

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS  
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

# EXPLOSIONES CÓSMICAS

DISCURSO LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN  
COMO ACADÉMICO DE NÚMERO POR EL

**EXCMO. SR. D. JUAN MARÍA MARCAIDE OSORO**

Y CONTESTACIÓN DEL

**EXCMO. SR. D. ALBERTO GALINDO TIXAIRE**

EL DÍA 30 DE MAYO DE 2007



MADRID  
Domicilio de la Academia  
Valverde, 22

Manuscrito entregado en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 21 de Junio de 2006, a las 14h 26min (12h 26min UT, Solsticio de Verano).

Revisado y entregado a imprenta el 10 de Noviembre de 2006.

Depósito legal: M. 22.423-2007

Imprime:

Realigraf, S. A.

Pedro Tezano, 26. 28039 Madrid

# ÍNDICE

Introducción.....	5
A. Paradigma actual del universo .....	9
B. Primeras estrellas, agujeros negros masivos y estructuras galácticas .....	25
C. Consideraciones energéticas.....	35
D. Supernovas y estallidos de rayos gamma (GRB) .....	39
E. Digresión complementaria.....	61
F. Supernovas históricas .....	73
G. Supernova SN1987A.....	81
H. Supernova SN1993J.....	93
Reflexiones sobre el futuro.....	107
Contestación del Excmo. Sr. D. Alberto Galindo Tixaire .....	113

Excmo. Señor Presidente de la Real Academia de Ciencias,  
Excmos. Señores Académicos,  
Compañeros, Amigos, Señoras y Señores,

## INTRODUCCIÓN

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a los miembros de esta prestigiosa institución por admitirme en su corporación. Muy en especial, quiero agradecer a los Académicos D. Francisco Ynduráin, D. Alberto Galindo y D. Antonio Hernando por haberme propuesto para ocupar la plaza con medalla número 45. Considero un honor el haber sido propuesto y elegido. También considero una obligación dedicarle a esta Academia una buena parte de mi esfuerzo a partir de ahora. La obligación la acepto gustosa y es sólo mía. Sin embargo, el honor lo quiero, y debo, compartir con más personas, algunas de ellas presentes hoy. Sin el concurso de mis discípulos no habría acometido algunas investigaciones, sin el magisterio profesional y personal de algunos de mis profesores no me hubiera iniciado en la investigación científica, y sin mi familia todo ello no hubiera tenido el sentido que ha tenido. Con todos ellos comparto el honor y a todos les doy las gracias.

Con la medalla 45 no me ha precedido nadie. Sin embargo, ha habido dignos precedentes de astrónomos en la Academia como D. José María Torroja y D. Antonio Romañá, por citar los más recientes, aunque el primero leyera, hace 38 años, su discurso de recepción sobre un tema de Geodesia.

Hace 41 años, D. Antonio Romañá leyó un discurso de recepción de título *Idea sobre el estado actual de la cosmología*. Fue un discurso muy interesante en el que incluso hubo referencias detalladas a la radioastronomía, disciplina entonces todavía emergente. Aún así, el autor se excusó por haber claudicado de su idea inicial de ofrecer a la Academia un tratado más completo con motivo de su ingreso. También se excusó por su tardanza en presentar el discurso debido a

otras obligaciones profesionales que no pudo eludir. Yo debería hacer sus palabras mías. Me he retrasado y he claudicado de presentar extensamente algunas ideas, entre ellas las referidas a la formación de las primeras estrellas y los primeros agujeros negros masivos. Mis averiguaciones no han concluido. En esos temas, las ideas con promesa son muy recientes e inmaduras, y no es el campo donde investigo activamente. Además, mi ingreso no podía dilatarse más.

Por muy completo que hubiera sido el discurso de D. Antonio Romañá, las evidencias observacionales lo hubieran dejado pronto obsoleto. Por poner sólo un ejemplo, en 1964, mientras Romañá preparaba su discurso, Penzias y Wilson descubrían la radiación de fondo de microondas. Este descubrimiento marcó un antes y un después. Treinta años más tarde, el descubrimiento de la expansión acelerada del universo ha marcado otro hito en la cosmología. Entre estos dos periodos se descubrieron los cuásares, los púlsares, el movimiento superlumínico, las enanas marrones, y un larguísimo etcétera que hacen de la astronomía una de las ramas de la ciencia más fascinantes.

Con este discurso, que presento a continuación, pasará algo parecido a lo que aconteció con el discurso de Romañá. Afortunadamente, pronto las nuevas observaciones astronómicas lo dejarán obsoleto. Aún así, he querido dotarlo de cierta completitud, en particular en lo que refiere a las explosiones supernovas cuya estructura espacial se ha podido estudiar con gran detalle, ya que estas explosiones suceden rara vez. En efecto, aunque es cierto que el ritmo de detección de supernovas supera el de una detección diaria, la frecuencia estimada para explosiones supernovas en galaxias como la nuestra es de una explosión cada 100-200 años. De hecho, la última en la Vía Láctea la avistamos hace 400 años. La mayoría de las supernovas tienen lugar a distancias cósmicas, pero, afortunadamente, las supernovas SN1987A y SN1993J tuvieron lugar en galaxias que no están tan lejos (165.000 y 10.000.000 años-luz, respectivamente) y sus estructuras se han podido estudiar con gran detalle.

Mis comienzos como radioastrónomo tuvieron lugar en temas relacionados con núcleos activos de galaxias, cuásares, astrometría de alta precisión, movimientos superlumínicos, etc. En suma, en temas que no tenían nada que ver con las explosiones cósmicas,

aunque trataban de fenómenos con liberaciones de grandes energías en procesos altamente relativistas. La percepción del universo como algo formado a base de procesos violentos es una percepción reciente. Donde antes se veía una formación estelar a partir de una fragmentación y colapso esférico, y pausado, de nubes moleculares y de polvo, ahora se encuentra un periodo de formación proto-estelar con emisión de chorros bien colimados de gas. Donde antes se veía una evolución pausada de galaxias, ahora se ven colisiones de galaxias y canibalismo galáctico, que dan lugar a brotes de formación estelar. Los brotes de formación estelar dan, a su vez, lugar a brotes de muerte estelar, pues la evolución de las estrellas masivas dura muy poco, meramente millones de años. Mientras unas estrellas nacen, otras mueren, incluso en un mismo entorno espacial. Cuando las estrellas masivas mueren dan lugar a estrellas de neutrones o agujeros negros. El concepto de agujero negro ha pasado de ser algo esotérico a algo común. Hay evidencia irrefutable de agujeros negros estelares y de agujeros negros masivos en los centros de las galaxias. Incluso la coalescencia de agujeros negros con estrellas de neutrones se invoca para explicar algunas explosiones cósmicas que conocemos como estallidos de rayos gamma de corta duración.

Llegué a interesarme en las explosiones cósmicas de la mano de la oportunidad que brindó la supernova SN1979C para determinar la constante de Hubble. Para determinar la distancia a esta supernova utilizamos el procedimiento novedoso de comparar su expansión radial (estimación común, a partir de los espectros en el visible) con su expansión angular (estimación novedosa, a partir de observaciones de radio interferometría intercontinental con gran resolución angular). La novedad hizo que el eco de ese trabajo llegara al gran público desde las páginas del New York Times y desde otros medios de comunicación. Desde entonces, la sensibilidad y resolución de la instrumentación radioastronómica han permitido estudiar con gran resolución angular las estructuras de una media docena de supernovas de nuestro entorno (dentro de un radio de 60 millones de años-luz).

Los telescopios ópticos gigantes y los radiotelescopios han permitido estudiar, aunque sin resolución angular, las características de varios cientos de supernovas lejanas y de casi un centenar de estallidos de rayos gamma (Gamma-Ray Bursts, GRB). Los GRB, cuya

asociación con la supernovas data de 1998, se han descubierto hasta distancias equivalentes a cuando el universo tenía 6% de la edad actual. Existen razones bien fundadas para pensar que este tipo de explosiones tuvieron lugar ya cuando el universo tenía el 1% de la edad actual y que estas explosiones jugaron entonces un rol esencial en el modo en que se formaron las galaxias. Sin embargo, esto no ha sido todavía comprobado. Uno de los retos está ahí, en llegar a observar esos eventos tan lejanos.

Por otro lado, no por mirar a los confines del universo debemos de dejar de estar preparados para un posible evento cercano y grandioso: la última supernova en nuestra galaxia la avistaron, entre otros, Galileo y Kepler hace ya más de 400 años. No dispusieron del telescopio para observarla. La próxima supernova galáctica llegará cualquier día. Es razonable pensar que, esta vez, no nos pillaré sin instrumentación para desvelar sus secretos.

Permítanme que me refiera a estos temas en más detalle.

## A. PARADIGMA ACTUAL DEL UNIVERSO

La cosmología moderna descansa, como todas las ciencias ciertas, sobre evidencias experimentales. En el caso del cosmos se trata de una evidencia observacional, es decir de una evidencia experimental pasiva. El **primer paso decisivo** hacia la cosmología moderna lo dio Hubble, en 1929, al descubrir la expansión del universo. Hubble descubrió que la velocidad de recesión de las galaxias, medidas por el desplazamiento de las líneas espectrales, es proporcional a la distancia a éstas, determinada entonces por el recién desarrollado método de las cefeidas. Como es habitual en la frontera experimental, Hubble descubrió la ley que ahora lleva su nombre de manera poco rotunda, con un apreciable margen de error, como puede verse en la figura A1, que reproduce la figura y el epígrafe originales de Hubble.

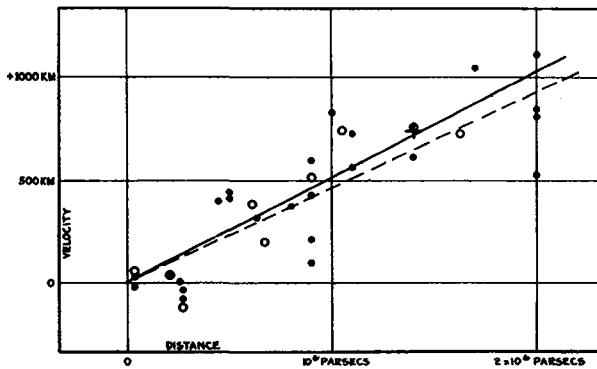


FIGURE 1  
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.

FIGURA A1. Descubrimiento de la expansión del universo (Hubble 1929).

Aún así, su impacto fue extraordinario. Lo fue en parte porque las soluciones de Friedman (1922) a la ecuación de Einstein (1916)



contemplaban de modo natural tal expansión, a pesar de que Einstein mismo la suprimiera, en 1917, introduciendo artificialmente el parámetro  $\Lambda$ , conocido como Constante Cosmológica, para obtener una solución estacionaria más acorde a los prejuicios de la época. El prejuicio de Einstein era natural a falta de evidencia observacional contraria.

La ley de Hubble ha sido estudiada y refinada continuamente utilizando galaxias cada vez más distantes (véase la figura A2 con una escala mil veces mayor que la escala original de Hubble). Sin embargo, la estimación de la constante de Hubble,  $H_0$ , ( $v_{gal} = H_0 d_{gal}$ ) ha sido objeto de fuertes desacuerdos entre grandes astrónomos hasta hace bien poco. La afirmación anterior puede parecer paradójica, pero no lo es. La expansión en sí se podía determinar cada vez con mayor precisión, pues la calibración relativa de los datos de cada observador mejoraba. Sin embargo, la calibración absoluta entre los observadores difería considerablemente, debido a los diferentes métodos utilizados.

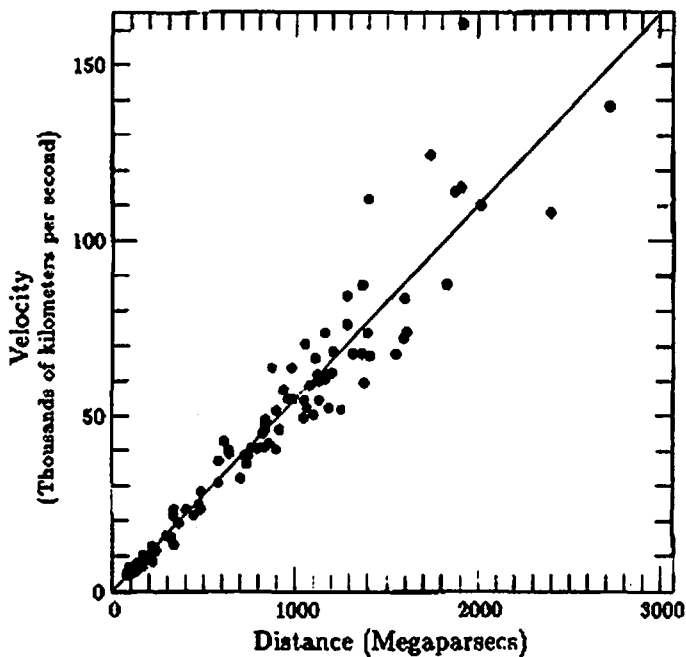


FIGURA A2. Representación de la ley de Hubble debida a Sandage. Nótese que la escala de esta gráfica es mil veces mayor que la escala de la figura A1.

Esta polémica, que se personalizó durante mucho tiempo entre de Vaucouleurs y Sandage, parece haberse zanjado recientemente. Nuevas técnicas han determinado el valor de la constante  $H_0$ :  $73 \pm 8 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  (Freedman et al. 2001);  $71 \pm 4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  (Spergel et al. 2006).

El perfeccionamiento reciente de la calibración de las supernovas de tipo Ia como candelas estándar ha permitido calibrar la distancia más lejos que con ningún método anterior. Con ello se ha encontrado (Schmidt et al. 1998, Riess et al. 1998, Perlmutter et al. 1999) que la velocidad de recesión de las galaxias en las que tienen lugar las supernovas es más grande de lo esperado con el prejuicio al uso. Hasta 1998, el prejuicio era el considerar que el universo se estaba desacelerando en todo momento y que lo que había que dilucidar era si el universo era cerrado, plano o abierto, según la densidad de energía en él fuera superior, igual o inferior a la densidad crítica.

Las mediciones de las supernovas, y de las galaxias en las que residen, son fotométricas y espectroscópicas. Sin embargo, las traducciones de las medidas fotométricas en distancias hacen uso de los modelos teóricos de la estructura espacio-temporal del universo. Brevemente, las mediciones fotométricas se transforman en distancia de luminosidad con una métrica determinada (la de Robertson-Walker) para la estructura del espacio-tiempo. Es decir, a diferencia de las medidas iniciales de Hubble en el universo relativamente próximo, que pueden luego interpretarse dentro de la Teoría General de la Relatividad pero que no necesitan de un soporte teórico, la medición de la expansión del universo con supernovas de tipo Ia tiene lugar dentro de un fuerte entramado teórico. Por tanto, a la hora de aceptar las consecuencias de las mediciones de las distancias con las supernovas de tipo Ia hay que entender bien qué parte es observacional y qué parte depende del edificio teórico. La figura A3 es una representación moderna, y precisa, de la ley de Hubble y, a la vez, incluye la evidencia de que la expansión es acelerada.

La expansión del universo determinada con las supernovas de tipo Ia resulta ser acelerada al menos para tiempos posteriores a  $z = 0,4$ , donde  $z$  es el corrimiento al rojo definido observacionalmente por la fórmula siguiente:  $1+z = \lambda_{\text{observador}} / \lambda_{\text{emisor}}$ . También existe

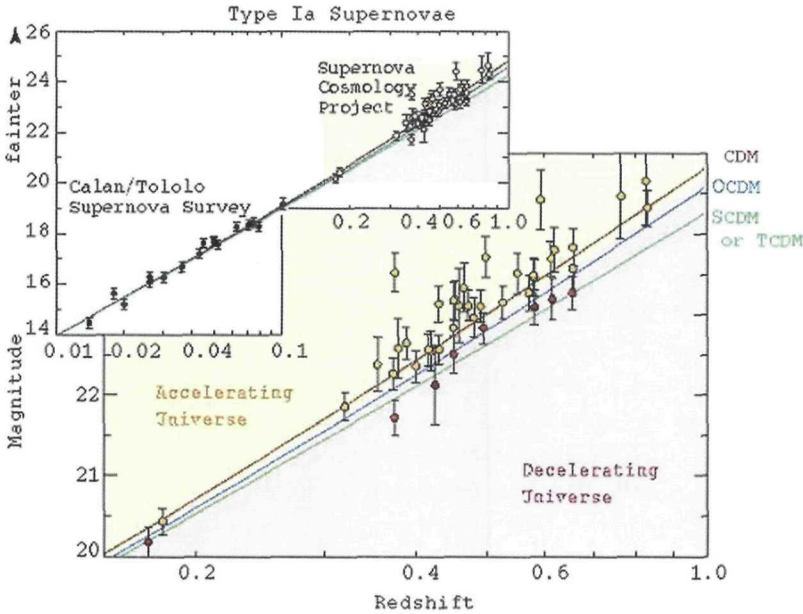


FIGURA A3. Expansión del universo medida utilizando supernovas de tipo Ia como candelas estándar. Los datos son consistentes con un universo acelerado. (Cortesía de Bahcall).

evidencia preliminar reciente, a partir de estudios de supernovas de tipo Ia hasta  $z \cong 2$ , de que durante la expansión del universo ha habido previamente una fase de desaceleración (Riess et al 2004). De hecho, una eventual determinación precisa del cambio del régimen desacelerado al acelerado daría una información inestimable sobre la densidad de energía relativa de los distintos constituyentes del universo. Y es que una de las consecuencias directas de las mediciones de distancia con las supernovas de tipo Ia es la necesidad de considerar una energía oscura, o una Constante Cosmológica, que tiende a acelerar la expansión y, oponiéndose a la atracción gravitatoria, llega a dominar a la expansión a partir de la edad del universo correspondiente a un corrimiento al rojo de 0,4.

Esto nos lleva al aspecto de la constitución del universo. La presencia de materia ordinaria, materia bariónica, que en mayor o menor grado delata su presencia a partir de la radiación que emite, es evidente. Por otro lado, los astrónomos han tenido evidencia de materia oscura desde hace un tiempo a partir, sobre todo, de las curvas de velocidad de rotación de las galaxias. Las medidas de la

velocidad de rotación de las galaxias espirales, a partir de las curvas de rotación del HI (emisión hiperfina del hidrógeno neutro), indican que esta velocidad de rotación se mantiene casi constante más allá de la extensión de la emisión visible, como se puede ver en la figura A4.

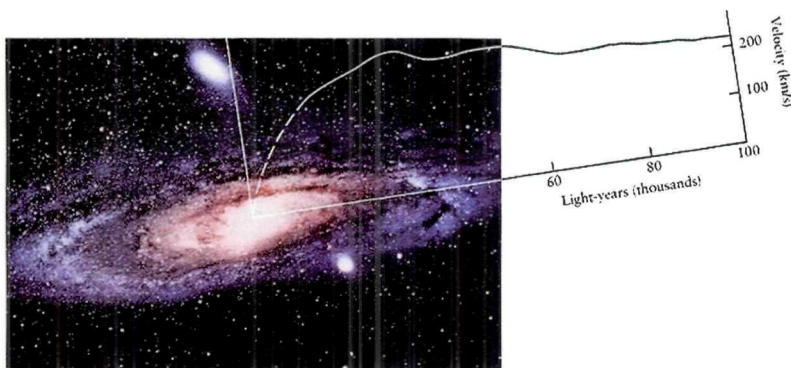


FIGURA A4. Curva de rotación de la galaxia M31 (Andrómeda), representativa de galaxia espiral, que muestra evidencia de materia oscura al no decaer la curva de velocidad para grandes distancias radiales. (Cortesía de Rees).

Mediciones recientes de monóxido de carbono en las partes más externas de la galaxia NGC4414 (Braine & Herpin, 2004) indican que hay materia bariónica, sobre todo hidrógeno molecular, a doble distancia que el límite de la emisión visible, pero también indican que esa densidad de materia es mucho menor que la necesaria para producir las curvas de rotación observadas. En definitiva, añade evidencia observacional de materia oscura en esta galaxia. Por otro lado, la necesidad de materia oscura para explicar otros fenómenos astrofísicos, que se comentarán más adelante, es patente.

Las observaciones de las supernovas de tipo Ia son muy sensibles al contraste entre la parte atractiva y repulsiva del universo e indican que (ahora, es decir, en este momento de la expansión del universo) la proporción entre las densidades de energía de las partes repulsiva (energía oscura) y atractiva (materia bariónica y oscura) es de aproximadamente 3.

El **segundo paso decisivo** hacia la cosmología moderna se dio a partir de las mediciones de las abundancias de deuterio y de los

elementos ligeros. Este paso se dio progresivamente a partir de los trabajos teóricos de von Weizsäcker (1938) y Bethe (1939), que permitieron conocer los mecanismos nucleares de generación de la energía solar, de Alpher, Bethe & Gamow (1948), que consideraron la síntesis primigenia del helio en posibles condiciones tempranas de lo que después se conocería como Big Bang, y sobre todo a partir del monumental trabajo de Margaret y Geoffrey Burbidge, Fowler & Hoyle, en 1957, sobre la síntesis de los elementos en las estrellas.

El conjunto de estos trabajos lograban explicar la síntesis de todos los elementos químicos a partir de unas condiciones plausibles cuando el universo tenía menos edad que 1 segundo, primero como síntesis primordial, que duraba unos minutos, y luego como síntesis estelar. Es paradójico que la contribución esencial de Hoyle tuvo justamente lugar a la vez que el se oponía visceralmente al modelo del Big Bang, al que incluso dio nombre sin quererlo en una mofa radiofónica.

El conocimiento actual de las reacciones nucleares ha permitido refinar las predicciones para la síntesis de elementos y ha permitido establecer las predicciones de los elementos primigenios para distintas densidades bariónicas del universo. En la figura A5 se muestran los resultados de estas difíciles mediciones, que son consistentes con que aproximadamente un 4% de la materia del universo es bariónica (aunque todavía sólo detectemos emisión electromagnética del 1%).

El **tercer paso decisivo** hacia la cosmología moderna lo dieron los radioastrónomos Penzias & Wilson (1965), cuando descubrieron la radiación de fondo de microondas (RFM). Su descubrimiento fue casual<sup>1</sup>. La correcta interpretación teórica del exceso de radiación que observaron en su radiotelescopio tuvo el beneficio de los trabajos teóricos que, por esas fechas, se llevaban a cabo en la Universidad

---

<sup>1</sup> Lo que no quiere decir que fue fruto del azar, nada más lejos de ello. Fue fruto de un tenaz empeño en descubrir el sentido de una minúscula parte de señal que entraba en sus detectores. El mero hecho de darse cuenta de la existencia de esa minúscula parte de señal suponía que conocían a la perfección las características técnicas de su instrumentación y que podían caracterizar con precisión el resto de la señal. La perseverancia en el empeño de dar con el origen de partes ínfimas y desconocidas de la información es, casi siempre, condición necesaria para los descubrimientos.

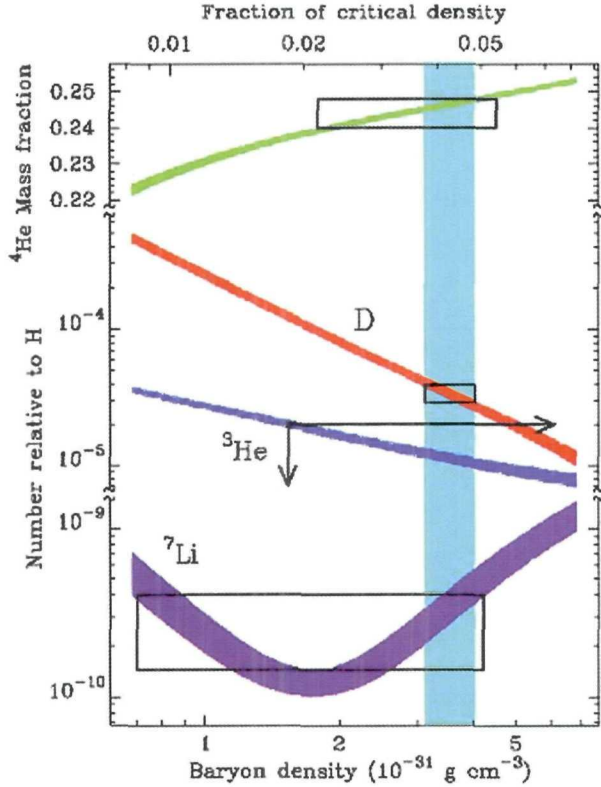


FIGURA A5. Abundancias de los elementos químicos de la síntesis primigenia para distintas densidades del universo. Los rectángulos y flechas indican los valores compatibles con las observaciones.

de Princeton y que habían sido precedidos, aunque ellos lo ignoraran, por otros de Gamow y colaboradores. La radiación medida a la longitud de onda de 7,35 cm correspondía a la radiación de un cuerpo negro a la temperatura de  $3,5 \pm 1,0$  K. La notable isotropía de la radiación fue la marca que indicó a Penzias y Wilson que esa radiación podría ser una reliquia de otra radiación mucho más caliente producida al comienzo del universo y cuya temperatura habría disminuido por la acción de la expansión del universo. Sin embargo había que demostrar que el espectro de esa radiación correspondía al espectro de un cuerpo negro y también había que poner límites muy estrictos a la isotropía.

Veinticinco años de esfuerzos por radioastrónomos trabajando en diversas longitudes de onda y con diversas técnicas confirmaron

razonablemente el espectro de cuerpo negro de la RFM y pusieron límites de hasta una parte en cien mil a la posible anisotropía. Esos 25 años de esfuerzos fueron superados en un solo día de 1989, cuando el instrumento FIRAS a bordo del observatorio espacial COBE (Cosmic Background Explorer) produjo en 9 minutos de observación el espectro reproducido en la figura A6 (y luego durante 10 meses lo mejoró).

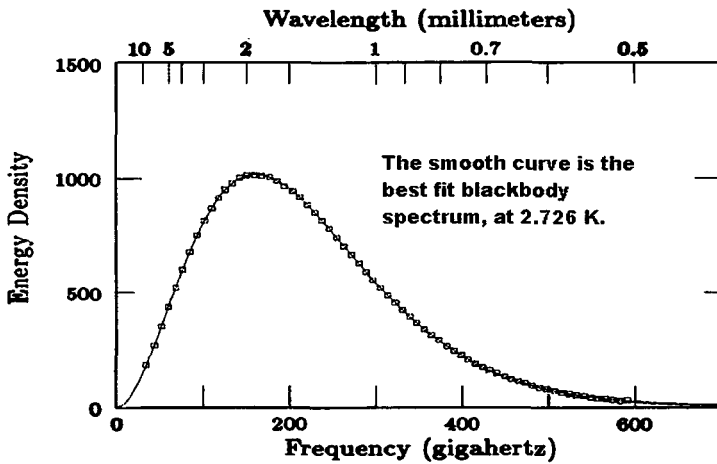


FIGURA A6. Espectro de la radiación de fondo tomado por COBE y ajuste de una función de Planck de  $T = 2,726$  K a los datos. Las incertidumbres de los datos están incluidas en los cuadrados que indican el valor medido. (Cortesía de NASA).

El espectro continuo correspondía muy precisamente a una función de Planck. Por otro lado, COBE acabó con la era de los límites a la posible anisotropía de la RFM, ya que midió la anisotropía misma e hizo el primer mapa del cielo de esta anisotropía combinando mapas de la emisión de microondas en 3 longitudes de onda y dos canales independientes por longitud de onda. El primer mapa de anisotropías se muestra en la figura A7.

Ese mapa de la anisotropía de la RFM fue la puerta que abrió el acceso a una nueva ciencia<sup>2</sup>. Ese mapa permitía contrastar los distintos modelos teóricos propuestos para los primeros instantes de universo. En la interpretación más sencilla, y comúnmente aceptada,

<sup>2</sup> [Nota añadida en imprenta] Por ello, los dos principales líderes del proyecto COBE, John Mather y George Smoot, han sido galardonados con el Premio Nobel de Física 2006.

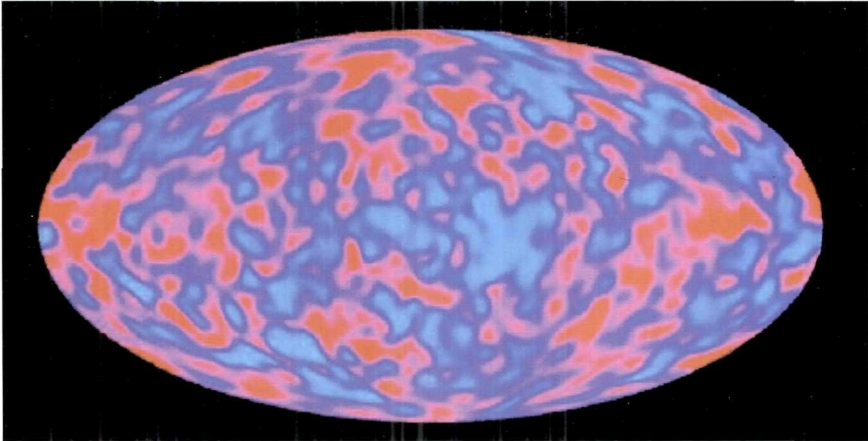


FIGURA A7. Primer mapa de las anisotropías de la radiación de fondo obtenido por COBE. La resolución angular es de  $7^\circ$ . (Cortesía de NASA).

las anisotropías se dieron en el momento del desacople de materia y radiación (*Época de Recombinación*), en el momento en el que el gas de átomos ionizados capturó los electrones libres y la materia se hizo neutra. Esta materia ya no interactuaba con la radiación y en la expansión del universo posterior a este momento la radiación siguió una evolución independiente a la evolución de la materia. La temperatura de la radiación disminuyó en proporción inversa al factor de escala del universo y dio lugar a la radiación que Penzias y Wilson detectaron. La distribución de la materia en la *Época de Recombinación* dio lugar a la estructura de la materia en el universo que conocemos. Por ello, la estructura de la radiación en el momento conocido como *Época de Recombinación* debería estar íntimamente ligada a la estructura de la materia en ese momento. Visto de este modo, la anisotropía de la RFM contiene también la clave para que nosotros podamos entender el desarrollo del universo material.

La anisotropía de la RFM, medida en 1991, era la primera evidencia directa de la existencia de unas zonas del universo ligeramente más calientes que otras en la *Época de Recombinación*. Las propiedades estadísticas de la anisotropía se estudiaron utilizando su espectro angular de potencias mostrado en la figura A8, donde  $l$  es el momento multipolar del espectro de potencias de la expansión del mapa de anisotropías en armónicos esféricos (Wright et al. 1992, Page 1999).



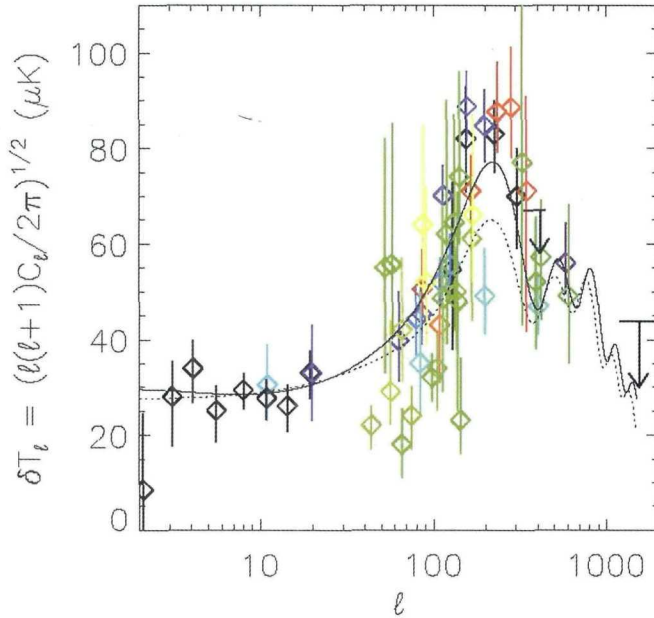


FIGURA A8. Análisis armónico de las anisotropías de la RfM descubiertas por COBE/DMR (rombos negros en el rango hasta  $l < 25$ , límite fijado por la resolución angular de COBE), junto con determinaciones posteriores con otros instrumentos de mayor resolución angular que ya muestrean el primer pico acústico. Los modelos ajustan muy mal el dato de  $l=2$  (justo al borde izquierdo de la gráfica). Estos resultados son previos a WMAP. (Cortesía de Page).

Los datos de COBE permitieron el florecimiento y consolidación de estudios, como el de la *Teoría Inflacionaria*, que habían surgido en la primera parte de los años ochenta para explicar las cuestiones del horizonte y del alto grado de isotropía de la RfM. Ahora las predicciones de estos modelos teóricos podían contrastarse con los datos de COBE. Si bien el ajuste general era aceptable, las predicción de la *Teoría Inflacionaria* quedaba muy por encima de la intensidad medida para el momento cuadrupolar  $l = 2$ . Dicho de otra manera, la función de correlación casi se anulaba para distancias angulares superiores a  $90^\circ$ .

Las discrepancias de los resultados de COBE con la teoría para el momento cuadrupolar agudizó todavía más la necesidad de futuros proyectos. De este modo se impulsaron los proyectos espaciales ya en marcha WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) y PLANCK. La sonda WMAP estaba prevista debido a la necesidad de

mejorar la sensibilidad y resolución angular de COBE ( $7^\circ$ ) y permitir el muestreo de momentos multipolares más grandes. El proyecto PLANCK, particularmente diseñado para estudiar la parte polarizada de la RFM y para proporcionar todavía mayor resolución angular que WMAP, se hará previsiblemente realidad hacia 2008.

El proyecto WMAP, con una mejora efectiva de un factor 40 en la resolución angular, se hizo realidad en 2001 y sus resultados, publicados a partir de 2003, son fascinantes. Las figuras A9 y A10 de WMAP son las equivalentes a las figuras A7 y A8 de COBE. La mejora de resolución del mapa mostrado en la figura A9 (correspondiente al primer año de datos de WMAP) con respecto al mostrado en la figura A7 permite muestrear componentes armónicas más altas. Con ello se pueden ver tonos superiores a los ya muestreados por COBE. El momento multipolar de las fluctuaciones de mayor intensidad es  $l \cong 220$ . Así pues, muestra que los tamaños angulares característicos de las zonas de más alta densidad comprimidas por ondas acústicas son un poco menores que  $1^\circ$ .

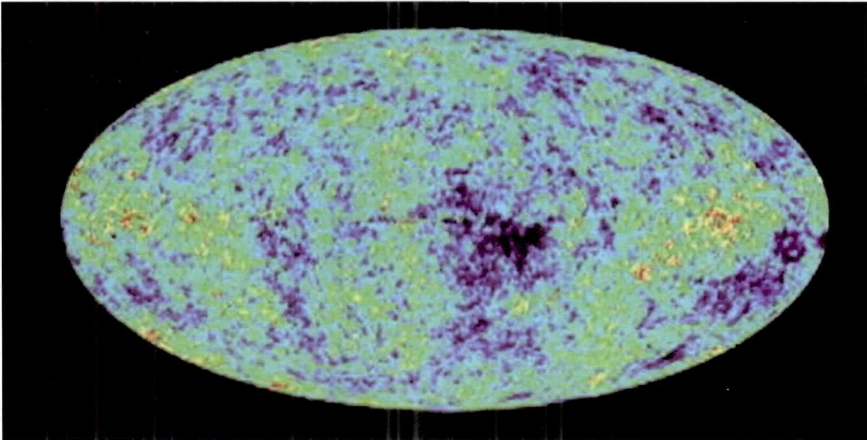


FIGURA A9. Anisotropías del fondo de microondas obtenidas por el observatorio WMAP. La resolución es  $0,2^\circ$ , 40 veces mejor que la obtenida por el observatorio COBE. (Cortesía de NASA).

Sin embargo, como se puede ver en la figura A10, el problema con los momentos multipolares bajos no desapareció. Bien al contrario, tras encontrar y corregir los errores sistemáticos responsables de los malos ajustes de los  $l = 22, 40$  y  $210$ , el ajuste para los

$l = 2$  y  $3$  empeoró. El análisis de 3 años de datos de WMAP no ha cambiado mucho las cosas.

La página <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current> contiene todas las publicaciones de WMAP, y en particular la publicación Spergel et al. (2006) contiene el análisis cosmológico más reciente y completo.

La localización del modo fundamental del espectro indica el tamaño máximo de las fluctuaciones de densidad y su amplitud indica el contraste de esas fluctuaciones. Ambos son compatibles con una geometría plana para el universo. Las razones entre los tres picos acústicos nos proporcionan la densidad de bariones. El análisis global del espectro permite determinar un buen número de parámetros del universo, como se comentará un poco más tarde.

WMAP llevaba a bordo receptores de microondas sensibles a radiación polarizada. Por ello, se pudo asimismo estudiar el espectro angular de potencia polarizada, que se muestra en la figura A10 (abajo). Como se puede ver en ella, las predicciones del modelo que mejor ajusta los datos del espectro angular de potencias también ajusta muy bien el espectro angular de potencia polarizada, excepto para un dato situado a  $l = 4$ . Este dato, que corresponde a un tamaño angular característico de 45 grados, está significativamente por encima de la predicción del modelo. Aunque no cabe excluir una subestimación de los errores sistemáticos de la instrumentación, ésta parece muy improbable. Por tanto, el resultado se debe tomar preliminarmente tal como es, hasta que los datos de PLANCK estén disponibles.

Una interpretación del resultado anterior es que a tiempos de la expansión del universo correspondientes a corrimientos al rojo entre 10 y 30, la materia se volvió a ionizar sobre grandes escalas angulares<sup>3,4</sup>. Conviene aclarar que la galaxia más distante detectada

---

<sup>3</sup> Como es bien sabido un plasma es capaz de polarizar la luz no-polarizada que la atraviesa al permitir la propagación de las dos componentes de su vector eléctrico a distintas velocidades y dar lugar a un desplazamiento de la fase relativa.

<sup>4</sup> [Nota añadida en imprenta] Según un análisis muy reciente, basado en 3 años de datos de WMAP, el rango sería más bien  $6 < z < 14$  para un modelo con reionización instantánea (Page et al. 2006; astro-ph/0603450).

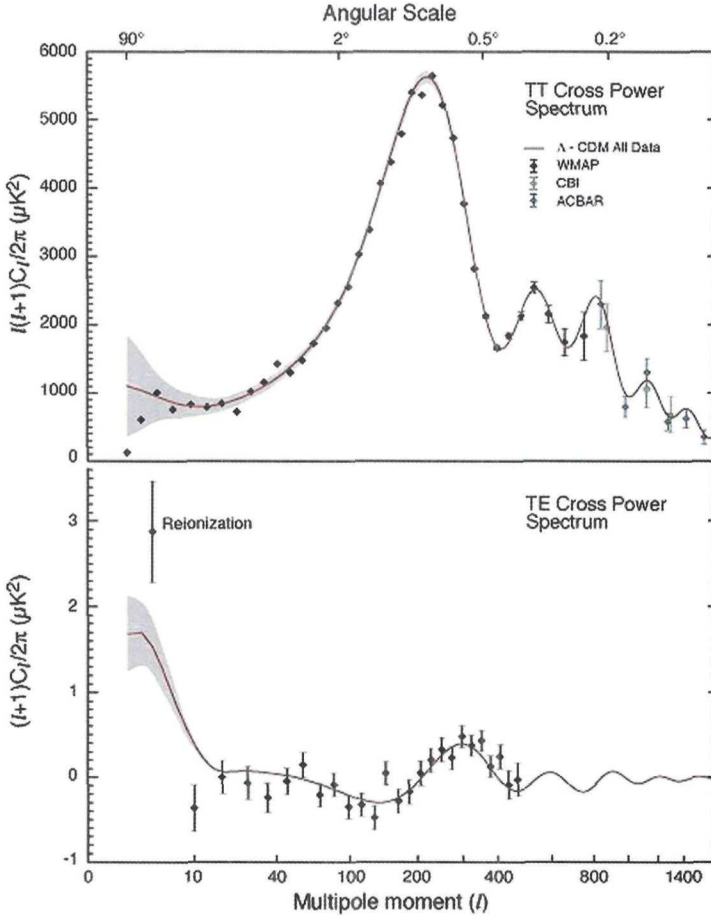


FIGURA A10. Análisis armónico de las anisotropías del fondo de radiación a partir de datos de WMAP: (arriba) intensidad total; (abajo) intensidad polarizada. Al espectro en potencia total se le han añadido datos de radio interferómetros sobre la superficie terrestre que proporcionan más resolución. El ajuste corresponde a un modelo con constante cosmológica,  $\Lambda$ , y materia oscura fría (CDM, es decir, materia oscura de velocidad mucho menor a la velocidad de propagación de la luz). El modelo no ajusta bien los datos de intensidad total de  $l=2$  y  $3$  (ver texto) y tampoco el punto de intensidad polarizada de menor momento multipolar. Para explicar este último dato se invoca reionización generalizada en el universo a corrimientos al rojo de  $20 \pm 10$ .

hasta la fecha está situada, tentativamente, a  $z = 10$  y que además sólo se ha podido estudiarla utilizando la amplificación de su señal por una lente gravitatoria (Pelló et al. 2004). La galaxia más lejana con detección directa espectroscópica está a  $z = 6,96$  (Iye et al. 2006). Por tanto, esa ionización que deja marca en la RFM tiene

lugar muy temprano. ¿Qué objetos se habían formado tan temprano en el universo?

