

**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES DE ESPAÑA**

DISCURSO INAUGURAL

DEL AÑO ACADÉMICO 2025-2026

**LEÍDO EN LA SESIÓN CELEBRADA EL DÍA 24 DE SEPTIEMBRE DE 2025
POR EL ACADÉMICO NUMERARIO**

EXCMO. SR. D. JUAN MARÍA MARCAIDE OSORO

SOBRE EL TEMA

**ALGUNOS APUNTES SOBRE
LA EXPLORACIÓN DEL UNIVERSO**



**MADRID
DOMICILIO DE LA ACADEMIA
VALVERDE, 22 - TELÉFONO 917 014 230**

www.rac.es

2025

ISSN: 1138-4093
ISBN: 978-84-87125-93-5
Depósito legal: M-16821-2025

Excma. Sra. Presidenta,
Excmas. Sras. Académicas y Excmos. Sres. Académicos,
Señoras, Señores, amigos todos.

Permítanme presentarles un sencillo discurso de inauguración de año académico de título:

ALGUNOS APUNTES SOBRE LA EXPLORACIÓN DEL UNIVERSO.

Está previsto que el gigantesco telescopio óptico Extremely Large Telescope¹, ELT, de casi 40 metros de diámetro esté construido en 2028 y vea primera luz en marzo de 2029. Por cierto que también estaba previsto que mi discurso tuviera lugar en 2028, pero por circunstancias se ha adelantado a hoy. Con ese telescopio que ahora se construye en Cerro Armazones, no lejos de donde están varios de los mayores telescopios del mundo en Cerro Paranal, Chile, los astrónomos, la humanidad, quieren dar un gran salto fundamental en el conocimiento del universo con observaciones en el rango visible e infrarrojo. Para ello el ELT se apoyará también

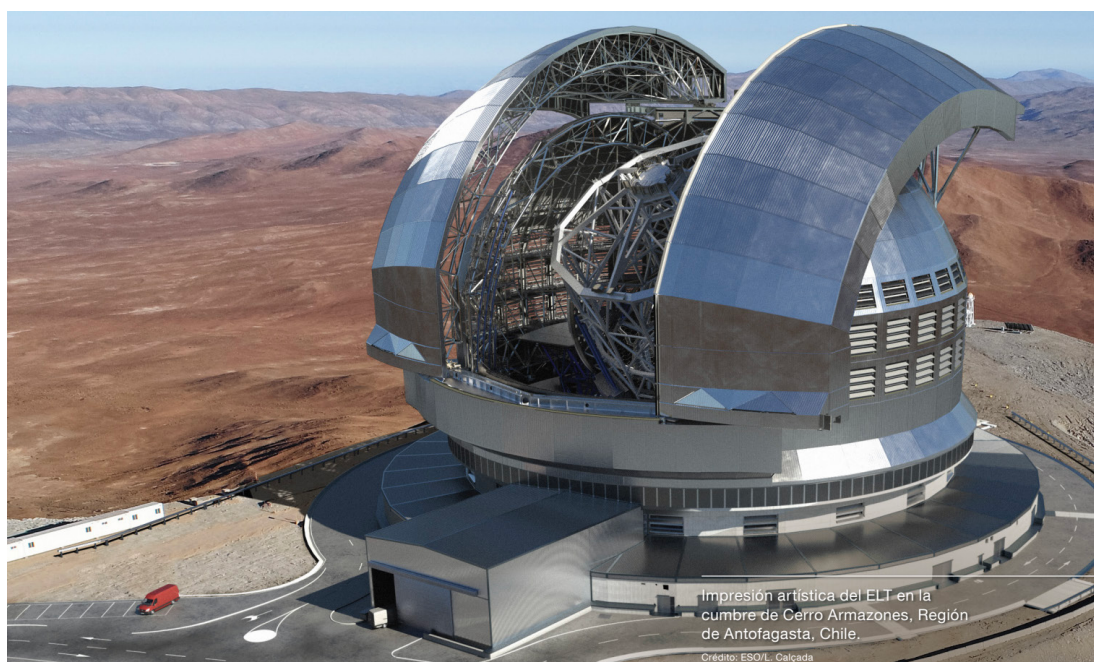


Figura 1: Maqueta del Extremely Large Telescope.

¹ El Extremely Large Telescope será un telescopio óptico (visible/infrarrojo) con espejo primario de 39,3 metros de diámetro. Lo está construyendo el European Southern Observatory en Cerro Armazones en el Desierto de Atacama, Chile, uno de los desiertos más secos de la Tierra. Su espejo primario estará formado por 798 espejos hexagonales. Tendrá 4 espejos secundarios. El cuarto espejo (tercero entre los secundarios) será muy delgado y estará dotado de actuadores muy rápidos que ajustarán su forma mil veces por segundo para compensar las distorsiones atmosféricas. El quinto espejo será del tipo tip/tilt de inclinación muy rápida. Se podrán conseguir resoluciones angulares de 1 milisegundo de arco y sensibilidades 15 veces superiores a las conseguidas por el Hubble Space Telescope. El domo que lo cubrirá tendrá una altura de 80 metros y 3700 toneladas de peso.

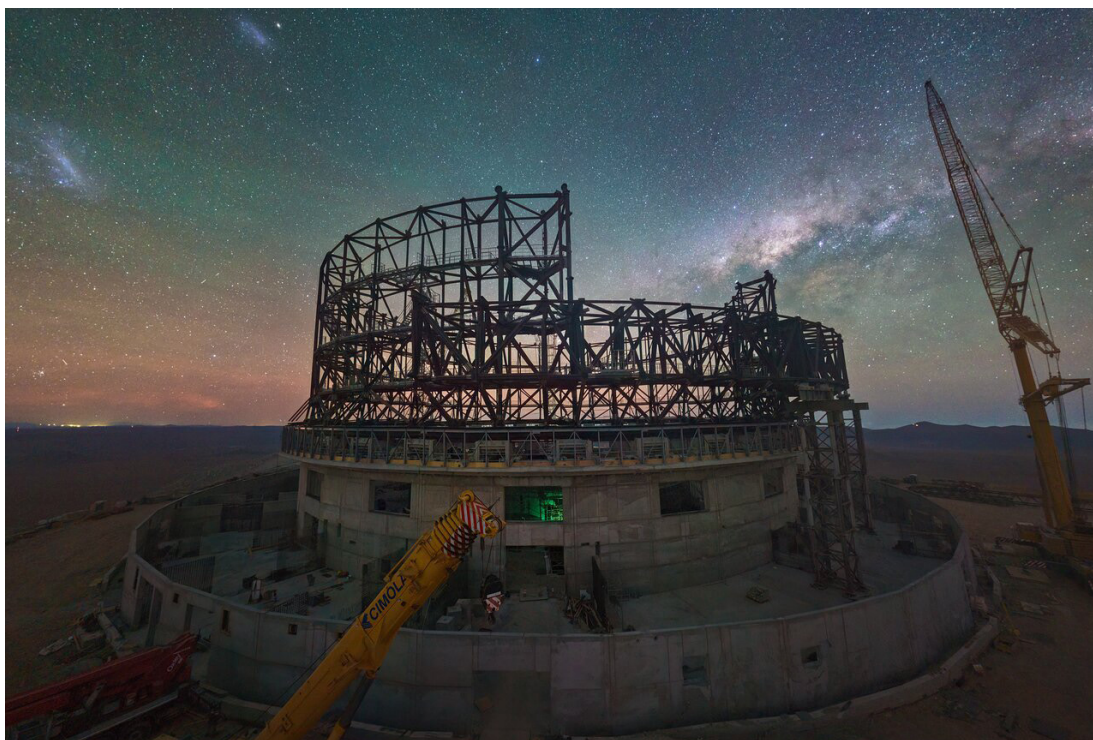


Figura 2: Extremely Large Telescope en construcción en una imagen de junio de 2023.

en observatorios espaciales y en radiotelescopios gigantes como el Square Kilometre Array², SKA, que se está construyendo ahora en Australia y Sudáfrica y también en otros instrumentos que más adelante mencionaré. Estos nuevos instrumentos al límite tecnológico harán nuevos descubrimientos, como siempre ha sucedido con la nueva instrumentación, pero también harán grandes avances en temas que conocemos ya, pero no del todo.

La astronomía, término que incluye la astrofísica y la cosmología, se ha desarrollado extraordinariamente en el último medio siglo. En ese periodo se descubrieron los púlsares, los agujeros negros, el movimiento superluminal en imágenes de cuásares, y las lentes gravitacionales. Se cartografió y entendió la naturaleza de la radiación del fondo de microondas y sus anisotropías. Se descubrieron los exoplanetas, se entendieron las explosiones supernovas y hasta se hicieron radio-imágenes de la expansión de algunas de ellas. Se descubrió la expansión acelerada del universo y la existencia de energía oscura. Se descubrieron las ondas gravitacionales. Se consiguió pesar agujeros negros supermasivos y obtener imágenes de dos de ellos. Se descubrieron las enanas marrones y algunos de los secretos que encierran. Se avanzó muchísimo en la comprensión de la formación estelar y de la evolución galáctica... solo por mencionar unos temas. Pero, en cada tema quedan flecos por entender, a veces importantes flecos. Y siempre quedarán algunos flecos.

² El Square Kilometre Array será un instrumento con varios interferómetros desplegados en la costa oeste de Australia y Sudáfrica. Véase más adelante.

También en las últimas décadas, varios observatorios terrestres y espaciales han obtenido catálogos de objetos celestes en cada rango del espectro electromagnético. Catálogos inmensos y a veces de una precisión astrométrica extraordinaria como los obtenidos por los observatorios europeos Hipparcos y GAIA³. También el ELT, que he mencionado al comienzo, como el EUCLID⁴ que lleva en órbita casi dos años son europeos. Se ha hecho mucho en Europa. En España también se ha hecho mucho. Y en la Real Academia de Ciencias, RAC, de un tiempo a esta parte se empieza a reflejar eso: hoy hay más astrónomos académicos que nunca antes.

Permítanme apuntar algunos temas –sólo algunos para no aburrirles– desde una perspectiva mundial, europea y española. Y discúlpenme por utilizar algunos nombres y conceptos que pueden no serles familiares. En las notas a pie de página encontrarán Uds. los detalles necesarios.

Muy recientemente un joven y modesto grupo castellano-canario⁵ ha estado estudiando los tamaños de las galaxias y su evolución en el tiempo. Ha estudiado una muestra de galaxias no muy lejanas con imágenes muy profundas donde se puede manifestar la emisión débil de sus partes externas, las de muy bajo brillo superficial. En vez de caracterizar el tamaño de las galaxias por su radio efectivo, lo cual premia a la emisión central, las ha caracterizado por su radio de truncamiento, el punto en el que la caída del brillo superficial es siempre muy abrupta y que desde hacía tiempo estaba propuesta como alternativa más fiable que la de usar los radios efectivos. Sus resultados indican una evolución galáctica muy distinta, mucho mayor, de la asumida hasta ahora. Estos investigadores son miembros de la colaboración EUCLID. ¿Qué encontrarán cuando esa muestra se extienda a los datos del observatorio EUCLID que va a proporcionar imágenes de un tercio de la esfera celeste, con una profundidad en la tercera dimensión (radial) hasta un corrimiento al rojo⁶ de casi 2, cuando el universo tenía 4000 millones de años de los 13800 que tiene ahora? ¿Afectarán esos resultados a los estimados de materia oscura en esas galaxias? ¿Afectarán a las simulaciones que se han considerado tan exitosas de la evolución de las estructuras en el universo con lo que sabíamos de la materia oscura sin saber nada de su composición?

Evidentemente, para extender los estudios a los datos de EUCLID, observatorio diseñado para cartografiar la energía oscura utilizando el efecto de lente gravitacional débil con los

³ El observatorio espacial GAIA es el sucesor del observatorio espacial Hipparcos. Diseñado para funcionar durante 5 años se extendió su vida hasta 2025, más de 11 años. Dotado de instrumentos para astrometría, fotometría y espectroscopía, sus determinaciones astrométricas han obtenido precisiones cercanas al microsegundo de arco. Los datos de miles de millones de objetos serán analizados durante décadas proporcionando posiciones, movimientos propios y características fotométricas y espectrales.

