

Muerte por materia oscura

María Luisa Sarsa Sarsa

La materia oscura representa el 27 % de la energía total del Universo y el 84 % de su masa. La Física de Partículas, la Cosmología y la Astrofísica afrontan la comprensión de su naturaleza, desconocida hasta la fecha. ¿Podría ser peligrosa?

El objetivo de la Física es comprender el universo que nos rodea, tanto los objetos que se observan a las distancias más lejanas, como los constituyentes elementales de la materia. Desde hace casi 100 años sabemos que no podemos explicar el universo con las formas de materia que conocemos. Se requiere una misteriosa materia “oscura”, cuya investigación es todo un reto en la frontera de la Física de Partículas, la Astrofísica y la Cosmología.

El universo invisible

El universo que vemos con nuestros ojos es una parte muy pequeña del universo que hay ahí afuera, sólo la que emite en el rango de longitudes de onda comprendidas entre 400 y 700 nanómetros. Sin embargo, hemos construido instrumentos mucho más sensibles que nuestro ojo, capaces de formar imágenes, aunque sea en colores falsos, utilizando desde las largas ondas de radio hasta las cortas ondas gamma. Además, hemos aprendido a ver el universo de otras formas, con los ojos de otras interacciones diferentes de la electromagnética. Si miramos, por ejemplo, hacia el Sol, podemos verlo con alta resolución en el UV gracias a las cámaras CCD instaladas en el satélite SDO [1], pero también hemos sido capaces de detectar su emisión en neutrinos. Los neutrinos se producen en reacciones termonucleares de fusión en el núcleo del Sol y su observación fue la confirmación de que nuestro modelo de producción de energía en las estrellas es correcto. El Sol es prácticamente transparente para los neutrinos, que, por eso, llegan a la Tierra sólo 8 minutos después de su producción, a diferencia de los fotones, que tardan decenas de miles de años en transportar la energía del núcleo del Sol a su superficie: la fotosfera es precisamente la frontera a partir de la cual los fotones los fotones se pueden propagar con libertad y abandonando por fin el Sol, dirigirse hacia los confines del universo. La imagen del Sol que construimos con los neutrinos es, por lo tanto, esencialmente diferente de la foto que registramos en fotones: en un caso vemos el núcleo del sol, en el otro la fotosfera; en un caso trazamos las reacciones nucleares de forma casi instantánea, mientras que en el otro observamos el resultado de los complicados procesos de difusión que llevan la energía producida en el núcleo hasta el exterior de la estrella. Imágenes diferentes del mismo objeto nos

aportan información complementaria. Y por supuesto, ha sido preciso desarrollar instrumentos diferentes: la neutrinoografía del Sol se tomó con un tanque lleno de 50 000 toneladas de agua radiopura, enterrado en la mina Mozumi en Japón, el detector Super-Kamiokande [2].

El Sol también lo podemos ver por sus efectos gravitatorios, responsables de la dinámica de todos los cuerpos que constituyen el sistema solar. Algunos, como los planetas, giran en órbitas estables, elípticas y de baja excentricidad, totalmente dominados por la atracción del astro rey. Otros, como los cometas, siguen trayectorias muy excéntricas, que apuntan a que su origen se encuentra en las afueras del sistema solar, en la nube de Oort. Tan lejos del Sol, los objetos están muy débilmente ligados y cualquier pequeña inestabilidad gravitatoria puede precipitarlos hacia el interior del sistema solar.

Si nos fijamos en los planetas, la curva que representa sus velocidades de rotación en función de su distancia al Sol es como una foto gravitatoria del sistema solar: no sólo nos muestra que el Sol está ahí, y que, aunque fuera invisible a nuestros ojos, su presencia sería indiscutible, sino que además nos dice cuál es su masa con una gran precisión. Esta foto gravitatoria del sistema solar es consistente con las fotos electromagnética y nuclear, lo que indica que nuestro modelo solar funciona y que las reglas de la Física que aplicamos en su estudio lo describen bien en todas sus facetas.

