

LA INSOPORTABLE AUSENCIA DE MONOPOLOS MAGNÉTICOS

La definición de un monopolo magnético es simple, casi intuitiva: en la jerga de la física de partículas, que estudia los componentes más elementales de la materia, un monopolo magnético sería una partícula con carga magnética y que por tanto sería atraída o repelida en presencia de otro monopolo con carga magnética de mismo u opuesto signo. El lector atento habrá ya adivinado hacia dónde nos dirigimos: sabemos que existen partículas con carga eléctrica, que llamamos positiva o negativa, y que son atraídas o repelidas en presencia de otras partículas cargadas eléctricamente. El electrón y el protón son ejemplos típicos. La carga eléctrica de dos partículas determina la intensidad de la fuerza con la que se van a atraer o repeler dichas partículas a través de la conocida fórmula clásica de la fuerza entre dos cargas; proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas. Toda la tecnología electrónica moderna está basada en la manipulación de cargas eléctricas en circuitos contruidos ad-hoc para realizar distintas tareas. Si la electricidad está basada en la existencia de cargas eléctricas, ¿por qué aparentemente no existen partículas con carga magnética, monopolos, que expliquen los fenómenos magnéticos? ¹

He aquí uno de los más interesantes misterios de la física moderna. Obviamente existen imanes, pero éstos son objetos macroscópicos, no elementales, y siempre tienen dos polos que tradicionalmente se han llamado “norte” y “sur” aunque ésta es una nomenclatura arbitraria. Podíamos igualmente decir que los imanes tienen un lado positivo y otro negativo o que tienen un lado con carga A y otro con carga B. O cualquier otra notación. Lo importante es que no hay imanes con sólo un polo “norte” o sólo un polo “sur” (prueben en casa a dividir por la mitad un imán y se encontrarán con dos imanes, cada uno con dos polos opuestos en sus extremos). Y esto se traslada a los componentes fundamentales de la materia: a día de hoy, y tras muchos esfuerzos de búsqueda como mencionaremos más abajo, no se ha observado ninguna partícula que tenga una sola carga magnética, ya sea “norte” o “sur”.

Los físicos de partículas tratamos de explicar la aparente complejidad de la naturaleza en términos de los mínimos componentes posibles y sus interacciones. Es una aproximación reduccionista para algunos pero que ha demostrado ser de un éxito abrumador. Con 13 partículas elementales (sin contar las respectivas antipartículas) y las distintas fuerzas que actúan entre ellas (eléctrica, magnética, nuclear fuerte y nuclear débil), la física moderna explica prácticamente todos los fenómenos observados en la naturaleza, desde la explosión de una estrella hasta el funcionamiento de la red eléctrica que proporciona electricidad a una casa. El marco matemático que describe las características de las partículas elementales y sus interacciones (con excepción de la gravedad) se ha dado en llamar el Modelo Estándar de física de partículas. Pero esto no quiere decir que nos encontremos en el umbral del fin de la física. Quedan cosas por explicar, y la ausencia de monopolos es una de ellas. Podría ser que el universo es simplemente así y sea inútil buscar más explicaciones. Pero la aparente inexistencia de monopolos no es una cuestión tan fácil de ignorar ya que según el Modelo Estándar no hay razón alguna para que los monopolos no existan. Aún es más, existen teorías de la unificación de las fuerzas de la naturaleza que intentan completar el Modelo Estándar, y *predicen* la existencia de monopolos magnéticos. Pero empecemos por el principio.

Uno de los objetivos más ambiciosos de la física es unificar las fuerzas eléctrica, magnética, nuclear fuerte y nuclear débil bajo un único marco matemático que vaya más allá del Modelo Estándar. Tal teoría se llama GUT por sus siglas en inglés, correspondientes a Teoría de Gran Unificación, y su formulación satisfactoria ha escapado a las mentes más brillantes hasta el momento. Fue a lo que Einstein dedicó los últimos años de su vida sin éxito. De hecho se habla de GUTs, en plural, ya que hay varias propuestas en el mercado.² Pero un primer paso en la unificación de las fuerzas se dió ya en el siglo XIX. Históricamente los fenómenos eléctricos y magnéticos se entendían como fenómenos aislados sin ninguna relación entre sí. De hecho es muy difícil sin un mínimo desarrollo tecnológico entender la electricidad o el magnetismo, que durante muchos siglos se redujo a la observación de que algunas rocas como la magnetita atraían el metal, que algunos materiales como el ámbar podían atraer objetos livianos como plumas si se frotaban contra otro material o que algunos animales como las anguilas tenían la capacidad de provocar un choque (que hoy llamaríamos electrochoque) si una parte del cuerpo se ponía en contacto con ellos. Todos estos efectos tenían un origen desconocido y se puede entender que no se relacionaran entre sí. Hasta 1862. Lo que nos lleva al siguiente punto de nuestra historia.