⁴ EUCLID es un observatorio espacial lanzado en el año 2023 que observará 14000 grados cuadrados de cielo hasta 2030. Su espejo primario es de 1.2 metros de diámetro. Cuenta con dos instrumentos: una cámara de luz visible y un espectrómetro y fotómetro de infrarrojo cercano. El objetivo de EUCLID es explorar la expansión acelerada del universo.

⁵ F.Buitrago & I.Trujillo, *Astronomy and Astrophysics*, 682, A110 (2024).

⁶ El corrimiento al rojo, que es un desplazamiento hacia longitudes más largas de las líneas espectrales de las galaxias por la expansión del universo, nos proporciona, a través de la ley de Hubble, la distancia a esas galaxias.

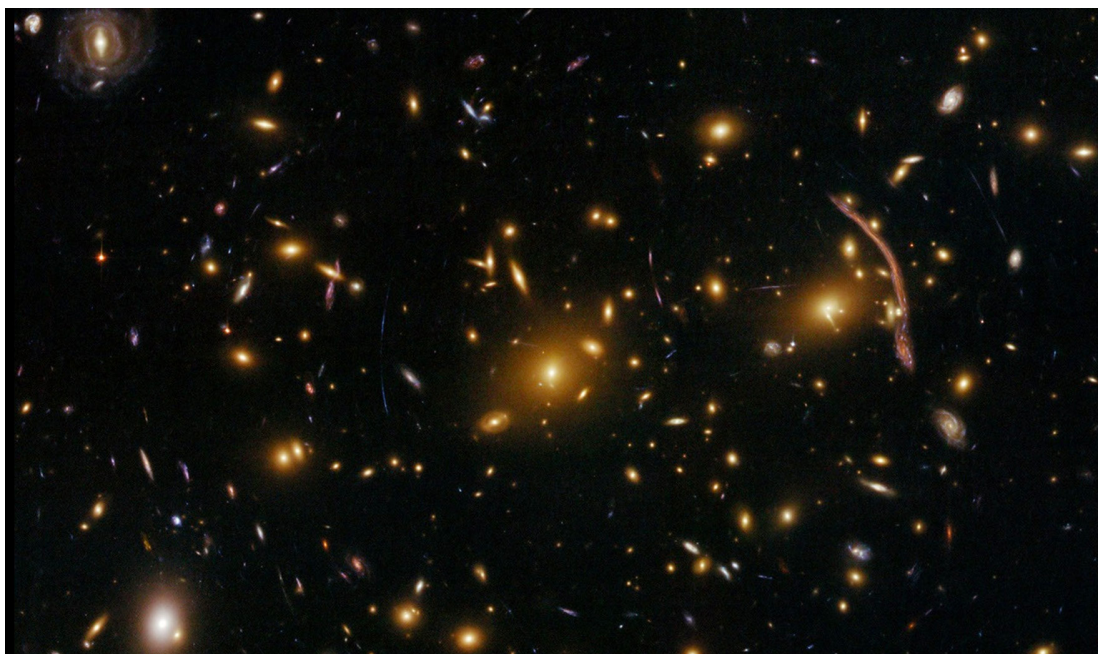


Figura 3. Cúmulo de Abell 370 que actúa distorsionando toda la emisión de los objetos más lejanos debido al efecto lente gravitacional débil. Se pueden observar arcos incompletos de anillos de Einstein.

cúmulos de galaxias (clústeres de galaxias), son necesarios procedimientos menos manuales, algo que llama a la Inteligencia Artificial. Estos jóvenes investigadores ya han utilizado IA con su muestra y han demostrado que llegan a los mismos resultados. Han demostrado en una muestra pequeña que los resultados proporcionados por la IA bien entrenada dan unos resultados fiables. Los estudios de EUCLID, y no solo de EUCLID, necesitarán de tremendos tratamientos informáticos.

He mencionado materia oscura y energía oscura sin darles explicación alguna. Pero se la daré más adelante. También he aludido al concepto lente gravitacional débil que hace que veamos el universo ligeramente distorsionado, distorsión causada por los cúmulos de galaxias y por galaxias gigantes que intervienen en el viaje de la luz entre el emisor y nosotros. El efecto de lente gravitacional lo caracterizó Einstein en 1930 mostrando que, si dos estrellas estuvieran alineadas del todo con el observador y si se tuviera suficiente sensibilidad en la observación, se podría ver la imagen de la estrella lejana como un anillo alrededor de la estrella cercana. Einstein llegó a escribir que no sería un efecto observable. Pero, el efecto se descubrió en 1979 con los cuásares 0957+56 A,B. Aparecían dos imágenes gemelas, por arte de la curvatura de los rayos de luz debida a una galaxia masiva, a partir de una imagen real del cuásar casi alineado con la galaxia y mucho más lejano que ella. ¡Quién me iba a decir a mí en 1979 cuando investigamos en esta primera lente gravitacional fuerte que hoy les estaría contando a mis queridos colegas académicos cómo ese efecto en su versión débil serviría para estudiar la energía oscura del universo!

Quizás les estoy empezando a confundir. Voy a tratar de evitarlo contándoles cómo los cosmólogos conciben el universo y la evolución de sus estructuras. Mis colegas los cosmólogos

—y algún académico cosmólogo tenemos en esta corporación— creen entender cómo se formó el universo a partir del periodo inflacionario que terminó a unos 10^{-32} segundos de edad del universo. O quizás, desde la edad de 10^{-20} segundos en la que el universo era una sopa o gas de partículas elementales que más tarde dieron lugar a los quarks. Estos terminaron por quedar confinados en protones y neutrones cuando la edad del universo era de unos 10^{-6} segundos. Todos los leptones o partículas ligeras quedaron libres de sus antipartículas cuando la edad del universo era de un segundo y su temperatura 10^{10} K. Luego, en unos tres minutos tuvo lugar la nucleosíntesis primordial por la que se formaron los núcleos de los átomos de helio, litio, berilio y boro.

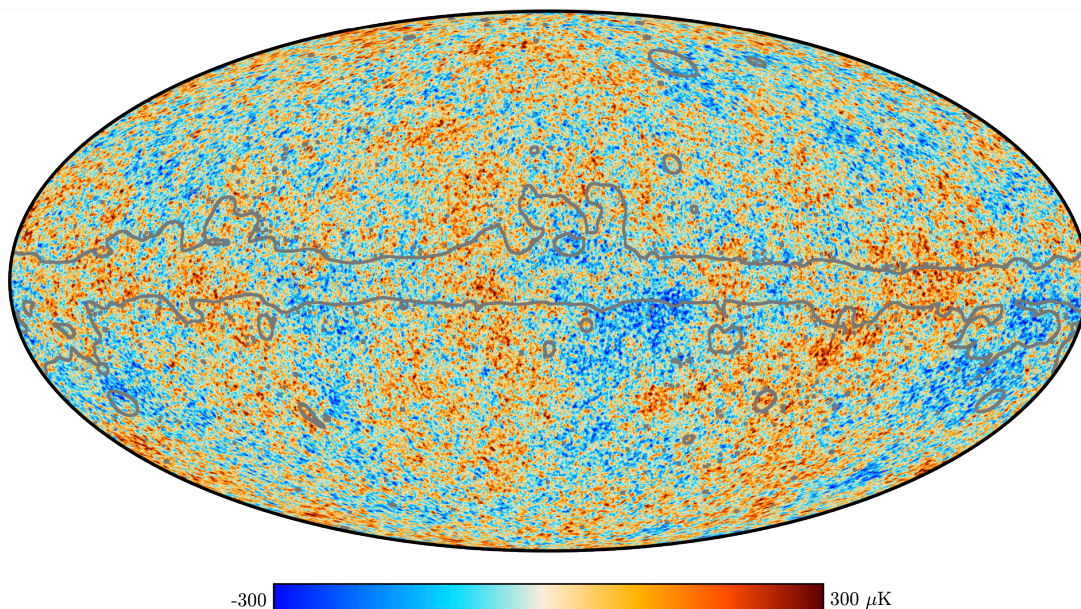


Figura 4: Anisotropía de la radiación del fondo de microondas en coordenadas galácticas medida con el observatorio espacial PLANCK. Bajo la imagen se muestra la escala del código de color de la imagen. A la imagen se superpone en gris el contorno de la emisión galáctica y otras emisiones del universo local que han sido debidamente eliminadas en el tratamiento de los datos.

Se estima que estos núcleos empezaron a captar sus electrones cuando la temperatura descendió hasta 3000 K por la expansión del universo. Hasta ese momento todo era esencialmente radiación, radiación atrapada en un universo ionizado. Pero, a esa temperatura la radiación escapó libremente tras desacoplarse electromagnéticamente de la materia. Eso fue hacia una edad de 380000 años, conocida como *Tiempo de Recombinación*. Desde entonces esa radiación viajó libremente y la hemos detectado como una radiación casi isotrópica de temperatura media de 2,73 K tras una expansión del universo de un factor 1100. La anisotropía de la *radiación del fondo de microondas* tiene lugar al nivel de 10^{-5} partes de la temperatura de radiación promedio. El estudio de esta ligera anisotropía es muy importante porque la distribución angular de esta anisotropía contiene información de las componentes del universo, no solo de la radiación.

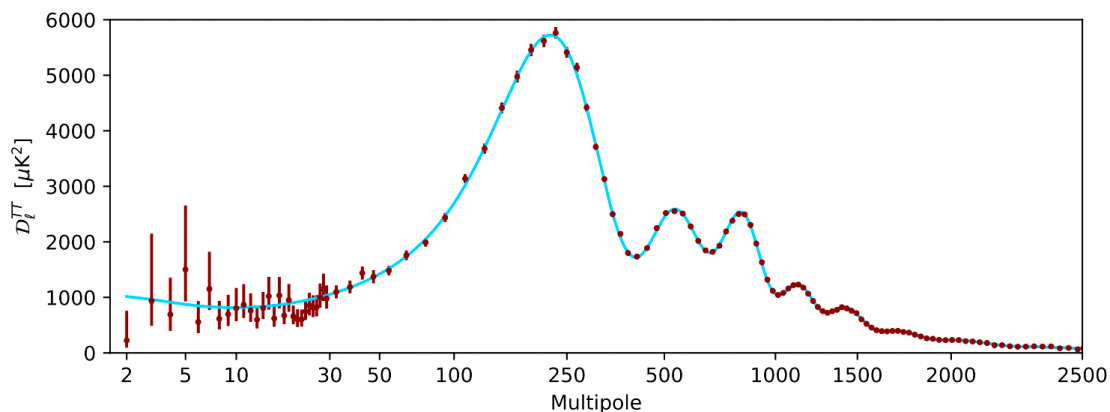


Figura 5: Espectro de potencia de la distribución angular de la anisotropía de la radiación del fondo de microondas.

La anisotropía de la *radiación del fondo de microondas* ha sido estudiada sucesivamente por los observatorios espaciales COBE, WMAP y PLANCK⁷. Estos observatorios han determinado el espectro de esa radiación con respecto a distintos tamaños angulares. Ese espectro muestra picos de intensidad a varias escalas angulares y su análisis viene a decirnos que el universo está compuesto de materia bariónica —la que se nos aparece brillante— en un 5%, de materia oscura en un 27%, y de energía oscura en un 68%. Y que juntos tienen la densidad crítica, la justa para hacer que ese universo no sea ni cerrado ni abierto sino plano, es decir Euclídeo.

La primera noticia de la existencia de materia oscura en los cúmulos de galaxias la dio un original y polémico astrónomo de nombre Fritz Zwicky en los años treinta de siglo pasado y se asentó en los años sesenta y setenta con los trabajos en el visible de Vera Rubin y Kent Ford, y luego de varios radioastrónomos, estudiando las curvas de rotación de las galaxias espirales. Vera le llamó materia oscura, y es buen nombre pues no sabemos todavía hoy nada de su naturaleza. Sólo sabemos que responde a la fuerza gravitatoria, pero que no interacciona de otro modo con el gas intergaláctico y que está en todos los halos de las galaxias y que probablemente hay entes astronómicos que solo sean de materia oscura. Nuestra ignorancia es tremenda considerando que hay 6 veces más de esa materia que de la materia ordinaria. También suponemos que se desacopló de la materia bariónica —si alguna vez estuvo acoplada— muy temprano en el universo, suficientemente temprano para no afectar a la nucleosíntesis primordial, que antes he mencionado.

