

Todos los planetas, las estrellas y las galaxias del cosmos apenas representan el 15% de la materia que existe. Nadie conoce a ciencia cierta de qué está hecho el 85% restante. Ahora bien, sabemos que está ahí por sus efectos gravitatorios.

EL MISTERIO DE LA MATERIA OSCURA

Parece inconcebible, pero la mayor parte de la materia que integra el universo, una gran masa que mantiene unidas las galaxias, resulta indetectable. Los astrofísicos llevan décadas tratando de desentrañar su naturaleza mediante detectores situados en profundas minas, aceleradores de partículas y potentes telescopios espaciales, aunque aún hoy ese *fantasma* constituye uno de los mayores desafíos de la cosmología.

Texto de
GONZALO LÓPEZ SÁNCHEZ

El detector subterráneo del observatorio IceCube, en el Polo Sur, ocupa un kilómetro cúbico. Algunos científicos sospechan que la solución al rompecabezas de la materia oscura se encuentra en el flujo de neutrinos—unas partículas de masa ínfima— que llega hasta él desde el espacio.



Los sensores ópticos del telescopio IceCube se encuentran bajo el hielo, a entre 1450 m y 2450 m de profundidad. En ese entorno, buscan el rastro de las señales que dejarían las interacciones entre partículas subatómicas.

Intuimos la existencia de la materia oscura por los efectos que produce en los objetos cósmicos que sí podemos observar

de microondas, un tipo de radiación electromagnética que inunda el cosmos y que constituye una reliquia de sus etapas tempranas.

Esta materia oscura no solo influye en la rotación de las galaxias. “Es un acelerador de estructuras cosmológicas —indica Ignacio Trujillo, del Instituto de Astrofísica de Canarias. Y añade—: Se trata de una masa extra que dicta el ritmo de crecimiento de las galaxias. Sin ella estas habrían tardado más en desarrollarse y no serían tan grandes”. Es decir, sin materia oscura, el universo no tendría el aspecto que hoy vemos.

LAS SIMULACIONES DE LA EVOLUCIÓN DEL COSMOS HAN LLEVADO A BARAJAR LA EXISTENCIA DE TRES TIPOS DE DICHA MATERIA: la fría, la templada y la caliente. Cada una de ellas estaría integrada por unas partículas que viajarían a distinta velocidad durante la infancia del universo: en las más cálidas, aquella sería mayor; en las más frías, menor. De acuerdo con estas recreaciones, la materia oscura fría es la que resulta más verosímil, porque su presencia pudo permitir que se formaran las grandes estructuras cuando el cosmos era joven. Sin embargo, hay discrepancias y detalles que no encajan, tal como reconoce Trujillo. Eso y la naturaleza fantasmal de la materia oscura suponen un auténtico rompecabezas para los expertos. ¿De verdad está ahí? La mayoría de los astrónomos creen que sí, pero dudan sobre su auténtica naturaleza y llevan años tratando de averiguar de qué podría estar hecha.

En la actualidad, este enigma se ve como una puerta que nos permitiría ir más allá del modelo estándar de la física de partículas, el gran marco teórico que explica el comportamiento de la materia por medio de un puñado de partículas e interacciones. Ese *ir más allá* resulta extraordinariamente importante, porque, aunque este modelo parece funcionar muy bien, no puede explicar fenómenos muy relevantes, como son el origen de la gravedad y el desequilibrio que existe entre materia y antimateria en el universo.

“La materia oscura muestra que nos falta una pieza clave del puzle —apunta María Luisa Sarsa, catedrática en la Universidad de Zaragoza e investigadora principal de ANAIS, un experimento que busca esta peculiar sustancia en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc, bajo la montaña de El Tobazo (Huesca), y advierte—: Puede que sea porque no hemos montado bien todas las demás”.

A finales de los años sesenta y principios de los setenta del siglo pasado, los astrónomos Kent Ford y Vera Rubin pudieron medir con precisión la velocidad de rotación del disco de Andrómeda, la galaxia más cercana a la Vía Láctea. Para su sorpresa, descubrieron que sus regiones externas se movían casi a la misma velocidad que las internas, cuando la ley de la gravitación de Newton predecía que debían girar más despacio a medida que aumentaba la distancia respecto al centro, tal como ocurre con los planetas de nuestro sistema que están más alejados del Sol.

