Por lo cual, mientras declaramos no sólo impia, sino también enteramente contraria a la recta razón la doctrina de aquéllos que, o bien niegan enteramente la existencia de Dios, o bien de una manera u otra confunden o asocian a Dios con la totalidad de las cosas, o bien corrompen la noción de creación verdadera y enteramente libre de todas las cosas realizada por Dios Eterno en el tiempo, advertimos y exhortamos con entrañas de caridad a todos los que no quieran precipitar sus almas en la condenación eterna, que no se dejen seducir por estos monstruos de opiniones mortíferas y que eviten también con todo cuidado aquellos sistemas filosóficos larvados, en que estos errores tan funestos de algún modo se insinúan». Pues bien, el Relator encargado de la respuesta a las enmiendas, Rđmo. Dr. Vicente Gasser, Obispo de Brixen, de ninguna manera recogió la idea de la creación en el tiempo como cosa digna de consideración especial. Exponiendo la forma en que una vez tomadas en consideración las enmiendas había quedado redactada la Constitución, casi igual a la aprobada definitivamente, se expresa en esta forma: «Y venimos ya al párrafo segundo del primer capítulo. Trata de la creación y por cierto bajo un doble aspecto: primero del acto de creación y luego de su efecto. Del acto de creación tiene estas palabras (las del núm. 1783 del Denzinger-Bannwart antes citadas). Por lo que toca a la primera parte, de nuevo consta de dos partes subordinadas, a saber, en primer lugar se aduce la doctrina católica del acto de creación como es en sí misma; luego en oposición a los errores de nuestro tiempo. A la primera parte pertenecen las palabras «*Hic solus Deus bonitate sua et omnipotenti virtute, non ad augendam suam beatitudinem, nec ad acquirendam, sed ad manifestandam perfectionem suam per bona quae creaturis impertitur*». A la posterior, es decir, a la opuesta a los errores de nuestro tiempo, que casi todos se derivan del panteísmo o de algún sistema afín al mismo, pertenecen las últimas palabras de esta primera parte, a saber, «*liberrimo consilio*» y «*ex nihilo simul ab initio temporis*». De nuevo por lo que toca a la primera parte, es decir, a la doctrina misma tal cual es en sí, se expone primero el motivo de la creación «*bonitate*»; luego su causa eficiente «*omnipotenti virtute*»; y finalmente el fin de la creación «*non ad augendam... impertitur*». Por lo que hace a la segunda parte de este primer inciso, esto es en cuanto la doctrina sana de la creación se

opone a los errores de nuestro tiempo, no hay nada que añadir: contra estos errores militan sobre todo las palabras «*liberrimo consilio*» y «*ex nihilo*». Finalmente por lo que mira a la segunda parte de este párrafo, trata como ya he dicho del efecto de la creación y este efecto consta en las criaturas creadas, a saber, en las criaturas espirituales y corporales, esto es, en la criatura angélica y en la mundana y en la humana como común constituida de espíritu y cuerpo. Esta es, reverendísimos Padres, la serie de las sentencias intimamente conexas entre sí». Como se ve, en la frase principal relativa a nuestro asunto «contra estos errores militan sobre todo las palabras *liberrimo consilio* y *ex nihilo*» no hace alusión alguna a la cuestión de la creación en el tiempo.

Y lo mismo parece seguirse del comentario directo a la enmienda: «El autor propone añadir al fin de este capítulo cierta detestación de los impíos errores de nuestro tiempo acerca de Dios y su obra la creación. Quizá lo mejor sería someterla a votación cuando la Congregación General haya decidido lo que convenga respecto de los cánones que van con este capítulo. Pues si no se aceptasen en alguna forma, entonces habría lugar a esta detestación y condenación de dichos errores. Ruego, pues, que se vote al fin de todo. Entonces en efecto o bien se verá que es superflua o bien, si los cánones no hubiesen sido aceptados, se verá que es enteramente necesaria». Ahora bien, como una vez votados los cánones, no obstante no hacerse en ellos referencia alguna a la creación en el tiempo, no se juzgó necesario añadir nada, parece que hay motivo para opinar que el Concilio no se preocupó ex profeso de definir la creación en el tiempo. Los teólogos de la Comisión preparatoria pudieron tener ciertamente la intención de incluir el comienzo temporal del Mundo en la definición; pero, como se ve, hay motivos para dudar de que los Padres conciliares acogiesen la idea. Y lo confirma el que una detallada propuesta preliminar de 38 Obispos de la Archidiócesis de Nápoles en la que se proponía una definición más explícita fue también pasada por alto. Y por lo demás el mismo Pio XII en las palabras que hemos reproducido de la encíclica *Humani Generis* deja también sospechar que no se trata de una definición ya que al referirse en la conclusión «*quae quidem Vaticani Concilii declarationibus adversantur*» a los distintos incisos «*Negatur mundum initium habuisse atque contenditur creationem mundi necessariam esse, etc.*» no emplea para todos ellos en común la palabra «*definitionibus*», sino «*declarationibus*», con lo que parece indicar que, aunque entre tales incisos hay verdades definidas, por ejemplo que Dios no creó el mundo por necesidad, las hay también que no lo están o por lo menos no es claro que lo estén.

El motivo de haberse incluido el inciso *ab initio temporis* en el capítulo es, pues, probable que fuese el deseo de no truncar la cita del Lateranense IV; por esto debemos ahora examinar cuál es su valor en el texto de este último.

En éste no hay distinción entre capítulos y cánones; el texto es único; y por tanto el sentido de cada frase debemos deducirlo de los

errores que se quería condenar y de su comparación con las que preceden y siguen. He aquí, pues, el texto completo del cap. I, *de fide catholica*, en que se contiene la definición contra los albigenses y otros herejes afines, como los gnósticos y los maniqueos, que sostenían que las substancias malas fueron creadas por un Principio Malo éstos últimos, y los primeros que del Primer Principio proceden muchos Eones que permanecen todavía en cierto modo en la plenitud del Ser divino, pero van distando tanto más de El cuanto menores y más imperfectos son; el último de todos ellos pudo ya pecar y quedó excluido del Mundo divino, tras lo cual creó el mundo material y el hombre, ambos seres imperfectos; resultando por tanto que los seres invisibles proceden por emanación del Primer Principio y los visibles son sólo obra de un Eón inferior y prevaricador. Es bueno tener esto presente para entender la fuerza de la definición: «Creemos firmemente y confesamos con sencillez que uno solo es el verdadero Dios, eterno, inmenso e inmutable, incomprendible, omnipotente e inefable, Padre, Hijo y Espíritu Santo: tres personas ciertamente, pero una sola esencia, substancia o naturaleza enteramente simple: el Padre no procede de ninguno, el Hijo sólo del Padre y el Espíritu Santo de ambos igualmente; sin principio, siempre y sin fin: el Padre engendrador, el Hijo nacido y el Espíritu Santo procedente; consubstanciales y coiguales, igualmente omnipotentes y eternos: un solo principio de todo, creador de todas las cosas visibles e invisibles, espirituales y corporales: que con su poder omnipotente creó a la vez de la nada desde el principio del tiempo ambas criaturas, la espiritual y la corporal, a saber, la angélica y la humana y luego la humana como común a las dos, compuesta de espíritu y cuerpo. El diablo en efecto y los otros demonios fueron creados ciertamente por Dios buenos por naturaleza, pero luego ellos por sí mismos se hicieron malos. El hombre empero pecó por sugestión del diablo, etc.». Como se ve, el fin de la definición es dejar bien claro que todos los seres fueron creados directamente por Dios y no unos por Dios y otros por aquellos Eones o por un Principio Malo, como pretendían los herejes mencionados; y entonces la expresión *simul ab initio temporis utramque de nihilo condidit creaturam* no es más que el modo de expresar esta *directa dependencia de Dios* como Creador de todos los seres, sin que se pretenda precisamente con ella definir que el tiempo tuvo principio. A lo más se da esto por supuesto, pero lo que se da por supuesto no es claro que sea objeto de la definición que nuevamente se formula.

Cierto que la interpretación de muchos después del Concilio de Letrán fue otra e incluso se sostuvo que el adverbio *simul* expresaba que las criaturas espirituales y corporales habían sido creadas al mismo tiempo, llegando Silvestre de Ferrara a decir que era esto de fe y afirmando Suárez que era por lo menos temerario discutirlo, aunque reprende a Silvestre de Ferrara por llamarlo de fe. Con todo el *Dictionnaire de la foi catholique* opina que no es indispensable interpretar «*simul*» en esta forma. Advirtiendo que lo que el Concilio tenía ante los ojos era el antiguo error de los origenistas de que la

materia fue creada después del pecado de los espíritus para servir de instrumento a su castigo y pruebas, dice que esto se refuta suficientemente con tal que *simul* signifique *semejantemente*, con un mismo designio y según un plan único, sin que sea necesario traducirlo por *al mismo tiempo*. Además el Concilio se ocupaba de los albigenses para los que era el demonio el creador de la materia y el cuerpo, ambos malos en sí. Era, pues, necesario afirmar que tanto la materia como el espíritu tenían un origen común y que los ángeles malos y el hombre mismo se hicieron malos por su culpa; de aquí el texto «*simul... condidit de nihilo... sed ipsi per se facti sunt mali*». Y es claro que en este sentido *simul* no afirmaría *identidad de fecha de creación*, sino *de plan y de autor*, que es como se suele explicar el texto del Eclesiástico (XVIII, 1) «*Deus creavit omnia simul*». A todo lo cual se puede añadir que medio siglo después del Concilio opinaba Santo Tomás que con el adverbio «*simul*» no se había definido otra cosa que la unidad del plan divino (in I Decret. c. 2) y en la Suma Teológica (q. LXI, a. 3) enseña que la doctrina de la creación de los Angeles antes que el mundo material, aunque poco probable, no se ha de tener por errónea. Vázquez asegura que la simultaneidad de la creación de los Angeles y la materia no sólo no ha sido definida, pero ni puede serlo, por no apoyarse ni en la Escritura ni en la Tradición; y Franzelin, Consultor del Concilio Vaticano I, dice que incluso si *simul* es adverbio de tiempo, una partícula incidental así no puede contener la definición del tiempo en que los Angeles fueron creados. Ahora bien, si una de las dos partículas temporales empleadas admiten tantos que no puede contener una definición de simultaneidad, ¿cómo se justifica que la otra partícula contenga de modo evidente una definición de temporalidad? Se ha argüido que una de las dos partículas ha de tener significado temporal, ya que luego, al hablar de la creación del hombre, se les contraponen el adverbio *deinde*, después; y los partidarios de la significación no temporal de *simul* contestan que basta que *deinde* se oponga a *ab initio temporis*. Pero del mismo modo cabría responder que basta que se oponga a *simul* y aun que puede tener significado atemporal, relativo también a una distinción en el plan divino de la creación del hombre, como de *simul* se ha explicado.

