

EL MISTERIO DEL MUON

El hermano masivo del electrón ha estado durante años en el centro de un enigma experimental y teórico. Un resultado reciente sobre sus propiedades magnéticas ofrece una de las vías más prometedoras para descubrir nueva física

Lucius Bushnaq, Gregorio Herdoíza y Marina Krstić Marinković

EN SÍNTESIS

El electrón y su versión masiva, el muon, actúan como pequeños imanes que reaccionan ante la presencia de campos magnéticos. Dicho comportamiento depende de una propiedad de estas partículas conocida como momento magnético.

Al contrario que otras propiedades, como la masa o la carga, el momento magnético de una partícula puede predecirse mediante un complejo cálculo teórico. Históricamente, su estudio fue clave para establecer la física de partículas moderna.

Un experimento ha hallado una discrepancia entre el momento magnético del muon y su predicción teórica. Sin embargo, un cálculo alternativo basado en tratar el espaciotiempo como formado por «píxeles» sugiere un acuerdo entre teoría y experimento.

LAS PARTÍCULAS VIRTUALES asociadas al vacío cuántico dictan el modo en que un muon (*azul, representación artística*) interactúa con un campo magnético. Medir con detalle dicha interacción podría aportar pruebas sobre la existencia de nuevas partículas elementales en la naturaleza.



Lucius Bushnaq es físico teórico de partículas del Trinity College de Dublín. Su investigación se centra en mejorar los métodos estadísticos usados en cromodinámica cuántica en el retículo.

Gregorio Herdoza es físico teórico de partículas de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) y el Instituto de Física Teórica, un centro mixto de la UAM y el CSIC. Estudia las interacciones fuertes mediante técnicas de cromodinámica cuántica en el retículo y su relación general con el modelo estándar.

Marina Krstić Marinković es profesora de física computacional en el Instituto Politécnico de Zúrich. Trabaja en simulaciones de cromodinámica y electrodinámica cuántica en el retículo para explorar las posibles diferencias entre las predicciones teóricas y los resultados experimentales.



EL PASADO 7 DE ABRIL

estaba marcado en los calendarios de miles de físicos de partículas de todo el mundo. Ese día, una videoconferencia desde el Laboratorio Nacional de Aceleradores Fermi (Fermilab), cerca de Chicago, iba a anunciar los primeros resultados de un experimento largamente esperado.

El experimento, llamado Muon $g - 2$, había sido concebido para medir con una precisión exquisita cierta propiedad magnética del muon, una partícula elemental casi idéntica al electrón pero unas 200 veces más masiva. Había mucho en juego, ya que el magnetismo del muon ha sido considerado desde hace años uno de los candidatos más prometedores para revelar una grieta en el modelo estándar, la teoría que describe el comportamiento de todas las partículas elementales conocidas y sus interacciones salvo la gravedad.

El modelo estándar cuenta con un legendario historial de haber superado todas y cada una de las pruebas experimentales a las que se ha visto sometido. Sin embargo, sabemos también que no puede ser la teoría final de la naturaleza. Entre otras cosas, no incluye la gravedad y tampoco explica fenómenos como el de la materia o la energía oscuras. Por ello, encontrar un fallo en el modelo estándar (es decir, un desacuerdo concluyente entre un resultado experimental y las predicciones de la teoría) es considerado desde hace tiempo el santo grial de la física de partículas: un punto de partida que permitiría tirar del hilo para llegar a una teoría más fundamental del universo.

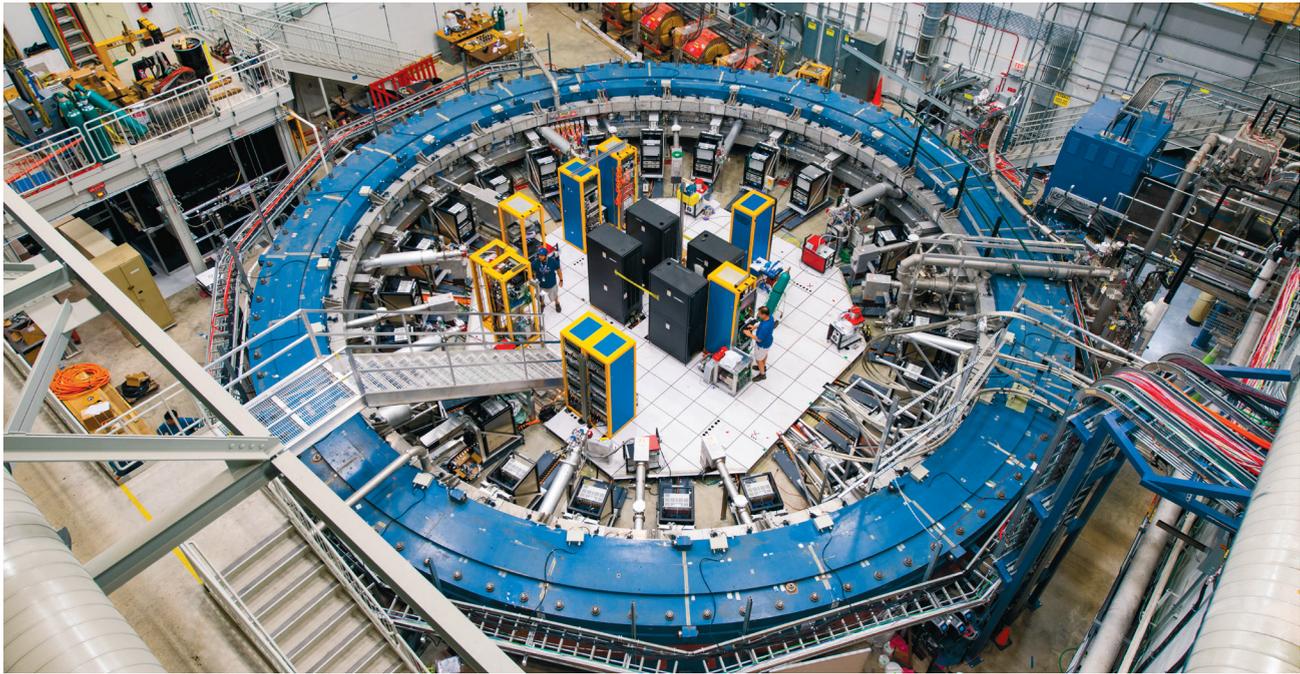
Los resultados de Muon $g - 2$ llegaban dos décadas después de que su predecesor, el experimento E821 del Laboratorio Nacional de Brookhaven, cerca de Nueva York, hubiera encontrado una tentadora discrepancia entre las propiedades magnéticas del muon y la predicción del modelo estándar. Sin embargo, dicha predicción teórica resulta extremadamente difícil de calcular, por lo que quedaban muchas preguntas abiertas.

