

El descubrimiento del espín y la búsqueda de nueva física

Miguel Ángel Sanchis Lozano y Roger Sanchis Gual

El espín ha jugado en el pasado, y juega actualmente, un papel fundamental en el conocimiento de las leyes de la naturaleza. Su descubrimiento, mediante el experimento de Stern y Gerlach durante la década de 1920, fue un ejemplo de serendipia, pues no se correspondía con la interpretación inicial. Sin embargo, una vez aceptada la existencia del espín del electrón como un nuevo número cuántico, se abrieron las puertas a un desarrollo sin precedentes de la incipiente mecánica cuántica, incluyendo la existencia de la antimateria y, en última instancia, conduciendo a la formulación de la teoría cuántica de campos. Aplicaciones en medicina, como la resonancia magnética nuclear, o en la búsqueda de la llamada nueva física más allá del modelo estándar de partículas elementales, son ejemplos de su importancia actual.

Introducción histórica

Como la historia de la ciencia enseña, no siempre un hallazgo experimental ratifica o coincide con aquello que se esperaba encontrar dentro del paradigma científico entonces válido. En ocasiones, de tal discrepancia surge una teoría más general que no anula enteramente la anterior, sino que la completa o amplia. Un ejemplo lo constituye el resultado “fallido” del experimento de Michelson-Morley en 1887, que intentaba determinar la velocidad relativa de la Tierra con respecto al éter y, por ende, al espacio absoluto newtoniano. En 1905, Albert Einstein reinterpretó tal resultado negativo proponiendo su teoría de la relatividad especial, con sorprendentes consecuencias como la dilatación del tiempo y la contracción de longitudes, desencadenando toda una revolución en el pensamiento científico y filosófico posterior.

Un caso semejante aconteció en la década de 1920, con el experimento de Stern y Gerlach [1-2] (ESG) y el descubrimiento, *a posteriori*, del espín del electrón. Aunque el resultado experimental (que describiremos con detalle después) fue incorrectamente interpretado al principio, proporcionó un valioso apoyo a la incipiente teoría cuántica, entonces sin una aceptación generalizada entre la comunidad científica. Max Planck había iniciado, en 1900, una revolución conceptual en la física al postular que la energía no se emitía de manera continua en el espectro del cuerpo negro, sino en “paquetes” discretos: los cuantos [3-4]. Siguiendo esa línea de pensamiento aplicada a los espectros atómicos, Niels Bohr propuso en 1913 [5] un modelo atómico donde únicamente ciertas órbitas circulares de los electrones estaban permitidas, según unas reglas de cuantización del momento angular orbital. Poco después, Arnold Sommerfeld amplió las órbitas posibles a elípticas en general, como un minúsculo sistema solar cuyos planetas serían los electrones de la corteza atómica. De ese modo, se intentaba explicar el desdoblamiento de los niveles energéticos en subcapas, puesto de manifiesto por la espectroscopía atómica de alta resolución. Cabe señalar la importante contribución de Miguel Catalán [6] al introducir la idea (y nombre) del *multiplete*, para designar tales subestructuras atómicas.

Pese a sus logros en espectroscopía (especialmente en átomos hidrogenoides) el modelo atómico de Bohr-Sommerfeld (BS) adolecía de una base teórica sólida. Además, era incapaz de dar cuenta de todas las reglas de selección en transiciones entre niveles atómicos, y mucho menos sus ritmos (probabilidades) de transición. Hubo que esperar a Erwin Schrödinger y Werner Heisenberg, entre otros físicos de gran nivel como Louis de Broglie (quien introdujo el importantísimo concepto de la dualidad onda-corpúsculo, proporcionando una primera explicación de la cuantización un tanto arbitraria de las órbitas según Bohr), para lograr una formulación más rigurosa y formal de la mecánica cuántica (MC) [7-8].

Señalemos que, por aquel entonces, la comunidad científica se mostraba reticente a aceptar la ahora denominada vieja teoría cuántica, que llevaba conceptos difícilmente aceptables para una mentalidad clásica [4]; pero una prueba definitiva sobre su validez estaba en camino. Se trataba del ya citado ESG cuya finalidad era detectar la llamada cuantización espacial de las órbitas de los átomos en el seno de un campo magnético externo. Pero antes traslademos nuestra atención a los espectros atómicos, como constatación de la existencia de niveles energéticos discretos, es decir, cuánticos.

Históricamente, Isaac Newton introdujo en el siglo XVII el concepto de espectro (del latín *spectrum*: aparición) cuando mediante un prisma separó, por refracción, la luz solar en sus diferentes componentes visibles. Pero fue Josef van Fraunhofer quien dio el gran impulso a la espectroscopía al observar rayas de absorción complementarias a las líneas de emisión de los elementos químicos. Las rayas en los espectros atómicos son como “huellas dactilares” de los elementos, lo cual permitió que algunos de ellos (como el cesio o el rubidio) fueran descubiertos posteriormente por Robert Bunsen y Gustav Kirchhoff gracias al espectroscopio de su invención en 1859.

Por otro lado, el efecto Zeeman (descubierto en 1896 por Pieter Zeeman) consiste en el desdoblamiento de las líneas espectrales atómicas en más componentes al situar los átomos dentro de un campo magnético externo débil (véase la figura 1).

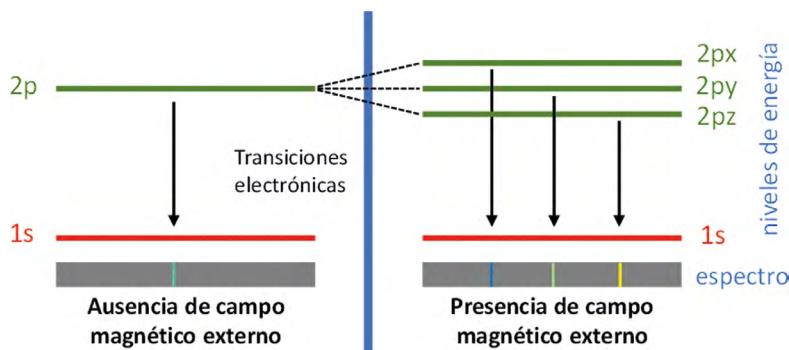


Fig. 1. Efecto Zeeman normal, mostrando el desdoblamiento de niveles de energía de un átomo en presencia de un campo magnético, originando tres rayas donde antes no había más que una. Las tres rayas se asocian a las tres proyecciones posibles del momento angular orbital a lo largo del campo aplicado.