Los astrónomos conocen múltiples ejemplos donde estrellas masivas de temperatura superficial muy alta en varias fases evolutivas son capaces de producir radiación ultravioleta capaz de ionizar el medio circundante. ¿Fueron estrellas masivas las responsables de la ionización tan temprana en la expansión del universo? ¿Tuvo lugar esta ionización en una fase muy intensa de, o previa a, explosiones supernovas? Dado que en esa fase la composición bariónica del medio en el que las estrellas podían formarse era de poca metalicidad<sup>5</sup>, ¿cómo eran estas estrellas y estas supernovas? Todavía no se tienen respuestas satisfactorias a estas preguntas, que serán abordadas más adelante en el discurso.

Los resultados de WMAP permiten afinar los parámetros del modelo estándar del Big Bang (modelo inflacionario  $\Lambda$ -CDM) como ningún otro conjunto de observaciones permite. Los resultados de WMAP son consistentes con un universo plano en el que la materia bariónica representa el  $4,4 \pm 0,4\%$ , la materia oscura el  $23 \pm 4\%$  y la energía oscura el  $73 \pm 4\%$ . Estas estimaciones son asimismo consistentes con los resultados de las observaciones de las supernovas de tipo Ia. Como estos dos métodos no tienen elementos comunes, la consistencia da confianza a los cosmólogos. De hecho, esta confianza aumenta al comprobarse que un tercer método, independiente de los dos anteriores, es también consistente con esos resultados. Este tercer método, que no presentaré en este escrito, se basa en los estudios de la distribución espacial de los cúmulos de galaxias.

Es preciso insistir que, aunque la evidencia de energía oscura es muy reciente, la evidencia de materia oscura viene de lejos y de varias direcciones: la ya mencionada evidencia cinemática de la curva de rotación de las galaxias espirales, los movimientos de galaxias en cúmulos, el material intergaláctico caliente detectado en rayos X y, de modo muy particular y limpio, las determinaciones de masas de galaxias y cúmulos a partir de lentes gravitatorias (o gravitacionales).

---

<sup>5</sup> La práctica astronómica denota los elementos químicos de masas atómicas superiores al hidrógeno y helio como metales e indica su proporción porcentual en masa en un objeto con la letra mayúscula Z.

Por medio de estas lentes, se encuentra que la relación masa-luminosidad,  $M/L$ , en las galaxias y cúmulos es típicamente 10 y 100, respectivamente, muy superior en ambos casos a la esperada de la materia bariónica. Además, en el caso de la galaxia B1933+503, con una  $M/L$  alta, se ha podido determinar que el perfil de densidad decae aproximadamente como  $r^{-2}$  (Muñoz et al. 2001), es decir, con el perfil necesario para producir las curvas de rotación observadas en las que la velocidad se mantiene constante con la distancia.

Así pues, a la espera del lanzamiento del satélite PLANCK, el paradigma del universo en este momento es el siguiente: Un universo de edad  $13.700 \pm 200$  millones de años, con aproximadamente un 1% de contenido de materia bariónica luminosa de un total de  $4,4 \pm 0,4\%$  de materia bariónica, con un contenido de materia oscura del  $23 \pm 4\%$ , responsable principal de la forma que han tomado las estructuras de materia del universo, y con un contenido de  $73 \pm 4\%$  de energía oscura (desconocida), cuyo efecto a grandes escalas es oponerse a la gravedad y acelerar la expansión del universo, como se muestra esquemáticamente en la figura A11. Un universo en el que

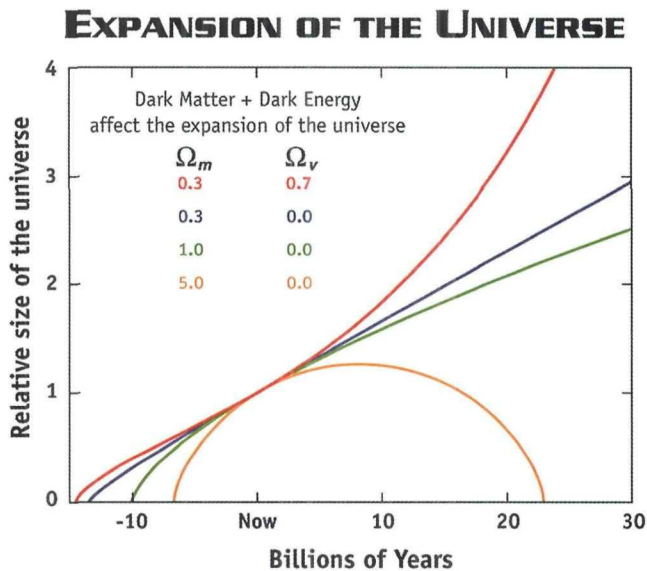


FIGURA A11. Esquemas de expansión del universo para distintos modelos. La línea superior (en rojo), correspondiente al modelo inflacionario  $\Lambda$ -CDM con las proporciones de materia oscura y energía oscura dadas (en rojo) en la tabla insertada en la figura, es la que representa el conocimiento actual.

al parecer las primeras estrellas se formaron pronto, hacia unos 200 millones de años tras el Big Bang y transformaron la composición química de él, que estaba fijada desde los primeros 3 minutos.

Las viejas controversias sobre el valor de la constante de Hubble han quedado zanjadas<sup>6</sup> con un valor de  $H_0 = 71 \pm 4 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ , pero se abren nuevos retos para comprender cómo fueron las primeras estrellas y las proto-galaxias y cómo se formaron los agujeros negros masivos que tan importantes son para la existencia misma de las galaxias.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alpher, R.A., Bethe, H.A. & Gamow, G., Phys. Rev., 73, 803 (1948)  
Alpher, R.A. & Herman, R.C., Nature, 162, 774 (1948)  
Bennett, C.L. et al., Astrophys. J., 464, L1 (1996)  
Bethe, H.A., Phys. Rev., 55, 434 (1939)  
Blanchard, A., et al., Astron. & Astrophys., 412, 35 (2003)  
Braine, J. & Herpin, F., Nature, 432, 369 (2004)  
Burbidge, E.M., et al., Rev. of Modern Physics, 29, 547 (1957)  
Einstein, A., Ann. der Physik, 49, 769 (1916)  
Freedman, W., et al., Astrophys. J., 553, 47 (2001)  
Friedman, A., Zeitschrift für Physik, 10, 337 (1922)  
Iye, M., et al., Nature, 443, 186 (2006)  
Muñoz, J.A., Kochanek, C.S. & Keeton, C.R., Astrophys. J., 558, 657 (2001)  
Perlmutter, S., et al., Astrophys. J., 517, 565 (1999)  
Page, L.A., astro-ph/9911199 (1999)  
Penzias, A.A. & Wilson, R.W., Astrophys. J., 142, 419 (1965)  
Pelló, R., Astron. & Astrophys., 416, L35 (2004)  
Hubble, E., Proc. Nat. Acad. Sci., 15, 168 (1929)  
Riess, A.G., et al., Astron. J., 116, 1009 (1998)  
Riess, A.G. et al., Astrophys. J., 607, 665 (2004)  
Schmidt, B.P., et al., Astrophys. J., 507, 46 (1998)  
Spergel, D.N., astro-ph/0603449  
Von Weizsäcker, C.F., Physik. Z., 39, 633 (1938)  
Wright, E. et al., Astrophys. J., 396, L7 (1992)

---

<sup>6</sup> Sería prudente decir que además del modelo concordante, que da lugar al paradigma del universo aquí descrito, se han propuesto *modelos discordantes* (Blanchard et al. 2003) en los que los datos de WMAP pueden ajustarse (incluso mejor en la zona de bajos momentos multipolares) con otros modelos de universo (como el Einstein-de Sitter con constante cosmológica nula) si se relaja la hipótesis de describir el espectro de fluctuaciones por una única ley de potencias y si se está dispuesto a aceptar una constante de Hubble cercana a  $50 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ , lo que presenta otros problemas.

## B. PRIMERAS ESTRELLAS, AGUJEROS NEGROS MASIVOS Y ESTRUCTURAS GALACTICAS

Las primeras estrellas debieron de formarse necesariamente a partir de los elementos químicos de la síntesis primigenia. Por tanto, estas estrellas debieron de ser esencialmente estrellas de hidrógeno y helio, lo que en la jerga astronómica equivale a decir que debieron de ser de metalicidad casi nula. Se ha argumentado a favor de que éstas hayan sido estrellas muy masivas (Abel, Bryan & Norman 2002; Bromm, Coppi & Larson 2002). Una estrella muy masiva tiene una vida muy corta, con independencia de su composición<sup>7</sup>. La consecuencia directa de una gran masa estelar es la gran luminosidad de la estrella, su alta temperatura superficial y su potencial ionizante.

Los datos de polarización de WMAP apuntan a una fuerte ionización sobre grandes escalas angulares para un corrimiento al rojo cosmológico de alrededor de 20, es decir cuando la escala del universo era alrededor de 20 veces menor y la edad del universo era del orden de un millón de años, 2% de la actual. Si, como parece probable, esa ionización proviene de las primeras estrellas (pues todavía los cuásares y otros núcleos activos de galaxias altamente ionizantes no se han formado) tenemos una cota temporal y un esquema de formación de estrellas masivas en proto-galaxias, o galaxias irregulares pequeñas, que luego, en construcción jerárquica, darán lugar a galaxias mayores y comparables a las actuales, de acuerdo a un modelo de formación de galaxias compatible con un universo plano de tipo  $\Lambda$ -CDM. ¿En qué momento el universo observable se hizo similar al actual? ¿Cuán rápido fue el proceso de fusión de estructuras pequeñas, que dio lugar a las grandes galaxias espirales y elípticas que hoy observamos?

Empiezan a existir pruebas de que la distribución de tamaños y la composición química de las galaxias sufrió una rápida evolución en los primeros tiempos del universo, y que a partir del 6% de la

---

<sup>7</sup> La muy baja metalicidad puede tener la consecuencia de que el viento estelar sea bajo y por tanto se pierda poca masa durante la evolución estelar.



edad actual del cosmos, éste no ha cambiado considerablemente. En efecto, el observatorio espacial *Spitzer* (Mobasher et al. 2005) ha encontrado una galaxia muy joven (denominada de momento HUDF-JD2, de  $z = 6,5$ , es decir formada ya a 6% de la edad actual del universo), muy brillante y más grande incluso que la Vía Láctea. También del estudio de los campos profundos del telescopio espacial *Hubble* se deduce que las galaxias a corrimientos al rojo  $z > 5$  no son sensiblemente más pequeñas y distintas que las actuales. Es decir, hay evidencia creciente de que la formación de galaxias y la redistribución de tamaños ocurrieron en un periodo temporal corto, o, al menos, no tan dilatado como se había pensado hasta ahora. Estudios recientes de cúmulos globulares proporcionan evidencia adicional en este mismo sentido.

Los cúmulos globulares, de los cuales hay unos 150 en nuestra galaxia y unos 500 en el halo de la galaxia Andrómeda, son formaciones compactas (con diámetros de varias decenas de años-luz) que albergan cientos de miles de estrellas muy viejas, de baja metalicidad, con un origen y edad comunes. Sin embargo, en cada galaxia se encuentran dos tipos de cúmulos globulares, uno más rojo (más rico en metales) y otro más azul (menos rico en metales). Esta simple clasificación llevó a Searle & Zinn (1978) a proponer que ambos grupos podrían tener un origen diferente. Los ricos en metales podrían haberse formado en el colapso gravitatorio de la nube proto-galáctica, mientras que los de más baja metalicidad ( $Z = 10^{-4}$ ) se podrían haber adquirido posteriormente, en la captura de galaxias satélites más pequeñas donde la evolución química de los cúmulos globulares habría sido más lenta.

Se han observado distribuciones multimodales en otras galaxias, lo que apoya aún más el esquema jerárquico de formación de galaxias. Sin embargo, el hecho de que la edad estimada (a partir del correspondiente diagrama Hertzsprung-Russell) para los distintos cúmulos de cada galaxia sea muy parecida indica que todo el proceso (formación de los cúmulos y *merging* de proto-galaxias y galaxias) debió de tener lugar en un corto rango temporal y en los primeros tiempos de la formación del universo.

Finalmente, las correlaciones que se han encontrado entre las metalicidades de los cúmulos (de los más rojos, pero también de

los más azules) y las luminosidades de las galaxias en las que se encuentran, introduce la cuestión de cómo sabían los cúmulos, en el momento de su formación, a qué galaxia pertenecían. No es la única correlación intrigante. Otra correlación muy estrecha es la que hay entre la masa del agujero negro masivo en el centro de las galaxias y la dispersión de velocidades de las galaxias elípticas o del bulbo de las galaxias espirales. Esta correlación se conoce como  $M_{\text{BH}}-\sigma$  y a ella me refiero a continuación.

La existencia de agujeros negros masivos en los centros de las galaxias ha sido ya bien establecida con varias técnicas. En el caso de tres galaxias, incluyendo la Vía Láctea, la determinación de la masa de los agujeros negros ha sido directa y se ha obtenido a partir de la cinemática de estrellas y máseres de agua. En otros casos, las determinaciones se han obtenido a partir de la cinemática del gas en la región nuclear. Las incertidumbres en la geometría del gas (disco o toroide con inclinación incierta con respecto a la visual) se traducen en incertidumbres en la determinación de la masa del agujero negro. Con todo, se han determinado las masas de varias decenas de agujeros negros masivos y se ha demostrado que existen correlaciones entre cuatro variables: masa del agujero negro,  $M_{\text{BH}}$ , luminosidad de la región esferoidal de la galaxia,  $L_{\text{B}}$ , radio efectivo,  $R_e$ , y dispersión de velocidades en el subsistema esferoidal,  $\sigma$ .

Se ha mostrado que existe un plano fundamental en el espacio 4-dimensional (Gebhardt et al. 2000a) definido por coordenadas que son los logaritmos de las cuatro variables citadas. La figura B1 de Gebhardt et al. (2000a) muestra la correlación entre la masa del agujero negro y la luminosidad (izquierda) y la dispersión de velocidad (derecha). Esta última correlación es particularmente fuerte (corresponde a una visión de perfil del plano fundamental). La figura B2 de Tremaine et al. (2002) muestra otra vez esta última correlación para otra muestra. La pendiente de la relación  $M_{\text{BH}}-\sigma$  es  $4,02 \pm 0,32$ . Para una dispersión  $\sigma$  de  $200 \text{ km s}^{-1}$  la masa del  $M_{\text{BH}}$  es  $10^{8,13 \pm 0,06} M_{\text{sol}}$ .

Una correlación tan estrecha entre la masa del agujero negro (sobre 3 órdenes de magnitud de masas) y la dispersión de velocidades en el bulbo de la galaxia sugiere una conexión causal entre

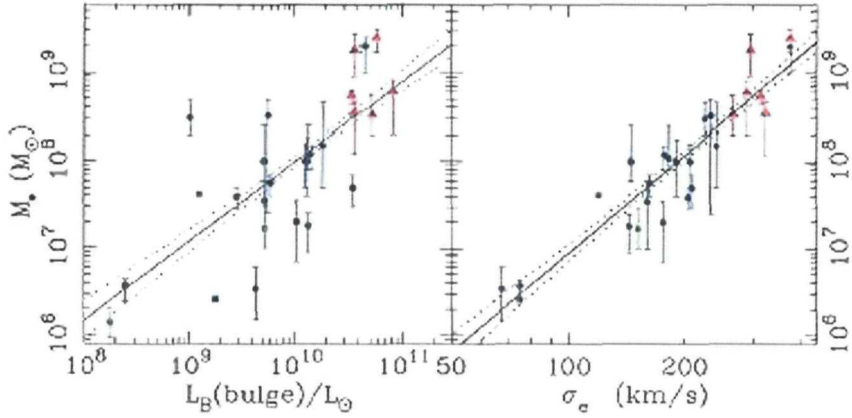


FIGURA B1. Correlaciones de la masa de los agujeros negros galácticos con la luminosidad del bulbo de las galaxias (izquierda) y con su dispersión de velocidades (derecha). (Cortesía de Gebhardt).

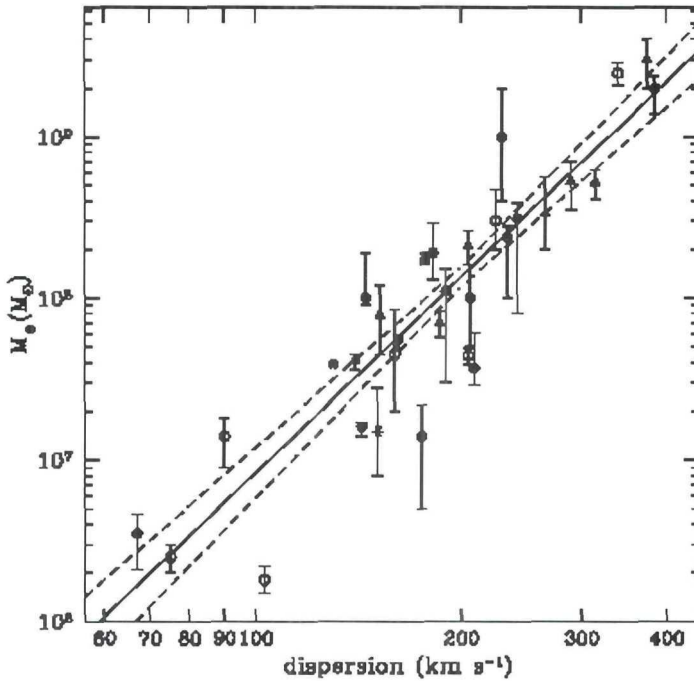


FIGURA B2. Correlación  $M_{\text{BH}}-\sigma$ . (Cortesía de Tremaine).

la formación del agujero negro y la evolución de la parte esferoidal de la galaxia. Si esta relación se extrapola en su parte inferior hacia los cúmulos globulares masivos (con una dispersión de unos 10 km

s<sup>-1</sup>) resulta una predicción de agujero negro de  $2.000 M_{\text{sol}}$ . Es de interés notar que Gebhardt et al. (2000b) miden un incremento de la relación  $M/L$  del cúmulo M15 hacia el centro que es consistente con una masa central de  $2.500 M_{\text{sol}}$ .

Nuevas pruebas observacionales, que incluyen galaxias esferoidales enanas, abundan en este hecho (Wehner & Harris 2006). Si en la gráfica se incluyen los objetos masivos centrales (que quizá no sean agujeros negros) la correlación (aunque con dos pendientes) alcanza 5 órdenes de magnitud como se puede ver en la figura B3.

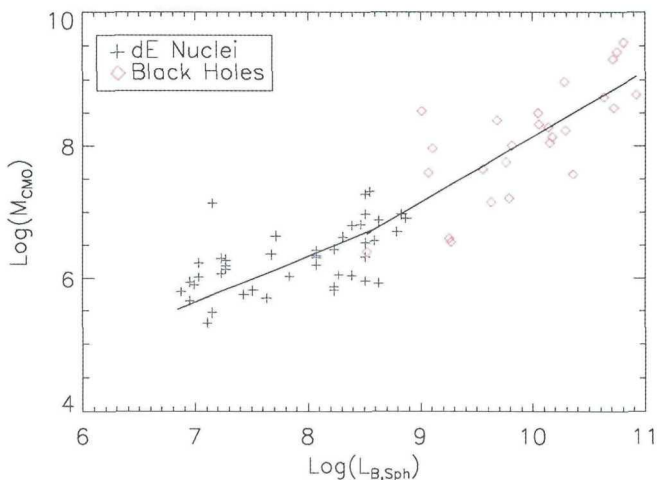


FIGURA B3. Correlación Objeto Central Masivo  $-\sigma$ . La parte alta equivale a las figuras B1 (izquierda). La parte baja, de menor pendiente, corresponde a los núcleos de las galaxias esferoidales enanas. (Cortesía de Wehner & Harris).

Es natural suponer que los bulbos de las galaxias, los agujeros negros (y luego la actividad cuasar) estén conectados a través de un mismo proceso de formación, quizás como consecuencia del colapso o *merging* de otro bulbos que proporcionaron material al agujero negro para crecer. Sin embargo, la naturaleza de la conexión todavía no está clara (Silk & Rees, 1998).

Por otro lado, contrariamente a la creencia generalizada, las estrellas también parecen formarse en ambientes muy convulsos. Buena evidencia de ello son las 200 estrellas azules, de una edad de unos 200.000 años, que orbitan el agujero negro masivo en el

núcleo de la galaxia Andrómeda (M31) a velocidades de  $1.000 \text{ km s}^{-1}$  (Bender et al. 2005). El estudio de este disco de estrellas azules en rápida rotación ha servido para estimar la masa del agujero negro ( $1,4 \cdot 10^8 M_{\text{sol}}$ ), pero también para que nos demos cuenta de que las estrellas se forman incluso en ambientes hostiles con presencia de grandes fuerzas de marea. Observaciones en rayos-X parecen apuntar a una situación parecida en el entorno del agujero negro del centro de nuestra galaxia (Nayakshin et al. 2006). ¿Se trata de una situación común? ¿Es un proceso recurrente? ¿Es parte del proceso de crecimiento en masa de los agujeros negros masivos?

Hay alguna evidencia de crecimiento rápido de la masa de los agujeros negros en galaxias de formación estelar masiva en un periodo similar al pico de formación de cuásares ( $z \approx 3$ ) (Alexander et al. 2005). Se estima que, en este periodo, las masas pasan de  $10^7$  a  $10^8 M_{\text{sol}}$ . ¿Cuál es el catalizador de este rápido crecimiento de la masa del agujero negro a la vez que hay una gran actividad de formación estelar evidenciada por la emisión en el rango submilimétrico? Otra vez, la actividad de *merging* de galaxias de masa comparable parece proporcionar un mecanismo eficiente de transporte de material hacia regiones centrales de la galaxia que induciría tanto los brotes de formación estelar como el crecimiento de la masa del agujero negro, como indican simulaciones hidrodinámicas recientes (Springer, Di Matteo & Hernquist, 2005).

¿Hay relación entre las primeras estrellas masivas (es decir, entre las estrellas de población III, como se las conoce en la jerga astronómica) y la formación de los primeros agujeros negros masivos? La opinión de los astrónomos está a favor de contestar con un sí a esa pregunta. Sin embargo, todavía no hay evidencia observacional clara que certifique este aserto. Es cierto que las primeras estrellas masivas se debieron formar cuando la escala de distancias cósmicas era 20 veces inferior a la actual y cuando la materia estaba distribuida más densamente y más extensamente que ahora. Por tanto, debieron morir dejando como restos agujeros negros estelares no muy separados unos de otros. ¿Cómo se fusionaron estos agujeros negros? ¿Se ha dado la correlación entre los agujeros negros y las poblaciones estelares esferoidales asociadas desde los primeros pasos de la construcción jerárquica de galaxias? ¿Hubo explosiones cósmicas como consecuencia de esas coalescencias de agujeros negros?

Como se verá más adelante, existen pruebas de que la muerte de las estrellas masivas tiene lugar en forma de explosiones cósmicas altamente energéticas: supernovas y estallidos de rayos gamma (GRB), que arrojan al medio interestelar los nuevos elementos químicos creados durante la evolución estelar y en la explosión misma. Este proceso enriquece químicamente el medio interestelar. Las nuevas estrellas se formarán a partir de este medio interestelar enriquecido en metales. Por ello, la búsqueda de estrellas de primera generación es equivalente a la búsqueda de estrellas de poca metalicidad<sup>8</sup>.

Curiosamente, la explosión cósmica más brillante y lejana jamás observada (GRB050904, 4 Septiembre 2005, con  $z = 6,295 \pm 0,002$ ; Kawai et al. 2006) muestra una metalicidad considerable en el entorno de la estrella, metalicidad que precisamente ha sido utilizada para determinar espectroscópicamente y con gran precisión la distancia a la que se encuentra el GRB (y presumiblemente la galaxia en la que la estrella progenitora se encontraba). El espectro se muestra en la figura B4.

Las líneas de absorción del azufre, silicio y carbono ionizados y del oxígeno neutro tienen lugar al mismo desplazamiento Doppler que el correspondiente al corte de Lyman- $\alpha$  (efecto Gunn-Peterson, 1965) debido a la absorción del continuo del GRB por el hidrógeno neutro a longitudes de onda más cortas. ¿Se trata de metalicidad en el entorno de la progenitora del GRB y depositada por el viento estelar de ella misma previo a la explosión? ¿Sucederá algo parecido para las estrellas de población III evitando de este modo que las podamos detectar con la baja metalicidad original? La situación es un poco confusa si se tiene en cuenta un resultado reciente de Fruchter et al. (2006) que encuentran que los GRB tienen lugar en entornos de baja metalicidad.

La determinación de objetos de muy alto corrimiento al rojo por métodos fotométricos puede que esté actualmente limitada por la instrumentación a  $z < 7$  (se conocen 14 casos entre 6 y 7) y que haya que esperar al lanzamiento del observatorio JWST, previsto

---

<sup>8</sup> El record de baja metalicidad lo tiene la estrella HE1327-2326, que tiene un contenido en hierro 300.000 veces inferior al del Sol, lo que corresponde a una metalicidad de  $-5,6$  en porcentaje logarítmico (Frebel et al. 2005).

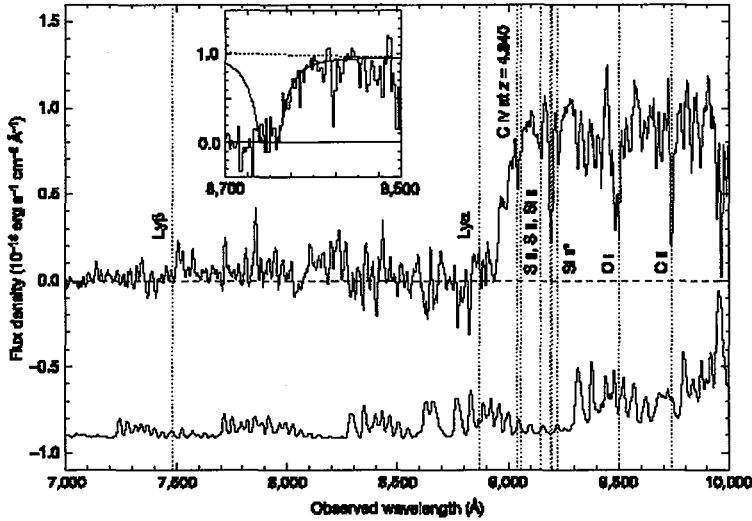


FIGURA B4. Espectro del GRB050904 (afterglow), que muestra el corte de Ly $\alpha$  cerca de 900nm (desplazado desde 121,6nm del sistema en reposo) y las líneas metálicas en absorción que dan un estimado del corrimiento al rojo de  $z = 6,295 \pm 0,002$ , el mayor hasta la fecha para una estrella o explosión asociada. (Cortesía de Kawai).

para 2013, para ir más lejos. Sin embargo, también parece, a juzgar por el espectro mostrado en la figura B4 y que fue obtenido nada menos que 2 días más tarde que la explosión GRB (en lo que se conoce como *afterglow*) por Kawai y colaboradores, que las líneas de absorción sobre el fuerte continuo de los afterglows de GRB<sup>9</sup> permitiría detectar sistemas hasta  $z \cong 10$ , o más. Precisamente, esto incide en la oportunidad que presentan los GRB para descubrir el universo más joven.

En efecto, las explosiones cósmicas del tipo GRB generadas por la muerte de las primeras estrellas supermasivas (hipernovas) o por la coalescencia de agujeros negros primigenios pueden proporcionarnos oportunos faros con los que iluminar todo el universo desde sus primeros instantes hasta el tiempo actual. Como se ha dicho antes, el GRB más lejano detectado hasta la fecha está en  $z \cong 6,3$ . ¿Hay GRBs de estrellas a  $z > 10$ ? ¿Podremos detectarlos? Si la instrumentación actual o futura no fuera capaz de detectarlos, estaríamos forzados a

<sup>9</sup> Al aumentar el corrimiento al rojo los afterglows de los GRBs corresponden a tiempos más tempranos y por tanto de más brillo intrínseco (Ciardi & Loeb 2000)

preguntarnos si hay algún impedimento físico para que se den GRB para las primeras estrellas. Ello requeriría un cuidadoso estudio de los posibles mecanismos que dan lugar a estas explosiones (¿estrellas masivas con núcleos en rotación? ¿coalescencia de estrellas de neutrones y agujeros negros?) y las limitaciones que imponen la masa inicial y la metalicidad de las estrellas para las explosiones. Por el contrario, la detección de estas tempranas explosiones cósmicas nos proporcionaría una singular fuente de información del universo muy joven, el de muy altos corrimientos al rojo (Ciardi & Loeb 2000; Lamb & Reichart 2000). Puede que en esa exploración del universo muy joven, de nuestro más remoto pasado, resida la clave para entender la formación de las estructuras de las galaxias y su evolución. Para comprender ese universo joven, las explosiones cósmicas probablemente jugarán un papel esencial, similar al que en décadas anteriores jugaron los cuásares en el universo algo más cercano.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abel, T., Bryan, G.L. & Norman, M.L., *Science*, 295, 93 (2002)  
Bender, R., et al., *Astrophys. J.*, 631, 280 (2005)  
Bromm, V., Coppi, P.S., & Larson, R.B., *Astron. J.*, 564, 23 (2002)  
Ciardi, B. & Loeb, A., *Astrophys. J.*, 540, 687 (2000)  
Frebel, A., et al., *Nature*, 434, 871 (2005)  
Gebhardt, K., et al., *Astrophys. J.*, 539, L13 (2000a)  
Gebhardt, K., et al., *Astron. J.*, 119, 1268 (2000b)  
Gunn, J.E. & Peterson, B.A., *Astrophys. J.*, 142, 1633 (1965)  
Kawai, N., et al., *Nature*, 440, 184 (2006)  
Lamb, D. & Reichart, D.E., *Astrophys. J.*, 536, 1 (2000)  
Nayakshin, S., et al., *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.*, 366, 1410 (2006)  
Searle, L. & Zinn, R., *Astrophys. J.*, 225, 357 (1978)  
Silk, J. & Rees, M.J., *Astron. & Astrophys.*, 331, L1 (1998)  
Springer, V., Di Matteo, T., & Hernquist, L., *Astrophys. J.*, 620, L79 (2005)  
Tremaine, S., et al., *Astrophys. J.*, 574, 740 (2002)  
Wehner, E.H. & Harris, W.E., *Astrophys. J.*, 644, L17 (2006)



## C. CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS

De entre las explosiones cósmicas, consideremos las supernovas y veamos las energías y mecanismos de emisión implicados.

Las observaciones fotométricas y espectroscópicas de supernovas en el visible muestran tres hechos básicos: (1) las supernovas brillan durante unas semanas casi tanto como las galaxias enteras en las que residen; (2) la temperatura de las supernovas, aunque más alta, es comparable a la temperatura del Sol; (3) las supernovas se expanden a velocidades entre 2.000 y 20.000 km s<sup>-1</sup>.

Como durante las semanas siguientes a su explosión las supernovas rivalizan en brillo con las galaxias en las que residen, podemos suponer que su luminosidad es del orden de  $10^{10} L_{\text{sol}}$ . Si su temperatura es comparable a la del Sol, lo anterior implica que su superficie ha de ser mucho mayor que la del Sol. Esto, a su vez, es compatible con las medidas espectroscópicas de las velocidades de expansión. Veámoslo de modo sencillo.

Una velocidad de expansión característica de 10.000 km s<sup>-1</sup> durante un tiempo característico de  $10^6$  s (12 días) para llegar al máximo de emisión resulta en un tamaño característico de  $10^{10}$  km para la supernova, lo que equivale a más de  $10^4$  radios solares. Ello supera por más de un orden de magnitud el tamaño de las mayores estrellas conocidas, y proporciona la superficie de emisión necesaria para —a temperaturas superiores a la del Sol dentro de un factor de 2— proporcionar la luminosidad  $10^{10} L_{\text{sol}}$ . Por otro lado, esa luminosidad en el visible equivale a una liberación de energía de  $1,2 \cdot 10^{50}$  erg en sólo un mes. Considerando que las supernovas son tan brillantes en el visible que han sido visualmente detectadas en nuestra galaxia en siglos pasados y que lo son todavía hoy en otras galaxias por astrónomos aficionados con pequeños telescopios, se puede tomar la aproximación de que emiten radiación principalmente en el visible (lo que es cierto). De este modo podemos comparar el estimado anterior a la energía cinética asociada a la explosión.

Si consideramos la explosión de  $5 M_{\text{sol}}$  (es decir, la explosión de la región nuclear de una estrella mucho más masiva —quizás 20

$M_{\text{sol}}$  — en secuencia principal) con velocidades de  $10.000 \text{ km s}^{-1}$ , llegamos al valor estimado de  $0,5 \cdot 10^{52} \text{ erg}$ . Este valor estimado es un poco excesivo, pues no toda la estrella se expande a esa velocidad, sino que las distintas partes lo hacen de modo homólogo, es decir, cada parte lo hace a velocidad proporcional a su distancia radial del centro. Esa consideración nos reduce el valor estimado hasta unos  $10^{51} \text{ erg}$ , lo que está avalado también por modelos hidrodinámicos.

¿De qué fluido estamos hablando? El modelo más simple de una supernova es imaginar que se libera una gran cantidad de energía (de ligadura) en la región nuclear de una estrella que colapsa a una estrella de neutrones de pocos kilómetros de radio y que ello resulta en una energía cinética del gas y en abundante emisión de neutrinos. La energía cinética transferida al gas resulta ser una pequeña fracción (1%) de la energía liberada por la supernova, como indica la detección de neutrinos en la supernova SN1987A, de la que se hablará más adelante en este discurso. En este caso, las energías liberadas se estiman en  $2,7 \cdot 10^{53} \text{ erg}$  (la energía de ligadura de una estrella de neutrones), el equivalente en masa a  $0,15M_{\text{sol}}$ , lo que a su vez indica la eficiencia en transformación de la masa en energía en las supernovas.

La energía cinética de la explosión será mucho mayor que la energía de ligadura de la estrella progenitora. Ello implicará una velocidad de expansión supersónica y dará lugar a que se forme una onda de choque, que es lo que calentará el material de la estrella progenitora, según vaya progresando la onda de choque sobre ella hacia el exterior.

Asimismo, se puede ver que, en esa situación, la presión de radiación es mucho mayor que la presión del gas. Por ello, la energía interna de la materia puede ignorarse, excepto por la energía radioactiva y de recombinación. Visto así, además del gas en expansión, una supernova es una bola de radiación en expansión y su energía térmica se puede escribir como  $E_{\text{sn,T}} = 4\sigma T^4V/c$ , donde  $V$  es el volumen,  $T$  la temperatura,  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann y  $c$  la velocidad de la luz.

Dado que el radio de la estrella progenitora es, en todo caso, menor que  $10^9 \text{ km}$  y que la velocidad típica de emergencia del choque

es de  $10.000 \text{ km s}^{-1}$ , el tiempo de expansión hidrodinámico será  $10^5 \text{ s}$ , es decir, como máximo del orden de un día. La destrucción de la estrella tiene, por tanto, lugar en, más o menos, un día. A partir de ese momento, tenemos una gran bola de gas caliente en expansión. Por otro lado, si se aproxima la energía térmica como la mitad de la energía cinética, de la expresión de la energía térmica de la supernova  $E_{\text{sn,T}} = (4\sigma T^4/c) (4/3)(\pi R^3)$  se puede obtener la temperatura del pico de la emisión, dando  $T \cong 6,3 \cdot 10^4 (E_{51}/R_{10}^3)^{1/4}$ , siendo  $E_{51}$  la energía cinética en unidades de  $10^{51} \text{ erg}$  y  $R_{10}$  el radio de la supernova en unidades de  $10^{10} \text{ km}$  en el momento del pico en la curva de luz.

Para el caso de SN1987A (véase más adelante en el discurso) esta estimación da la temperatura de  $4,2 \cdot 10^5 \text{ K}$ , no muy lejana de la que se obtiene con simulaciones numéricas más precisas ( $5,0 \cdot 10^5 \text{ K}$ ). Después del pico, la temperatura decrece gradualmente, pues la expansión conlleva un enfriamiento del gas de radiación (incluso antes de que pueda escapar y contribuir a la curva de luz). Distintas supernovas contribuyen de distinto modo a la parte inicial de la curva de luz, según sus progenitoras sean estrellas grandes y tenues o pequeñas y densas.

Sin embargo, del entorno del pico en adelante la curva de luz está alimentada principalmente por la radiación producida por la desintegración del  $^{56}\text{Ni}$ , isótopo que se produce en la nucleosíntesis explosiva, para dar  $^{56}\text{Co}$  y del  $^{56}\text{Co}$  para dar  $^{56}\text{Fe}$ . La vida media del primer paso es tan sólo 6,10 días y la del segundo 77,12 días. Los efectos de este calentamiento radiactivo en la curva de luz no se verán de modo instantáneo tras la desintegración, sino cuando la radiación producida tras la termalización de los rayos gamma de la desintegración pueda escapar. Finalmente, la curva de luz recibe una tardía aportación de la energía de recombinación producida cuando el material ionizado de la supernova se recombina al enfriarse debido a la expansión. La recombinación libera una energía de ionización y se desarrolla una onda de recombinación que va de afuera hacia adentro hasta que todas las partes de la supernova se hacen transparentes a la radiación.

## D. SUPERNOVAS Y ESTALLIDOS DE RAYOS GAMMA (GRB)

### SUPERNOVAS

Se clasifican según las características de sus espectros en el rango visible durante las primeras semanas. En la figura D1 se muestran los espectros de varios tipos. Si en el espectro no se encuentran líneas correspondientes al hidrógeno se clasifican como supernovas de tipo I y en caso contrario se clasifican como de tipo II. Cada tipo a su vez se clasifica en subtipos según se den líneas como el silicio ionizado, el helio, etc. en los espectros de las de tipo I (Ia, Ib, Ic) o según sea la forma de sus curvas de luz para las de tipo II (IIP, IIL, etc). No se va a dar aquí una descripción exhaustiva de la clasificación, que se puede ver esquemáticamente en la figura D2. Lo que sí se va a apuntar es que hay un gran consenso en que las supernovas de subtipo Ia se producen a través del mecanismo de deflagración nuclear de estrellas enanas blancas y que todas las demás se originan en el colapso de estrellas masivas.

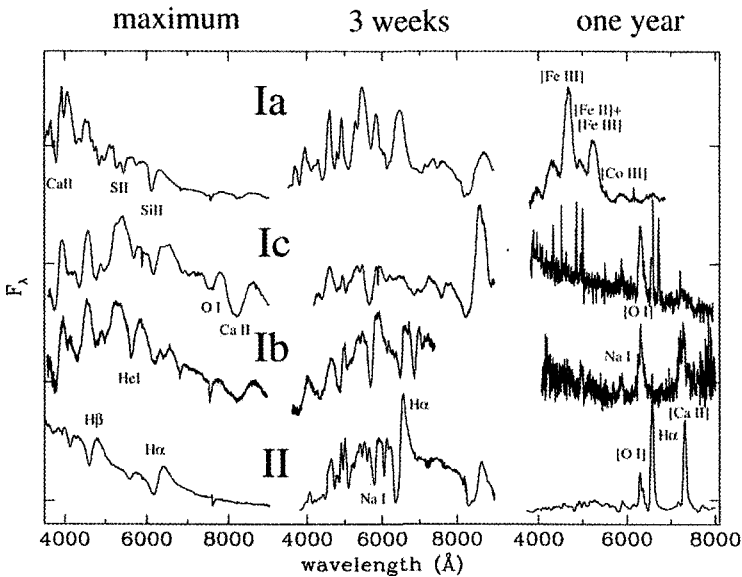


FIGURA D1. Espectros ópticos de los tipos principales de supernovas en varios momentos tras la explosión. (Cortesía de M. Turatto).

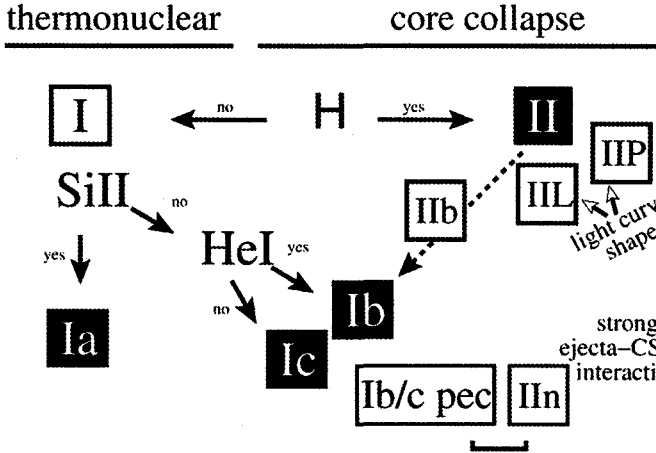


FIGURA D2. Esquema de clasificación de supernovas. Las de tipo Ia son supernovas termonucleares. Todas las demás son supernovas de colapso de estrellas masivas. (Cortesía de M. Turatto).

### Tipo Ia: supernovas termonucleares

Como se ha dicho, hay consenso en que una supernova de tipo Ia tiene como estrella progenitora una enana blanca rica en carbono y oxígeno. Antes de hablar del modelo de explosión se dirán unas palabras sobre lo que es una enana blanca y cómo se forma.