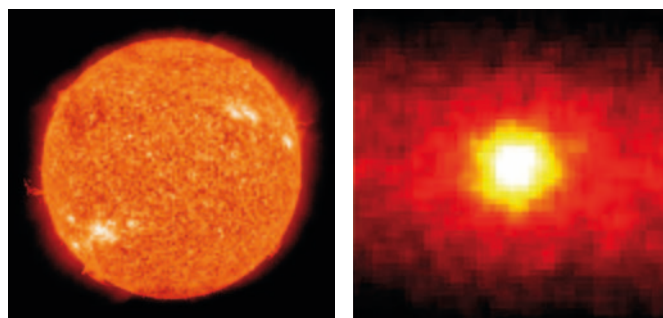


Fig. 1. a) Fotografía del Sol en el rango ultravioleta tomada con el instrumento Atmospheric Imaging Assembly del satélite SDO de la NASA (Solar Dynamics Observatory) [1]. (Crédito: NASA). **b)** Neutrinoografía del Sol tomada con el detector Super-Kamiokande [2] en la mina Mozumi, Japón. (Crédito: R. Svoboda for the Super-Kamiokande Collaboration).

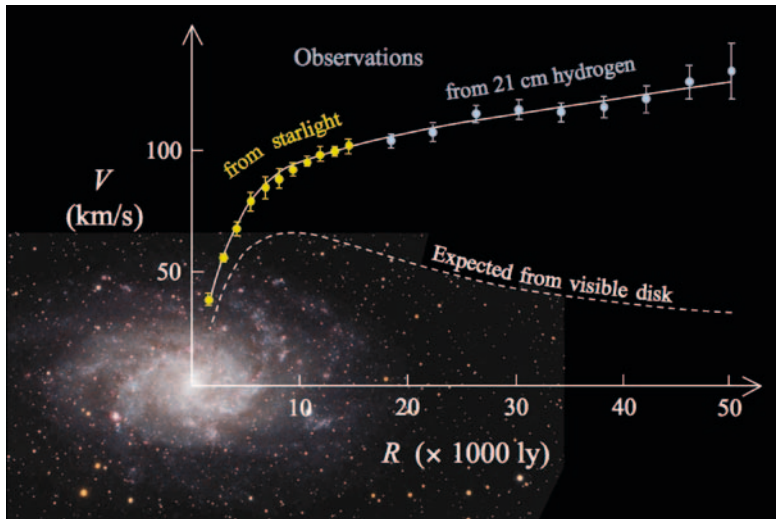


Fig. 2. Curva de rotación de la galaxia M33 comparada con la predicha a partir de la distribución de materia visible [5].

Fig. 3. Imagen compuesta del “Bullet cluster”: en rosa se muestra la emisión del gas caliente en rayos X, tomada con el telescopio Chandra, en azul se ha representado la distribución de masa del cúmulo que se deriva del análisis del efecto de lente gravitatoria, ambas se superponen a la imagen en el visible, tomada con el Magellan and Hubble Space Telescope. (Crédito: NASA).

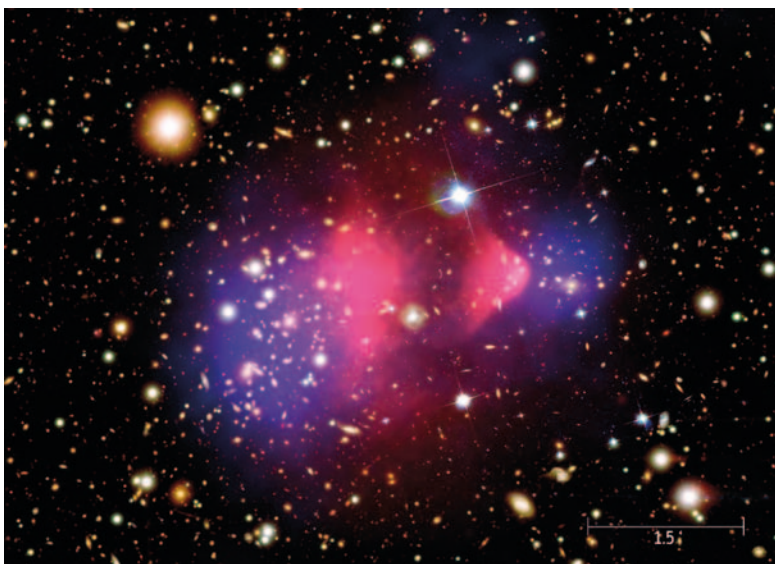
Sin embargo, si miramos las galaxias espirales del mismo modo, las curvas de rotación de sus estrellas y nubes de gas y polvo, medidas por Vera Rubin y Kent Ford en el visible [3] y por Albert Bosma en radio [4], no muestran el mismo comportamiento. Las velocidades de rotación de los objetos que medimos en los brazos de las galaxias espirales crecen o se mantienen constantes hasta distancias muy superiores al radio de la galaxia visible. Sin embargo, al alejarnos suficientemente de la distribución de masa dominante las velocidades de rotación deberían disminuir con la raíz cuadrada de la distancia al centro de la distribución. El hecho de que en este caso las fotos gravitatoria y electromagnética no coincidan se resume diciendo que las galaxias no tienen suficiente masa visible para explicar su comportamiento dinámico.