Existe otro fenómeno equivalente, el llamado efecto Stark (descubierto en 1913) cuando en lugar de un campo magnético se aplica un campo eléctrico externo, que no desarrollaremos en este artículo por cuestiones de espacio, pese a su indudable interés. Por similares razones, tampoco abordaremos los espectros moleculares, limitando nuestra atención al caso atómico.

Bajo la acción de un campo magnético sobre los átomos, cabe distinguir entre el efecto Zeeman normal y el anómalo en espectroscopía. Este último, descubierto por Thomas Preston en 1897, presentaba unas características distintas en la multiplicidad y polarización de la luz en el desdoblamiento de rayas, inexplicables según el modelo cuántico primitivo. Por esa razón, se le denominó “anómalo”, pues no existía entonces ninguna explicación satisfactoria a falta de la posterior introducción del espín en el formalismo teórico. En realidad, el efecto Zeeman anómalo es más frecuente en espectroscopía que el “normal”, proporcionando un ejemplo de un uso desafortunado de la terminología en física, que posteriormente no se corrige por su utilización ya habitual.

Por un lado, la física clásica podía proporcionar una explicación razonable del efecto Zeeman normal mediante la fuerza de Lorentz ejercida por un campo magnético externo sobre los electrones girando en órbitas permitidas alrededor del núcleo atómico según el modelo de BS. Por el contrario, era totalmente incapaz de dar cuenta del efecto Zeeman anómalo, como el desdoblamiento en multipletes de la serie de líneas del sodio, con o sin campo magnético externo aplicado.

En efecto, si se examinan con alta resolución las líneas espectrales de átomos como el hidrógeno (hidrogenoides) sin campo magnético externo, se encuentra que algunas de ellas, poco espaciadas entre sí, forman dobletes; de ahí el nombre de estructura fina. Su origen radica principalmente (aunque no únicamente) en la interacción entre el espín del electrón y su momento angular orbital alrededor del núcleo, creando un campo magnético efectivo que “siente” el electrón [9]. Por ello, se le puede considerar como un efecto Zeeman “interno” estando su magnitud (separación entre rayas) controlada por la constante de estructura fina, $\alpha \approx 1/137$, introducida por Sommerfeld al in-

corporar correcciones relativistas al movimiento orbital del electrón según el modelo cuántico primitivo.

En 1919, el efecto Zeeman había captado la atención de Alfred Landé, cuyo director de tesis había sido Sommerfeld, obteniendo importantes resultados, especialmente en la suma vectorial de momentos magnéticos y su relación con los momentos angulares atómicos según la MC, conduciendo al famoso factor g que lleva su nombre. Invitado por Landé, llegó a Tübingen (Alemania) en 1925 un joven Ralph Kronig, procedente de la Universidad de Columbia (USA). Allí explicó a un escéptico Wolfgang Pauli su idea de un electrón girando como una peonza, introduciendo por primera vez el concepto de espín (*spin* en inglés significa girar alrededor de sí mismo) para explicar el efecto Zeeman anómalo. De hecho, Pauli ya estaba considerando un cuarto número cuántico atómico (además de los ya conocidos: principal, orbital y magnético), con dos posibles valores (pero sin significado físico), formulando el principio de exclusión a finales de 1925 [10]. Sin embargo, Pauli rechazó de manera un tanto desdenosa (véase el recuadro 1) la propuesta, entonces algo ingenua, de Kronig.¹ Entre otros motivos, un electrón girando como una diminuta esfera (con el llamado radio clásico del electrón) conducía a dificultades insalvables al superar la velocidad de la luz en su periferia con el fin de reproducir numéricamente el momento dipolar magnético necesario. El crédito de la introducción del espín en la física se atribuye habitualmente a George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit, discípulos de Paul Ehrenfest en la universidad de Leiden (Países Bajos), quienes, ignorantes acerca de la sugerencia inicial de Kronig, presentaron una propuesta semejante mediante un corto artículo en 1925. Anecdóticamente, tras entregarlo a Ehrenfest para una revisión previa a su envío, y tras una fundamentada crítica de Hendrik Lorentz, reconsideraron su publicación. Sin embargo, Ehrenfest, a quien le atrajo de inmediato la idea pese a su atrevimiento (o quizás por ello), ya lo había remitido a la revista [11], justificándose ante ellos: “sois lo suficientemente jóvenes como para poder decir algunas tonterías”. Pero no eran tonterías...

Experimento de Stern-Gerlach y el descubrimiento a posteriori del espín

Otto Stern, nacido en Prusia en 1888, comenzó su carrera científica siendo el primer estudiante de Einstein, inicialmente en Praga y posteriormente en Zúrich, de quien adquirió su interés por la teoría cuántica y el problema del átomo. A principios de los años 20 del pasado siglo, Stern investigaba sobre gases moleculares en el Instituto de Física Teórica en Frankfurt bajo la dirección de Max Born. Walther

¹ Arthur Compton fue el primer científico en sugerir, en 1921, que el electrón poseía un momento magnético intrínseco, pero no desarrolló más allá la idea.

Gerlach, también nacido en Prusia en 1889, quien hizo su doctorado con Friedrich Paschen, coincidió con Stern al incorporarse al Instituto de Física Experimental en Frankfurt, contiguo al teórico, una afortunada coincidencia.