Con lo dicho hemos tratado de exponer los motivos que hay a nuestro juicio para dudar de que la creación del Mundo en un tiempo finito esté realmente definida por un Concilio como verdad de fe; pero naturalmente, aunque se concediese que efectivamente no lo está, todavía cabe que sea verdad de fe revelada por Dios y contenida en la Escritura. Y esto es lo que sin duda creía Santo Tomás cuando en la cuestión 46 de la primera parte de la Suma aduce como prueba de su aserto las primeras palabras del Génesis: «*In principio creavit Deus coelum et terram*» y explica que uno de los tres sentidos en que se puede entender este «*in principio*» se refiere precisamente al principio en su aspecto temporal. El mismo texto se aduce una y otra vez por los distintos autores y aunque con menos unanimidad, es decir unos unos y otros otros, se le suelen agregar en sus argumentaciones

otros tomados de diversos lugares de la Biblia, como por ejemplo las palabras de la Sabiduría en el libro de los Proverbios (VIII, 22 sig.) «*Dominus possedit me in initio viarum suarum antequam quidquam faceret a principio. Ab aeterno ordinata sum et ex antiquis antequam terra fieret, etc.*» o las del Señor en la oración sacerdotal (Io., 17, 5): «*Nunc clarifica me tu, Pater, apud te ipsum claritate quam habui, priusquam mundus esset, apud te*» o las de San Pablo en la epístola a los Efesios (1,4): «*Deus elegit nos in Christo ante mundi constitutionem*», etc. Pero bien mirados, ninguno de estos textos parece concluyente, pues unos hablan claramente de la Tierra o se pueden referir a ella, la cual tuvo ciertamente principio, y en los otros se puede dudar de que *principium* e *initium* se refieran a un comienzo real del tiempo. Así en la misma cuestión 46 admite Santo Tomás que las palabras «*In principio creavit Deus coelum et terram*» han sido interpretadas por los Santos Padres de tres maneras diferentes, de modo que además de la interpretación aducida de un principio temporal, propia de San Basilio y San Ambrosio, hay la de los mismos Santos y además San Jerónimo y San Agustín que interpretan *In principio* como *In Filio* y esto para excluir el error de los que ponían dos principios de las cosas creadas, uno de las buenas y otro de las malas («Pues así como el principio eficiente se atribuye al Padre por la omnipotencia, así el principio ejemplar se apropia al Hijo por la sabiduría como cuando se dice *Omnia in sapientia fecisti*; y así se ha de entender que Dios todo lo hizo en el Principio, es decir, en el Hijo, según lo del Apóstol: *in ipso* (a saber, en el Hijo) *condita sunt universa*»; y finalmente la de San Agustín contra los que afirmaban que los seres corporales habían sido creados mediante los espirituales y dice que se dice *In principio* para excluir esta subordinación temporal de unos a otros. Se ve, pues, que ni para el mismo Santo Doctor la interpretación es exclusiva y esto parece bastar para que no pueda ser de fe. En cuanto a los otros lugares en que salen las palabras «*in principio*», «*in initio*», etc., es claro que los hay que no sólo admiten, sino que exigen un matiz claramente *atemporal*, como en el comienzo del Evangelio de San Juan «En el principio era el Verbo y el Verbo estaba en Dios y el Verbo era Dios; El estaba en el principio en Dios»; o bien el mismo antes citado del libro de los Proverbios; pues Dios es evidentemente eterno y no obstante su Sabiduría hipostatizada en este texto, esto es, la segunda Persona de la Santísima Trinidad, afirma de sí misma: «*Dominus* (esto es, el Padre) *possedit Me in initio viarum suarum antequam quidquam faceret a principio*. ¿Qué es este *initium viarum (Dei)* distinto del principio en que hizo las cosas? ¿No parece lógico que se trate, siempre que tales expresiones se enuncian de la relación de Dios con las criaturas, de locuciones manifestativas de un orden ontológico, para que quede bien clara la total dependencia de las criaturas respecto de Dios? Que Dios es el Creador y Señor de todo es lo indudablemente contenido en estas frases y que por tanto el mundo en modo alguno es independiente de El o su igual; pero

que se manifieste taxativamente en estas expresiones que su duración no puede ser infinita, no creemos que se vea con toda claridad.

Pero supongamos que examinadas por un perito todas estas razones, demuestre que carecen de fundamento y que no es lícito por tanto apartarse de la común sentencia de que es verdad de fe que el Mundo ha sido creado en el tiempo. Si no nos equivocamos, todavía entonces habría manera de salvar la posibilidad de que el cosmólogo creyente convencido de las razones en pro de un Universo estacionario o en pulsación perpetua pudiese *tuta conscientia* adherirse en la práctica a su punto de vista.

Como se ha visto, una cosa está bien clara y es que la preocupación de los Concilios y de los Padres era afirmar la eternidad en Dios como contrapuesta al tiempo en las criaturas y esto para garantizar la trascendencia de Dios y sus diversos atributos, omnipotencia, inmutabilidad, libertad, etc. Si es así, es lógico que lo que se excluye cuando se define que el mundo ha sido creado en el tiempo es que sea eterno en el sentido estricto de la palabra y por tanto no precisamente que pueda carecer de principio y fin, sino que pueda tener como Dios una plena posesión de su duración, una existencia toda a la vez sin sucesión alguna, que es lo estrictamente característico de la eternidad; pues como afirma Boecio «un *ahora* fluyente hace el tiempo, un *ahora* permanente hace la eternidad» y así en la Suma Teológica (p. 1, q. X, a. 4) dice Santo Tomás que «el tiempo y la eternidad no son lo mismo y la razón de su diversidad la pusieron algunos en el hecho de que la eternidad carezca de principio y fin y por el contrario el tiempo tenga principio y fin; pero ésta es una diferencia accidental, no substancial, porque supuesto que el tiempo siempre haya existido y siempre tenga que existir, según la opinión de los que afirman que el movimiento del cielo es sempiterno, todavía habrá diferencia entre la eternidad y el tiempo como dice Boecio, por aquello de que la eternidad existe toda a la vez, lo que no conviene al tiempo, y además porque la eternidad es medida del ser permanente y el tiempo en cambio es medida del movimiento». Claro está que, entendida en esta forma, no se opondría directamente la presunta definición al punto de vista de los cosmólogos de que hablamos.

Puede con todo ocurrir que se haya ido más lejos y que lo establecido por las definiciones conciliares sea efectivamente que el Mundo ha sido creado en el principio del tiempo. ¿Qué decir en tal caso? ¿Queda sin más excluida una duración infinita en el pasado? En la respuesta «*ad primum*» del artículo III de la misma cuestión XLVI de la 1.^a parte de la Suma Teológica varias veces citada explica Santo Tomás que no se dice que las cosas fueron creadas en el principio del tiempo como si este principio fuese la medida de la creación, sino porque el cielo y la tierra fueron creados simultáneamente con el tiempo. Es lo mismo que afirma San Agustín cuando dice en el libro XI de su obra *De civitate Dei*. «Sin duda el mundo no ha sido creado en el tiempo, sino con el tiempo. Antes del mundo no podía haber tiempo». Pero de que sin existir el mundo no pudiese existir el tiempo real, no se

sigue forzosamente que el tiempo real transcurrido desde la creación no pueda ser infinito. Más aún, como nota bien Sertillanges, en cierto modo es bien difícil entender qué se quiere decir con exactitud cuando se afirma que el comienzo del Universo tuvo lugar hace un número finito de unidades de tiempo. Pues equivale ello a decir que más allá de este lapso de tiempo, *antes* del principio del Mundo, sólo existía Dios en su eternidad, como si la eternidad y el tiempo fuesen dos duraciones que se siguiesen la una a la otra y se yuxtapusiesen en el momento de la creación. Pero esto no tiene sentido, pues este *antes* del principio del tiempo ya supondría un tiempo y como el tiempo supone sucesión y *entonces* (¡también tiempo!) sólo habría existido Dios en el cual no puede haber mudanza ni sucesión, este *tiempo* y este *entonces* y este *antes* carecen de sentido... La antinomia proviene de que, sumergidos como estamos en el tiempo y sin idea alguna de otro género de duración, todo nos lo representamos de una manera temporal, como en cierto modo concebimos las realidades espirituales con ideas corporales y a Dios antropomórficamente y lo más a que llegamos es a purificarlo todo mediante abstracciones... La eternidad es ciertamente una duración, pero cotejada con el tiempo, no le es semejante, sino tan sólo análoga. Es una duración que no admite divisiones y que por tanto ni se prolonga ni siquiera dura en el sentido que nosotros damos a esta palabra de progresión y sucesión. Si la quisiésemos representar gráficamente no tendríamos que recurrir a una línea indefinida, sino a un punto, por más que parezca ello maravilloso, un punto que coexiste con todas las duraciones posibles y las contiene, pero no está constituido por ellas. La eternidad de Dios no precede al Mundo ni al tiempo ni va en cierto modo a su encuentro en el instante de la creación; es algo que está por encima del tiempo y le es trascendente como Dios trasciende al Mundo. De aquí que el tiempo sólo haya podido existir y sólo exista desde que el Mundo existe y consiguientemente podamos afirmar que el Universo ha existido *en todo tiempo*, es decir, *siempre*, tomando este adverbio en sentido temporal; y como en Física y Cosmología estamos evidentemente en el orden temporal parece que esta posibilidad de afirmación de que el Universo ha existido en todo tiempo ha de poder bastar a los que quisieran sostener la teoría estacionaria o de la pulsación perpetua; fuera del tiempo no hay Física ni ciencia positiva alguna.

Supongamos finalmente que ni siquiera la explicación que acabamos de dar sea suficiente y que la definición conciliar excluya que el Mundo tenga efectivamente una duración infinita en el pasado; miremos si todavía hallamos un principio de conciliación. Quizás pueda hallarse en que tal vez el concepto de tiempo tiene más implicaciones de lo que se había creído y el poder determinar si su duración es finita o infinita es algo tan sutil que escapa a la consideración vulgar. Fijémonos por ejemplo en las teorías como la de Milne que admiten distintas escalas del mismo, apoyadas todas en guardatiempos constituidos por fenómenos naturales. Hemos visto al exponerla que a un mismo suceso podían corresponder determinaciones de tiempo en-

teramente distintas según fuese una u otra la escala a que se refiriese. Y en particular el momento actual según se le considere formando parte de la evolución del Cosmos, medida en la escala t , o del tiempo dinámico en que se desarrollan los fenómenos de la vida macroscópica, medida en la escala τ , se comporta muy diferentemente respecto del pasado. En el primer caso, nuestro instante presente forma parte de una sucesión de momentos de tiempo atómico o cosmológico cuyo guardatiempos fundamental son las vibraciones de una fuente-patrón de luz de un color dado; en esta escala la evolución del Cosmos tiene lugar a partir de un momento perfectamente determinado $t = 0$, que Milne identifica con el instante de la creación; en cambio en el segundo caso, nuestro mismo instante presente forma parte de una sucesión de momentos del tiempo a que estamos acostumbrados, cuya duración se va diferenciando de la de los momentos de la primera escala a razón de una parte sobre 13.000 millones cada año (diferencia quizás un día comprobable en el futuro merced a los relojes atómicos y nucleares); y de resultas, por más que retrocedamos en el pasado, no podremos alcanzar nunca con ella el instante equivalente al instante cero de la escala atómica; pasando al límite en la fórmula que relaciona ambas escalas del tiempo, al instante cero (momento de creación de la escala t) corresponde el valor $-\infty$ (digamos una duración pasada infinita) en la escala τ : o en otras palabras, el hecho físico de la creación tuvo lugar en el instante absoluto 0; pero cuando medimos el tiempo con nuestros patrones acostumbrados (oscilaciones del péndulo o rotación de la Tierra, etc.), por más que nos esforcemos no podremos llegar nunca mediante un número finito a expresar el lapso de tiempo que nos separa del instante inicial y resultará por tanto para nosotros prácticamente infinito. ¿Podría servir una explicación de esta índole para solucionar la antinomia entre las exigencias de la fe (caso de darse realmente) y los postulados del estado estacionario? Dependerá gran parte de la beligerancia que se conceda a la multiplicidad de escalas del tiempo de Milne y Whitrow; en el cuerpo de nuestra exposición nos hemos limitado a afirmar que las introducían sin aducir de ello una justificación a fondo, que nos habría llevado demasiado lejos; al deseo de penetrar la materia puede remitirse a las obras originales de Milne *Relativity, Gravitation and World Structure* y *Modern Cosmology and the Christian Idea of God* o bien la obra de Martín Johnson *Time, Knowledge and the Nebulae* donde la materia se expone con mucha más extensión. Una fórmula podría entonces adoptar el creyente que quisiese defender el estado estacionario sin chocar con los dictados de su conciencia: la primera creación tuvo lugar no en estado puntual, sino con la materia plenamente difundida ya por todo el espacio en el instante $t = 0$ del tiempo cosmológico, que es el propio de la expansión y los fenómenos cósmicos; luego el Universo ha ido evolucionando, expansionándose sin cesar y manteniéndose constante su densidad y aspecto merced a la creación continua de nueva materia; pero al querer medir la duración con nuestros guardatiempos típicos (péndulo, rotación