Durante los veinte años transcurridos entre los resultados de Brookhaven y los del Fermilab, numerosos físicos teóricos de todo el mundo trabajaron para mejorar las técnicas de cálculo y afinar todo lo posible la predicción del modelo estándar. La inminente llegada del experimento Muon $g - 2$ dio un enorme impulso a ese esfuerzo global y, en diciembre de 2020, este cristalizó en la publicación de un «valor de consenso» para la pre-

dicción teórica del magnetismo del muon. Según dicho cálculo, la discrepancia entre la teoría y los resultados experimentales obtenidos en Brookhaven seguía existiendo.

El resultado anunciado en Fermilab el pasado 7 de abril ratificó el de Brookhaven. Las implicaciones eran de primer orden. Por un lado, la nueva medición daba un espaldarazo a las técnicas experimentales empleadas. Pero, además, la combinación de ambos resultados permitió obtener una medición aún más precisa del magnetismo del muon. En total, la discrepancia entre la teoría y el experimento ascendía a 4,2 sigmas, donde la letra griega sigma es el símbolo que usamos los científicos para referirnos a la incertidumbre total, procedente tanto de la teoría como del experimento. Esta «escala de sigmas» es el método habitual empleado en física de partículas para cuantificar cuán lejos se halla un resultado experimental de su predicción teórica. Una desviación de 4,2 sigmas quiere decir que la probabilidad de obtener dicho resultado por pura casualidad (es decir, sin que hayan intervenido nuevos fenómenos físicos) es de menos de uno entre 10.000. Sin embargo, y aunque ello suponga un fuerte indicio de haber observado nueva física, es importante señalar que tal desviación no cuenta como un descubrimiento en física de partículas, donde, para proclamar un hallazgo, es necesario alcanzar el umbral de 5 sigmas (correspondientes a una probabilidad de menos de uno entre un millón de haber obtenido dicho resultado por casualidad).

Sin embargo, ese mismo 7 de abril, un giro en los acontecimientos añadió una nueva capa de complejidad a la historia. Aquel día se publicó un nuevo cálculo teórico sobre la contribución más decisiva al magnetismo total del muon. Dicho resultado, obtenido por una colaboración internacional conocida como Budapest-Marsella-Wuppertal (BMW), se basaba en un enfoque teórico completamente distinto. En lugar de tratar el espacio y el tiempo como una entidad continua, dicho método, conocido como «cromodinámica cuántica en el retículo», modeliza el es-



EL EXPERIMENTO Muon $g - 2$, en el Laboratorio Nacional de Aceleradores Fermi, consta de un anillo magnético superconductor de 15 metros de diámetro. A medida que los muones lo recorren, el campo magnético induce un movimiento de precesión en el espín de las partículas.

paciotiempo como una red de puntos. Este enfoque proporciona una solución a las complejas ecuaciones que rigen la dinámica de quarks y gluones, los componentes básicos del protón y el neutrón. Y, contrariamente a lo que indicaba el cálculo de 2020, el resultado de la colaboración BMW sugería un acuerdo entre la teoría y el experimento.

La historia del estudio del magnetismo del muon proporciona un excelente ejemplo de cómo la interacción entre teoría y experimento ha ayudado a validar nuestra imagen del universo. Ahora, los físicos nos enfrentamos a un nuevo rompecabezas: bien el de la discrepancia entre los diferentes cálculos teóricos, el de la desviación entre la teoría y el experimento, o ambos.

UNA VENTANA ÚNICA A UN MUNDO VIRTUAL

Para entender los nuevos resultados relativos al muon, conviene comenzar considerando una partícula más familiar: el electrón. Un electrón posee carga eléctrica y espín, el número cuántico que caracteriza su momento angular intrínseco. Juntas, estas dos propiedades determinan la manera en que la partícula interactúa con los campos eléctricos y magnéticos. La interacción de un electrón con un campo magnético depende de una propiedad de la partícula llamada momento magnético. Si imaginamos el electrón como un pequeño imán, su momento magnético esencialmente cuantifica la intensidad del campo magnético del propio electrón.

El valor que toma el momento magnético del electrón está relacionado con su espín por medio de un único número, el llamado «factor g ». En las unidades adecuadas, el momento magnético es simplemente g veces el espín del electrón. El factor g es una cantidad adimensional (un número puro, sin unidades físicas) que, como veremos enseguida, resulta ser extremadamente cercano a 2. Un punto clave es que, a diferencia de otras propiedades del electrón, como su masa o su carga eléctrica, el factor g no es un parámetro fundamental del modelo estándar. Eso significa que su valor puede derivarse a partir de primeros

principios. En otras palabras: podemos usar el modelo estándar para predecir qué fuerza ejercerá sobre un electrón un campo magnético externo.

Los ladrillos del modelo estándar son campos cuánticos que interactúan entre sí. Cada uno de esos campos se halla asociado a una partícula elemental con una determinada carga, masa y espín. Las interacciones electromagnéticas están mediadas por fotones. Por tanto, el efecto de un campo magnético sobre un electrón queda descrito por la interacción entre el campo del fotón y el del electrón.