El problema de la materia invisible en el universo ya se había planteado con anterioridad. Observando el cúmulo de Coma en los años treinta, Fritz Zwicky había observado que las altas velocidades que medía para las galaxias debían corresponder-

se con una masa total del cúmulo muy superior a la inferida a partir de su luminosidad [6]. El teorema del virial que aplicó, suponiendo que los cúmulos son estructuras estables, gravitatoriamente ligadas, asocia los valores medios de la energía potencial gravitatoria con el doble de la energía cinética. Hacía falta materia invisible, y mucha, para hacer estables los cúmulos de galaxias. Estos argumentos se han visto después reforzados por las medidas de la masa de muchos cúmulos derivadas del análisis del efecto de lente gravitatoria que producen en la luz de galaxias más lejanas, desviada por la distribución de masa interpuesta. La masa requerida para producir estos efectos es muy superior a la observada en forma de galaxias y gas caliente y, además, la distribución espacial de la masa total y el gas caliente no siempre coincide, en particular no lo hace en aquellos casos en los que el cúmulo ha experimentado procesos de colisión, como sucede en el “Bullet cluster” [7]. Este hecho indica que la materia que domina en la distribución de masa de los cúmulos, además de ser invisible, interacciona mucho más débilmente que la materia convencional.

El universo primitivo

A lo largo del siglo xx y en lo que llevamos del xxi, en nuestro esfuerzo por comprender el universo y la materia hemos mirado hacia lo más lejano y lo más grande, pero también hacia lo más pequeño. Aunque parezca que miramos en sentidos opuestos, realmente estamos viendo lo mismo, ya que al mirar lejos vemos el pasado del universo. Nos llega luz de galaxias que fue emitida hace 13 mil millones de años, cuando el universo era mucho más pequeño y caliente. Podemos ver hacia atrás, hasta la llamada “primera luz”, la primera foto del universo que podemos tomar con radiación electromagnética: la radiación cósmica de fondo de microondas. Corresponde a un universo de solo 380 000 años de edad. El universo era una sopa de partículas cargadas, un plasma, en el que los fotones eran continuamente absorbidos y reemitidos, tan rápido que no se podían mover con libertad. Cuando la temperatura bajó de 3 000 K, los núcleos positivos se recombinaron con los electrones negativos y formaron átomos neutros. De repente el universo pasó a ser transparente para los fotones, que sin tener con quien interactuar desde entonces, siguen propagándose por el universo, enfriándose conforme este se ha ido expandiendo. Esos fotones “fósiles” o reliquia del pasado del universo son los que vemos en la foto: en la actualidad les corresponde una temperatura media de 2,7 K y muestran un espectro perfecto de cuerpo negro. Las fluctuaciones en su temperatura al observar distintas regiones de la esfera celeste son de solamente una parte en 10 000 y su observación ha permitido que la cosmología se convierta en una ciencia



de precisión. No cualquier modelo cosmológico es capaz de reproducir cuantitativamente la estructura que nos muestra esta foto. Estas fluctuaciones en la temperatura de los fotones se corresponden con las de la densidad de materia en ese momento, que amplificadas por la gravedad permitieron después la formación de las galaxias y los cúmulos de galaxias que observamos en el universo actual.

Pero sabemos mucho más del universo, también de la época de la que no nos puede llegar ninguna luz. Su composición actual (75 % de hidrógeno, 24 % de helio y 1 % del resto de elementos) es resultado de procesos nucleares bien conocidos que dieron lugar a la formación de los núcleos ligeros en los tres primeros minutos de la historia del universo. Los cálculos de la nucleosíntesis primordial predicen con mucha precisión la cantidad de protones y neutrones que tuvo que tener en esa época el universo para reproducir las abundancias observadas de los núcleos ligeros: en ningún caso son suficientes para explicar la materia que nos falta en los cúmulos y en las galaxias. Este argumento, totalmente independiente de los anteriores, apoya que la materia invisible, además, es cualitativamente diferente de la materia que conocemos, es no bariónica.