⁷ El Cosmic Background Explorer (COBE) determinó sin lugar a dudas que la radiación del fondo de microondas es una radiación de cuerpo negro a 2,73K, como siempre se había sospechado a pesar de ciertos resultados previos en contra que resultaron ser incorrectos. COBE también descubrió las anisotropías al nivel de unas pocas partes por millón con una resolución angular de 7 grados. Ello les valió el Premio Nobel de 2006 a John Mather y George Smoot, investigadores principales del proyecto. El Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) estudió con 45 veces más sensibilidad y 33 veces más resolución angular que COBE esas anisotropías. El observatorio europeo PLANCK todavía mejoró más las prestaciones del WMAP utilizando 9 bandas de frecuencia en vez de las 5 de WMAP y una resolución de minutos de arco.

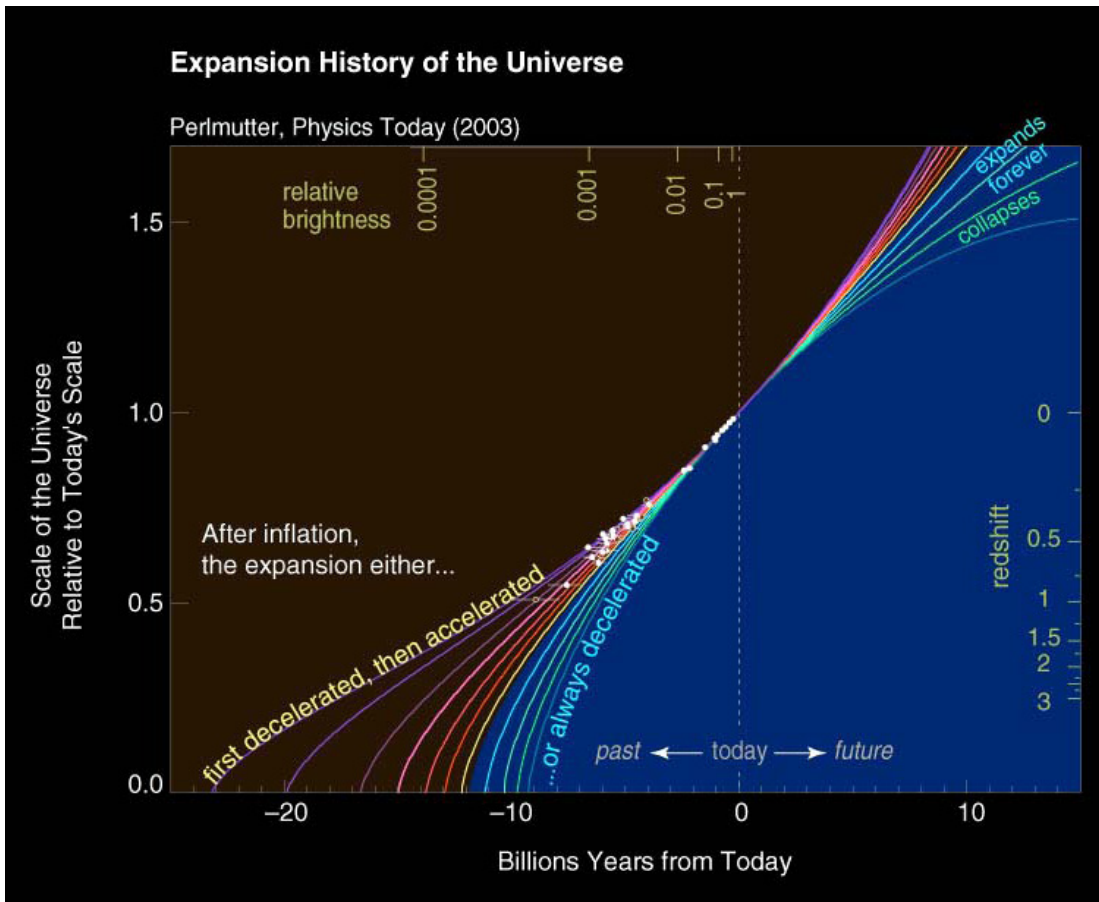


Figura 6: Los datos obtenidos por los grupos liderados por Brian Schmidt y Saul Perlmutter en 1998 comparados con las predicciones de distintos modelos teóricos de expansión del universo.

La primera noticia de la existencia de la energía oscura la dio nuestro académico extranjero Brian Schmidt y su equipo en enero de 1998. Los valores estimados de la composición del universo que he mencionado antes son los obtenidos con el observatorio PLANCK, el más reciente. Estos estimados concuerdan con los de Schmidt y otros obtenidos con supernovas del tipo Ia. Sin embargo, la determinación por estos dos métodos de la constante de Hubble, que mide la expansión del universo en primer orden relacionando la velocidad de recesión de las galaxias y la distancia a ellas, está en cierta tensión actualmente. El valor obtenido de las observaciones de la radiación del fondo de microondas ronda los $68 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, pero el valor obtenido con las supernovas de tipo Ia ronda los 73, con incertidumbres pequeñas en cada caso, de ahí la tensión. Hay quien piensa que quizás la medición de ese valor a través de las supernovas Ia tiene lugar en un espacio del universo con mayor velocidad de expansión que el resto, en una grandísima burbuja. Quien así piensa también concede más veracidad al resultado más global de la radiación del fondo de microondas. Las disputas actuales de Adam Riess, otro de los descubridores y premio Nobel, tienen un tono muy elevado con los que defienden la posición contraria.

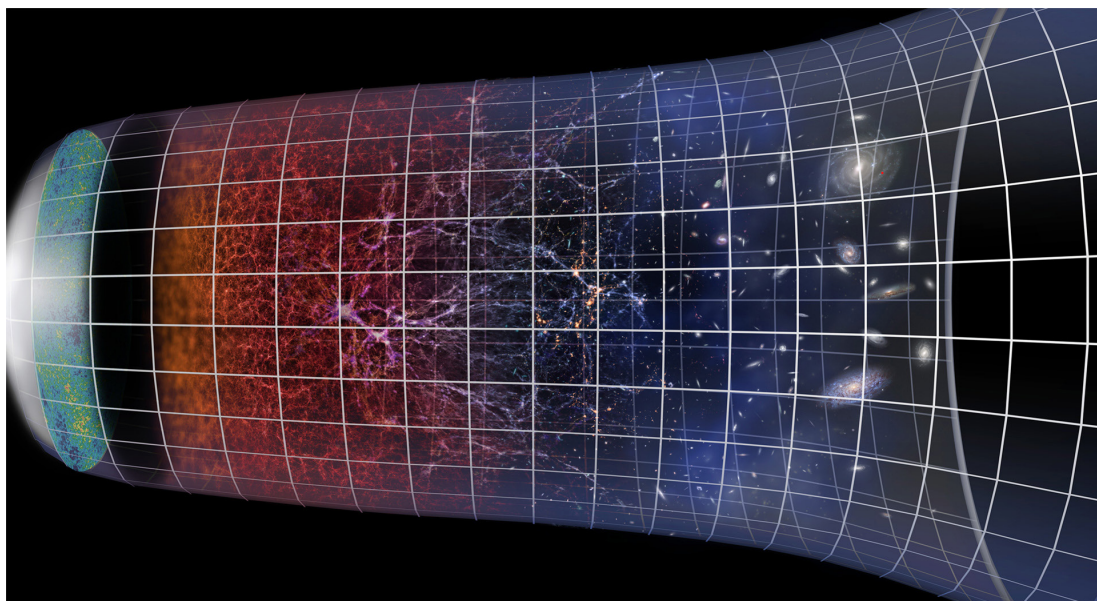


Figura 7: Emergencia de las estructuras del universo a partir del Big Bang (extremo izquierdo) hasta hoy (extremo derecho). Las estructuras de galaxias bien formadas se aprecian en la parte derecha. Las anisotropías de la radiación del fondo de microondas ocurrieron cuando el universo tenía unos 380000 años, en el momento conocido como Periodo de Recombinación y se muestran cerca del Big Bang en una coloración verdusca, seguida de un área oscura que corresponde al intervalo entre ese periodo y el periodo de formación de las primeras galaxias, entre 100 y 200 millones de años después del Big Bang, a lo que llamamos el Amanecer Cósmico.

Los estudios de los grupos liderados por Brian Schmidt y Saul Perlmutter encontraron para 1998 que el universo se expande aceleradamente⁸ y que para ello es necesaria una presión negativa similar, pero muchísimo más pequeña que la que se pudo dar en el periodo inflacionario y que es dominante desde aproximadamente la mitad de la edad del universo, es decir desde corrimientos al rojo alrededor de $z=0.6$. Esa energía oscura se puede caracterizar actualmente con una constante cosmológica, que volvería a ser el horror de Einstein, quien tras introducirla en sus ecuaciones la sacó rápidamente para que su universo fuera estable. Pero, no sabemos nada de su naturaleza y tampoco si es una constante realmente. ¿Podría ser un resto ínfimo, una ligera fuga, de aquello que suponemos que tuvo lugar en el periodo inflacionario, antes de 10^{-32} segundos? Podría. Las anisotropías de la radiación del fondo de microondas no tienen información directa de ello pues en el *Tiempo de Recombinación* esta energía oscura no jugaba un rol relevante ya que su densidad era baja en comparación con las densidades de radiación y materia. Su existencia a partir de las anisotropías se infiere para cerrar el universo con la densidad crítica correspondiente al universo plano. La estimación de la energía oscura a partir de la radiación del fondo de microondas aparece en el ajuste de un modelo de 6 parámetros libres al espectro de potencia de la radiación de fondo, a sus anisotropías.

⁸ Por ello recibieron el Premio Shaw en 2006 y el Premio Nobel en 2011 Adam Riess, Brian Schmidt y Saul Perlmutter.

Tras esta larga introducción les diré, queridos colegas y público, que el observatorio EUCLID está diseñado para dos cosas: intentar esclarecer la naturaleza de la energía oscura y ver si la estructura del universo es sólo compatible con la gravitación de Einstein o admite otras gravitaciones alternativas. Lo hará obteniendo imágenes de millones y millones de galaxias y estudiando los cúmulos de galaxias y los efectos que estos cúmulos tienen en la radiación que viene de las galaxias que están más lejos por efecto de lente gravitacional débil. Es bien sabido que vemos el fondo del universo, sus galaxias, deformado por el efecto lente gravitacional. Justamente haciendo de la necesidad virtud ese inconveniente se puede utilizar para estudiar la materia oscura y la energía oscura, algo en lo que los astrónomos cayeron en los años noventa.

Por otro lado, EUCLID tampoco estará solo en ese empeño. El observatorio Nancy Grace Roman Space Telescope⁹ (RST) de la NASA, que previsiblemente se lanzará en mayo de 2027, está diseñado para descubrir la naturaleza de la energía oscura, pero utilizando otra herramienta: los vestigios de las así llamadas *oscilaciones acústicas bariónicas* (BAO, por sus iniciales en inglés) por analogía a las oscilaciones acústicas de la radiación de fondo¹⁰. Sin embargo, no son propiamente oscilaciones acústicas sino cambios en la expansión de la materia bariónica a partir de las estructuras de materia bariónica resultante tras el Tiempo de Recombinación, cuando se desacoplan (salvo gravitacionalmente) la radiación y materia. Estas estructuras tienen tamaños característicos y todo ello deja una impronta en la distribución de galaxias. Las correlaciones espaciales entre las posiciones tridimensionales de las galaxias dadas por su posición angular y su corrimiento al rojo, permiten estudiar la historia de la evolución de estos BAO y así permite poner a prueba la hipótesis de una energía oscura en evolución.

Justamente, esta primavera la primera publicación de los resultados con el Dark Energy Survey Instrument (DESI)¹¹ han proporcionado indicios de posibles variaciones de la energía oscura durante la expansión del universo. Es un resultado 3 sigma y, por tanto, se debe considerar de momento tentativo con datos de 2 años de un programa que va a durar 5 años. Nuestro

⁹ El Nancy Grace Roman Space Telescope (RST) será un observatorio espacial con un telescopio de 2.4 metros de diámetro que proporcionará imágenes comparables a las del observatorio espacial Hubble pero a una velocidad mil veces superior y en el rango espectral infrarrojo cercano. Ello permitirá observar las supernovas de tipo Ia hasta corrimientos al rojo muy altos, lo cual a su vez permitirá estudiar la posible variabilidad de la energía oscura con la edad del universo.