MONOPOLOS CLÁSICOS

En ese año el físico escocés James Clerk Maxwell logró describir los efectos causados por la existencia de un campo eléctrico y los causados por la existencia de un campo magnético con un único conjunto de, originalmente, veinte ecuaciones que relacionaban esos dos aparentemente distintos fenómenos. En una palabra, logró unificar las fuerzas eléctrica y magnética en lo que hoy los físicos llamamos, sin mucha imaginación, la fuerza electromagnética. Como

¹ En el resto del artículo emplearé el término monopolo y monopolo magnético de forma intercambiable.

² La unificación de la gravedad con las otras fuerzas presenta problemas adicionales debido a su estructura matemática cuya discusión va más allá del alcance de este artículo.

ocurre siempre en ciencia, Maxwell se valió del trabajo previo de muchos otros investigadores como Charles Coulomb, Carl Friedrich Gauss, Michael Faraday o André-Marie Ampère entre otros. La forma moderna de escribir las ecuaciones de Maxwell se debe a Oliver Heaviside y es en forma vectorial, reduciéndolas a las cuatro famosas expresiones que relacionan variaciones espacio-temporales de los campos eléctrico y magnético con la presencia de cargas y corrientes eléctricas de una forma extremadamente elegante. Este logro de Maxwell constituye el primer paso en la unificación de fuerzas.

A pesar de tal logro, Maxwell se encontró con un dilema. Sus ecuaciones describen el origen de un campo eléctrico estático como resultado de la presencia de cargas eléctricas. Algo similar debería ocurrir con un campo magnético. Pero no existía evidencia en la época de la existencia de cargas magnéticas aisladas (monopolos) así que Maxwell no dudó en poner un simple cero en el lugar en dónde debería aparecer una carga magnética en sus ecuaciones. Según la teoría de Maxwell, los campos magnéticos son producidos por cargas eléctricas en movimiento, no por “cargas magnéticas” aisladas. *Spoiler*: seguimos sin tener evidencia de la existencia de monopolos magnéticos, como veremos en el resto del artículo, y la forma que aún hoy tenemos de crear campos magnéticos es a través de corrientes eléctricas. Piénsese en la estructura de un electroimán.

Las ecuaciones de Maxwell se encuadran dentro de la *física clásica*, en compañía de la mecánica de Newton. Pero sabemos desde principios del siglo XX que la física clásica no puede describir los fenómenos subatómicos y que un cambio de paradigma fue necesario, dando lugar a la mecánica cuántica. No es el objetivo de este artículo entrar en los detalles de la mecánica cuántica, pero siendo los monopolos partículas con carga magnética es interesante preguntarse si la mecánica cuántica puede admitir en su seno tales partículas o si, por el contrario, las nuevas premisas de la mecánica cuántica son incompatibles con la existencia de cargas magnéticas aisladas (lo que hubiera resuelto el problema de su aparente inexistencia). Fue Paul Dirac, quizás más conocido por su propuesta de la existencia de la antimateria, quien en 1931 logró describir una hipotética carga magnética en el marco de la nueva mecánica. Es decir, aunque no estrictamente predichos por la mecánica cuántica, los monopolos pueden incorporarse a la teoría sin problemas si realmente existen. Pero no sólo eso, la descripción cuántica de cargas magnéticas de Dirac trajo consigo un regalo difícil de ignorar: la descripción cuántica de cargas magnéticas aisladas predice que necesariamente la carga eléctrica *debe* de estar cuantizada. Y sabemos que la carga eléctrica está cuantizada: las partículas subatómicas presentan siempre múltiplos enteros de una carga fundamental, la carga del electrón. La tesis contraria también es cierta: la existencia de cargas eléctricas implica que la carga magnética de los monopolos, si existen, debe de estar cuantizada. Desafortunadamente, la observación de que la carga eléctrica está cuantizada no implica necesariamente la existencia de monopolos, o sea que la teoría de Dirac no puede ser utilizada para demostrar, aunque sea de forma indirecta, la existencia de monopolos. Simplemente establece qué características tendrían las cargas magnéticas. Pero como Dirac escribió en su artículo de 1931, “sería sorprendente que la Naturaleza no hubiera hecho uso de [polos magnéticos aislados]”. El modelo de Dirac también implica que la interacción magnética es mucho más intensa que la eléctrica. La atracción o repulsión entre dos cargas magnéticas sería unas 4700 veces más fuerte que la fuerza eléctrica entre dos cargas eléctricas elementales, como dos electrones por ejemplo.