Intrigados, Rubin y Ford repitieron estas observaciones en otras galaxias y encontraron lo mismo. Finalmente, concluyeron que estas se hallan rodeadas por un halo de masa invisible, varias veces más extenso que ellas mismas, lo que explicaría que se alcancen tales velocidades en esas zonas.

Otros dos fenómenos apoyaban la existencia de esa materia oscura: el llamado *efecto de lente gravitacional* —en esencia, este consiste en que una gran masa desvía la trayectoria de los haces de luz— y la radiación de fondo

interacciona con la luz, resulta completamente invisible. Todas estas características implican que la materia oscura es muy difícil de detectar. También que no puede estar compuesta por alguna de las partículas elementales conocidas, pues ninguna se comporta de ese modo. Por eso, algunos expertos han puesto incluso en duda su existencia.

EN UN PRIMER MOMENTO, LA EXPRESIÓN MATERIA OSCURA NO SE USABA PARA DESIGNAR algún tipo de sustancia exótica, sino un conjunto de planetas, estrellas y nubes de polvo muy poco brillantes e imposibles de atisbar desde la Tierra. En 1933, el astrofísico suizo Fritz Zwicky (1898-1974) empleó este concepto para tratar de explicar por qué las mil galaxias que integran el cúmulo de Coma, a 320 millones de años luz de distancia, permanecen unidas a pesar de la gran velocidad a la que giran. Zwicky propuso que algún tipo de *Dunkle Materie* —materia oscura— debía constituir la mayor parte de la masa de las galaxias, pero su hipótesis no tuvo mucha aceptación y sus ideas cayeron en el olvido.

Los científicos se percataron de algo muy intrigante hace ya medio siglo: no tenemos ni idea de qué está hecha la mayor parte del universo. A partir de los movimientos de las galaxias y de los cúmulos galácticos podía deducirse que ahí arriba existía una gran masa que por alguna razón no podíamos ver. Desde entonces, los astrónomos han averiguado que, de hecho, es mucho más importante que la que existe en forma de gas, estrellas y planetas. Es más, parece funcionar como una especie de pegamento

que mantiene unidas las estructuras en el universo observable. Se calcula que constituye alrededor del 85% de la masa del cosmos, pero ni los telescopios ni los sensores repartidos por todo el mundo la han podido localizar. Con razón se la conoce como materia oscura.

“Pensábamos que sabíamos cómo es el universo y de qué está hecho —apunta el investigador Carlos Muñoz, del Instituto de Física Teórica de Madrid—. Pero hace décadas nos dimos cuenta de que no es así, porque descubrimos que la materia de la que estamos hechos no es la que forma la mayor parte del cosmos”.

Los estudios llevados a cabo hasta la fecha sugieren que esa masa oculta no forma átomos y apenas interacciona con la materia convencional, por lo que millones de partículas de la misma atraviesan nuestro cuerpo cada segundo sin que notemos nada. Como tampoco

L

M. WOLF / ICECUBE / NSF

JANE YANG / ICECUBE

Para tratar de resolver este misterio se han construido laboratorios en las entrañas de minas abandonadas y se han instalado sensores en las profundidades de la Antártida. También se han lanzado telescopios al espacio y se han hecho chocar entre sí partículas a altísimas velocidades, pero, hasta ahora, nadie sabe con certeza qué es la esquivada materia oscura.

POR EL MOMENTO, LA HIPÓTESIS MÁS ACEPTADA ENTRE LOS EXPERTOS ES QUE ESTÁ HECHA DE WIMP –siglas de *Weakly Interacting Massive Particles*, esto es, partículas masivas débilmente interactivas–. Se trataría de corpúsculos miles de millones de veces más masivos que los neutrinos y se relacionarían con la materia normal por medio de la interacción nuclear débil, pero con una frecuencia muy baja. “Aunque existen otros candidatos, son el modelo por excelencia –explica Muñoz–. Las WIMP reproducen el comportamiento de la materia oscura tal como predicen las evidencias astrofísicas”.