A lo largo de 1921 y comienzos de 1922, Stern y Gerlach diseñaron y llevaron a cabo un experimento histórico que contribuyó de manera definitiva a la aceptación y posterior desarrollo de la teoría cuántica propuesta por Bohr y Sommerfeld para explicar los niveles energéticos atómicos. La idea era enviar un haz bien colimado de átomos neutros de plata a través de un campo magnético externo uniforme junto con otro de gradiente no uniforme perpendicular a su dirección de movimiento (ver figura 2). Cada átomo debería comportarse como un pequeño imán bajo la acción del campo magnético del dispositivo. Se pensaba entonces (erróneamente) que el "último" electrón desapareado (de valencia) del átomo de plata poseía un número cuántico orbital igual a 1 y, por tanto, momento dipolar magnético no nulo que caracterizaba las propiedades magnéticas del átomo en su conjunto.

Por un lado, la física clásica predecía que, según la orientación (al azar) del momento magnético del átomo de plata, la fuerza magnética que actúa sobre los diferentes átomos sería diferente, desviando la trayectoria en diversos grados. Por tanto, se esperaba una mancha continua, formada por los impactos de los átomos sobre la placa recolectora situada a la salida del campo magnético.

En cambio, de acuerdo con la teoría cuántica, cada átomo debería orientarse hacia arriba o hacia abajo (con respecto al campo magnético aplicado) con una probabilidad del 50 % en cada caso, sin posibilidades intermedias. La mitad de los átomos de plata estarían sometidos a una fuerza en sentido contrario a la otra mitad, al desplazarse por la región del imán, de manera que la marca final estaría formada únicamente por el contorno de la mancha continua según la física clásica. Es lo que suponía Bohr. Por otro lado, Born esperaba muy razonablemente tres manchas: una más debida al momento angular orbital perpendicular al campo, como en el efecto Zeeman normal.

Tras un año de trabajo y superando numerosas dificultades en condiciones económicas difíciles por la hiperinflación,² Stern y Gerlach finalmente encontraron que los átomos desviados por el campo magnético se concentraban en dos únicas manchas en la placa recolectora, en vez de llenar la zona entre ellas. Fue gracias al humo de los cigarrillos baratos que fumaba Stern, ricos en azufre, que pudieron visualizar por primera vez las manchas al formarse sulfuro de plata, como en

un revelado fotográfico [12]. Posteriormente utilizaron una película de emulsión fotográfica para registrar la señal. No obstante, los resultados no eran del todo concluyentes y el desánimo cundió entre ellos decidiendo, en una reunión en Gottinga a principios de 1922, abandonar el experimento. Sin embargo, una huelga de ferrocarriles retrasó durante un día el regreso de Gerlach a Frankfurt, lo que le dio tiempo para repensar cómo mejorar el dispositivo experimental, conduciendo al éxito final tras reanudar el trabajo.

¿Se hubiese descubierto el espín sin el ESG de 1922? Sin duda que sí, al igual que otros grandes descubrimientos experimentales o formulaciones teóricas que, más tarde o más temprano, han de acontecer prosiguiendo el curso lógico, aunque a veces irregular, de la ciencia. Pero este comentario no resta mérito alguno a la capacidad y perseverancia demostradas por Stern y Gerlach en su experimento, y se extiende a cualquier hallazgo similar.

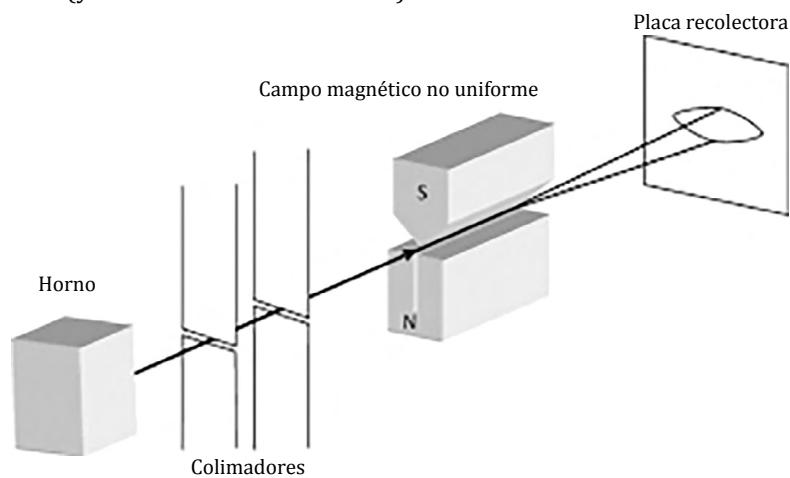
Una vez comprobado, tras una mejora del alineamiento del haz, que eran dos manchas claramente diferenciadas, Gerlach envió un telegrama a Stern (entonces en Rostock) con el siguiente texto: "Bohr tenía razón después de todo". Pero en realidad solo a medias...

En 1927, Ronald Fraser, uno de los estudiantes de Stern, llegó a la conclusión de que el momento magnético orbital del átomo de plata era, en realidad, ¡cero! Utilizando la nomenclatura actual, de los 47 electrones que posee un átomo neutro de plata, 46 llenan los primeros orbitales, mientras que el "último" se encuentra en el orbital esférico 5s [13]. Esto significaba que el haz de plata no debería haber sido afectado por el campo magnético aplicado y, por tanto, dividirse en dos. En consecuencia, la motivación y fundamento teórico del resultado del ESG eran... incorrectos. Faltaba un ingrediente fundamental, aunque por aquel entonces desconocido. Un caso típico de serendipia...

Momento angular orbital y de espín

Según la MC se puede establecer una relación lineal (ya conocida en física clásica) entre el mo-

Fig. 2. Esquema del experimento de Stern y Gerlach en 1922. Un haz bien colimado de átomos neutros de plata calentados a unos 1000 °C en un horno atraviesa una región con un campo magnético uniforme (de una décima de tesla) y otro no homogéneo (de 10 teslas por centímetro), desviándose transversalmente en dos trayectorias que originan sobre una placa recolectora dos manchas simétricas con un espacio entre medias, mientras la física clásica predecía una mancha continua. La explicación final de la cuantización espacial observada supuso, *a posteriori*, el descubrimiento experimental directo del espín del último electrón (desaparecido) de la plata y sus dos posibles orientaciones con respecto al campo magnético aplicado. Este tipo de experimento se ha repetido con diferentes elementos químicos, como el hidrógeno o el sodio, con idéntico resultado.