MONOPOLOS GUT

La mecánica cuántica fue el primer paso hacia la física de partículas moderna, basada en la teoría cuántica de campos relativista. En este marco las partículas elementales no son los entes más fundamentales de la teoría, sino que la teoría describe el comportamiento de estructuras extensas que toman valores en cada punto del espacio-tiempo (campos). Las partículas elementales en esta descripción son excitaciones de los campos (valores del campo distintos de cero) en un punto dado del espacio-tiempo. El desarrollo de la teoría cuántica de campos facilitó el segundo paso hacia la unificación de las fuerzas. En los años 60 del pasado siglo, Steven Weinberg, Abdus Salam y Sheldon Glashow lograron unificar la fuerza electromagnética con la fuerza nuclear débil y recibieron el premio Nobel de física por ello en 1979. De nuevo, y sin mucha imaginación, los físicos llamamos a esa fuerza la fuerza electrodébil. El Modelo Estándar de física de partículas es una teoría cuántica de campos y describe los fenómenos regidos por la fuerza electrodébil y la fuerza nuclear fuerte bajo un marco matemático consistente, y ha sido validado en cada experimento que se ha llevado a cabo para probarlo. Sin embargo sabemos que no puede ser la teoría final. El Modelo Estándar no unifica realmente la fuerza nuclear fuerte con la electrodébil ni incluye la gravitación en su formalismo matemático (la teoría de la Relatividad General de Einstein sigue siendo una teoría clásica, sin que se haya logrado su versión cuántica, que sería el primer paso para tratar de incluirla en el Modelo Estándar). El modelo tampoco explica qué es la materia oscura, ni las masas de los neutrinos ni por qué la materia dominó en algún momento sobre la antimateria en la evolución inicial del Universo. Todo esto hace que los físicos estemos convencidos de que tiene que haber “física más allá del Modelo Estándar”, todavía sin descubrir. Las teorías GUT son un paso hacia adelante y precisamente tratan de predecir qué es esa nueva física. Pero lo hacen sin guía experimental ya que la energía a la que se manifestaría la nueva física no está al alcance de los aceleradores actuales. De ahí que haya varios “sabores” de teorías GUT.

Aún está más lejos del objetivo de este artículo el profundizar en los detalles de las teorías cuánticas de campos, pero la

cuestión que nos planteamos al introducir la mecánica cuántica es todavía relevante: ¿son los monopolos magnéticos compatibles con las teorías cuánticas de campos? Y la respuesta es de nuevo afirmativa: no hay nada que prohíba la existencia de cargas magnéticas aisladas en dichas teorías. Es más, los físicos Gerard t'Hooft y Alexander Polyakov llegaron independientemente en 1974 a la conclusión que bajo ciertas condiciones las teorías GUT predicen la existencia de monopolos magnéticos, es decir, no sólo son compatibles con su existencia, sino que los monopolos magnéticos *han de existir* para que la teoría sea consistente. Una peculiaridad de los monopolos predichos por t'Hooft y Polyakov es que no son partículas elementales, como los electrones, o los monopolos descritos por Dirac, sino que poseen una subestructura bastante complicada: los monopolos GUT son objetos complejos formados tanto por partículas elementales conocidas (quarks, electrones, bosones, etc) como por nuevas partículas predichas por la teoría GUT, todas confinadas en un radio de unos 10^{-13} cm (el radio del protón es 100 veces más pequeño, 10^{-15} cm). Tal amasijo de partículas conspira para crear un campo magnético que decrece como el inverso de la distancia al cuadrado desde la superficie del monopolo, comportándose a todos los efectos prácticos como una carga magnética puntual. Sin embargo, aunque las teorías GUT necesitan de monopolos para ser consistentes, no predicen con exactitud la masa de éstos. Un monopolo GUT puede tener una masa de 10^3 GeV (cien mil veces la masa de un átomo de Hidrógeno) hasta 10^{16} GeV (diez mil billones de veces la masa de un átomo de Hidrógeno). Por lo tanto nos queda a nosotros, los físicos experimentales, tratar de detectar monopolos magnéticos y establecer qué características ha elegido la Naturaleza para ellos. Si es que existen para empezar, porque nunca se ha observado una carga magnética aislada. ¿Dónde se podrían observar entonces?

¿QUE OCURRIÓ AL PRINCIPIO DEL UNIVERSO?