Durante la evolución de una estrella de pocas masas solares se llega a una fase en la que la envoltura de la estrella oscila, expandiéndose y contrayéndose sin llegar a equilibrarse. Por un lado, la energía generada en la combustión del núcleo estelar la calienta y, por otro, su expansión le permite enfriarse. En vez de llegar a un equilibrio, la situación empeora, las oscilaciones son cada vez mayores y eventualmente la envoltura estelar se desacopla del núcleo estelar dando lugar a una nebulosa planetaria. A su vez, el núcleo estelar, donde ya se han formado el carbono y el oxígeno, se contrae. La presión del gas de electrones degenerado evita que el núcleo se contraiga indefinidamente. Si la masa de la enana blanca resultante permanece constante, el gas se va enfriando progresivamente por las pérdidas de radiación. Aunque la masa permanece constante para una enana blanca aislada, puede no ser así para una enana blanca en un sistema binario.

Chandrasekhar (1939) demostró que una enana blanca es estable si su masa permanece debajo del valor  $1,4 M_{\text{sol}}$ . Si supera esta masa, la enana blanca colapsará y sólo quizás la eventual degeneración de un gas de neutrones podrá detener su colapso. Sin embargo, si la enana blanca es rica en carbono y oxígeno las reacciones termonucleares darán lugar a una explosión violenta, debido a que, sobre un gran rango de presiones, la enana blanca permanecerá con aproximadamente el mismo tamaño. En efecto, no sabrá cómo expandirse para compensar el exceso de calor y presión por la combustión del carbono y, siendo su conducción térmica muy buena, mantendrá todo el calor de las nuevas reacciones nucleares del carbono dentro de su pequeño volumen hasta la explosión final.

Si la estrella enana blanca, rica en carbono y oxígeno, es parte de un sistema binario de pequeña separación (del orden de la unidad astronómica) con una estrella gigante roja compañera, puede recibir masa de ésta a través del punto  $L_1$  de Lagrange. La figura D3 ilustra el proceso. Estos sistemas binarios son relativamente comunes. Cuando la masa de la enana blanca alcanza unas  $1,3 M_{\text{sol}}$ , puede comenzar la combustión del carbono en su centro. A diferencia de la situación habitual en la evolución de las estrellas, esta combustión no dará lugar a una expansión de la estrella y con ello a un enfriamiento que rebaje el ritmo de combustión, sino más bien, como sucede en el punto de la evolución estelar que se conoce como el “*flash de helio*”, debido a la altísima conductividad del gas de Fermi, el calor se disipará rápidamente hacia las partes externas de la enana blanca, pero el vigoroso ritmo de combustión se mantendrá y el frente de combustión se propagará desde el centro hasta la superficie.

La energía liberada en este proceso será suficiente para destrozarse la estrella cuando la masa de ésta esté cerca del límite de Chandrasekhar ( $1,4 M_{\text{sol}}$ ). Cuando ello suceda, las partes de la estrella se expandirán en el espacio circundante a velocidades que irán en aumento desde el centro hasta el exterior, alcanzando velocidades de más de  $20.000 \text{ km s}^{-1}$ . Cuando la propagación del frente de combustión tenga lugar a una velocidad inferior a la velocidad de propagación local del sonido hablaremos de una deflagración (en contraste con la situación cuando la velocidad de propagación del frente sea supersónica, a la que llamaremos detonación).

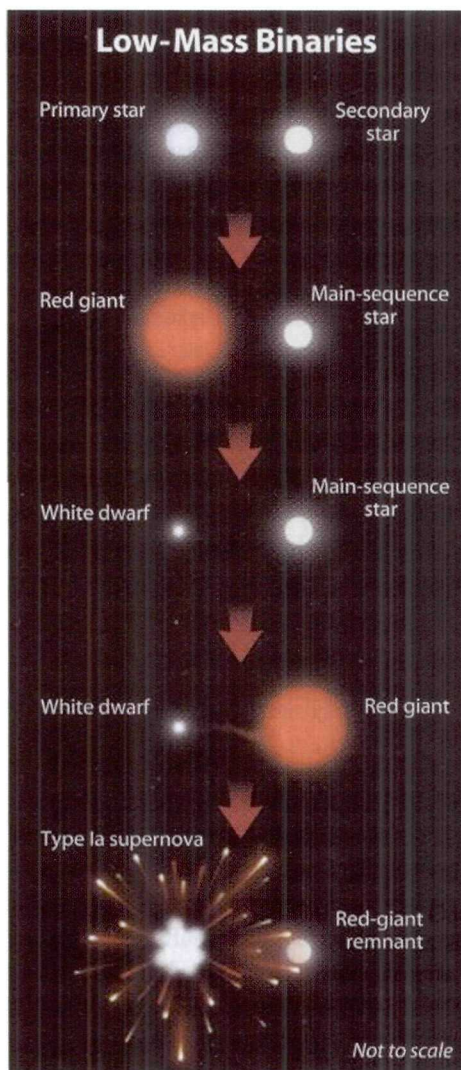


FIGURA D3. Esquema que muestra cómo una estrella enana blanca alrededor de una estrella gigante roja puede superar la masa de Chandrasekhar y explotar como supernova de tipo Ia. (Cortesía de Sky and Telescope).

La supernova de tipo Ia empezaría en el centro de la estrella enana blanca rica en carbono y oxígeno con una deflagración, es decir, una onda de choque subsónica radial creada por las primeras reacciones nucleares en el centro, que a su vez comprimiría el material que le precede y alimentaría reacciones nucleares en él. En el centro de la estrella, las presiones de confinamiento serían tan grandes que las ondas de deflagración podrían originar una combustión nuclear a las densidades necesarias para crear los elementos del “pico de hierro” (hierro, cobalto, níquel). Cuando las ondas de deflagración

subsónicas viajen hacia fuera, las presiones disminuirán y la combustión será menos completa, dando lugar a elementos como magnesio, silicio y azufre. Cuando la onda alcance las capas más externas de la estrella, el entorno no será ya tan denso como para mantener la onda subsónica, y ésta se tornará en supersónica. Se pasará así de la deflagración a la detonación. Entonces, la combustión acelerada producirá elementos como el calcio.

Este esquema explica de modo natural los espectros ópticos. Éstos muestran en su primera fase evidencia de silicio, azufre, calcio, etc. a grandes velocidades y sólo luego muestran fuertes picos de emisión de líneas de hierro. Ello indica que las líneas correspondientes a elementos intermedios en los espectros iniciales vienen de capas exteriores de la estrella que salen a gran velocidad y que posteriormente, en los espectros más tardíos, se ven los elementos pesados del centro moviéndose a menor velocidad. Ello sólo puede suceder si durante la explosión central hay una expansión de la zona en combustión que evite que todo acabe en líneas de *pico de hierro*, es decir, si al principio tiene lugar una deflagración y no una combustión que arrase con todo y lo convierta en elementos pesados. Esta manera ordenada de ver las capas de la estrella, y no todo ello mezclado, es también una característica que se ve en las simulaciones por ordenador y se sabe de la experimentación militar. La figura D4 muestra esquemáticamente las distintas partes del material eyectado de la supernova que se ven alrededor del pico de emisión.

Curiosamente, en las supernovas de tipo Ia, la mayor parte de la luz no proviene del calor de combustión. La combustión explosiva da lugar a grandes cantidades del isótopo radioactivo  $^{56}\text{Ni}$  antes de que el gas de Fermi deje de ser degenerado. Aproximadamente, el 40% de la estrella se convierte en  $^{56}\text{Ni}$ , lo que corresponde a una masa de  $0,6 M_{\text{sol}}$  ( $1,2 \cdot 10^{33}$  g). El  $^{56}\text{Ni}$  decae rápidamente en  $^{56}\text{Co}$ , que es también radioactivo y que a su vez decae en  $^{56}\text{Fe}$  con una vida media de 77,1 días. Los rayos gamma que se emiten, a su vez, transmiten su energía a los electrones vecinos y luego son eventualmente absorbidos por los átomos del material eyectado de la supernova. De este modo se calienta la envoltura de la supernova a una temperatura de unos 10.000 K. La luz que ésta emite sale eventualmente al exterior desde la fotosfera de la supernova dando lugar al pico de luz que se observa unos 20 días después de la explosión.



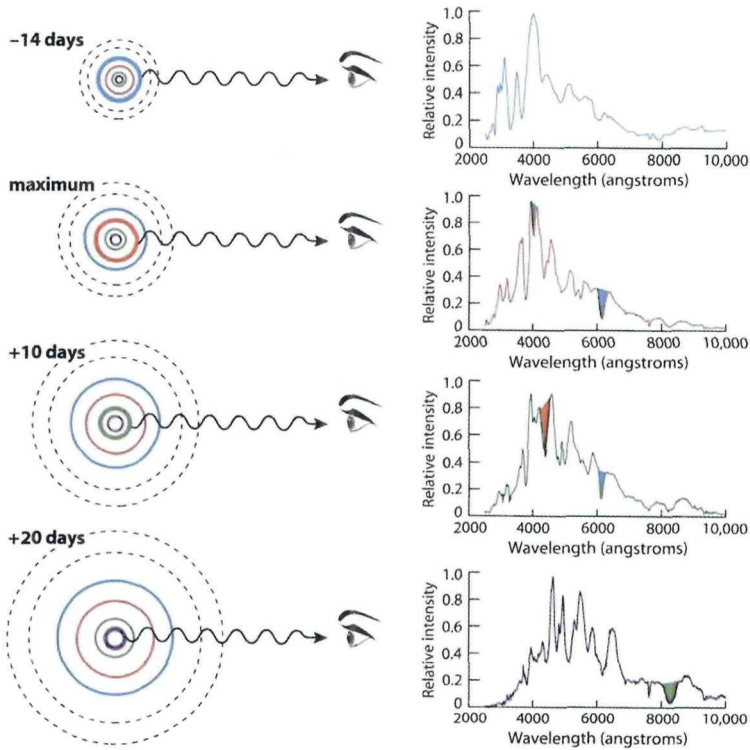


FIGURA D4. Partes del material eyectado de la supernova que se ven en distintos tiempos alrededor del tiempo de máxima emisión. Cada vez se ve más adentro en el interior de la (estrella) supernova. Las partes exteriores más frías dejan su huella en absorción. (Cortesía de Sky and Telescope).

Las curvas de luz de las supernovas de tipo Ia no son todas iguales, como se puede ver en la figura D5(a), correspondiente a datos observacionales. Sin embargo, las curvas se pueden renormalizar a una única forma patrón. Las supernovas más luminosas tardan más en decaer. Lo hacen con una anchura de la curva de luz (a 1,5 magnitudes del pico de emisión) más grande. Las luminosidades y curvas de luz son tales que la variedad se puede “estirar y encoger” de modo que, tras la operación, todas ellas caen en una curva de luz patrón, con una dispersión muy pequeña, como se muestra en la figura D5(b). Esta renormalización tiene gran importancia, pues permite utilizar las supernovas de tipo Ia como candelas estándar (“luminosidades patrón”) que se ven a grandes distancias en el universo (Hamuy et al. 1993). Precisamente, como se ha comentado anteriormente, su utilización reciente ha dado lugar a uno de los

descubrimientos más sorprendentes de todos los tiempos: el universo se expande de manera acelerada.

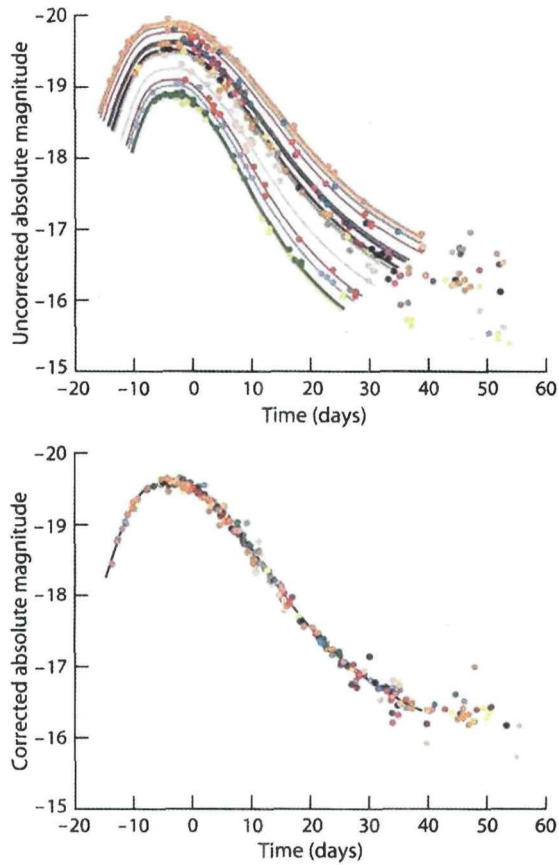


FIGURA D5. (a) (arriba) Curvas de luz de distintas supernovas de tipo Ia; (b) (abajo) Las curvas de luz anteriores tras la renormalización. (Cortesía de Sky and Telescope).

Para la curva normalizada, la magnitud absoluta en el azul y en máximo es  $M_B = -19,6 \pm 0,2$  ( $10^{9,72} L_{\text{sol}}$ ). Ello casa bien con la existencia de un umbral como la masa de Chandrasekhar. Por otro lado, se han observado supernovas de tipo Ia en todo tipo de galaxias y entornos estelares, en gran contraste con todas las demás supernovas, que sólo se observan en entornos de formación estelar reciente. Ello indica que las supernovas de tipo Ia tienen lugar en sistemas evolucionados, mientras que las otras supernovas tienen lugar en sistemas jóvenes. Como la duración de la vida de una estrella

es aproximadamente inversamente proporcional al cuadrado de su masa en la secuencia principal, las candidatas naturales para estrellas progenitoras de explosiones supernovas de todos los tipos, excepto las de tipo Ia, serán pues estrellas masivas.

## Tipo II: Supernovas de colapso de estrellas masivas

Las curvas de luz de las supernovas de tipo II no se pueden normalizar a una única curva patrón y presentan un característico aplanamiento (*plateau*) en la zona de máximo. Cuando este aplanamiento es claro y dura unos 50-100 días, se la clasifica como de tipo IIP, como la que se muestra en la figura D6. Cuando este aplanamiento es casi imperceptible, la curva no se diferencia mucho de las de tipo I y se les denomina de tipo IIL (figura D7). La variedad de las curvas de luz de las supernovas de tipo II es muy grande y se encuentra de todo entre los extremos, IIP, *plateau*, y IIL, *linear*.

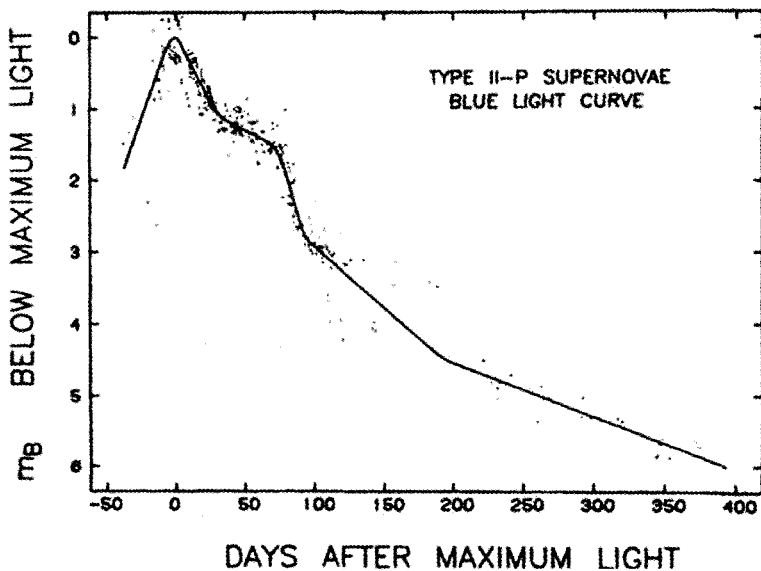


FIGURA D6. Curva de luz de supernovas de tipo IIP.

Las características principales de la curva de luz de una supernova de tipo IIP se pueden reproducir modelando la explosión

de una estrella supergigante roja de composición normal, con una corteza de unas  $5 M_{\text{sol}}$  y un radio de unos  $500 R_{\text{sol}}$ . El aplanamiento de la curva de luz en su máximo resultaría de la disipación de la energía térmica almacenada en la corteza debido al paso de la onda de choque que da lugar a la explosión. La duración del aplanamiento sería proporcional a la masa de la corteza eyectada. Debido a que las cortezas eyectadas pueden tener todo un rango de masas entre  $1-10 M_{\text{sol}}$ , los aplanamientos en máximo de las curvas de luz tendrán todo un rango que hace que las curvas de luz de las tipo II sean casi todas distintas. Por otro lado, el modelado con composición normal (en contraste con las de tipo I) está más que justificado, dado que las líneas de absorción de Ca, Na, Mg y Fe en los espectros de las supernovas de tipo II no indican anomalías.

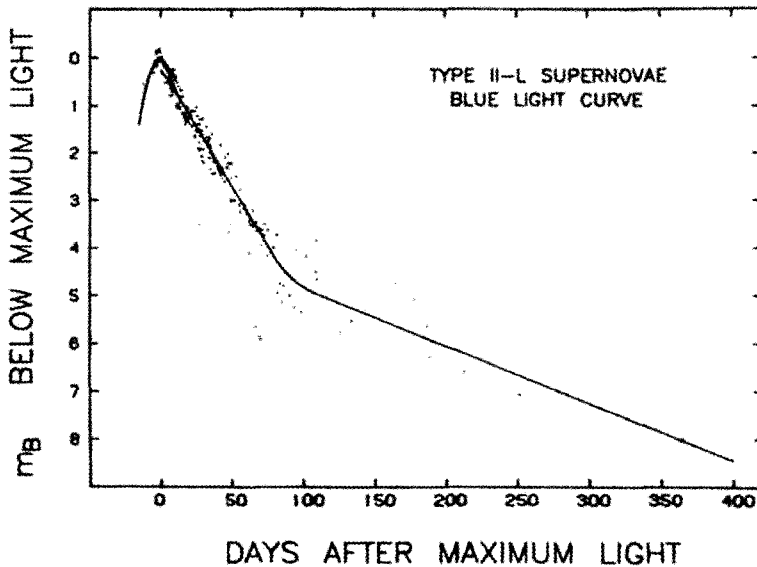


FIGURA D7. Curva de luz de supernovas de tipo III.

En una fase más tardía de las tipo IIP, cuando la caída es ya cuasi-exponencial con una vida media de unos 100 días, la curva de luz (del mismo modo que la curva de luz de las de tipo IIL) parece alimentarse de emisión de otros mecanismos como un choque propagándose por el viento estelar de la progenitora, desintegración radiactiva de un núcleo entre  $0,03-0,07 M_{\text{sol}}$  de  $^{56}\text{Ni}$ , o un posible pulsar.

El espectro de continuo de las tipo II es muy aproximadamente *planckiano* y por tanto se puede caracterizar muy bien por una temperatura, que resulta ser entre 10.000-15.000 K en el máximo de luminosidad, cayendo al rango 5.000-7.000 K en varias semanas y hacia 4.000K tras varios meses. En todos los casos se detecta un exceso de emisión de infrarrojo, lo que delata la presencia de polvo. Las líneas espectrales muestran velocidades que van desde 10.000-20.000 km s<sup>-1</sup> al principio hasta 1.000-2.000 km s<sup>-1</sup> después de varios meses o años. Sin embargo, esto no es un efecto de desaceleración, sino el efecto de que, según la supernova se expande, la corteza eyectada se hace cada vez más transparente y se observa radiación que proviene cada vez de más adentro en la corteza (véase otra vez la figura D4), es decir, de gas cada vez más lento.

La teoría de evolución estelar está ya tan desarrollada como para poder concluir que las estrellas que, en secuencia principal, tienen una masa superior a aproximadamente  $9 M_{\text{sol}}$  dan lugar a explosiones supernova de tipo II o de los tipos relacionados Ib y Ic. Por tanto, cuando hablamos de estrellas masivas nos restringimos a estrellas de masa superior a  $9 M_{\text{sol}}$ . Estas estrellas masivas tienen una evolución cualitativa que se puede resumir del siguiente modo: la temperatura y luminosidad de la estrella responde en cada caso a la combustión en la corteza más externa del núcleo, es decir a la combustión del hidrógeno. Cuando esta combustión es vigorosa la estrella se expande y enfría y de este modo regula la combustión. Es decir, la estrella siempre tiene una reacción hacia equilibrarse. Debajo de la corteza de combustión de hidrógeno hay una zona rica en helio y en su parte interior hay otra zona de combustión de helio. Al principio esta zona más interior será el núcleo, pero luego se tornará a su vez en corteza intermedia, dejando un núcleo rico en carbono y oxígeno. La combustión del helio en una corteza intermedia afectará a la combustión del hidrógeno en otra corteza más exterior. En su parte interior irán quedando sus cenizas, es decir, el núcleo de carbono y de oxígeno. Como este núcleo no tendrá sustentación interna, empezará a contraerse hasta que las temperaturas en su centro alcancen valores que permitan nuevas reacciones nucleares que darán lugar a elementos como el <sup>20</sup>Ne, <sup>23</sup>Na, <sup>23</sup>Mg, etc. Todo ello dará lugar a un núcleo en el que la composición dominante será el <sup>28</sup>Si. De ese modo se irá formando la estructura de la composición de la estrella en forma de cebolla con las capas internas cada vez más delgadas,

siempre teniendo en el centro los elementos más pesados que se habrán sintetizado en la fase de combustión precedente. La síntesis de elementos llegará tan lejos como le permita la masa de la estrella.

Si la masa supera las  $9 M_{\text{sol}}$  y las temperaturas centrales superan eventualmente los  $3 \cdot 10^9$  K también el silicio empezará a quemarse, dando lugar a una secuencia de elementos intermedios como el  $^{32}\text{S}$ , para dar al final  $^{56}\text{Ni}$  y a un número de isótopos alrededor de  $^{56}\text{Fe}$ . Estos isótopos son los que tienen las mayores energías de ligadura nuclear y se conocen como *núcleo de hierro*. La consecuencia de que la combustión en el núcleo de las estrellas masivas resulte en isótopos cada vez más cercanos al *núcleo de hierro* hace que cada vez la energía liberada pueda ser menor por unidad de masa del combustible consumido. Como esta energía liberada es necesaria para soportar la contracción de la estrella, el precario equilibrio exigirá un ritmo de combustión desahogado y creciente... mientras sea posible. En una estrella masiva la combustión del núcleo de silicio se completa en pocos días, aunque la estrella haya vivido unos 10-100 millones de años con las combustiones anteriores.

Las altísimas temperaturas del *núcleo de hierro* no sólo permiten las reacciones nucleares, sino que también comportan fotones de muy alta energía que chocan contra los núcleos de los distintos elementos. Si la energía de estos fotones es suficientemente grande pueden foto-desintegrar los núcleos. Precisamente eso es lo que hacen llegado a un punto. Dado que el elemento  $^{56}\text{Fe}$  es el de mayor energía de ligadura, no hay posibilidad de que su combustión sea exotérmica. Al contrario, es endotérmica y más que evitar la contracción del núcleo lo que hace es provocarla, con el consiguiente aumento de las temperaturas debido a la liberación de energía potencial. Esta liberación aumenta la temperatura y provoca la foto-desintegración del  $^{56}\text{Fe}$  dando lugar a 13 partículas- $\alpha$ , que a su vez se foto-desintegran dando lugar a un caldo de protones y neutrones.

Para una estrella de  $10 M_{\text{sol}}$  en la secuencia principal, la foto-desintegración tendrá lugar cuando el núcleo de hierro tenga una masa de unos  $1,3 M_{\text{sol}}$ . Hasta ese momento, los electrones libres contribuyen a la presión con su presión de degeneración y, junto con la presión de radiación, evitan el colapso del núcleo. Sin embargo, tras la foto-desintegración se alcanzan densidades cercanas a  $10^{10} \text{ g cm}^{-3}$  y temperaturas

cercanas a  $10^{10}$  K que propician reacciones de captura del electrón por el protón para dar neutrón y neutrino. Como consecuencia, se pierde muchísima energía del núcleo en forma de neutrinos, pero además ya no hay presión debida a la degeneración del gas de electrones y, con ello, el colapso es inevitable y tiene lugar de un modo extremadamente rápido. El colapso es homólogo en las partes interiores. A la distancia radial a la que la velocidad de colapso iguala la velocidad local del sonido hay un desacoplamiento entre la parte interior y la parte exterior, supersónica, en caída libre. Todo esto sucede en el núcleo.

Más hacia afuera, la estrella sigue sin enterarse de lo que está pasando en su interior, pues la transmisión de información mecánica se propaga a la velocidad del sonido. Así pues, la mayor parte de la estrella queda momentáneamente sin “cimientos” mientras el colapso homólogo de la parte interior del núcleo continúa hasta que la densidad excede ampliamente la densidad de un núcleo atómico. En ese momento se tiene un gas de neutrones, un gas de Fermi, que se torna degenerado y que cesa en su compresión. Los detalles de lo que sucede en este momento no son muy conocidos, pero se supone que hay una especie de rebote de las partes más exteriores de la estrella de neutrones que se acaba de formar y que provoca una onda en sentido contrario al material supersónico que está colapsando. Se forma una onda de choque que se desplaza en sentido radial, ayudada por la presión de los neutrinos que constituyen la mayor parte de la energía liberada en el colapso, y con una energía cinética que es aproximadamente un 1% de la energía liberada.

Hasta la fecha, las simulaciones tridimensionales no han conseguido una explosión supernova a partir de esta onda de choque alimentada por la presión de los neutrinos<sup>10</sup>, pero se supone que si la onda de choque no se encuentra con un *núcleo de hierro* demasiado grande, podrá sobrevivir y dar lugar a la explosión supernova. El problema de tener una cantidad excesiva de *núcleo de hierro* es que las altas temperaturas del choque provocan más fotodisociación, y por cada  $0,1 M_{\text{sol}}$  de material del *núcleo de hierro* foto-disociado el choque pierde aproximadamente  $10^{51}$  erg (Ostlie and Carroll, 1996).

---

<sup>10</sup> Burrows et al (2006) han incorporado en su modelo de explosión un nuevo mecanismo basado en ondas acústicas en el núcleo de protones y neutrones y los resultados parecen más prometedores. [Nota añadida en imprenta] Ver también *Scientific American*, octubre 2006, páginas 23-39.

Cuando la onda de choque avanza su camino procesando todo el material intermedio y externo de la estrella, tiene lugar la explosión supernova con una energía cinética total de unos  $10^{51}$  erg. Para que la supernova sea tan brillante en el visible es necesario que la onda de choque alcance primero la superficie de la estrella progenitora (lo que hará en 1 día aproximadamente) y luego la supernova aumente hasta la distancia radial a la que la emisión es máxima. Eso tiene lugar en 10-20 días, para un radio de supernova de unos  $10^{10}$  km y entonces se produce una luminosidad pico de  $10^{10} L_{\text{sol}}$ . A lo largo del tiempo esta luminosidad decae liberando unos  $10^{49}$  erg de energía en forma de fotones del visible. También se libera energía en radio (microondas), pero en menor cantidad y como radiación no-térmica por la interacción de la onda de choque con el material circunestelar creado por el viento de la estrella progenitora.

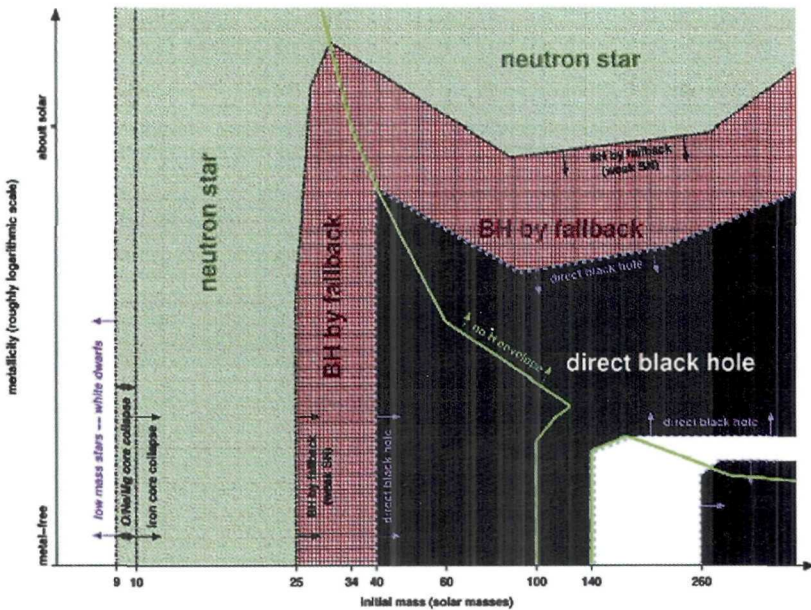


FIGURA D8. *Cuerpos compactos resultantes del colapso de estrellas masivas en función de la masa (abscisas) y de la metalicidad (ordenadas). (Cortesía de Heger).*

Parece que las estrellas masivas de hasta  $25 M_{\text{sol}}$  podrían dar lugar a una explosión supernova dejando como resto compacto una estrella de neutrones. Para estrellas todavía más masivas la presión



de degeneración de los neutrones podría no ser suficiente para evitar el colapso y éste conduciría directamente a un agujero negro. Sin embargo, en este caso no es obvio cuál sería el origen de la onda radial que daría lugar a la onda de choque que marcharía sobre el material de la estrella y destruiría a ésta. Heger et al (2003) dan los resultados de sus modelos de explosión: Las figuras D8 y D9 muestran los objetos terminales para diversas masas de las estrellas progenitoras en secuencia principal y el tipo de supernova resultante, respectivamente.

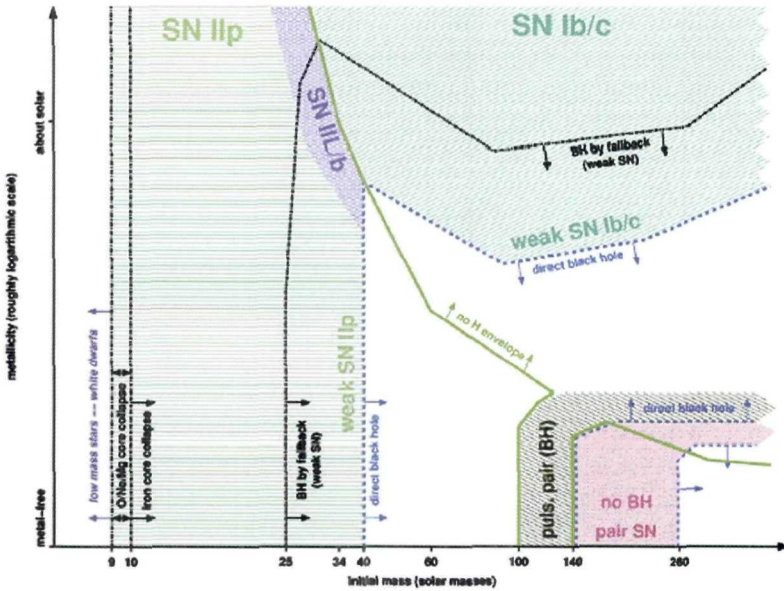


FIGURA D9. Tipos de supernovas resultantes del colapso de estrellas masivas en función de la masa (eje-X) y de la metalicidad (eje-Y). (Cortesía de Heger).

## ESTALLIDOS DE RAYOS GAMMA (GRB)

El estallido de rayos gamma (GRB, según sus siglas en inglés) recibe este nombre por razones históricas y porque su energía se emite por encima de 25 keV. Su descubrimiento en 1967 por el satélite VELA, desplegado para verificar el cumplimiento del *Tratado de No Proliferación Nuclear*, fue fortuito. Durante 25 años, tras el anuncio de su descubrimiento en 1973, se creyó que se trataba de alguna

emisión de origen galáctico, relativamente débil y supuestamente asociada a estrellas de neutrones, y su estudio no pasó de ser poco más que una curiosidad. La creciente evidencia de su distribución isotrópica y la detección el 28 de Febrero de 1997 de la contrapartida óptica de GRB970228 (Van Paradijs et al. 1997) en una distante galaxia cambiaron por completo la percepción. Desde entonces se han encontrado un centenar de contrapartidas.

Los GRB son las explosiones cósmicas más brillantes (aunque quizás no las más energéticas) del universo. Se han detectado GRBs a las mayores distancias cosmológicas ( $z = 6,3$ ) (Tagliaferri et al. 2005). Recientemente, su origen estelar, es decir, su parentesco con las explosiones supernovas, ha sido confirmado en algunos casos. Por ello, podemos concebir que se hayan originado GRBs incluso con las primeras estrellas. En este caso, los GRB podrían ser una de las sondas más prometedoras para estudiar el universo, pues actuarían como faros desde sus confines más remotos.

Un GRB puede durar entre 0,01 y 1.000s, con una distribución bimodal: alrededor de 0,1s (tipo corto, 25%, SGRB) y alrededor de 20s (tipo largo, 75%, LGRB), tomándose 2s como la frontera de los tipos, de los que se muestran dos ejemplos en la figura D10. La mayor parte de su energía electromagnética se recibe a energías superiores a 25 keV. Sus espectros se han medido hasta 18 GeV, por limitaciones instrumentales, habiendo indicaciones de que su espectro pueda ser mucho más duro. La figura D11 muestra una detección de un GRB largo (LGRB) en un detector de banda 25-150 keV, en la que además se ha medido, por primera vez, polarización del orden del 80% (Coburn y Boggs, 2003). Esta detección indica presencia de un campo magnético ordenado.

En muchos de los LGRB se ha detectado emisión posterior, conocida como *afterglow*, que aparece sucesivamente en rayos-X, óptico y radio con duraciones de horas, semanas y meses, respectivamente. A partir de las curvas de luz en radio entre frecuencias 0,8-660 GHz, como la mostrada esquemáticamente en la figura D12 (Frail et al. 2001; Frail 2005), se determina que la radio emisión es debida a material ultra-relativista colimado en chorros de unos pocos grados de apertura, que según va avanzando sobre el material estelar se va haciendo menos relativista y menos colimado.

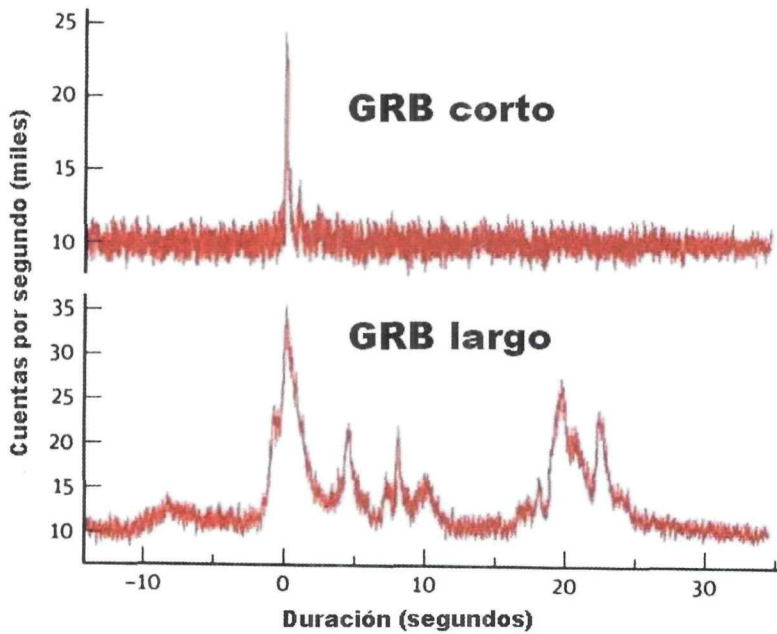


FIGURA D10. Ejemplos de perfiles temporales de GRBs. (Cortesía de Sky and Telescope).

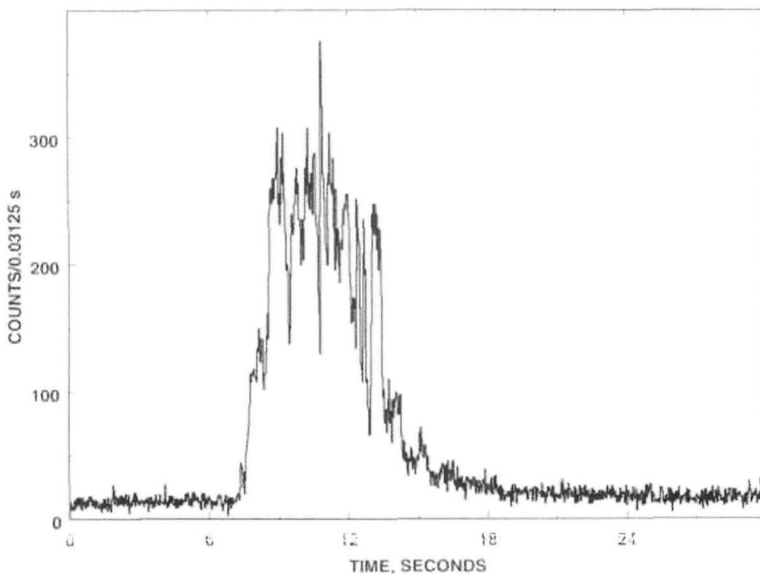


FIGURA D11. Ejemplo de perfil temporal de un LGRB. Está medido en la banda 25-150 keV y corresponde a GRB021206. (Cortesía de Hurley).

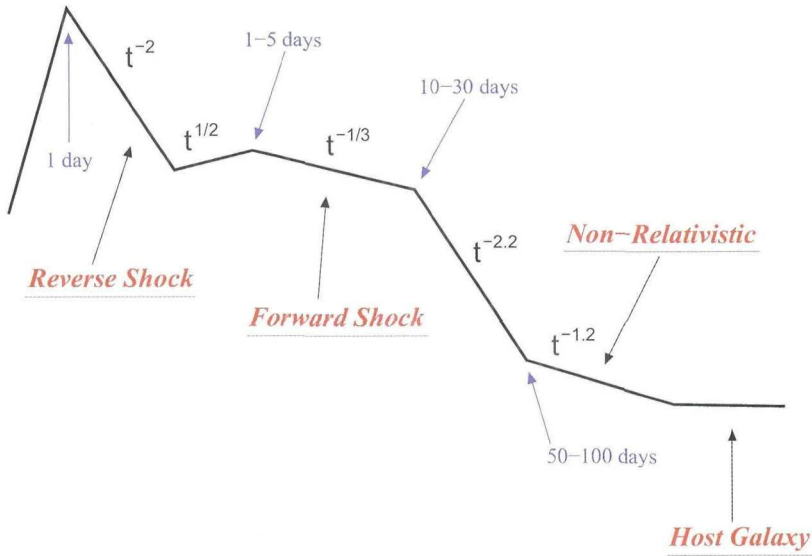


FIGURA D-12. Curva de luz esquemática en radio de un afterglow de LGRB (escala vertical: densidad de flujo; escala horizontal: tiempo). Se indican las escalas y las dependencias temporales de la evolución en cada estadio. (Cortesía de Frail).

Con ésta, y otra información similar en el óptico, emerge el siguiente cuadro conceptual: El LGRB se forma en el colapso de estrellas muy masivas en rotación. Cuando el núcleo colapsa hacia un agujero negro rodeado de un campo magnético fuerte, la energía sale en las direcciones polares, probablemente por algún mecanismo similar al propuesto por Blandford y Znajek (1977) para núcleos activos de galaxias. Esta energía se invierte en acelerar capas estelares a velocidades ultra-relativistas (con factores de Lorentz de varios cientos). Cuando estas capas colisionan entre ellas dan lugar a ondas de choque internas que aceleran los electrones y emiten radiación sincrotrón. Eventualmente, el material chocado se va haciendo menos relativista y llega a interactuar con el viento estelar o el medio interestelar, dando lugar a ondas de choque externas.

Todo esto nos resulta muy familiar. Recuerda a las explosiones supernovas, excepto por las velocidades ultra-relativistas iniciales y la colimación (*beaming*) del movimiento y de la emisión. En vez de una explosión hidrodinámica como en las supernovas, se tiene una

explosión alimentada por una “*máquina*” central (un agujero negro) rodeada de un disco de acrecimiento del que extrae la energía<sup>11</sup>. Esta descripción cualitativa basada en el colapso de una estrella masiva en rotación corresponde al modelo *fireball* estándar, que tiene varias formas concretas como la de los *collapsars*, etc. La emisión en haces estrechos tiene una ventaja añadida: traslada unas estimaciones de energías (isotrópicas) inaceptablemente grandes ( $10^{53}$  erg) para explosiones estelares a energías (en haces estrechos) más aceptables:  $10^{51}$  erg. También, ello mismo indica que los LGRB son mucho más habituales, ya que los estaríamos viendo sólo en las orientaciones favorables. Las detecciones actuales y esta interpretación implicarían una frecuencia de LGRB de unos mil LGRBs por día en todo el universo.

La conexión LGRB-supernova es una conexión natural para explicar muchas características de las curvas de luz en el óptico y en radio. Esta conexión ha recibido un gran espaldarazo con la asociación directa entre el evento LGRB (por su emisión gamma y su *afterglow*) y el evento posterior SN (por el exceso de emisión y sus anchas líneas espectrales de absorción) sobre todo en dos casos: GRB980425 / SN1998bw (Galama et al. 1998, Bloom et al. 1999) y GRB030329 / SN2003ah (Hjorth et al. 2003, Matheson et al. 2003, Mazzali et al. 2003, Stanek et al. 2003). Además en ambos casos las supernovas son de tipo Ic con muy parecidos espectros y evolución espectral. También los espectros de la supernova SN2003lw asociada a GRB031203 (Malesani et al. 2004) y los de las supernovas identificadas muy recientemente con los GRB040924 y GRB041006 (Soderberg et al. 2006) son muy parecidos a SN1998bw. Esto no quiere decir que todos los LGRB estén asociados a supernovas, sino que una fracción de ellos sí lo está.