De hecho, hace unas décadas los científicos se encontraron con lo que se denominó el *milagro WIMP*. La supersimetría, una extensión teórica del modelo estándar que postula que las partículas conocidas tienen compañeras más masivas que no hemos descubierto, permitió proponer la existencia de ciertos WIMP que parecían encajar casi mágicamente con lo esperado de las partículas de materia oscura. Muchos investigadores pensaron que, al menos, ya sabíamos dónde buscar la solución al problema. Pero las cosas no han resultado ser como parecían, y, tras años de indagaciones, aún no se ha hallado ni rastro de las partículas predichas. “Está claro que ese milagro WIMP no ha ocurrido. No ha sido posible encontrarlas”, reconoce Francis Halzen, director del observatorio IceCube. En esta instalación, situada muy cerca de la base estadounidense Amundsen-Scott, en el Polo Sur, se han colocado 5000 fotosensores en un kilómetro cúbico de hielo, enterrados a 2500 metros de profundidad.

Este experimento trata de dar con la materia oscura a través de lo que se conoce como detección indirecta. Aunque, como ya sabemos, aquella es invisible, se sospecha que las partículas que la integran pueden llegar a chocar entre sí y aniquilarse. Durante el proceso

se producirían señales que sí sería posible llegar a captar.

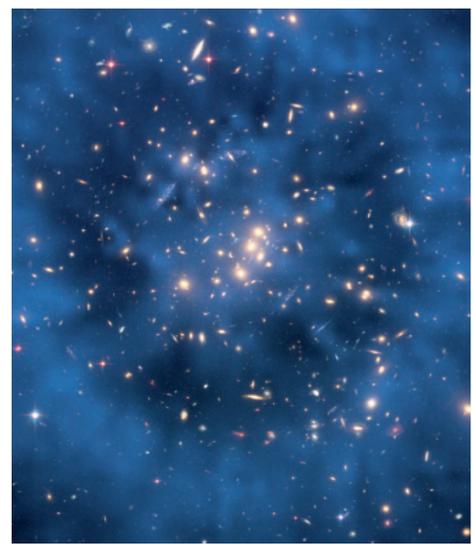
A miles de kilómetros de allí, en el Mediterráneo, el telescopio ANTARES lleva a cabo observaciones complementarias mediante una red de sensores fijados al fondo marino, a 2,5 kilómetros bajo la superficie, frente a la costa de Tolón, en Francia. Otros dispositivos buscan igualmente el rastro de la materia oscura en sucesos más energéticos. Es el caso del telescopio espacial Fermi de la NASA, que escudriña las fluctuaciones de rayos gamma en el centro de nuestra galaxia. Algunos investigadores creen que un excedente de este tipo de radiación en esa zona podría corresponderse con la presencia de la materia oscura, pero el análisis de los datos recabados por Fermi no permite aclararlo. Quizá sea así, tal como muestra un reciente estudio impulsado por Rebecca K. Leane, una física del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), o tal vez solo se trate de la presencia de objetos hasta ahora desconocidos que emiten radiaciones muy intensas, como los púlsares, que es lo que piensa buena parte de la comunidad científica.

También se busca su rastro en los rayos cósmicos, una forma de radiación de alta energía procedente del espacio exterior que baña la Tierra continuamente y que analiza en detalle el espectrómetro magnético alfa (AMS-02), un ingenio instalado a bordo de la Estación Espacial Internacional. A partir de los datos obtenidos con este módulo experimental de física de partículas, varios equipos de investigadores han llegado a la conclusión de que parte de los antiprotones que integran los citados rayos cósmicos surgen como consecuencia de la aniquilación de las partículas de materia oscura.

En 2022, cuando está previsto que entre en funcionamiento el observatorio de rayos gamma Cherenkov Telescope Array, que contará con más de cien telescopios repartidos



Los estudios de Vera Rubin –en la foto– sobre la rotación de las galaxias mostraron que se necesitaba mucha más masa que la visible para justificar la velocidad a la que lo hacían. A la derecha, un anillo de materia oscura detectado por el Hubble en un cúmulo, a 5000 millones de años luz.



NASA/ESA/NAJ.BEE/JH.FOTO

en varios enclaves de Chile y la isla canaria de La Palma, quizá podamos contar con más información sobre esas posibles interacciones entre partículas de materia oscura.

Como hemos visto, se han planteado distintas técnicas para tratar de dar con su *eco*, pero también existen experimentos que intentan detectarla directamente. En esencia, estos se basan en un supuesto como el que se detalla a continuación: a medida que nuestro planeta se desplaza en su órbita es atravesado por un número inimaginable de partículas de materia oscura que forman parte del halo de la Vía Láctea, una región que rodea nuestra galaxia. Como apenas interactúan con la materia convencional, traspasan la Tierra sin dejar huella. Muy raramente chocarían con los núcleos de algunos átomos, a través de la interacción débil, una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. Pero tales colisiones pueden llegar a suceder y ocasionar destellos o pequeñas descargas, algo que los científicos esperan poder captar justo cuando ocurren.