2 El banquero de origen alemán Henry Goldman donó al experimento unos cientos de dólares a petición de Born. Einstein también prestó alguna ayuda económica a su antiguo discípulo Stern.

mento magnético dipolar $\vec{\mu}_L$ y el momento angular \vec{L} de una partícula como el electrón $\vec{\mu}_L = -g_L(e\hbar/2m_e)\vec{L}/\hbar = -g_L\mu_B\vec{L}/\hbar$, donde $\hbar=h/2\pi$ es la constante de Planck reducida; e y m_e denotan la carga (en valor absoluto) y masa del electrón, respectivamente. El factor g_L representa la razón giromagnética entre el momento dipolar magnético (expresado en unidades del magnetón de Bohr, $\mu_B=e\hbar/2m_e$) y el momento angular correspondiente (en unidades de \hbar). Notemos que g_L vale 1, coincidiendo con el caso clásico; no obstante, el símbolo se mantiene por razones de simetría del caso orbital con el espín, como se verá a continuación. Si el momento angular orbital L fuera nulo (como en el átomo de plata neutro), el momento magnético asociado μ_L también lo sería, por lo que la interpretación inicial del ESG era claramente incorrecta.

A finales de los 1920, la idea de un nuevo número cuántico para el átomo, que podría explicar el efecto Zeeman anómalo, ya estaba rondando en la comunidad científica. De tal modo, un electrón poseería un momento angular intrínseco S originando un momento dipolar magnético de espín según la expresión $\vec{\mu}_s = -g_S\mu_B\vec{S}/\hbar$.

Si nos centramos en este último caso, la energía de interacción U entre un campo magnético \vec{B} y el momento magnético de espín de un electrón se escribe como el producto escalar $U = -\vec{\mu}_s \cdot \vec{B}$, que se corresponde con una expresión general (clásica) que conduce a un antialineamiento entre el espín y el campo magnético debido a una menor energía que en el caso del alineamiento.

Ahora bien, considerando la naturaleza cuántica del espín se distinguen los denominados estados *up* y *down* (según la proyección a lo largo de la dirección del vector \vec{B}) que originan, consecuentemente, un desdoblamiento o *splitting* del nivel energético del electrón con respecto al átomo sin campo magnético, fundamental para interpretar correctamente el resultado del ESG.

En una configuración inicial de un dipolo magnético en un campo magnético, sin posibilidad de disipación de energía, su energía de orientación permanecerá constante. Bajo tales circunstan-

cias, $\vec{\mu}_s$ precesa alrededor de \vec{B} con una frecuencia angular determinada mediante la expresión: $v = g_S\mu_B B / 2\pi\hbar$, conocida como la frecuencia de Larmor. Este fenómeno juega un papel primordial, por ejemplo, en la resonancia magnética nuclear, aunque, en este caso, el responsable de la precesión sea el espín de los núcleos atómicos.

Regresemos ahora a 1925, cuando Goudsmit y Uhlenbeck estudiaban el desdoblamiento de ciertas líneas del espectro óptico del hidrógeno y de los átomos alcalinos, encontrando que, en ausencia de un campo magnético externo, estaban compuestas por parejas muy próximas. Se trataba de la estructura fina ya abordada por Sommerfeld en su modelo atómico, quien la atribuía a las correcciones relativistas del movimiento del electrón alrededor del núcleo. Esa interpretación funcionaba adecuadamente para el caso del hidrógeno. Sin embargo, en los elementos alcalinos, con velocidades orbitales de los electrones menos elevadas (por tanto, con efectos relativistas mucho menores), el desdoblamiento de niveles observados era incluso mayor que en el caso del hidrógeno. Algo fallaba.

En resumen, con el fin de reproducir adecuadamente los desdoblamientos de las rayas espectrales de los elementos alcalinos, pero no el hidrógeno, debía emplearse el valor $g_S = 2$, el doble del factor orbital $g_L = 1$. En cambio, en el caso del hidrógeno se requería $g_S = 1$, lo cual era una contradicción. Por todo ello, Pauli acogió con desconfianza la propuesta inicial de Kronig sobre el espín de un electrón que gira.

Ahora bien, en 1926, Llewellyn Thomas [14] consiguió demostrar, mediante transformaciones de Lorentz, que en el caso del hidrógeno el factor g_S efectivo era muy cercano a 1, en vez de 2, mientras que en los otros átomos polielectrónicos el grado extra de libertad introducido por el espín del electrón explicaba adecuadamente la estructura fina, siendo las correcciones relativistas claramente insuficientes por sí mismas.

Al fin, Pauli se convenció de la necesidad y realidad del espín (identificándolo con "su" cuarto número cuántico) para explicar la interacción espín-órbita (generando la estructura fina de los espectros atómicos), y reinterpretar *a posteriori* el resultado del ESG. Por todo ello, la comunidad científica comenzó a aceptar la existencia del espín, y del momento dipolar magnético asociado, como un nuevo número cuántico: una propiedad intrínseca del electrón (aun siendo puntual, es decir, elemental), como su masa o carga eléctrica, y no como consecuencia de una rotación de una minúscula esfera alrededor de un eje.