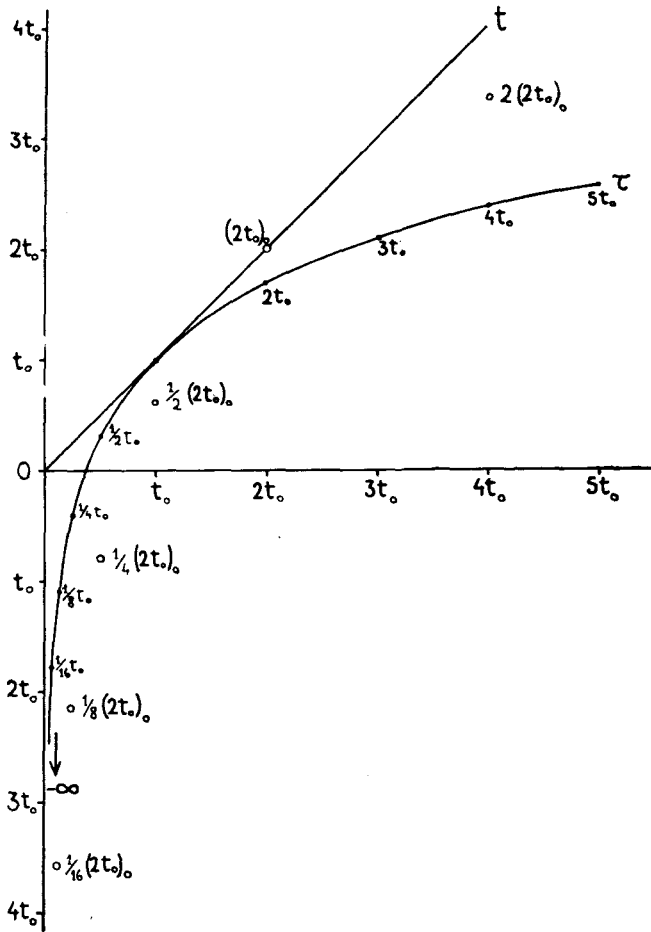


FIG. 10. — Correspondencia del tiempo t y el tiempo τ . En el momento presente t_0 ambos coinciden. Cuando el tiempo cosmológico t valga 2, 3, ... veces su valor actual t_0 el tiempo τ irá adquiriendo a partir del momento presente los valores dados por la parábola. Y lo mismo hacia el pasado cuando el valor del tiempo cosmológico fue $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, ... del actual t_0 . Al punto 0 del tiempo t corresponde el valor $-\infty$ del tiempo τ . De hecho cuando el tiempo t alcance el valor $2t_0$, los observadores que entonces quieran medir tendrán que considerar por definición que ambos tiempos coinciden en dicho instante, ya que entonces sera tal instante el momento presente y $2t_0$ será la unidad de medida que representamos por $(2t_0)_o$. Medido desde dicho instante el tiempo τ irá adquiriendo en los instantes $2(2t_0)_o$, $3(2t_0)_o$, ... los valores dados por la parábola (no dibujada) que pasaria por los puntos que representamos por circulitos. Y lo mismo hacia el pasado en los momentos $\frac{1}{2}(2t_0)_o$, $\frac{1}{4}(2t_0)_o$, etc. Al instante 0 del tiempo t le volveria a corresponder el valor $-\infty$ del tiempo τ . Y así sucesivamente.

de la Tierra, revolución alrededor del Sol) por más que nos esforcemos no podemos expresar con una cifra finita la duración transcurrida desde el instante de la creación; podemos, pues, decir que para nosotros el mundo es eterno y su aspecto es siempre el mismo desde todo lugar y en todo instante. Evidentemente con este recurso no salvaría el que tal opinase el fin filosófico de aquellos autores de la teoría del estado estacionario que pretenden evitar con ella la necesidad de recurrir al Creador; pero esto ya hemos demostrado antes que era una simple extrapolación insostenible y además nos llevaría fuera de nuestra hipótesis que es la de un creyente que quiere hallar modo de sustentar la teoría en sus aspectos físicos y matemáticos; en cambio creemos que esto último nuestra explicación lo conseguiría plenamente; y en cuanto a la posible objeción de que así se admite una creación en una forma que podría considerarse evolucionada, es claro que a los ojos del creyente para el Creador no puede haber habido mayor ni menor dificultad en dar existencia a la primera materia en forma de átomos de hidrógeno que en forma de átomos pesados o aun en algún estadio evolutivo más completo; y prueba de que no se ve en ello una mayor repugnancia intrínseca la tenemos en la teoría de Jordan de que la nueva materia introducida en el Universo para mantener constante su densidad no se supone creada en forma de átomos sueltos elementales, sino en forma de lo que él llama «paquetes de neutrones» que rápidamente se expansionan por explosión y constituyen las nuevas estrellas supernovas.

No dudo que durante toda esta larga exposición en la mente de más de uno se habrán suscitado dudas e interrogantes sobre la naturaleza y posibilidad del acto de creación en sí mismo y sobre la racionalidad de su admisión por el científico y ciertamente sería para mí un placer tratar de dilucidarlas y resolverlas completamente; pero ello nos llevaría al terreno polémico y apologético que desde el primer momento hemos querido evitar. Nuestro objetivo, como hemos dicho, era mucho más modesto: estudiar y procurar resolver las implicaciones teológicas emanadas directamente de algunos de los sistemas cosmológicos expuestos en orden a salvar lo más posible la plena libertad de la investigación científica. Y esto es lo que hemos procurado en la modesta medida de nuestras fuerzas. Y quizás de paso hayamos conseguido hacer ver a los no habituados a estas materias cuán delgado se hila en cuestiones teológicas y cuántas precauciones se toman antes de admitir que una proposición sea verdad de fe obligatoria: para ello ha de constar que ha sido ciertamente revelada por Dios y propuesta como tal por la Iglesia Docente. Y ello hace ver cuán deleznable son muchas de las dificultades que algunos creen encontrar en aparentes contradicciones entre la Fe y la Ciencia: o bien provienen de haber tomado como verdades reveladas afirmaciones que bien examinadas no gozan de tal garantía o bien de mirar como verdades científicas adquiridas definitivamente cosas que más tarde se verá no pasaban de simples hipótesis o teorías que con el tiempo se han de ir retocando.

Por lo demás paladinamente reconocemos que no somos especialistas en Teología y por lo mismo nuestro ferviente deseo sería que cuanto hemos dicho hiciese caer en la cuenta a los maestros de dicha Ciencia Sagrada de la conveniencia de reconsiderar esta cuestión a la luz de los nuevos datos que las Ciencias positivas han aportado. Si el asunto consiguiese excitar su interés y un nuevo estudio de la materia llevase a una mayor seguridad teórica y práctica, quizás el resultado sería beneficioso no sólo para cuantos queremos cultivar las Ciencias Naturales sin apartarnos de la luz de la Fe, sino también para la misma Teología al verse obligada a desentrañar y precisar mejor conceptos que ya San Agustín consideraba tan intrincados como los de espacio y tiempo y que posiblemente tienen mayor complejidad aún que la que él sospechó, si se llega a confirmar que en el orden objetivo no son sino facetas distintas de una misma y única realidad espacio-temporal en que se desarrolla toda la trama de la historia del Universo. Es lo que nos dice el Vaticano II en el núm. 62 de la Constitución sobre la Iglesia en el mundo actual. «Estas dificultades no dañan necesariamente a la vida de la fe; más aún, incluso pueden estimular la mente a una más exacta y profunda comprensión de aquélla. Pues los más recientes estudios y hallazgos de las ciencias... suscitan nuevos problemas que llevan consigo consecuencias prácticas y reclaman de los teólogos nuevas investigaciones». Y por esto «los teólogos, guardando los métodos y las exigencias de la ciencia sagrada, están invitados a buscar siempre un modo más aproximado de comunicar sus conocimientos a los hombres de su época; porque una cosa es el depósito mismo de la Fe o sea sus verdades» (naturalmente intangibles) «y otra el modo de formularlas, conservando el mismo contenido». Y un poco más abajo: «La investigación teológica siga profundizando en la verdad revelada sin perder contacto con su tiempo, a fin de facilitar a los hombres cultos en los diversos ramos del saber un mejor conocimiento de la Fe». Más aún «este buen entendimiento proporcionará grandes servicios a la misma formación de los ministros sagrados que podrán presentar de este modo a sus contemporáneos las enseñanzas de la Iglesia acerca de Dios, del hombre y del mundo de forma más adecuada de modo que más gustosamente reciban sus enseñanzas».

EPILOGO

Al llegar a este punto podríamos sentirnos tentados a decir que habíamos llegado al término de nuestro cometido; pero como si quisiesen quitarnos toda ilusión de haberlo conseguido, o si se prefiere, como si quisiesen corroborar la casi imposibilidad que mencionábamos en la introducción de poder llegar a resumir al día las teorías cosmológicas y los tests con ellas relacionados, entregado ya nuestro trabajo a la imprenta nos llegan nuevos artículos que nos demuestran cuán lejos estamos de haber alcanzado la meta... En el núm. 2 del volumen 131 de *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* llegado a nuestras manos a fines de diciembre de 1965, J. Pachner nos propone un nuevo modelo de Universo isótropo oscilante sin puntos singulares; en el número de noviembre de *L'Astronomie*, H. Heidmann nos habla de las consecuencias del descubrimiento del quasar 3C9, cuya velocidad de fuga, como dijimos en el núm. 4 de la tercera parte, parece ser a primera vista el *doble* de la velocidad de la luz (!). Claro que no es así: lo *sería* si se pudiese calcular su velocidad por la fórmula ordinaria [14]; pero ya vimos en el mismo número que a tales distancias, en que forzosamente se han de manifestar ya los efectos de la curvatura del Universo, la fórmula ha de ser modificada y deben emplearse expresiones con términos correctivos de orden superior al primero, como por ejemplo la [95]. Aun así y todo, resulta para este quasar la distancia mínima de 5300 millones de años de luz, y como en el Atlas Celeste de Monte Palomar aparece como una estrella de magnitud 18, su luminosidad real ha de exceder la de cien galaxias de las más brillantes... Realmente es prodigioso el desarrollo que irá adquiriendo la exploración del Universo, a medida que se sigan descubriendo nuevos cuerpos celestes de una potencia de emisión tan enorme... ¡Y pensar que hace apenas tres años la naturaleza de los cuasares era todavía insospechada!... El cálculo hace esperar que se puedan llegar a descubrir unos 500.

La idea de Pachner no tiene menos interés. En la línea de los Universos del estado estacionario a que últimamente se ha acogido, Hoyle propone, como hemos dicho, un modelo oscilante uniforme e isótropo sin puntos singulares en que la materia tenga que pasar por una fase de densidad infinita, y ello merced a la existencia en todo

el espacio de una presión negativa indirectamente proporcional a la enésima potencia de la curvatura del mismo, a la cual se debería la creación de nueva materia. La curvatura del espacio dependería entonces del tiempo según una ley cicloidal; y es interesante notar que se llegaría al doble resultado de que por un lado las posibles diferencias entre este tipo de Universo y el correspondiente de Friedmann en la época actual de la evolución cósmica quedarían por debajo del límite de observabilidad y, por otro, la presente fase de expansión distaría poco de su término por estar en estos momentos el proceso de creación casi acabado.

Y en el número de octubre de 1965 del *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, T. S. Eastmond, basándose en trabajos asimismo muy recientes de K. Tomita y C. Hayashi, completa los estudios de Sandage sobre la relación [m. u] (magnitud aparente — corrimiento al rojo), que considera «como la relación que puede ofrecer la mejor promesa en el campo de la observación para hallar un modelo aceptable de Universo», y hace notar que es preciso prestar más atención al caso $\Lambda \neq 0$ para varios valores de q_0 . Teniendo en cuenta que las magnitudes medias representan la luminosidad de las galaxias cuando la luz fue emitida y que en el largo tiempo del recorrido hasta nosotros tal luminosidad puede haber variado en un porcentaje incluso del 77 %, prueba que para el cálculo de q_0 es menester conocer la verdadera magnitud aparente actual y que, si sólo se trata el caso de $\Lambda = 0$, la inseguridad en los resultados es tan grande que puede hacer variar el valor de q_0 desde 0 hasta 2,9; mientras no se haya hecho lo que sugiere, cree que ningún modelo cosmológico se puede considerar ni bien establecido ni excluido. Etcétera, etcétera...