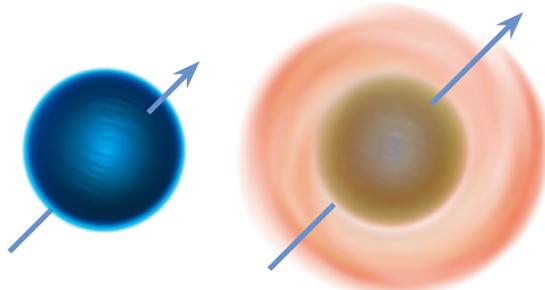
Sin embargo, las leyes cuánticas nos dicen que, si queremos calcular dicha interacción, no podemos limitarnos a considerar electrones y fotones. En su lugar, tendremos que incorporar también los efectos de las llamadas «partículas virtuales»: estados intermedios que se crean durante dicha interacción y que se reabsorben rápidamente antes de que podamos observarlos de manera directa. Tales intercambios virtuales incluyen todas las partículas e interacciones del modelo estándar. Por ejemplo, en ellos intervienen los electrones y sus réplicas más masivas (el muon y el tauón); los bosones W y Z , encargados de transmitir la interacción débil; y también quarks y gluones.

Si descartamos las contribuciones derivadas de las partículas virtuales, el cálculo del factor g del electrón arroja un valor exactamente igual a 2. Sin embargo, cuando incluimos los efectos virtuales, el número final resulta ser ligeramente mayor que 2. Esa desviación del valor $g = 2$ debida a los efectos virtuales recibe el nombre de «momento magnético anómalo» del electrón, o $g - 2$.

Las mismas consideraciones se aplican al muon, una partícula elemental casi idéntica al electrón solo que inestable (se desintegra espontáneamente en unos 2 microsegundos) y unas 200 veces más masiva. Al igual que su hermano más ligero, también el muon tiene un momento magnético, y también su factor g resulta ser ligeramente mayor que 2 debido a los efectos de las partículas virtuales.

Una ventana al vacío cuántico

El muon (azul) es una partícula elemental casi idéntica al electrón, solo que inestable y más masiva. Puede imaginarse como un pequeño imán capaz de interactuar con un campo magnético externo. Esa interacción depende de una propiedad de la partícula conocida como momento magnético (flecha). En las unidades adecuadas, este viene dado por un número adimensional usualmente denotado por g .



Despreciar los efectos de las partículas virtuales implica un valor $g = 2$

Incorporar los efectos de las partículas virtuales implica un valor $g > 2$

El valor de g puede predecirse a partir de primeros principios. Depende del modo en que el muon interactúa con las «partículas virtuales» (naranja) que, según las leyes cuánticas, impregnan el espacio vacío. Por tanto, una medición muy precisa de g puede proporcionar información sobre el vacío cuántico y, en principio, sobre la existencia de nuevas partículas elementales en la naturaleza.

Desde hace más de 70 años, el estudio del momento magnético del electrón y del muon ha proporcionado uno de los campos más fecundos para comparar las predicciones teóricas con los resultados experimentales. Ello se debe a que ambas cantidades pueden medirse experimentalmente con una precisión asombrosa, y a que sus valores teóricos pueden calcularse con el mismo nivel de precisión. Eso ha permitido hacer comparaciones entre teoría y experimento con unos niveles de precisión que carecen de parangón en cualquier otro campo de la ciencia.

En el caso de un electrón, el valor de su momento magnético puede determinarse, tanto teórica como experimentalmente, con una precisión de menos de una parte entre mil millones. En otras palabras: la incertidumbre es mil millones de veces menor que el valor en sí. Hoy por hoy, el acuerdo entre el valor experimental y la predicción teórica del momento magnético del electrón proporciona la prueba más precisa hasta la fecha de la validez del modelo estándar.

Dado que el muon es unas 200 veces más masivo que el electrón, su momento magnético resulta ser unas $200^2 = 40.000$ veces más sensible a los efectos virtuales debidos a partículas masivas. Por tanto, si en la naturaleza existen nuevas partículas e interacciones más allá de las incluidas en el modelo estándar, sus efectos podrían delatarse en el momento magnético del muon. Dichos efectos se manifestarían como una discrepancia entre el valor medido experimentalmente y la predicción teórica del

modelo estándar. En principio, el momento magnético del tauón, otra «versión pesada» del electrón pero 3.500 veces más masiva, proporcionaría una sensibilidad aún mayor a nuevos fenómenos físicos. Sin embargo, su extremadamente corto tiempo de desintegración (menos de una trillonésima de segundo) impide por ahora medir con precisión su momento magnético.

Así pues, el momento magnético del muon constituye un ejemplo único de una cantidad que puede determinarse con una enorme precisión tanto experimental como teóricamente, y la cual esperamos que sea sensible a fenómenos físicos más allá del modelo estándar. Ello nos ofrece una manera indirecta pero muy prometedora de obtener pistas sobre la existencia de nuevas partículas, la cual resulta complementaria a la usada en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, donde lo que se persigue es crear directamente esas nuevas partículas en colisiones de muy alta energía.

LA HISTORIA DE UNA ANOMALÍA

Además de constituir un fascinante objeto de investigación por derecho propio, el estudio del momento magnético del electrón —y, posteriormente, el del muon— desempeñó un papel esencial a la hora de perfilar nuestra comprensión actual de la física de partículas.

La historia se remonta a 1924, cuando Wolfgang Pauli, uno de los fundadores de la mecánica cuántica, construyó un formalismo de la electrodinámica cuántica que incorporaba el espín del electrón. Cuatro años más tarde, Paul Dirac amplió dicha formulación y derivó la ecuación que hoy lleva su nombre, la cual unificaba la descripción cuántica del electrón con los principios de la relatividad especial. Dirac se percató de que «una ventaja totalmente inesperada» de su ecuación era que permitía predecir el momento magnético del electrón. El valor calculado a partir de la ecuación de Dirac correspondía a un factor g igual a 2.

Otra consecuencia notable de la ecuación de Dirac fue que predecía la existencia de antipartículas, como el positrón, la antipartícula del electrón. En los años treinta, eso condujo a una formulación más general en la que las partículas y las antipartículas se convirtieron en los cuantos asociados a los distintos campos. En este formalismo, las interacciones debían incorporar el intercambio de partículas virtuales. Sin embargo, pronto apareció un problema: las contribuciones de las partículas virtuales eran a menudo aparentemente infinitas, lo que daba lugar a predicciones carentes de sentido. La solución de este problema tardaría unos años en llegar y exigiría una comprensión más profunda sobre cómo relacionar los parámetros fundamentales de la teoría con los resultados experimentales.