El modelo de universo Λ CDM

Hemos ido componiendo una foto sorprendente del universo, combinando información de todas las épocas de su evolución, escalas de distancias, y obtenida con técnicas muy diferentes. Tenemos un modelo cosmológico en el que todas estas observaciones encajan de una forma satisfactoria: el modelo Λ CDM. Bueno, de manera satisfactoria si consideramos que un 68 % del universo (Ω_Λ) está en forma de una energía desconocida, la energía oscura, y el resto, en forma de materia (Ω_m), se reparte en un 27 % de materia desconocida e invisible, a la que me referiré a partir de aquí como materia oscura, y nada más que un 5 % de materia bariónica ordinaria.

Aunque la concordancia de tantos indicios en el marco del modelo se ha visto como una de sus fortalezas, no tenemos que olvidar que cualquier teoría o modelo es siempre provisional, todos los nuevos datos que se vayan recabando deben estar de acuerdo con sus predicciones para que su validez se mantenga. Por eso, es importante recordar situaciones similares afrontadas en el pasado. Urano mostraba un comportamiento anómalo en su órbita que permitió descubrir Neptuno, invisible para los instrumentos de la época hasta que se supo dónde mirar. Hasta entonces Neptuno había sido materia invisible, pero sus efectos dinámicos sobre otro objeto visible lo pusieron en evidencia. Algún tiempo después, la anomalía en la precesión del perihelio de la órbita de Mercurio, sin embargo, fue explicada de forma distinta: hizo falta

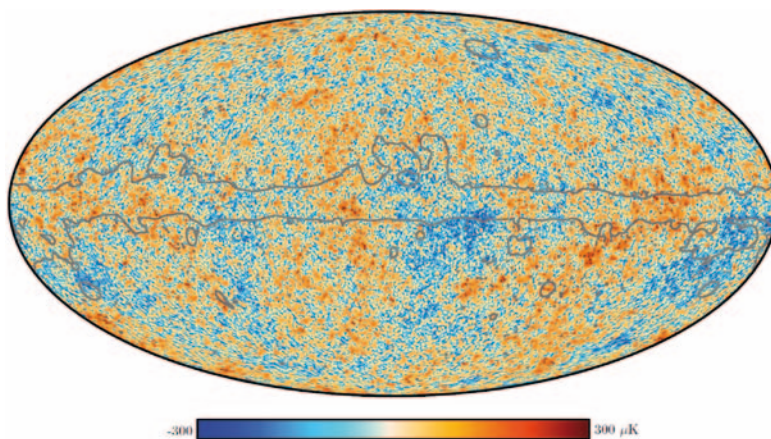


Fig. 4. El mapa de fluctuaciones en la temperatura de la radiación cósmica de fondo de microondas medido por los instrumentos de la misión Planck [8] de la ESA, 2018. (Crédito: ESA and the Planck Collaboration).

que Albert Einstein introdujera una nueva teoría de la gravitación, la Relatividad General, para resolver el problema. Hoy en día no sabemos cómo se resolverá el problema de la materia y energía oscuras, y por eso la ciencia debe investigar las dos opciones: nuevas leyes para el mundo físico, y por lo tanto un nuevo marco cosmológico en el que interpretar todas las evidencias, o materia y energía que hasta ahora había sido invisible. En este artículo me centraré en los esfuerzos por investigar la naturaleza de esta forma desconocida de materia, la materia oscura, uno de los grandes retos que abordan la Física de Partículas, la Astrofísica y la Cosmología.

La naturaleza de la materia oscura

Sabemos bien de qué está compuesta la materia visible (podríamos llamarla también ordinaria). Con solo unos pocos ingredientes (quarks y leptones, el bosón de Higgs y cuatro interacciones