PARA ELLO, SE UTILIZAN DETECTORES ULTRASENSIBLES SITUADOS en grandes tanques de xenón o argón líquido ultraenfriados. Estos detectores se instalan a gran profundidad, a salvo de la radiación cósmica y otras señales externas que podrían alterar el funcionamiento de los aparatos.

Desde hace décadas se han llevado a cabo distintos ensayos, pero, de momento, con resultados negativos. Es el caso del PandaX, ubicado en el Laboratorio Subterráneo de Jinping (China), a 2400 metros de profundidad; el LUX, en una antigua mina de oro de Dakota del Sur –terminó en 2016 sin encontrar rastro de materia oscura–; y el proyecto XENON, que se desarrolla en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso (Italia). En mayo de 2018, los responsables de la iniciativa XENON1T –una fase del anterior–, que se cuenta entre las más ambiciosas puestas en marcha hasta la fecha, informaron de que no habían logrado detectar las citadas WIMP.

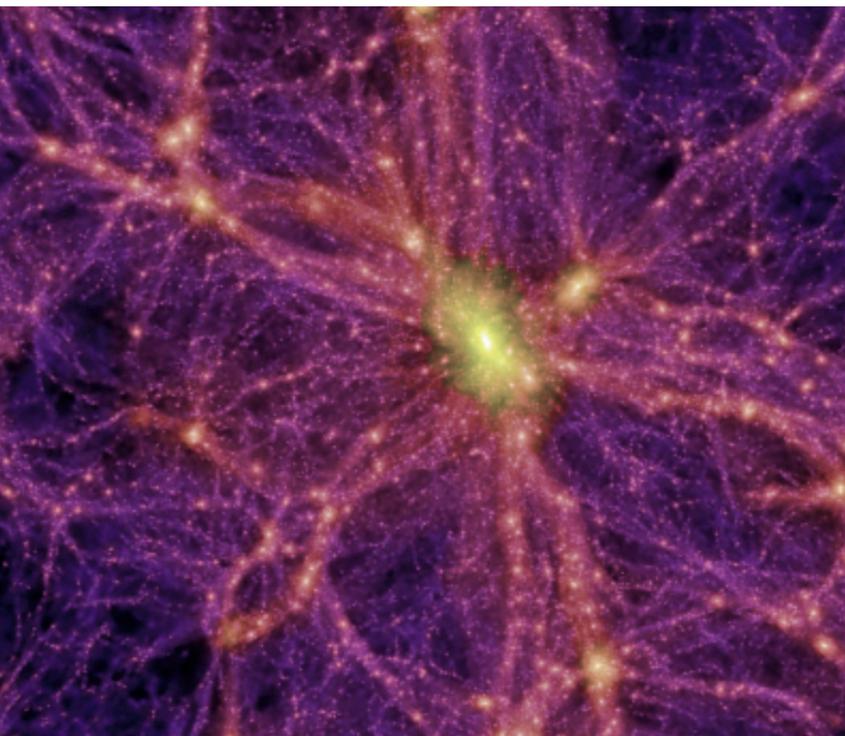
Pero hace tan solo unas semanas, en este mismo centro de investigación, se anunciaba un hallazgo que ha devuelto las esperanzas a los científicos que siguen la pista a la escurridiza materia oscura. Los detectores que rodean el tanque de 3500 litros de xenón líquido ultrapuro que constituye el corazón del experimento captaron una inusual cantidad de colisiones de partículas; muchas más de las esperadas. Entre las distintas explicaciones que se dan a este suceso, la más probable, según sus descubridores, es que se deba a la presencia de axiones producidos por el Sol, una partícula hipotética no prevista por el modelo estándar de la física. Aunque estas partículas no serían en sí mismas la materia oscura, su detección demostraría su existencia, y con ella, la de los axiones, que, en teoría, se habrían originado justo



El telescopio espacial de rayos gamma Fermi –en la imagen, en el interior del cohete Delta II en el que fue lanzado en 2008– trata de captar corpúsculos que podrían emanar de la aniquilación de partículas WIMP y otras candidatas a materia oscura.