En vista de todo ello, nuestra impresión es que la consecuencia de la exploración que hemos intentado realizar sea tener que repetir humildemente lo que el gran Pontífice Pío XII propuso a la consideración de los astrónomos cuando nos recibió en septiembre de 1952, en Castelgandolfo, a los miembros de la VIII Asamblea General de la Unión Internacional de Astronomía: «El camino emprendido por el espíritu del hombre... ¿estará indefinidamente abierto ante él? ¿Lo podrá recorrer sin interrupción hasta descubrir los últimos enigmas que el Universo tiene reservados?... La respuesta de las grandes inteligencias que han penetrado más profundamente en los secretos del Cosmos es bien modesta y comedida: estamos —piensan— al comienzo; pero por el momento no hay ninguna probabilidad de que ni el más genial investigador pueda nunca conocer ni mucho menos resolver todos los enigmas encerrados en el Universo físico».

Es la pura verdad. Aun suponiendo que en un futuro no lejano consiguiéramos saber según qué modelo estaba construido nuestro Cosmos. ¡cuántos enigmas nos quedarían todavía por resolver! Y lo peor es que, como se hizo observar cuando Edlén consiguió identificar las rayas más destacadas del espectro de la corona solar, en Astronomía la solución de cada enigma suscita otro, que se resolverá también un día a su vez, pero para dejar planteado un nuevo inte-

rrogante. Insinuemos sólo dos o tres: si, como dice Jordan, la suma total de energía del Universo ha de ser nula, ¿no existirán quizá galaxias totalmente compuestas de antimateria?, y si los rayos cósmicos son como meteoritos minúsculos procedentes del exterior de la Vía Láctea, ¿qué ocurriría si un día un chorro de meteoritos de antimateria venido de una de tales galaxias (o antigalaxias) llegase hasta nosotros? ¿Qué desastre provocaría? ¿O no ocurriría nada, sino un nuevo enriquecimiento de nuestros conocimientos espaciales? Y en otro orden de ideas, si la proporción de los elementos en grandes partes del Cosmos parece la misma de nuestro contorno, ¿no es lógico que la evolución en dichos sitios haya tenido lugar en la misma forma que en nuestro Mundo? Y si así es, ¿no habrán aparecido seres vivientes y con el tiempo humanidades como la nuestra? Si así fuese efectivamente, ya vimos cuán difícil sería, y en muchos casos imposible con los medios de que actualmente disponemos, entrar en una forma u otra en comunicación con ellos; pero dada la forma exponencial de la curva del progreso, ¿es absurdo esperar que se descubrirán otros nuevos? Cuando se lanzó el primer satélite artificial ¿se habría atrevido nadie a pensar que sólo diez años después se trataría ya seriamente de alcanzar la Luna?

Detengamos nuestra imaginación: no en vano se la ha llamado *la loca de la casa*. Pero lo serio es que en esta ocasión muchas de estas aparentes locuras no son quizá sino previsiones, audaces, sí, pero probablemente acertadas... Volvamos atrás y pisemos el terreno firme de los conocimientos seguros que poseemos. Es tan extraordinario lo que ya sabemos del Cosmos, son tan acuciantes los enigmas que tenemos planteados, que no puede uno menos de reconocer la justeza de la consecuencia que el mismo Sumo Pontífice Pio XII sacaba en su discurso de las palabras que hemos citado: «Estos (los enigmas todavía pendientes de solución del mundo físico) reclaman e indican la existencia de un Espíritu, infinitamente superior... que crea, conserva, gobierna y, por tanto, con suprema intuición conoce y escruta hoy, como en el alba del primer día de la Creación, todo cuanto existe... ¡Feliz y sublime este encuentro, a través de la contemplación del Cosmos, entre el espíritu humano y el Espíritu Creador!».

Hace tres siglos, cuando todo cuanto se conocía del Universo se reducía a las primeras leyes del sistema planetario, terminaba Newton sus Principios Matemáticos de Filosofía Natural con estas palabras: «Este bellissimo conjunto integrado por el Sol con sus planetas y cometas, no puede reconocer otra causa que la voluntad y el dominio de un Ser inteligente y poderoso. Y si las estrellas fijas son centros de sistemas semejantes, todos ellos contruidos según el mismo modelo, estarán bajo el dominio del mismo Ser... Este lo rige todo, no como alma del Mundo, sino como Señor del Universo, y por este su dominio suele llamársele Señor Dios, παντοκρατορ... Dios es el Ser Supremo, eterno, infinito, absolutamente perfecto».

En nuestros tiempos ha puesto Milne como lema a su obra *Relativity, Gravitation and World-Structure* este versículo del Evangelio:

«*Nisi efficiamini sicut parvuli... non intrabitis in regnum coelorum*» (Matt., XVIII, 3), que uno de sus discípulos interpretaba en el sentido de que, «a menos de volver a admitir con sencillez de corazón la fe en la creación aprendida en vuestra niñez, os será enteramente imposible entender de manera racional todo el mecanismo de los Cielos».

Por nuestra parte, fieles a la línea que nos hemos trazado, nos contentaremos con una conclusión más modesta. No hace todavía medio siglo la palabra «creación» estaba excluida de los tratados científicos. Ya se ocupasen del origen de la materia o del de la vida, «la hipótesis creacionista» ni siquiera era discutida; se la excluía *a priori* como algo definitivamente descartado. Hoy podrá o no admitirse la creación, pero nadie podrá argüir que sea anticientífico hablar de ella. Como dice Javet en su obra *La figure de l'Univers*: «Nos encontramos en presencia de uno de estos absolutos que los positivistas declaran incognoscibles *a priori* y que por este motivo excluyen del dominio de la investigación científica. Las observaciones que preceden prueban que la posición filosófica de los cosmólogos modernos es otra. No es en virtud de un *a priori* que ciertos absolutos son incognoscibles, sino que su inaccesibilidad es la consecuencia lógica de las teorías establecidas. Así, no obstante su creciente imperialismo, la Ciencia se encuentra detenida por ciertos límites, consecuencia de los principios que ella misma ha puesto en juego; su imperialismo se fija en sí mismo barreras infranqueables, más allá de las cuales son posibles muchas hipótesis metafísicas. En lo que concierne al principio del Universo, podemos, si así lo deseamos y con más libertad que en las antiguas cosmogonias, volver a tomar en nuestros labios las tres primeras palabras de la Biblia: *Al principio Dios*».

No creo, pues, que os parezca fuera de lugar que termine esta disertación con las palabras que el Sumo Pontífice León XIII hizo grabar en la entrada de la cúpula del gran astrógrafo de la Specola Vaticana, destinado a la confección de la carta del cielo: DEO CREATORI.

Sí, señores, a Dios Creador nuestro homenaje y nuestra adoración.

He dicho.

DISCURSO DE CONTESTACION

DEL

Excmo. Sr. D. FRANCISCO DE A. NAVARRO BORRAS

SEÑORES ACADÉMICOS:

Me complace ser el portavoz de esta docta Corporación en el acto solemne de ingreso del Padre Romaña, mi admirado discípulo y entrañable amigo; no sólo por el afecto que le profeso, sino singularmente por la clara conciencia que tengo de su valer científico que determina el que su incorporación a nuestras tareas académicas entraña una adquisición valiosísima.

La personalidad del P. Romaña no necesita ser destacada, ni subrayados sus méritos, de todos conocidos. No obstante, en debido acatamiento a la práctica tradicional, efectuaré un examen lo más conciso posible de sus trabajos científicos, que le hacen acreedor a nuestra alta estimación; asimismo, me limitaré a unas breves reflexiones sobre el contenido de su discurso e intentaré trazar finalmente, unas líneas sobre el perfil humano de su personalidad vigorosa.

Recibe el Padre Romaña la medalla núm. 4, que ocho ilustres antecesores ostentaron, desde la fundación de la Real Academia. De su inmediato predecesor, don José Augusto Sánchez Pérez, como historiador de la Ciencia, habéis oído un cumplido, justo y exacto juicio. De los siete restantes, cinco fueron Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Hombres de Ciencia eminentes, que ocuparon, en su tiempo, los más altos estamentos de la Técnica mundial. Sus nombres, don José García Otero, don Juan de Cortázar, don Miguel Martínez de Campos y Antón, don Vicente Garciñi Pastor y don Juan Manuel de Zafra y Estevan, han quedado vinculados unos, a tratados clásicos sobre Matemáticas y otros, a obras memorables de técnicas de Ingeniería. Igualmente, fue poseedor de la medalla don Manuel M.^a de Azofra y Saenz de Tejada, Arquitecto y Catedrático de Mecánica. Ocupó altos cargos docentes y políticos y con su inteligente actividad contribuyó, en sumo grado, durante el segundo tercio del siglo pasado, al desarrollo científico e industrial de España. Y, por último, hemos de citar, entre los que ostentaron la medalla, a nuestro venerado Maestro, don José M.^a Plans y Freire, Catedrático de Mecánica Celeste en la Universidad de Madrid, que por su

pura vocación intelectual, sin mistificaciones, vastos conocimientos científicos, valiosas obras y acrisolados valores éticos, supo captar a sus discípulos y formar una pléyade que se distingue en los diversos campos de la Matemática y de la Física. Entre ellos uno de los más preclaros es el que hoy ingresa en esta docta Corporación. Por este motivo, comprenderéis que, como adscrito a la Escuela, me congratule al pensar la complacencia que hubiera experimentado el Maestro, si hubiera podido presentir que su sillón académico, llegaría un día, en que por herencia, sería ocupado por uno de sus discípulos más queridos.

* * *

El Padre Romañá, nació en Barcelona en 1900, donde pasó su infancia y donde cursó brillantemente los estudios de Bachillerato en el Colegio de la Compañía de Jesús, sito en la calle Caspe.

Al cumplir los dieciséis años, finalizada su primera etapa académica, sintió el despertar de su vocación religiosa, que fue sometida, por motivos de salud, a un año de prueba, tanto por la Orden como por la familia. Durante este periodo, en que su vocación religiosa permanece inquebrantable, publica una serie de artículos en «La Gaceta de Cataluña», en los que comenta, con fina perspicacia, los acontecimientos de la Guerra Mundial, que apasionaban entonces a la humanidad. Como consecuencia de estos artículos, dada la discreción y tino con que estaban redactadas, se le ofreció un banquete, en el que surgió la natural sorpresa, al descubrir los lectores que el autor, al que admiraban, era un periodista que no rebasaba los diecisiete años.

Transcurrido el año de prueba, ingresa, en 1917, en la Compañía de Jesús en su Noviciado de Gandía; cursa luego Humanidades en el Monasterio de Veruela, al pie del Moncayo, e inicia después, sus estudios de Filosofía en el Colegio Máximo de Sarriá.

En 1922, se matricula en la Facultad de Ciencias de Barcelona (Sección de Físicas); pero apenas iniciados ha de interrumpir sus estudios científicos en el año siguiente. Sus Superiores deciden trasladarle al Seminario de Misiones de Vals-près-le-Puy (Haute Loire); allí continúa los de Filosofía durante los cursos 1923-24 y 1924-25; se adiestra en la gimnasia intelectual que suministra la Dialéctica y con ella adquiere una elasticidad de inteligencia y un ingenio tan sutil como es preciso para sostener con éxito, en acto público, en Vals-près-le-Puy, una tesis en campo rival de otra, que meses antes le había tocado defender en Sarriá, en acto análogo.

Regresa en 1925 a Barcelona, y durante los cursos 1925-26 y 1926-27 aprueba con las máximas calificaciones todas las asignaturas que le quedaban de la Licenciatura en Exactas y consigue premio extraordinario en el Grado.

Viene a Madrid en 1927. Con los magníficos Maestros que fueron nuestros compañeros Plans, Vegas y Octavio de Toledo aprueba las asignaturas del Doctorado. Y aquí es deber de gratitud consignar que los apuntes que semanalmente me mandaba a Barcelona, donde

residía, me ayudaron considerablemente para poder superar también dichos exámenes.