Justo después de la Segunda Guerra Mundial, un grupo de jóvenes físicos liderados por Isidor Isaac Rabi, de la Universidad de Columbia, comenzó a hacer medidas de precisión de los niveles energéticos del átomo de hidrógeno. En 1947, Willis Lamb anunció un impactante hallazgo: dos niveles energéticos que debían ser idénticos según la teoría de Dirac eran en realidad diferentes. El descubrimiento de este «desplazamiento de Lamb» tuvo inmediatamente una enorme repercusión. Un año más tarde, Polykarp Kusch y Henry M. Foley, también de Columbia, midieron el momento magnético del electrón usando los mismos métodos de resonancia magnética que hoy se emplean de manera rutinaria en las imágenes médicas. Su trabajo halló un valor que difería con respecto a la predicción de Dirac en más de 20 sigmas, muy por encima del umbral de 5 sigmas exigido hoy para proclamar un descubrimiento.

En el verano de 1947, dos jóvenes físicos teóricos, Julian Schwinger y Richard Feynman, abordaron el problema. Schwinger observó que, en realidad, el desplazamiento de Lamb y el momento magnético anómalo del electrón estaban conectados entre sí. Ello cambió por completo la percepción de la electrodinámica cuántica. En abril de 1948, Schwinger y Feynman habían desarrollado sendos esquemas de cálculo que, a primera vista, parecían totalmente distintos. Sin embargo, ambos podían reproducir los resultados experimentales, lo que les convenció de que, tal y como lo describiría Feynman, habían «escalado la misma montaña desde lados diferentes». El método de Feynman aportó también una manera de visualizar las interacciones entre partículas mediante sus hoy célebres diagramas, los cuales tenían la ventaja añadida de que permitían realizar los cálculos de manera muy eficiente. Pronto se supo que, en Japón, durante la guerra, Shin'ichiro Tomonaga había desarrollado su propia formulación de la electrodinámica cuántica. En 1949, en un extraordinario esfuerzo de síntesis, Freeman Dyson, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, estableció la equivalencia de los tres formalismos y demostró, además, que las predicciones de la teoría estaban libres de las cantidades infinitas que tanta preocupación habían causado unos años atrás.

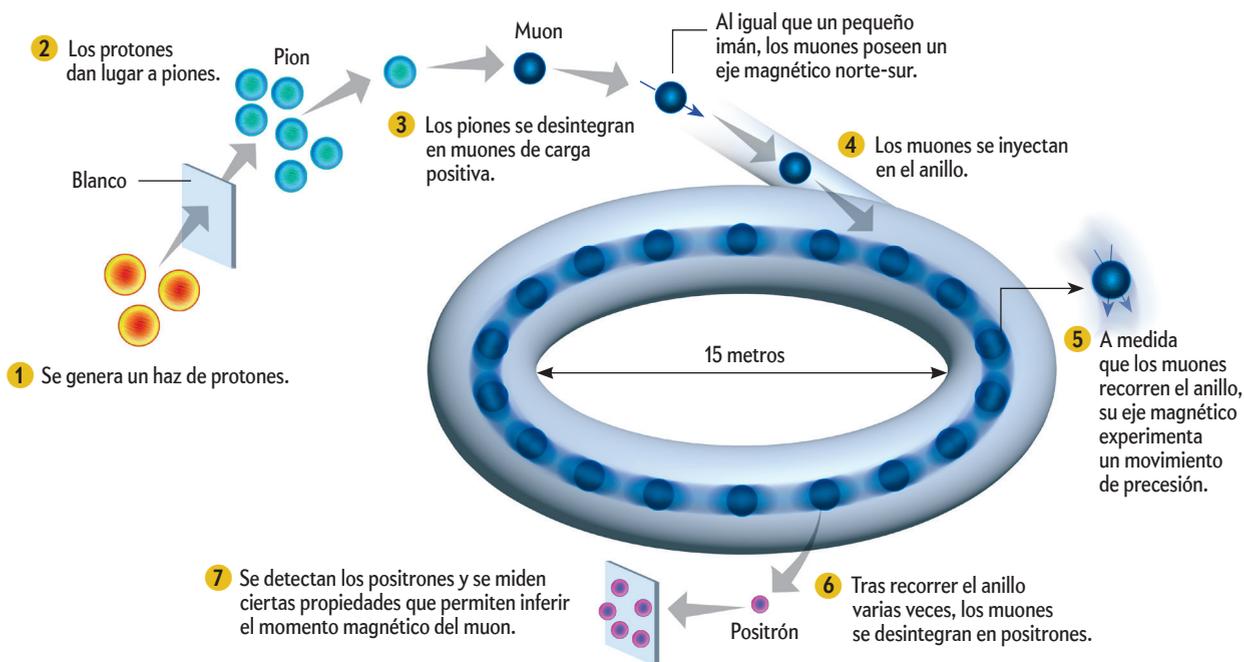
En principio, los cálculos en física de partículas exigen integrar todos los valores que pueda tomar cada campo cuántico en todos los puntos del espaciotiempo. Dado que el espaciotiempo está compuesto por un número infinito e incontable de puntos, lo anterior implicaría calcular infinitas integrales. Ello impide abordar el cálculo de manera directa. Sin embargo, había una manera de eludir dicho obstáculo.

La intensidad de la interacción entre un fotón y un electrón puede cuantificarse mediante un número adimensional llamado «constante de estructura fina», α . Este parámetro fundamental de la naturaleza resulta ser mucho menor que 1; en concreto, su valor es aproximadamente igual a $1/137$. Gracias a un malabarrismo matemático, cualquier cantidad que queramos calcular en física de partículas puede reescribirse como una serie de potencias de α : una suma en la que el primer término relevante es proporcional a $\alpha \approx 1/137 \approx 0,007$, el segundo es proporcional a $\alpha^2 \approx 1/137^2 \approx 0,00005$, el tercero a α^3 , y así sucesivamente. Dado que α es mucho menor que 1, cada término será mucho menor que el anterior. Eso significa que cada nuevo sumando añade solo una pequeña corrección a los anteriores, y que, en principio, la suma total puede aproximarse con la precisión que deseemos calculando únicamente una cantidad finita de términos.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una nueva medición

El pasado mes de abril, el experimento Muon $g - 2$ anunció la medición más precisa hasta la fecha del momento magnético del muon. En esta instalación se genera un haz de muones con carga positiva (antimuones) que se inyectan en un anillo de 15 metros de diámetro. A medida que las partículas lo recorren, un intenso campo magnético modifica la orientación de sus espines. Cuando los muones se desintegran, el análisis de sus productos de desintegración permite determinar su momento magnético.