Las partículas que recorren el anillo del gran acelerador de hadrones, situado en un túnel de 27 km, entre Suiza y Francia, se mueven a velocidades cercanas a la de la luz. Los físicos estudian sus colisiones para intentar encontrar indicios de la existencia de materia oscura. Bajo estas líneas, una simulación de su posible distribución en el universo llevada a cabo por el equipo internacional de científicos del Consorcio Virgo.



YOLKER SPRINGELLE ET AL. / INSTITUTO MAX PLANCK DE ASTROFÍSICA

después del big bang y que, en opinión de algunos físicos, componen la materia oscura. Los investigadores reconocen que no pueden afirmar categóricamente que hayan dado con los mencionados axiones solares, pero esperan que la próxima fase del experimento, denominada XENONnT, que triplicará la cantidad de xenón y aumentará notablemente la capacidad del detector, arroje luz sobre este asunto.

PERO ¿Y SI LA MATERIA OSCURA NO PUDIERA ENCONTRARSE? Según va aumentando la sensibilidad de los instrumentos con el paso de los años, el umbral de detección se va reduciendo y la búsqueda de WIMP y otras partículas podría tener los días contados. Aunque situemos los detectores bajo tierra, los neutrinos atraviesan el planeta y generan un ruido conocido como *fondo de neutrinos*. “Tanto este como el que generan los materiales de los que están hechos los propios aparatos marcan el límite de sensibilidad –explica Mario Pérez, investigador del Instituto de Física de Altas Energías, en Barcelona–. Cuando lleguen a ese límite se acabó, será como una pared”. Entonces, será imposible discernir los

neutrinos de las posibles partículas que integren la materia oscura.

Por el contrario, hay científicos que afirman que ya la hemos encontrado. En 1998, los responsables del experimento DAMA, que se desarrolla asimismo en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso, aseguraron que, por fin, habían dado con ella.

Bajo unos 1400 metros de roca, los detectores que emplea DAMA, situados en unos cilindros de 12 kilos de cristal ultrapuro de yoduro de sodio, captan los minúsculos destellos que originan los núcleos atómicos a medida que reciben el impacto de las partículas cósmicas. Tales destellos varían estacionalmente: alcanzan un máximo el 2 de junio y un mínimo el 3 de diciembre. Según los responsables de esa iniciativa, esta modulación anual es consecuencia de los movimientos de la Tierra. Si la materia oscura es, como sospechan, una nube de partículas situada en el halo de la galaxia, los cristales podrían detectar una mayor o menor cantidad de señales en función de si el planeta se mueve más rápido o más despacio en relación con ella.

En 1998, el experimento DAMA, llevado a cabo en Italia, pareció detectar indicios de materia oscura, pero otros laboratorios no han podido comprobarlo

“En ningún otro experimento se ha observado algo parecido, por lo que es dudoso que se trate de una detección de materia oscura”, asegura Sarsa. Su objetivo es reproducir en Canfranc los resultados de DAMA, en paralelo con COSINE-100, otro ensayo, situado bajo la presa de YangYang, en Corea del Sur. “Si DAMA lo ha logrado, deberíamos encontrar lo mismo en otros laboratorios”.

El problema es que lo que sea con lo que se han topado los investigadores en el Gran Sasso contradice lo que muestran otros sistemas de detección directa. De momento, los resultados de ANAIS y COSINE-100, que llevan recogiendo datos desde 2017, no han sido concluyentes. Sin embargo, ambos proyectos continuarán tomando medidas varios años más, y se espera que otra colaboración, denominada SABRE, prepare otro instrumento similar en el Laboratorio Subterráneo de Stawell, en Australia. “Si confirmamos las observaciones de DAMA, habría que crear un nuevo candidato a materia oscura. Si no, tendremos que averiguar qué aparece allí año tras año”, explica Sarsa.

ESTAS DIFICULTADES HAN ANIMADO A OTROS EXPERTOS A BUSCAR INDICIOS DE MATERIA OSCURA MEDIANTE ACELERADORES DE PARTÍCULAS, como el gran colisionador de hadrones o LHC, instalado en la Organización Europea para la Investigación Nuclear, el célebre CERN, en Suiza.