¹⁰ Hay un tamaño característico impreso en los cúmulos de galaxias (y cúasares) debido a ondas de presión que se propagaban en el fluido acoplado de bariones y fotones en el universo antes del Tiempo de Recombinación debido al horizonte de las ondas de sonido. Para corrimientos al rojo menores que aproximadamente 1060 las ondas de presión ya no se propagaban porque los fotones ya no arrastraban a los bariones como lo hacían antes de la recombinación. Ese tamaño característico se puede estimar y por otro lado el tamaño transversal y longitudinal (con respecto a la línea del observador) de los cúmulos se puede medir en función del corrimiento al rojo.

¹¹ DESI es un instrumento muy singular instalado en el telescopio Mayall de 4 metros de diámetro en Arizona, EE.UU., que permite robóticamente posicionar 5000 fibras ópticas sobre otras tantas galaxias objeto en el plano focal y tomar sus espectros simultáneamente sobre 8 grados cuadrados. El programa espera estudiar un tercio de la esfera celeste durante 5 años. Con la determinación del corrimiento al rojo de las galaxias (y cúasares) y sus posiciones angulares se puede obtener una distribución tridimensional precisa de los objetos. Ello permite estudiar correlaciones entre objetos de distintos cúmulos de galaxias y cúasares. Es a partir de esas correlaciones, de mediciones de la extensión de los cúmulos, de alguna información previa de tipo teórico sobre los BAO y del modelo estándar de materia oscura fría (Cold Dark Matter model, CDM) que se puede estudiar, entre otras cosas, la historia de la energía oscura.

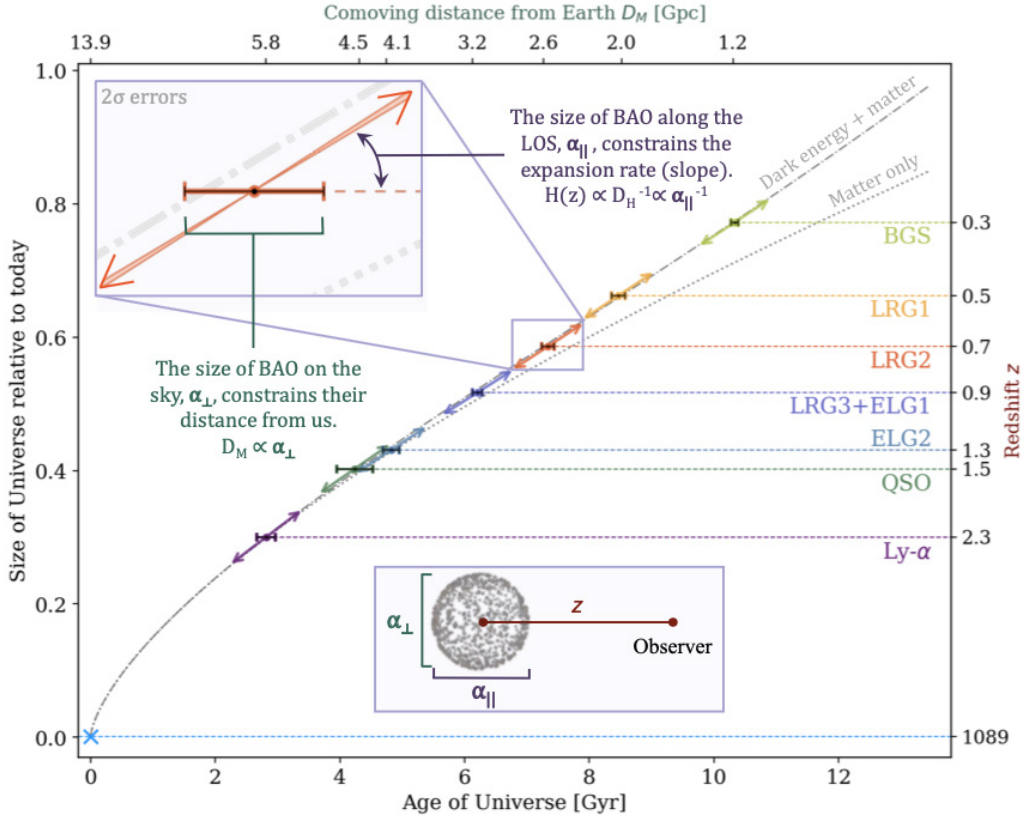


Figura 8. Historia de la expansión del universo. Las mediciones de los tamaños de cúmulos de galaxias y cuásares proporcionan en el esquema de los BAO evidencia de expansión acelerada del universo por la energía oscura. La posible evolución de la energía oscura no se puede observar en este gráfico de arXiv:2503.14738v2.



Figura 9. Vista del Observatorio Vera Rubin en Cerro Pachón, Chile.

académico correspondiente Juan García-Bellido es parte de ese numeroso grupo de investigadores y, a buen seguro, dentro de unos años nos informará con más detalle y certeza que lo puedo hacer yo hoy. Por otro lado, el Roman Space Telescope tiene un espejo de un tamaño como el Hubble y obtendrá imágenes de la calidad del Hubble en mil veces menos tiempo, con lo que probablemente hará una determinación más significativa que DESI.

Asimismo, este verano ha entrado en funcionamiento el Observatorio Vera Rubin en Cerro Pachón, Chile, un observatorio público-privado con espíritu de hacer públicos los datos a todo el mundo, profesionales y aficionados, de modo inmediato y de crear un legado con datos de 10 años de operación. Este original telescopio, que inició su diseño hace 25 años (es el tiempo característico de todos los proyectos) con donaciones de algunos millonarios de Microsoft, va a cartografiar cada pocos días todo el hemisferio sur y va a estudiar las supernovas de tipo Ia hasta altos corrimientos al rojo también con el objeto de determinar la expansión acelerada del universo sobre un gran rango de distancias para con ello poder entender la naturaleza de la energía oscura. Con su primario de 8.4 metros de diámetro y su revolucionaria y gigantesca cámara LSST, acrónimo de Legacy Survey of Space and Time, que proporciona imágenes con 3.2 gigapíxeles cada 15 segundos con un campo visual equivalente al ángulo sólido de 40 lunas llenas, podemos estar en vísperas de hallazgos muy importantes.

En realidad, me he saltado una parte conceptual interesante. Veámosla, aunque me repita un poco. Podríamos decir que la estructura del universo está bastante más determinada por la

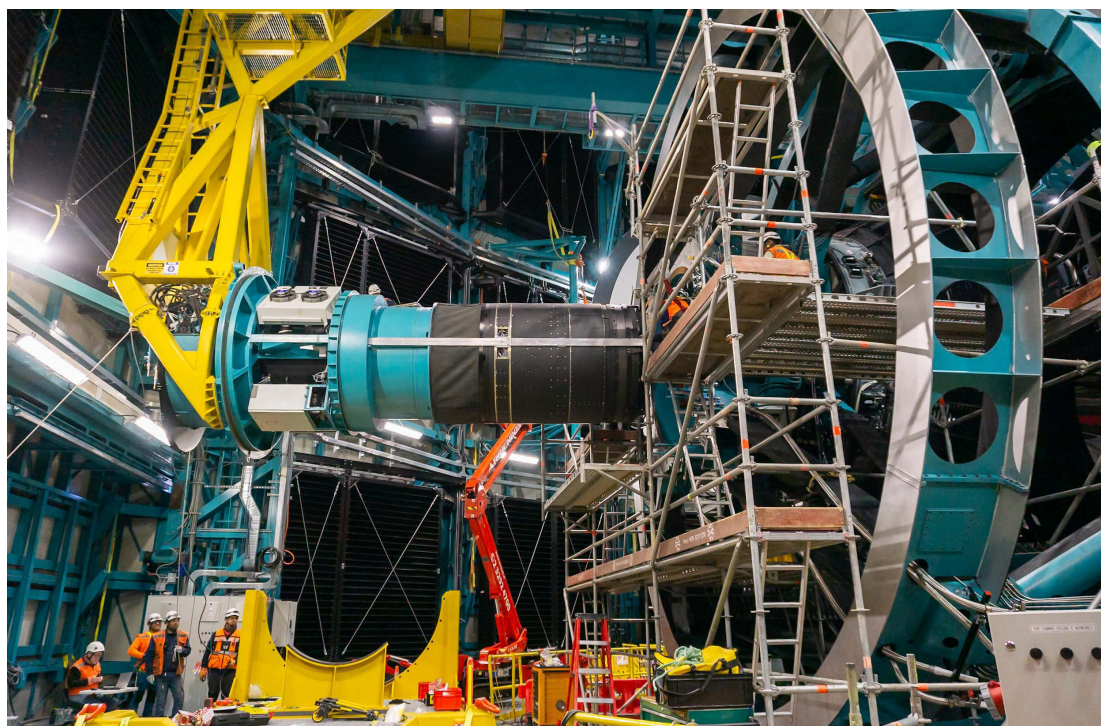


Figura 10. Cámara LSST instalada en el telescopio Simonyi del Observatorio Vera Rubin. Es la mayor del mundo con 3.2 gigapíxeles y produce imágenes de un campo visual de 8 grados cuadrados, equivalente a 40 lunas llenas.

materia oscura que por la materia ordinaria. El hecho de que las proporciones determinadas observacionalmente de los productos de la nucleosíntesis primordial se obtengan exclusivamente de la evolución de la materia ordinaria nos hace pensar que ésta no estaba acoplada a la materia oscura en esos momentos, a pesar de que ambas debieron ser productos del final del periodo inflacionario. Muy probablemente la materia oscura, que repito responde únicamente a la gravedad, siguió desde el principio su propio camino en la expansión del universo y formó sus propias nubes, grandes y pequeñas, con sus respectivos pozos de potencial gravitatorio. Luego, estos halos de materia oscura debieron ir captando gas, materia ordinaria e incluso galaxias. Por la fricción gravitatoria esas galaxias debieron de caer hacia el centro del pozo de potencial. Esto concuerda con lo que vemos: galaxias muy masivas en el centro de ricos cúmulos de galaxias. Galaxias que en sus interacciones han ido dando lugar cada vez a galaxias más grandes y aportando los agujeros negros masivos de sus centros a esas nuevas galaxias que por ello tienen agujeros negros cada vez más masivos.



Figura 11: Galaxias espirales interactuando. Cada una de ellas tiene un agujero negro supermasivo en el centro. Probablemente la interacción tiene lugar en presencia de, y condicionada por, materia oscura.

Parémonos un momento a considerar lo que hacen las estrellas que se forman en las galaxias. Las estrellas inicialmente están compuestas de hidrógeno, helio y poco más. Ese poco más de todos los elementos que pueda haber en una estrella es la metalicidad en la jerga astronómica. En las primeras estrellas esa metalicidad era casi nula y sus masas podían ser de cientos de masas solares. Por tanto, su evolución debió de ser muy rápida, de cientos de miles de años, explotando en supernovas y dejando en su centro agujeros negros estelares (es más, las estrellas de metalicidad casi nula que tuvieran más de 260 masas solares implosionarían directamente a un agujero negro según estudios teóricos actuales). Como el volumen del universo en ese periodo era relativamente pequeño, estos agujeros negros que se tuvieron que dar frecuentemente tenían grandes oportunidades de interactuar y, tras una coalescencia, dar lugar a agujeros negros todavía más masivos. De esta manera los cosmólogos piensan que el crecimiento de las galaxias y de los agujeros negros masivos en su centro fue muy sincronizado y que ante la demostrada correlación que hay desde hace décadas entre la masa del agujero negro galáctico y la masa del bulbo de las galaxias no tiene sentido plantearse si antes fue el huevo o la gallina. Ambas crecieron de modo síncrono.