Por otro lado, la naturaleza de los SGRB empieza a desvelarse con la ayuda de las espectaculares detecciones del satélite *Swift*. La primera contrapartida óptica (*afterglow*) de un SGRB se encontró el

---

<sup>11</sup> Las velocidades ultra-relativistas, el movimiento y emisión en haces estrechos, y un agujero negro en rotación alimentando todo ello resultará familiar a aquellos que están familiarizados a la generación de los chorros en núcleos activos de galaxias y cuásares y que se mencionan en otro lugar de este discurso como digresión.

9 de Julio de 2005 (GRB050709, Hjorth et al. 2005) y se localizó en la parte exterior de una galaxia enana azul. La emisión *afterglow* en el óptico, y en rayos-X, lleva la inconfundible marca de la radiación sincrotrón, producida en el material ultra-relativista eyectado como en los LGRB. Sin embargo, no hay asociación con supernova alguna. Más bien, las energías involucradas apuntan a algún otro origen. Hasta la fecha se han encontrado unas pocas contrapartidas ópticas más.

La asociación de los SGRB 050509B y 050724 con galaxias elípticas de corrimientos al rojo 0,225 y 0,258, respectivamente, favorece una interpretación de coalescencia (*merger*) de binarias de estrellas de neutrones o agujeros negros (Gehrels et al. 2005; Barthelmy et al. 2005). También la evolución temporal de espectros multi-frecuencia (Gorosabel et al. 2006), que ajusta bien al patrón sintético de las galaxias elípticas, indica que los SGRB tienen lugar en medios de menor densidad (y con progenitores más viejos que las estrellas masivas) que las regiones de formación estelar donde tienen lugar los LGRB (Fruchter et al. 2006). Todo ello refuerza la hipótesis de que los SGRB se originan en la coalescencia de binarias de neutrones (tipo PSR B1913+16) o binarias de estrella de neutrones y agujero negro, pues en estos sistemas el tiempo característico para la coalescencia sería  $10^8$ - $10^9$  años y las energías involucradas en la emisión colimada serían de un orden de magnitud menor que en los LGRB, como se observa. Una predicción de esta hipótesis es que los SGRB deberían estar asociados a emisores de ondas gravitatorias. Quizás instrumentos ahora en diseño, como LISA, puedan en algún momento detectar estas ondas gravitatorias antes de que se vea el estallido de rayos gamma de corta duración.

Retornemos a los LGRB y sus supernovas asociadas. Heger et al. (2003) han hecho simulaciones del colapso de estrellas masivas en rotación para dar lugar a lo que ellos llaman *jet-driven supernovae*, un nombre genérico de lo que se ha descrito anteriormente. La figura D13 muestra sus resultados. En ella se puede ver que se formarían LGRB para masas de estrellas progenitoras mayores que 40 masas solares y con preferencia en estrellas que no han retenido el hidrógeno de su envoltura, es decir, en la relacionadas a explosiones de tipos Ib y Ic.

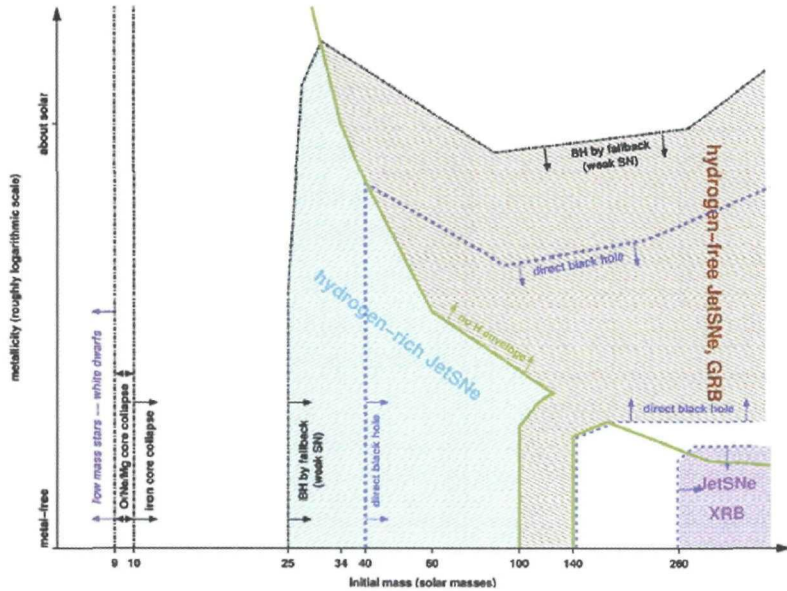


FIGURA D13. Tipos de supernovas y GRB resultantes del colapso de estrellas masivas en rápida rotación en función de la masa (abscisas) y de la metalicidad (ordenadas). (Cortesía de Heger).

Por otro lado, Fruchter et al. (2006) encuentran que, aunque algunos LGRB y supernovas están claramente asociados<sup>12</sup>, la población general de las galaxias en las que tienen lugar las explosiones y el lugar de la galaxia en la que la explosión tiene lugar son muy distintos para los LGRB y las supernovas. Los LGRB tienen lugar en los lugares más brillantes de galaxias irregulares, en entornos de

<sup>12</sup> [Nota añadida en imprenta] Dos casos recientes, GRB060505 (Fynbo et al. 2006) y GRB060614 (Fynbo et al. 2006, Della Valle et al. 2006, Gal-Yam et al. 2006) son LGRBs sin asociación con supernova hasta un límite de emisión más de cien veces menor al habitual. Para explicarlos, los autores citados necesitan invocar algún nuevo tipo de estrella progenitora masiva o algún nuevo mecanismo de colapso. En contraste, y también recientemente, se ha encontrado un caso menos luminoso del habitual, GRB060218, con una contrapartida más fuerte en el rango de rayos-X, de ahí que se le denote XRB060218, y una asociación a la supernova SN2006aj de tipo Ic (Campana et al. 2006, Pian et al. 2006, Soderberg et al. 2006, Mazzali et al. 2006). Los autores citados explican este caso como menos relativista que el LGRB habitual, con una estrella progenitora del tipo Wolf-Rayet, menos masiva que las progenitoras de los LGRB, y una estrella de neutrones magnetizada (*magnetar*) como resultante del colapso, en vez de un agujero negro. Los autores apuntan que los XRBs podrían ser más comunes que los GRBs, aunque hasta ahora sólo se haya detectado este caso.

baja metalicidad, mientras que las supernovas (Ic, pues todavía no se ha relacionado ningún otro tipo con las LGRB) pueden ocurrir en cualquier lugar de galaxias irregulares o de gran diseño (espirales). La conclusión anterior obtenida al parecer con gran fiabilidad sobre una muestra de 42 LRGB, indicaría que los LGRB son explosiones de estrellas de poca metalicidad y muy masivas en las que, debido al colapso, se formaría un agujero negro en rotación alimentándose de un disco de acrecimiento, dando lugar a un chorro muy relativista que sólo en los casos de no tener una excesiva envoltura de hidrógeno y helio conseguiría abrirse camino hasta la superficie a velocidades relativistas. También es de interés resaltar que Heger y colaboradores encuentran soluciones para los casos de muy baja metalicidad.

Es decir, aquellas primeras estrellas de baja metalicidad que mencionábamos antes en el discurso podrían proporcionarnos tres cosas importantes a través de las supernovas y los LGRB: (1) síntesis de los primeros elementos químicos pesados, (2) faros que nos permitan indagar el contenido del universo desde sus confines y (3) agujeros negros estelares que, al fusionarse con otros, den lugar a los masivos agujeros negros de los núcleos galácticos. De lo primero se tiene evidencia directa. Los astrónomos actuales buscan ávidamente evidencia de las dos últimas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Blandford, R. & Znajek, R., *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 179, 433 (1977)  
Bloom, J.S., et al., *Nature*, 401, 453 (1999)  
Burrows, A., et al., *Astrophys. J.*, 640, 878 (2006)  
Chandrasekhar, S., *An Introduction to the Study of Stellar Structure*, The University of Chicago Press (1939)  
Campana, S., et al., *Nature*, 442, 1008 (2006)  
Coburn, W. & Boggs, S., *Nature*, 423, 415 (2003)  
Della Valle, M., et al. *ArXiv:astro-ph/0608322*  
Dogget, Branch, *Astron. J.*, 90, 2303 (1985)  
Frail, D., et al., *Astrophys. J.*, 562, L55 (2001)  
Frail, D., en *Cosmic Explosions*, eds. Marcaide, J.M. & Weiler, K.W., Springer Verlag, Heidelberg, p. 452 (2005)  
Fynbo, J.P., et al., *Nature* (publicación prevista para el 21 Diciembre 2006)  
Fruchter, A.S., et al., *Nature*, 441, 463 (2006)  
Galama, T., et al., *Nature* 395, 670 (1998)  
Gal-Yam, A., et al., *arXiv:astro-ph/0608257*  
Gehrels, N., et al., *Nature*, 437, 851 (2005),  
Gorosabel, J., *Astron. & Astrophys.*, 450, 87 (2006)



- Hamuy, M., *Astron. J.*, 106, 2392 (1993)  
Heger, A., et al., *Astrophys. J.*, 591, 288 (2003)  
Hjorth, J., et al., *Nature*, 423, 847 (2003)  
Hjorth, J., et al., *Nature*, 437, 859 (2005)  
Malesani, D., *Astrophys. J.*, 609, L5 (2004)  
Matheson, T., et al., *Astrophys. J.*, 599, 394 (2003)  
Mazzali, P., et al. *Astrophys. J.*, 599, 95 (2003)  
Mazzali, P., et al., *Nature*, 442, 1018 (2006)  
Ostlie, D.A. & Carroll, B.W., *An Introduction to Modern Stellar Astrophysics*, Addison-Wesley (1996)  
Pian, E., et al., *Nature*, 442, 1011 (2006)  
Tagliaferri, G., et al., *Astron. & Astrophys.*, 443, 1L (2005)  
Soderberg, A., et al., *Astrophys. J.*, 636, 391 (2006)  
Soderberg, A., et al., *Nature*, 442, 1014 (2006)  
Stanek, K.Z., et al., *Astrophys. J.*, 591, L17 (2003)

## E. DIGRESIÓN COMPLEMENTARIA

Anteriormente se ha invocado la explosión colimada de estrellas en rotación y la alineación de esta colimación con el observador como hipótesis para apañar las excesivas energías ( $10^{53}$  erg) que resultarían de considerar estallidos de rayos gamma con simetría esférica. Esta invocación hubiera parecido esotérica hace tan sólo tres décadas. No lo es ahora debido a que hay amplia evidencia de colimación en fenómenos astronómicos de todo tipo. Ello tiene mucho que ver con la capacidad adquirida en la últimas décadas para obtener imágenes de alta resolución. Sin embargo, antes de entrar en ello, quisiera ilustrar la situación con algo distinto, pero que nos es hoy muy familiar.

Los teléfonos móviles han irrumpido en la vida diaria hasta transformar nuestros hábitos. Un requisito básico para el uso del teléfono móvil es que éste se pueda usar en cualquier postura y orientación. Para cumplir este requisito se tienen que dar dos circunstancias: que el móvil como emisor sea lo más isotrópico posible (y para ello una de las soluciones más simples es la antena dipolar) y que la antena receptora también sea poco direccional y no esté muy lejos. Esta última circunstancia exige la gran red de antenas que llenan los tejados de nuestras ciudades. La transmisión entre estas antenas y otros puntos de la red y de estos puntos con los satélites de comunicaciones tiene lugar, sin embargo, con direccionalidad creciente. En concreto, se utilizan antenas parabólicas de 20 ó 30 metros de diámetro para las comunicaciones con satélites. Estas antenas tienen gran direccionalidad (es decir, ganancia sobre el emisor isotrópico en una determinada dirección) y transmiten en ángulos sólidos de anchura de unos pocos minutos de arco. Por ello, la transmisión de una conversación o el envío de unos datos desde un móvil hasta el satélite de comunicaciones es sólo posible por el gran ahorro energético que supone la direccionalidad de las grandes antenas. Si la transmisión tuviera que ser directa desde el móvil mismo (emisor cuasi-isotrópico), eso sería imposible. Es el ahorro energético debido a la direccionalidad de las grandes antenas lo que hace posible la telefonía móvil global.

De un modo similar, si la emisión que recibimos de un objeto celeste partió de él muy colimada —y sólo la recibimos porque estamos en una orientación privilegiada con respecto a él— nuestros

estimados de energía de emisión del objeto se verán reducidos por el factor de colimación. Por eso, en los casos en los que hay un problema energético, la solución puede venir de considerar que la emisión pueda estar colimada. Como he dicho antes, este recurso habría sido bastante inaceptable hace no muchos años, sin embargo el desarrollo reciente de la astronomía muestra lo común de esta situación. La radioastronomía ha jugado un papel esencial en este aspecto a través de su capacidad de producción de imágenes de alta resolución angular. Quisiera decir unas palabras sobre ello.

Las resoluciones angulares de objetos astronómicos vistos desde la Tierra en el visible por un telescopio típico están limitadas, por lo que se conoce como *seeing*, a 1" (segundo de arco), salvo en casos excepcionales. El *seeing* es consecuencia de la atmósfera, que con sus inhomogeneidades, cambiantes en escalas de tiempo características de 0,001 s, distorsionan la trayectoria de los rayos de luz ensanchando la respuesta de difracción de un telescopio durante la integración temporal de la señal. La anchura del lóbulo principal de la respuesta de difracción de un telescopio es aproximadamente  $\lambda / D$ , siendo  $\lambda$  la longitud de onda de la luz y D el tamaño del telescopio. Para un telescopio de 1 metro de diámetro, operando en longitudes de onda del visible, esa anchura es de 0,1", diez veces menor al *seeing*.

En principio, la pretensión de obtener mayor resolución angular utilizando ondas de radio no parece viable, ya que sus longitudes de onda típicas son casi un millón de veces más largas que las del visible. Parece inconcebible construir un radiotelescopio de un kilómetro de diámetro. Sin embargo, precisamente lo que parece insuperable es muy fácil de superar. Por un lado, el problema del *seeing* es irrelevante para las largas longitudes de onda de radio, y por otro, la condición  $\lambda / D$  se da para una D que sea la separación máxima entre los elementos de un telescopio, *incluso cuando el resto de los elementos no existan*. Es decir, la relación  $\lambda / D$  es cierta cuando, en vez de un telescopio, se tiene un interferómetro de separación D entre los telescopios. Como la señal de radio de una banda de frecuencia se puede mezclar con una señal de radio coherente de otra frecuencia próxima para dar una señal de banda de frecuencia más baja (procedimiento heterodino) que sea fácil de transportar sin pérdidas y alteraciones de fase por cables

y guías de onda, la  $D$  puede hacerse muy grande y se puede obtener instantáneamente incluso mayor resolución angular que en el visible. Precisamente eso es lo que se hizo en los años sesenta, cuando se construyeron las primeras redes radio interferométricas en Inglaterra, Holanda e Italia. Estas redes tenían extensiones de unos pocos kilómetros y combinaban la señal de cada elemento con la señal de todos los demás elementos en procesadores especiales (correladores) que permitían obtener instantáneamente las visibilidades (transformadas de Fourier de las distribuciones de brillo) de los objetos de estudio. Ryle y Hewish (1960) desarrollaron la síntesis de apertura —lo que, junto al descubrimiento de los púlsares, les valió el premio Nobel— por la que se podían combinar las distintas visibilidades obtenidas durante 12 horas (o varios días) gracias a la rotación de la Tierra para luego, transformando en Fourier, determinar las distribuciones angulares de brillo de las radiofuentes objetos de estudio.

De este modo se obtuvieron imágenes de radiofuentes con alta resolución angular. Si bien estas imágenes no superaban entonces la resolución del visible, tuvieron consecuencias importantísimas: mostraron que la emisión de radio asociada a las galaxias venía de inmensas estructuras a ambos lados de éstas y plantearon la necesidad de comprender cómo se alimentaban esas regiones con los electrones relativistas necesarios para dar lugar a la radiación sincrotrón<sup>13</sup> que se observaba.

Según se fue acortando la longitud de onda de observación y según se fueron construyendo interferómetros más extensos se fue averiguando que la emisión era en general más y más colimada. Ello dio lugar a que se avanzara la hipótesis de que estos lóbulos podrían estar alimentados por chorros de material relativista lanzados muy colimadamente a lo largo del eje de rotación de agujeros negros masivos que podrían residir en los núcleos de las galaxias y que obtendrían su energía a partir de los discos de acrecimiento perpendiculares que rodearían el agujero negro masivo. Se empezaron a manejar masas de  $10^8 M_{\text{sol}}$  para esos agujeros negros (Lynden-Bell & Rees 1971).

---

<sup>13</sup> Las temperaturas de brillo que se observaban excluían cualquier origen térmico de la radiación.

Se justificó entonces que los chorros mismos no se veían porque las pérdidas radiativas del transporte eran mínimas. Se argumentó que sólo se veían los lóbulos donde el chorro chocaba con el medio intergaláctico y se producían pérdidas. De este modo, y sin casi quererlo, aparecieron es escena conceptos que han revolucionado nuestro modo de ver el cosmos: agujeros negros masivos, chorros relativistas, material intergaláctico,...

Mucho antes de que la sensibilidad y resolución de los interferómetros conexos (aquellos en los que el mezclado heterodino en todas las antenas sucede a partir de la señal de un único oscilador central) avanzaran hasta llegar a proporcionar imágenes de los chorros relativistas (i.e. imagen de Cygnus A en la figura E1) unas experiencias pioneras en la Universidad de Florida en 1967 (Brown, Carr & Block, 1968), seguidas muy de cerca por otras (Bare et al. 1967, Broten et al. 1967, Moran et al. 1967), indicaron el camino hacia una extensión de los radio interferómetros hasta entonces impensable. Estas experiencias mostraron que se podían usar distintos osciladores en distintas antenas y grabar independientemente los datos, de modo que más tarde se podían obtener las visibilidades sin pérdida de coherencia en la señal. De este modo, la D de los interferómetros

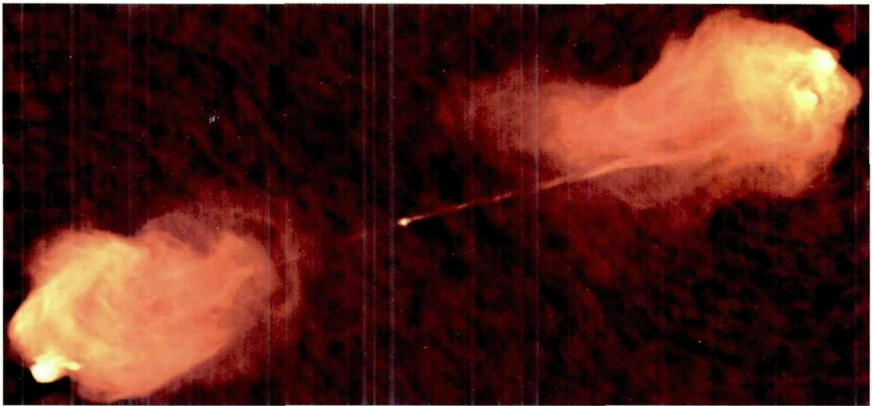


FIGURA E1. Imagen de la radio galaxia Cygnus A obtenida hacia 1983 con el Very Large Array (tratamiento de imágenes en una computadora Cray) con resolución angular de  $1''$ . En ella se observan los gigantescos lóbulos donde el material relativista interacciona con el material intergaláctico y los estrechos chorros a través de los cuales llega el plasma relativista desde la galaxia (de extensión comparable al punto brillante central de la imagen) a esos lóbulos que están a distancias enormes (cientos de miles de años-luz). (Cortesía de Perley).

se podía extender a varios miles de kilómetros y se podía intentar reconstruir imágenes de resoluciones de milisegundos de arco.

El análisis de los cambios en las visibilidades en función de las frecuencias espaciales (inversos de  $\lambda / D$ ) dio lugar al descubrimiento del movimiento superlumínico (movimiento propio interno que, a la distancia al objeto, equivale a una velocidad superior a la de propagación de la luz) en algunos radio cuásares (Whitney et al. 1971). El fenómeno tenía fácil explicación combinando los movimientos ultra-relativistas en los chorros de las radiofuentes con una alineación privilegiada con el observador, que acorta el tiempo entre eventos en la radiofuente en el sistema de referencia del observador con respecto al tiempo entre eventos en el sistema de referencia de la radiofuente. De hecho, esta geometría de cuasi-alineación con el observador también amplifica la emisión intrínseca por, al menos, el cuadrado del factor de Doppler del movimiento relativista y hace que los radio cuásares sean más brillantes. En efecto, los radio cuásares bajo estudio en los primeros años setenta se habían seleccionado precisamente porque eran los más brillantes.

El desarrollo de los algoritmos para la reconstrucción de imágenes a partir de datos interferométricos intercontinentales (es decir con pobrísimo cubrimiento del plano de Fourier) no maduró hasta 1978 (Readhead & Wilkinson, 1978; Cotton 1979). Sin embargo, a partir de esa fecha se pudieron hacer imágenes que mostraron que las estructuras de algunos radio cuásares se desplazaban a velocidades superlumínicas. En realidad, incluso con las imágenes, sólo se podía hablar de *expansiones* superlumínicas, ya que se trataba de movimientos superlumínicos relativos entre partes de la estructura interna del cuásar sin que hubiera un punto fiducial fijo para determinar el movimiento absoluto. La determinación de que se trataba de movimientos superlumínicos *bona-fide* tuvo que esperar unos años al desarrollo de la astrometría diferencial de precisión o a la técnica hermana de mapeo por referencia de fase.

La figura E2 muestra cuatro imágenes obtenidas de datos adquiridos simultáneamente para dos cuásares a dos longitudes de onda. Estas imágenes simultáneas se pudieron hacer en 1981 por varias razones: la separación angular de los cuásares es de solo 33", el instrumental

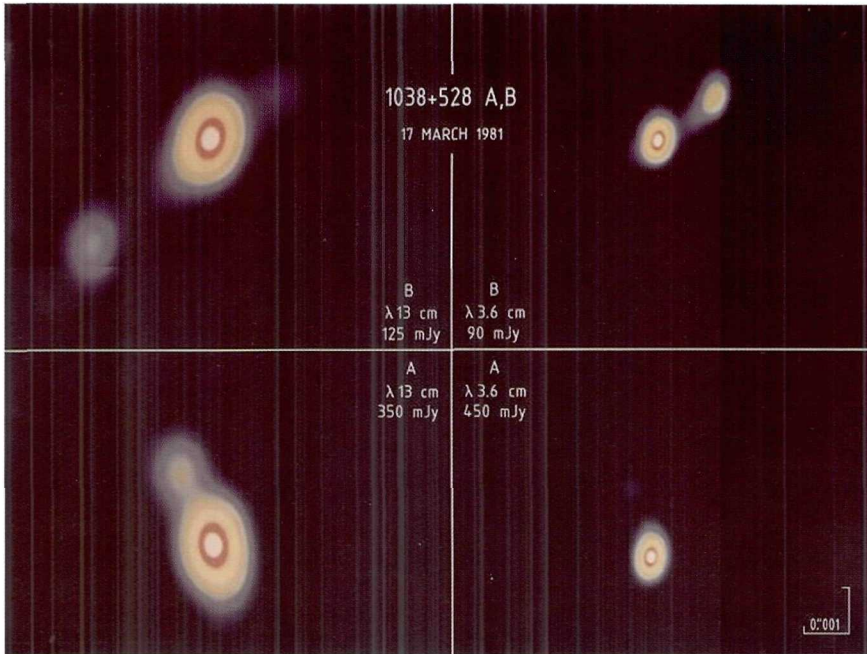


FIGURA E2. Imágenes simultáneas a dos longitudes de onda de los cuásares 1028+528 A y B, separados por sólo 33". La separación entre los núcleos de estos cuásares se pudo determinar con 4 microsegundos de arco de precisión.

MKIII de interferometría de muy larga base (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) recién desarrollado permitía una grabación independiente en dos bandas de frecuencia, tal instrumental acababa de instalarse en las antenas gigantes (64m de NASA y 100m del Instituto Max Planck für Radioastronomie), las computadoras para poder procesar las imágenes empezaban a ser suficientemente grandes y las técnicas de tratamiento de imágenes se habían desarrollado. Todo ello permitió determinar la distancia angular entre puntos bien definidos de las estructuras de cada cuasar con precisión de 4 micro-segundos de arco y descubrir que los picos de brillo de las imágenes estaban desplazados por 700 micro-segundos de arco (Marcaide & Shapiro 1983, 1984). El descubrimiento de este desplazamiento permitió a su vez, un poco más tarde, corroborar la propuesta de Blandford & Königl (1979) de que, debido a la opacidad a la radiación (auto-absorción sincrotrón), la posición del pico de brillo de un chorro relativista se desplaza sobre la fuente en función de la longitud de onda de observación.

El cuáasar 4C39,25, el único entre los brillantes radio cuásares estudiados desde los primeros tiempos de VLBI en el que no se había detectado expansión superluminal, ofreció a partir de un episodio que dio lugar al descubrimiento de una nueva componente interna (Marcaide et al. 1985) la oportunidad de medir el movimiento superluminal de esa componente por medio de una combinación entre cartografiado y astrometría diferencial de precisión, tomando una fuente externa como referencia del movimiento (Guirado et al. 1995). De este modo, se pudo determinar la trayectoria absoluta de esa componente y proponer un modelo físico con predicciones concretas, que han sido confirmadas (Alberdi et al. 2000).

En resumen, durante las últimas décadas ha quedado bien establecido que muchos núcleos activos de galaxias y cuásares tienen asociados grandes chorros de plasma relativista que a menudo se extienden sobre decenas de miles de años-luz (véase la figura E3) y que, como en el caso que se muestra, se pueden detectar en varias zonas del espectro electromagnético. Cuando la orientación de los chorros es favorable se pueden observar movimientos superlumínicos. Como ello supone una persistencia en la orientación (memoria) del objeto colimador de los chorros durante cientos de miles de años, es

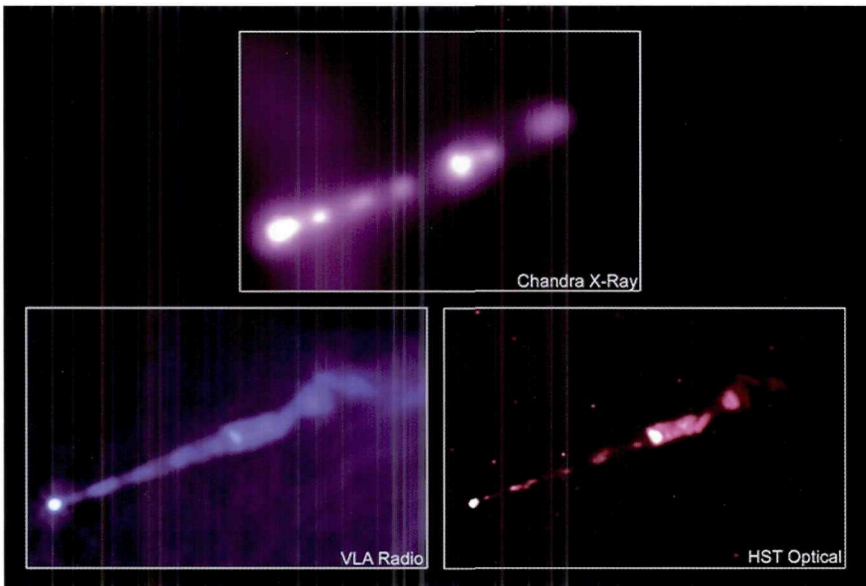


FIGURA E3. Imagen del chorro de Virgo A (M87) en radio, visible y rayos X.



difícil sustraerse a la conclusión de que el motor de tal emisión de energía debe ser un agujero negro muy masivo en rotación, que la genera a partir de su entorno gravitatorio, la transforma y la colima en esos estrechos y larguísimos chorros. Esta conclusión se ve confirmada por la determinación directa (utilizando la ley de Kepler en casos observacionalmente difíciles) de la masa de un agujero negro masivo en tres casos (Miyoshi et al. 1995, Eckart & Genzel 1996, Bender et al. 2005).

En este momento, hay estudios de muestras completas, como la mostrada en la figura E4, encaminados a determinar en gran detalle, utilizando imágenes multi-frecuencia y astrometría diferencial de precisión, cómo se mueven las componentes superlumínicas y cuál

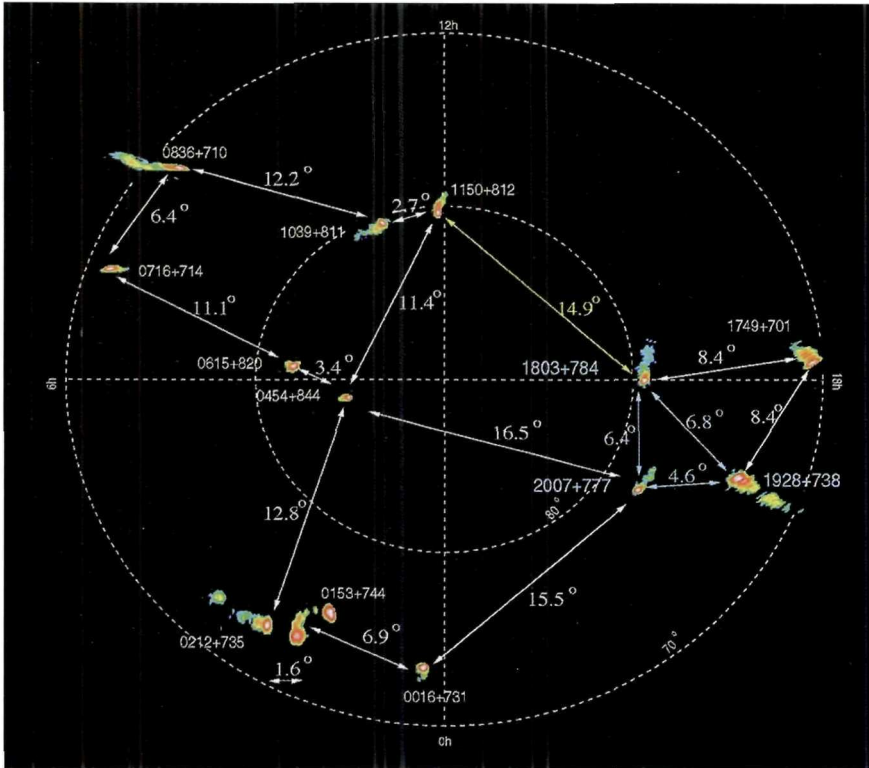


FIGURA E4. Estructuras compactas de 13 objetos BLLac y cuásares que componen una muestra completa (bajo una cierta definición) y que está en estudio a 3 longitudes de onda sobre 4 épocas de observación para obtener un registro único de todo el conjunto con precisión de unos 0,00005".

es la estabilidad de la posición del entorno inmediato de los agujeros negros masivos (es decir, la base de los chorros) (Martí-Vidal et al. 2007).

Tras años de estudios de la radio emisión bipolar de estructuras muy colimadas en núcleos activos de galaxias y cuásares no es difícil imaginar cómo pueden ser las emisiones de los GRB donde los actores en juego (agujero negro, disco de acrecimiento, plasma ultra-relativista en chorros colimados, etc), a otras escalas, son los mismos. Sin embargo, la rapidísima evolución de la emisión radio en el caso de los GRB no ha permitido todavía el cartografiado en ningún caso.

Como ya se ha dicho antes, los GRB están relacionados a las fases finales de la vida de las estrellas. Podríamos preguntarnos si también hay emisión bipolar en las fases iniciales de las estrellas o si éstas se forman en un colapso perfectamente esférico. Cuando las primeras evidencias de emisión bipolar (Snell, Loren & Plambeck 1980, Torrelles et al. 1983, Rodríguez et al. 1983, Lada 1985) aparecieron en las observaciones espectroscópicas del monóxido de carbono, la sorpresa fue grande y muchos astrónomos fueron muy escépticos de que la interpretación de los datos fuera correcta. Sin embargo, es cierto: en general, la formación estelar también tiene lugar con una emisión de materia en chorros bastante colimados y con una fenomenología parecida a lo que se ha mostrado antes. Naturalmente, la física es bien distinta, pero las morfologías son muy parecidas. En estos casos se han obtenido imágenes de esta colimación tanto en el visible como en radio. Véase la figura E5, donde se muestra, con observaciones espectroscópicas que distinguen los movimientos de aproximación (corrimientos al azul) de los movimientos de recesión (corrimientos al rojo), una bella imagen del movimiento colimado de los gases. Curiosamente, determinaciones recientes de movimientos propios de *máseres* de agua en la región de formación estelar W75 muestran que al lado de una zona de emisión muy colimada se da otra con forma esférica (Torrelles et al. 2003).

Por otro lado, también se consideran explosiones supernovas con simetría esférica. Es más, la mayoría de las simulaciones realizadas hasta la fecha se han hecho considerando simetría esférica. ¿Qué nos dicen las observaciones sobre las explosiones cósmicas más poderosas?

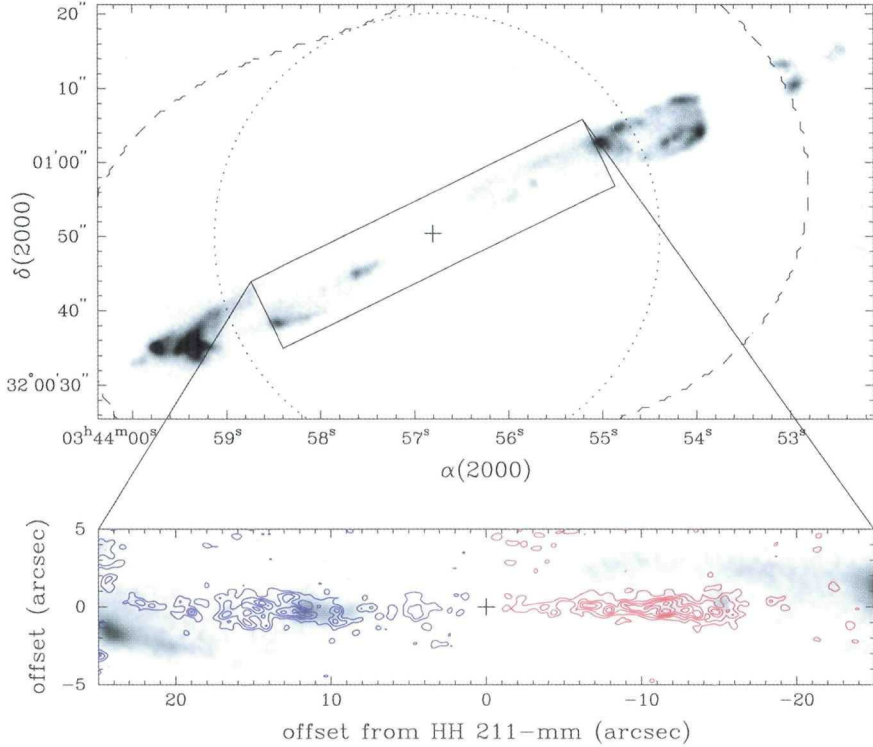


FIGURA E5. Flujo supersónico bipolar molecular trazado por la molécula de SiO (gas corrido al rojo/azul a derecha/izquierda de la imagen inferior). La cruz indica la posición de la estrella joven origen del flujo bipolar (Cortesía de Chandler).

¿Tienen simetría esférica o bipolar? Para averiguarlo se han de realizar imágenes de la mayor resolución angular en condiciones de baja señal a ruido, dado que la emisión de radio de las supernovas es siempre escasa. No es posible obtener esas imágenes en muchos casos, pero recientemente se han hecho grandes avances en unos pocos casos que nos dan información crucial. Para lograr estos avances, que serán presentados más adelante en este discurso, se ha utilizado la mayor, y más sensible, red radio interferométrica existente. La figura E6 muestra la ubicación de las antenas (de entre 25-100 m de diámetro) de la red de radio interferometría intercontinental que se puede usar actualmente en estos estudios para obtener imágenes con resolución angular entre 0,0005 - 0,0001 segundos de arco.

## Global - VLBI - Network

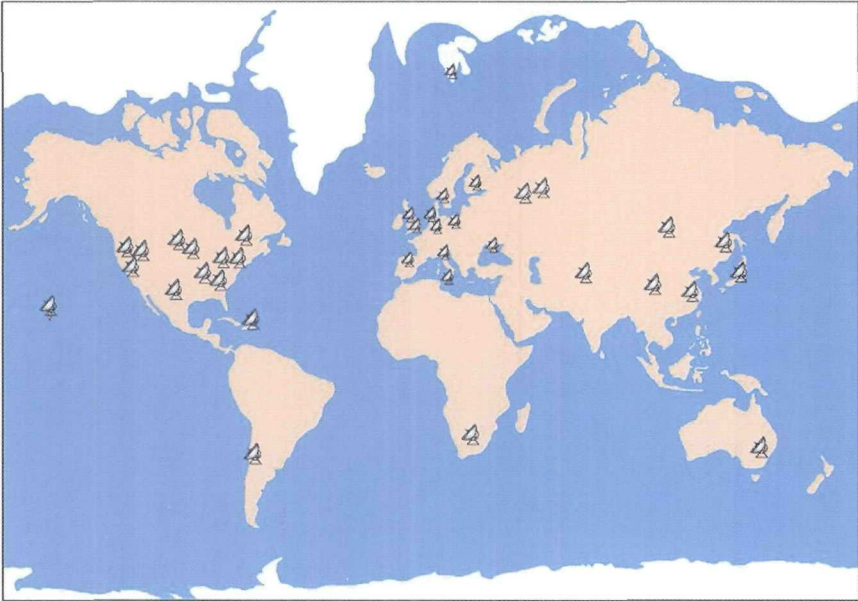


FIGURA E6. Red global de radio interferometría de muy larga base (VLBI).

## BIBLIOGRAFÍA

- Alberdi, A., et al., *Astron. & Astrophys.*, 361, 529 (2000)  
Bare, C.B., et al., *Science*, 157, 189 (1967)  
Bender, R., et al., *Astrophys. J.*, 631, 280 (2005)  
Blandford, R.D. & Königl, A., *Astrophys. J.*, 232, 34 (1979)  
Broten, et al., *Nature*, 215, 38 (1967)  
Brown, G.W., Carr, T.D., & Block, W.F., *Astrophys. Lett.*, 1, 89 (1968)  
Chandler, C. & Richer, J.S., *Astrophys. J.*, 555, 139 (2001)  
Cotton, W.D., *Astron. J.*, 84, 1122 (1979)  
Eckart, A. & Genzel, R., *Nature*, 383, 415 (1996)  
Guirado, J.C., et al., *Astron. J.*, 110, 2586 (1995)  
Lada, C.J., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 23, 267 (1985)  
Lynden-Bell, D. & Rees, M.J., *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.*, 152, 461 (1971)  
Marcaide, J.M. & Shapiro, I.I., *Astron. J.*, 88, 1133 (1983)  
Marcaide, J.M. & Shapiro, I.I., *Astrophys. J.*, 276, 56 (1984)  
Marcaide, J.M., et al., *Nature*, 314, 424 (1985)  
Martí-Vidal, I., et al., *Astron. & Astrophys.* (2007) (en preparación)  
Miyoshi, et al., *Nature*, 373, 127 (1995)  
Moran, J.M., et al., *Science*, 157, 676 (1967)  
Snell, R.L., Loren, R.B. & Plambeck, R.L., *Astrophys. J.*, 239, L17 (1980)  
Readhead, A.C.S. & Wilkinson, P.N., *Astrophys. J.*, 223, 25 (1978)

Rodríguez, L.F., et al., *Astrophys. J.*, 260, 635 (1982)  
Ryle, M. & Hewish, A., *Mon. Not. Roy.Astr. Soc.*, 120, 220 (1960)  
Torrelles, J.M., et al., *Astrophys. J.*, 274, 214 (1983)  
Torrelles, J.M., et al., *Astrophys. J.*, 598, L115 (2003)  
Whitney, A.R., et al., *Science*, 173, 225 (1971)

## F. SUPERNOVAS HISTÓRICAS

Sólo hay documentación histórica de 5 supernovas en nuestra galaxia. Estas supernovas tuvieron lugar los años 1006, 1054, 1181, 1572 y 1604. Probablemente hubo otras, pero su emisión visible pudo quedar ocultada por el polvo galáctico. Una sexta supernova, que dejó su rastro solamente en la potente emisión radio de su resto de supernova, Cas A, se ha podido identificar ahora con una supernova de tipo II que debió tener lugar alrededor de 1675, pero que no fue visible. Es decir, no ha habido supernovas en nuestra galaxia desde el descubrimiento del telescopio. Todas las supernovas históricas son pre-telescópicas. Aquí se hace un repaso breve de las 5 supernovas históricas a la luz de recientes indagaciones de tipo histórico-científico. Una referencia importante para cuestiones histórico-científicas es Stephenson & Green (2002).