El LHC es un anillo de 27 kilómetros de largo en el que una cadena de electroimanes enfriados hasta $-271,3$ °C curvan la trayectoria de un haz de protones previamente acelerado hasta una velocidad próxima a la de la luz. Estos imanes son muy potentes y precisos, y permiten que estas partículas choquen, lo que origina nuevas partículas y energía. A partir de ese momento, los investigadores del LHC, por medio de experimentos como CMS, ATLAS o ALICE, trabajan a modo de detectives: reconstruyen esas colisiones y eliminan el ruido y los efectos conocidos para encontrar algo que pueda indicar la presencia de una nueva partícula.

“Hasta ahora, los intentos de dar con algo que explique la materia oscura no han ido bien –indica Rebeca Suárez, investigadora de la Universidad de Uppsala, en Suecia, que trabaja en ATLAS–. Del mismo modo que nuestra materia está formada por partículas e interacciones, podría ser que la materia oscura lo estuviera por partículas e interacciones oscuras”, señala. Ambas realidades serían ajenas entre sí, pero ¿podría existir algo que las conectase?

El caso es que, tras diez años de trabajo, el LHC no ha dado con señales de WIMP ni de supersimetría. El milagro no ha ocurrido, pero no es motivo para finalizar la búsqueda. “Se tardó sesenta años en descubrir el bosón de Higgs”, recuerda Suárez. En su opinión, podría ser que la materia oscura no se haya encontrado sencillamente porque quizá no hemos dado con la masa adecuada, porque, en realidad, no interaccione de ningún modo o quizá porque sea algo totalmente diferente a lo que sospechamos.

“El problema de la materia oscura es tan complejo que no creo que llegue el día en que lo entendamos del todo, en parte porque es probable que existan decenas de partículas de materia oscura”, señala Trujillo. Para Muñoz, el problema podría ser irresoluble si solo interaccionase con la materia convencional a través de la gravedad. Aun así, los expertos coinciden en que el interés por este asunto se mantendrá durante los próximos años. □

¿De qué rayos está hecha la materia oscura?

A medida que la tecnología avanza —y con ella, la sensibilidad de los detectores—, los científicos plantean nuevas ideas y descartan otras. Estas son algunas de las principales hipótesis que hoy se barajan para tratar de explicar la existencia y la composición de la huidiza materia oscura.

1. LAS DEBILUCHAS PERO FUERTES WIMP

AÑO EN QUE SE PROPUSO: 1985

FORTALEZAS: su existencia explicaría la cantidad de materia oscura en el universo, lo que se conoce como *milagro WIMP*.

DEBILIDADES: no se han hallado estas partículas y la capacidad de los instrumentos empleados se acerca al límite.

EXPERIMENTOS DESTACADOS: IceCube, ANTARES, XENON, PandaX, LUX, DAMA, LHC.

En los últimos años, las mejores candidatas para tratar de explicar la composición de la materia oscura han sido las WIMP, unas partículas hipotéticas que se adecúan a las observaciones astrofísicas. En teoría, las WIMP —un remanente del big bang— serían mucho más masivas que los neutrinos y podrían interactuar mínimamente con la materia convencional. Nacerían de la supersimetría, una modificación del modelo estándar que asume que las partículas conocidas tienen compañeras más pesadas. Al incorporar las masas de estas partículas supersimétricas se obtendría una cantidad que cuadra con el total esperado de materia oscura.

Se ha tratado de dar con su rastro en tanques de xenón, sin éxito. Tampoco se han podido producir partículas supersimétricas en el gran colisionador de hadrones. Además, el aumento de la sensibilidad de los detectores pronto permitirá discernir grandes masas de neutrinos, por lo que las WIMP quedarían ocultas en un mar de señales.

2. AXIONES: MÁS LIGEROS Y MÁS 'LIMPIOS'

AÑO EN QUE SE PROPUSO: 1977

FORTALEZAS: en teoría, es una hipótesis más fácil de poner a prueba que otras.

DEBILIDADES: no puede explicar otros enigmas del universo, como la antimateria y la energía oscura.

EXPERIMENTOS DESTACADOS: ADMX, XENON.

La marca de detergente Axion inspiró al físico del Instituto Tecnológico de Massachusetts Frank Wilczek el nombre de una partícula hipotética que tenía en mente para explicar la materia oscura. El axión se caracteriza por tener una masa mínima, billones de veces menor que la de un electrón o las WIMP, más pesadas. La idea, que proviene de ciertos modelos para explicar la interacción nuclear fuerte, conlleva que el universo está repleto de axiones desde el big bang. No obstante, tendrían carga neutra e interactuarían poco con el resto de la materia.