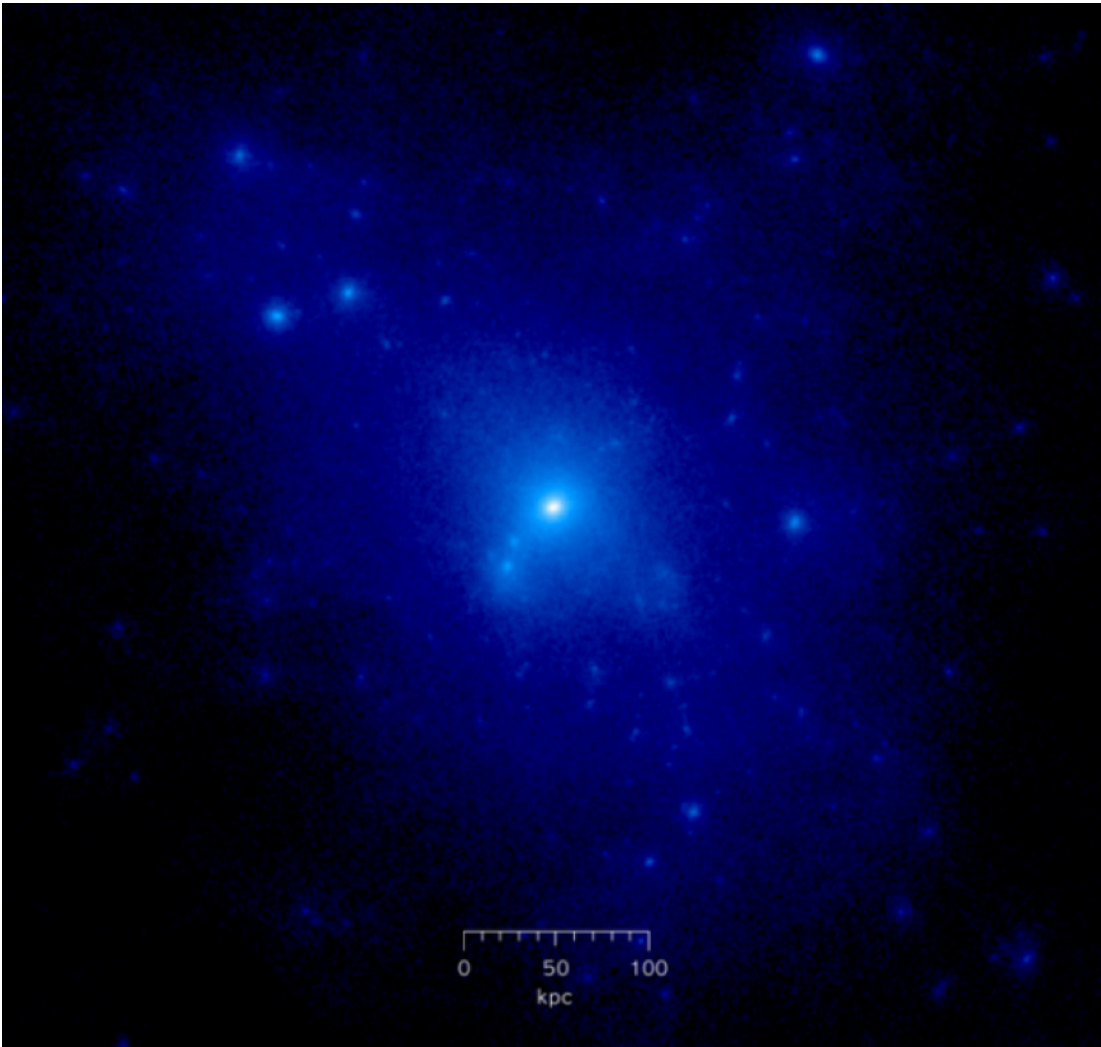


Figura 12: Imagen de un gran halo de materia oscura fagocitando otros halos menores de materia oscura. La imagen está obtenida en una simulación numérica cosmológica. Los halos contienen una galaxia masiva central y varias galaxias satélite (puntos brillantes) en un gas intergaláctico (luz difusa). Aunque la materia oscura es invisible, es la que produce la mayor parte del potencial gravitatorio de las estructuras mostradas en la imagen.

Esas estrellas muy masivas y de poca o nula metalicidad que se tuvieron que dar en los tiempos más tempranos del universo las etiquetamos como Población III, mientras que las estrellas de nuestro entorno cósmico actual que tienen metalicidades más altas, digamos entre 2 y 4%, las etiquetamos como Población I. Las de Población I son estrellas que se forman sobre los materiales lanzados al espacio por estrellas anteriores cuando mueren como supernovas. Porque ese es el sino y el gran servicio de las estrellas: vivir creando los elementos químicos como hornos químicos y morir en supernovas lanzando estos nuevos elementos químicos al espacio interestelar para que otra generación haga lo mismo y la metalicidad aumente cada vez. Claro está —pero no me voy a detener ahora en ello— que muchas veces, quizás casi

siempre, a la vez que se forman estrellas se forman planetas en su entorno. Desde 1995 que nuestros académicos Michel Mayor y Didier Queloz descubrieron el primer exoplaneta¹², ya se han detectado más de 10000 exoplanetas y más de 6000 están confirmados y caracterizados en 4500 sistemas planetarios. La búsqueda y caracterización sigue a buen ritmo con el proyecto del observatorio espacial CHEOPS liderado por Queloz.

Hay ahora otro observatorio en órbita, el James Webb Space Telescope (JWST) con dos grandes objetivos. Uno de los grandes objetivos de ese observatorio espacial infrarrojo con un espejo primario segmentado de 6.5 metros de diámetro, sucesor aventajado del observatorio Hubble operando en el infrarrojo, es precisamente el de buscar evidencia de signos de posibles antecedentes a la vida en exoplanetas. Ya, anteriormente al lanzamiento del JWST, se habían detectado líneas de absorción de diversas moléculas, como el agua, en las atmósferas de varios exoplanetas, pero todavía no se han podido detectar vestigios de moléculas pre-bióticas en las atmósferas de los exoplanetas. El segundo objetivo importante del JWST es estudiar el universo en tiempos remotos. Los resultados más recientes del James Webb Space Telescope

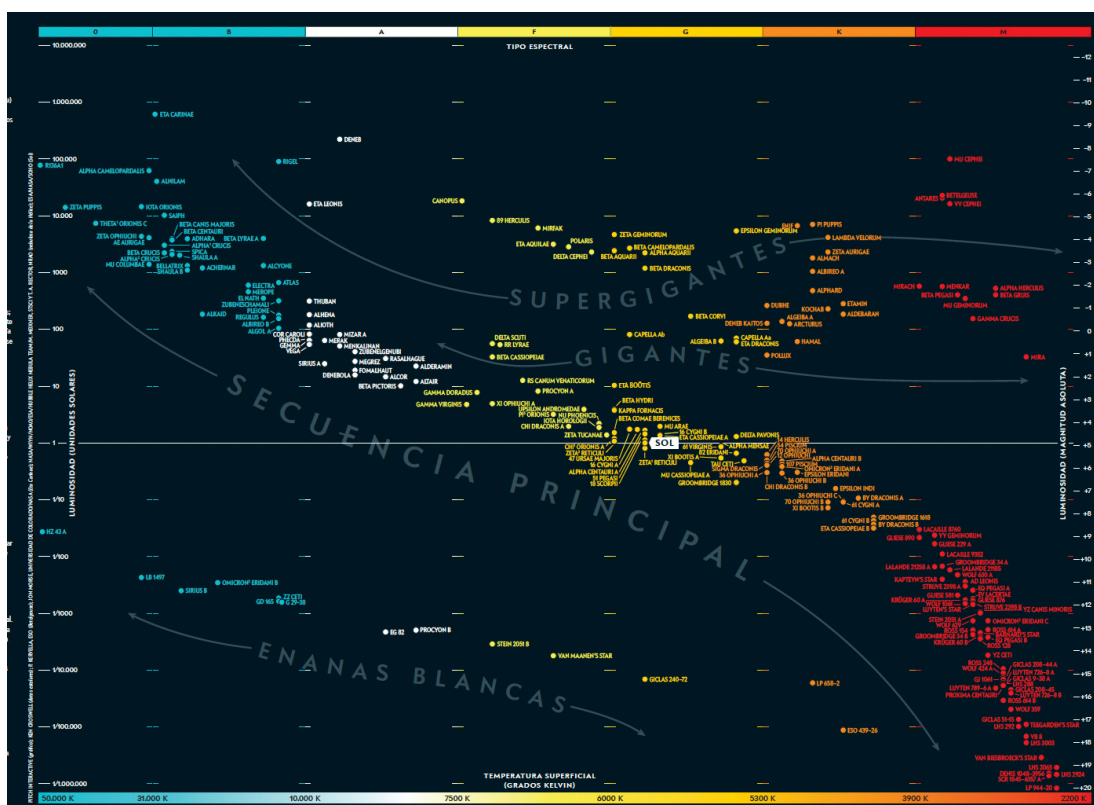


Figura 13: Diagrama de Hertzsprung-Russell (HR). Muestra los lugares comunes de estrellas de secuencia principal, estrellas gigantes, estrellas supergigantes y enanas blancas, cada una en su color (debido a la temperatura superficial) en función de su masa (en secuencia principal) y de su evolución (en las demás).

¹² Michel Mayor y Didier Queloz recibieron el Premio Nobel 2019 por su descubrimiento y son miembros extranjeros de la RAC como los otros premios Nobel Brian Schmidt y Reinhard Genzel.

muestran que ya hay galaxias bien formadas a corrimientos al rojo de casi $z=15$ (edad del universo 300 millones de años) y que las galaxias son más grandes de lo esperado hasta ahora por los astrónomos. Pero, tampoco se han podido detectar hasta hoy, que yo sepa, estrellas de Población III en esos tiempos remotos. Es evidente que el estudio de los exoplanetas y el del universo remoto se profundizará enormemente con la disponibilidad de telescopios como el gigante ELT o el SKA.

He dicho que las estrellas mueren en forma de supernovas, pero no siempre es así. Las estrellas de secuencia principal, es decir aquellas que se forman a partir de las nubes del medio interestelar y que ocupan un lugar común en el diagrama de Hertzsprung-Russell, cuando no tienen más de 8 masas solares no explotan como supernovas, sino que acaban su vida perdiendo su envoltura y dejando su parte más interior en forma de estrella enana blanca. Una enana blanca es un gas de electrones degenerado de Fermi. Cuando la masa de una enana blanca sobrepasa la masa de Chandrasekhar, 1.4 masas solares, por ejemplo, por acreción de masa a partir de una estrella compañera, la enana blanca da lugar a una explosión termonuclear y entonces sí resulta en una supernova de tipo Ia. Las supernovas de tipo Ia no son todas igualmente brillantes, pero una propiedad de su curva de luz permite normalizarlas a un brillo constante. Y por eso sirven como candelas estándar para medir distancias en el universo.

Las estrellas muy masivas en secuencia principal dan lugar a supernovas de colapso gravitacional en su evolución natural. La parte no-nuclear de la estrella sale al exterior expulsada a velocidades típicas de 20000 km s^{-1} y el núcleo colapsa a un agujero negro o a una estrella de neutrones. Cuando las estrellas son muy masivas, digamos cientos de masas solares, tienen otros mecanismos de explosión e implosión según sus masas.

¿Entendemos bien la formación estelar y la evolución estelar? Sí y no. El estudio de la formación de estrellas masivas a partir del medio interestelar es muy incompleto y su evolución hacia supergigantes y supernovas tampoco es completo, pues las oportunidades de estudio con alta resolución angular son raras en nuestro entorno cercano.

Al otro extremo de lo que llamamos la secuencia principal en el diagrama de Hertzsprung-Russell están las estrellas de baja masa que ahora las agrupamos bajo la denominación de estrellas enanas ultrafrías para incluir las enanas marrones, que no son propiamente estrellas pues no tienen reacciones nucleares sostenidas en su centro. Enanas marrones, por cierto, co-descubiertas hace 30 años por un equipo español del Instituto de Astrofísica de Canarias, IAC, liderado por nuestro académico Rafael Rebolo. Las enanas marrones están bajo intenso escrutinio y en ellas hemos descubierto recientemente cinturones de radiación¹³ y emisiones aurorales¹⁴ parecidas a las de los planetas gigantes como Júpiter. Muchas de las estrellas como el Sol y las de baja masa, incluyendo enanas marrones, tienen exoplanetas.