Así pues, fue en 1927, cinco años tras el ESG, y tras la observación de Fraser ya citada sobre la falta de momento angular orbital de la plata, cuando se reinterpretó el resultado del desdoblamiento del haz mediante el concepto cuántico del espín. En ese año, Pauli extendió la ecuación de Schrödinger

Recuadro 1: El experimento de Stern-Gerlach y el “efecto Pauli”

Wolfgang Pauli (1900-1958) fue un extraordinario físico teórico, premio Nobel en 1945, con grandes aportaciones a la mecánica cuántica (como el famoso principio de exclusión que lleva su nombre), aunque temido por sus críticas a menudo despiadadas hacia sus colegas (excepto a su maestro Arnold Sommerfeld a quien veneraba). Sin embargo, se propagó una leyenda (que llegó a creer él mismo) conocida como “efecto Pauli”: su cercanía a un equipo experimental provocaba una avería sin causa aparente. Tal era la fama de “gafe”, que su amigo y colega Otto Stern le prohibió tajantemente entrar en las instalaciones del instituto en Frankfurt donde, junto con Walther Gerlach, se descubrió el espín del electrón, fundamental en el desarrollo y aplicación del principio de exclusión de Pauli.

para incluir un término de interacción entre el momento dipolar de espín y un campo magnético externo, mediante la introducción de unas matrices 2×2 (que llevan su nombre). Sin embargo, tan importante éxito quedaba viciado de origen por el carácter no relativista de la ecuación de Schrödinger y su falta de motivación fundamental más allá de la fenomenología.

En realidad, Schrödinger ya había formulado, en 1926, la ahora denominada ecuación de Klein-Gordon para describir partículas relativistas. Sin embargo, cuando Oskar Klein y Walter Gordon la intentaron aplicar al electrón, encontraron graves dificultades, entre otras la aparición de densidades negativas de probabilidad. Fue Paul Dirac quien, en 1928, formuló una ecuación cuántica relativista con la decisiva ventaja de contener solo derivadas primeras respecto al tiempo (y al espacio), evitando de este modo tales probabilidades negativas. Actualmente la ecuación de Klein-Gordon se aplica a partículas sin espín (genéricamente llamadas bosones, como los piones o el bosón de Higgs) y la dificultad inicial de probabilidades negativas se solucionó al considerar densidades de carga eléctrica, con una clara interpretación física.

La ecuación de Dirac, ampliando el formalismo de Pauli a matrices de dimensión 4×4 , no solo evitaba las (entonces) problemáticas densidades negativas, sino que además aportaba un extraordinario "valor añadido": los estados "etiquetados" mediante las dos posibles proyecciones del espín $\frac{1}{2} \hbar$ del electrón. El orden de magnitud del momento magnético asociado a dicho espín queda determinado por el magnetón de Bohr (véase el recuadro 2) prediciendo, de manera natural, el factor $g_s=2$ en el límite no relativista, un logro nada trivial.

Por otro lado, el espín quedaba fundamentado sobre firmes principios físicos, íntimamente ligado con la relatividad especial de Einstein (más específicamente, con el grupo de transformaciones de Lorentz). Señalemos también el carácter típicamente cuántico del espín (proporcional a \hbar), resultando imposible alcanzar un límite clásico mediante el procedimiento habitual de hacer \hbar tender a cero.

No menos importante, según la inicial interpretación de Dirac, las soluciones de su ecuación le llevaron a postular la existencia del llamado "mar de Dirac", entendido como un conjunto infinito de estados de energía negativa (lo que significa, inobservables) que llenan todo el espacio. Al tratarse de partículas de espín semientero, el principio de exclusión de Pauli prohíbe que electrones de energía positiva (observables) "caigan" y ocupen tales estados por el principio básico en física de mínima energía. Ahora bien, si un fotón suficientemente energético impacta sobre un electrón de energía negativa, le dotará de energía positiva (por tanto, volviéndose observable), dejando un "hueco" en el mar de Dirac que se comportará como un antielectrón, o positrón. Algo (relativamente) análogo suce-

de en los semiconductores, donde se forman pares electrón-hueco, aunque en este caso los huecos deben contemplarse como cuasipartículas (no reales), mientras que los positrones (de igual masa que los electrones, pero con carga eléctrica opuesta) sí que se consideran verdaderas (anti)partículas elementales. Prosiguiendo con la interpretación de Dirac, cuando un electrón se encuentra con un positrón, ocupa el hueco correspondiente, liberando energía en forma de rayos gamma: materia y antimateria se aniquilan. La predicción de la antimateria por Dirac, años antes del descubrimiento experimental del positrón por Carl Anderson en 1932 observando rayos cósmicos en una cámara de burbujas, representa uno de los más portentosos éxitos de la mente humana en solitario.³ Ahora sabemos que la antimateria comprende "duplicados" de todas las partículas elementales, como quarks y leptones, aunque en nuestro universo observable domina la materia frente a la antimateria, un misterio aún por explicar.

Sin menoscabo del extraordinario logro intelectual de Dirac, la actual descripción teórica de la antimateria, debida a Richard Feynman y Ernst Stueckelberg, contempla al positrón (viajando hacia el futuro) como un electrón de energía negativa viajando hacia el pasado. No es necesario, por tanto, recurrir a la noción del mar de Dirac, no exento de graves dificultades conceptuales. No obstante, la "imagen" y denominación de mar de Dirac, aplicada a quarks, aún se utiliza para describir la complejidad de la estructura dinámica de protones y neutrones en la difusión de electrones y neutrinos con alto momento transferido.

Ahora bien, lo que la ecuación de Dirac ponía claramente de manifiesto es que el problema relativista y cuántico de una única partícula pierde sentido al involucrar (necesariamente) nada menos que infinitas partículas inobservables (del mar). Además, observaciones detalladas en la ordenación energética de los niveles atómicos, como el desplazamiento de Lamb entre los subniveles 2s y 2p del átomo de hidrógeno, requieren para su explicación de procesos que van más allá de la ecuación de Dirac, como la autointeracción de un electrón consigo mismo. Todo lo anterior, junto con otras muchas razones (formales, teóricas y prácticas) condujeron a un formalismo superior a la MC aplicada a partículas: la teoría cuántica de campos (históricamente denominada segunda cuantización) cuyo abordaje cae fuera del objetivo de este artículo, pero proponemos algunas referencias [16, 17].