### SN1006

Probablemente el astro más brillante, después del Sol y la Luna, que jamás haya surcado los cielos, apareció en la constelación Lupus del hemisferio Sur, a declinación  $38,5S$  y atrajo gran atención en su época. Según evidencia de escritos árabes, se descubrió el 30 de Abril. En China y Japón se descubrió el 1 de Mayo. Descripciones de sus movimientos diarios en documentos de los monasterios de St. Gallen (Suiza), donde se indica que sufría frecuentes ocultaciones por la altura de los picos de los Alpes, en el horizonte sur, y Benevento (Italia) han ayudado a reconstruir su posición. En 1965 se la identificó con el remanente de supernova PKS1459-41, que en coordenadas galácticas es el G327,6+14,6. Winkler et al. (2003) han medido el movimiento propio de filamentos del resto de supernova, filamentos que aparecen sólo en líneas de Balmer del hidrógeno. Su determinación de  $280 \pm 8$  milisegundos de arco/año, combinada con otro reciente estimado de la velocidad de esos filamentos basado en espectros y en modelos de gas chocado (Ghavamian et al. 2002) de  $2.890 \pm 100$  km s<sup>-1</sup> ha permitido a Winkler et al. determinar la distancia a SN1006:  $2,18 \pm 0,08$  kiloparsecs (es decir,  $7.110 \pm 260$  años-luz).

Por otro lado, varias líneas argumentales (su latitud galáctica, evidencia de bastante hierro en los restos en expansión, ausencia de estrellas masivas en su entorno, ausencia de resto compacto en el centro del resto de supernova...) vienen a indicar que se trató de una supernova de tipo Ia. Saha et al. (2001) han determinado la magnitud absoluta en el máximo de brillo para una muestra de nueve supernovas de tipo Ia para las que existen determinaciones de distancia basadas en el método de las ceféidas. Esta determinación precisa en el filtro V:  $-19,55 \pm 0,09$ , combinada con otros trabajos como el de Hamuy et al. (1996) sobre la dispersión de brillos en el pico, permiten fiablemente adoptar un estimado de magnitud  $-19,50 \pm 0,40$  para caracterizar el brillo probable de SN1006. A su vez, este resultado, combinado con la determinación de distancia, ha permitido estimar la magnitud aparente de este astro en su punto de brillo máximo:  $-7,5 \pm 0,4$ , absolutamente consistente con todos los registros históricos, que hacen de esta supernova la más brillante jamás observada. Cien veces más brillante que Sirio y también más brillante que Venus, fue, en su pico de emisión, el astro más brillante que jamás se haya mostrado en la esfera celeste, aparte del Sol y la Luna. SN1006 fue visible durante más de 3 años.

## SN1054

Apareció en la constelación de Taurus y fue registrado por primera vez por los chinos el 4 de Julio. Los chinos compararon su brillo al de Venus. Según los registros chinos y japoneses, se mantuvo visible a la luz del día durante 23 días. Se mantuvo visible durante 21 meses, hasta el 6 de Abril de 1056. No existen registros europeos de esta supernova, excepto alguno en Estambul. En 1942, el historiador Jan Duyvendak la asoció, a partir de estudios de fuentes chinas y japonesas, con la nebulosa conocida desde hacía dos siglos antes como Nebulosa del Cangrejo (M1, Messier 1). Esta nebulosa de extensión  $7' \times 5'$  (minutos de arco), es muy brillante, tanto en el visible, como en radio y rayos-X. Se muestra una imagen en la figura F1. En radio recibe la denominación 3C144 y en coordenadas galácticas G184,6–5,8. Trimble (1973) estimó la distancia a M1 como  $6.300 \pm 360$  años-luz.

En 1968 se descubrió en radio un pulsar en su centro, y posteriormente se descubrió el púlsar en el visible y en rayos-X. Este pulsar

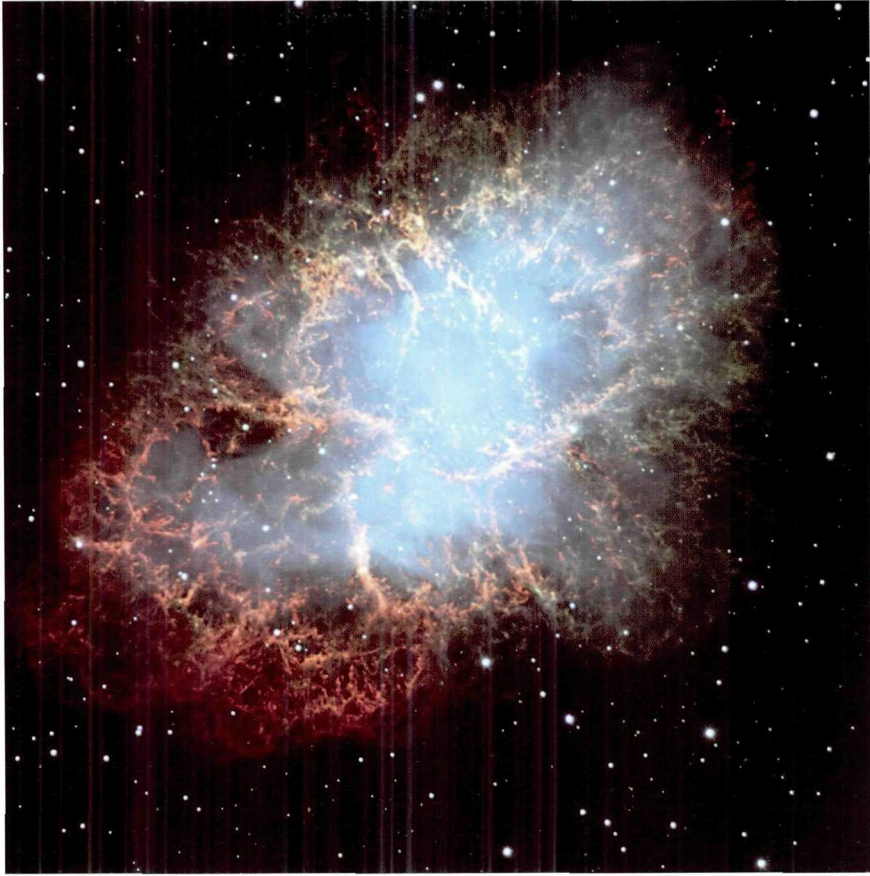


FIGURA F1. *Imagen de la Nebulosa del Cangrejo, que es un resto de la supernova SN1054. (Cortesía del European Southern Observatory).*

es la prueba de que la nebulosa es un remanente de supernova de una estrella masiva (tipo II, Ib o Ic) que, tras la explosión, dejó en su centro una estrella de neutrones magnetizada rotando rápidamente (periodo: 0,33 s). Este pulsar alimenta la nebulosa continuamente resultando ser ésta del tipo de centro-lleño (o plerión)<sup>14</sup>. Nomoto et al. (1982) concluyeron, basándose en las abundancias de elementos químicos observadas, que la estrella progenitora de SN1054 debió tener aproximadamente  $9 M_{\text{sol}}$ . Bietenholz et al. (2001) han obser-

---

<sup>14</sup> Hay más nebulosas remanentes de supernova de este tipo, en las que no se han identificado la fuentes que las alimentan. La ausencia de detección de púlsares en otros casos es fácil de explicar por una orientación desfavorable del púlsar.



vado cambios en la estructura de M1 en el entorno del púlsar, lo que refuerza la evidencia de una transferencia energética desde el púlsar a la nebulosa. Estos autores han medido movimientos estructurales con velocidades de  $0,26c$ , siendo  $c$  la velocidad de la luz, y los han relacionado con movimientos similares detectados en el visible y rayos-X. El periodo del púlsar se está alargando, y de ello se infiere que pierde energía al ritmo de  $5 \cdot 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ . Bietenholz et al. encuentran que la mayor parte de esta energía se transfiere a la nebulosa de modo muy eficiente a través de un viento muy colimado de partículas relativistas en un medio magnetizado. Todo ello refuerza el hallazgo original de Trimble (1968) de que los filamentos se mueven a velocidades del orden de  $1.450 \text{ km s}^{-1}$ , mayor velocidad que la que corresponde a una expansión que interactúa con el medio interestelar sin contribución energética externa. La explicación está probablemente en una alimentación de la nebulosa por el púlsar.

## SN1181

Apareció en la constelación de Cassiopeia y fue descubierta en el sur de China el 6 de Agosto. Según los registros chinos y japoneses se mantuvo visible durante 185 días. Clark & Stephenson (1977) la asociaron a la radiofuente 3C58 (G130,7+3,1, en coordenadas galácticas) basándose en los registros históricos. Sin embargo, hay problemas con esta asociación y con las propiedades físicas de la nebulosa 3C58. Su extensión es de  $9' \times 6'$ . Es, como la nebulosa del Cangrejo, de tipo pleriónico, de centro-lleño, y también se ha detectado en rayos-X un púlsar en su centro. Sin embargo, no es ese el caso en radio. El principal problema con la asociación es que la velocidad de los débiles filamentos ópticos y de las estructuras más externas de radio arrojan un resultado parecido, unos  $900 \text{ km s}^{-1}$  (Fesen 1983; Bietenholz, Kassim & Weiler, 2001), pero este valor es unas 5 veces menor del esperado. O bien la expansión se ha desacelerado enormemente o bien la nebulosa 3C58 tiene más edad de la que le correspondería de su asociación con SN1181. La distancia a esta nebulosa ha sido determinada por Roberts et al. (1993) como 10.500 años-luz sin dar un estimado del error de la determinación.

## SN1572

Esta supernova apareció también en la constelación de Cassiopeia y fue descubierta el 6 de Noviembre en Corea y en Messina, Italia. Como, a partir del día 11, fue estudiada en gran detalle por el gran astrónomo danés Tycho Brahe, se la conoce como Supernova Tycho. Brahe, ya en Praga, publicó en 1602 todas sus observaciones de esta supernova en *Astronomiae Instauratae Progymnasmata* (Introducción a la Nueva Astronomía) y determinó su posición fija, sin paralaje, con unos pocos minutos de arco de precisión. También Brahe publicó su curva de luz y una descripción del color cambiante durante su evolución, que duró unos 18 meses. A partir de los estudios de Baade (1945) y de Vaucouleurs (1985) se estima que la magnitud aparente en máximo fue  $-4,0 \pm 0,3$ , o sea comparable a Venus. Hanbury-Brown & Hazard identificaron en 1952 los restos de supernova con una radiofuente. Luego, en el tercer catálogo de Cambridge, esa radiofuente recibiría el nombre de 3C10 (que corresponde a G120,1+1,4 en coordenadas galácticas). En el visible, la identificación con una nebulosa tuvo lugar en 1957. Los restos de supernova consisten de una corteza delgada de emisión de un diámetro unos 8'.

Utilizando calibraciones recientes de curvas de luz de supernovas de tipo Ia, Ruiz-Lapuente (2004) concluye que se trató de una supernova de tipo Ia de luminosidad media, como SN1996X o SN1998bu, con magnitud absoluta  $-18,95 \pm 0,2$  a una distancia de  $9.300 \pm 1.300$  años-luz. Según esta autora, este estimado de distancia es compatible con la obtenida comparando los tamaños angulares de las nebulosas de SN1006 y SN1572, utilizando las velocidades de expansión dadas por los movimientos propios de los filamentos y los factores de desaceleración correspondientes. Finalmente, considerando extinción y otras fuentes de incertidumbre, esta autora vuelve a estimar la magnitud absoluta de SN1572 en  $-19,1 \pm 0,4$  y su distancia  $9.100 \pm 1300$  años-luz.

## SN1604

Descubierta en Italia el 9 de Octubre, se la conoce como Supernova Kepler y tuvo lugar en la constelación que hoy llamamos

Ophiuchus. Kepler, en Praga a partir del día 17, y Fabricius, en Frisia (Países Bajos), midieron la curva de luz y su posición fija, sin paralaje, con precisión de minutos de arco durante los 12 meses que fue visible. También en China, y sobre todo en Corea, se midió con detalle su posición y curva de luz. La curva de luz combinada se muestra en la figura F2. Kepler describió sus observaciones en el famoso libro *De stella nova in pede Serpentarii* (Sobre la nueva estrella al pie de Serpentario), que apareció publicado en 1606. Utilizando la información en él, Baade (1943) descubrió en el visible la nebulosa correspondiente a esta supernova, que luego fue asociada en radio a la fuente 3C358 (G4,5+6,8, en coordenadas galácticas).

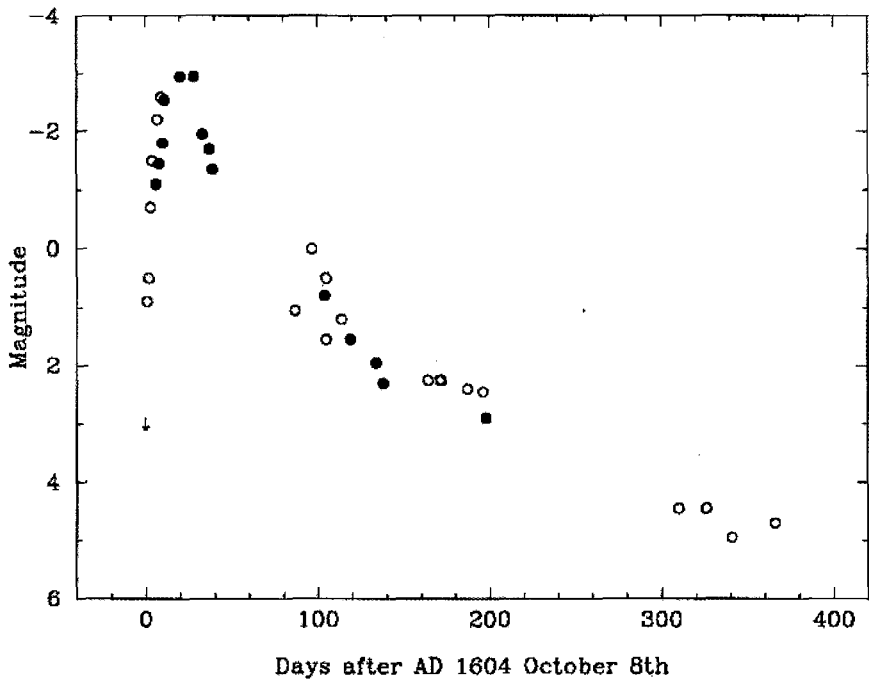


FIGURA F2. Curva de luz de SN1604. Las circunferencias son datos europeos y los círculos son datos coreanos. (Cortesía de Stephenson).

El descubrimiento de Baade tuvo su mérito, dada la fragmentación de la nebulosa y el hecho de estar situada en una dirección rica en estrellas masivas, lo que hace muy difícil su detección y estudio. La emisión de radio fue estudiada desde 1965. Sin embargo, sólo en 1975, Gull (1975) resolvió la estructura de radio y la cartografió

con modernas técnicas. La estructura consiste en una corteza esférica irregular que se extiende unos 3'. La correspondiente estructura de corteza en rayos-X la determinaron inicialmente White & Long (1983).

Por su localización, con una altura galáctica considerable (1.600 años-luz para una supuesta distancia de 14.000 años-luz a la nebulosa), se ha supuesto que se trata de una supernova de tipo Ia. Bandiera & Van den Bergh (1991) determinaron que la estrella progenitora de la supernova tuvo que ser una estrella de alta velocidad. El rico campo estelar alrededor de la nebulosa visible ha hecho la determinación de su distancia incierta. En la literatura hay muchas determinaciones que van desde 10.000 hasta 33.000 años-luz. Con observaciones en el visible, Braun (1987) determina la distancia como  $13.400 \pm 2.900$  años-luz, y observaciones en el visible combinadas con un modelo de gas chocado permiten a Bandiera (1987) estimar la distancia en  $14.700 \pm 3.300$  años-luz. Sin embargo, Blair et al. (1991), basándose en las velocidades de los choques observados en la línea de Balmer concluyen que la distancia es  $9.500 \pm 1.300$  mil años-luz. Por otra parte, Reynoso & Goss (1999), basándose en observaciones radio interferométricas de alta resolución del HI (hidrógeno neutro) determinan el límite inferior a la distancia con la cota de  $15.600 \pm 4.600$  años-luz.

La radio nebulosa, 3C358, tiene una estructura de gruesa corteza irregular de diámetro de unos 200" (o sea, algo más que 3'). Esta estructura ha sido cartografiada en detalle en radio continuo con el Very Large Array con una resolución de 2" durante cuatro años por Dickel et al. (1988). Estos autores se han esforzado en determinar el parámetro de desaceleración y encuentran que es alrededor de 0,5, que es lo esperable de la explosión de una estrella poco masiva como las de tipo Ia y no lo que se esperaría (alrededor de 0,8-0,9) para estrellas masivas. Por tanto, ello refuerza el argumento de que la supernova fue de tipo Ia, en contraste con las dudas expuestas por Bandiera (1987) y otros. Aún así, no está establecida con claridad a qué tipo pertenece la supernova Kepler, pudiendo bien ser de tipo Ia, siguiendo cierta línea de argumentación, o tipo IIL, siguiendo otra línea de argumentación. Tampoco su distancia está bien determinada, lo que hace difícil la estimación de los parámetros físicos que la caracterizan.

Imágenes recientes de altísima resolución en rayos-X obtenidas con la cámara EPIC del satélite XMM-Newton (Cassam-Chenaï et al. 2004) muestran una corteza muy parecida a la corteza de radio. La correspondencia es impresionante y confirma que la expansión se puede entender dentro del modelo de Chevalier (1982) para la interacción circunestelar de supernovas de tipo II.

## BIBLIOGRAFIA

- Baade, W.B., *Astrophys. J.*, 97, 119 (1943)  
Baade, W.B., *Astrophys. J.*, 102, 309 (1945)  
Bandiera, R., *Astrophys. J.*, 319, 885 (1987)  
Bietenholz, M.F., Frail, D.A. & Hester, J.J., *Astrophys. J.*, 560, 254 (2001)  
Bietenholz, M.F., Kassim, N.E. & Weiler, K.W., *Astrophys. J.*, 560, 772 (2001)  
Blair, W.P., Long, K.S. & Vancura, O., *Astrophys. J.*, 366, 484 (1991)  
Braun, R., *Astron. Astrophys.*, 171, 233 (1987)  
Cassam-Chenaï, et al., *Astron. Astrophys.*, 414, 545 (2004)  
Clark, D.H. & Stephenson, F.R., *The Historical Supernovae*, Pergamon Press, Oxford (1977)  
De Vaucouleurs, G., *Astrophys. J.*, 289, 5 (1985)  
Gardner, F.F. & Milne, D.K., *Astron. J.*, 70, 754 (1965)  
Ghavamian, P., et al., *Astrophys. J.*, 572, 888 (2002)  
Gull, S.F., *MNRAS* 171, 237 (1975)  
Hamuy, M., et al., *Astron. J.*, 112, 2391 (1996)  
Nomoto, K., et al., *Nature*, 299, 803 (1982)  
Reynoso, E.M. & Goss, W.M., *Astrophys. J.*, 118, 926 (1999)  
Roberts, D.A., et al., *Astron. & Astrophys.*, 274, 427 (1993)  
Ruiz-Lapuente, P., *Astrophys. J.*, 612, 357 (2004)  
Saha, A., et al., *Astrophys. J.*, 562, 314 (2001)  
Stephenson, F.R. & Green, D.A., *Historical Supernovae and their Remnants*, Oxford University Press, Oxford (2002)  
Trimble, V., *Astron. J.*, 73, 535 (1968)  
Trimble, V., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 85, 579 (1973)  
White, R.L. & Long, K.S., *Astrophys. J.*, 264, 196 (1983)  
Winkler, F., Gupta, G. & Long, K.S., *Astrophys. J.*, 585, 324 (2003)

## G. SUPERNOVA SN1987A

La supernova SN1987A en la nebulosa Tarántula de la Gran Nube de Magallanes (GNM) fue descubierta por Ian Shelton (Circular de la IAU núm. 4316) desde el Observatorio de Las Campanas en Chile el 24 de Febrero de 1987. Shelton la descubrió en una placa tomada en Febrero 24,23UT (Tiempo Universal 0,23 horas del día 24). Oscar Duhalde, también desde Las Campanas, dio a conocer su observación visual de Febrero 24,2UT. La detección de la supernova en Febrero 24,37UT por el astrónomo aficionado neozelandés Albert Jones, dentro de un programa rutinario de observación diaria de la GNM que no la había detectado en Febrero 23,39UT, cobró especial relevancia ante la detección de neutrinos de la dirección de SN1987A en Febrero 23,316UT en Kamiokande II e IMB.

Los espectros iniciales (figura G1) mostraron líneas de la serie de Balmer con perfiles de tipo *P-Cygni* que indicaban la presencia de hidrógeno (supernova de tipo II) moviéndose a unos 30.000 km s<sup>-1</sup>. Alcanzó magnitud visual 4,4 tras aumentar su brillo en un factor 100 en 3 horas, y no en varios días como en otras supernovas de tipo II, lo que indicaba que la atmósfera de la supernova era más compacta que las de las supergigantes rojas. SN1987A es la supernova más próxima a nosotros (y la primera visible a simple vista) desde la supernova SN1604, hace 400 años. Ello y la detección de neutrinos en SN1987A, que son la signatura del colapso de su núcleo de hierro hacia una estrella de neutrones, hacen a esta supernova verdaderamente única.

Su estrella progenitora fue identificada con la Sk -69°202, una estrella supergigante azul de tipo espectral B3 Ia. El que la progenitora fuera supergigante azul, y no roja, también explica el bajo brillo intrínseco (magnitud absoluta -15,5, en comparación con una magnitud absoluta típica de -19,6) y la gran velocidad de los materiales eyectados. Ello, as su vez, explica la bajísima emisión radio de esta supernova, pues el medio circunestelar, que la onda de choque fue barriendo, era un viento estelar de la progenitora supergigante azul de velocidad 300 km s<sup>-1</sup> de muy baja densidad ( $5 \cdot 10^{-6} M_{\text{sol}}/\text{año}$ ) que estuvo actuando durante unos 30.000 años antes de la explosión.

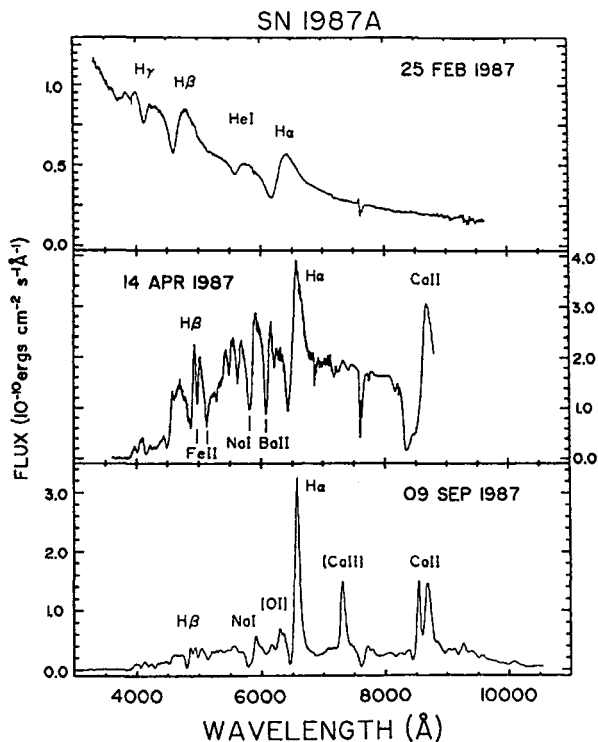


FIGURA G1. Espectros de SN1987A para tres diferentes épocas. El primer espectro corresponde a 40 horas tras el colapso, y las líneas de hidrógeno y helio con perfiles tipo P-Cygni son las únicas líneas del espectro. (Cortesía de Woosley & Phillips).

Antes de este periodo, la estrella habría pasado por una fase de supergigante roja (cuyo viento tendría el perfil de densidad  $r^{-2}$ ) con velocidad  $10 \text{ km s}^{-1}$  y una densidad de  $10^{-4} M_{\text{sol}}/\text{año}$  que actuaría durante unos 100.000 años (McCray 2005). Los valores anteriores están estimados de varios modos y, en concreto, a partir de la anchura de las líneas de radiación ultravioleta del medio circunestelar (Blades et al. 1988). El punto de transición entre los vientos de supergigantes azul y roja lo define el anillo central que se descubrió con la resolución del HST dos años después de la explosión y que se muestra en la figura G2.

El tamaño del anillo central en la figura G2 proporciona la distancia a la cual tuvo lugar la transición entre los dos vientos estelares ( $5 \cdot 10^{12} \text{ km}$ ). Desde un principio, se pudo predecir la interacción que los materiales eyectados de la supernova (viajando a velocidades de

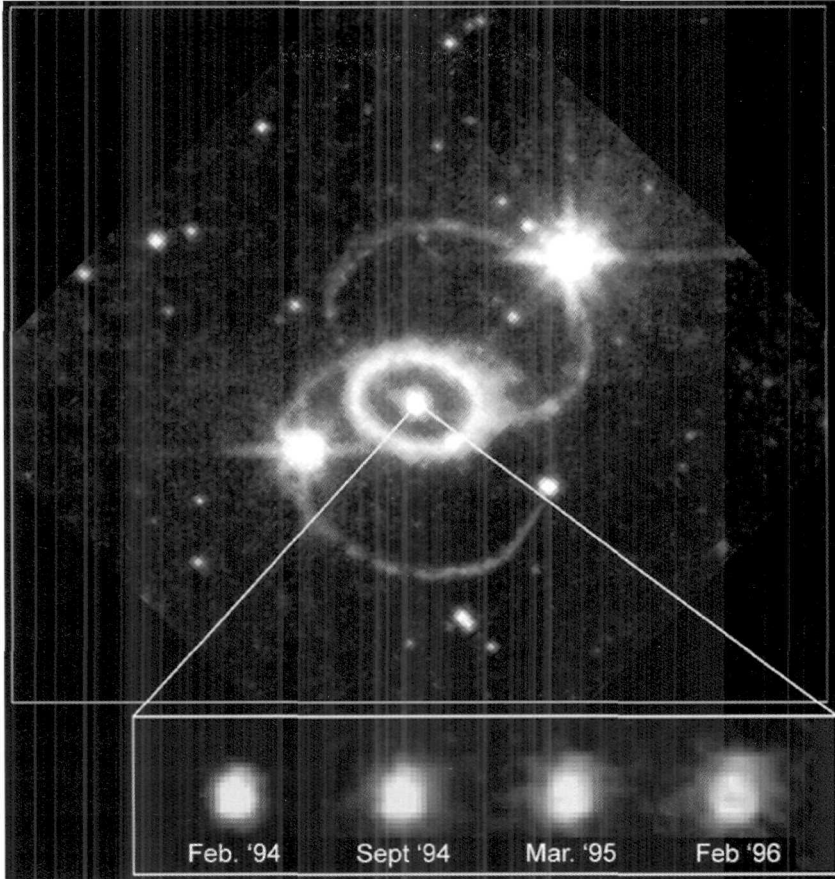


FIGURA G2. Imagen de los tres anillos descubiertos en el lugar de la explosión de SN1987A. Una deproyección muestra que los anillos son paralelos. El origen de los anillos no centrados en la supernova es todavía desconocido. El origen del anillo central es fácil de explicar como la parte interior de un viento ecuatorial de la supergigante roja que es iluminado por los fotones de la supernova. Ver texto. (Cortesía de NASA).

$20.000 \text{ km s}^{-1}$ ) tendrían a unos diez años vista con esta región más densa correspondiente al final del periodo de supergigante roja, y de la que delata su existencia el anillo que se ve como luz reflejada (véase más adelante en el texto). Varios argumentos condujeron a Arnett et al. (1989) a concluir que la progenitora era una estrella de baja metalicidad con una masa en secuencia principal de  $20 M_{\text{sol}}$ , un núcleo de helio de unas  $6 M_{\text{sol}}$  y una envoltura de unos  $10 M_{\text{sol}}$  y, por tanto, que se trataba de una estrella que había tenido una pérdida de masa de unas  $4 M_{\text{sol}}$ .



La curva de luz de SN1987A, mostrada en la figura G3, ha podido ser explicada como consecuencia del calentamiento debido a la desintegración primero del  $^{56}\text{Co}$  ( $0,07 M_{\text{sol}}$ ), luego del  $^{57}\text{Co}$  ( $0,003 M_{\text{sol}}$ , correspondiente a abundancia solar para  $^{57}\text{Co} / ^{56}\text{Co}$ ) y finalmente del  $^{44}\text{Ti}$  y del  $^{22}\text{Na}$  ( $2 \cdot 10^{-4} M_{\text{sol}}$ ).

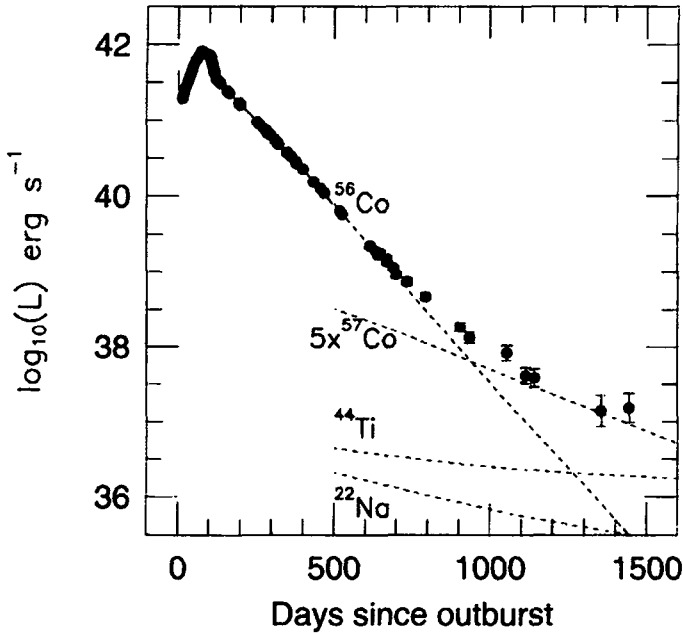


FIGURA G3. Curva de luz de SN1987A. Se indican los distintos tramos de aporte de radiación debidos a distintas componentes radioactivas. (Cortesía de Suntzeff).

## OBJETO COMPACTO

La cercanía de la supernova SN1987A y la disponibilidad de detectores de neutrinos ha permitido detectar éstos por primera vez en una supernova. La observación del estallido de neutrinos, del que se detectaron  $19 \pm 1$  eventos en Kamiokande II (Hirata et al. 1987) e IMB (Bionte et al. 1987), permiten inferir para la *neutrino-esfera* (supuesta como un cuerpo negro a temperatura  $T$ , con una caída exponencial [ $\exp(-t/4\tau)$ ] por enfriamiento) una energía de  $3 \cdot 10^{53}$  erg, una temperatura  $kT \approx 4,2$  MeV y  $\tau = 4,5$  s. Las detecciones de neutrinos son evidencia directa de la formación de un objeto com-

pacto (estrella de neutrones o, más improbablemente, agujero negro) en el núcleo de la progenitora. Sin embargo, no se ha detectado ningún púlsar y hasta la fecha no hay evidencia adicional de tal objeto compacto.

De hecho, para la detección del objeto compacto debería de ser suficiente la luminosidad bolométrica de una estrella de neutrones. La detección se resiste, a pesar de que el límite de detección actual es ya menor que una centésima parte de la luminosidad del púlsar de la nebulosa del Cangrejo, después de casi mil años. Una posibilidad, no muy favorecida por los expertos, es que tras la formación de una estrella de neutrones a partir del núcleo de hierro de  $1,4 M_{\text{sol}}$ , ésta tuviera un acrecimiento adicional de  $0,4 M_{\text{sol}}$  y colapsara a un agujero negro. Otra posibilidad es que haya una ocultación del objeto central por polvo, del que hay evidencia de que absorbe la emisión óptica de la mitad del remanente de la explosión que se encuentra más alejado y la vuelve a radiar en el infrarrojo cercano. Las alas de las líneas espectrales en el infrarrojo muestran que las condiciones de alta densidad y baja temperatura (1.000 K) de los restos de la supernova necesarias para condensar los gases de óxido de hierro, óxido de silicio y magnesio y grafito, que dan lugar a las partículas de polvo y a la alta opacidad que se observa, se dan, en efecto, a partir de los 450 días tras la explosión.

## EMISIÓN DE RAYOS GAMMA DE ORIGEN RADIOACTIVO

En la figura G3 se muestra que la emisión debida a la radioactividad del  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{44}\text{Ti}$  y  $^{22}\text{Na}$  puede explicar la curva de luz tras el principal pico de emisión. Algo parecido había sido observado ya en otras supernovas de tipo II y sobre todo en las supernovas de tipo I, tras la sugerencia inicial de Colgate & McKee (1969). Sin embargo, la sugerencia de Clayton, Colgate & Fishman (1969) de que también algunos rayos gamma de esta desintegración podrían escapar sin interactuar con el material de la supernova y podrían observarse no había podido comprobarse. En el caso de SN1987A, la cercanía de la explosión y el momento en el que tuvo lugar, coincidente con desarrollos de alta tecnología en la detección de rayos gamma, han permitido detectar tales rayos por vez primera y comprobar que los

estimados teóricos estaban en lo correcto, confirmando de este modo directo la existencia de tal radioactividad.

## ANILLOS CIRCUNESTELARES Y ECOS DE LUZ

Aunque la forma de los anillos sólo se pudo determinar a partir de la imagen que se muestra en la figura G2, la existencia del anillo central y sus características principales se pudieron predecir a partir de observaciones de líneas en el espectro ultravioleta. Estas líneas mostraban que: (a) el gas está casi estacionario, a juzgar por la anchura de las líneas; (b) probablemente se trata de gas del viento estelar de la estrella progenitora, porque su abundancia en nitrógeno es elevada; (c) el gas podría haber sido ionizado por el destello (*flash*) de rayos-X y radiación ultravioleta extrema de la explosión y está situado aproximadamente a un año-luz de distancia, a juzgar por el tiempo de subida de las curvas de luz; (d) las densidades son del orden de  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$   $\text{cm}^{-3}$ , a juzgar por la escala de tiempo de caída de las líneas de emisión.

El anillo central de la figura G2 bien pudiera ser sólo la parte interior ionizada de una hoja ecuatorial más extensa formada por viento estelar durante un periodo continuado. Este viento estelar podría haberse originado en una estrella aislada pero, a la vista de los otros dos anillos que delatan una simetría bipolar, parece más probable que un viento central tan ecuatorial venga como consecuencia de un *merger* de dos estrellas binarias. Ello también ayudaría a comprender que la progenitora fuera una supergigante azul y no una roja. Por otro lado, los ecos de la llegada del destello de la explosión a otras zonas lejanas de viento estelar más denso que su entorno —véase la figura G4—, con ser la primera vez que se observan, caen dentro de lo esperable en la evolución de cualquier estrella masiva en sus fases de gigante y supergigante. Es, sin embargo, curioso que se vea esa propagación con un movimiento propio equivalente a una velocidad superlumínica (16c). Ello se debe a que la luz reflejada proviene cada vez del cambiante lugar geométrico de los puntos de retraso lumínico constante. O sea, para cada plano se va muestreando la elipse en cuyos focos están la supernova y la Tierra (Emmering & Chevalier 1988). Estos ecos nos han dado la primera oportunidad de ver a la luz propagarse y muestrear los espacios galácticos alrededor

de una estrella, pero por lo demás no tienen nada de particular. En contraste, el anillo central almacena un enorme potencial para entender los aspectos más relevantes de la evolución de la progenitora que dio lugar a SN1987A a través de su interacción con los restos de supernova con los que interacciona desde 1999.



FIGURA G4. Anillos concéntricos de luz reflejada en las regiones con más densidad de polvo a varios años-luz alrededor de SN1987A. La luz proviene de regiones de retraso lumínico constante. Por ello, los anillos se desplazan a velocidades aparentes superlumínicas.

## EMISIÓN DE ONDAS DE RADIO

En SN1987A hay dos periodos de emisión de radio diferenciados debidos a dos razones muy distintas. En el primer periodo, se detecta emisión de radio poco tiempo tras el descubrimiento y esta emisión alcanza su máximo a longitudes de onda centimétricas 3 días después de la explosión. El máximo de emisión está en un nivel que es mil veces menor que la radioemisión típica de las radiosupernovas. La emisión decae en unas semanas. Esta breve emisión inicial resulta de la acción de la onda de choque sobre el material circunestelar (previamente

ionizado por la radiación ultravioleta de la explosión) que amplifica el campo magnético circunestelar<sup>15</sup>. Como la densidad del material circunestelar inmediato a la estrella es muy baja, la emisión deja de ser ópticamente gruesa en menos de 3 días y, pasado el máximo de emisión, decae linealmente en unas semanas. La falta de detección de franjas interferométricas en unas observaciones de VLBI realizadas 5 días después de la explosión acota el mínimo tamaño angular del emisor a 1,25 milisegundos de arco (correspondiente a un tamaño lineal de  $8 \cdot 10^9$  km), lo que implica una velocidad de expansión de la *radioesfera* de más de  $19.000 \text{ km s}^{-1}$  (Jauncey et al. 1988).

El segundo periodo de emisión de radio comienza unos 3 años más tarde cuando los restos de la supernova se aproximan a las inmediaciones del anillo circunestelar central. Como se muestra en la figura G5, a partir de 3 años, esta emisión es cada vez más intensa según la onda de choque del material eyectado evoluciona a través del medio circunestelar y lo choca.

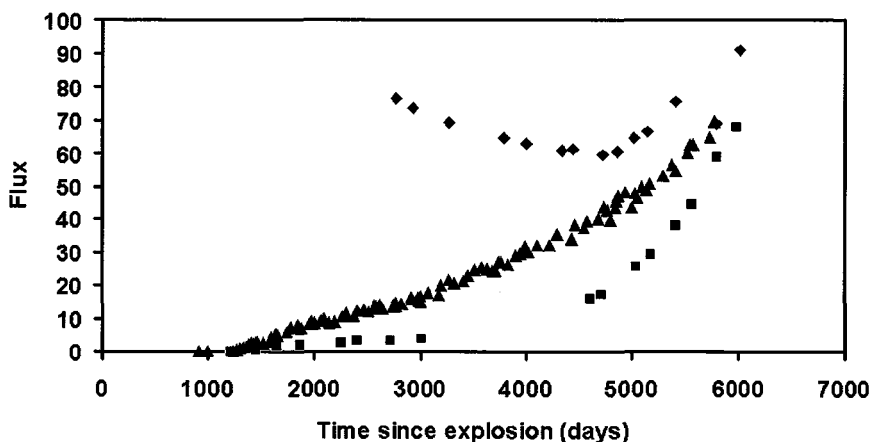


FIGURA G5. Evolución de la emisión de radio de la SN1987A (triángulos). Se puede comparar la evolución de la emisión de radio con la evolución de la emisión en rayos-X (cuadrados) y en el óptico (diamantes). La correlación es muy fuerte entre radio y rayos-X como se espera en el modelo estándar de interacción circunestelar. La correlación entre las emisiones en los tres regímenes se acentúa a partir de los 4500 días, cuando ya la interacción de los restos de la supernova con el anillo circunestelar es muy intensa. Compárese esta gráfica con las imágenes en la figura G8. (Cortesía de McCray).

<sup>15</sup> Véase el capítulo sobre la supernova SN1993J para una descripción somera del modelo estándar de la emisión circunestelar.

Como el material chocado es cada vez más denso, la emisión aumenta progresivamente y, tras 10 años, llega a haber suficiente emisión para obtener imágenes con el Australia Compact Array dada la cercanía de la SN1987A (165.000 años-luz). Se presenta una imagen (que es un anillo de emisión) en la figura G6. Una sucesión de imágenes ha permitido determinar la velocidad de expansión del radio-anillo como se muestra en la figura G7 (Manchester et al. 2002). Hasta la fecha no se ha explicado bien la desaceleración de la expansión inicial a través de un medio tenue y la expansión a velocidad casi constante a través del medio más denso cercano al anillo central.

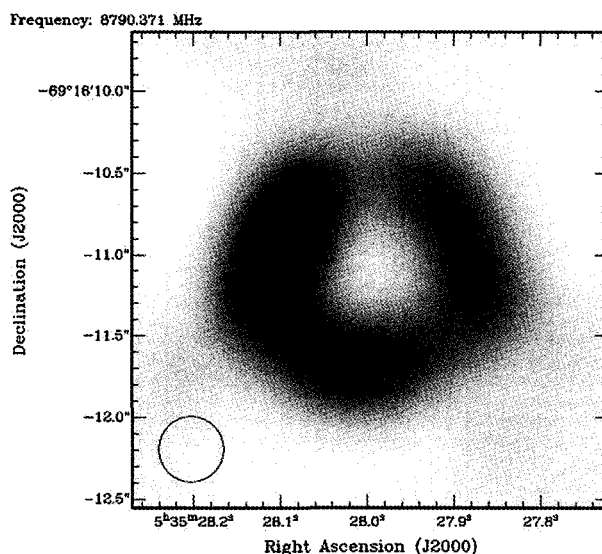


FIGURA G6. Imagen de la interacción del material eyectado de la SN1987A con el entorno del anillo circunestelar central el día 5810 tras la explosión obtenida a longitud de onda de radio de 3,5cm. (Cortesía Staveley-Smith).