Un resultado intrigante

El resultado anunciado el pasado abril mostró una fuerte desviación con respecto a la predicción teórica de consenso. En caso de confirmarse, ello demostraría la existencia de física más allá del modelo estándar. Sin embargo, otros cálculos teóricos implican valores que parecen coincidir con el resultado experimental.

Por otro lado, cada uno de los términos de la serie puede interpretarse físicamente como un intercambio de partículas virtuales; un proceso que puede visualizarse con ayuda de los diagramas de Feynman. Al calcular el momento magnético del electrón, la contribución principal procede de la interacción directa del electrón con un campo magnético; es decir, sin el intercambio de ninguna partícula virtual. Esto proporciona el valor $g = 2$ predicho por la teoría de Dirac. La primera corrección, proporcional a α , corresponde al intercambio de un fotón virtual. En el diagrama de Feynman asociado, este fotón introduce un «bucle» (un circuito cerrado) de partículas virtuales, lo que equivale a la corrección al factor g calculada por Schwinger en 1948. El siguiente término, proporcional a α^2 , implica la aparición de dos bucles de partículas virtuales. Fue calculado un año más tarde y, una vez más, resultó coincidir con el resultado experimental dentro del margen de precisión correspondiente.

EL RETO TEÓRICO

Sin embargo, la dificultad del cálculo aumenta de manera notable a medida que consideramos más y más términos en la serie de potencias. Ello se debe a que cada nuevo término implica la aparición de más bucles de partículas virtuales, y tanto la cantidad como la complejidad de los diagramas de Feynman asociados crecen muy rápido con el número de bucles. Además, en el marco del modelo estándar, el cálculo completo debe incluir las contribuciones virtuales de todas las interacciones: no solo las electromagnéticas, sino también las asociadas a las fuerzas nucleares débil y fuerte.

Por ahora, no está claro por qué dos cálculos que en principio tendrían que haber dado el mismo resultado han acabado arrojando valores distintos

Para lograr la precisión de las últimas medidas experimentales, fueron necesarias varias décadas de cálculos a fin de incluir los 12.672 diagramas con cinco bucles que contribuyen al momento magnético del electrón y del muon solamente por medio de la interacción electromagnética. La principal contribución debida a la interacción débil fue calculada en 1972.

La fuerza nuclear fuerte desempeña un papel clave en el cálculo del momento magnético del muon. Sin embargo, evaluarla requiere proceder de una manera totalmente distinta. Ello se debe a que, en el régimen de energías que nos ocupa, el equivalente a la constante de estructura fina (el parámetro que caracteriza la intensidad de la interacción) no es un número pequeño. Por tanto, al calcular la serie de potencias, cada término será mayor que el anterior, lo que invalida por completo este método. Dicho de otro modo: los efectos de la interacción fuerte ya no pueden aproximarse de manera fidedigna mediante un número finito de bucles de partículas virtuales. Este problema afecta a numerosos cálculos en cromodinámica cuántica, la teoría que describe las interacciones fuertes.

En los diagramas de Feynman asociados, las contribuciones de la interacción fuerte se representan en su lugar mediante

«manchas virtuales»: nubes indefinidas de estados virtuales que contienen un número arbitrario de partículas. En el cálculo del momento magnético del muon intervienen varias contribuciones de este tipo. La más crítica de ellas recibe el nombre de «polarización del vacío», e incluye una de estas manchas en medio del intercambio de un fotón virtual.

Dado que las ecuaciones de la cromodinámica cuántica no pueden resolverse de la manera habitual, ¿cómo podemos calcular estas contribuciones? Una solución consiste en emplear propiedades teóricas básicas para relacionar los términos que no podemos calcular con cantidades medibles. Por ejemplo, la contribución de la polarización del vacío puede relacionarse con los resultados de experimentos en los que un electrón y un positrón se aniquilan y dan lugar a estados ligados de quarks. Este enfoque se conoce como «guiado por datos» y permite alcanzar una precisión notable, del orden de seis por mil. Sin embargo, en comparación con las demás contribuciones, la polarización del vacío sigue suponiendo la mayor fuente de incertidumbre en el cálculo del momento magnético del muon. Como consecuencia, buena parte del trabajo teórico actual está centrado en reducir el error asociado a este término.

No obstante, existe una manera alternativa de calcular los efectos de la interacción fuerte. Esta técnica, conocida como «cromodinámica cuántica en el retículo», se remonta a los años setenta y parte de un enfoque totalmente distinto al basado en diagramas de Feynman. En ella, el espacio y el tiempo quedan modelizados por una red discreta de puntos. Y dado que el espaciotiempo ya no se trata como un ente continuo, los infinitos cálculos que en principio tendríamos que hacer quedan reducidos a una cantidad finita de ecuaciones que podemos resolver con ayuda de los mejores superordenadores. En los últimos años, un gran esfuerzo colectivo ha dado lugar a múltiples avances computacionales que buscan alcanzar una precisión similar a la del enfoque guiado por datos. El resultado de la colaboración BMW publicado el 7 de abril (y que ya se había dado a conocer más de un año antes en el repositorio de prepublicaciones arXiv) constituye un primer ejemplo de un cálculo con este formalismo con una incertidumbre inferior a uno por ciento.

LA PRUEBA EXPERIMENTAL

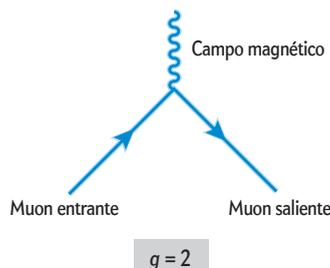
En el frente experimental, las mediciones actuales del momento magnético del muon son herederas de una larga historia que comenzó en el CERN en los años sesenta, continuó en Brookhaven y llegó a su encarnación actual en el Fermilab. En 2013, la piedra angular del experimento de Brookhaven, un anillo magnético superconductor de 700 toneladas y 15 metros de diámetro, fue meticulosamente transportada en una sola pieza con barcas y camiones a lo largo de 5000 kilómetros hasta el Fermilab. Allí, un haz de muones con carga positiva (es decir, antimuones) se inyecta en el anillo. A medida que estos orbitan, el campo magnético hace que el espín de las partículas experimente un movimiento de precesión. Por último, los muones se desintegran y se convierten en positrones, los cuales impactan contra los detectores situados en las paredes del anillo. Las propiedades de dichos positrones permiten deducir la frecuencia de precesión de los muones y, a partir de ella, su momento magnético.