En 1928 y 1929 elabora bajo la dirección del Prof. Terradas su tesis doctoral sobre la generalización al espacio del criterio de Whitaker para la existencia de órbitas cerradas en el plano; tesis, que no sólo se la considera acreedora a la calificación de sobresaliente, sino que también es galardonada con el Premio extraordinario.

Continúa en Sarriá sus estudios de Teología hasta 1931; fecha en que como consecuencia de la inicua medida de expulsión y extrañamiento de la Compañía de Jesús, se ve obligado a interrumpirlos, trasladándose a Aalbeck (Holanda), donde los prosigue y recibe en 1932 la Ordenación Sacerdotal.

Pasa luego a Innsbruck donde termina los estudios de Teología y realiza a continuación en Carintia el segundo Noviciado, que la Compañía de Jesús, denomina Tercera Probación. Marcha después a Viena en cuyo Observatorio Astronómico trabaja bajo la dirección del Profesor Graff y de los Astrónomos, doctores Bernheimer y Krumpholz; y luego en el Instituto de Meteorología y Geodinámica con el Profesor Konrad.

Los tiempos no eran propicios para el Observatorio del Ebro. La expulsión de la Compañía de Jesús acordada por la República, determinó la supresión de las ayudas y subvenciones oficiales. Hubo meses en los que ni siquiera existían fondos para satisfacer sus haberes al personal subalterno. En tales circunstancias, resultaba preciso robustecer aún más, si cabía, el prestigio del Centro. Por este motivo su benemérito Director, P. Rodés, solicitó los servicios del P. Romaña, quien en 7 de agosto de 1934 se incorporó al Observatorio y se encargó de la Sección de Geomagnetismo y Corrientes Telúricas.

El ímpetu de su nuevo ayudante, su juventud y su sólida preparación respondieron plenamente a las esperanzas del P. Rodés. El nivel científico de los trabajos va en aumento y la utilidad que se presta es de tal magnitud que llega la revolución del 36 y ocurre que, dispersos los restantes miembros de la Comunidad de PP. Jesuitas de Tortosa (tres de ellos asesinados), a los cuatro técnicos, Padres Rodés y Romaña y sus ayudantes, los Hermanos Benitez y Cremades, no tan sólo se les autoriza a proseguir su labor científica en el Observatorio, sino que terminantemente se les obliga a permanecer en servicio «hasta que se les encuentre sustitutos», sin perjuicio de que *sotto voce* se diga «y después se les podrá liquidar».

La opresión y las vejaciones fueron al principio infinitas; luego al lado de ellas se van encontrando muestras de consideración, como el autógrafa de Tito (entonces Coronel de un regimiento de tanques), que consignó en el Album del Observatorio frases muy laudatorias para su personal. Tito adoptó el Observatorio como pararrayos. Fue su refugio cuando en un mapa, hallado en un avión nacional derribado, vió un circulito en torno a él señalado como zona a no bombardear.

De todos modos, a fines del 37, excepto el P. Rodés (que había recibido de Burgos la orden de custodiarlo hasta el fin), los otros tres jesuitas tuvieron que abandonar Tortosa y ocultarse en Barcelona. Al P. Romaña se le requirió para que, de ser posible, se pasase a la zona nacional con el fin de que se hiciese cargo del Observatorio de Granada; pero fracasó las dos veces consecutivas en que intentó cruzar el Pirineo.

Entonces, en la clandestinidad, le ordenan sus Superiores ponerse al frente de la «Academia Lauria», continuación camuflada de los Colegios de Jesuitas y de los de Religiosas del Sagrado Corazón, Esclavas y Jesús María. El local ocupaba el piso primero de una casa en cuyos bajo y principal estaban instalado un Centro de la F.A.I., funcionando en el segundo una oficina del Socorro Rojo Internacional. Con tales vecinos ¿quién podía sospechar la existencia de un Colegio Religioso? Es el Centro a donde encubiertos por el medio millar de alumnos de ambos sexos que asisten a las clases, acuden innumerables Sacerdotes y fieles en busca de socorros materiales y espirituales. Allí el P. Romaña, aunque él se niegue a hablar de este punto, que conozco por otros conductos fidedignos, actúa con la abnegación en él característica y afronta con excepcional valor los peligros que constantemente le acechan. De su heroica actuación existen unas breves menciones en el libro de la B.A.C. «*Historia de la persecución religiosa en España 1936-1939*».

Desmantelado el Observatorio del Ebro, se halló parte de su instrumental al terminar la guerra (1) en el Castillo de Perelada, (provincia de Gerona), próximo a la frontera francesa; todo muy deteriorado y mezclado con valiosos enseres y cuadros del Museo del Prado. Allí lo recuperó el P. Romaña y lo trasladó a Tortosa en marzo de 1939. Aunque su estado era lamentable, junto con la biblioteca y sobre todo el archivo de datos, que asimismo se habían salvado, iba a ser el germen de resurrección del Centro.

El P. Rodés a causa de su salud muy quebrantada, que le vedaba para siempre el seguir actuando en el campo de las investigaciones astrofísicas, pidió el relevo y recomendó como sucesor a nuestro Recipiendario. Sólo diez días más tarde fallecía.

Designado el P. Romaña para dirigir el Observatorio del Ebro, su labor se presentaba extremadamente difícil: sin instrumental, sin personal científico idóneo, casi prácticamente solo durante diez años y con gran penuria de toda clase de medios para rehacer el Centro, su tarea había de ser titánica. Pero con su colosal perseverancia y puesta toda su alma en revitalizarlo todo, comienza la reorganización

(1) Desde la ocupación de la orilla derecha del Ebro por las tropas nacionales, el Observatorio del Ebro, fue interinamente regido por nuestro compañero fallecido el P. Enrique de Rafael, quien sin medios de ninguna clase no pudo reemprender la brillante trayectoria científica de su etapa anterior a 1936; consiguió, no obstante, salvar la continuidad de las observaciones meteorológicas y, en parte, también las sísmicas.

con disciplina y orden; y como los aparatos faltan, dedica su tiempo al archivo de datos y a la biblioteca del Observatorio, comenzando por completar las aportaciones del P. Rodés al problema de la posible influencia de la Tierra en la formación de las manchas solares, que Romañá atribuye a un efecto óptico, nacido de no coincidir el eje del torbellino que constituye la mancha solar con la dirección del radio del Sol que la atraviesa. En colaboración con el Dr. Torroja, publica «el llamado efecto *Tierra* en la actividad solar» estudio exhaustivo de todas las posibles manifestaciones del fenómeno (más de doce distintas), a base de todos los datos publicados por todos los Observatorios Heliofísicos del mundo, desde la primera organización sistemática de observaciones solares. Este primer trabajo, fue seguido por otro sobre «el predominio de las manchas solares al Este del meridiano central y la inclinación de sus ejes hacia el Oeste», cuyos resultados por su importancia fueron fuertemente discutidos en la «*Zeitschrift für Astrophysik*» y finalmente incluidos por Unsöld en su gran tratado «*Stellar Atmosphären*».

A la escasez de colaboradores con que comenzó su tarea se vinieron a sumar las graves dificultades que para la adquisición de aparatos, instrumental y medios derivaron de la conflagración mundial primero y luego de los años de ostracismo y restricciones económicas a que estuvo sometida nuestra Patria.

Pero ellas no bastaron a contrarrestar el entusiasmo con que se entregó a la tarea, en verdad hercúlea, de reconstruir el Observatorio y hacer que se mantuviese intacto el prestigio de que en el extranjero siempre había gozado, y que él, al igual que sus antecesores cuidaba con sumo esmero; no por las ventajas que pudiese reportarles, sino por reputarlo como una de las formas mejores de contribución al servicio de la Patria y de la Iglesia. Afortunadamente la riqueza incomparable de los archivos de datos del Observatorio, y en particular su colección de registros de Corrientes Telúricas (aún hoy la más extensa del mundo), le habilitaron para ello y así apenas terminado el estudio sobre las manchas solares, emprende otro sobre la influencia de la Luna en dichas Corrientes, acometido también, no por métodos simplificados y por lo mismo expuestos a errores de aproximación, como se había hecho en varios países europeos y americanos, sino por el método directo, pero de improbo trabajo, de volver a medir de nuevo todas las curvas de un ciclo solar (¡11 años!) en horas lunares y someterlas a los mismos trabajos de reducción que si de la primera medición en horas solares se tratase, más los necesarios para eliminar el influjo solar que inevitablemente tenía que predominar en las curvas, aun medidas en esta forma. El trabajo interesó singularmente al entonces Director del Instituto de Física del Globo de Paris y más tarde Director del C.N.R.S. (y actualmente del C.R.S.), Prof. J. Coulomb, que se ofreció a publicarlo inmediatamente en sus Anales. Romañá, por juzgarlo más patriótico, prefirió efectuarlo en la Revista «*Urania*», aunque ello fuese en mengua de su difusión. Lo llevó, eso sí, a la Asamblea de Oslo de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica y lo pre-

sentó en las sesiones de la Asociación Internacional de Magnetismo y de Electricidad Terrestres (entonces I.A.T.M.E. y hoy día I.A.G.A.). Y entonces se produjo el fenómeno de que estando los resultados de Romaña en discrepancia con la célebre «ley de las fases» de Sydney Chapman (el conocido Profesor del Imperial College, de Londres, máxima Autoridad mundial en la materia), de tanto peso consideró éste sus argumentos y le parecieron de tal valor, que incorporó al P. Romaña a la Comisión que él presidía «para el estudio del influjo de la Luna en los fenómenos geofísicos», hecho que, no menos que en favor del trabajo del Recipiendario, habla en pro de la ecuanimidad del gran Maestro; quien no sólo no se siente herido porque se nieguen sus conclusiones, sino que otorga la máxima beligerancia al que le opone otros puntos de vista, movido exclusivamente por el deseo de que prevalezca la verdad.

En este trabajo Romaña contó con la colaboración de un discípulo al que inició en esta materia, el P. José-Oriol Cardús, hoy su continuador en este campo, en el que goza de autoridad mundial.

La actividad de Romaña, culmina con tareas de organización, viajes, estudios, conferencias, publicaciones, colaboración cada vez más íntima con el Consejo Superior de Investigaciones Científicas desde los primeros tiempos de su creación (2) y se corona con una fecunda labor de magisterio. No sólo se dedica a formar alumnos de su Orden como el mencionado P. Cardús, sino que atraídos por el prestigio de su nombre, acuden a él jóvenes aspirantes a Grados y Cátedras. Cúmpleme, por ejemplo, señalar las tesis doctorales de Constantino Gaibar, sobre la variación secular del campo geomagnético, y de José María Príncipe, Profesor adjunto de la Facultad de Ciencias de Madrid. Varios resultados de la primera han sido utilizados por el Prof. Runcorn en el primer volumen de Geofísica del monumental «*Handbuch der Physik*» y en cuanto a la segunda en ella encontró Príncipe la ley de sucesión diurna de las «bahías geomagnéticas» para Tortosa, la cual fue posteriormente generalizada por Romaña, extendiéndola a todas las latitudes magnéticas medias y adoptada luego varias veces como punto de partida por investigadores de distintos países, para ulteriores estudios en la materia.

Un tesoro de noticias biográfico-científicas se podrían reseñar en este relato de su vida a grandes rasgos; mas para no ser prolijo saltaré al año 1952, cuando se desplaza a la Guinea española, formando parte de la expedición científica a dicha provincia ecuatorial, al objeto de observar el eclipse total de Sol que aconteció el 25 de febrero de dicho año (3). Fuera de la observación del eclipse cromosférico y de su influencia sobre la variación magnética diurna, aprovecha la estancia allí para efectuar junto con el P. Cardús un

(2) Por expreso deseo del Recipiendario nos place hacer constar que tanto en dicho Consejo como en distintos organismos del Ministerio del Aire, con los que también de antiguo colabora, halló siempre para su tarea el más eficaz y cordial apoyo.