Uno de los laboratorios más eficientes que tenemos los físicos de partículas para validar, o falsar, las teorías sobre la estructura de la materia es el universo mismo. En particular las primeras fracciones de segundo de la evolución del universo. Ahí se daban unas condiciones tales de densidad de energía que, de acuerdo con la conocida ecuación de Einstein sobre la equivalencia de masa y energía, pares de partícula-antipartícula (para conservar la carga eléctrica) se podían crear simplemente por conversión de energía en masa. Y no hay razón para que una cantidad enorme de monopolos (y anti-monopolos) magnéticos, comparable a la cantidad de materia en el Universo, se crearan de esa forma. Al ser partículas estables, una gran cantidad de monopolos magnéticos debería vagar aún hoy por el universo formando parte del flujo de rayos cósmicos que continuamente bombardea la Tierra y que sabemos que, sin embargo, consiste mayoritariamente (99%) de protones y una pequeña fracción de otros núcleos atómicos más pesados. Tras muchas décadas de monitorizar la radiación cósmica que llega a la Tierra, con detectores cada vez más sofisticados, no se ha detectado ningún monopolo magnético en tal flujo. Esto no quiere decir que no existan, simplemente que su densidad en el universo es mucho menor que la predicha. El hecho de que nuestra teoría sobre la evolución inicial del universo prediga una densidad de monopolos no observada se ha dado en llamar “el problema de los monopolos”, y constituye una de las más substanciales diferencias encontradas en física entre una sólida predicción teórica y un resultado experimental.

Los resultados negativos en ciencia son muchas veces tan, o más, interesantes que la simple corroboración experimental de una teoría. ¡Que aburrida sería la física si solamente se tratara de medir efectos que siempre estuvieran de acuerdo con los cálculos teóricos! El “problema de los monopolos” es tan serio que tuvo consecuencias en un campo aparentemente sin relación directa: la cosmología. Junto al problema de la observada uniformidad del Universo a grandes distancias y en todas direcciones, el “problema de los monopolos” dió lugar a la teoría de la inflación. Según esta teoría el Universo no se expandió a una velocidad uniforme desde su origen, sino que pasó inicialmente por una fase de expansión exponencial, llamada fase de inflación, que duró entre los primeros 10^{-35} y 10^{-32} segundos.

Si, como predicen las teorías GUT, cantidades ingentes de monopolos se crearon en los primeros 10^{-35} segundos de vida del Universo, justo antes del periodo de expansión inflacionario, la rápida expansión durante dicho periodo diluye de forma exponencial la densidad de monopolos de modo que, al final de la inflación, su número por unidad de volumen ha caído a niveles prácticamente indetectables hoy en día. La inflación explica de ese modo por qué la densidad de monopolos magnéticos es hoy tan baja para que no se hayan detectado entre los rayos cósmicos, reconciliando la teoría con la observación experimental. Como la teoría de la inflación resuelve al mismo tiempo otros problemas en cosmología, ha pasado a formar parte de nuestro “modelo estándar” de la evolución del universo.

LA LARGA Y TORTUOSA BÚSQUEDA EXPERIMENTAL DE MONOPOLOS MAGNÉTICOS

A los físicos experimentales nos gusta probar las teorías aunque éstas predigan sucesos improbables. Al fin y al cabo la fortaleza de la ciencia reside en la posibilidad de falsar sus hipótesis. ¿Y si estamos encaminados por la ruta equivocada y realmente existen monopolos magnéticos en mayor cantidad que la predicha por las teorías GUT? Tendríamos entonces que cuestionarnos ciertos aspectos de tales teorías que a lo mejor nos orientan en la dirección correcta. O, por el contrario, la detección de un monopolo magnético con las características esperadas en las teorías GUT aportaría

apoyo a tales teorías. Por eso existe un amplio programa internacional de búsqueda de monopolos magnéticos utilizando diversas técnicas, que se pueden resumir en dos grandes enfoques: la búsqueda de monopolos remanentes del principio del Universo y la creación de monopolos en colisiones en aceleradores de partículas.

Monopolos magnéticos entre el flujo de rayos cósmicos:

Retomando la analogía entre magnetismo y electricidad, un monopolo magnético será acelerado por un campo magnético de forma similar a la que una carga eléctrica es acelerada en presencia de un campo eléctrico. Por tanto los monopolos magnéticos remanentes del periodo preinflacionario, que llamaremos también *monopolos cósmicos* para dejar claro su origen, se podrían acelerar en su largo viaje a través del cosmos al atravesar los campos magnéticos existentes en las galaxias y en el espacio entre éstas, ganando energía cinética. Aunque los campos magnéticos en el universo son muy débiles (del orden de 10^{-9} a 10^{-3} Gauss)³, su extensión espacial es muy grande (del tamaño de una típica galaxia a millones de veces mayor), por lo que la ganancia total de energía puede ser substancial para un monopolo no muy pesado que atravesase varios campos magnéticos a lo largo de la vida del universo. Se estima que podría haber monopolos con una energía de hasta $\sim 10^{14}$ GeV (diez mil millones de veces la máxima energía alcanzable en el acelerador LHC del CERN, el más potente en el mundo). Es decir, estamos hablando de monopolos que han podido alcanzar velocidades relativistas en la época actual, de hasta 99.9999% de la velocidad de la luz. Para monopolos pesados, con una masa mayor que aproximadamente 10^{11} GeV, se espera que la máxima velocidad posible alcanzada de esta forma será solamente una pequeña fracción de la velocidad de la luz y por tanto no serían relativistas en la época actual.