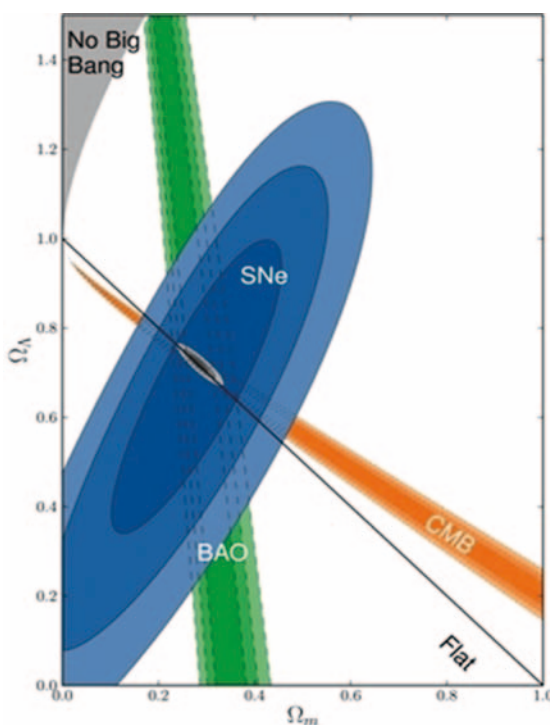


Fig. 5. Muestra de la concordancia de las varias evidencias observacionales interpretadas en términos del modelo cosmológico estándar Λ CDM [9]: radiación cósmica de fondo de microondas (CMB), oscilaciones acústicas de bariones (BAO) y supernovas (SNe). Confluyen en un Universo con un 68 % de energía oscura (Ω_Λ) y un 32 % de materia (Ω_m), de la cual el 84 % es oscura. (Crédito: Supernova Cosmology Project, Suzuki *et al.*, figura 5 de [9]).

mass charge spin	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ u up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ c charm	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ t top	0 0 1 g gluon	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 γ photon	SCALAR BOSONS
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	0 1 1 Z Z boson	GAUGE BOSONS
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e electron neutrino	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ tau neutrino	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson	

Fig. 6. El modelo estándar de la Física de Partículas incluye tres familias de quarks y leptones, cuatro bosones gauge con los que se explican tres de las cuatro interacciones fundamentales y un bosón escalar, el bosón de Higgs. (Figura bajo licencia Creative Commons 3.0).

fundamentales), el modelo estándar de la Física de Partículas permite explicar de forma increíblemente precisa todas las observaciones y, sin embargo, deja sin respuesta demasiadas preguntas: cómo incorporar la gravedad en el modelo, por qué se observa una asimetría entre materia y antimateria en el universo, por qué hay tres familias de quarks y leptones, por qué son los que son los valores de las masas de las partículas, o qué son la materia y la energía oscura, entre otras.

Entre los posibles candidatos propuestos para explicar la materia oscura, la mayoría tienen carácter no bariónico para no entrar en conflicto con los resultados de la nucleosíntesis primordial. Este hecho requiere que sean partículas fuera del modelo estándar, distintas por tanto de todo lo que conocemos. Sin embargo, esto no supone ningún problema, ya que muchas de las teorías propuestas para ir más allá del modelo

estándar introducen de forma natural partículas con las características adecuadas para explicar la materia oscura. Entre los candidatos preferidos destacan los axiones y los WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles, partículas masivas que interactúan débilmente). Por supuesto, existen otras opciones que eluden el problema de la nucleosíntesis primordial y la explicación de las fluctuaciones en la radiación cósmica de fondo de microondas, escondiendo los bariones en las etapas iniciales de la evolución del universo, por ejemplo, en forma de agujeros negros primordiales o agregados de quarks.

La detección de los WIMPs

Como hemos comentado, los WIMPs constituyen una categoría de candidatos a materia oscura fuertemente motivada. Además de interactuar gravitatoriamente, los WIMPs interactúan débilmente con la materia normal, por lo que si existieran podríamos abordar su detección de distintas maneras. Podríamos producirlos, por lo tanto, en los grandes aceleradores mediante colisiones a muy alta energía entre partículas normales, o bien observar las partículas que se producirían cuando se aniquilen entre sí en los halos “oscuros” de las galaxias o los cúmulos de galaxias, o bien mediante la interacción de las partículas de materia oscura con los núcleos de un detector adecuado. Esta última aproximación, la detección directa de la materia oscura, es en la que me voy a centrar a continuación.

Necesitamos detectores muy sensibles, capaces de identificar los pequeños y poco frecuentes depósitos de energía que producirían estas partículas y, por lo tanto, debemos aislar bien los detectores de todas las posibles radiaciones que interferirían con nuestra observación. En primer lugar, debemos protegernos de la radiación cósmica, que baña la superficie terrestre con casca-

Fig. 7. Mapa que muestra los laboratorios subterráneos más importantes. Hay también instalaciones subterráneas en Finlandia, Rusia, Ucrania y planes en curso para construir otras nuevas en India, Australia y Sudamérica. (Imagen cedida por S. Cebrián).



das de partículas secundarias, generadas cuando una única partícula de origen cósmico y muy energética interacciona con los átomos de la atmósfera. Debemos buscar entornos subterráneos para que la roca nos proteja de esta radiación. Las instalaciones del Laboratorio Subterráneo de Canfranc [10] se encuentran bajo 800 metros de roca, equivalentes a 2 450 metros de agua, que reducen el flujo de muones atmosféricos en un factor 20 000. Hay sólo unos pocos laboratorios en todo el mundo que compartan estas características [11].