A pesar de tales carencias, la elegante simplicidad, sólido fundamento y poder predictivo de la ecuación de Dirac, proporcionaron el empuje definitivo a la aceptación del espín como nuevo

³ Dirac inicialmente identificó al antielectrón con el protón, al ser la única partícula elemental de carga positiva entonces conocida. Para una exposición detallada de la vida y obra de P. A. M. Dirac, véase la referencia [15].

número cuántico esencial en la física. Además de contribuir a explicar los espectros atómicos, el espín juega un papel fundamental en muchas propiedades físico-químicas de la materia ordinaria, como es el caso del magnetismo, un tema de extraordinario interés científico y tecnológico [18]. Por último, el espín permite duplicar el número de electrones al poblar los estados cuánticos de los átomos polielectrónicos, respetando el principio de exclusión de Pauli. Sin el espín, la tabla periódica de los elementos, y el mundo en consecuencia, serían muy diferentes de lo que conocemos.

El espín no es exclusivo de partículas elementales como los electrones, sino que partículas compuestas como protones o neutrones (y los núcleos atómicos en general) también pueden exhibir dicha propiedad cuántica. Así, la interacción entre el espín nuclear (en realidad, del momento angular total \vec{J} resultante de la superposición de los espines de los

nucleones constituyentes y de su momento angular orbital) y la corteza electrónica del átomo genera la denominada estructura hiperfina de los espectros atómicos, manifestándose como un desdoblamiento de las rayas espectrales en subconjuntos de niveles muy cercanos, al observarse con alta resolución.

Por supuesto, el espín también juega un papel trascendental en la estructura del propio núcleo atómico, sus desintegraciones y transiciones entre niveles. A su vez, los propios protones y neutrones (en general hadrones) están constituidos por quarks y antiquarks, dotados de espín $\frac{1}{2}\hbar$, cuyas propiedades y dinámica están descritas según el llamado modelo estándar (ME), actual paradigma de la física de partículas y de sus interacciones [19,20]. Notemos que en el marco del ME, todas las partículas (realmente) elementales constituyentes de la materia, son fermiones (espín semientero) mientras que los portadores de la interacción fuerte y electrodébil son bosones (espín uno), más el bosón de Higgs (espín cero).

En resumen, el estudio del espín abarca numerosísimos campos de la ciencia, desde la cosmología, astrofísica, física atómica, nuclear y de partículas, física de la materia condensada, fotónica, etc. hasta aplicaciones tecnológicas, imposibles de enumerar en su totalidad en este artículo. Citemos, a modo de ejemplo, la resonancia magnética nuclear (heredera histórica del ESG y conocida popularmente por su aplicación diagnóstica en imagen médica) o los ordenadores cuánticos donde los cíbits (del inglés *quantum bits*) se corresponden con estados (entrelazados) *up* y *down* de espín en ciertos prometedores dispositivos.

Seguidamente abordaremos brevemente la búsqueda de nueva física (NF) más allá del ME, donde el espín juega un papel decisivo. Conviene aclarar, primero, qué se entiende por NF en este contexto: no se trata de buscar un modelo alternativo que cancele al ME, y sus extraordinarios éxitos cosechados, sino de un marco más general que contemple al ME como una teoría efectiva, válida dentro de un margen de aplicación más reducido.⁴

El espín del muon y la búsqueda de nueva física

Nos centraremos en la determinación muy precisa del momento dipolar magnético asociado a un “parente” más pesado del electrón, el muon, con una masa unas cien veces mayor y que se desintegra rápidamente, pero con una vida media lo suficientemente larga como para permitir la medida con precisión de sus propiedades.

La ecuación de Dirac predice para la razón giro-magnética g_e del electrón un valor igual a 2, en el límite no relativista, explicando en primera aproxi-

⁴ Una situación diametralmente opuesta se dio con Galileo y Newton durante el nacimiento de la ciencia moderna, que supuso la completa desaparición de la “física” aristotélica.

Recuadro 2: El magnetón de Bohr frente al magnetón nuclear

En física es importante conocer de antemano las escalas (de energía, longitud, etc.) que caracterizan a los fenómenos que se van a estudiar. En el caso del magnetismo atómico, la unidad natural es el magnetón de Bohr ($\mu_B = e\hbar/2m_e \approx 5,78 \times 10^{-5} \text{ eV/T}$), que se corresponde con la mitad del momento dipolar magnético del electrón en primera aproximación. Su valor numérico es tan pequeño que podría pensarse en una contribución no apreciable del espín en el desdoblamiento de los niveles atómicos. Sin embargo, el campo magnético que “siente” un electrón atómico (considerando al núcleo girando a su alrededor) es considerable, de manera que el desdoblamiento debido a la estructura fina resulta observable espectroscópicamente. Así, en el caso del hidrógeno, el campo magnético interno es de unos 0,4 teslas. El desdoblamiento en energía de la interacción espín-órbita para el nivel $n = 2$ es aproximadamente $4,5 \times 10^{-5} \text{ eV}$, equivalente a una diferencia de longitudes de onda de 0,016 nanómetros para la célebre línea roja H α (por ejemplo, la transición... 3s \rightarrow 2p de la serie de Balmer).

Por otro lado, protones y neutrones poseen un momento dipolar magnético cuyo orden de magnitud viene gobernado por el magnetón nuclear $\mu_N = e\hbar/2m_N$, donde m_N es la masa del nucleón (protón o neutrón), de manera que su valor es unas dos mil veces menor que en el caso del electrón.