A falta de una predicción precisa sobre los posibles valores de la masa, la velocidad e incluso la abundancia esperada de monopolos magnéticos, las técnicas experimentales utilizadas en su búsqueda deben de ser lo más amplias posible. Pero antes de describir los experimentos que utilizamos para tratar de detectar monopolos magnéticos cósmicos, hay una observación experimental que se ha utilizado para poner un límite a su número en el universo, el llamado *límite de Parker*, en honor a Eugene Parker quien lo propuso en 1971. El razonamiento de Parker, se basa en el hecho de que la energía cinética que una carga magnética gana al ser acelerada en un campo magnético proviene de la correspondiente pérdida de energía acumulada en el propio campo magnético. No es más que una forma de expresar la conservación de la energía, pero que lleva a un efecto importante: una carga magnética libre de moverse en un campo magnético drenaría de energía a dicho campo, provocando eventualmente su desaparición. De modo que la mera existencia de campos magnéticos en las galaxias supone un límite superior al número de monopolos magnéticos que vagan por el universo (ha de ser menor que un cierto valor ya que de otra forma hubieran consumido los campos magnéticos de las galaxias a lo largo de la evolución del universo). El valor del límite de Parker al flujo de monopolos es de aproximadamente 10^{-15} monopolos por centímetro cuadrado, por segundo y unidad de ángulo sólido. En unidades un poco más asequibles, el límite de Parker se traduce en que si queremos utilizar un detector de un metro cuadrado de superficie (el típico tamaño de una mesa de comedor) tendríamos que esperar como poco unos 1000 años para detectar un monopolo magnético cósmico. En realidad el límite de Parker es incluso menor si se tiene en cuenta que los campos magnéticos de las galaxias comenzaron siendo más débiles que en la actualidad cuando las galaxias se encontraban en fase de formación. Hay ciertas situaciones en las que se evita el límite de Parker, por ejemplo si un grupo de monopolos presenta un movimiento coherente en una escala espacial típica del tamaño de una galaxia. En ese caso los monopolos pueden contribuir a regenerar el campo magnético en vez de drenarlo. Pero se trata de situaciones bastante improbables, y el límite de Parker ha pasado a ser un referente estándar al valor máximo del número de monopolos magnéticos que se puede esperar entre el flujo de rayos cósmicos.

El límite de Parker es sólo eso, un límite, y no una medida. Pero lo que dicho límite indica a un físico experimental es que el tamaño de los detectores que se necesitan para tener la más mínima probabilidad de detectar un monopolo entre el flujo de rayos cósmicos ha de ser monumental: del orden de kilómetros cuadrados. Nadie quiere esperar mil años para ver el resultado de su experimento. Afortunadamente existen varios detectores de gran tamaño que, aunque diseñados y construidos con otros objetivos en mente, se utilizan sistemáticamente para la búsqueda de monopolos. La detección de monopolos magnéticos cósmicos se basa siempre en los procesos que ocurren cuando un monopolo atraviesa materia ordinaria e interacciona a su paso con los átomos del material. Los monopolos son muy penetrantes, pudiendo atravesar la Tierra si poseen la velocidad adecuada, pero inducen ionización, fluorescencia o participan en interacciones atómicas, perdiendo parte de la energía inicial, que se traduce en la creación de nuevas partículas a lo largo de su trayectoria. Todos estos procesos producen emisión de luz que puede ser detectada con técnicas estándar. Adicionalmente un monopolo relativista puede emitir radiación Cherenkov como cualquier otra partícula al atravesar un material a una velocidad mayor que la velocidad de propagación de la luz en dicho material.

Sería demasiado largo describir en este artículo todos los experimentos que históricamente han contribuido a la búsqueda de monopolos magnéticos cósmicos por lo que mencionaremos únicamente dos proyectos importantes en este campo que están actualmente en funcionamiento: el Observatorio de rayos cósmicos Pierre Auger situado en la Pampa Argentina y el telescopio de neutrinos IceCube, en el Polo Sur. Aunque se trata de dos detectores muy distintos en cuanto a estructura y especialidad, comparten ciertos objetivos científicos, y la búsqueda de monopolos magnéticos es

3 Por comparación, el campo magnético en la superficie de la Tierra creado por su interior es de unos 0.2 Gauss

uno de ellos.