Según el modelo estándar de interacción circunestelar, la emisión de radio debe estar relacionada con la emisión de rayos-X que tiene lugar en la zona de los restos de supernova chocada por el choque retrocedente (en el sentido lagrangiano, ver el capítulo H). Como se ve en la figura G8, a partir de 1999, esta correlación es evidente. Sin embargo el mecanismo es mucho más sutil en este caso. Chevalier & Dwarkadas (1995) propusieron un modelo de una cavidad bipolar con forma de reloj de arena en la que el anillo

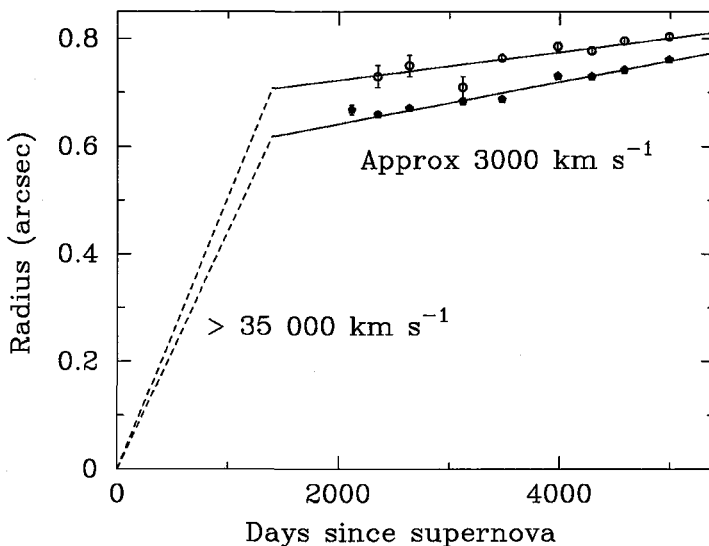


FIGURA G7. Expansión de la radio emisión de SN1987A. (Cortesía de Manchester).

central fuera la parte más estrecha de la nebulosa bipolar. Sugirieron que la parte interior de esta cavidad bipolar está cubierta por una capa de gas fotoionizada y que el grosor de esa capa es aproximadamente la mitad del tamaño radial del anillo central. Esto explicaría de modo natural el comienzo de la emisión de radio y rayos-X en una zona todavía relativamente lejana al anillo central y su incremento progresivo. Además el modelo contenía una predicción: los átomos de hidrógeno neutros de la parte más externa del material eyectado emitirían radiación  $\text{Ly}\alpha$  y  $\text{H}\alpha$  según atravesaran el choque interior (retrocedente). Su cálculo, utilizando la densidad necesaria para ajustar la emisión de rayos-X y suponiendo que la excitación de los átomos de hidrógeno sea debida a colisiones con electrones y protones en el gas chocado, fue cuantitativamente confirmado por observaciones ópticas con el telescopio espacial *Hubble* (HST). Ello permitió a McCray (2005) obtener imágenes tridimensionales del choque interno utilizando espectroscopía de alta resolución en  $\text{Ly}\alpha$  y  $\text{H}\alpha$ . Estas imágenes mostraron que la parte más cercana es más brillante. En efecto, los fotones que provienen de esa parte son de época de emisión más reciente que los fotones que provienen de la parte más lejana y, debido a que la interacción del choque (es decir, la emisión) va en aumento según pasa el tiempo, se ve más brillante.

Cinco años más tarde del comienzo de la emisión radio y rayos-X, hacia el momento en que se pudo detectar radiación  $\text{Ly}\alpha$  y  $\text{H}\alpha$  de los restos de supernova calentados por el choque retrocedente, la onda de choque alcanzó la primera protrusión interna (*hotspot*) del anillo central, intensificando su emisión. Luego, se pudieron estudiar en gran detalle la evolución de la emisión de este *hotspot* y de otros 16 *hotspots*, que han ido apareciendo, y la emisión del anillo mismo.

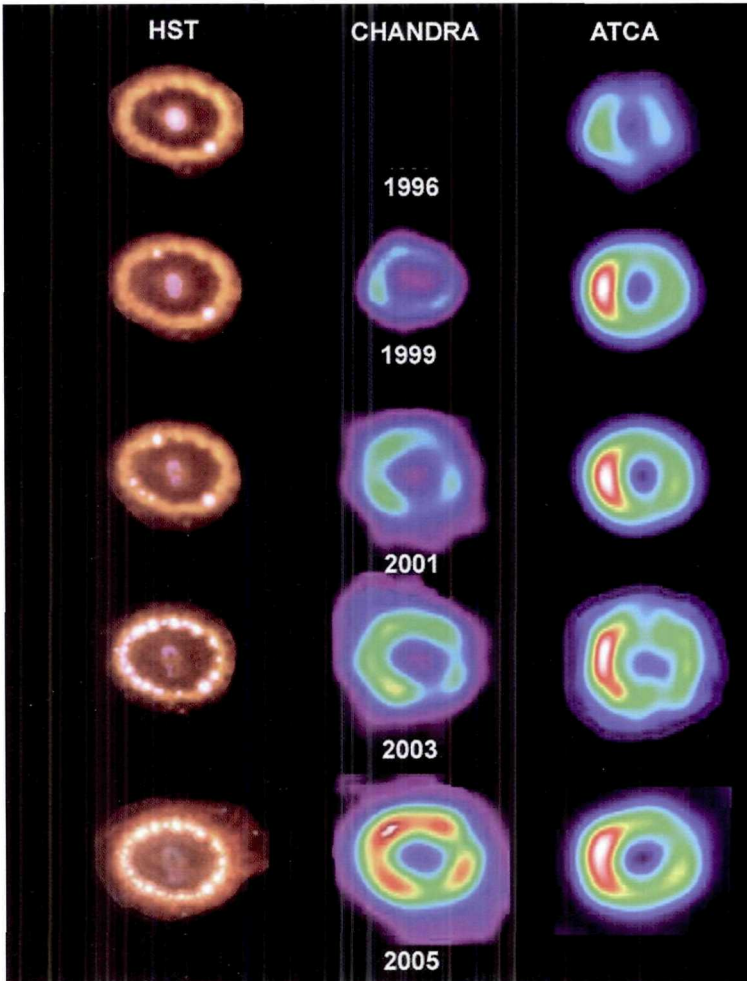


FIGURA G8. Evolución de la emisión óptica, rayos-X y radio en la zona del anillo central a partir de 1996. Se observa claramente la correlación entre las emisiones en las tres regiones del espectro electromagnético. (Cortesía de McCray).



Actualmente se siguen estudiando los detalles de las emisiones en el óptico, rayos-X y radio. Con las coincidencias y diferencias en esas emisiones, se intenta entender en exquisito detalle la interacción del material eyectado de la supernova con la zona del anillo central que marca la transición entre los regímenes de viento solar de las estrellas supergigantes roja y azul. Se estima que la emisión óptica ha de aumentar todavía un factor 50 durante los próximos años como consecuencia de la interacción con el anillo central. Además, esta gran emisión ionizará el entorno y mostrará elementos que nos son ahora invisibles.

De que la explosión era asimétrica en el sentido bipolar no había duda desde el principio. Sin embargo, y sorprendentemente, los resultados más recientes muestran que la explosión fue también muy asimétrica en el sentido azimutal. Esperemos que nuevas observaciones, con nuevos instrumentos ahora en construcción, como el Atacama Large Millimeter Array (ALMA), nos permitan indagar sobre las condiciones de una explosión supernova única por cercana y reciente.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arnett, W.D., Bahcall, J.N., Kirshner, R.P. & Woosley, S.E., *Annu. Rev. Astron. & Astrophys.*, 27, 629 (1989)
- Bionta, R.M., et al., *Phys. Rev. Lett.*, 58, 1494 (1987)
- Blades, J.C., et al. *Astrophys J.*, 334, 308 (1988)
- Chevalier, R. & Dwarkadas, V., *Astrophys J. Lett.*, 452, L45 (1995)
- Clayton, D.D., Colgate, S.A., Fishman, G.J., *Astrophys. J.*, 155, 75 (1969)
- Colgate, S.A. & McKee, C., *Astrophys. J.*, 157, 623 (1969)
- Emmering, R.T. & Chevalier, R.A., *Astrophys. J. Lett.*, 331, L105 (1988)
- Hirata, K., et al., *Phys. Rev. Lett.*, 58, 1490 (1987)
- Jauncey, D.L., et al., *Nature*, 334, 412 (1988)
- Manchester, R.N., et al., *Publ. Astron. Soc. Aust.*, 19, 207 (2002)
- McCray, R., "Cosmic Explosions", Marcaide, J.M. & Weiler, K.W. (Eds.), Springer-Verlag, Heidelberg (2005), p. 77
- Staveley-Smith, L., et al., "Cosmic Explosions", Marcaide, J.M. & Weiler, K.W. (Eds.), Springer-Verlag, Heidelberg (2005), p. 89
- Suntzeff, N.B., et al., *Astrophys. J. Lett.*, 384, L33 (1992)
- Woosley, S.E. & Phillips, M.M., *Science*, 240, 750 (1988)

## H. SUPERNOVA SN1993J

### INTRODUCCIÓN

La supernova SN1993J, en la galaxia M81, la descubrió Francisco García, el 28 de Marzo de 1993, en Lugo (Circular de la IAU número 5731). Alcanzó magnitud visual 10,8, lo que la hizo la supernova más brillante en el hemisferio norte desde la SN1954A. La relativamente pequeña distancia a M81 en la que la supernova explotó (10 millones de años luz) y la alta declinación de M81 hicieron pronto que SN1993J fuera una de las supernovas mejor observadas de la historia y muy en especial a muy alta resolución angular. Aunque al principio fue clasificada como de Tipo II (Filippenko, Matheson & Ho, 1993), no se comportó como otras de Tipo IIP o IIL. Su curva de luz mostró dos picos separados por unas dos semanas.

El comportamiento inusual de la curva de luz (figura H1) hizo que muchos investigadores concluyeran que se trataba de una explosión debida al colapso del núcleo de una progenitora que había perdido una parte significativa de su envoltura de hidrógeno y que en el momento de la explosión la envoltura no tenía ya más de una masa solar de hidrógeno. Para explicarlo se propusieron mecanismos como grandes vientos estelares o vaciado de hidrógeno por una estrella compañera en un sistema binario. Muchos modelos, basados en las curvas de luz y en los espectros observados, indicaban una masa del material eyectado de la supernova en el rango entre 2-6  $M_{\text{sol}}$ , con una envoltura de hidrógeno entre 0,1-0,9  $M_{\text{sol}}$ , y con un radio inicial de varios cientos de  $R_{\text{sol}}$  (Nomoto et al. (1993); Filippenko, Matheson & Ho (1993); Schmidt et al. (1993); Swartz et al. (1993); Wheeler et al. (1993); Podsiadlowski et al. (1993); Ray, Singh, & Sutaria (1993); Taniguchi et al. (1993); Shigeyama et al. (1994); Utrobin (1994); Bartunov et al. (1994); Woosley et al. (1994)). En esos modelos, el primer máximo en la curva de luz se debería al calentamiento de la delgada envoltura de hidrógeno por la onda de choque y el segundo máximo se debería a la expansión de la supernova y a la radioactividad del  $^{56}\text{Ni}$  y del  $^{56}\text{Co}$ .

Estudios posteriores (Young, Baron & Branch 1995; Patat, Chugai & Mazzali 1995; Utrobin 1996; Houch & Fransson 1996)

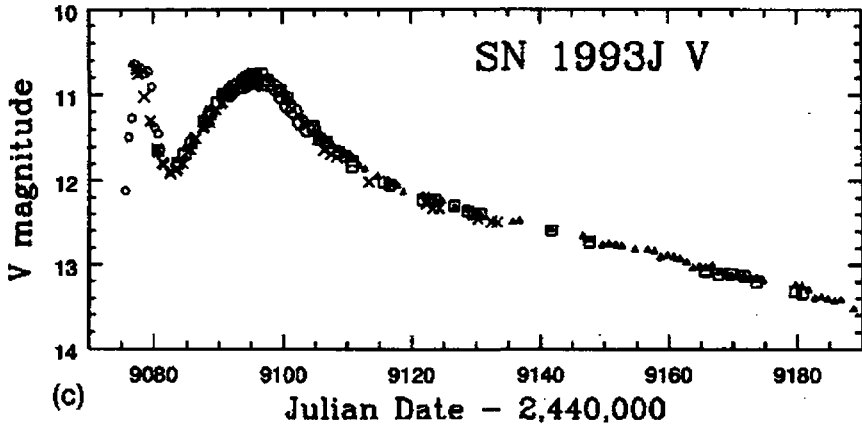


FIGURA H1. Curva de luz de SN1993J, una supernova de tipo IIb, con los dos picos característicos. (Cortesía de Benson).

siguieron indicando que se trataba de una progenitora con una envoltura de poca masa. Esta envoltura de poca masa daría la apariencia inicial de tratarse de una explosión de Tipo II, pero el espectro cambiaría lentamente hacia un espectro más parecido a las explosiones de Tipo Ib, situación que ya había sido considerada por Woosley et al. (1987) y Filippenko (1988) para SN1987K. Por ello, según Woosley et al. (1987), SN1993J debía clasificarse como de tipo IIb. Además, este esquema binario recibió apoyos a partir de la fotometría de la región que indicaba la presencia de más de una estrella (Aldering, Humphreys & Richmond 1994). Según Filippenko, Matheson & Ho (1993), la estrella progenitora fue probablemente una estrella de tipo espectral K0 I en un sistema binario. Cuando, mucho más tarde, Maund et al. (2004) descubrieron la compañera de la progenitora, el modelo de explosión en un sistema binario recibió el espaldarazo final.

Trammel, Hines & Wheeler (1993) y Tran et al. (1997) encontraron polarización al nivel del 1% en la radiación visible, lo que indicaba una asimetría global en la supernova misma o en el sistema progenitora (supernova) y estrella compañera. Espectros tempranos en el ultravioleta, obtenidos con el telescopio espacial *Hubble* (HST), mostraron un espectro sin estructura y suave semejante a los de SN1979C y SN1980K, ambas asimismo radiosupernovas.

## INTERACCION CIRCUNESTELAR

Branch et al. (2000) sugirieron que la emisión originada en la interacción circunestelar podría reducir las intensidades relativas de las líneas y dar la impresión de un espectro sin estructura y suave. En efecto, la presencia de interacción circunestelar pudo verse en espectros tardíos correspondientes a la fase nebular (Filippenko, Matheson & Barth 1994; Li et al. 1994; Barbon et al. 1995; Finn et al. 1995) con líneas de  $H\alpha$  que empezaban a dominar el espectro. Tanto Patat et al. (1995) como Houck & Fransson (1996) concluyeron que los espectros ópticos tardíos sólo podían alimentarse a través de un mecanismo de interacción circunestelar, ya que la radiactividad no podía ser suficiente para ello.

Se obtuvo evidencia adicional de la interacción circunestelar a partir de la detección temprana de rayos-X (Zimmerman et al. 1994; Kohmura et al. 1994). Estos rayos-X podían venir del viento estelar chocado o del material eyectado de la supernova calentado por el choque interior (Suzuki & Nomoto 1995; Fransson, Lundqvist & Chevalier 1996) según el modelo estándar de la interacción circunestelar para las supernovas.

En el entorno de la discontinuidad de contacto entre el material eyectado de la supernova y el medio circunestelar (MCE) (véase la figura H2), el modelo estándar considera un material eyectado de la supernova con perfil de densidad pronunciado  $\rho_{\text{eyec}} \propto r^{-n}$ , siendo  $r$  la distancia radial y  $n$  grande, y un medio circunestelar con perfil de densidad  $\rho_{\text{MCE}} \propto r^{-s}$ . En el modelo estándar, una onda de choque interior (choque *retrocedente* y, en inglés, *reverse shock*), que se mueve hacia dentro (es decir, hacia atrás en el sentido lagrangiano) a partir de la superficie de contacto, interacciona con (choca) el material eyectado de la supernova y una onda de choque exterior (*forward shock*), que se mueve hacia fuera a partir de la superficie de contacto, choca el medio circunestelar. Para  $n > 5$  (y  $s < 3$ ), se pueden encontrar soluciones auto-similares (Chevalier 1982a) y los radios de la superficie de discontinuidad, del choque interior y del choque exterior están relacionados y evolucionan todos con una potencia temporal  $t^m$ , donde  $t$  es el tiempo transcurrido tras la explosión y donde el parámetro  $m$  está relacionado con  $n$  y  $s$  a través de la relación  $m = (n-3)/(n-s)$ . En este modelo, la radioemisión se

originaría en la región chocada del MCE entre la superficie de discontinuidad y la onda de choque exterior y el MCE habría resultado de un viento estelar constante ( $s = 2$ ) de la estrella progenitora de la supernova (Chevalier 1982b).

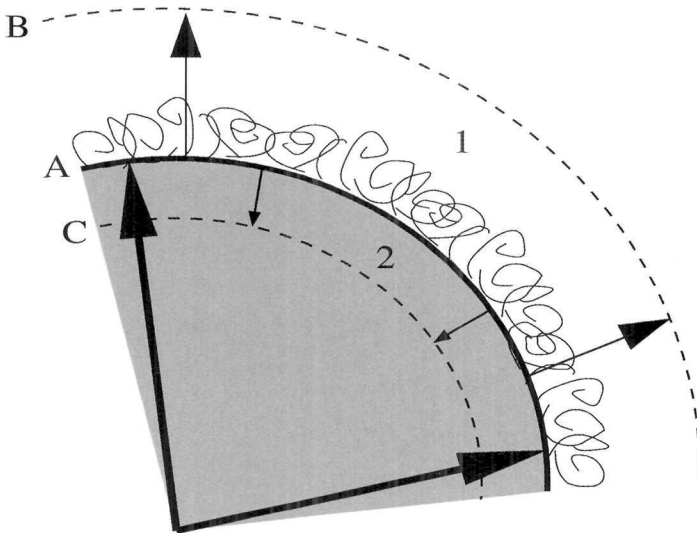


FIGURA H2. Esquema de las zonas chocadas del material eyectado de la supernova (región 2, sombreada) y del viento estelar (región 1) a ambos lados de la superficie de discontinuidad (línea continua). Las flechas indican esquemáticamente los valores relativos de las velocidades a las que se mueven cada uno de los frentes. La zona de trazo irregular indicaría la zona donde los campos y las partículas se amplifican y aceleran, respectivamente, en estructuras formadas por inestabilidades de Rayleigh-Taylor.

## OBSERVACIONES DE MUY ALTA RESOLUCIÓN ANGULAR

La primera detección de radio emisión de SN1993J tuvo lugar aproximadamente 2 semanas tras la explosión (Pooley & Green 1993; Van Dyk et al. 1994). La alta luminosidad en radio de esta supernova y la alta declinación de la galaxia en la que residía hicieron el resto para que esta supernova pudiera estudiarse con exquisito detalle con la técnica de Very Long Baseline Interferometry (VLBI), bien desarrollada sólo en el hemisferio norte con la disponibilidad de grandes radiotelescopios. Marcaide et al. (1994) y Bartel et al. (1994), liderando sendos grupos internacionales, dieron a conocer

las primeras detecciones de unas observaciones que habrían de continuarse durante más de una década. Marcaide et al. (1995a) descubrieron una corteza de emisión de anchura aproximada del 30% del radio exterior (figura H3). Un poco más tarde, Marcaide et al. (1995b) mostraron la primera película del crecimiento autosimilar de la corteza de emisión de una supernova con datos tomados durante un año tras la explosión (figura H4). Posteriormente, Marcaide et al. (1997) encontraron una desaceleración en la expansión de la corteza y estimaron con precisión el parámetro de desaceleración  $m = 0,86 \pm 0,02$ .

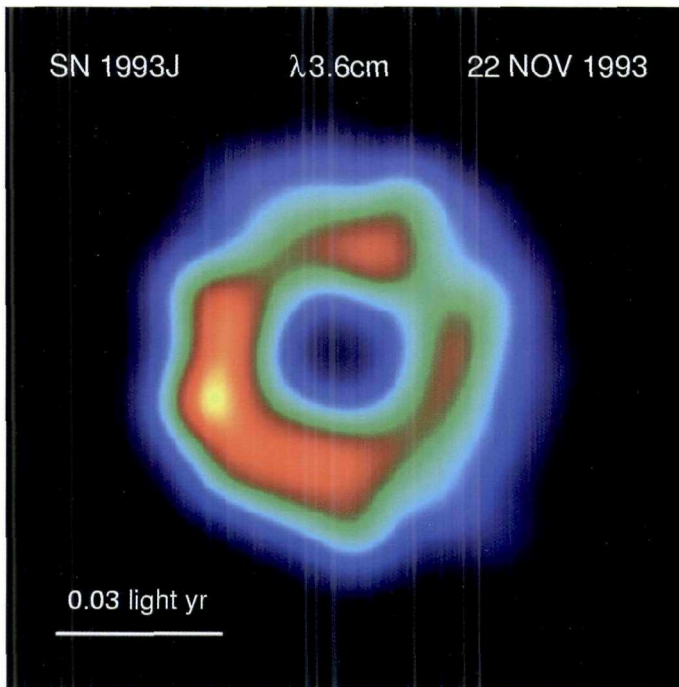


FIGURA H3. Primera imagen de una radiosupernova que muestra que la emisión se origina en una corteza de anchura 30% del radio de la supernova.

Combinando el valor estimado de la desaceleración con la determinación de la opacidad a la radiación debida a la absorción libre-libre en el MCE, por Van Dyk et al. (1994), podía derivarse un valor de  $s = 1,66$  consistente con el valor  $s = 1,7$  obtenido por Fransson, Lundqvist & Chevalier (1996) para explicar la emisión de rayos-X. Sin embargo, esta determinación de la opacidad libre-libre ha

sido cuestionada por Fransson & Björnsson (1998) que argumentan a favor de un viento constante,  $s = 2$ , y enfatizan la importancia de la auto-absorción sincrotrón. También Pérez-Torres, Alberdi & Marcaide (2001) enfatizan la importancia de la auto-absorción sincrotrón para explicar las curvas de luz en radio.

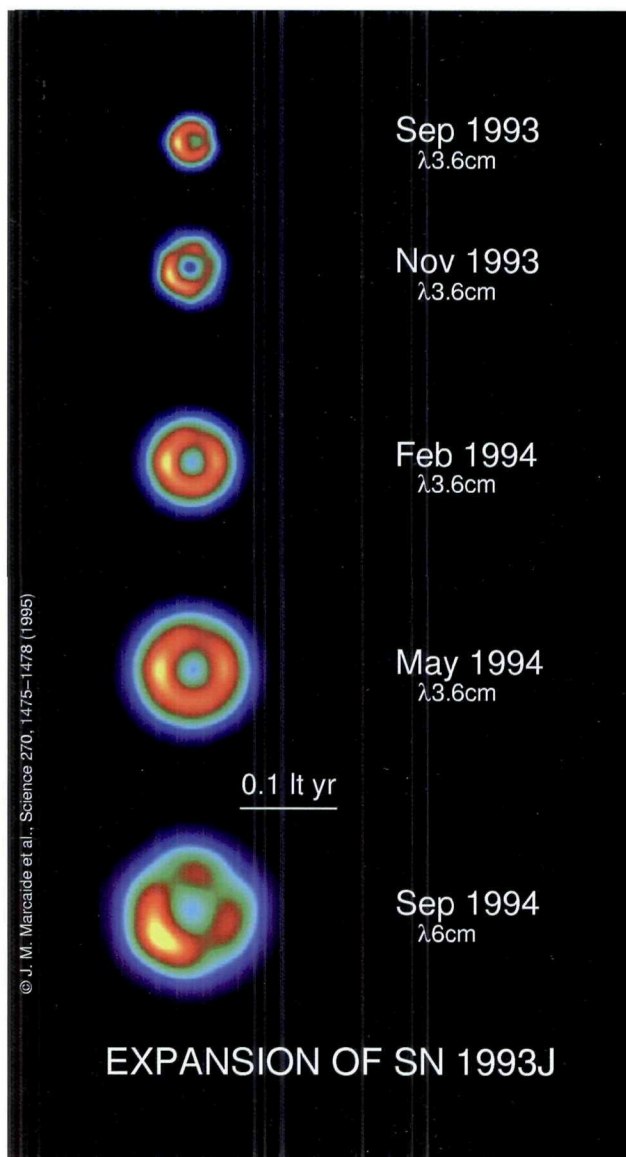


FIGURA H4. Primera película de la expansión de una radiosupernova.

Por otro lado, la determinación del parámetro  $m$  permite la comparación directa de los perfiles del material eyectado determinados a partir de espectros de la supernova en el visible. Baron et al. (1995) ajustan un perfil inicial de  $n = 50$  cambiando progresivamente a  $n = 10$  a sus datos. En efecto, el perfil de  $n = 10$ , obtenido en épocas comparables a los datos de radio, corresponde a un  $m = 0,875$  para  $s = 2$ , que es totalmente compatible con la medición de la desaceleración. Adicionalmente, tal  $m$  es compatible con la velocidad de expansión de  $14.000 \text{ km s}^{-1}$  determinada el primer año a partir de espectros en el visible (Garnavich & Ann 1994) y con los  $10.000 \text{ km s}^{-1}$  medidos para el periodo entre 1.000-1.400 días tras la explosión (Fransson et al. 2005).

La expansión de la corteza emisora de radio ha tenido lugar con una simetría esférica notable, en claro contraste a las indicaciones de la detección de emisión óptica polarizada y a la naturaleza binaria del sistema de la progenitora. Se ha puesto mucho esfuerzo en la determinación de  $m$  y de la anchura de la corteza en este caso único. El esfuerzo lo han llevado a cabo dos grandes grupos internacionales que han adquirido independientemente los datos y han utilizado distintas estrategias de análisis. Bartel et al. (2000, 2002) han confirmado la desaceleración medida por Marcaide et al. (1997), pero han reportado sobre cambios de los valores de  $m$  para distintos periodos de la expansión. Estos cambios han sido también sugeridos por simulaciones numéricas de Mioduszewski, Dwarkadas, & Ball (2001), motivadas por los resultados de Bartel et al., en las que se ha usado un modelo de explosión demasiado específico, a juicio de los expertos. Otros modelos de explosión más aceptables no dan esos resultados numéricos. Marcaide (2005b) ha presentado evidencia contraria a Bartel et al. (2002).

Por otro lado, tras un estimado inicial de la anchura de la corteza de 30% del radio exterior por Marcaide et al. (1995b), Bartel et al. (2000) sugirieron anchuras de la corteza mucho más estrechas ( $20,5 \pm 1,5\%$ ), lo que tiene serias implicaciones teóricas. Sin embargo, Bietenholz, Bartel y Rupen (2003), Bietenholz et al. (2005) y Marcaide et al. (2005a) proporcionan evidencia de que hay absorción de la emisión sincrotrón de la parte central de la radiosupernova incluso en épocas tardías y, basándose en la evidencia de esta absorción de la parte central, Bietenholz, Bartel y Rupen (2003) y Bietenholz et al. (2005) revisan su estimado de la anchura de la corteza a  $25 \pm 3\%$ ,



consistente con el valor inicial y con los resultados más recientes que se presentan en la sección siguiente.

La SN1993J ha sido muy importante en dos sentidos: (a) por primera vez, se ha observado una clara transición de una supernova de tipo II a una de tipo Ib, asociando de esta manera las tipo Ib (y en consecuencia las de tipo Ic) a las supernovas de colapso nuclear como las tipo II, en contraste a las de origen termonuclear como las de tipo Ia, y (b) por primera vez, se han obtenido imágenes de una explosión supernova y se ha seguido la expansión en gran detalle hasta permitir la determinación precisa del ritmo de expansión. Los resultados de este seguimiento han confirmado los aspectos principales del modelo estándar, propuesto inicialmente por Chevalier (1982). Sin embargo, los resultados de Bartel et al. (2002) ponían en cuestión la expansión auto-similar. En la próxima sección presentaremos nuestros resultados más recientes, que consideramos definitivos, y que muestran que la expansión es auto-similar, pero que existen efectos muy sutiles en la expansión que delatan la presencia de campos magnéticos de perfil radial pronunciado en la corteza de material circunestelar chocado donde se origina la emisión. Estos nuevos resultados nos indican asimismo, por vez primera, en qué lugar de la corteza tiene lugar la generación de la radioemisión sincrotrón.

## RESULTADOS RECIENTES MAS RELEVANTES

Tras analizar sus resultados en el ultravioleta, obtenidos con el *HST* a partir del día 1000 tras la explosión y que corresponden ya a la fase nebular, y combinando éstos con los de la línea en  $H_{\alpha}$  dados a conocer antes por Matheson et al. (2000), Fransson et al. (2005) concluyen que hay un enriquecimiento de nitrógeno en SN1993J consistente con la hipótesis de un sistema binario para la progenitora y que la emisión procede de una corteza de emisión en la que la velocidad es de  $7.000 \text{ km s}^{-1}$  en la parte interior y  $10.000 \text{ km s}^{-1}$  en la parte exterior. De este modo, este resultado parece confirmar el anterior de Marcaide et al. (1995) que la anchura de la corteza de emisión es del 30% del radio de la radio supernova, aunque la relación entre las zonas de emisión en el visible y ultravioleta, relacionadas con la ionización por la radiación producida en el choque interior, y la zona de emisión radio no está todavía bien aclarada.

Por otro lado, un análisis de diez años de observaciones de VLBI por Marcaide et al. (2007), que han desarrollado nuevas herramientas de análisis, presenta, además de una película de la expansión de la supernova (figura H5), los siguientes resultados: (1) las desviaciones de simetría esférica de la estructura de radio son menores que el 1%; (2) la expansión es auto-similar y desacelerada con  $m = 0,85 \pm 0,01$ ; (3) la observación de la expansión sólo a la longitud de onda de 6 cm conduciría a conclusiones erróneas (por ejemplo, de cambio de valor  $n$  del perfil de densidad del material eyectado de la supernova tras 1550 días) pues a partir de ese día tienen lugar efectos que hacen que en apariencia la desaceleración sea más pronunciada. Sin embargo, observaciones simultáneas a 18 cm, que dan estimados de tamaño mayores que a 6 cm como se puede ver en la figura H6, muestran que la expansión sigue su curso de un modo auto-similar; (4) dado que el tamaño de la supernova es mayor a la longitud de onda más larga, y no al revés como sería de esperar en el caso de absorción por un posible gas de electrones en el MCE no chocado, se concluye que la zona efectiva de emisión a 6 cm es menor que a 18cm y, por tanto, que la emisión no puede originarse en la parte más cercana a la onda de choque externa; (5) la hipótesis de que la emisión radio se origina en la zona de turbulencias cercana a la superficie de discontinuidad, junto con la hipótesis de que el campo magnético en la zona chocada tiene un perfil radial pronunciado explica los resultados anteriores; (6) se determina que la anchura de la corteza de emisión es de  $32 \pm 5\%$  de la superficie externa correspondiente al frente de choque externo y un 50% más ancha que la predicha teóricamente (Fransson 1982); (7) la emisión de la parte central posterior (en dirección opuesta a la línea de visión) de la supernova está parcialmente absorbida, probablemente por la zona ionizada por la onda de choque interior.

Estos resultados refutan otros de Bartel et al. (2000, 2002), Bietenholz, Bartel & Rupen (2003). Los resultados iniciales de un re-análisis de los datos de archivo del grupo de Bartel por Iván Martí-Vidal, como parte de su tesis doctoral, muestra que los datos del grupo de Bartel dan los mismos resultados que nuestros datos si se analizan con las herramientas adecuadas y si se utilizan modelos apropiados (y no sólo razonables, pero inapropiados) para analizar los datos en el plano de Fourier. Las diferencias son pequeñas pero decisivas.

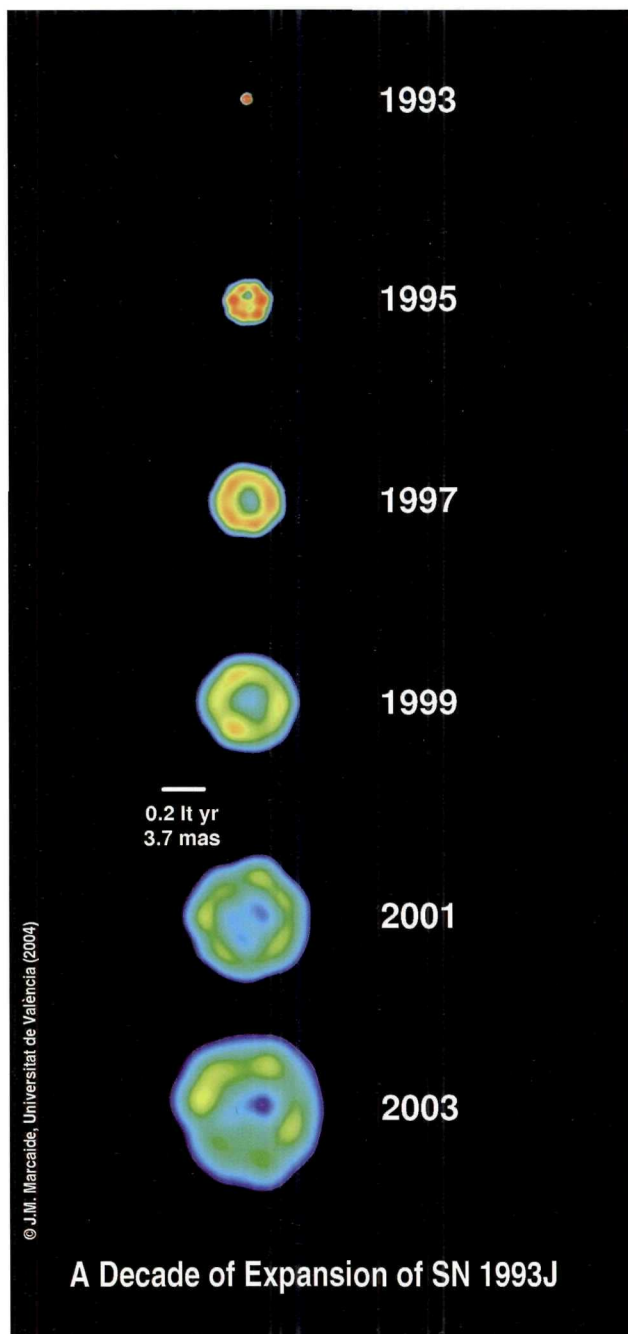


FIGURA H5. *Expansión de SN1993J sobre una década. Por claridad, sólo se incluyen imágenes obtenidas al comienzo del otoño cada dos años. Nótese que la tira de la figura H4 está contenida en la primera imagen de esta tira.*

## A Decade of Expansion of SN1993J

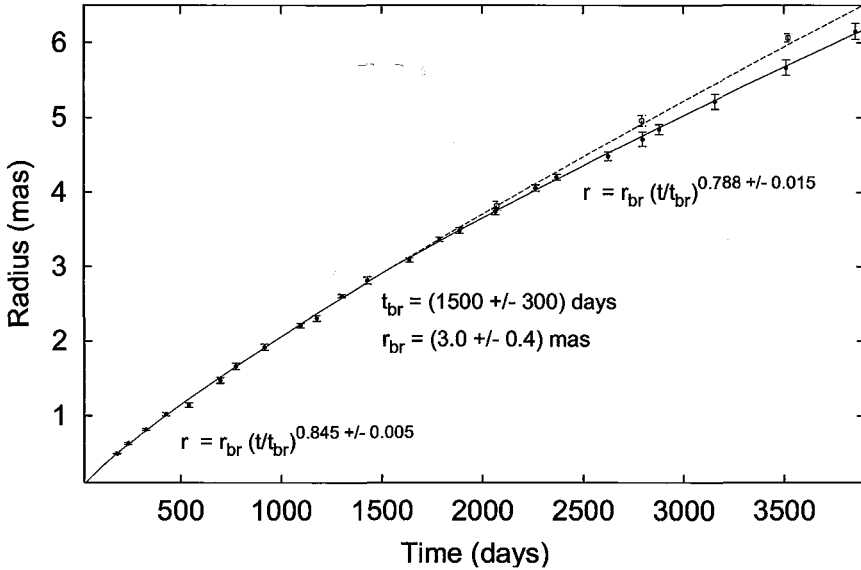


FIGURA H6. Expansión desacelerada y auto-similar de SN1993J. Muestra el hallazgo de la dependencia (aparente) de la expansión con la longitud de onda de observación (los datos a 18cm (cuadrados) dan estimados más grandes que los datos a 6cm (círculos) para épocas de observación posteriores a 2000 días). El origen de esta dependencia ni es cinemático ni tiene que ver con ningún cambio en el perfil del material eyectado con el tiempo, sino con las condiciones de emisión en la zona chocada del medio circunestelar y el lugar concreto de generación de la radioemisión en ella, que de esta manera queda determinado.

### ESTUDIOS FUTUROS DE SN1993J

Diez años después de la explosión se pueden obtener espectros ópticos con alta razón de señal a ruido como el que se muestra en la figura H7. Es incluso previsible que se puedan obtener espectros de calidad durante 20 y 30 años más, del mismo modo que se estudian otras supernovas más lejanas. De este modo se seguirá obteniendo una información valiosa de la explosión SN1993J.

Sin embargo, la evolución de la radio estructura no se podrá seguir ya a 6 cm. Se podrá seguir con dificultad a 18 cm durante una década más, a lo sumo<sup>16</sup>. A partir de ese punto, el efecto

<sup>16</sup> [Nota añadida en imprenta] Tampoco se podrá seguir a 18cm. La caída exponencial de la densidad de flujo que se está observando durante el último año

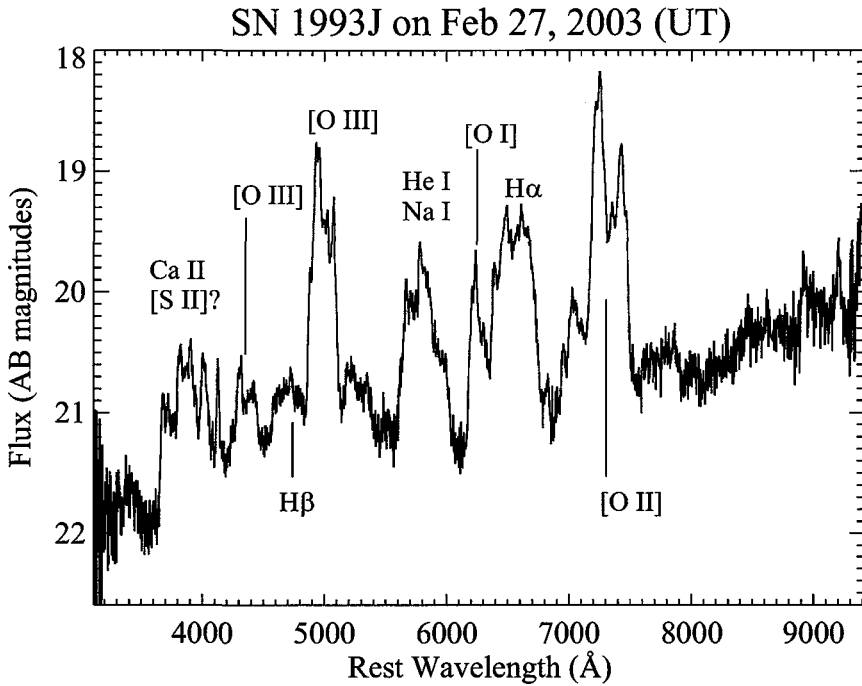


FIGURA H7. Espectro óptico de la supernova SN1993J obtenido exactamente 10 años después de la explosión y que su autor (Filippenko) viene a denominar “El espectro de Valencia”. (Cortesía de Filippenko).

de caída de emisión y la distancia de 10 millones de años-luz, combinados, lo impedirán, como impiden normalmente el estudio de muy alta resolución de otras radio supernovas. Por ejemplo, la supernova SN2001gd tenía un espectro óptico casi idéntico al de SN1993J, su radioemisión no era intrínsecamente tan fuerte y su distancia era 4 veces mayor. Por ello, sólo se pudieron obtener dos imágenes (Pérez-Torres et al. 2005) y estimar *grosso modo* los parámetros físicos de la emisión. Algo parecido ha sucedido con la supernova SN2004et, a casi el doble de distancia que SN1993J, de la que se ha obtenido una sola imagen en el límite mismo de detección (Martí-Vidal et al. 2007). Esa imagen, tomada 153 días tras la explosión, muestra una intrigante asimetría. Sin embargo, no se pueden estudiar más detalles pues, ya no se recibe suficiente

---

lo va a impedir (K.W. Weiler et al., en preparación para publicación en *Astrophysical Journal*).

emisión. Los estudios de radiosupernovas que tienen, o tengan, lugar más allá de la distancia al cúmulo de Virgo (60 millones de años-luz) están fuera del alcance la instrumentación actual de radio interferometría.