(3) Desde 1914, España no había organizado ninguna expedición para la observación de un eclipse.

notable trabajo sobre la amplitud de la variación magnética diurna entre los dos escudores (magnético y geográfico), y cuando se comienza a pensar en la organización del Año Geofísico Internacional, sistemáticamente llama la atención sobre la importancia y necesidad de atender al estudio de las pequeñas variaciones magnéticas y electro-telúricas, desde las que duran unas pocas horas hasta las mucho más breves de sólo minutos y aun segundos de duración. Aunque al principio sus insinuaciones son acogidas con cierto escepticismo, su labor acaba por dar fruto y éstos superan sus previsiones. Así en la Asamblea de Roma de 1954 de la I.A.G.A. se decide la creación del «Comité Internacional para el estudio de las variaciones magnéticas rápidas y de las corrientes telúricas» y es designado para presidirlo. Gracias a su prestigio y al del P. Cardús, el Comité Especial del Año Geofísico Internacional elige a Barcelona para sede de su III Asamblea General en 1956 y el Comité del P. Romaña (el número diez de la I.A.G.A. hoy conocido universalmente), se ve precisado a dictar normas a más de cien Observatorios de todo el Globo que con él colaboran sobre la manera de realizar las observaciones durante el A.G.I. y luego el Año de Cooperación Geofísica y después los Años del Sol en Calma, y cuidar de su centralización y explotación. Sus trabajos pesan más fuera de España que entre nosotros; quizá por esto la primera condecoración que recibe en su vida es la Cruz de Caballero de la Legión de Honor.

Hay que reconocer, pues, la influencia del P. Romaña en el concierto mundial de la Ciencia. Su actividad no tiene pausa; cuantos asuntos caen en sus manos proliferan; las investigaciones se enlazan unas con otras de una manera tan rápida que las ramas se multiplican. La especialización se impone; y así en 1963, el Comité exigió una ramificación. Mme. Troyskaya y el Prof. Campbell se encargan de la presidencia de dos nuevos Comités para el estudio de dos distintos tipos de pulsaciones; el resto continúa presidiéndolo el P. Romaña.

Bien conocido es de todos el vertiginoso desarrollo del estudio de las variaciones rápidas magnética y electro-telúricas; fue alma de su organización. Sus intervenciones en el Symposium de organización de Copenhague de 1957 y en el de Utrecht 1959, que convoca y preside, lo mismo que en las sesiones de su especialidad de las Asambleas de la I.A.G.A. en Toronto 1957 y Helsinki de 1960, son paradigmáticas. Autoridades como Bartels primero y Chapman después, cuando destacan el extraordinario avance (el «salto brusco», como dijo el primero, empleando familiarmente el nombre de un tipo de variaciones rápidas), que el estudio de tales variaciones rápidas había dado desde que el P. Romaña lo había tomado a su cargo, es del todo significativo. Tal es su crédito que en 1957 se le encarga la publicación del primer Atlas provisional de variaciones rápidas y en 1959 se le confía la del Atlas definitivo. Desde entonces el Servicio Permanente de Variaciones Rápidas ha estado a su cargo y son ya once los volúmenes de «Geomagnetic Indices» y de «Rapid Variations» editados por la I.A.G.A. que aparecen publicados por él junto con nombres tan prestigiosos como el del Director del «Geophysikaliches Institut» de Göt-

tingen, Julius Bartels, y el del Prof. Veldkamp, del Instituto Real Meteorológico Neerlandés de De Bilt.

La dilatada lista de sus publicaciones, que podéis leer al final de este discurso, acredita su destacada aportación a la Ciencia. Para no abrumarle pongo fin a esta síntesis de su labor, la cual justifica plenamente la valiosa adquisición que representa para la Real Academia. Hago abstracción asimismo de la relación de cargos y misiones por él desempeñadas; premios y distinciones obtenidos; honores y condecoraciones alcanzadas; para su labor académica esto tiene escasa importancia. Por lo demás él no reconoce en sí la concurrencia de sus efectivos méritos, porque su auténtica modestia absolutamente se lo impide.

* * *

Confieso que he pasado muchas horas estudiando el tema de su discurso y con clara conciencia de mi escasa preparación en la parcela de la Ciencia, que Romañá cultiva, he de expresar mi temor de no poder opinar con autoridad sobre las teorías cosmológicas que nos expone; y mucho menos extenderme al campo de conocimientos teológicos que tan mal conozco; pero rindiéndome al protocolo que en estas solemnidades exige una réplica al tema de la disertación, vais a permitirme una modesta glosa de su magnífico discurso.

La visión panorámica que se nos ha presentado de las modernas explicaciones del Universo, nos hace comprender la inmensa complejidad del problema y la lejanía de la meta.

Hay aspectos alucinantes como es este continuo retroceder de las fronteras del Cosmos, sobre todo desde que los progresos de la Técnica han permitido el perfeccionamiento de los medios de observación.

¡Qué lejos quedan los tiempos en que Augusto Comte afirmaba que jamás se llegaría a conocer la composición química de las estrellas! Siglo y medio ha pasado desde entonces, pero aún no nos separa una generación del día en que se estampó en una de las mejores obras de divulgación astronómica, que el átomo constituiría siempre el obstáculo en que se estrellaría eternamente la inteligencia humana...

La primera consecuencia a deducir de cuanto hemos oído, es una lección de prudencia en perfecta sindéresis de humildad.

De hecho el noventa por ciento de cuantos sabemos del Universo, lo hemos conocido por medio de las ondas electro-magnéticas de longitud comprendida entre 350 y 800 millonésimas de milímetro, las de la luz visible. Una pequeña ampliación, que de día en día se agranda, se va obteniendo en el campo de la Radio-astronomía gracias a las ondas de longitud entre 1 centímetro y 10 a 20 metros. El uso de los instrumentos, globos, cohetes, satélites y naves cósmicas, permiten la recepción y traducción de ondas UV, Rayos X y rayos γ y radiaciones infra-rojas que antes nos resultaban inaccesibles por la acción de la atmósfera. A la Tierra llegan constantemente, procedentes del espacio exterior, ondas en número prácticamente infinito, cuyas longitudes oscilan desde varios billones de veces las mayores, hoy

conocidas, hasta millonésimas de las más pequeñas. Si algún día nuestra inteligencia hallase el medio de captarlas y analizarlas ¿qué nuevas secuencias de maravillas no se abrirían a nuestras mentes? Y si además de las ondas electro-magnéticas, las únicas hasta el presente utilizadas, pensamos en los otros «emisarios» que continuamente nos llegan de los más apartados rincones del Cosmos (gravitones, neutrones, radiación corpuscular, neutrinos, etc.), ¿no es lógico pensar que se añadirían conclusiones insospechadas a cuantas hoy conocemos?

En particular, sería impresionante la posibilidad del conocimiento de los «primeros» instantes del Universo si un día se diera efectivamente la convergencia de los rayos luminosos emitidos en los primeros estadios de la expansión y llegados a feliz término después de la circunvalación del espacio. Aunque, por otra parte, no es preciso el recurso a esta convergencia de los rayos emitidos en el pasado para penetrar sus secretos. Precisamente, la mayoría de cuantos objetos terrestres contemplamos nos retrotraen a épocas muy anteriores a nosotros, pues la luz, que en este momento llega a nuestros telescopios, no lo hace sino después de viajes, a veces, de cientos y aun de miles de millones de años a través del espacio. Y éste es uno de los grandes problemas de la investigación cósmica; que la imagen del Universo que vemos no corresponde a un estado del mismo en algún momento, sino que es una superposición de datos de los más diversos tiempos y procedencias. Y es así como se palpa la importancia capital, que en el conocimiento del Cosmos juega la concepción del espacio y del tiempo. Y que no tan sólo el cambio del concepto, sino la simple manera de medir el tiempo, pueda llevar a concepciones tan distintas como son las dos imágenes cósmicas de Milne (que nos ha expuesto el Recipiendario), obtenidas según que se tome el tiempo cósmico t o el tiempo dinámico τ .

De hecho en nuestras concepciones científicas intervienen lo que podríamos llamar tres Universos diferentes: primero, el Universo de la experiencia espontánea, el que podríamos llamar «*Universo de los sentidos*» el cual abarca desde la bóveda estrellada hasta las florecillas del campo; pero del cual, no sólo la Física sino también la Fisiología y la Psicología nos enseñan que su carácter eminentemente subjetivo es tan sólo una traducción de nuestras imágenes cognoscitivas del mundo exterior; segundo, el que podríamos llamar «*Universo real*» en el que no existe formalmente cualidad alguna sensible de estas esenciales características que atribuimos a cuanto nos rodea (colores, luz, calor, sonidos, sabores, olores, etc.), sino sólo los mecanismos que los producen... El lazo de unión de ambos Universos lo constituye el tercer Universo, precisamente el Universo de la Ciencia, el que podríamos llamar «*Universo Físico*» el cual nos da la clave para pasar del primero al segundo; pero como su información es abstracta, de tipo físico-matemático (la luz, los colores, el calor radiante se reducen a ondas electro-magnéticas o fotones; la temperatura, al estado cinético de partículas individualmente imperceptibles; en vez de cuerpos sólidos, líquidos y gases diversos, estados de agregación de

moléculas, átomos, iones, etc.; en lugar de atracciones e interacciones, campos gravitatorios, magnéticos, eléctricos, nucleares...), la imagen «sensible» que podemos inferir de ellos, nos da una idea poco clara de la «realidad» y mucho más deficiente y problemática de lo que suele pensarse... De aquí los continuos «retoques» a que hay que estar sometiéndola y la explicación de lo que podría parecer versatilidad de algunos investigadores al cambiar frecuentemente sus concepciones cosmológicas.

Y sin embargo, nada más natural. Como nota con razón F. M. Biosca, un modelo integral del Universo debería dar razón de todos los hechos experimentales del Universo de la Física; y basta echar una ojeada a unos cuantos de éstos, para persuadirse de su increíble complejidad. Así, por ejemplo, por lo que a la *materia* se refiere, la forma en que aparece diseminada por el espacio, prácticamente «vacío», y reunida, por otra parte, en agrupaciones jerarquizadas (astros, galaxias, enjambres, y tal vez super-enjambres; núcleos, átomos, moléculas, células, organismos, etc.); predominio exorbitante del hidrógeno, y a la par, existencia de núcleos pesados, cuya formación exige temperaturas de miles de millones de grados. Si se atiende a la *energía*, sus manifestaciones tan diversas, como son la gravitatoria, la eléctrica, la magnética, la nuclear, la química, la vital, la mental... su equivalencia relativista con la masa... Por lo que se refiere a los *procesos*, el hecho de existir los reversibles y los irreversibles; y entre éstos, los de los organismos, los humanos; transformaciones de materia en energía y viceversa; reacciones de toda índole; generación de partículas y subpartículas, radiaciones, evolución, etc... Unos procesos que parecen regirse por leyes cuánticas y causalidad estadísticas y otros, al parecer, por leyes diferenciales y causalidad de tipo clásico; sin olvidar la entropía como clave de la flecha del tiempo. *Estructuras* del micro y del macro-cosmos, con tantas partículas y subpartículas clasificadas, relacionadas entre sí y con decisiva intervención del estado eléctrico; existencia de los diversos elementos químicos y varios centenares de isótopos estables o inestables: la «molécula de vida» de estructura helicoidal, el código genético de aplicación universal; las células, organismos y sociedades, el plasma y campos del mundo sideral. Y en relación al *movimiento* la isotropía que proscribire direcciones privilegiadas en el Cosmos (no válida para el micro-cosmos), las rotaciones, traslaciones, vibraciones, *spins*; los fenómenos ondulatorios, el límite teórico relativista para la traslación, la fuga de las galaxias... y finalmente por lo que se refiere a nuestro «Hic et nunc» el que no haya posiciones privilegiadas en el Cosmos; el que el tiempo de la Humanidad no pase de ser un «instante» en la evolución lentísima de su vida y más aún en la de los sistemas astronómicos y a la vez, que durante la vida del género humano hayan nacido muchas estrellas, que se han extinguido ya, y que este lapso de cerca de un millón de años sea de una duración fabulosa si se mide por la «vida» de los mesones y bimesones o en «años» teóricos del electrón (10^{-16} seg.) o en los llamados años nucleares (10^{-22} seg.).

Todo lo cual significa que todo cuanto sabemos del Universo lo ha deducido la Ciencia de una «instantánea» y aun tomada en posición poco favorable.