Con un tamaño de 3000 km², el Observatorio Pierre Auger es el detector de partículas más grande del mundo. Aunque estrictamente hablando no es un detector sino una red de 1660 detectores individuales de 12 m³ cada uno operando conjuntamente, separados 1.5 kilómetros entre si y que abarcan la superficie total mencionada. El Observatorio Pierre Auger ha sido construido para estudiar las partículas más energéticas que llegan a la Tierra desde el espacio exterior y que, al colisionar con átomos de la atmósfera a varias decenas de kilómetros de altitud, crean una auténtica cascada de partículas secundarias, muchas de las cuales llegan a la superficie. El observatorio también cuenta con 27 telescopios sensibles en el rango ultravioleta que miden la traza de fluorescencia producida por las partículas cargadas de la cascada al atravesar la atmósfera y excitar los átomos de Nitrógeno del aire. La detección en la superficie de los productos de la interacción original unida a la medida de la fluorescencia permite extraer información detallada sobre qué tipo de partícula inició la interacción, su energía y la dirección de llegada. Pero son los telescopios ultravioleta los que permiten la búsqueda de monopolos magnéticos. Un monopolo llegado del espacio exterior y que atraviese la atmósfera terrestre dentro del campo de visión de Auger va a producir una traza de luz debido a la interacción a lo largo de su trayectoria con los átomos del aire. Aunque la luz emitida no cae dentro del rango visible, sí puede ser captada por los telescopios ultravioletas. Y dadas las especiales características de la interacción de un monopolo con la materia ordinaria, dicha traza es muy distinta de la que producen las partículas resultantes de una interacción de un rayo cósmico. La limitación de dicha técnica es que es aplicable únicamente a monopolos con una velocidad cercana a la velocidad de la luz.

Para detectar monopolos cósmicos en un rango de energía más amplio es necesario utilizar otros detectores, y aquí es dónde entra el telescopio de neutrinos IceCube. IceCube consiste en 5600 sensores ópticos enterrados en el hielo antártico entre 1500 m y 2500 m de profundidad, distribuidos en un volumen de 1 km³. Aunque inicialmente construido para escudriñar el cielo en busca de neutrinos de alta energía, IceCube puede detectar monopolos cósmicos de una forma similar a Auger: a partir de la traza de luz que dejarían al atravesar el detector. Pero las distintas características del hielo respecto al aire hace que incluso monopolos “lentos”, con una velocidad de aproximadamente la mitad de la velocidad de la luz, dejen una traza que puede ser detectada por los módulos ópticos de IceCube.

Tras aproximadamente diez años de operación continua, ni Auger ni IceCube han observado ningún monopolo cósmico, lo que ayuda a restringir aún más el límite superior a su abundancia en el universo. Dependiendo de la velocidad considerada, los límites más estrictos sobre la abundancia de monopolos cósmicos derivados de la no-observación de Auger y IceCube se encuentran entre 10⁻¹⁸ y 10⁻²¹ monopolos por centímetro cuadrado, segundo y unidad de ángulo sólido. Es decir, un límite entre mil y un millón de veces más restrictivo que el límite de Parker. En unas unidades más asequibles, un límite al flujo de monopolos cósmicos de, por ejemplo, 10⁻¹⁸ por centímetro cuadrado, segundo y unidad de ángulo sólido quiere decir que menos de un monopolo llega la Tierra cada minuto de cualquier dirección. Y como se trata de un límite superior, el número real puede ser mucho menor, si es que existen.

Monopolos magnéticos atrapados en rocas y meteoritos:

El tiempo acumulado de búsqueda de monopolos cósmicos por todos los experimentos que se han llevado a cabo hasta el momento, unas pocas décadas a lo sumo, palidece en comparación con la duración del proceso de formación del sistema solar, unos cien millones de años. Y ese es el tiempo que tuvieron los monopolos remanentes del periodo preinflacionario para quedar atrapados en el interior de planetas durante su formación. La duración de dicho proceso podría compensar la baja probabilidad de que un monopolo quede atrapado en la materia ordinaria y resultar en que los cuerpos celestes contengan monopolos en su interior.

El único acceso que tenemos hoy en día a material planetario primigenio es a través de meteoritos o rocas antiguas del interior de la Tierra. Si existen monopolos atrapados en el interior de nuestro planeta éstos tenderán a alinearse a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético terrestre, siendo arrastrados al mismo tiempo por los procesos de convección en el manto. Dada la orientación del eje magnético de la Tierra el movimiento convectivo de los monopolos sería orientado hacia las zonas polares. Esto siempre que su masa no sea lo suficientemente grande como para que simplemente se hundan hacia el centro. Se estima que para masas menores que 10¹³ GeV los monopolos podrían participar del movimiento convectivo del manto. Por tanto, las rocas basálticas de regiones volcánicas de altas latitudes, como Islandia, Hawaii o la Antártida entre otras, son particularmente interesantes, ya que incluyen material antiguo, eyectado desde las profundidades del manto y que podría contener monopolos incrustados. Los meteoritos son interesantes de por si ya que provienen del material inicial a partir del cual se formaron los planetas del sistema solar o de fragmentos de antiguos protoplanetas presentes en dicha fase, y también podrían contener monopolos en su interior acumulados desde hace mas de cuatro mil millones de años.