Desde 2018, un equipo de científicos de la Universidad de Washington conduce el Axion Dark Matter Experiment (ADMX), que trata de encontrarlos con un potente campo magnético generado en el interior de un cilindro ultraenfriado de cuatro metros. La teoría predice que estos axiones deberían decaer y emitir algunos fotones.

El posible hallazgo de axiones solares anunciado hace pocas semanas por los expertos del experimento XENON1T, en Italia, podría confirmar la existencia de estas partículas.

3. LOS MACHOS DE LOS AGUJEROS NEGROS PRIMORDIALES

AÑO EN QUE SE PROPUSO: 1971

FORTALEZAS: no requiere la existencia de nuevas partículas.

DEBILIDADES: aún no se han descubierto.

EXPERIMENTOS DESTACADOS: MACHO, EROS.

En 1971, Stephen Hawking propuso que esa masa invisible del universo podría deberse a agujeros negros primordiales, de menos de la décima parte de un milímetro, que se habrían formado tras el big bang a partir de fluctuaciones cuánticas. Algunos se habrían desvanecido, pero otros habrían crecido hasta alcanzar varias masas solares. Se conocen como objetos compactos masivos del halo (MACHO) y solo podríamos percibirlos a través del efecto de lente gravitacional, esto es, por la deformación que ejercen en la luz que nos llega de galaxias lejanas. "En teoría, son posibles", indica Mario Pérez, del Instituto de Física de Altas Energías, en Barcelona. Pero aún no se han observado. Según Pérez, si hallásemos agujeros negros de tres a cinco masas solares, estaríamos en el buen camino.

4. GRAVEDAD MODIFICADA O POR QUÉ LA MATERIA OSCURA NO EXISTE

AÑO EN QUE SE PROPUSO: 1983

FORTALEZAS: predice el comportamiento de las galaxias sin necesidad de meter por medio a las partículas exóticas.

DEBILIDADES: no explica el comportamiento de los cúmulos.

EXPERIMENTOS DESTACADOS: observaciones y simulaciones.

Existe la posibilidad de que no hayamos podido encontrar la materia oscura por el motivo más sencillo: no existe. En un artículo de 1983, el físico israelí Mordehai Milgrom planteó que en vez de explicar el movimiento de las galaxias y cúmulos como consecuencia de la presencia de una sustancia extraña e invisible, deberíamos plantearnos que a esa escala quizá la gravedad se comporta de forma diferente. Esta idea recibe el nombre de dinámica newtoniana modificada o MOND.

"Su punto más fuerte es su gran poder predictivo", indica el astrofísico Stacy McGaugh, de la Universidad Case Western (EE. UU.). "No solo explica la rotación de las galaxias, sino también su estabilidad o la formación de las más grandes", apunta McGaugh. Pero tiene un gran punto débil: los cúmulos galácticos. "MOND no cumple su cometido en ellos; aparentemente, allí hay más materia que la visible", señala este investigador.

Además, MOND engloba muy diversas hipótesis, lo cual hace muy difícil que todo ese marco se pueda poner a prueba globalmente. Es una de las razones que ha llevado a la mayoría de los científicos a descartarla y centrarse en la materia oscura.

6. ¿DÓNDE ESTÁN LOS GRAVITINOS?

AÑO EN QUE SE PROPUSO: 1970

FORTALEZAS: se relaciona con la gravedad.

DEBILIDADES: es una hipótesis muy especulativa.

EXPERIMENTOS DESTACADOS: solo propuestas teóricas.

El modelo estándar explica las interacciones electromagnética, débil nuclear y fuerte nuclear, pero no puede definir qué es la gravedad. Algunos expertos han planteado que existe un campo

5. EN BUSCA DE LOS NEUTRINOS ESTÉRILES

AÑO EN QUE SE PROPUSO: 1970

FORTALEZAS: se basa en el modelo estándar.

DEBILIDADES: todavía no se ha detectado ninguna señal.

EXPERIMENTOS DESTACADOS: KATRIN.