Además de irnos bajo Tierra, debemos proteger nuestros detectores de la radiactividad medioambiental. Todo es radiactivo: las rocas que nos rodean, la materia orgánica, el aire y el agua. Hay isótopos radiactivos naturales como el carbono-14 que se producen por la interacción de la radiación cósmica con átomos estables, mientras que otros forman parte de la composición del sistema solar desde su formación, como el uranio-238 o el potasio-40. Debemos protegernos de las radiaciones que emiten estos isótopos mediante blindajes adecuados que, sin embargo, son prácticamente transparentes, como también lo es la montaña, a los WIMPs.

El experimento ANAIS en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc

Así llegamos a construir un experimento como ANAIS en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc [12]. Usamos detectores de yoduro de sodio dopado con Talio. El yoduro de sodio emite pequeños destellos cuando una partícula interacciona en él. Mediante tubos fotomultiplicadores de muy alta eficiencia cuántica acoplados ópticamente al cristal centelleador se puede observar la luz producida. ANAIS-112 consiste en nueve detectores de 12.5 kg cada uno, distribuidos en una matriz 3×3 , es decir, 112.5 kg de material sensible en total. Los detectores están protegidos de las distintas formas de radiación ambiental dentro de un blindaje adecuado.

ANAIS estudia el viento de materia oscura. En su movimiento acompañando al Sol alrededor del centro de la galaxia, la Tierra suma o resta su velocidad a la del Sol de forma periódica. La materia oscura debe estar ahí, aunque no la veamos, para explicar la curva de rotación de la Vía Láctea, y al movernos a través de ella, deberíamos experimentar algo similar a lo que sucede cuando atravesamos una nube de mosquitos viajando en moto. Deberíamos ver cambiar el ritmo de interacción de las partículas de materia oscura en nuestros detectores con periodicidad anual. Este efecto ha sido aparentemente observado por un experimento, DAMA/LIBRA, en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso, en Italia, a lo largo de 20 años: observan una modulación en los datos de sus detectores de yoduro de sodio exacta-



mente como la que se espera que produzcan las partículas de materia oscura [13]. Sin embargo, otros muchos experimentos más sensibles son incompatibles con este resultado y la comunidad científica no lo ha aceptado como prueba de la detección directa de la materia oscura galáctica. Ninguno de estos otros experimentos ha utilizado el mismo material como detector, el yoduro de sodio, y por ello, la comparación de los resultados depende del modelo de materia oscura considerado (tanto en su distribución en el halo galáctico

Fig. 8. Instalaciones del Laboratorio Subterráneo de Canfranc, Huesca, bajo 2 450 metros equivalentes de agua. Dispone de 1 500 m² de espacio subterráneo, alojando experimentos de colaboraciones internacionales. En la figura se muestran todavía vacíos en el momento de su inauguración, en 2010.

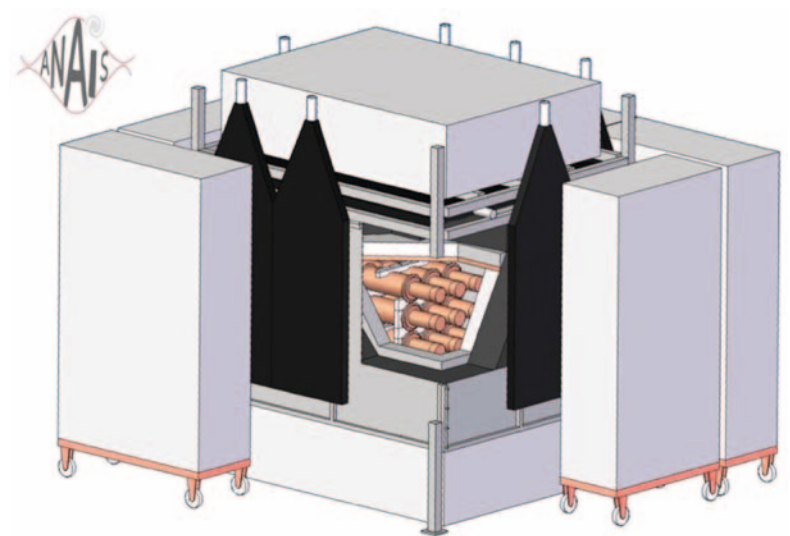
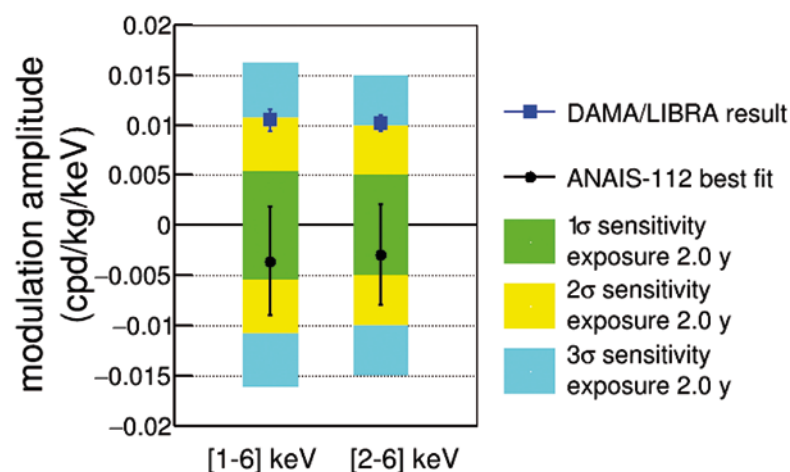