Dos de las principales diferencias entre los experimentos del Fermilab y de Brookhaven son la mayor intensidad del haz de muones y la mejor calibración del campo magnético del anillo. Además, para evitar cualquier sesgo causado por un conocimiento previo del resultado o de otros trabajos en curso, en

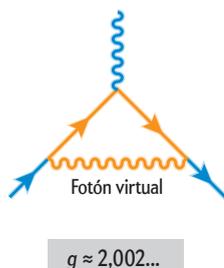
Calcular el efecto de las partículas virtuales

Para predecir el valor del momento magnético del muon, g , es necesario calcular el modo en que las partículas virtuales modifican la interacción entre un muon y un campo magnético. La manera habitual de hacerlo es mediante diagramas de Feynman. En estos, el tiempo corre de izquierda a derecha y las diferentes líneas representan partículas de distintos tipos.

Cada diagrama está asociado a un cálculo complejo. Añadir más partículas virtuales (*naranja*) implica aumentar la precisión del resultado final. Para alcanzar una precisión equiparable a la de las últimas mediciones experimentales han sido necesarias décadas de trabajo teórico a fin de calcular las decenas de miles de diagramas que contribuyen al resultado final.

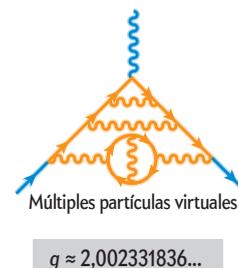


Caso más simple: Un muon (*línea sólida*) interactúa con un campo magnético (*línea ondulada*) y sigue su curso. No se intercambian partículas virtuales. El resultado es $g = 2$.



Primera corrección: El muon emite un fotón virtual que después es reabsorbido por el propio muon. Este intercambio introduce un bucle de partículas virtuales (*naranja*) e implica un valor de g ligeramente mayor que 2.

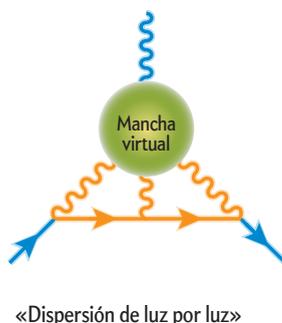
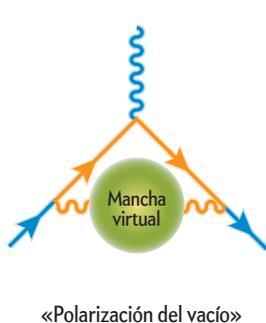
...



Vorágine de partículas: Los cálculos se complican a medida que consideramos más partículas virtuales. Por ejemplo, diagramas con cinco bucles y relacionados únicamente con la interacción electromagnética hay 12.672. Este esquema ilustra uno de ellos.

El problema de las interacciones fuertes

El cálculo completo exige incluir los efectos virtuales de todas las partículas e interacciones conocidas. Sin embargo, a bajas energías, los efectos de la interacción fuerte (la que gobierna la dinámica de quarks y gluones) no pueden calcularse mediante diagramas de Feynman. Ello se debe a que, como indica su nombre, la intensidad de esta interacción es muy elevada. Esta propiedad implica que añadir más partículas virtuales no equivale a añadir más precisión al resultado final, lo que invalida este método de cálculo.



En su lugar, los efectos debidos a quarks y gluones quedan representados por «manchas virtuales» (*verde*) que contienen un número arbitrario de partículas. Aunque estas contribuciones no pueden calcularse directamente, pueden evaluarse relacionándolas con los resultados de otros experimentos. Este método se conoce como «guiado por datos». Aquí se muestran las dos contribuciones de la interacción fuerte que más afectan a la precisión del cálculo del momento magnético del muon: la polarización del vacío y la dispersión de luz por luz.

el Fermilab se llevó a cabo un «análisis ciego»: a los investigadores se les ocultó el valor de uno de los parámetros necesarios para extraer la medida final del momento magnético del muon. Dicho parámetro solo era conocido por dos físicos ajenos a la colaboración, y únicamente se hizo público una vez concluido el análisis de datos.

El resultado, anunciado el 7 de abril en *Physical Review Letters*, confirmó el obtenido veinte años atrás en Brookhaven con un nivel de precisión similar. La combinación de ambas mediciones proporciona el que, en estos momentos, es el valor experimental del momento magnético anómalo del muon, el cual goza de una precisión de unas 0,5 partes por millón.

Junto con más de un centenar de físicos, dos de los autores de este artículo (Herdoíza y Marinković) participamos en el cálculo del valor teórico publicado en 2020. Como ha expresado nuestra compañera Aida El-Khadra, física teórica de la Universidad de

Illinois que codirigió esta colaboración mundial sin precedentes, «es la primera vez que la comunidad teórica ha llevado a cabo un esfuerzo colaborativo de este tipo». El resultado se basó en el enfoque guiado por datos debido al alto nivel de precisión logrado con esta técnica por varios grupos independientes, así como a la coherencia interna entre los distintos resultados. El valor final implica una desviación de 4,2 sigmas con respecto al resultado experimental.

Por su parte, el cálculo de la colaboración BMW, obtenido gracias al método de la cromodinámica cuántica en el retículo, arrojó un valor teórico mucho más cercano al experimental, lo que sugiere que no habría diferencias significativas entre uno y otro. En principio, el cálculo de la colaboración BMW tendría que arrojar el mismo valor que el enfoque guiado por datos. Por ahora no está claro por qué eso no ocurre, al menos hasta que dicho cálculo se coteje con otros cálculos en el retículo de

precisión similar. La resolución de este enigma ocupará un papel central en las investigaciones teóricas de los próximos años.