¹³ J.B.Climent, J.C.Guirado, M.A.Torres, J.M.Marcaide, L.Peña-Moñino, *Science*, 381, pp1120-1124 (2023)

¹⁴ J.C.Guirado, J.B.Climent, J.D.Bergasa, M.A.Torres, J.M.Marcaide, L.Peña-Moñino, *Astrophysical Journal* 987_7 (2025 July 1)

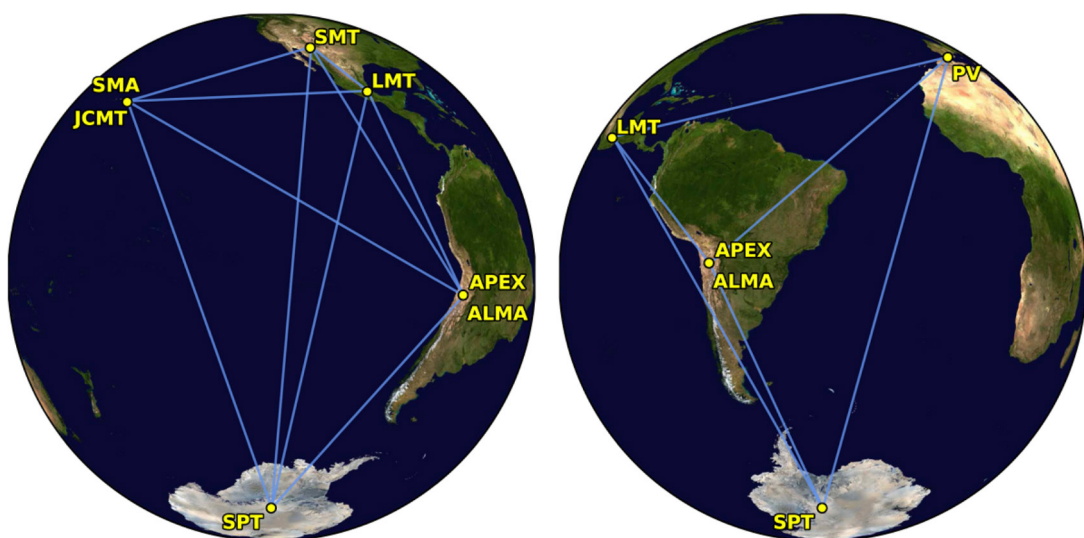


Figura 14: Red interferométrica Event Horizon Telescope capaz de funcionar a longitudes de onda ligeramente por encima y debajo de 1mm para poder cartografiar los agujeros negros M87* y SgrA*.

¿Está ahí la naturaleza esperando a que miremos y la descubramos? Muchas veces sí, pero no siempre. Hay erupciones de diversa índole, fenómenos variables, supernovas, etc. que tienen lugar de modo imprevisible. Por ejemplo, el equipamiento futuro no va a mejorar mucho para estudiar la evolución de las estructuras de las supernovas extragalácticas. La Tierra tiene un tamaño finito, la emisión tiene lugar en ondas centimétricas y la difracción limita la resolución obtenible. Por ejemplo, en los últimos 30 años no ha habido otro caso de estudio tan favorable como el de la supernova 1993J que en mi grupo pudimos estudiar durante 15 años. La nueva instrumentación no mejora mucho nuestras posibilidades.

Esa limitación también estaba ahí para el estudio de los agujeros negros del centro galáctico y de la radiogalaxia Virgo A, M87 en la nomenclatura visible. Pero aquí sí se ha podido buscar una solución elevando la prestación a radiofrecuencias altísimas (1,35 mm de longitud de onda) para una red de radiotelescopios diseñados en parte de modo *ad hoc*: el Event Horizon Telescope, EHT. Con datos adquiridos en abril de 2017 se han obtenido imágenes en abril de 2019 del agujero negro supermasivo ($6 \cdot 10^9$ masas solares) en M87 y en mayo de 2022 del agujero negro en nuestra galaxia (4 millones de masas solares). Incluso se han obtenido posteriormente imágenes de sus emisiones polarizadas que ha permitido entender la estructura de los campos magnéticos en el entorno de los agujeros negros. Por cierto, que también aquí las contribuciones de varios españoles (cercanos a mí, lo que es un gran orgullo) ha sido sobresaliente y en un caso esencial. Pero, para el futuro, quizás el recorrido no sea muy grande pues no hay otros agujeros negros supermasivos tan favorables para el estudio y la mejora en resolución y sensibilidad instrumental está acotada quizás a un factor 3 o 5. Me gustaría estar equivocado.

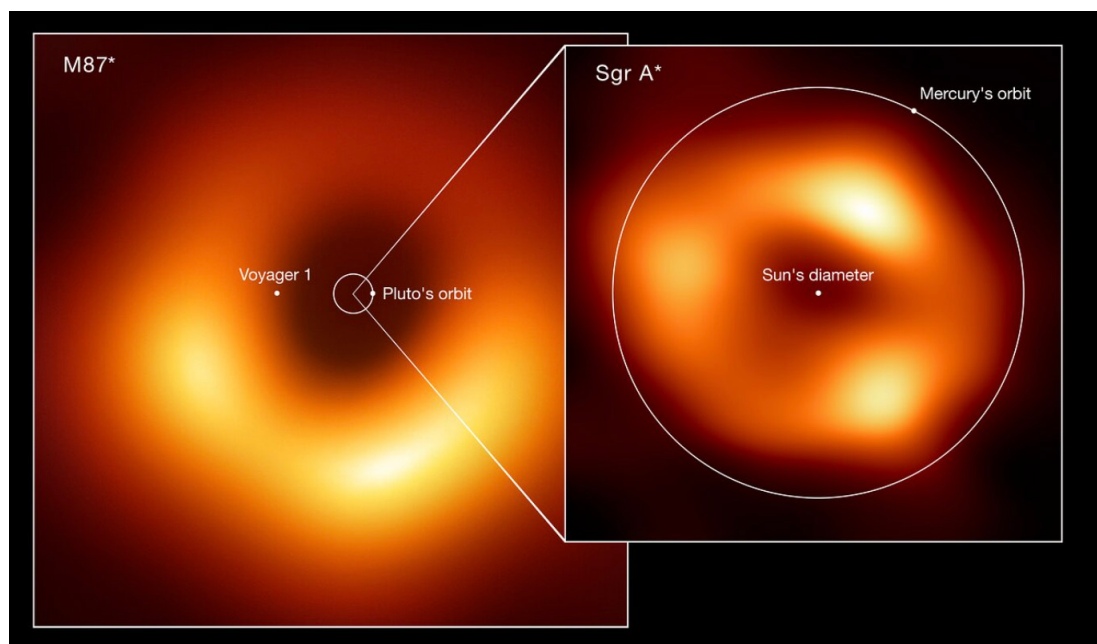


Figura 15: Radio imágenes comparadas de los agujeros negros supermasivos en la galaxia M87 (izquierda) y en nuestra Galaxia (derecha) obtenidas con una resolución angular de 25 microsegundos de arco por el interferómetro Event Horizon Telescope con observaciones realizadas en abril de 2017. Las imágenes están obtenidas en intensidad total. A partir de 2024 se han publicado imágenes en emisión polarizada.

Sin duda el descubrimiento mas relevante de los últimos años fue la detección de las ondas gravitacionales. En este momento el número de eventos detectados ronda el centenar. Estas ondas gravitacionales producidas en eventos muy lejanos debido a la coalescencia de agujeros negros en uno mayor, o de estrellas de neutrones en agujero negro o agujero negro y estrella de neutrones en agujero negro, nos llegan tras un largo viaje alterando el espacio, no viajando por un espacio rígido sino modulándolo, encogiendolo y estirándolo, claro está de modo imperceptible para nosotros, pero no para los interferómetros LIGO¹⁵ y semejantes. Este extraordinario descubrimiento de 2015 mereció de inmediato el Premio Nobel de 2017 concedido a Rainer Weiss, Kip Thorne y Barry Barish, este último también académico extranjero de la RAC. También en el equipo descubridor muy numeroso había españoles, en concreto de la Universidad de las Islas Baleares.

¹⁵ El Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) consta de dos instrumentos idénticos, uno en Hanford, Estado de Washington, EE.UU., y el otro en Livingston, Estado de Luisiana, EE.UU. Cada instrumento es un interferómetro de Michelson con brazos de 4 km de largo y detectores ultrasensibles capaces de detectar un desplazamiento de una diezmilésima parte del tamaño de un protón. Para la detección de una onda gravitacional ambos instrumentos lo han de detectar con un retraso que depende de la distancia entre los instrumentos y la dirección de llegada de la onda gravitacional.

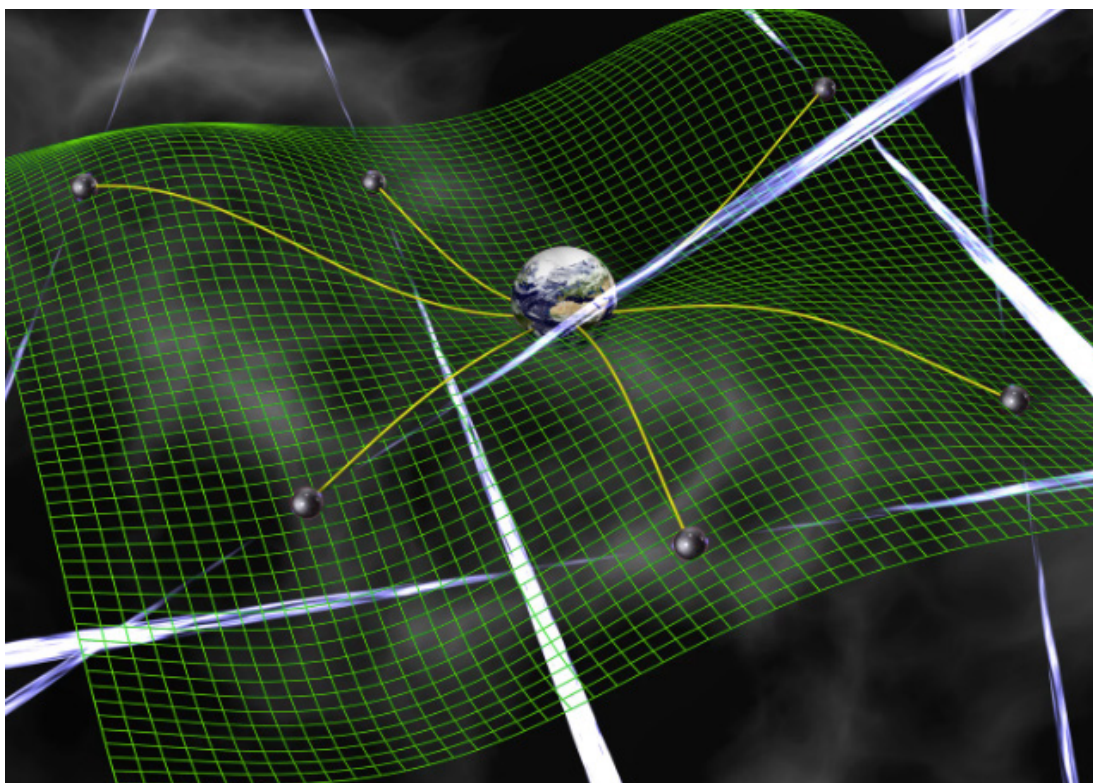


Figura 16. En la figura se representa en cuadrícula el espacio Euclídeo distorsionado (exagerando la distorsión) por el paso de una onda gravitacional. En ese espacio se encuentran varios púlsares que emiten en chorros muy estrechos con una pulsación muy precisa relacionada con la rotación de la estrella de neutrones. Al paso de la onda gravitacional los púlsares pueden cambiar casi imperceptiblemente el momento de la pulsación. La comparación de esos cambios medidos en los radiotelescopios terrestres y correlacionados entre distintos púlsares daría lugar a la detección y determinación de la dirección del objeto emisor de las ondas gravitacionales. Todavía no ha habido ninguna detección con este instrumento que conceptualmente es equivalente a un interferómetro de tamaño galáctico y es particularmente sensible a longitudes de onda muy largas. Figura cortesía de la Max Planck Gesellschaft.