Se han llevado a cabo varios experimentos diseñados para medir un posible campo magnético anómalo causado por la presencia de un monopolo en el interior de antiguas rocas terrestres, meteoritos e incluso en rocas traídas de la Luna por los astronautas de la misión Apolo 11. Dichos experimentos son conceptualmente fáciles y baratos de realizar, aunque no por eso triviales ya que muchos meteoritos y rocas terrestres poseen cierto grado de magnetismo natural. La presencia de un monopolo magnético en su interior se manifestaría como un sutil campo magnético adicional que se

puede medir con magnetómetros superconductores extremadamente sensibles llamados SQUIDS por sus siglas en inglés. Los SQUIDS permiten establecer la existencia de cargas magnéticas en una muestra de material sin la necesidad de extraerlas físicamente.

Desafortunadamente, todas las búsquedas de monopolos magnéticos atrapados en rocas y meteoritos llevadas a cabo hasta el momento han dado resultados negativos.

Producción de monopolos magnéticos en colisiones de partículas:

Los resultados negativos de la búsqueda de monopolos entre los rayos cósmicos y atrapados en cuerpos celestes indica que la densidad de monopolos en el universo es realmente baja. Puede que simplemente no sea medible en ninguna escala de tiempo razonable. Pero si los monopolos magnéticos realmente existen debería de ser posible producirlos en colisiones entre otras partículas elementales, aunque con una importante limitación: la masa de los monopolos que se pueden crear de esta forma está limitada a, como mucho, la energía del haz del acelerador. Si pensamos en el gran colisionador de hadrones, LHC, del Laboratorio Europeo para la Física de Partículas en Ginebra, la masa de los monopolos que pueden ser creados en las colisiones de protones sería de aproximadamente diez mil veces la masa de un átomo de Hidrógeno. Esto es mucho menor que las masas predichas por las teorías de unificación pero, como hemos indicado, no hay ninguna predicción mínimamente exacta de cuál debe de ser la masa de los monopolos. Aunque los aceleradores actuales no puedan alcanzar la energía necesaria para la producción de monopolos GUT, si que podrían producir monopolos más ligeros y sin estructura (el tipo de monopolos considerados por Dirac). Nótese que debido a la conservación de la carga (tanto eléctrica como magnética), un principio fundamental de la física, los monopolos creados en colisiones de partículas siempre se crearán en pares con “carga” opuesta ya que la carga magnética inicial de los haces que colisionan es nula.

La búsqueda de monopolos creados de ésta forma se basa en la búsqueda de trazas de partículas masivas altamente ionizantes en los detectores. Ésa sería la distintiva carta de presentación de un monopolo magnético atravesando los típicos detectores de, por ejemplo, los experimentos ATLAS y CMS en el CERN. Aunque el diseño de éstos detectores no fue optimizado para detectar cargas magnéticas, las características de un monopolo son tan distintas a las de una partícula neutra o cargada eléctricamente que serían fácilmente identificables. Se ha sugerido incluso centrar la búsqueda en los productos de la aniquilación de un par monopolo-antimonopolo, ya que es posible que, debido a la intensa atracción entre dos cargas magnéticas opuestas, los monopolos producidos en el LHC no se separen de forma apreciable apareciendo en los detectores como partículas independientes, si no que se aniquilen inmediatamente tras ser producidos a un par de fotones, que son fácilmente detectables en ATLAS o CMS. En ausencia de resultados positivos en su búsqueda ATLAS y CMS han puesto un límite a la masa inferior de monopolos con una unidad de carga magnética de unas cuatro mil veces la masa del protón.

Pero desde el año 2015 hay un detector en el CERN que sí ha sido concebido desde el principio específicamente para detectar monopolos magnéticos (estrictamente, para detectar partículas muy ionizantes, cualquiera que sea su naturaleza): el experimento MoEDAL por sus siglas en inglés de “Detector de Monopolos y Exótica en el LHC”. MoEDAL consiste de dos subdetectores especializados en detectar monopolos con distintas cargas magnéticas. Ochocientos kilos de aluminio en forma de barras rodean el punto en el cual se producen las interacciones entre los haces de protones del LHC con el objetivo de atrapar en su interior cualquier monopolo producido. Éste sistema es adecuado para atrapar monopolos con una carga de varias veces la carga elemental, ya que dichos monopolos perderían toda su energía inicial en el aluminio y quedarían ligados a un átomo del material. Dichas barras de aluminio se desmontan cada cierto tiempo y se pasan por un magnetómetro SQUID para detectar posibles cargas magnéticas en su interior. Por el contrario, los monopolos con una o dos unidades de carga magnética podrán atravesar el grosor de las barras de aluminio. Para éstos MoEDAL dispone de una serie de placas de material plástico en las cuales quedaría grabado el paso de un monopolo magnético. Esta es una conocida técnica en física nuclear para detectar radiación, que MoEDAL utiliza de forma novedosa para detectar monopolos. Una partícula altamente ionizante que atraviese dichas placas ocasionará un daño permanente en la estructura molecular del material de un tamaño de varias micras, que puede ser “revelado” mediante técnicas químicas. Un principio no muy diferente del de la fotografía tradicional. Las placas de MoEDAL se retiran tras aproximadamente un año de exposición y se revelan en busca de zonas dañadas. El tamaño y la profundidad del daño se puede relacionar con la carga de la partícula que lo ocasionó.