EXPECTATIVAS SOBRE EL FUTURO

Tras estos acontecimientos, buena parte del trabajo futuro estará dirigido a consolidar la predicción del modelo estándar. Nuevos datos experimentales permitirán afinar la contribución de las interacciones fuertes usando el método guiado por datos. Al mismo tiempo, varios grupos en todo el mundo tendrán como prioridad mejorar la precisión de los cálculos en el retículo. Y distintas pruebas en curso seguirán controlando la coherencia mutua de ambos métodos. Desde el lado experimental, el Fermilab ya ha acumulado una estadística varias veces mayor que la de Brookhaven. El objetivo para los próximos dos años será multiplicarla por 20 y reducir la incertidumbre total a la cuarta parte.

Por su parte, el CERN está planeando un nuevo experimento llamado MUonE. Gracias a un intenso haz de muones, este intentará medir de manera directa la problemática contribución de la

polarización del vacío mediante la dispersión de muones y electrones. Según Graziano Venanzoni, físico del Instituto Nacional de Física Nuclear (INFN) italiano en Pisa que trabaja tanto en MUonE como en el experimento del Fermilab, «MUonE podría resolver las potenciales discrepancias entre los resultados del retículo y los del enfoque guiado por datos».

Además, el Complejo de Investigación del Acelerador de Protones de Japón (J-PARC) está planeando otro experimento para medir el momento magnético anómalo del muon mediante una técnica completamente distinta. Al emplear muones diez veces más lentos que los usados en el Fermilab, su trayectoria circular podrá acomodarse en un anillo de 66 centímetros de diámetro. Este experimento debería proporcionar una comprobación clave de los métodos usados hasta ahora.

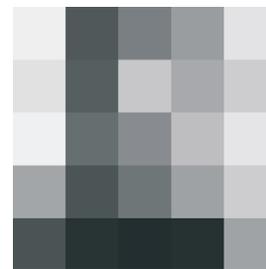
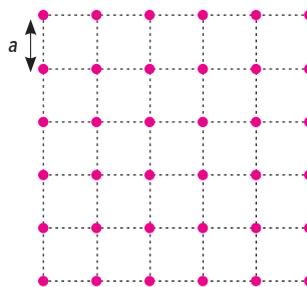
Una vez que los resultados teóricos y experimentales estén claros y puedan considerarse estables, cabe considerar varios escenarios. A fin de explorarlos, hemos solicitado la opinión a varios colegas de profesión implicados en este problema.

PREDICCIÓN TEÓRICA 2

Otra manera de tratar el espacio y el tiempo

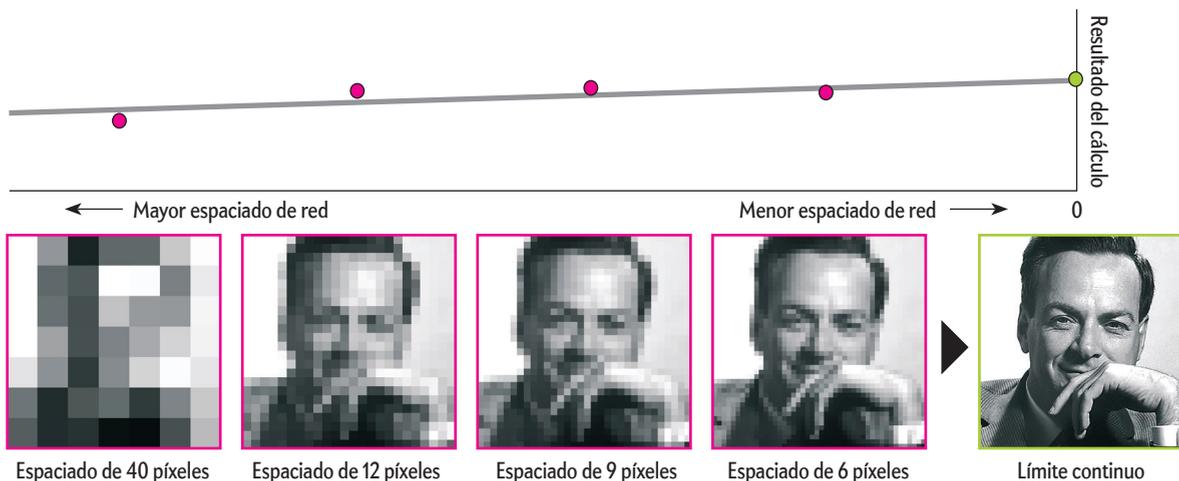
Para calcular el efecto de las interacciones fuertes, un método alternativo a los diagramas de Feynman consiste en modelar el espacio y el tiempo como una red de puntos. Ello da lugar a un número finito de ecuaciones que pueden resolverse en un superordenador. Esta técnica, conocida como «teoría de campos en el retículo», se remonta a los años setenta, pero en los últimos años su precisión ha mejorado considerablemente.

Este método funciona de manera análoga al almacenamiento digital de imágenes, en el que una imagen continua pasa a estar compuesta por píxeles. En lugar de un espaciotiempo continuo, tenemos una cuadrícula en la que solo podemos avanzar en «pasos» de longitud a .



Red espaciotemporal

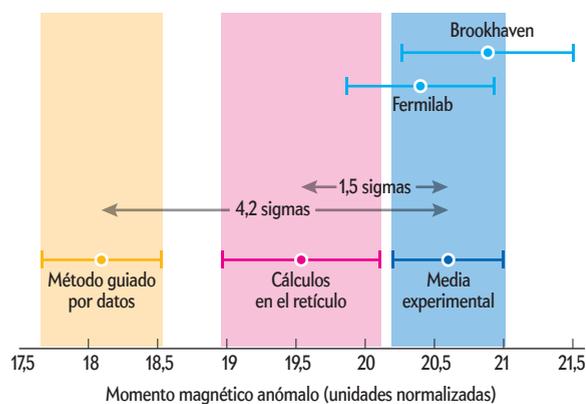
Por supuesto, en el mundo real el espacio y el tiempo son continuos. Esto corresponde al límite en el que el espaciado de la cuadrícula, a , es cero. Sin embargo, hacer a cada vez menor implica aumentar el número total de «píxeles» y, con ello, la complejidad del sistema que debe resolverse. Hoy en día, los superordenadores pueden efectuar los cálculos en una red espaciotemporal formada por cientos de millones de puntos y con un espaciado entre ellos inferior a la décima parte del tamaño de un protón. Para inferir el resultado en un espaciotiempo continuo, el cálculo se repite con un valor de a cada vez menor (gráfica, puntos magenta). Eso da lugar a una curva (gris, ejemplo simplificado) que puede extrapolarse al caso $a = 0$ (verde).