Con la detección de las ondas gravitacionales tenemos evidencia de que todo el espacio está siendo alterado continuamente. Con púlsares, que actuarán como boyas en el espacio, como sensores en distintos lugares del espacio, emitiendo pulsos con precisión cuasi-atómica, podremos dentro de no mucho determinar mucho mejor los parámetros y la dirección de los emisores de ondas gravitacionales. Esta red de púlsares de periodos de milisegundos con pulsos extremadamente precisos observados desde cuatro centros de la Tierra formando una red conocida como el International Pulsar Timing Array¹⁶ es especialmente sensible a longitudes de onda de

¹⁶ El Pulsar Timing Array (PTA) consta de radiotelescopios capaces de medir con gran precisión temporal los pulsos que se reciben de los púlsares con periodos temporales de milisegundos debido a la rotación de la estrella de neutrones. El PTA monitoriza la emisión de unos 60 milisecond-pulsars en busca de variaciones en la llegada de esos pulsos debidas al paso de una onda gravitacional. Si se diera ese paso de una onda gravitacional las variaciones estarían retrasadas o adelantadas contra una emisión que actuaría de referencia. Es decir, la variaciones estarían correlacionadas. EL PTA es como un interferómetro de tamaño galáctico especialmente sensible a longitudes de onda muy largas correspondientes a frecuencias de nanohercios.

nanohercios de las ondas gravitacionales. También, de ese modo y con una previsible mejora en la sensibilidad de los instrumentos como LIGO, o con el Einstein Telescope dentro de unos 10 años, podremos detectar ondas gravitacionales todavía inéditas, originadas en supernovas y otros eventos cataclísmicos. Larga vida a esta ciencia del nuevo mensajero, el primero fuera del espectro electromagnético. Esa nueva ciencia se complementará con la información que se podrá obtener de manera cuasi-simultánea en el rango de radio, visible, ultravioleta, rayos X, etc.

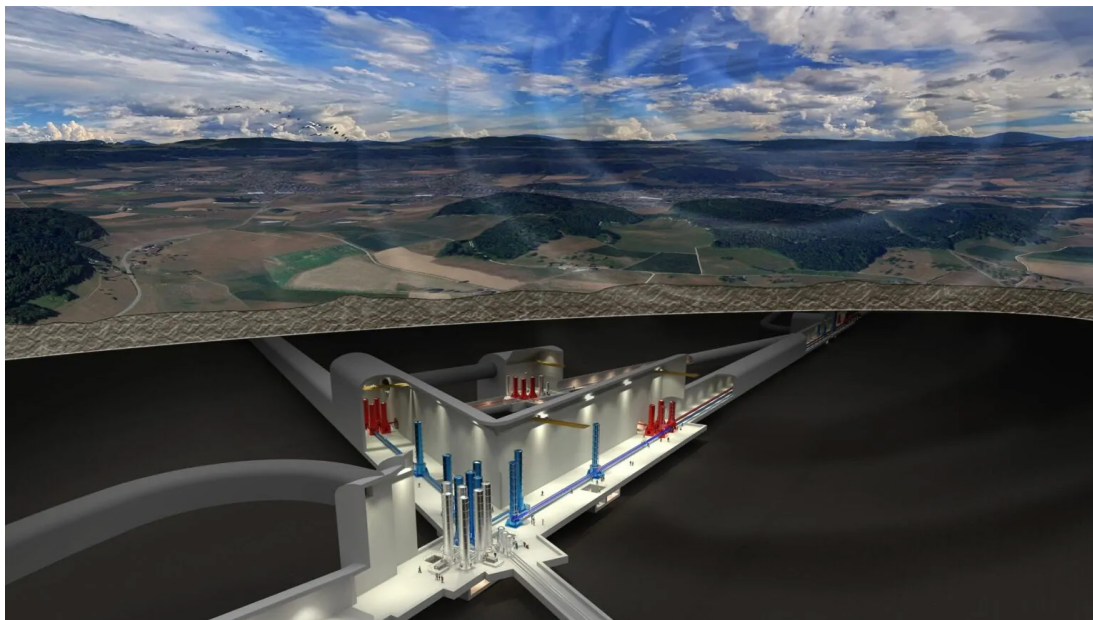


Figura 17: Concepción del Einstein Telescope ahora en estudio: tres detectores en los vértices de un triángulo equilátero de 10 km de lado, situado a unos 300 metros bajo tierra, con cada vértice en Alemania, Bélgica y Holanda, respectivamente. Será operacional previsiblemente hacia 2035.

He mencionado al principio que el Extremely Large Telescope se apoyará en otros radiotelescopios como el Square Kilometre Array¹⁷ para sus investigaciones. El Extremely Large Telescope con los casi 40 metros de diámetro de su espejo primario segmentado en casi 800 espejos es un Leviatán que no se eleva en el mar, sino que estará anclado a tierra firme a gran altitud en una colina del desierto más seco de la Tierra. Eso, con la ayuda de alguna imagen, es fácil de comprender, pero lo es menos el que un radiointerferómetro de un área colectora de un kilómetro cuadrado esté parte de él en Sudáfrica y otra parte en un desierto cerca de la costa oeste de Australia. En ambos emplazamientos ha habido instrumentos precursores y la construcción se hace en dos fases, la primera de la cual estará lista en dos años.

¹⁷ El Square Kilometre Array (SKA) es un radiointerferómetro en construcción compuesto de miles de antenas que pueden funcionar como un radiotelescopio único en un rango continuo de frecuencias entre 50 MHz y 15 GHz, es decir con longitudes de onda entre 600 y 2 cm. Su parte de baja frecuencia estará instalada en la costa oeste de Australia y la parte de frecuencia más alta lo estará en un altiplano a 1000 metros en Sudáfrica. Para cubrir todas las frecuencias en ese enorme rango constará de miles de unidades (radiotelescopios) de diversos tamaños y características. La fase 1 del proyecto se completará hacia 2028.



Figura 18. La complejidad de un instrumento como el Square Kilometre Array (SKA), ahora en construcción, con radiotelescopios en dos continentes y con enormes rangos de longitudes de onda en su funcionamiento es difícil de captar en una sola imagen. Aquí se muestra un montaje de parte de los interferómetros en Sudáfrica (izquierda) y Australia (derecha).

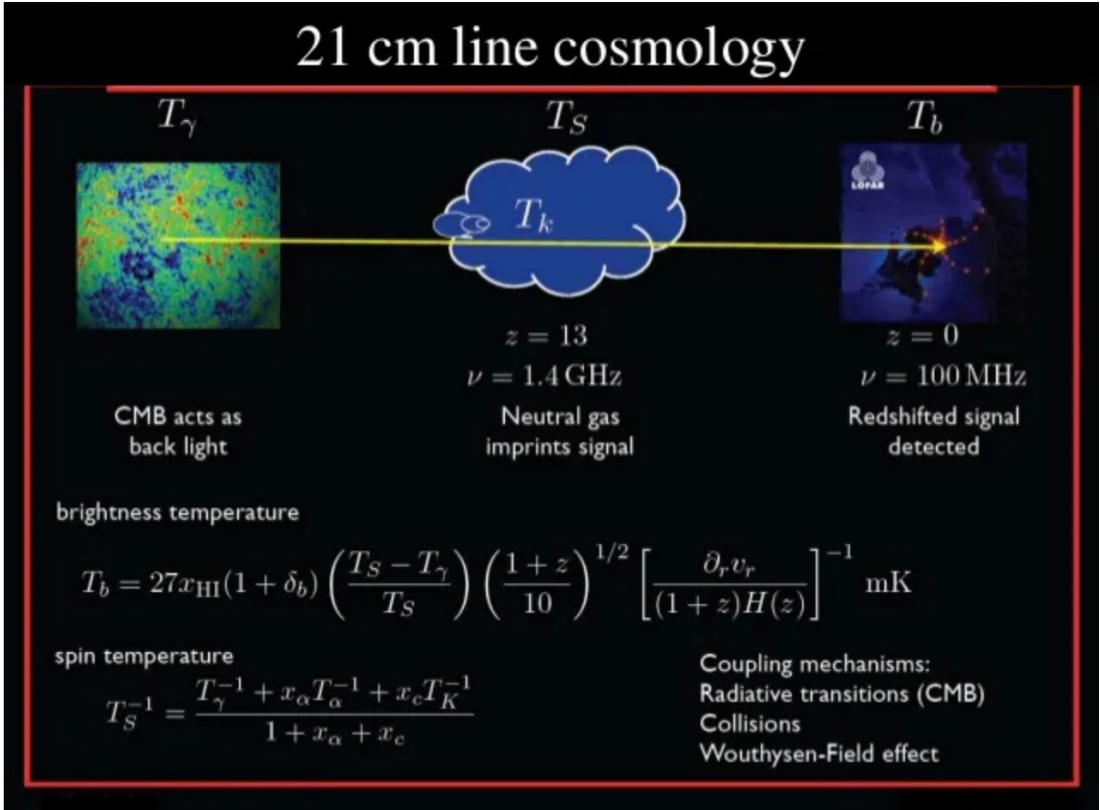


Figura 19. Esquema de cómo se puede hacer cosmología con la línea hiperfina del hidrógeno neutro.

El SKA tendrá impacto en casi todas las áreas astronómicas. La idea de construirlo se originó con una pregunta sencilla: “¿Qué área colectora ha de tener un radiotelescopio para poder estudiar la historia del universo con su constituyente más abundante, el hidrógeno?”. Hay hidrógeno desde el Amanecer Cósmico y se puede ver ese hidrógeno utilizando la transición hiperfina¹⁸ del átomo de hidrógeno neutro, que se conoce como HI en la jerga astronómica y que tiene lugar a 1420 MHz. Por la expansión del universo esta línea en reposo se enrojece, pues por cada corrimiento al rojo z su frecuencia se reduce por el factor $(1+z)$ y la longitud se alarga a $21(1+z)$ cm. Sintonizando esa línea a distintas frecuencias, es decir a distintos corrimientos al rojo, se puede hacer una especie de tomografía del universo desde tiempos presentes hasta tiempos en los que se formaron las primeras estrellas, el Amanecer Cósmico, cuando el universo tenía solo 100 o 200 millones de años. Se podrá cartografiar la estructura de la emisión del hidrógeno neutro durante la era de formación de las primeras galaxias entre 200 y cerca de 1000 millones de años.

En efecto, quizás lo más singular del SKA será cartografiar en hidrógeno neutro el periodo entre 100 y 800 millones de años de edad del universo, correspondientes a $z=30$ y $z=15$, respectivamente. Es decir, desde el Amanecer Cósmico en el que se empiezan a formar las primeras estrellas y el hidrógeno está a una temperatura de unos 100 K al *Periodo de Reionización* en el que el hidrógeno está a unos 1000 K e ionizado y cubriendo grandes extensiones por solapamientos de las distintas zonas ionizadas por las primeras estrellas. Esta parte alrededor del Amanecer Cósmico no es asequible con otros instrumentos y será esencial para reconstruir la historia inicial del universo. Para estudiar esa parte el SKA contará con interferómetros operando longitudes de onda muy largas de entre 3 y 6 metros, cien veces más largas que las habituales en radioastronomía o telecomunicaciones.

Como otros proyectos, pero de distinta manera, SKA explorará la evolución de las galaxias a lo largo de 13600 millones de años utilizando la línea del hidrógeno y otras. Pero también estudiará como ningún otro instrumento los lejanos Estallidos de Rayos Gamma por su emisión radio y los Estallidos Rápidos de Radio y el plasma que interviene en la transmisión de esas ondas de radio. Y no menos la formación de supercúmulos de estrellas cuando el universo tenía cientos de millones de años. No voy a abundar en esto.

Por otro lado, ese instrumento SKA, permitirá estudiar la Relatividad General en condiciones de un campo fuerte, algo único, utilizando púlsares alrededor del agujero negro en nuestra galaxia como sensores. Los púlsares de periodo de rotación de milisegundos se comportan como precisos relojes atómicos. Solo se han encontrado 6 de estos púlsares en el entorno del agujero negro SgrA* a fecha de hoy, lo que es un misterio porque se estima que hay un millar. Los efectos del agujero negro sobre estos cuerpos celestes de inmensas densidades (masas como el Sol y radios de sólo 10 kilómetros) son medibles y la Relatividad General verificable. Curiosamente, también una configuración similar, pero a gran escala puede permitir detectar las distorsiones causadas por las ondas gravitacionales en el espacio-tiempo, como ya mencioné.

¹⁸ La transición hiperfina del hidrógeno neutro se origina entre los estados $F=1$ y $F=0$, es decir, del que tiene los espines del protón y electrón paralelos al que los tiene antiparalelos.