A diferencia de SN1987A, y sólo por efecto de la dilución del flujo de emisión con la distancia (¡nada menos que por un factor 4.000!) no se han podido observar neutrinos, ni rayos gamma directos en SN1993J. Se han detectado rayos-X y se ha monitorizado su emisión. Sin embargo también después de los años transcurridos, ya no se puede detectar la supernova en esa banda. Durante un tiempo prolongado, se podrán seguir llevando a cabo estudios ópticos de la emisión de esta supernova en su fase nebulosa. Nada impedirá ya, sin embargo, que se hayan realizado los estudios de radio de muy alta resolución (VLBI), que han sido hasta la fecha únicos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aldering, G., Humphreys, R.M. & Richmond, M., *Astron. J.*, 107, 662 (1994)  
Barbon, R. et al., *Astron. & Astrophys.*, 110, 513 (1995)  
Baron, E. et al., *Astrophys. J.*, 441, 170 (1995)  
Bartel, N., et al., 1994, *Nature*, 368, 610 (1994)  
Bartel, N., et al., *Science*, 287, 112 (2000)  
Bartel, N., et al., *Astrophys. J.*, 581, 404 (2002)  
Bartunov, O.S., et al., *Astron. & Astrophys.*, 281, 53 (1994)  
Bietenholz, M.F., Bartel, N., Rupen, M.P., *Astrophys. J.*, 597, 374 (2003)  
Branch, D. et al., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 112, 217 (2000)  
Chevalier, R. A., 1982a, *Astrophys. J.*, 258, 790 (1982a)  
Chevalier, R. A., 1982b, *Astrophys. J.*, 259, 302 (1982b)  
Filippenko, A.V., *Astron. J.*, 96, 1941 (1988)  
Filippenko, A.V., Matheson, T. & Ho, L.C., *Astrophys. J.*, 415, 103 (1993)  
Filippenko, A.V., Matheson, T. & Barth, A.J., *Astron. J.*, 108, 2220 (1994)  
Finn R.A. et al., *Astron. J.*, 110, 300 (1995)  
Fransson, C., Lundqvist, P. & Chevalier, R., *Astrophys. J.*, 461, 993 (1996)  
Fransson, C. & Björnsson, C.-I., *ApJ*, 509, 861 (1988)  
Fransson, C., et al., *Astrophys. J.*, 622, 991 (2005)  
Garnavich, P.M. & Ann, H.B., *Astron. J.*, 108, 1002 (1994)  
Houck, J.C. & Fransson, C., *Astrophys. J.*, 456, 811 (1996)  
Kohmura, Y. et al., *Publ. Astron. Soc. Japan*, 46, 157 (1994)  
Li, A., et al., *Astrophys. J. Supl. Ser.*, 211, 323 (1994)  
Marcaide, J.M., et al., *Astrophys. J.*, 424, 25 (1994)  
Marcaide, J.M., et al., *Nature*, 373, 44 (1995a)  
Marcaide, J.M., et al., *Science*, 270, 1475 (1995b)  
Marcaide, J.M., et al., *Astrophys. J.*, 486, 31 (1997)

- Marcaide, J.M. in “1604-2004: Supernovae as Cosmological Lighthouses”, eds. Turatto, M., Benetti, S., Zampieri, L. & Shea, W., ASP Conference Series, 342, 298 (2005)
- Marcaide, J.M., et al., *Astrophys. J.* (2007, enviado)
- Martí-Vidal, I., et al., *Astron. & Astrophys.* (2007, enviado)
- Matheson, T., *Astron. J.*, 120, 1487 (2000)
- Maund, J.R., et al., *Nature*, 427, 129 (2004)
- Mioduszewski, A.J., Dwarkadas, V.V. & Ball, L., *Astrophys. J.*, 562, 869 (2001)
- Nomoto, K., et al., *Nature*, 364, 507 (1993)
- Patat, F., Chugai, N. & Mazzali, P.A., *Astron. & Astrophys.*, 299, 715 (1995)
- Pérez-Torres, M.A., Alberdi, A. & Marcaide, J.M., 2001, *Astron. & Astrophys.*, 374, 997 (2001)
- Pérez-Torres, M.A., et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 360, 105 (2005)
- Podsiadlowski, Ph., et al. *Nature*, 364, 509 (1993)
- Pooley, G.G. & Green, D.A., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 264, 17 (1993)
- Ray, A., Singh, K.P. & Sutaria, F.K., *J. Astrophys. & Astron.*, 14, 53 (1993)
- Schmidt, B.P. et al., *Nature*, 364, 600 (1993)
- Shigeyama, T., et al., *Astrophys. J.*, 420, 341 (1994)
- Suzuki, T. & Nomoto, K., *Astrophys. J.*, 455, 658 (1993)
- Swartz, D.A., et al., *Nature*, 365, 232 (1993)
- Taniguchi, Y., et al., *Publ. Astron. Soc. Japan*, 45, 43 (1993)
- Trammell, S.R., Hines, D.C. & Wheeler, J.C., *Astrophys. J.*, 414, 21 (1993)
- Tran, H.D. et al., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 109, 489 (1997)
- Utrobin, V., *Astron. & Astrophys.*, 281, 89 (1994)
- Utrobin, V., *Astron. & Astrophys.*, 306, 219 (1996)
- Van Dyk, S.D., et al., *Astrophys. J.*, 432, 115 (1994)
- Wheeler, J.C., et al., *Astrophys. J.*, 417, 71 (1993)
- Woosley, S.E., et al., *Astrophys. J.*, 318, 664 (1987)
- Woosley, S.E., et al., *Astrophys. J.*, 429, 300 (1994)
- Young, T.R., Baron, E. & Branch, D., *Astrophys. J.*, 449, 51 (1995)
- Zimmerman, H.U., et al., *Nature*, 367, 621 (1994)

## REFLEXIONES SOBRE EL FUTURO

Las explosiones cósmicas son faros que nos iluminan el pasado. Cuando son muy, muy lejanas, nos iluminan el pasado remoto del universo y nos ayudan a explorarlo. Cuando son más cercanas nos permiten explorar el pasado de las estrellas mismas que las originaron al destruirse. De estas catástrofes cósmicas de energías portentosas, cuando han tenido lugar en nuestra galaxia, la Vía Láctea, nos quedan bellísimas nebulosas, restos de supernova, que cientos y miles de años después viajan por el espacio, provocando a su paso cambios en el medio interestelar. Las explosiones cósmicas tienen lugar frecuentemente y en todas partes del universo, pero desde hace cientos de años no las hemos podido avistar en nuestra galaxia. Esperamos ya una, con impaciencia y algo de miedo. La esperamos, se entiende, en escalas cósmicas: uno de estos siglos. Pero podría ser el próximo año. Podría ser mañana.

Cuando los padres de la astronomía Kepler y Galileo avistaron la supernova 1604 (y antes, Brahe la supernova 1572) lo hicieron sin el beneficio del telescopio, todavía no descubierto. Es más que probable que la próxima supernova galáctica sorprenda a los humanos (¡esperemos que para entonces no nos hayamos auto-destruido!) con un increíble instrumental astronómico a disposición. A distancias galácticas típicas veríamos crecer a la supernova a unas velocidades angulares fabulosas. Por ejemplo, a la distancia a  $\eta$  Carinae, 7.500 años-luz, veríamos crecer la supernova a un ritmo de expansión angular de unos 0,01" por día. Los radio interferómetros intercontinentales podrían ver cambios estructurales en su imagen en cuestión de horas. En un año, su tamaño alcanzaría 3" y aparecería resuelta en cualquier telescopio. La cantidad de imágenes en todos los rangos del espectro serían fabulosas y podríamos estudiar el entorno de la estrella progenitora como en una máquina del tiempo de factor de compresión temporal mil. ¿Será la convulsa y bella  $\eta$  Carinae la próxima supernova galáctica? Es imposible predecir. Cualquier estrella muy masiva en un estadio avanzado de evolución es una candidata, y, probablemente, las circunstancias externas no delatarán con mucha anticipación lo que sucederá en un instante de tiempo y se convertirá en un acontecimiento histórico.



Si la explosión tuviera lugar todavía más cerca, las estimaciones anteriores se multiplicarían por el factor de distancia (y la emisión por ese factor al cuadrado). No sólo recibiríamos inicialmente neutrinos a raudales sino que, dependiendo de dónde tuviera lugar realmente la explosión, quizás recibiríamos demasiada radiación de altas energías y ultravioleta. Las propiedades eruptivas del evento SGR1806-20 (*magnetar?*, *mini-GRB?*) del 27 de Diciembre de 2004 (Gaensler et al. 2005) con una energía estimada de  $4 \cdot 10^{43}$  erg (cuya emisión incluso alteró la ionosfera terrestre) situado a 15.000 años-luz nos dan una idea de lo que podría suponer una explosión supernova con cien millones de veces más energía y a una distancia menor.

En el otro extremo están las supernovas y los GRBs, que tienen lugar todos los días en algún lugar lejano del universo conocido. Estas explosiones cósmicas son como faros en los confines del universo, que iluminan el espacio sideral que se interpone entre ellas y nosotros. El material que interviene en el viaje de esa luz nos permite estimar las distancias. A su vez, la estimación de distancias nos permite probar el espacio-tiempo. Las supernovas de tipo Ia nos han desvelado que el universo está en expansión acelerada. Probablemente, nuevas observaciones de ese tipo de supernovas, ya en curso, nos desvelarán detalles más concretos de la expansión del universo a distintas edades. A las supernovas de tipo Ic con líneas de absorción anchas (mal llamadas hipernovas) se les ha encontrado parentesco con los estallidos de rayos gama de larga duración. Estos LGRB parecen enviarnos su emisión en finos e inmensos chorros y los vemos solamente cuando esos chorros, por azar, están casi alineados con nuestra línea de visión. En varios casos, los LGRB están en los confines mismos del universo explorado.

¿Qué hay más allá de esos confines explorados? ¿Qué hay en el espacio más allá de  $z = 7$ ? ¿Qué hay en ese espacio que uno no sabe si llamarlo universo muy joven o periodo oscuro del universo? Toda la evidencia apunta a que deberíamos detectar emisión de las explosiones cósmicas de las estrellas supermasivas que se debieron formar en este periodo, si dispusiéramos de la instrumentación adecuada para ello.

La exploración de ese universo muy joven necesita de nuevas herramientas, de instrumentos como el satélite PLANCK, de próximo

lanzamiento, que nos dará una idea más precisa sobre la ionización del entorno de las primeras estrellas. Sobre todo necesita de instrumentos que se adentren en esa parte del universo de emisión muy corrida al rojo por su expansión. Hacen falta grandes telescopios en el infrarrojo, como el telescopio espacial *James Webb (JWST)* de lanzamiento previsto hacia 2013, que sean capaces de captar emisión débil y corrida al rojo, con corrimientos mucho mayores que 7. También hacen falta instrumentos que todavía se adentren más en el universo de emisión *muy enrojecida* por su propia expansión, instrumentos que vean en el rango sub-milimétrico —más allá del infrarrojo lejano— con gran sensibilidad.

El primer instrumento de estas características, llamado ALMA (Atacama Large Millimeter Array), se está construyendo en el altiplano chileno<sup>17</sup> y se completará hacia 2015, aunque partes de él se utilizarán previsiblemente desde 2010. Este proyecto global, en el que participan Europa, EE.UU. y Japón, que constará de 50 radiotelescopios (y además la red japonesa compacta complementaria en su centro) de 12m de diámetro funcionando en modo interferométrico a longitudes de onda milimétricas y sub-milimétricas servirá para explorar muchos temas astrofísicos<sup>18</sup>. Aunque no esté todavía claro en qué modo, es previsible que la aportación de este instrumento al conocimiento del universo muy joven sea determinante. También su aportación al estudio de la emisión muy temprana de los GRBs, emisión que apenas ha podido ser estudiada hasta la fecha, será enorme.

La detección de radio supernovas y GRBs del universo muy joven y el estudio detallado de supernovas y GRBs mucho más cercanos también necesitan de un nuevo instrumento de radio con mucha más sensibilidad y versatilidad que los instrumentos presentes. Afortunadamente, ya viene de camino. Los estudios del SKA (Square Kilometre Array), que será a partir de 2020 y previsiblemente durante muchas décadas el instrumento más sensible del mundo en radio ondas, ya están avanzados. El emplazamiento del SKA todavía no está decidido

---

<sup>17</sup> En el altiplano de Chajnantor, cerca de Atacama, en la zona fronteriza de Chile con Bolivia, a 5080 metros de altitud.

<sup>18</sup> Evidentemente, también para estudiar por primera vez en ese rango de longitudes de onda los detalles de la emisión del anillo central de la supernova SN1987A.

entre dos lugares candidatos (Australia y Suráfrica, tras el descarte reciente de las propuestas de Argentina y China), pero ha de ser un lugar de mínima interferencia en radio ondas. El SKA será, como su nombre indica, una red interferométrica con una superficie colectora combinada de un kilómetro cuadrado. Tendrá una respuesta multi-banda y multi-haz. La mera comparación de esa superficie colectora con los mayores radio telescopios actuales arroja una mejora en sensibilidad de un factor 100. Sin embargo, el uso generalizado de fibra óptica de gran ancho de banda, etc. permitirá mejorar la sensibilidad por un factor cercano al millón. Naturalmente, esa mejora tendrá su precio, no sólo económico, pues la síntesis de apertura (tipo VLBI) deberá hacerse sobre una banda anchísima y con una dependencia de las estructuras de los objetos con la longitud de onda, lo que exigirá muy sofisticados tratamientos informáticos. Para una descripción más detallada del instrumento y de los proyectos científicos que se pueden encarar con él, véase Carilli & Rawlings (2004). Sin embargo, justo es decirlo, las contribuciones más importantes de SKA serán probablemente aquellas que no se pueden prever. Es lo que ha sucedido con todos los instrumentos de radio (telescopios e interferómetros) que se han construido hasta la fecha. Es de esperar que con el SKA no se produzca una excepción, particularmente tras la advertencia de Townes (1994), de que el futuro de la investigación punta en una disciplina científica es poco previsible a 5 años vista y totalmente impredecible a más de 10 años vista.

También otro tipo de instrumentación jugará un rol creciente en la comprensión de las explosiones cósmicas: las computadoras. Las simulaciones en 3D son relativamente recientes y la disponibilidad de poderosas computadoras para el cálculo también. Como los algoritmos de computación y la capacidad de cálculo van mejorando y aumentando rápidamente, probablemente no está lejano el día en el que se consigan simulaciones satisfactorias de explosiones cósmicas. Todo lo mencionado anteriormente, y la también previsible construcción no muy lejana de un gran telescopio (infrarrojo/visible) de la clase de 30-60 metros de diámetro, ya en estudio y diseño, seguirá contribuyendo de modo decisivo a nuestra comprensión de las explosiones cósmicas y del universo.

Lo mejor no es lo que hemos aprendido en el pasado, sino lo que nos queda por aprender. Como siempre, lo importante del pasado

es que es un legado para el futuro. Las explosiones cósmicas son una herramienta poderosísima para conocer el pasado del universo, pero son asimismo unas actrices tremendamente activas para diseñar el futuro de los entornos en los que tienen lugar. La muerte de las estrellas contribuye de modo esencial al nacimiento de nuevas estrellas. Todo ello constituye el legado de las explosiones cósmicas.

He dicho.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Gaensler, et al., *Nature*, 434, 1104 (2005)

Carilli, C. & Rawlings, S., (eds.) *Science with the Square Kilometre Array*, Elsevier B.V. (2004)

Townes, C., comunicación privada (1994)

**CONTESTACIÓN  
DEL  
EXCMO. SR. D. ALBERTO GALINDO TIXAIRE**

Excmo. Sr. Presidente de Honor,  
Excmos. Sres. Académicos,  
Señoras, Señores:

Es para mí un motivo de gran alegría contestar en nombre de nuestra Corporación al nuevo Académico Profesor Juan María Marcaide Osoro, a quien, antes de nada, me apresuro a expresarle, en nombre de todos, la más efusiva bienvenida a esta casa.

Tras un esbozo de la personalidad, vida y obra del recipiendario, concluiré con unas breves consideraciones sobre la ciencia del universo.

## ENCOMIUM

La historia del Profesor Jon Marcaide está marcada por el triunfo de una voluntad de hierro al servicio de una vocación decidida y de una ilusión desbordante y contagiosa. Nacido en el seno de una familia guipuzcoana, humilde, de campesinos sin tierras, hizo primero el bachillerato elemental en un colegio de Mondragón, para de ahí pasar a una escuela profesional. Pero sus profesores del colegio, apreciando sus dotes, presionaron para que cursara el bachillerato superior. Tras terminar este, hizo oficialía industrial para pasar de ahí al peritaje. Compaginó sus estudios para perito con un trabajo que le ofreció el gerente<sup>1</sup> de la empresa FAGELECTRO. Aquí intervino

---

<sup>1</sup> Curiosamente, de este gerente, Javier Mongelos, que estudió Ciencias Físicas en Zaragoza, recuerdo que me prestó en 1958 unos apuntes de Geometría Analítica,

activamente en la creación de un sintonizador integrado V/UHF, que tuvo un gran éxito comercial.

Pero lo que a Jon Marcaide le apasionaba era la física. La empresa le ofreció pagarle los estudios si se comprometía a trabajar para ellos en los veranos y también en los 5 años siguientes a terminar la carrera. Jon prefirió, como siempre, la libertad, y dejando su trabajo, a Vitoria se fue a hacer Preu con cinco mil duros en el bolsillo, y luego a Zaragoza a estudiar física con una beca-préstamo, que al año siguiente se convirtió en beca-salario.

### De bachiller a doctor

Profesores como Justiniano Casas, José M.<sup>a</sup> Savirón y Domingo González atraen y dejan huella valiosa. Los disturbios políticos en la vida universitaria desorientan. Por eso Jon, al terminar el tercer curso en Zaragoza, cogió la maleta y se vino a Madrid. No resultó ser una buena elección. Así que, con una beca de la Fundación Stevenson, se fue a estudiar a Edimburgo. Tras medirse allí durante un curso como físico con experimentos de efecto Mossbauer y de detección de neutrones, se traslada a la Universidad de St. Andrews a investigar con uno de los descubridores de la superfluidez, el canadiense John Frank Allen.

Pero tenía que terminar sus estudios. Volvió a Zaragoza, e hizo a la vez cuarto y quinto cursos. Ya licenciado (estamos en 1975), Allen le ofrece una beca doctoral, pero Jon, con todo el dolor de su corazón, y para evitar problemas a su familia, decide cumplir antes con su obligación militar. Contra todo pronóstico, le admiten para las milicias del ejército del aire. Consigue hacer las prácticas de alférez en Zaragoza, donde puede compaginar sus obligaciones militares con una ayudantía en la Universidad. Intenta hacer una tesis rápida en Zaragoza sobre Mecánica Estadística. No sale bien. Ve un anuncio de becas de la Fundación del Instituto Tecnológico para Postgraduados, para el *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Pide una, se la dan, y Jon

---

que él había comprado, de las clases del Profesor Pedro Abellanas Cebollero. Lo digo porque es otra muestra más de la generosidad y talante de esta ilustre personalidad del Cooperativismo Vasco.

aterriza en Boston en 1977. Su idea era dedicarse al Estado Sólido. Un día le presentan al afamado astrofísico Irwin I. Shapiro, que luego sería director del *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics* por más de dos décadas, quien le propone que se vaya con él seis meses a trabajar sobre un *special problem*. Lo hace. Al terminar, Shapiro le invita a hacer la tesis bajo su dirección. Empieza así una historia de estrecha colaboración a lo largo de más de treinta años. En 1982 defiende su tesis doctoral en el MIT, excepcionalmente calificada como *first rate thesis*. Recuerdo con simpatía la extrañeza que le produjo el enterarse por primera vez en 1986, en una conferencia que yo impartí en Zaragoza, de que su “jefe” Shapiro había sido el primero en usar, posiblemente sin saberlo, secuencias de Galois en su famosa medición del efecto que ahora lleva su nombre, consistente en el retraso que sobre la recepción del eco de una señal de radar reflejada por Mercurio o Venus, en conjunción superior, provoca la interposición del campo gravitatorio solar.<sup>2</sup>

### De investigador a catedrático

Desde ese momento, se le abren a Marcaide todas las puertas en EEUU y en Europa. El Instituto Max Planck para Radioastronomía le ofrece un contrato post-doc, y NASA-JPL le solicita también sus servicios de asesoramiento desde Alemania. Las dos instituciones se ponen de acuerdo y a ambas satisface hasta 1985. En ese tiempo realiza las primeras observaciones de VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) a 7 mm, con líneas de base transatlánticas, y descubre una nueva componente superlumínica del cuásar peculiar 4C39.25. En una visita a Múnich siente la fascinación de esta bella ciudad bávara; y no habiendo allí instituto de radioastronomía, firma con Siemens un suculento contrato para investigar en su laboratorio central muniqués, descartando otras propuestas tentadoras: MIT como *assistant professor*, e IRAM (Instituto de Radio Astronomía Milimétrica) como director del radiotelescopio de 30 m de Pico Veleta. Tras un año en Siemens, en los que desarrolla una antena offset portátil, y escribe un par de artículos en radioastronomía, decide aceptar la oferta de una

---

<sup>2</sup> I.I. Shapiro, *Fourth Test of General Relativity*, Phys. Rev. Lett. 13, 789-791 (1964); I.I. Shapiro, G.H. Pettengill, M.E. Ash, M.L. Stone, W.B. Smith, R.P. Ingalls, R.A. Brockelman, *Fourth Test of General Relativity: Preliminary Results*, Phys. Rev. Lett. 20, 1265-1269 (1968).



plaza de Investigador Científico del CSIC. Elige para incorporarse el Instituto de Astrofísica de Andalucía, adonde llega en septiembre de 1986. Empieza a formar su primer grupo de investigación. En julio de 1991 gana por oposición la cátedra de Astronomía y Astrofísica de la Universidad de Valencia.

Desde entonces, sus esfuerzos, día a día renovados, se han centrado en crear un fuerte Departamento de Astronomía y Astrofísica, con una vigorosa línea de investigación, y en potenciar la Sociedad Española de Astronomía, fundada por el propio Jon Marcaide con dos colegas catedráticos de la Universidad de Barcelona. La excelente acogida que en otros centros de investigación encuentran los numerosos discípulos de Marcaide es la mejor muestra de sus cualidades docentes y del entusiasmo que transmite a las jóvenes generaciones. Simultaneando con estas actividades, el Profesor Marcaide organizó y co-presidió en 2003 la gran conferencia internacional *Supernovæ: 10 years of SN1993J*, y el año pasado organizó el primer encuentro de la radioastronomía española.

Entre sus proyectos más inmediatos están la creación de un Grupo Inter-Institucional de Radio Astronomía (me trae a la memoria el éxito de nuestro querido GIFT, Grupo Interuniversitario de Física Teórica), y la preparación de próximas observaciones pioneras con el instrumento ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*) en Chile y con el interferómetro óptico VLTI (*Very Large Telescope Interferometer*) en Cerro Paranal.

### Méritos científicos

El campo de especialización básico del Profesor Marcaide ha sido la radiointerferometría de muy larga base. De 1980 es su primera publicación, con el grupo del Profesor Shapiro. En su tesis *VLBI Studies of the Extragalactic Radio Sources 1038+528 A,B*, utilizando el nuevo correlador Mark III, consiguió, entre otras cosas, desarrollar el método de cartografiado por referencia de fase en VLBI e iniciar la astrometría diferencial de alta precisión midiendo la separación angular entre dos radio fuentes vecinas con una precisión del orden del  $\mu$ s de arco.<sup>3</sup> Esto situó a Marcaide en la frontera del campo, y ahí sigue liderándolo.

---

<sup>3</sup> Para apreciar lo que esto significa, pensemos que un microsegundo de arco es el ángulo bajo el que “veríamos” (es un decir) un coche a  $10^9$  km de distancia.

En 1985 Jon extendió la técnica VLBI a longitudes de onda milimétricas, abriendo con ello la posibilidad de estudiar las regiones próximas a los núcleos activos de galaxias. En particular, esto les permitió obtener la primera imagen bidimensional de la radiofuente compacta Sagittarius A\* en el núcleo mismo de nuestra galaxia, a 43 GHz.

En 1993 un astrónomo lucense aficionado descubría la supernova SN1993J en la galaxia M81 (NGC 3031), a  $3.6 \pm 0.3$  Mpc.<sup>4</sup> Su relativa cercanía, alta declinación y gran luminosidad en ondas de radio facilitaron a dos grandes grupos internacionales, uno dirigido por Jon Marcaide, estudiar con precisión su evolución a lo largo de cuatro años. Sin duda fue el equipo de Marcaide el vencedor en esta competición científica que todavía sigue. A su excelente exposición me remito.

Finalmente, el Profesor Marcaide también ha trabajado en chorros superlumínicos, lentes gravitacionales, mediciones de la constante de Hubble, etc.

Sus trabajos, muy numerosos, están en las mejores revistas del campo. De los más excepcionales, cuatro se publicaron en *Nature*, y dos en *Science*.

## Colofón

No hay duda de que nuestro nuevo Académico es un investigador de suma relevancia internacional, cuya labor docente y científica ha contribuido decisivamente al despegue de la astrofísica en España. En justo reconocimiento de ello, le fue otorgado el Premio Euskadi de Investigación 2004.

Estoy convencido de que su presencia entre nosotros enriquecerá y dinamizará notablemente las actividades de nuestra Academia.

---

<sup>4</sup> El parsec (pc) es una unidad de longitud ampliamente usada en astrofísica. Se define así:  $1 \text{ pc} = 1 \text{ AU} / \arctg 1''$ , donde AU es la unidad astronómica, esencialmente la distancia media Sol-Tierra. En años luz (al):  $1 \text{ pc} = 3.2615... \text{ al}$ .

## SOBRE EL UNIVERSO

### Explosiones cósmicas

El Profesor Jon Marcaide nos ha ofrecido un brillante discurso sobre supernovas y otras explosiones titánicas como los estallidos de rayos gamma, dejando bien claro el papel crucial de tales eventos para iluminar el pasado del universo y moldear localmente su futuro.

Su análisis de la SN1993J es especialmente llamativo. Como ya se ha dicho, Marcaide, con su grupo de investigación, siguió durante una década la evolución de esta radio-supernova; con las técnicas radio-interferométricas de alta resolución angular, en las que es gran experto internacional, detectó una corteza de emisión y monitorizó con precisión su expansión muy isótropa y desacelerada en el tiempo. A Marcaide se debe la primera película de tan espectacular fenómeno, una película que mostraron cadenas de TV de todo el mundo, y de la que la revista *Science* publicó una secuencia de fotogramas.

### *¿SNe cercanas?*

Dice sentirse impaciente por avistar alguna SN nueva en nuestra galaxia. Estadísticamente, nos toca ya alguna. Pero yo, personalmente, no comparto esas prisas, aunque aprecio el protagonismo de las SNe en la beneficiosa dispersión de elementos pesados, tan indispensables para la formación de planetas y de los seres vivos.

La escasez que ha mencionado de las supernovas históricas pretelescopicas (cinco o seis en los últimos mil años) no deja de ser un alivio para los humanos; todas ellas se produjeron a unas distancias del orden de 3 kpc, por lo que su flujo de radiación ionizante en la Tierra fue despreciable. El efecto de una SN próxima al sistema solar (digamos a distancia inferior a 10 pc) sería desastroso para la biosfera: su radiación desharía la capa de ozono por miles de años, dejando a la intemperie ultravioleta a la superficie terrestre y terminando con la vida de las especies más evolucionadas. Geminga es un pulsar, a 160 pc, fuertemente emisor de rayos gamma; se creó hace unos 300 ka en una explosión SN a unos 60

pc, y se le supuso en un primer momento responsable de nuestra "burbuja local".<sup>5</sup> Su visión, que superó en brillo durante un par de años al de la Luna llena, debió atemorizar al *homo erectus*; y su intenso flujo de radiación X y gamma pudo rebajar en un 10-20% el ozono atmosférico, sin producir en nuestros antecesores otro que quemaduras de sol.

Uno de los primeros en considerar la posibilidad de que la radiación electromagnética de alta energía (rayos X duros y rayos gamma), y los rayos cósmicos cargados provenientes de alguna SN cercana, pudieran haber afectado nuestra capa de ozono, y con ello nuestra biosfera, fue Ruderman.<sup>6</sup> Veinte años después Ellis y Schramm analizaron con mejores datos esta influencia,<sup>7</sup> concluyendo que alguna SN a distancia inferior a 10 pc podía haber devastado la capa de ozono durante varios siglos y causado la extinción masiva del fito- y zoo-plancton y del coral, con sus repercusiones evidentes en la vida marina y en toda la cadena alimentaria. Se preguntaron si pudo ser esta la causa de la extinción masiva de los trilobites a finales del Pérmico.

Teniendo en cuenta que en nuestra galaxia el ritmo de explosiones SN (por colapso de su núcleo, esto es, tipo Ib/c, tipo II) es, aproximadamente, de una cada 50 años,<sup>8</sup> y que hay unas  $2 \times 10^{11}$  estrellas, con una densidad estelar del orden de  $1 \text{ (pc)}^{-3}$ , el número de tales explosiones, por unidad de tiempo, en un entorno nuestro de 10 pc de radio sería  $\sim 1 \text{ Ga}^{-1}$ . Esta estimación debe corregirse al alza porque no hemos considerado las SNe tipo Ia, que, aunque

---

<sup>5</sup> Actualmente los astrofísicos se inclinan por las asociaciones Sco-Cen de jóvenes estrellas OB, que hace unos 10-15 Ma se hallaban donde ahora está la burbuja, y la excavaron produciendo su vaciado con las explosiones de una veintena de SNe. Ver B. Fuchs, D. Breitschwerdt, M.A. de Avillez, C. Dettbarn, C. Flynn, *The search for the origin of the Local Bubble redivivus*, Mon. Not. R. Astron. Soc. 373, 993-1003 (2006).

<sup>6</sup> M.A. Ruderman, *Possible Consequences of Nearby Supernova Explosions for Atmospheric Ozone and Terrestrial Life*, Science, 184, 1079-1081 (1974).

<sup>7</sup> J. Ellis, D.N. Schramm, *Could a Nearby Supernova Explosion have Caused a Mass Extinction?*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 92, 235-238 (1995).

<sup>8</sup> R. Diehl, H. Halloin, K. Kretschmer, G.G. Lichti, V. Schönfelder, A.W. Strong, A. von Kienlin, W. Wang, P. Jean, J. Knödseder, J-P. Roques, G. Weidenspointner, S. Schanne, D.H. Hartmann, Ch. Winkler, C. Wunderer, *Radioactive <sup>26</sup>Al and massive stars in the Galaxy*, Nature 439, 45 (2006).

menos frecuentes, tendrían efectos de mayor alcance. Los autores<sup>9</sup> tomaron como valor de mérito 1 SN/(500 Ma). Con todo ello resulta plausible que durante el eón Fanerozoico pueda haber ocurrido alguno de estos episodios.

La desaparición de los organismos bivalvos hace unos 500 Ma podría por tanto deberse a una SN. Igual que la anomalía del iridio en la capa límite K/T fue la marca delatora de un impacto boloidal con la Tierra, que causó la extinción de los grandes reptiles hace 65 Ma, en las extinciones provocadas por SNe sería el hallazgo de cantidades anormales del isótopo radiactivo <sup>60</sup>Fe (1.5 Ma de vida media), que se produce en abundancia en el colapso gravitacional a SN,<sup>10</sup> la señal dejada por una SN cercana. Hay una notable evidencia de que esto pudo ocurrir con una SN a unas decenas de parsecs, hace unos  $2.8 \pm 0.3$  Ma. Se han encontrado capas de sedimentos de esa época con riqueza de <sup>60</sup>Fe varias veces superior a la normal. Tal SN pudo desencadenar el enfriamiento global, bien conocido, que sufrió en esa época nuestro planeta, con una duración de unos 100 ka; en particular, el continente africano se aridificó. Nadie sabe con certeza la importancia que este episodio pudo tener en la evolución humana.<sup>11</sup>

¿Y qué podemos decir de los efectos producidos por un estallido cercano de rayos gamma? Pionero en estas consideraciones es Thorsett,<sup>12</sup> quien concluye, de su análisis, que un estallido, a menos de 150 pc de la Tierra, alteraría letalmente nuestra capa de ozono. Afortunadamente, no parece muy probable que esto ocurra, porque la tasa de estallidos en nuestra galaxia, rica en metales, es más bien baja; se estima que está entre  $10^{-6}$ - $10^{-5}$  por año.<sup>13</sup> Los estallidos ocurren preponderantemente en galaxias

---

<sup>9</sup> J. Ellis, D.N. Schramm, *loc. cit.*

<sup>10</sup> Una SN viene a producir una masa de <sup>60</sup>Fe equivalente a diez veces la masa de la Tierra, mientras que su presencia natural en el sistema solar es despreciable.

<sup>11</sup> K. Knie, G. Korschinek, T. Faestermann, E.A. Dorfi, G. Rugel, and A. Wallner, *<sup>60</sup>Fe Anomaly in a Deep-Sea Manganese Crust and Implications for a Nearby Supernova Source*, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 171103 (2004).

<sup>12</sup> S.E. Thorsett, *Terrestrial implications of cosmological gamma-ray burst models*, *Astrophys. J.*, **444**, L53-L55 (1995).

<sup>13</sup> Ph. Podsiadlowski, P.A. Mazzali, K. Nomoto, D. Lazzati, E. Cappellaro, *The Rates of Hypernovae and Gamma-Ray Bursts: Implications for Their Progenitors*, *Astrophys. J.* **607**, L17-L20 (2004).

irregulares de bajo contenido metálico, y por tanto, poco aptas para la vida.<sup>14, 15</sup>

No solo la existencia de vida en la Tierra, sino también la propia Tierra están en principio amenazadas por catástrofes astrofísicas. Que la vida en nuestro planeta se haya librado de la destrucción durante casi 4 Ga no es razón para sentirse seguros, pues pudo ser cuestión de pura suerte. Sin embargo, transmite cierta tranquilidad (o recelo, según el estado de ánimo de cada cual) el resultado de un cuidadoso análisis, válido para cualquier planeta habitable; según el mismo, una cota superior a su ritmo de esterilización cósmica por cualesquiera agentes exógenos, tales como presuntas bolas de materia extraña, hipotéticas transiciones a vacíos de menor energía, vulgares agujeros negros, o impactos de asteroides, además de las explosiones SNe y estallidos gamma ya comentados, es estimable en  $1 \text{ (Ga)}^{-1}$  (99.9% n.c.).<sup>16</sup>

### Cosmología: ¿ciencia?

Cultiva el Profesor Marcaide una ciencia hartó difícil, de sistemas muy complejos cuyo análisis necesita el apoyo de toda la física conocida, clásica y cuántica, y que en lugar de laboratorio en el que reproducir fenómenos bajo control, tiene que conformarse con ojear y sopesar un amplísimo muestrario de fenómenos similares ofrecidos por el universo. Cuando un físico o astrofísico quiere liberar su imaginación con la legítima ambición<sup>17</sup> de formular un sistema del

---

<sup>14</sup> A.S. Fruchter, A.J. Levan, L. Strolger, P.M. Vreeswijk, S.E. Thorsett, D. Bersier, I. Burudl, J.M. Castro Cerón, A.J. Castro-Tirado, C. Conselice, T. Dahlen, H.C. Ferguson, J.P.U. Fynbo, P.M. Garnavich, R.A. Gibbons, J. Gorosabel, T.R. Gull, J. Hjorth, S.T. Holland, C. Kouveliotou, Z. Levay1, M. Livio, M.R. Metzger, P.E. Nugent, L. Petro, E. Pian, J.E. Rhoads, A.G. Riess, K.C. Sahu, A. Smette, N.R. Tanvir, R.A.M.J. Wijers, S.E. Woosley, *Long  $\gamma$ -ray bursts and core-collapse supernovae have different environments*, Nature **441**, 463-468 (2006).

<sup>15</sup> K.Z. Stanek, O.Y. Gnedin, J.F. Beacom, A.P., A.P. Gould, J.A. Johnson, J.A. Kollmeier, M. Modjaz, M.H. Pinsonneault, R. Pogge, D.H. Weinberg, *Protecting Life in the Milky Way: Metals Keep the GRBs Away*, Acta Astron. **56**, 333-345 (2006); arXiv:astro-ph/0604113v4.

<sup>16</sup> M. Tegmark, N. Bostrom, *Is a doomsday catastrophe likely?*, Nature **438**, 754 (2005); *How Unlikely is a Doomsday Catastrophe?*, arXiv:astro-ph/0512204v2.

<sup>17</sup> Escribió Schrödinger: *I am born into an environment –I know not whence I came nor whither I go nor who I am*. NATURE AND THE GREEKS – SCIENCE AND HUMANISM, E. Schrödinger, Cambridge University Press; 1996, 1951, 1954.

mundo que, siendo compatible con las observaciones, le quepa en la cabeza, se ve obligado a “fraguar hipótesis” simplificadoras que solo sus consecuencias, a veces poco directas, pueden falsar. El cosmólogo quiere recomponer el rompecabezas cósmico para conseguir una imagen global de su gran casa. En tal menester, no busca el detalle fino de un cellini, sino el brochazo recio y seguro de un goya que hay que contemplar a distancia.

Los cosmólogos, absortos y entusiasmados ante la grandeza de su espectáculo, a menudo se ven sacudidos por sus colegas más mundanos que les espetan esta embarazosa pregunta: ¿Es la cosmología una ciencia?

Siente uno con no poca frecuencia la tentación de negarlo. No entendemos qué es la materia oscura (si es que es alguna cosa), y ya la hemos acompañado con algo aún más extraño, como es la energía oscura. Y sumidos todavía en el estupor, sale por ahí quien afirma que a lo mejor nuestro universo tiene un gemelo paralelo con el que solo se comunica gravitacionalmente. La gente normal (entre ella la mayoría de los físicos) le mira compasivamente, y sigue su camino.

Pero esta historia es muy vieja, y se repite desde los albores de la humanidad. Posiblemente la cosmología comenzó, como tarde, con el *homo sapiens*, hará unos 200.000 años. ¡Cuántas cosmologías ha concebido desde entonces la imaginación! Cada filosofía, cada religión, abrazó la suya.

Dice Alfvén que la cosmología empezó el día que el hombre empezó a preguntar: *What is beyond the horizon and what happened before the earliest event I can remember?*<sup>18</sup> Al principio, satisfizo su curiosidad interrogando al viajero que venía de lejos, y al anciano de la tribu. Más tarde, aparecerían brujos vendiendo sus relatos mágicos para satisfacer la curiosidad de las gentes.

En el siglo V a. C., con el sueño heleno de un saber unitario, con ese encantamiento jónico del que habla Holton, y en una explosión singular de racionalidad, entra en la cosmología la geometría,

---

<sup>18</sup> H. Alfvén, *Cosmology: Myth or Science?*, J. Astrophys. Astr. 5, 79-98 (1984).

el elemento dinamizador que habría de transformarla, primero, en la “música de las esferas”, y unos siglos más adelante (II d. C.), en el complejo sistema ptolemaico de epiciclos y deferentes. Perduró este más de mil años, hasta dejar paso al sistema copernicano. De su complejidad dicese que se quejaba nuestro Alfonso el Sabio, alias “el estrellero”: *Si el Señor Todopoderoso me hubiera consultado antes de embarcarse en la Creación, le hubiese recomendado algo más simple.*<sup>19</sup>

La mayoría de las ideas propuestas por los grandes pensadores de la Antigüedad sucumbieron al paso del tiempo y a la observación astronómica. Otras, como el universo de Lucrecio, sin límites y pleno de átomos, han permanecido. En todas las épocas, sin excepción, se lamentaron los errores de los antepasados, y así ocurrirá, cabe pensar, con los nuestros. Es la pugna constante entre quienes buscan la verdad y los que creen que la han encontrado. Mas, como bien se ha señalado,<sup>20</sup> hay una cosa clara, y es que nuestra “era de la ciencia” se ha liberado (casi totalmente) de la carga antropocéntrica que caracterizó la primera “era de la magia” y la posterior “era del mito”.

### *Nacimiento de la cosmología moderna*

Todos recordamos el universo ptolemaico como un legado de la racionalidad griega que permitió al hombre predecir el movimiento de los planetas y de la Luna, a base de epiciclos y más epiciclos. El giro copernicano, con su propuesta heliocéntrica, facilitaría después esta descripción. En lo tocante al mundo sideral, científicamente inabordable en su dinámica hasta hace un siglo, silencio, y reposo absolutos.

Newton nos regaló la ley de la gravitación universal, y con ello una clave para gobernar los cielos. Incitado por el clérigo Bentley,

---

<sup>19</sup> Baltasar Gracián, en EL CRITICÓN, Crisi III (La hermosa naturaleza), escribe: ...; y si aquel otro rey, aplaudido de Sabio, porque conoció cuatro estrellas (tanto se estima en los Príncipes el saber), se arrojó a decir que si él hubiera asistido al lado del Divino Hacedor, en la fábrica del Universo, muchas cosas se hubieran dispuesto de otro modo, y otras mejorado, no fue tanto efecto de su saber, cuanto defecto de su nación, que en este achaque del presumir, aun con el mismo Dios no se modera.

<sup>20</sup> Harrison, COSMOLOGY, Cambridge 2000.



expresó Newton sus ideas sobre el universo, debiendo rechazar un universo finito por su inestabilidad ante el colapso gravitacional, y requiriendo la intervención divina para poner orden en las cosas cuando la atracción gravitatoria entre las estrellas distribuidas por igual en todo el universo pusiera en peligro la inmutabilidad de los cielos.

Al descubrirse la expansión del universo o el flujo de Hubble, se desmoronó la imagen de un universo estático, y al imaginarnos el paso al revés de la película de dicha expansión, surgió la visión de un comienzo singular, *Big Bang* (BB) o Gran Explosión. Todos, salvo los encallecidos por el abuso de los términos, se preguntan inmediatamente: expansión ¿dónde? En sí mismo, podría ser una respuesta; el crecimiento de las distancias mutuas entre galaxias lejanas es, simplemente, consecuencia de una dilatación de la métrica. Pensar en estiramientos o en fugas de galaxias no es la imagen adecuada.

La idea del BB, central a la cosmología actual, quedó arrinconada en la década de los 50, cuando dominó el modelo cosmológico del estado estacionario como favorito, al presentarnos un universo sin principio ni fin, siempre igual, pero en expansión exponencial, lo que exigía una creación permanente de materia para mantener constante la densidad. Los científicos parecían preferir una repetición interminable e imperceptible de infinitos actos de creación infinitesimales en cada punto del universo a una sola creación original, ciclópea y conspicua de todo el universo. Así que en esos momentos, la cosmología se apoyaba solo, como dice Wright, en dos hechos y medio:<sup>21</sup> 1/ La oscuridad de la noche, 2/ el desplazamiento cosmológico hacia el rojo, y 2.5/ la evolución temporal del universo (¿estacionariedad?, ¿cambio?).