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA (gráficos); FUNDACIÓN NOBEL/DOMINIO PÚBLICO (Richard Feynman)

¿Nueva física?

Los resultados anunciados el pasado abril en el Fermilab (dos décadas después del experimento predecesor en el Laboratorio Nacional Brookhaven) implican un valor para el momento magnético del muon (azul) marcadamente distinto del que arroja la predicción basada en el método guiado por datos (naranja). Sin embargo, nuevos cálculos basados en la teoría de campos en el retículo parecen implicar un resultado (magenta) mucho más cercano al experimental. Por ahora, no está claro por qué dos cálculos que en principio tendrían que haber dado el mismo resultado han acabado arrojando valores distintos.



Una desviación entre la teoría y el experimento por encima de las 5 sigmas implicaría la existencia de nueva física más allá del modelo estándar. Desde hace tiempo, los físicos teóricos han considerado varias extensiones que podrían explicar la discrepancia en el momento magnético del muon. Entre ellas, la supersimetría es un marco genérico que predice que cada especie de partícula presente en el modelo estándar debería tener una «supercompañera». Entre otras ventajas, ello aporta posibles candidatos para explicar la materia oscura al tiempo que aspira a resolver el llamado «problema de la naturalidad»: por qué las partículas elementales se disponen en escalas de energía tan extremadamente alejadas unas de otras. «La supersimetría seguiría siendo un candidato, pero el hecho de que el LHC no haya obtenido indicios a su favor merma considerablemente sus perspectivas», apunta Bill Marciano, físico teórico de Brookhaven. «En mi opinión, una extensión del sector de Higgs [la existencia de más de un bosón de Higgs] sería la mejor apuesta, aunque para nada una apuesta segura.»

«Quizá deberíamos dejar de preocuparnos por la naturalidad y tal vez la materia oscura se deba a otro tipo de partícula, como un bosón muy ligero» afirma John Ellis, físico teórico del King's College de Londres. «Hoy por hoy, esta posibilidad me gusta (casi) tanto como la supersimetría.» Además, el hallazgo de nuevos fenómenos físicos en el momento magnético del muon podría orientar e impulsar otras investigaciones. «Una posibilidad cada vez más explorada es la de que existan partículas de vida larga que hayan conseguido evadir las búsquedas del LHC», continúa Ellis. Y otra vía, añade el investigador, consistiría en examinar con más detalle los indicios observados en los últimos años por el experimento LHCb acerca de una asimetría inesperada entre muones y electrones.

Por otro lado, una situación en la que la diferencia entre la teoría y el experimento se quedase entre 3 y 4 sigmas «sería muy decepcionante», opina Lee Roberts, físico experimental de la Universidad de Boston y miembro del experimento de Fermilab que también participó en el de Brookhaven. «Sin embargo, es estadísticamente posible», reconoce.

«Alcanzar una precisión experimental aún mejor que la actual exigirá superar varios obstáculos técnicos», señala Alex Keshavarzi, físico de la Universidad de Mánchester y miembro de Muon $g - 2$ que también participó en el cálculo de 2020. «Uno de ellos será conseguir una mejora significativa en la medición del campo magnético más allá de las 70 partes por mil millones que se está intentando en el Fermilab. También habría que pensar en un nuevo acelerador que produjera un haz de muones de mayor intensidad y velocidad de repetición, junto con detectores de partículas de última generación.»

Por último, una situación en la que los resultados experimentales acabaran coincidiendo con la predicción del modelo estándar acabaría con una de las vías más prometedoras para descubrir nueva física. «Sería el fin de una era», afirma Massimo Passera, físico teórico del INFN en Padua. «Pero primero deberemos entender las diferencias entre las distintas determinaciones de las contribuciones de la interacción fuerte. El experimento MUonE podría resolver este enigma», añade.

Ocurra lo que ocurra, los muones no están solos en estas búsquedas. El año pasado, una mejora extraordinaria permitió obtener una nueva medición de la constante de estructura fina electromagnética con una precisión de 81 partes por billón. Eso condujo a una nueva determinación de la predicción del modelo estándar para el momento magnético del electrón. Esta ha coincidido con el resultado experimental, lo que supone otro triunfo del modelo estándar. Sin embargo, la nueva medición de la constante de estructura fina difiere de la anterior en 5,4 sigmas, una discrepancia cuyo origen explorarán varios experimentos en curso. Y en los próximos años, las mejoras en la determinación del momento magnético del electrón permitirán aguzar su sensibilidad a nuevos fenómenos físicos hasta un nivel similar a la del muon.

Sea cual sea el resultado de las próximas comparaciones entre la teoría y el experimento, la física fundamental vivirá un impulso que le permitirá continuar en su búsqueda de cualquier grieta en el edificio del modelo estándar.

PARA SABER MÁS

The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model.

Tatsumi Aoyama et al. en *Physics Reports*, vol. 887, págs. 1-166, 3 de diciembre de 2020.

Leading hadronic contribution to the muon magnetic moment from lattice

QCD, Szabolcs Borsanyi et al. en *Nature*, vol. 593, págs. 51-55, 7 de abril de 2021.

Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment

to 0.46 ppm. Colaboración Muon $g - 2$ en *Physical Review Letters*, vol. 126, art. 141801, 7 de abril de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

El confinamiento de los quarks. Yoichiro Nambu en *lyC*, enero de 1977.

Quarks por ordenador. Donald H. Weingarten en *lyC*, abril de 1996.

La física y los diagramas de Feynman. David Kaiser en *lyC*, septiembre de 2005.

Cuarenta años de libertad asintótica. Antonio González-Arroyo en *lyC*, junio de 2013.

El LHC sigue viendo indicios de nueva física. Daniel Garisto en *lyC*, mayo de 2021.