Para mí personalmente una cosa muy singular de SKA es que tendrá la capacidad “multihaz”, es decir la capacidad de mirar al universo en muchas direcciones simultáneamente y con gran resolución. Eso permite hacer cosas muy novedosas, pero hay una que me resulta particularmente familiar: las observaciones interferométricas con líneas de base intercontinentales con referencia de fase en emisión continua empezaron con mi tesis doctoral y un par de cuásares separados 33 segundos de arco. Posteriormente, logramos en mi equipo con grandes esfuerzos extender esa capacidad primero a un grado de separación (lo que nos permitió determinar el movimiento verdadero de la componente superluminal en un cuásar, tesis doctoral del ahora catedrático José Carlos Guirado). Luego lo conseguimos con separación de varios grados y finalmente para un casquete polar grande de radiofuentes con un procedimiento en la secuencia de observación que los sajones llamarían “bootstrapping”. Pero para verdaderamente llegar más lejos hacían falta pares de grandes radiotelescopios relacionados en fase en cada lugar de la red interferométrica intercontinental. Esto no fue posible. Ahora SKA lo proporcionará de modo natural, aunque con menor línea de base. A saber, lo que serán capaces de hacer algunos investigadores. Quizás debería de enfatizar el algunos, porque una de las cosas que va a diferenciar a SKA del pasado es la importancia que tendrán los informáticos en sus trabajos. En la radiointerferometría primero fueron los ingenieros eléctricos, luego los físicos y astrónomos y ahora llega el tiempo en el que los ingenieros informáticos se van a unir a esos grupos para trabajar con y sin la IA. Es difícil pensar en lo que un instrumento así puede descubrir en sus décadas de observaciones. Hemos dicho algo sobre lo que se espera que haga, pero siempre que yo recuerde los nuevos instrumentos han dado lugar a nuevos y a veces revolucionarios descubrimientos. No creo que en este caso sea menos.

Hay otro instrumento de radio astronomía que se está construyendo y es el complementario en resolución al SKA. Se trata del ngVLA. El Very Large Array, VLA, empezó su andadura cuando yo era estudiante doctoral, hace ya unos años. Recibió mejoras varias veces y ha sido un instrumento esencial para la investigación radio astronómica. En estos momentos está en desarrollo el ngVLA, que nace con propósito de ser un instrumento esencial y gran complemento del SKA durante otros 50 años.

Muchos objetivos del ngVLA y del SKA se solapan y otros se complementan. Quiero además pensar que ambos instrumentos funcionarán conjuntamente en modo interferométrico en algunos casos muy importantes, pues no hay nada fundamental que lo impida. El ngVLA proporcionaría la resolución y el SKA la sensibilidad. Seguramente eso permitiría abordar algunas investigaciones hoy inconcebibles.

No he mencionado la física solar, ni los estudios en el sistema solar, ni la radio espectroscopía de nubes moleculares, ni los estudios en el ultravioleta, ni los estudios en rayos X, ni los estudios de rayos gamma y rayos cósmicos (por cierto, el Cherenkov Timing Array South, CTA-South, está construyéndose a no mucha distancia del ELT), etc., etc. También dejo sin mencionar centenares de instrumentos y de líneas de investigación en la exploración del universo. Mi idea inicial era agruparlas en un anexo, pero he cambiado de idea antes de frustrarme en el empeño. Todo cambia muy pronto y todos esos detalles estarían obsoletos en poco tiempo. Sólo voy a hacer una excepción ya que varias veces en el discurso he mencionado verificar la Relatividad General.

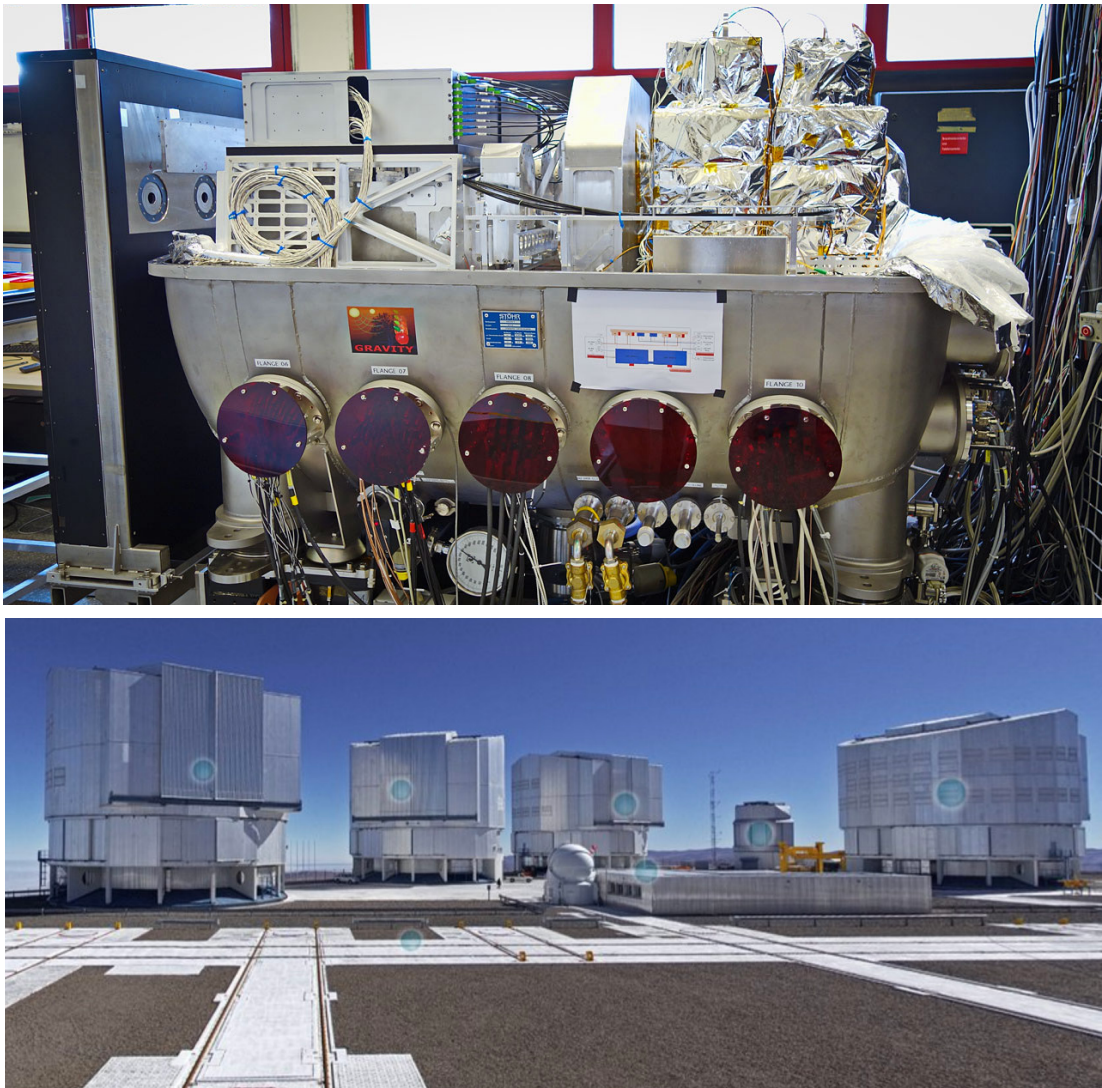


Figura 20: Instrumento GRAVITY y telescopios UT (8m de diámetro) y AT (1.5m de diámetro y desplazables sobre raíles) en el Observatorio Europeo Austral en Cerro Paranal, Chile. El edificio en medio de la imagen es el lugar al que llegan todas las líneas ópticas de todos los telescopios y es el que alberga GRAVITY.

Precisamente para ese propósito se construyó el instrumento GRAVITY¹⁹ por un consorcio franco-alemán liderado por Frank Eisenhauer del grupo de nuestro académico Reinhard Gen-

¹⁹ GRAVITY es un instrumento interferométrico que opera en banda K, entre 2,0 y 2,4 μm , con los telescopios UT y AT del Very Large Telescope (VLT) en Cerro Paranal, Chile. Combina haces de cuatro telescopios y está diseñado para realizar imágenes y astrometría mediante referencia de fase porque está equipado con un subsistema de seguimiento de franjas. El instrumento proporciona resoluciones espectrales baja, media y alta. En modo de imagen, GRAVITY puede resolver características entre 4 μs (milisegundos de arco) y 50 μs con los telescopios UT. La precisión astrométrica es del orden de 10 a 100 μs .

zel. Este instrumento combina la luz de 4 telescopios óptico/infrarrojos en modo interferométrico. Esos 4 telescopios pueden ser los gigantes de 8 metros de diámetro distribuidos sobre una superficie de 200 metros en el truncado Cerro Paranal, Chile, o los pequeños telescopios auxiliares de 1.5 metros de diámetro también presentes en ese emplazamiento. Estamos hablando de interferometría óptica, que ha tardado 50 años más que la interferometría radio en desarrollarse, pero que ahora proporciona una resolución angular de unos 4 milisegundos de arco y una precisión posicional de algunas centésimas de milisegundo de arco con objetos muy débiles, gracias a que funciona en un modo similar a referencia de fase en radioastronomía. Esto permite aumentar enormemente su tiempo de integración y su sensibilidad. Genzel alentó el desarrollo de este extraordinario instrumento para poder medir la precesión de Schwarzschild de la estrella S2 a su paso por el periastro del agujero negro masivo en el centro de nuestra galaxia y determinar de ese modo, y sin género de dudas, que aquello que está asociado a la radiofuente Sagitario A* es en efecto un agujero negro. Indudablemente esta medición fue la que terminó de decidir al comité Nobel para darles el premio a Andrea Ghez y Reinhard Genzel, que anteriormente ya habían hecho determinaciones precisas de la masa del agujero negro que les habían acercado al premio. Ese instrumento se utiliza hoy día para otros menesteres en los que el objeto es de emisión muy débil y hay que determinar algo de él con gran precisión. Incluso nosotros lo hemos utilizado. Por ejemplo, con él se ha obtenido también el primer espectro infrarrojo de la atmósfera de un exoplaneta mostrando trazas de hierro y silicatos. Debo decir que una versión mejorada de Gravity, el Gravity+, viene de camino²⁰.

Y para ir acabando vuelvo puntualmente a donde empecé, el ELT, con algo muy singular. Este descomunal telescopio tiene el potencial de medir el cambio del corrimiento al rojo de las galaxias durante un tiempo de expansión de varias décadas. Aclaro, no el corrimiento al rojo sino el cambio de ese corrimiento al rojo. Esto permitiría determinar la expansión del universo de manera directa, sin suposiciones sobre su curvatura y sobre los modelos cosmológicos. Por tanto, este método directo proporcionaría a largo plazo un test de consistencia de otros métodos y una comprobación de la correcta cosmología. Una perspectiva extraordinaria la que nos proporcionará el ELT con el tiempo.

²⁰ GRAVITY+ es una mejora sustancial del instrumento GRAVITY. Su objetivo principal es aumentar significativamente la sensibilidad y la cobertura del cielo e incrementar la precisión de alto contraste en objetos brillantes. GRAVITY+ combina la luz de los telescopios del VLT mediante interferometría, pero se beneficiará de óptica adaptativa mejorada (incluyendo nuevas estrellas guía láser para corregir mejor la distorsión atmosférica) y de capacidad de seguimiento de franjas mejorada. Esto permitirá estudiar: el Centro Galáctico (realizar pruebas más profundas de la Relatividad General y del agujero negro central, medir con mayor precisión la distancia al centro de la Vía Láctea y estudiar las estrellas débiles en su entorno); Núcleos Activos de Galaxias (medir las masas de los agujeros negros supermasivos en AGNs a lo largo del tiempo cósmico, lo que permitirá comprender mejor la coevolución de los agujeros negros y sus galaxias anfitrionas, incluyendo fenómenos como la acreción super-Eddington y eventos de disrupción de marea; estudiar sistemas binarios de agujeros negros supermasivos); exoplanetas (caracterizar las órbitas y las propiedades atmosféricas de exoplanetas jóvenes, incluyendo la obtención de espectros de alta calidad); estrellas jóvenes y sus discos protoplanetarios (obtener imágenes de alta resolución de estos sistemas para comprender mejor los procesos de formación planetaria); microlentes, etc.

Como reflexión final, y en estos tiempos en los que algún presidente parece pensar que la Tierra no es de todos sino de sólo algunos, mirando atrás veo que la astronomía ha sido una actividad de gran colaboración internacional, de generosa cesión de recursos entre países y colegas para desentrañar los secretos de un universo que es de todos. Espero que siga siendo así y que España, que sigue siendo joven en esta disciplina, alcance todavía mayores cotas de rendimiento y aportación. Y que en nuestra corporación acojamos a los mejores entre los muchos que harán esas aportaciones.

Gracias por su atención. He dicho.