Fig. 9. Montaje experimental de ANAIS-112 en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Son nueve módulos de yoduro de sodio de 12.5 kg cada uno, rodeados (de dentro hacia fuera) por 10 cm de plomo arqueológico, 20 cm de plomo de baja actividad, una caja hermética que evita la entrada de aire del laboratorio y se mantiene bajo sobrepresión de nitrógeno gas, libre de radón, 16 plásticos centelleadores que actúan como veto activo contra el flujo residual de muones que alcanza el laboratorio y 40 cm de agua y polietileno para moderar los neutrones.



Fig. 10. Detalle de uno de los módulos de ANAIS en el proceso de acoplo al fotomultiplicador de alta eficiencia cuántica en la sala limpia del Laboratorio Subterráneo de Canfranc.

Fig. 11. Resultados de 2 años de toma de datos de ANAIS-112 en términos de modulación. El resultado en las dos ventanas de energía analizadas (círculos negros) es compatible con la ausencia de modulación e incompatible con la modulación observada por DAMA/LIBRA (cuadrados azules) con un nivel de confianza de 2.6 desviaciones estándar [15].



¿Cómo puede afectar la materia oscura a la vida en la Tierra?

Pero no olvidemos que existen muchos y muy variados candidatos, aparte de los WIMPs, que podrían estar ahí afuera, en el halo de nuestra galaxia, constituyendo la materia oscura. En el resto de este artículo voy a comentar un par de propuestas curiosas que nos llevan a plantearnos qué papel podría jugar esta elusiva y misteriosa materia tanto de forma directa en nuestras vidas como en el pasado y tal vez el futuro del planeta Tierra.

La materia oscura podría ser la responsable de desencadenar las extinciones masivas que con cierta periodicidad han asolado nuestro planeta, aniquilando a la mayoría de las especies que en ese momento lo poblaban. Estas extinciones muestran cierta periodicidad, y aunque solo la última de ellas, la famosa que acabó con los dinosaurios hace 66 millones de años, ha sido claramente asociada a un impacto meteórico, se ha barajado frecuentemente la posibilidad de que exista un desencadenante de lluvias de objetos masivos, procedentes de las afueras del sistema solar, sobre los planetas interiores. Partículas de materia oscura que mostraran poca interacción con la materia normal pero que interaccionaran entre ellas podrían generar un disco galáctico oscuro lo suficientemente masivo como para ser capaz de desestabilizar gravitatoriamente los objetos de la nube de Oort, muy débilmente ligados, cuando el sistema solar cruza el disco galáctico, de forma periódica, en su movimiento en torno al centro de la galaxia. Esta es la propuesta que hace Lisa Randall en su libro *Dark Matter and the dinosaurs* [20].

Por otro lado, existe la posibilidad de que la materia oscura no se encuentre en forma de partículas elementales, sino de objetos macroscópicos que pueden interaccionar elásticamente con la materia normal con secciones eficaces “geométricas”. Aunque parezca sorprendente, esta posibilidad no ha sido descartada para un rango grande de masas y secciones eficaces, porque la densidad de estas partículas en el halo de nuestra galaxia sería muy baja. En este escenario, el cuerpo humano podría ser un buen detector de las interacciones directas de este tipo de partículas con la materia normal, aunque el proceso sería bastante destructivo: sus colisiones producirían heridas graves e incluso la muerte, siendo equivalentes a heridas producidas por un disparo de bala. Los autores del artículo “Death by Dark Matter” [21], de hecho, logran excluir algunas de estas partículas de la lista de candidatos a materia oscura, precisamente considerando que en una muestra relevante de seres humanos que desarrollan su día a día en el seno del halo de materia oscura de nuestra galaxia, deberían haberse producido unas cuantas



Fig. 12. Representación artística del impacto meteórico hace 66 millones de años que pudo provocar la última de las grandes extinciones masivas. Lisa Randall propone que la materia oscura pudo estar detrás de este y otros eventos catastróficos, aunque de una forma indirecta. (Crédito: Don Davis/ NASA).

muertes misteriosas de este tipo sin explicación por otros medios: serían muertes por materia oscura.