Resulta irónico que Pauli, que rechazó durante bastante tiempo la idea del espín propuesta por Kronig, una vez convencido de su validez, lo utilizó para explicar la estructura hiperfina de niveles atómicos como consecuencia de la interacción magnética entre la corteza electrónica y el espín nuclear. Poco después, Kronig publicó un artículo opuesto a tal explicación al pensar entonces que el núcleo atómico contenía electrones, además de protones, que deberían contribuir al espín nuclear total como un magnetón de Bohr. Por tanto, resultaba inverosímil que la estructura hiperfina observada tuviera un espaciado tan pequeño. La crítica de Kronig era sólida y resulta curioso que se le hubiese escapado a Pauli en su artículo. Sin embargo, poco después el neutrón fue descubierto por James Chadwick, entendiéndose entonces el núcleo compuesto por protones y neutrones, sin electrones, por lo que la crítica de Kronig perdió todo sentido.

mación la estructura fina y el ESG. En realidad, ese valor se aplica a cualquier partícula elemental de espín $\frac{1}{2}\hbar$, como es el caso del muon. Notemos que los muones se producen copiosamente en las interacciones de los rayos cósmicos en la alta atmósfera, alcanzando fácilmente la superficie terrestre debido a la dilatación Lorentz del tiempo. También se pueden producir en aceleradores de partículas, y orbitar durante un tiempo en un anillo mediante la acción de un campo magnético, como en el experimento muon g-2, primero en el National Brookhaven Laboratory y actualmente en FERMILAB (EE. UU.). De ese modo, se consigue medir el momento dipolar magnético llamado anómalo del muon con una precisión comparable a la del electrón. Distinguiremos los factores de espín del electrón y del muon mediante los símbolos g_e y g_μ , respectivamente. En primera aproximación se verifica que $g_e = g_\mu = 2$.

No obstante, las partículas, incluso elementales, interactúan consigo mismas y con el vacío cuántico a su alrededor, por ejemplo, mediante la emisión y absorción de fotones virtuales los cuales, a su vez, crean pares de partículas y antipartículas virtuales, según el principio de indeterminación de Heisenberg. Tales procesos, que se describen mediante “bucles” (*loops*) en los diagramas de Feynman, pueden alterar las propiedades intrínsecas de las partículas puntuales.

Para determinar la desviación o anomalía con respecto al valor 2 de una partícula “pura” de Dirac, como el electrón, se introduce el factor a_e , tal que $g_e = 2(1+a_e)$.

La primera corrección del valor esperado de g_e es debida a Julian Schwinger en 1948, que obtuvo $a_e = (g_e - 2)/2 = \alpha/2\pi$, donde α , recordemos, toma el valor aproximado de $1/137$. Se trata, pues, de una corrección pequeña pero medible, que acercaba el valor predicho al observado. Ahora bien, hay muchas más contribuciones, a cuyo arduo cálculo se han consagrado expertos durante años (citemos especialmente a Toichiro Kinoshita y su equipo, con más de doce mil diagramas de Feynman), alcanzando un extraordinario acuerdo con la determinación experimental de $0,21$ partes por millón. Tal concordancia representa uno de los mejores resultados de precisión en toda la física y un éxito rotundo de la teoría cuántica de campos (y en particular de la electrodinámica cuántica) dentro del ME. También sugiere estudiar cualquier discrepancia entre la teoría y la observación experimental mediante esta propiedad magnética derivada del espín.

Con tal fin, analizaremos seguidamente el momento dipolar magnético anómalo del muon mediante el correspondiente factor $a_\mu = (g_\mu - 2)/2$.

Citemos que el muon ofrece mucho mejores oportunidades que el electrón para el descubrimiento de NF debido a su mayor masa, pues las nuevas interacciones se amplificarían proporcionalmente a las masas (al cuadrado) de las partículas implicadas.

La última medida experimental realizada en Fermilab durante 2023 proporcionó un valor promedio $a_\mu = 0,00116592059(22)$ donde, entre paréntesis, se indica el error experimental. Por otro lado, el valor teórico resultaba ser $a_\mu = 0,00116591810(43)$ incorporando las correcciones (véase la figura 3) de todo tipo de interacciones dentro del ME, incluidas débiles y fuertes (hadrónicas). Con aproximadamente cinco desviaciones estándar de diferencia entre ambas, se consideró tal discrepancia como un posible descubrimiento de la tan ansiada NF.

Sin embargo, hace pocos meses, el cálculo de la contribución hadrónica (mediante la polarización del vacío especialmente, y la dispersión luz por luz) al factor g_μ ha variado significativamente dando un vuelco a la situación. Con anterioridad, la corrección correspondiente se obtenía empíricamente a partir de datos procedentes de colisiones $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$. Sin embargo, utilizando la llamada cromodinámica cuántica en el retículo (*lattice QCD* en inglés), se ha recalculado recientemente dicha contribución, proporcionando esta vez un valor (y error) considerablemente menor. En resumen, el resultado actual resultado actual implica una discrepancia entre la predicción teórica del ME y la medida experimental de tan solo $0,9$ desviaciones estándar (en lugar de 5), siendo, por tanto, compatible con una fluctuación estadística o error sistemático, descartando (por ahora) el descubrimiento de NF mediante el momento magnético anómalo del muon [21, 22]. Nuevas comprobaciones teóricas y experimentales están de camino, aunque, innegablemente, el nuevo valor teórico de la anomalía cercano al experimental ha supuesto una decepción entre la comunidad de física de partículas.

Fronteras del conocimiento: intensidad versus alta energía

Como hemos visto, la determinación precisa del momento magnético anómalo del muon puede proporcionar pistas sobre la existencia de NF. La clave radica en aquellos procesos virtuales “internos” (bucles como en la figura 3) en los diagramas de Feynman, inaccesibles directamente a la observación, que, no obstante, originan modificaciones sutiles de las propiedades medibles de las partículas y de sus interacciones. Es este un ejemplo de un tipo de búsqueda de NF (cuya escala de energía es presumiblemente mucho mayor que la puesta en juego en el proceso estudiado) basado en correcciones virtuales de canales de producción o desintegración de partículas. Se habla pues de la *frontera de la intensidad o precisión*, por la gran estadística necesaria para alcanzarla.