El hallazgo casual del fondo cósmico de microondas (FCM) en 1964,<sup>22, 23</sup> con temperatura independiente de la dirección, supuso el

---

<sup>21</sup> E.L. Wright, *A Century of Cosmology*, UCLA Astronomy Preprint.

<sup>22</sup> A.A. Penzias, R.W. Wilson, *A Measurement of the flux density of Cas A at 4080 Mc/s*, *Astrophys. J.* **142**, 1149-1154 (1965).

<sup>23</sup> En realidad, como señala Wright, *loc. cit.*, se remonta a 1941 la primera evidencia del FCM, en la línea R(1) de absorción del radical CN interestelar en el espectro de la estrella  $\zeta$  Oph (W. Adams, *Some Results with the COUDÉ Spec-*

final de la supremacía del modelo estacionario.<sup>24</sup> La única interpretación aceptable es que los fotones que componen esa radiación son testigos fósiles de un episodio singular en la historia del universo, que hemos llamado BB, en que el universo estuvo en una fase de densidad y temperatura extremadamente altas.

Tal BB caliente, y una microfísica basada en el modelo electrodébil estándar, permitieron, sobre un principio cosmológico de antiantropocentrismo y la teoría einsteiniana del campo gravitatorio, geometrizar el universo y reconstruir su historia primitiva, explicando, en particular, las abundancias primigenias de núcleos ligeros producidos cuando la edad del universo, tras el BB, era de dos a tres minutos.

### *La nueva cosmología*

Los fotones fósiles que recibimos de partes opuestas del firmamento se liberaron cuando la temperatura del universo descendió, por la expansión, hasta unos pocos miles de grados y la materia se neutralizó. Con una evolución del universo dictada exclusivamente por la materia/energía ordinaria y bien conocida, los fotones que nos llegan de direcciones opuestas del cielo provienen de regiones que nunca, desde el BB, habrían tenido la oportunidad de ponerse

---

*trograph of the Mount Wilson Observatory, Astrophys. J.* **93**, 11-23 (1941)). Esta línea se debe al paso del estado fundamental a un estado rotacional del CN, y su intensidad indicaba una temperatura de excitación de 2.3 K. Se consideró que era un fenómeno local, ignorándose mayormente su proyección cosmológica. Prosigue Wright mostrando cómo a Alpher y Hermann, y luego a Hoyle, se les escapó, incomprensiblemente, de entre las manos, una ocasión única para alzarse con el premio Nobel como descubridores del FCM. Ver R.A. Alpher, R.C. Hermann, *Remarks on the Evolution of the Expanding Universe*, *Phys. Rev.* **75**, 1089-1095 (1945); F. Hoyle, *The Observatory* **70**, 194-197 (1950), conteniendo la recensión por Hoyle del libro *THEORY OF ATOMIC NUCLEUS AND NUCLEAR ENERGY-SOURCES*, de G. Gamow y C.L. Critchfield, Oxford Univ. Press 1949.

<sup>24</sup> El baño de fotones fósiles, hoy FCM, estuvo dominado en otras épocas del universo por fotones mucho más energéticos, con temperatura inversamente proporcional al factor de escala del universo:  $T(t) \propto R^{-1}(t)$ . Por eso muchos prefieren hablar de la radiación cósmica de cuerpo negro o radiación cósmica de fondo (ambas, en inglés, CBR), e incluso radiación cósmica de fondo de microondas (en inglés, CBMR).

en contacto causal. Y sin embargo, sus temperaturas son iguales con precisión de 1 ppk.<sup>25</sup>

Para explicar este problema de horizontes (y otros, como la planitud, la escasa o nula abundancia de reliquias cósmicas como monopolos primigenios, etc.) se propuso en 1981-82 una hipótesis radical, conocida como *inflación*:<sup>26</sup> cuando la edad del universo era una fracción insignificante de segundo, el universo experimentó, durante un brevísimo período de tiempo, una tremenda expansión exponencial que aumentó sus dimensiones en decenas de órdenes de magnitud. Con ello lo que hoy es nuestro universo visible fue tan solo una submicroscópica esfera antes de la inflación y hubo tiempo sobrado desde el BB para que todas sus propiedades se homogeneizaran.

Se han propuesto muchos modelos específicos del proceso inflacionario.<sup>27</sup> El más simple (un campo escalar, llamado *inflatón*) predice un espectro adecuado (casi invariante bajo cambios de escala) de fluctuaciones escalares de la densidad de materia/energía, inhomogeneidades “semilla” llamadas a ser, por acúmulo gravitatorio tras la inflación, las grandes estructuras astrofísicas de hoy. Asimismo predice fluctuaciones tensoriales de la geometría, origen de un importante fondo de ondas gravitacionales primigenias cuya detección, de lograrse en el futuro, suministraría información muy valiosa sobre la escala y los detalles de ese período de expansión colosal. Dichas fluctuaciones escalares y tensoriales, resultantes de la amplificación, por inflación, hasta escala macroscópica de las fluctuaciones cuánticas

---

<sup>25</sup> Que se convierte en unas 10 ppM si se aparta la estructura dipolar del FCM, atribuible al movimiento de la Tierra respecto de dicho fondo.

<sup>26</sup> A.H. Guth, *The Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems*, Phys. Rev. D 23, 347-356 (1981).

A. Linde, *A New Inflationary Universe Scenario: A Possible Solution Of The Horizon, Flatness, Homogeneity, Isotropy And Primordial Monopole Problems*, Phys. Lett. B 108, 389-393 (1982).

A. Albrecht, P.J. Steinhardt, *Cosmology For Grand Unified Theories With Radiatively Induced Symmetry Breaking*, Phys. Rev. Lett. 48, 1220-1223 (1982).

<sup>27</sup> A. Linde, *Inflation and String Cosmology*, eConf C040802, L024 (2004); J. Phys.: Conf. Ser. 24, 151-160 (2005); arXiv:hep-th/0503195v1.

V.F. Mukhanov, *PHYSICAL FOUNDATIONS OF COSMOLOGY*, Cambridge University Press 2005.

del campo inflatón y del campo métrico, dejan su huella en el FCM, imprimiéndole anisotropías en su temperatura y polarización.

Como ya ha comentado el Profesor Marcaide, en 1992 la sonda espacial COBE (Cosmic Background Explorer), que en 1989 había medido con gran precisión la temperatura del fondo de microondas, envió datos valiosos acerca de las pequeñas anisotropías (aparte de la dipolar debida al movimiento de la Tierra respecto del FCM) en la distribución angular de dicha temperatura. Su análisis suponía un espaldarazo importante a la hipótesis de la inflación como eficiente mecanismo para explicar las condiciones iniciales del universo tras el Big Bang.

En el año 2001 otra sonda espacial, la WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), fue llevada al punto L2 de Lagrange del sistema Sol-Tierra,<sup>28</sup> para medir anisotropías del FCM a pequeña escala angular  $\theta \geq 0.23^\circ - 0.93^\circ$ . Dos años después se publicaban los primeros resultados, sensacionales, de estas observaciones.<sup>29</sup>

*De omnibus dubitandum est ...*

La física nos sugiere un modelo global de universo, basado en la relatividad general y en el modelo estándar de partículas, resumible en media docena de parámetros,<sup>30,31</sup> y que da perfecta cuenta de todas las observaciones de que disponemos, desde las peculiaridades espectrales del FCM hasta la estructuración a gran escala de la materia, sin olvidar las abundancias primigenias de los elementos ligeros ( $A \geq 12$ ). A quienes hemos vivido las convulsiones que la cosmología ha experimentado a lo largo de medio siglo, nos tranquilizaría pensar que este notable modelo de *concordancia* va a ser perdurable

---

<sup>28</sup> Este punto se halla a 1.5 Gm de la Tierra, en la línea Sol-Tierra, y más lejos del Sol que nuestro planeta.

<sup>29</sup> Ver [http://map.gsfc.nasa.gov/m\\_mm/pub\\_papers/threeyear.html](http://map.gsfc.nasa.gov/m_mm/pub_papers/threeyear.html)

<sup>30</sup> Densidades de materia bariónica y de materia oscura exótica, parámetro actual de Hubble, amplitud e índice espectral de las perturbaciones escalares de densidad, y profundidad óptica a la reionización. En este modelo, se supone *a priori* la planitud, por lo que la densidad de energía oscura viene determinada por los otros parámetros.

<sup>31</sup> Me viene a la mente aquella frase de von Neumann: *With four parameters I can fit an elephant and with five I can make him wiggle his trunk.*

en lo fundamental. Pero hay que extremar la cautela. La historia de la ciencia abunda en ejemplos de creencias científicas que el paso del tiempo ha reducido a cenizas. Y en lo que nos concierne, he aquí algunas hipótesis de partida sobre las que no tenemos ninguna evidencia experimental directa:

- Extrapolación *ad limitem*. Los instrumentos de observación astrofísica directa permiten ver solo las últimas 4.6 décadas logarítmicas de las 61 que separan el tiempo de Planck de la edad del universo. Sin embargo, no tenemos empacho en extrapolar nuestro conocimiento (que además es impreciso) a casi todo el rango de tiempos. Otro tanto ocurre con las distancias; extrapolamos a la totalidad del universo nuestras observaciones dentro de nuestro limitado horizonte visible.
- El mecanismo generador del proceso inflacionario. Ya hemos mencionado antes la propuesta simple de un campo escalar, el inflatón; en ese modelo se introduce un autopotencial diseñado para producir una densidad prácticamente constante y enorme de energía repulsiva, que se encarga de expandir el factor de escala de la métrica en tantos órdenes de magnitud como sean necesarios.
- Una materia oscura, fría y exótica, desconocida, con densidad media actual de aproximadamente una cuarta parte de la densidad crítica,<sup>32</sup> solo porque la materia ordinaria (en cuantía limitada por las cosmoabundancias primigenias) y la ley  $1/r^2$  de Newton no bastan para explicar las velocidades peculiares de las galaxias en sus cúmulos, o de las nubes de hidrógeno en los alrededores de las galaxias en espiral, o para dar cuenta de la focalización gravitacional. ¿Por qué no pensar en que, a lo mejor, la ley newtoniana deja de funcionar a grandes distancias? Se han propuesto modelos al respecto:  $1/\text{MOND}$  (*Modified Newtonian Dynamics*),<sup>33</sup> por ejemplo, que

---

<sup>32</sup> La densidad crítica actual de energía se define como  $\rho_{c,0} := 3c^2 H_0^2 / 8\pi G_N$ , donde  $H_0$  es el parámetro de Hubble que mide el presente ritmo de expansión del universo. Como  $H_0 = 100h$  km/s/Mpc, con  $h = 0.73^{+0.03}_{-0.04}$ , resulta  $\rho_{c,0} = 11.23h^2 m_p c^2 / \text{m}^3$ .

<sup>33</sup> M. Milgrom, *A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis*, *Astrophys. J.* **270**, 365-370 (1983); *A modification of the Newtonian dynamics - Implications for galaxies*, *Astrophys. J.* **270**, 371-

aunque parece ser que arregla el problema de todas las curvas de rotación galácticas mediante un único parámetro universal, con dimensiones de aceleración,<sup>34</sup> presenta consecuencias inaceptables en otras cuestiones, como en la focalización gravitacional de la luz por cúmulos galácticos, por no hablar de su violación del principio de conservación del momento lineal. 2/ TeVeS (*Tensor-Vector-Scalar*),<sup>35</sup> generalización relativista de MOND que evita dicho problema de focalización, y que además da cabida en su seno a la descripción cosmológica. 3/ STVG (*Scalar-Tensor-Vector Gravity*),<sup>36</sup> también una extensión relativista con puntos de contacto con TeVeS, y con la característica, añadida a la de no requerir materia oscura, de explicar la extraña anomalía de las sondas Pioneer (que muchos astrofísicos creen que pueden ser debidas a vulgares errores sistemáticos). 4/ Gravedad conforme,<sup>37</sup> que conduce a una interacción gravitacional atractiva a escalas pequeñas e intermedias, como debe ser, pero repulsiva a escalas cosmológicas, con lo que permite eliminar la necesidad de introducir, no solo la materia oscura, sino también la energía oscura que invocamos para acelerar la expansión, como comento a continuación.

La reciente observación en el interesante Cúmulo Bala 1E0657-56, procedente de la colisión y fusión de dos cúmulos de galaxias, de una disposición asimétrica de la materia ordinaria y de la materia oscura, reconstruida la localización de esta

---

379 (1983); *A Modification of the Newtonian Dynamics - Implications for Galaxy Systems*, *Astrophys. J.* **270**, 384 (1983).

<sup>34</sup>  $a_0 \approx 1.2 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2 \sim cH_0$ . Si se insiste, como hacen los defensores de MOND, en la universalidad de  $a_0$ , su semejanza con  $cH_0$  debe considerarse como mero casualidad.

<sup>35</sup> J.D. Bekenstein, *Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm*, *Phys. Rev. D* **70**, 083509 (2004); Erratum, *Phys. Rev. D* **70**, 069901(E) (2005); Bekenstein, J.D., *An alternative to the dark matter paradigm: relativistic MOND gravitation*, *Proc. Sci.* **JHW2004**, 012 (2004), ArXiv astro-ph/0412652; Bekenstein, J. D. and Sanders, R.H., *A Primer to Relativistic MOND Theory*, ArXiv astro-ph/0509519.

<sup>36</sup> J.W. Moffat, *Scalar-tensor-vector gravity theory*, *J. Cosm. Astropart. Phys.* **JCAP03(2006)004**, 18 pp; arXiv:gr-qc/0506021.

<sup>37</sup> Ph.D. Mannheim, *Cosmology and galactic rotation curves*, astro-ph/9511045. Y muchos otros artículos después.

última a partir de datos sobre focalización gravitacional, señala, para muchos, que la materia oscura es algo real, cuya acción gravitatoria no es explicable mediante ninguna modificación de la ley de la gravitación.<sup>38</sup> Sin embargo, se ha argüido que puede haber sido prematura dicha conclusión, pues es explicable en una teoría relativista modificada de la gravitación (MOG, por *Modified Gravity*) basada en el modelo STVG.<sup>39</sup> Es evidente, por tanto, que las espadas siguen en alto.

- Una energía oscura antigravitante, también desconocida, que, con una densidad media actual de tres cuartas partes de la densidad crítica, domina el contenido energético del universo, y cuya presencia resolvería la aceleración de la expansión inferida de los brillos de las SNela lejanas. El vacío como motor de esta aceleración es un candidato favorito, pero ¿cómo explicar el ajuste fino que requiere la sorprendente pequeñez de su densidad de energía frente a lo que sería su valor natural? Propuestas más sofisticadas, como la de una quintaesencia, que, con su soporte de campo escalar, pasa a engrosar la lista de tantos mecanismos dinámicos poco conocidos (Higgs, inflatón...) que invocan a los humildes campos de espín cero, serían rivales dignos de toda consideración si los datos futuros apoyasen una distribución inhomogénea (en espacio y/o en tiempo) de la energía oscura.

¿Se imaginan la conmoción científica que supondría derrocar a Newton y a Einstein? Miles de trabajos “ortodoxos” irían a parar a la papelera si algunas de estas teorías alternativas de la gravitación, que tendemos a rechazar sin concederles siquiera la presunción de respetabilidad, recibieran el espaldarazo de la naturaleza. Nos cuesta más liberarnos de las estructuras mentales que hemos ido forjando en nuestras cabezas mediante las ideas entre las que hemos crecido, que

---

<sup>38</sup> D. Clowe, M. Bradac, A.H. Gonzalez, M. Markevitch, S.W. Randall, Ch. Jones, D. Zaritsky, *A direct empirical proof of the existence of dark matter*, *Astrophys. J.* **648**, L109-L113 (2006); arXiv:astro-ph/0608407v1. S. Carroll, *Dark matter is real*, *Nature Physics* **2**, 653-654 (2006).

<sup>39</sup> J.W. Moffat, *Gravitational Lensing in Modified Gravity and the Lensing of Merging Clusters without Dark Matter*, arXiv:astro-ph/0608675; J.R. Brownstein, J.W. Moffat, *The Bullet Cluster 1E0657-558 evidence shows Modified Gravity in the absence of Dark Matter*, arXiv:astro-ph/0702146v1.

llenar el universo con materia y energía extrañas a nuestro entorno. Seguimos instintivamente la enseñanza de parte de la historia, que abunda en ejemplos que prueban que la elección acertada fue la de buscar objetos nuevos en lugar de cambiar las teorías: recordemos, al efecto, la introducción por Pauli de los neutrinos en lugar de cambiar el principio de conservación de la energía como proponía Bohr, o la introducción por Adams y Le Verrier de un planeta no conocido (hoy Neptuno) en lugar de modificar la ley de Newton para explicar las perturbaciones de Urano. Claro que, en otra parte del legado histórico, tenemos a Einstein, que cortó por lo sano y modificó la ley newtoniana de la gravedad en lugar de buscar pequeños planetas adicionales, como el hipotético Vulcano concebido por Le Verrier para perturbar ligeramente la acción del Sol sobre Mercurio y así dar cuenta del avance del perihelio de Mercurio, o distribuciones de materia en torno al Sol que ayudasen a explicar dicha precesión.

... *sed sapientium argumenta multa sunt*

A pesar de lo dicho, es innegable el éxito del nuevo modelo cosmológico. Estas son sus bases teóricas:

**T1** El principio cosmológico (PC);<sup>40</sup> todos los observadores fundamentales que cabalgan sobre galaxias promedio ven la misma cosmohistoria que nosotros (antiantropocentrismo), en particular, una distribución isótropa y espacialmente homogénea a gran escala.<sup>41</sup>

**T2** Una geometría y dinámica cosmológica basada en la gravitación einsteiniana. Junto con el PC, se infiere de esto

---

<sup>40</sup> También conocido como principio copernicano.

<sup>41</sup> El nombre de PC, así como su formalización, se debe a Milne (E.A. Milne, *World-Structure and the Expansion of the Universe*, Nature, 130, 9-10 (1932); *Zeitschr. für Astrophys.* 6, 1-95 (1933); *Correction to the paper: "World-Structure etc."*, *Zeitschr. für Astrophys.* 6, 244 (1933)), que se apoya en el requerimiento de Einstein a todo modelo cosmológico: *Alle Stellen des Universums sind gleichwertig* (Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften, S. 235-237 (1931)). Pero la esencia del PC se remonta, al menos, a cinco siglos antes. Nicolás de Cusa escribía en su obra *DE DOCTA IGNORANTIA* (1439-40), cerca del final del Cap. XI del Libro II, dedicado a reflexionar sobre el posible centro y límites del universo: ...y a donde quiera que fuera [un observador] creería estar en el centro.



la existencia de un instante cósmico, la geometría de Robertson-Walker, el desplazamiento cosmológico al rojo, y una distribución global de materia/energía de tipo fluido perfecto, caracterizada por una densidad  $\rho(t)$  y presión  $p(t)$  uniformes. En particular, la fuente efectiva de la gravitación es  $\rho + 3p$ .

**T3** El modelo estándar de partículas elementales, con su libertad asintótica para las interacciones fuertes que permite estudiar el universo primitivo como un gas ideal.

Y sus bases observacionales ya han sido comentadas:

**O1** Expansión del universo.

**O2** FCM y su distribución angular.

**O3** Cosmoabundancias primigenias.

**O4** Estructura a gran escala del universo.

A tales pertrechos añadimos finalmente:

**N1** Un modelo específico de inflación.

**N2** Una componente de materia oscura fría.

**N3** Una componente de energía oscura tipo vacío.

Así resulta el modelo cosmológico  $\Lambda$ CDM (por  $\Lambda$  *Cold Dark Matter*), cuyo éxito para acomodar los datos cosmológicos disponibles es bien conocido. Hilando fino, serían once los parámetros cosmológicos a tener en cuenta. A los seis citados antes, habría que añadir: (parámetros de) densidad de energía oscura  $\Omega_\Lambda$ , de radiación  $\Omega_\gamma$  y de neutrinos  $\Omega_\nu$ , cociente tensor/escalar  $r$ , y sesgo lineal  $b$ . Pero el modelo  $\Lambda$ CDM presupone la planitud de las secciones espaciales, y la energía de vacío como energía oscura, con lo que  $\Omega_\Lambda$  queda fijado por los otros parámetros de densidad; la energía de radiación está muy bien medida (FCM); se estima, por el momento, que la energía en neutrinos carece de importancia cosmológica; del parámetro  $r$  existe

muy poca información, y el sesgo *b* puede ignorarse mientras no se usen datos sobre distribución de galaxias a gran escala.<sup>42</sup>

### Excesos verbales

Recuerdo que en 1992 (“año de la Expo”) las trompetas triunfales sonaron por todo el mundo: *If you’re religious, it’s like looking at God*, exclamó George Smoot en unas declaraciones a *Associated Press* comentando el mapa de anisotropías del FCM revelado por los datos del satélite COBE. Otras expresiones místicas de este estilo fueron: *It’s the Holy Grail of cosmology*, por Michael Turner, o *it’s the birth of the universe, the handwriting of God*, también de Smoot. En la portada del libro *WRINKLES IN TIME*, de Smoot, aparece esta frase alusiva de Hawking: *The most important scientific discovery of the century, if not all time*. Y en la contraportada del mismo, se lee: *Behold the Handwriting of God*.

Ante este estallido de euforia, hubo llamadas a la sensatez. Por ejemplo, la revista *Nature* recordó el viejo dicho de Bondi: *The data in cosmology are so likely to be wrong that I propose to ignore them*.<sup>43</sup> Ciertamente, ha llovido mucho desde entonces, pues la cosmología ha pasado de presentar errores de algún que otro orden de magnitud a ser considerada hoy como una cosmología de “precisión”, calificativo un tanto exagerado, porque ahora los errores en la mayoría de sus parámetros esenciales son del orden de unos pocos por ciento. Pero tampoco esto autoriza exageraciones que, aunque de otro estilo, son inaceptables por injustificadas: *These measurements will undoubtedly match, and in many cases exceed, the precision of experimental particle physics measurements and correspondingly establish the cosmological model as securely as the Standard Model of elementary particles. We will then know as much, or even more, about the early Universe and its contents as we do about the fundamental constituents of matter*.<sup>44</sup> Pensemos que, por ejemplo, hay cantidades, como la anomalía del electrón, que se

---

<sup>42</sup> O. Lahav, A.R. Little, *The Cosmological Parameters*, en *REVIEW OF PARTICLE PHYSICS*, Particle Data Group, *J. Phys. G* **33**, 224-232 (2006).

<sup>43</sup> (Anonymous); *Big Bang Brouhaha*, *Nature* **356**, 731 (1992).

<sup>44</sup> W. Hu, N. Sugiyama, J. Silk, *The physics of cosmic microwave background anisotropies*, *Nature*, **386**, 37-43 (1997).

mide con 10 cifras significativas, y permite fijar la constante de estructura fina con precisión de 1ppG a partir de la predicción teórica. ¿Igualará esta marca algún día la cosmología del futuro?

No es, pues, de extrañar que se produjeran duras reacciones en sentido opuesto, como la protagonizada por Disney hace unos pocos años.<sup>45</sup> La unicidad del universo, su opacidad hasta el desacoplo, la gigantesca extrapolación a que se someten las leyes conocidas para aplicarlas a distancias cósmicas, las dificultades de la astrofísica para apreciar objetos sumamente tenues por su lejanía, lo que obliga a fijarse solo en los objetos que se ven, y no en los muchos más que no se ven, con la consiguiente carga de sesgo por selección, etc., le llevan a expresar una opinión muy negativa sobre la cosmología y sobre quienes la cultivan. No es nuevo.

Hace ya medio siglo, Whitrow (matemático, cosmólogo e historiador de la ciencia) y Bondi (matemático y cosmólogo) mantuvieron un debate sobre si la cosmología física era o no una ciencia.<sup>46</sup> Whitrow defendía el no, Bondi el sí. Recordaba el primero que las polémicas entre científicos acostumbran a acompañar los grandes avances de la ciencia, y han sido a menudo muy violentas. En Harvard se decía en las postrimerías del XIX que ya se podía hablar de la teoría ondulatoria de la luz, porque los defensores de la teoría corpuscular estaban ya todos muertos. Para Whitrow, la cosmología es especial. Está en la frontera entre la ciencia (se apoya en datos objetivos) y la filosofía (sus respuestas son cambiantes, mientras que las preguntas permanecen). Además, se distingue de las ciencias ordinarias porque no goza de un respaldo mayoritario (le falta el sello de *universal agreement*). Pero según Bondi, una ciencia no necesita el consenso. Lo que sí requiere unanimidad general es el criterio para distinguir entre lo que es ciencia y lo que no lo es, y este criterio, para todos los científicos, es nítido: *the yardstick of experiment*, que dice Bondi. Los hechos experimentales u observacionales han de respaldar lo que llamemos *ciencia*, sus predicciones deben cumplirse, y no debe presentar inconsistencias lógicas. Con estas premisas, el consenso en su aceptación como ciencia terminará por imponerse. Bien, dirá

---

<sup>45</sup> M.J. Disney, *The Case Against Cosmology*, arXiv:astro-ph/0009020v1.

<sup>46</sup> G.J. Whitrow, H. Bondi, *Is Physical Cosmology a Science?*, Br. J. Philos. Sci. 4, 271-283 (1954).

Whitrow, pero no se negará que hay cuestiones en cosmología que rayan en la filosofía, como la de la finitud o infinitud de la edad del universo, cuestión esta a la que jamás podremos dar respuesta ni teórica ni experimental. Terminará la discusión Bondi reconociendo que hay varias clases de cosmología, una científica, y otra que podría llamarse *filosófica*. En cuanto a cuestiones como la edad del universo, se mantiene en que es una cuestión de rango físico; si bien nunca podremos tener una confirmación directa, sí que podremos inferirla de sus consecuencias, de observaciones que indiquen que el universo se comporta *como si* la vida del universo fuese tal o cual.

¿Cómo no suscribir las palabras de Bondi? Su vigencia es plena. Captan el sentir mayoritario. La verdad es que ahora es mucho más fácil reconocer a la cosmología como otra rama más de las ciencias físicas. Sus espectaculares hallazgos observacionales y su fructífera simbiosis con la física de partículas la han convertido en un respetable campo de investigación. En una mesurada y firme respuesta a la crítica de Disney, Peebles nos recuerda que la cosmología está basada en hipótesis, y que en la comprobación observacional de éstas hay un progreso indiscutible.<sup>47</sup> Unas, como la hipótesis de evolución cósmica, están bien establecidas. Otras, como las concernientes a la materia y energía oscuras, son por el momento *Ansätze* en espera de confirmación. La consistencia de las múltiples inferencias independientes que sobre los parámetros cosmológicos se obtienen a través de distintas fuentes de información es una garantía añadida de la solidez de la cosmología actual.

## La cosmología del mañana

Estaría uno tentado de pensar que la maravillosa sonda WMAP de la NASA ha agotado el filón informativo del FCM. Pero los años que se avecinan prometen ser realmente interesantes. He aquí un par de muestras.

---

<sup>47</sup> P.J.E. Peebles, *Concluding Remarks*, arXiv:astro-ph/0011252v1.

## La misión europea Planck

La UE está preparando pacientemente (para algunos con demasiada lentitud) una misión sumamente importante en este campo. Se trata de la misión europea Planck, concebida bajo el nombre COBRAS/SAMBA en 1996.<sup>48</sup> La sonda Planck de la Agencia Espacial Europea, cuyo lanzamiento está previsto para el mes de julio de 2008,<sup>49</sup> va a ser sin duda la misión definitiva para el análisis del FCM. Por su gran sensibilidad ( $\Delta T/T = 2 \times 10^{-6}$ , frente al  $1 \times 10^{-5}$  de la WMAP) y su alta resolución angular —desde 5 hasta 33 minutos de arco (según la frecuencia central de cada uno de sus nueve canales, que van desde 857 hasta 30 GHz, respectivamente), frente a los 15' de la WMAP, o los 7° del COBE—, los datos de la misión Planck previsiblemente permitirán obtener el espectro angular de potencia de la anisotropía de la temperatura del FCM (correlación  $TT$ ) hasta altos momentos angulares ( $\ell \leq 2500$ ), con precisión limitada tan solo por la ineludible covariancia cósmica y las fluctuaciones de primer plano, y con menor resolución, los espectros angulares de las correlaciones  $EE$ ,  $TE$  y  $BB$  asociadas a la polarización del FCM.<sup>50</sup> Con todas estas mediciones, se espera determinar los parámetros cosmológicos dentro del contexto  $\Lambda$ CDM con precisiones del orden del 1 %, discernir entre los posibles modelos de inflación, buscar señales de las presuntas cuerdas por sus posibles efectos sobre las fluctuaciones en la polarización del FCM, y arrojar luz sobre los mecanismos de aceleración en la expansión del universo (energía de vacío, quintaesencia...). En particular, como los modos B de la polarización del FCM son exclusivamente debidos a las fluctuaciones tensoriales, los datos sobre el espectro angular BB darán preciosa información sobre la razón tensor/escalar  $r$  y por tanto del hipotético fondo cósmico de gravitones que predicen muchos modelos de inflación.<sup>51</sup>

---

<sup>48</sup> Véase el "libro azul": *The Scientific Programme of Planck*, ESA-SCI(2005)1, arXiv:astro-ph/0604069.

<sup>49</sup> Como la WMAP, se colocará en un entorno del punto de Lagrange  $L_2$  del sistema Sol-Tierra, situado a 1.5 Gm.

<sup>50</sup> E indica el modo de tipo eléctrico, o par, de polarización, y B el modo de tipo magnético, o impar. Estos modos están relacionados con una descomposición de un campo tensorial sobre  $S^2$ , simétrico y de traza nula, en suma de otro similar de tipo gradiente y otro de tipo rotacional.

<sup>51</sup> J.G. Bartlett, *Cosmic microwave background polarization*, J. Phys.: Conf. Ser. 39, 1-8 (2006).

## La forma de nuestro universo

Los datos cosmológicos sugieren fuertemente que las secciones de simultaneidad de nuestro universo son localmente planas: la densidad total de energía/materia relativa a la densidad crítica vale  $\Omega_0 = 1.003_{-0.017}^{+0.013}$ . En general, suponemos tácitamente por sencillez que son difeomorfas a  $\mathbf{R}^3$ . Pero no disponemos de datos ni argumentos que permitan afirmar que dichas secciones son infinitas, y parece obvio que la hipótesis de que lo fueran nunca podría ser confirmada. En principio, nuestro espacio podría ser finito, de uno cualquiera de los seis tipos existentes de “planicosmos” quirales, o formas (de espacio) euclidianas cerradas y orientables,<sup>52</sup> con topología  $\mathbf{T}^3$  (torocosmos o 3-toro),  $\mathbf{T}^3/\mathbf{Z}_2$  (dicocosmos o espacio con media vuelta),  $\mathbf{T}^3/\mathbf{Z}_3$  (tricosmos o espacio con un tercio de vuelta),  $\mathbf{T}^3/\mathbf{Z}_4$  (tetracosmos o espacio con un cuarto de vuelta),  $\mathbf{T}^3/\mathbf{Z}_6$  (exacosmos o espacio con un sexto de vuelta), y  $\mathbf{T}^3/(\mathbf{Z}_2 \times \mathbf{Z}_2)$  (didicosmos o variedad de Hantzsche-Wendt).<sup>53</sup> O bien podría ser un planicosmos infinito y quiral, pero no simplemente conexo, sino de una de las tres formas euclidianas abiertas y orientables, distintas de  $\mathbf{R}^3$ , con topología  $S^1 \times \mathbf{R}^2$  (proespacio circular),  $\mathbf{T}^2 \times \mathbf{R}$  (proespacio toroidal),  $((\text{Botella de Klein}) \times \mathbf{R})/\mathbf{Z}_2$  (moespacio kleiniano).<sup>54</sup>

¿Es la topología del cosmos observable? Como vías más prometedoras, se han estudiado las formas cerradas o “pequeños universos”, pues son los que ofrecen mayores posibilidades de detección. De ellas, la más simple es la toroidal. En un universo con secciones  $\mathbf{T}^3$ , escenarios repetitivos de paredes ficticias especulares, cada objeto astrofísico se multiplica infinitas veces (hay en  $\mathbf{T}^3$  infinitas geodésicas de tipo luz entre dos sucesos causalmente separados), ofreciendo otras tantas imágenes suyas, una, la “real” o más cercana, las otras “fantasmagóricas”, alejadas cada vez más de nosotros. Veríamos pues, en dicho universo múltiplemente conexo, una misma galaxia

---

<sup>52</sup> La orientabilidad espacial se apoya en la hipótesis de hiperbolicidad global del espacio-tiempo y la consiguiente orientabilidad temporal, así como en la violación de la conjugación de carga y de paridad en las interacciones débiles, que permite distinguir operacional y localmente entre orientaciones espaciales opuestas.

<sup>53</sup> J.H. Conway, J.P. Rossetti, *Describing the platycosms*, arXiv:math/0311476v1.

<sup>54</sup> “Proespacio” y “moespacio” son abreviaturas de espacio producto y espacio de Möbius, respectivamente.

en distintas etapas de su evolución, con diferentes orientaciones, y con luminosidades aparentes en escala decreciente. La “cristalografía cósmica” se encarga de analizar estadísticamente los datos de posiciones aparentes de distintas fuentes astrofísicas, buscando correlaciones que revelen una topología multiconexa. Si el poliedro fundamental es un cubo de lado  $\alpha$  y diagonal  $\beta$ , menor que la distancia  $c/H_0 = 3000h^{-1}$  Gpc al horizonte Hubble, cabe la posibilidad de encontrar evidencias observacionales de su topología global. Por ejemplo, los histogramas de distancias de pares de objetos deberían presentar picos acusados a ciertas distancias discretas, vinculadas a las holonomías. El análisis de esta señal para los cúmulos de galaxias del catálogo de Abell revela que  $\beta \geq 600h^{-1}$  Mpc, y no permite concluir nada sobre la posible toricidad del espacio.<sup>55</sup>

Otro lugar indicado para buscar señales de la topología del espacio es el FCM. Si el tamaño de la celda es menor que la distancia a la superficie de última difusión (SUD), esta cortará a su imagen más próxima en un círculo. En ese caso habrá pares de círculos opuestos en la SUD con igual distribución de temperaturas. Su búsqueda es computacionalmente muy penosa. Se ha realizado, sin hallarse ninguna pareja de tales círculos, lo que revela que el tamaño de la posible celda fundamental debe ser, si existe,  $\geq 25$  Gpc.<sup>56</sup>

Va para un siglo que, dentro de la cosmología estática defendida por Einstein en el primer modelo cosmológico relativista,<sup>57</sup> De Sitter había señalado que el espacio proyectivo  $S^3/\mathbf{Z}_2$  (espacio elíptico) era más indicado que  $S^3$  como sección espacial de ese universo, pues con él se evitaban los antípodas.<sup>58</sup> El volumen de ese espacio sería solo la mitad de su recubridor universal  $S^3$ , y por tanto no muy distinto. A Einstein, sin embargo, no le movieron estos argumentos, y en

---

<sup>55</sup> Ver, por ejemplo, M. Lachièze-Rey, J.-P. Luminet, *Cosmic Topology*, Phys. Rep. **254**, 135-214 (1995).

<sup>56</sup> N.J. Cornish, D.N. Spergel, G.D. Starkman, E. Komatsu, *Constraining the Topology of the Universe*, Phys. Rev. Lett. **92**, 201302(4) (2004).

<sup>57</sup> A. Einstein, *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften, S. 142-152 (1917).

<sup>58</sup> W. De Sitter, A. *Einstein's Theory of Gravitation and its Astronomical Consequences*, MNRAS **78**, 3-28 (1917); *On the curvature of space*, Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam. Section of Sciences. Proceedings, **20**, 229-243 (1917).

sendas tarjetas postales a De Sitter (1918) y a Klein (1919) confesaba que un sentimiento interior le empujaba a inclinarse por los espacios en que todas las curvas cerradas son deformables a un punto (variedades simplemente conexas).<sup>59</sup> Como los datos observacionales nunca dieron materia/energía suficiente para forzar un universo con índice de curvatura positivo, las formas espaciales esféricas no fueron consideradas seriamente como alternativas plausibles.

Hace unos pocos años, sin embargo, se ha propuesto como forma espacial del universo el espacio dodecaédrico  $S^3/I^*$  de Poincaré (esfera homológica),<sup>60</sup> donde  $I^*$  indica el grupo icosaédrico binario de orden 120.<sup>61</sup> Al ser su volumen 120 veces menor que el de la superficie esférica  $S^3$ , dificulta más las vibraciones de gran longitud de onda, y en particular, inhibe significativamente los modos  $\ell = 2, 3$ , en la distribución angular de las anisotropías del FCM, tal como los datos de COBE y WMAP sostienen, apartándose ostensiblemente de la predicción teórica dentro del modelo de concordancia. Con  $\Omega_0 = 1.016$ , compatible con los datos conocidos, el modelo dodecaédrico reproduce muy bien el espectro angular de potencia del FCM.<sup>62</sup> Subsisten algunos flecos, no obstante, que tampoco este modelo consigue explicar.<sup>63</sup>

Se espera ahora que la sonda Planck clarifique, con sus datos de mayor precisión, si el contenido de nuestro universo rebosa el nivel de planitud lo suficiente como para afianzar la propuesta de Luminet y otros. Si se diera la inesperada circunstancia de que la balanza se

---

<sup>59</sup> A. Einstein, Tarjeta postal a Hermann Weyl, junio 1918; tarjeta postal a Felix Klein, abril 1919. Einstein Archives, Princeton.

<sup>60</sup> Contraejemplo del propio Poincaré a su primera conjetura de que una variedad cerrada  $C$  tridimensional, con la misma cohomología que  $S^3$ , debía ser homeomorfa a ésta. Recordemos que el pasado año, en el Congreso Internacional de Matemáticos celebrado en Madrid, se declaró correcta la demostración por el ruso Gregori Perelman de la cuestión (o conjetura) de Poincaré: toda variedad tridimensional cerrada  $C$ , simplemente conexa, es homeomorfa a  $S^3$ .

<sup>61</sup> J.-P. Luminet, J.R. Weeks, A. Riazuelo, R. Lehoucq, J.-Ph. Uzan, *Dodecahedral space topology as an explanation for weak wide-angle temperature correlations in the cosmic microwave background*, *Nature* **425**, 593-595 (2003).

<sup>62</sup> J.-P. Luminet, *The Shape of Space after WMAP data*, arXiv:astro-ph/0501189v1.

<sup>63</sup> J. Weeks, J. Gundermann, *Dodecahedral topology fails to explain quadrupole-octupole alignment*, arXiv:astro-ph/0611640v1.



inclinase hacia el otro lado, y nuestro espacio fuese hiperbólico, se abriría una caja mucho más rica en posibilidades para su forma.<sup>64</sup>

### ¡Límites a la curiosidad cósmica?

Las preguntas filosófico-científicas fundamentales, híbridas por naturaleza, siguen ahí a pesar de los avances, no sólo en datos, sino también en principios, experimentados por la cosmología: 1/ ¿Cómo surgió el universo? 2/ ¿Nació de unas leyes, o por el contrario, las leyes emergieron con él (o de él)? 3/ ¿Hay otros universos? 4/ ¿Son el espacio y la cantidad de materia/energía finitos? 5/ ¿Cabe el infinito en la realidad? 6/ ¿De verdad podemos esperar de una futura cosmología cuántica que explique la creación del universo? ¿Acaso esa misma cosmología no formaría parte del universo y debería por tanto autoexplicarse? 7/ &c.

El escaso, por no decir nulo, progreso hacia una respuesta a estas cuestiones parece sugerir la acción inevitable de un principio de “indeterminación” en cosmología:<sup>65</sup> *Scientific exploration can tell us much about the universe but not about its ultimate nature, or even much about some of its major geometrical and physical characteristics. Some of this uncertainty may be resolved, but much will remain. Cosmological theory should acknowledge this uncertainty.*

Pero los científicos, y en particular, los cosmólogos, tienden a desoír recomendaciones que coarten su imaginación. Convencidos la inmensa mayoría, hoy día, de que la Gran Explosión es una barrera infranqueable que impide la llegada de información estructurada sobre lo que ocurrió antes de la misma, sigue habiendo cosmólogos (como los apasionados por las cuerdas) que la trascienden especulando sobre su “más allá”. Cualquier descubrimiento teórico sobre partículas hipotéticas es inmediatamente transportado a los orígenes del universo, y da lugar a discusiones sobre sus posibles consecuencias

---

<sup>64</sup> J. Levin, *Topology and the cosmic microwave background*, Phys. Rep. 365, 251-333 (2002).

<sup>65</sup> G.F.R. Ellis, *Philosophy of cosmology*. To appear in HANDBOOK IN PHILOSOPHY OF PHYSICS, Eds. J. Butterfield, J. Earman (Elsevier, 2006), Section 9.2. ArXiv:astro-ph/0602280v2: *Issues in the Philosophy of Cosmology*.

en la historia primitiva de este o en su composición y estructuración actuales. Así, por ejemplo, hay cosmologías de axiones, de branas, de cuerdas, etc. La consideración de un megaverso, con innumerables universos distintos (al menos unos  $10^{500}$  podrían divisarse en el “paisaje cósmico” de la teoría M), abre nuevos horizontes a la imaginación, y a la polémica.

Pero esta es otra historia, y este, un buen momento para terminar.

He dicho.