Tras unos cinco años en funcionamiento, MoEDAL tampoco ha sido capaz de detectar ningún monopolo magnético y, como el resto de experimentos mencionados, lo único que ha podido establecer es un límite a su masa: entre mil quinientas y cuatro mil veces la masa del protón, dependiendo de la carga y spin del monopolo.

EL FUTURO

Paul Dirac comentó en su artículo de 1931 que “todavía queda por discutir la cuestión de por qué no se han observado polos magnéticos aislados”. Noventa años después y tras decenas de experimentos dedicados a su búsqueda, nos seguimos haciendo la misma pregunta. Que todas las búsquedas experimentales de monopolos magnéticos hayan sido infructuosas hasta la fecha es como poco peculiar, ya que la interacción de los monopolos con la materia ordinaria se

llevaría a cabo a través de la interacción electromagnética, y tenemos desde hace tiempo la tecnología para detectar partículas cargadas a través los efectos que provocan a su paso por cualquier medio material. Por otra parte la ausencia de detección no implica la inexistencia de monopolos, simplemente que, si existen, poseen una masa y una densidad en el universo que no está al alcance de nuestros detectores actuales. Recuérdese que, por ejemplo, la partícula Higgs tardó unos 50 años en descubrirse después de que fuera propuesta de forma teórica. Aceleradores previos como el LEP, también en el CERN, buscaron el Higgs sin éxito, estableciendo límites inferiores a su masa pero sin llegar a ser lo suficientemente sensibles como para detectarlo.

Dada la importancia que la existencia de monopolos magnéticos tendría en nuestra comprensión del universo y de la estructura de la materia, la búsqueda experimental va a seguir con detectores cada vez más grandes o más sofisticados. Tanto el observatorio Auger como IceCube tienen planes de extender la capacidad de los detectores actuales, lo que incrementará la sensibilidad a un flujo de monopolos cósmicos menor que el alcanzado actualmente. Hay también nuevos detectores de rayos cósmicos en operación o fase de desarrollo. Y es que, ya que es imposible demostrar la inexistencia de monopolos, los físicos seguirán buscándolos mientras el avance en la tecnología de los detectores permita mejorar las posibilidades de su detección.

Para saber más

“Quantised singularities in the electromagnetic field”, P. A. M. Dirac, Proc. R. Soc. Lond. A13360–72, 1931.

“La búsqueda de la teoría final”, Corey S. Powel. Investigación y Ciencia, Noviembre 2015. (algo más reciente?)

Búsqueda en rocas ?

Auger: www.auger.org. Phys. Rev. D 94, 082002 (2016) (arXiv:1609.04451).

IceCube: icecube.wisc.edu. Phys. Rev. Lett. 128, 051101 (2022) (arXiv:2109.13719).

MoEDAL: moedal.web.cern.ch, Phys. Rev. Lett. 123, 021802 (2019).

Ventanas aparte:

Energías en Física de Partículas

En física de partículas las energías se miden en electronvoltios (eV), cuya definición técnica es la energía cinética que adquiere una unidad de carga eléctrica al ser acelerada por una diferencia de potencial de 1 Voltio.

Para hacerse una idea de cuánto corresponde ésta unidad téngase en cuenta que por ejemplo, la energía térmica de una molécula de oxígeno en el aire en una habitación a temperatura ambiente es de unos 0,04 eV. Los fotones de la luz visible tienen energías entre 1,5 y 3,5 eV y los rayos X de las máquinas de los hospitales, unos 10.000 eV, o 10 kiloelectronvoltios (keV).

Sobre el autor

Carlos Pérez de los Heros es doctor en Física por el Instituto Weizmann de Israel y actualmente catedrático de Física de Partículas en la Universidad de Uppsala (Suecia). Es investigador del proyecto IceCube (www.icecube.wisc.edu) desde hace más de 20 años y líder del grupo de trabajo que busca nueva física más allá del Modelo Estándar.