Alternativamente, se puede buscar NF aumentando la energía del experimento (es decir, del acelerador) con el fin de superar el umbral de manifestación de nuevos fenómenos mediante la

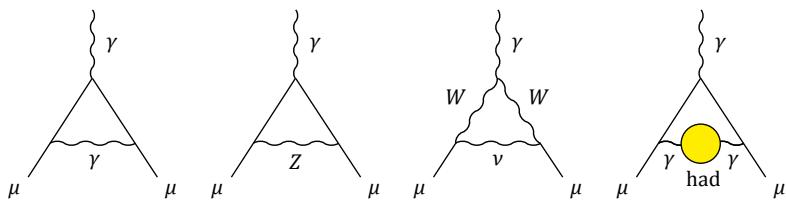


Fig. 3. Distintas contribuciones a la interacción del muón con un campo magnético externo (representado mediante el fotón superior del vértice), alterando su momento dipolar magnético. El primero por la izquierda fue calculado por Schwinger en 1948, y actualmente más de 12 000 diagramas de Feynman han sido incluidos en el cálculo. El cuarto grafo a la derecha no se puede calcular perturbativamente, constituyendo una de las principales fuentes de incertidumbre teórica. Faltaría una contribución adicional (o más) en caso de que la NF contribuyera como una corrección más allá del ME con nuevas partículas y/o mediadores de interacción.

producción real, ya no virtual, de nuevas partículas o emergencia de interacciones. Se trata de la *frontera de la alta energía* en física de partículas. Un ejemplo de lo anterior se encuentra en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) en el CERN, y en sus futuras extensiones para incrementar luminosidad (intensidad) o energía, como el FCC (Future Circular Collider) de unos 100 km de circunferencia.

Por último, existe otro modo de explorar “territorios” desconocidos del conocimiento de la naturaleza, inaccesibles mediante los anteriores métodos. Se trata de aquellas observaciones astronómicas y astrofísicas que permiten investigar fenómenos extremadamente violentos en el universo, que tuvieron lugar a distancias considerables tanto en el espacio como en el tiempo: fusión de agujeros negros y consiguiente generación de ondas gravitatorias, materia y energía oscuras y sus efectos (anti)gravitatorios a gran escala, rayos cósmicos, fondo cósmico de microondas y de neutrinos, ondas gravitatorias primordiales que se remontan a pocos instantes después del *Big Bang*, pero que todavía pueden permanecer como un (débil) fondo en el universo actual [23-25].

Tales energías solo se pueden estudiar a escala astrofísica o cósmica, ciertamente inalcanzables por cualquier acelerador actual o futuro construido por la mano del ser humano. La cosmología/astrofísica de precisión está, por tanto, estrechamente vinculada con las anteriores fronteras, de intensidad y energía, considerándose todas ellas complementarias en el avance del conocimiento del micro y del macrocosmos, las dos caras de una misma moneda del saber.

Referencias

- [1] W. GERLACH y O. STERN, Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld, *Zeitschrift für Physik* **9**, 349 (1922).
- [2] R. EISBERG y R. RESNICK, *Física cuántica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas* (Limusa, 1978).
- [3] P. A. TIPLER, *Física Moderna* (Reverté, 1980).
- [4] J. M. SÁNCHEZ RON, *Historia de la física cuántica (Crítica, 2025)*.
- [5] H. KRAGH, *Niels Bohr and the Quantum Atom: The Bohr Model of Atomic Structure 1913-1925* (Oxford University Press, 2012).
- [6] A. GALINDO TIXAIRE, Miguel Catalán, una obra, un ejemplo, *Revista Española de Física* **17** (6), 5 (2003).
- [7] A. GALINDO y P. PASCUAL, *Mecánica Cuántica* (Alhambra, 1978).
- [8] D. J. GRIFFITHS, *Introduction to Quantum Mechanics*, (Prentice Hall, 1995).

- [9] S. GASIOROWICZ, *Quantum physics* (John Wiley & Sons, 1974).
- [10] N. STRAUMANN, The Role of The Exclusion Principle from Atoms to Stars: A Historical Account, arXiv:quant-ph/0403199v2
- [11] G. E. UHLENBECK y S. GOUDSMIT, Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons, *Naturwissenschaften* **47**, 953 (1925).
- [12] B. FRIEDERICHS y D. HERSCHBACH, Stern and Gerlach: How a Bad Cigar Helped Reorient Atomic Physics, *Physics Today* **56** (12), 53 (2003).
- [13] C. E. HOUSECROFT y A. G. SHARPE, *Química inorgánica* (Pearson/Prentice Hall, 2006).
- [14] L. H. THOMAS, The motion of the spinning electron, *Nature* **117**, 514 (1926).
- [15] J. A. de AZCÁRRAGA, P. A. M. Dirac, el ingeniero que imaginó casi todo antes que todos, *Revista Española de Física* **31** (1), 57 (2017).
- [16] L. H. RYDER, *Quantum Field Theory* (Cambridge University Press, 1996).
- [17] M. E. PESKIN y D. V. SCHROEDER, *An introduction to quantum field theory* (CRC Press, 2019).
- [18] D. JILES, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, 3rd ed. (CRC Press, 2015).
- [19] M. THOMSON, *Modern Particle Physics* (Cambridge University Press, 2014).
- [20] S. NAVAS *et al.* (Particle Data Group), Review of Particle Physics, *Physical Review D* **110**, 030001 (2024).
- [21] D. CASTELVECCHI, Dreams of new physics fade with latest muon magnetism result, *Nature* **620**, 473 (2023).
- [22] F. R. VILLATORO, Adiós a la desviación de muón g-2 del Fermilab en el momento magnético anómalo del muón, *La ciencia de la mula Francis* (18 julio 2024).
- [23] E. ELIZALDE, *Cosmología moderna desde sus orígenes* (Los Libros de la Catarata, 2020).
- [24] B. J. T. JONES, *Precision Cosmology: The First Half Million Years* (Cambridge University Press, 2017).
- [25] M. GUIDRY, *Modern General Relativity* (Cambridge University Press, 2019).

Miguel Ángel Sanchis Lozano
Dpto. de Física Teórica e Instituto
de Física Corpuscular, Universitat
de València-CSIC



Roger Sanchis Gual
Instituto de Ciencia Molecular
(ICMol), Universitat de València