Cada segundo, billones de neutrinos procedentes de estrellas, de supernovas y del big bang atraviesan nuestro cuerpo. Estos pueden tener tres variedades o *sabores* —electrónico, muónico o tau—, entre los que oscilan espontáneamente, tienen masa y se relacionan con la materia convencional a través de la interacción débil, aunque los choques con los núcleos atómicos son muy infrecuentes.

Cuando tienen lugar, a veces se liberan fotones que pueden ser detectados. Así fue como en 2018 los sensores del experimento MiniBooNE, sumergidos en un tanque lleno de 800 toneladas de aceite mineral en el Fermilab, cerca de Chicago, encontraron un exceso de uno de los tres sabores de los neutrinos. Esto llevó a los científicos a plantear la existencia de un cuarto, que podría explicar la de la materia oscura: el neutrino estéril. Este no se relacionaría con la materia ordinaria por medio de la interacción débil, sino a través de la gravedad. Por desgracia, en 2019 el experimento MINOS+, también impulsado en el Fermilab, contradujo esos resultados. El KATRIN, que se desarrolla en Alemania, pretende acotar la masa de los neutrinos y arrojar algo de luz sobre este asunto.

gravitatorio mediado por una partícula hipotética conocida como gravitón, al igual que el fotón media la interacción electromagnética, pero la teoría no está completa.

Se especula, incluso, con que el gravitón podría tener un compañero supersimétrico: el gravitino. Su masa se encontraría en el rango compatible con la materia oscura y sería similar a la de las partículas WIMP. Si los gravitinos fuesen estables, provendrían de los comienzos del universo.

7. MATERIA OSCURA BORROSA

AÑO EN QUE SE PROPUSO: 2000

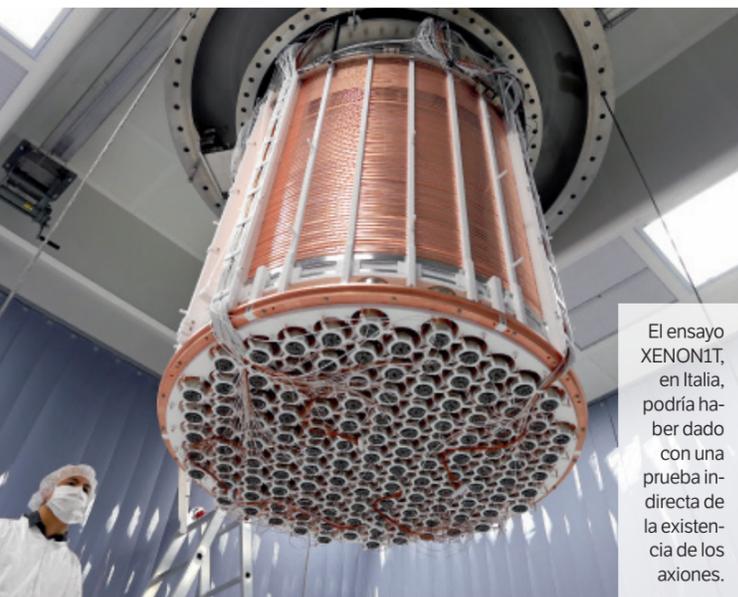
FORTALEZAS: es especulativa, pero parece comprobable.

DEBILIDADES: todavía no se han hallado indicios.

EXPERIMENTOS DESTACADOS: simulaciones informáticas.

Los defensores de esta hipótesis sugieren que la materia oscura estaría compuesta por partículas extremadamente ligeras que se agruparían y se comportarían como ondas a escala galáctica. A temperaturas próximas al cero absoluto (-273,15 °C), formarían condensados de Bose-Einstein —un estado de la materia que ocurre cuando algunos compuestos se enfrían hasta cerca de ese punto—, apenas tendrían energía y se comportarían como un solo átomo. Casi no influirían en sus alrededores, pero en gran cantidad serían capaces de desviar la luz, como una lente gravitacional.

Hasta el momento, no se han detectado, pero su existencia implicaría que las primeras galaxias habrían tenido una forma característica, por lo que el estudio de las más antiguas podría revelar algo al respecto.



El ensayo XENON1T, en Italia, podría haber dado con una prueba indirecta de la existencia de los axiones.

COLABORACIÓN XENON



La aniquilación de la materia oscura quizá origine neutrinos. El CERN alberga este prototipo del futuro detector DUNE, especializado en captar esas partículas, que será veinte veces mayor y empezará a funcionar en 2026, en Estados Unidos.

CERN