Causan admiración, pero al mismo tiempo vértigo, los esfuerzos para avanzar en la investigación del Cosmos. La Ciencia, al tender nuevos puentes cada día para salvar abismos abrumadores e insondables, va demoliendo también los viejos enlaces establecidos por la Poesía y la Tradición que contentaban a nuestros abuelos. Por esto se producen estos choques al derrumbarse viejas estructuras. No cabe duda que hubo quien odió a Newton porque había interrumpido el contacto entre las estrellas y la milicia celestial, entre el arco iris y el arca de Noé; porque desposeyó a los fenómenos físicos de su sentido poético tradicional...

.
*Porque este cielo azul, que todos vemos,
Ni es cielo ni es azul... ¡Lástima grande
Que no sea verdad tanta belleza!*

El Universo tiene una significación que reside en el inmenso misterio de su existencia. ¡Cuántos y cuán grandiosos esfuerzos son los que se requieren para dar un sentido escatológico a estos arcanos de la Ciencia!

Nuestro Recipiendario ha expuesto en forma clara el estado actual del problema y además sus conocimientos y formación teológica le han conducido mistatógicamente a las implicaciones teológicas de ciertas teorías cosmológicas con las que nos ha deleitado, examinándolos de una manera icástica con resultados alentadores al ver la anchura de corazón con que procura desbrozar el campo para que no se sienta nadie cohibido por sus creencias, para sostener la que le parezca a cada cual más probable. Es notable el hecho de que los datos experimentales concurren cada vez más a desautorizar las teorías que desde el punto de vista religioso pudieran parecer las menos ortodoxas; y no obstante, se esfuerza Romaña por salvaguardar la libertad de investigación para sostenerlas o rechazarlas de modo que no haya conflicto de conciencia. Con ello alcanza una meta que no puede estar más en la línea del Concilio Vaticano II, que tanto se ha esforzado en abrir y no cerrar.

* * *

La formación del P. Romaña en sus múltiples y, por consiguiente, variadas facetas, intelectuales, religiosas y humanas, se ha forjado en el seno de la Compañía de Jesús (que muchos imaginan de una disciplina férrea, anuladora de toda auténtica personalidad), donde él ha encontrado el ambiente propicio para sus estudios en la difícil y nunca acabada síntesis de obediencia y libertad, tradición y actualidad, características en la Orden de San Ignacio.

Desde el comienzo de su noviciado se identificará con el ideal de la

Compañía, el cual forma parte de su propio ser, como Sacerdote ejemplar. Y como la Compañía le confiara el Observatorio del Ebro, a él y sus vicisitudes vincula sus pensamientos. «¿Qué es para usted el Observatorio?», le preguntó hace aproximadamente diez años un periodista, paisano mío, al salir de una conferencia que dio en mi ciudad natal (4). Y sin pensarlo un momento le contestó: «Toda mi vida». Y así es. Y si sus investigaciones en vez de seguir el cauce de sus aficiones propiamente astronómicas, han derivado después hacia el campo de la Geofísica, y aun en éste no se han ceñido a una sola materia (el Magnetismo y la Electricidad terrestres), sino que se han extendido por todos sus dominios (Meteorología, Climatología, Sismología, etc.), ha sido debido a la complejidad de los problemas propios del Observatorio y a la necesidad de atender a todas sus Secciones y de representarlas dignamente en las Corporaciones Internacionales en que colabora.

Con su gran cultura científica y humanística, unida a su virtud, resulta un jesuita de cuerpo entero. Intrépido y fiel; clarividente y humano; es el paradigma de los sabios varones que le precedieron en el mando de su Observatorio y de los otros Observatorios de la Compañía a los que tomó como modelo, digno de imitación: el P. Cristóbal Scheiner, que en el siglo XVII constituyó con sus hermanos misioneros la primera Comisión Internacional para el estudio de los fenómenos solares; el P. Angelo Secchi, llamado con razón el fundador de la Astrofísica moderna; y de manera más inmediata los PP. Faura y Viñes, beneméritos fundadores de los Observatorios de Manila y La Habana, ambos jesuitas españoles y catalanes por más señas, que fueron creadores de los primeros servicios de previsión del tiempo, mucho antes de que se formaran las redes meteorológicas actuales; y más concretamente el Padre Cirera, fundador del Observatorio del Ebro, quien durante los últimos años del dominio español en Filipinas levantó el primer mapa magnético del Archipiélago y partes vecinas del Pacífico, y no menos el Padre Rodés, cuyo alto ideal siempre se cifró en colocar a España en lugar digno dentro del concierto científico mundial...

Posee Romañá doctrina y vida, cualidades indispensables para el investigador. Sus éxitos no han sido óbice para que conserve la misma ingenua sencillez de los años escolares. Jamás se enorgullece de sus triunfos merecidísimos y su encantadora humildad le permite hacerse perdonar la superioridad de sus conocimientos, que ofrenda a Dios.

Su conducta parece anticiparse a las recomendaciones contenidas en el mensaje del Concilio Vaticano II a los hombres de Ciencia:

«Continuad, continuad buscando sin desesperar jamás de la verdad. Recordad la palabra de uno de vuestros grandes amigos, San Agustín: *«Buscamos con afán de encontrar y encontramos con el deseo de buscar aún más»*. Felices los que consiguiendo la verdad, la buscan aún, con el fin de renovarla, profundizar en ella y ofrecerla

(4) Reus.

a los demás. Felices los que, no habiéndola encontrado, caminan hacia ella con un corazón sincero. Ellos buscan la luz de mañana con la luz de hoy, hasta llegar a la plenitud de la luz.»

Y luego más adelante prosigue:

«Nunca, quizá, gracias a Dios, ha parecido tan clara como hoy la posibilidad de un profundo acuerdo entre la verdadera Ciencia y la verdadera Fe, sirvientes una y otra de la única Verdad. No impidáis este preciado encuentro. Tened confianza en la Fe, esa gran amiga de la inteligencia. Alumbraos con su luz para descubrir la Verdad, toda la Verdad.»

* * *

La Real Academia al llamar a su seno al P. Romañá hizo un reconocimiento explícito de sus méritos. Hoy en su nombre le doy la bienvenida y le expreso nuestra seguridad de que estimamos nos honrará con su contribución y consejo y con la continuación de su fecunda e importante labor.

He dicho.

PRINCIPALES PUBLICACIONES DEL P. ROMAÑA

1. Entre 1926 y 1927: Artículos de Matemáticas en la Enciclopedia Espasa, por encargo del Prof. Terradas:
Torsión (Geom.), vol. 62, págs. 1508-1518
Tractriz, vol. 63, págs. 355-360
Variación, vol. 67, págs. 30-55
y otros de menor extensión, como Subnormal, Subtangente, Superposición, Verde (rayo), etc.
2. *Nota sobre el concepto de coordinación* (Revista Matemática Hispano-Americana, 1930, núms. 4-5).
3. *El Congreso Internacional de Matemáticas de Zurich* (Ibérica, 1932, núm. 950, págs. 262-272).
4. *Medio siglo de progreso en la determinación de los elementos del movimiento del Sol en el espacio por el método de las velocidades radiales* (Ibérica, 1935, núm. 1054, págs. 24-28; 1056, 59-64; 1068, 248-256; 1099, 360-364; 1936, número 1101, págs. 8-12; quedando la serie incompleta por la guerra y la destrucción de «Ibérica»).
5. *Resumen de las Observaciones de Magnetismo Terrestre y Electricidad Atmosférica efectuadas durante el año 1935* (Boletín Mensual del Observatorio del Ebro, vol. XXVI, págs. 228-230 y 239-270).
6. *Informe para el Comité para el estudio de la Caracterización Eléctrica de los Días, por encargo del P. Luis Rodés, miembro del mismo* (International Association of Terrestrial Magnetism and Electricity (I.A.T.M.E.), Transaction of Edinburgh Meeting, 1936, págs. 210-212).
7. *A propos de la caractérisation électrique des jours dans l'étude du gradient du potentiel atmosphérique* (I.A.T.M.E., Transactions of Washington Meeting, 1939, págs. 245-254).
8. *Los atrayentes problemas de la moderna Astronomía* (Editorial Redención, Madrid, 1940, 170 págs. en 12.").
9. *La Compañía de Jesús y la Astronomía* (Hechos y Dichos, 1941, núm. 85, págs. 467-478).
10. *Astronomía* (Espasa, Suplemento 1940-41, págs. 89-140).
11. *A propósito de la edad del Universo* (Revista Nacional de Educación, 1942, abril, págs. 85-102).
12. *Recientes progresos de la técnica astronómica* (Revista Nacional de Educación, 1942, noviembre, págs. 7-25).

13. *La obra astronómica de Galileo Galilei* (Revista Matemática Hispano-Americana, 1942, 4.ª serie, tomo II, 59 páginas).
14. *La difusión del Sistema de Copérnico* (Euclides, 1944, núms. 35 y 36, 23 págs.).
- 15-19. *La actividad solar y geomagnética en 1942* (Revista de Geofísica, núm. 1943, págs. 63-77). Idem en 1943 (R. de G., 1944, núm. 11, págs. 432-454). Idem en 1944 (id. 1946, núm. 17, págs. 51-87). Idem en 1945 (R. de G., 1947, núm. 21, págs. 84-115). Idem en 1946 (R. de G., 1947, núm. 24, págs. 565-602).
20. *Notas trimestrales sobre la actividad solar y geomagnética* (en Revista de Geofísica, de enero-marzo 1943 a octubre-diciembre 1946).
21. *Recientes progresos en nuestros conocimientos sobre el Sol y su influencia en los fenómenos geofísicos* (Asociación Española para el Progreso de las Ciencias, Congreso de Córdoba, 1944, págs. 125-153).
22. *El llamado «efecto-Tierra» en la actividad solar* (en colaboración con el doctor Torroja Menéndez. Revista de Geofísica, 1944-45, núms. 9, 12 y 15, 120 págs.).
23. *Nuevas orientaciones en el estudio del período undecenal y en el pronóstico de la actividad solar* (Urania, 1945, núm. 210, págs. 39-54).
24. *El predominio de las manchas solares al Este del meridiano central y la inclinación de sus ejes hacia el Oeste* (en col. con el Sr. Torroja. Urania, 1948, núm. 218, págs. 1-23).
- 25-26. *Breve resumen de los trabajos astronómicos realizados en España y Bibliografía Astronómica Española durante el período 1939-1945* (Urania, 1947, número 216, págs. 54-62). Idem durante el período 1945-48 (Urania, 1948, número 219, págs. 180-186).
27. *Contribution à l'étude des effets géomagnétiques des différentes manifestations de l'activité solaire* (en col. con el Sr. Princep Curto. I.A.T.M.E., Transactions of Oslo Meeting, 1948, págs. 355-357 en resumen).
28. *Contribution à l'étude de la variation séculaire de la constante magnétique locale G* (en col. con el Sr. Gaibar Puertas. I.A.T.M.E. Transactions of Oslo Meeting, 1948, resumen en pág. 451).
29. *Contribution à l'étude de l'influence de la Lune sur les courants telluriques* (en col. con el P. Cardús. I.A.T.M.E. Transactions of Oslo Meeting, resumen en págs. 511-512).
30. *Sur la période annuelle et diurne des tremblements de terre* (en col. con la señorita Aurora Lobato. Publications du Bureau Central Séismologique International, 1948, serie A, fasc. 17, págs. 205-215).
31. *Sobre el período anual y diurno en la frecuencia de terremotos* (en col. con la señorita Lobato. Urania, 1948, núm. 219, págs. 128-140).
32. *Contribución al estudio de la influencia de la Luna en las Corrientes Telúricas* (en col. con J. O. Cardús. S. J. Urania, 1949, núm. 220, págs. 151-164).
33. *Sobre el carácter general de la clasificación de las bahías geomagnéticas y su ley de aparición durante el día* (Geofísica Pura e Applicata, Milán, 1950, tomo XVIII, págs. 148-154).
34. *Sobre las bahías geomagnéticas en los Observatorios de México y el Ebro* (XIII Congresso Luso-Espanhol para o Progresso das Ciências, Lisboa, 1950, tomo III, págs. 5-19).