Epílogo

Durante el último siglo hemos aprendido a ver el universo con nuevos ojos, el espectro electromagnético completo, los neutrinos y recientemente las ondas gravitacionales. Se ha iniciado una nueva Astronomía que nos ha enseñado y nos enseñará en los próximos años cosas increíbles del universo que hoy ni siquiera somos capaces de imaginar. Si añadimos a todo esto una mayor comprensión del campo de Higgs, como la que debería derivarse de los resultados de LHC, y otros posibles descubrimientos en física de neutrinos o violación de CP que nos lleven más allá del modelo estándar de la Física de Partículas, tal vez en un futuro próximo la materia oscura deje de ser un misterio. En todo caso, podemos estar tranquilos, la probabilidad de que tengamos un encuentro “fatal” con la materia oscura en el curso de nuestras vidas, es realmente muy pequeña.

Referencias

- [1] <https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>
- [2] <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>
- [3] V. RUBIN, N. THONNARD y W. K. JR. FORD, “Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 ($R=4\text{kpc}$) to UGC 2885 ($R=122\text{kpc}$)”, *The Astrophysical Journal* 238: 471-487 (1980).
- [4] A. BOSMA, “The Distribution and Kinematics of Neutral Hydrogen in Spiral Galaxies of Various Morphological Types”, PhD tesis, Rijksuniversiteit Groningen (1978).
- [5] E. CORBELL y P. SALUCCI, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 311 (2): 441-447 (2000).
- [6] F. ZWICKY, “Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln”, *Helvetica Physica Acta*, 6: 110-127 (1933).
- [7] D. CLOWE, A. GONZALEZ y M. MARKEVICH, “Weak lensing mass reconstruction of the interacting cluster 1E0657-558: Direct evidence for the existence of dark matter”, *The Astrophysical Journal* 604 (2): 596-603 (2004).
- [8] <https://www.cosmos.esa.int/web/planck/home>
- [9] Figura 5 tomada de N. SUZUKI *et al.* “The Hubble Space Telescope Cluster Supernova Survey. V. Improving the Dark-energy Constraints above $z > 1$ and Building an Early-type-hosted Supernova Sample”, *The Astrophysical Journal* 746: 85 (2012).
- [10] <https://lsc-canfranc.es/>
- [11] S. CEBRIÁN, “Science goes underground”, *Science in School* 39 (2017) [<https://www.scienceinschool.org/content/science-goes-underground>].
- [12] <https://gifna.unizar.es/anais/>
- [13] R. BERNABEI *et al.*, “First model independent results from DAMA/LIBRA-phase2”, *Nuclear Physics and Atomic Energy*, vol. 19, n.º 4: 307-325 (2018).
- [14] COSINE-100 experiment: <https://cosine.yale.edu/home>; SABRE experiment: <http://sabre.lngs.infn.it/>
- [15] AMARÉ, J. *et al.*, “ANAIS-112 status: two years results on annual modulation”, *Journal of Physics: Conference Series* (2019) [<https://arxiv.org/abs/1910.13365>].
- [16] AMARÉ, J. *et al.*, “First results on dark matter annual modulation from ANAIS-112 experiment”, *Physical Review Letters* 123: 031301 (2019).
- [17] <https://www.symmetrymagazine.org/article/testing-dama>
- [18] <https://www.nature.com/articles/d41586-019-00865-9>
- [19] M. L. SARSA, “¿Sopla el viento de materia oscura en el Pirineo Aragonés?”, *Investigación y Ciencia* (julio de 2019).
- [20] LISA RANDALL, *Dark Matter and the Dinosaurs: The Astounding Interconnectedness of the Universe* (Harper Collins: Ecco Press, 2015, ISBN 978-0-06-232847-2).
- [21] J. S. SIDHU, R. J. SCHERRER y G. STARKMAN, “Death by Dark Matter” (2019) [<https://arXiv:1907.06674v2>].

María Luisa Sarsa Sarsa
Centro de Astropartículas
y Física de Altas Energías,
Universidad de Zaragoza