35. *Sur le caractère général de la loi de classification des baies géomagnétiques pour les latitudes moyennes* (I.A.T.M.E., Transactions of Brussels Meeting, 1951, resumen en pág. 307).
36. *Determination of the Moon's influence on the Earth-Currents by the Chapman-Miller Method* (en col. con el P. Cardús, I.A.T.M.E., Transactions of Brussels Meeting, resumen en pág. 312).
37. *Note on a preliminary direct determination of the lunar phase effect in the magnetic declination at Tortosa* (en col. con el P. Cardús, I.A.T.M.E., Transactions of Brussels Meeting, citación en pág. 303).
38. *Sur la distribution saisonnière des tremblements de terre* (Association Internationale de Séismologie et de Physique de l'Intérieur de la Terre, Comptes Rendus des Séances de la IX Conférence, Bruselas, 1951, resumen en págs. 48 y 49).
39. *Sobre la posible explicación térmica del período anual en la frecuencia de terremotos* (volumen centenario del Instituto de Coimbra, Coimbra, 1951).
40. *Le Monde, son origine et sa structure aux regards de la Science et de la Foi* (cap. III de la obra «Essai sur Dieu, l'Homme et l'Univers», Castermann, Tournai-Paris, 1950, págs. 113-172; 2.ª ed., 1951, págs. 113-172; 3.ª ed., 1953, págs. 49-110 (es el cap. II); 4.ª ed., 1957, págs. 49-110; traducción inglesa, Kenedy & Sons, Nueva York, 1953; italiana, Marietti, 1953; alemana, Verlag Styria, Graz, Viena, Colonia, 1957; hay además traducción portuguesa y otra inglesa, en Madrás, India, del capítulo del autor sólo).
41. *La expedición científica a la Guinea Española con motivo del eclipse total de Sol de 25 de febrero de 1952* (Boletín de la Real Sociedad Geográfica, 1952, núm. 280, 34 pág.).
42. *Expedición a Guinea para la observación del eclipse total de Sol de 25 de febrero de 1952* (Urania, 1953, núm. 234, 13 págs.).
43. *Ondas hertzianas y exploración del Universo* (Origen, 1953, núm. 1, págs. 15-18).
44. *Distancias estelares* (Origen, 1953, núm. 8, págs. 12-17).
45. *La vuelta en Astrofísica a la idea de creación* (Esto Vir, Valencia, 1954, 6 páginas).
46. *The Range of the diurnal magnetic variation in Spanish Guinea near the Equator* (International Association of Geomagnetism and Aeronomy (= I.A.G.A., nueva denominación de I.A.T.M.E.), Transactions of the Rome Meeting, 1954, resumen en págs. 18 y 322).
47. *Étude d'un siècle de variation séculaire de F et G et de D et I dans l'ensemble des Observatoires Magnétiques du Globe* (en col. con el doctor Gaibar Puertas, I.A.G.A., Transactions of the Rome Meeting, resumen en pág. 14).
48. *Influence de la Lune sur la composante horizontale à Moka, Fernando Poo* (I.A.G.A., Transactions of Rome Meeting, citación en pág. 34).
49. *La amplitud de la variación magnética diurna en las proximidades del ecuador. Observaciones magnéticas en Guinea Española* (en col. con el P. Cardús, Urania, 1955, núm. 241, págs. 181-220).
50. *El Año Geofísico Internacional* (Ciclo de Conferencias organizado por el Instituto Geográfico y Catastral, 1.ª conf., Madrid, 1955, 25 págs.).

51. *International Data on Magnetic Disturbances. Part I: Sudden Commencements and Solar-Flare Effects. Preliminary Report* (en col. con J. Bartels y J. Veldkamp, trimestralmente en *Journal of Geophysical Research*, Washington, a partir del primer trimestre de 1955).
52. *El Año Geofísico Internacional 1957-1958* (Arbor, 1956, núm. 121, 17 págs.).
- 53-54. *Geomagnetic Indices K and C, 1955* (en col. con J. Bartels y J. Veldkamp. International Union of Geodesy and Geophysics, I.A.G.A. Bulletin núm. 12 j, Den Haag, 1957, 124 págs.). — *Idem 1956* (I.A.G.A. Bulletin núm. 12 k, Amsterdam, 1959, viii + 160 págs.).
55. *Symposium sur les Variations Rapides géomagnétiques et telluriques*, Copenhague. 1957 (Chronique de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale, núm. 4, págs. 123-140).
56. *Rapport du Comité Spécial n.º 10 (Variations Rapides et Courants Telluriques) pour l'Assemblée Générale de Toronto, 3-14 Septembre 1957* (I.A.G.A., Toronto Meeting, documento núm. 57, 22 págs.).
57. *Las Corrientes Telúricas en Tortosa a fines del siglo pasado* (volumen conmemorativo del cincuenta aniversario del Observatorio Fabra, 1957, 15 págs.).
58. *El Año Geofísico Internacional 1957-1958* (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, sesión de clausura del XIV Pleno, 1958, 69 págs.).
59. *Provisional Atlas of Rapid Variations* (I.A.G.A., Committee on Rapid Variations and Earth Currents, Tortosa, 1958, 20 págs.).
60. *El estudio de las variaciones rápidas del campo magnético terrestre* (Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, 1958, núm. 50, págs. 347-363).
61. *El Año Geofísico y la investigación con cohetes y satélites artificiales* (Arbor, 1958, núms. 153-154, 40 págs.).
62. *Geomagnetic Data 1957: Indices K and C, Rapid Variations* (en col. con J. Bartels y J. Veldkamp. International Union of Geodesy and Geophysics, I.A.G.A. Bull. núm. 12 l, Amsterdam, 1961, x + 281 págs.).
63. *Variaciones magnéticas rápidas durante el AGI y el ACG* (en col. con J. O. Cardús. *Urania*, 1961, núm. 254, págs. 201-224).
64. *Rapport du Président du Comité N.º 10 de l'I.A.G.A. au Symposium d'Utrecht* (en Rapid Magnetic Variations. Utrecht Symposium, I.A.G.A. Bulletin número 16 c, Tarragona, 1961, págs. 234-240).
65. *Instructions for the Atlas of Rapid Variations* (idem, págs. 249-251).
66. *Geomagnetic Rapid Variations during IGY and IGC* (en col. con J. O. Cardús. *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 17, supl. A-II, 1962, págs. 47-55).
- 67-71. *Geomagnetic Data 1958, Indices K and C* (en col. con J. Bartels y J. Veldkamp. International Union of Geodesy and Geophysics, I.A.G.A. Bull. núm. 12 m-l, Amsterdam, 1962, viii + 113 págs.). — *Idem 1959* (I.A.G.A. Bull. núm. 12 n-1, Amsterdam, 1963, viii + 103 págs.). — *Idem 1960* (I.A.G.A. Bull. núm. 12 o-1, Amsterdam, 1963, viii + 100 págs.). — *Idem 1961* (I.A.G.A. Bull. núm. 12 p-1, Amsterdam, 1964, viii + 106 págs.). — *Idem 1962* (I.A.G.A. Bull. núm. 12 q-1, Amsterdam, 1965, viii + 101 págs.).

- 72-74. *Geomagnetic Data 1958, Rapid Variations* (en col. con J. Bartels y J. Veldkamp, International Union of Geodesy and Geophysics, I.A.G.A. Bull. núm. 12 m-2, Amsterdam, 1962, vi + 95 págs.). — *Idem 1959* (I.A.G.A. Bull. núm. 12 n-2, Amsterdam, 1963, vi + 69 págs.). — *Idem 1960* (I.A.G.A. Bull. núm. 12 o-2, Amsterdam, 1964, vi + 64 págs.).
75. *El estudio de las Corrientes Telúricas* (Scientia, julio-agosto 1962, Asso (Como, Italia), 1962, págs. 150-156). Traducción francesa (por R. Daniel, Scientia, suplemento julio-agosto 1962, Asso, 1962, págs. 74-80).
76. *Año Geofísico Internacional* (en Gran Enciclopedia del Mundo, vol. 2. col. 206-226, Bilbao, 1962).
77. *Sobre algunas singularidades de las curvas de frecuencia de horas con pc en los Observatorios de la zona ecuatorial* (en «Geomagnética», publicación conmemorativa del 50 aniversario del Observatorio Magnético de San Miguel, Azores, Lisboa, 1962, págs. 217-227). — *Concerning some features of the curves of occurrence-frequency of pc's at Observatories in the equatorial zone* (traducción inglesa por E. R. Hope, Defence Research Board of Canada, Ottawa, 1965, 12 págs.).
78. *Sol* (en Gran Enciclopedia del Mundo, vol. 17. col. 535-542, Bilbao, 1963).
79. *Instructions for the registration of pi's and pc's and other rapid variations during the I.Q.S.Y.* (Circular letter on the Observatories, Tortosa, 1964).
80. *Galileo Galilei, científico y creyente* (Arbor, núm. 241, Madrid, 1966, págs. 5-38).

Además, desde 1939 a 1950 fue el único responsable del Boletín del Observatorio del Ebro y desde 1951 a 1962 de su Sección Sismológica; y asimismo desde 1947 es el editor principal de la revista «Vrania», órgano de la Unión Nacional de Astronomía y Ciencias Afines (del Consejo Superior de Investigaciones Científicas).

INDICE

INTRODUCCIÓN	5
ELOGIO DEL PROF. SÁNCHEZ PÉREZ	9
1. ^a PARTE. FORMACIÓN GRADUAL DE NUESTRA IMAGEN DEL COSMOS	13
1. La obra de William Herschell	13
2. La preponderancia de la Vía Láctea	17
3. La vuelta al estudio de las nebulosas extragalácticas	20
4. La entrada en servicio del telescopio de Monte Palomar	24
5. Perfeccionamiento de los métodos de medida	25
6. Las masas de las nebulosas y de la materia intergaláctica	29
7. La aportación de la Radioastronomía	30
8. La imagen de conjunto del Universo	33
2. ^a PARTE. LAS TEORÍAS COSMOLÓGICAS	37
1. Concepto de la Cosmología	37
2. Los principios cosmológicos	40
3. Cosmologías prerrelativistas	42
4. La ley einsteiniana de la gravitación	45
5. El Universo cilíndrico de Einstein	52
6. El Universo observablemente limitado de De Sitter	58
7. Los modelos expansivos de Universo	61
8. El átomo primitivo de Lemaitre	69
9. Modelos que prescinden del Principio Cosmológico	75
10. Modelos newtonianos	77
11. Modelos de Universo deducidos de principios universales	81
12. El concepto múltiple del tiempo y el Universo cinemático de Milne	81
13. Elucubraciones sobre las relaciones entre el macro y el microcosmos	94
14. El Uranoide de Eddington	96
15. Los modelos de Universo de Dirac y Jordan	100

16. El Universo estacionario de la Escuela de Cambridge. Teorías de Gold y Bondi, Hoyle y McCrea	107
17. La concepción cosmológica de Fantappié	115
3.ª PARTE. LAS PRUEBAS DE LAS TEORÍAS COSMOLÓGICAS	123
1. El examen experimental de los modelos cosmológicos	123
2. Expresión de las ecuaciones de campo en función de magnitudes directa o indirectamente observables	126
3. La relación entre los números de nebulosas y su magnitud aparente.	129
4. La relación entre la magnitud aparente y el corrimiento al rojo del espectro	141
5. La relación entre el corrimiento al rojo y los diámetros de los enjambres	152
6. Los tests radioastronómicos y sus dificultades	159
7. Los recuentos de radiogalaxias	161
8. El ruido de fondo del cielo	175
9. Los tests del grupo de «efectos de objeto». La edad del Universo	177
10. Los restantes criterios de «efectos de objeto»	185
4.ª PARTE. IMPLICACIONES TEOLÓGICAS DE ALGUNAS TEORÍAS COSMOLÓGICAS	195
EPÍLOGO	219
DISCURSO DE CONTESTACIÓN DEL EXCMO. SR. D. FRANCISCO DE A. NAVARRO BORRÁS	223
PRINCIPALES PUBLICACIONES DEL P. ROMAÑA	239