

Cien años de Física Cuántica: su impacto en Ciencia y Tecnología¹

El 14 de diciembre del año 2000 se conmemoró el primer centenario del informe de Planck a la *Deutschen Physikalischen Gesellschaft* (Academia Alemana de Física), titulado "Una teoría de la ley de distribución de energía en el espectro normal"². Este artículo puede ser considerado como el punto de partida de la Física Cuántica. Pocos artículos han tenido tan gran impacto a largo plazo como el artículo de Planck, no sólo en Física, sino en todas las Ciencias, en Tecnología, en Medicina, en Filosofía, e incluso en la sociedad en general. Como muchos otros innovadores, Planck no se percató de la magnitud de la revolución, en el sentido de Thomas Kuhn, que él acababa de comenzar y que llevó a una revisión de los conceptos de partículas y campos y de cómo la naturaleza funciona en el nivel fundamental o microscópico.

Si se me pregunta cuál es uno de los rasgos más importantes del siglo XX, no dudaría en decir que es el extraordinario avance en nuestra comprensión y manipulación de la radiación y la materia, hecho posible gracias a la aparición de la Física Cuántica y al desarrollo de técnicas elaboradas (detectores, aceleradores, etc.) para explorar y manipular materia y radiación en su nivel más fundamental. En otras palabras, una combinación única de ciencia y tecnología que proporciona un paradigma del mundo microscópico bastante diferente al del siglo XIX y a nuestra manera de ver

el mundo macroscópico. Pero lo que es incluso más importante desde el punto de vista social es que ahora vivimos rodeados de desarrollos tecnológicos basados, de una u otra manera, en la Física Cuántica, con aplicaciones en campos tan diversos como la Medicina, la Biología, las comunicaciones, los materiales, la exploración espacial, el procesado de imágenes, etc.; son demasiados para mencionarlos todos en detalle.

MICRO, MESO Y MACRO-FÍSICA

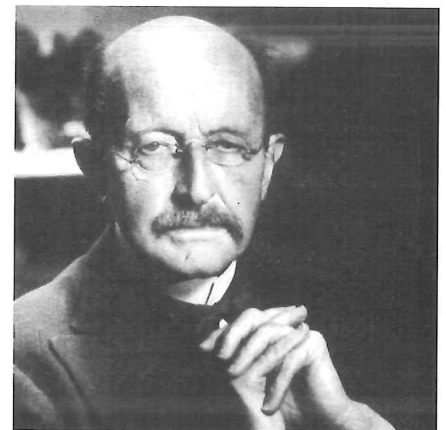
En microfísica hemos identificado los componentes más relevantes de la materia y hemos descubierto cómo interactúan, y hemos desarrollado un formalismo o metodología coherente, la Física Cuántica, para estudiar esos componentes y sus interacciones. Esto ha llevado a la formulación de un paradigma de la Física de gran simplicidad, como se muestra en la Tabla I, que nos ha permitido tener una visión unificada de cómo funciona el universo.

Este paradigma unificador es quizás la contribución más importante de la Física Cuántica, que no es una ciencia estática, sino que continúa evolucionando. Además, ha proporcionado innovaciones conceptuales fundamentales, algunas de las cuales están enumeradas en la Tabla II y serán examinadas más adelante. El impacto de algunas de estas ideas innovadoras ha trascendido más allá del problema que las motivó, inclu-

so en algunos casos en los que el método usado originalmente no era el correcto.

Gracias a la Física Cuántica sabemos cómo explicar y calcular con gran precisión las propiedades de las moléculas, los átomos y los núcleos, y de otros muchos materiales, como los conductores y los semiconductores, siendo una de sus principales aplicaciones los transistores (o *chips*). Gracias al desarrollo de la Teoría Cuántica de Campos sabemos cómo analizar la interacción entre radiación electromagnética y materia y entender cómo las nociones de partículas y campos (no ondas) pueden ser correlacionadas. Un modelo estándar de partículas (leptones y quarks) ha permitido un dibujo unificado de la materia y la explicación de muchos procesos de alta energía. Y así, sucesivamente.

Esta unificación conceptual basada en la Física Cuántica también tuvo un impacto importante en nuestra comprensión del mundo macroscópico o sensorial, que es



Max Planck.

Tabla I

¿Existe una línea histórica en la Física?:	
En el nivel microscópico: SÍ	
En el nivel macroscópico: NO	
1.	El mundo está compuesto por unidades distinguibles llamadas partículas, con propiedades bien definidas y asociadas a campos.
2.	Hay unas pocas interacciones fundamentales entre partículas.
3.	Las interacciones se describen mediante campos, generalmente dependientes del tiempo, y algunos se propagan en el espacio en forma de ondas.
4.	Las interacciones "conservan" ciertas magnitudes físicas.
5.	Las leyes de conservación se relacionan con las simetrías observadas en el universo.

¹ Esta es una versión revisada por el autor (y traducida por Carmen Carreras) de un artículo presentado en la Conferencia sobre Mecánica Cuántica, Partículas y Campos, que tuvo lugar en La Habana (Cuba), del 15 al 22 de diciembre de 2000. También fue presentado en el Curso: "La Física y la Química: del descubrimiento a la intervención" que el Instituto Superior de Formación del Profesorado organizó con la UNED en el Centro Asociado de Ávila (2-6 de julio de 2001).

² Publicado en *Annalen der Physik*, vol. 4, pág. 553 (1901).

Tabla II
Innovaciones conceptuales de la Física Cuántica

1. Imposibilidad de describir el mundo microscópico en los mismos términos que el macroscópico. Revisión de los principios de causalidad, determinismo y realidad en el nivel microscópico. Papel del observador.
2. Cuantificación de las magnitudes dinámicas: energía, momentum (cantidad de movimiento), momento angular, espín.
3. Estados estacionarios de energía de los sistemas compuestos ligados: átomos, moléculas, núcleos, hadrones.
4. Transiciones radiativas entre los estados estacionarios: $\Delta E = h\nu$
5. Simetría, invariancia y leyes de conservación.
6. Clasificación de las partículas según su espín y su simetría. Fermiones y bosones. Estadística de Bose-Einstein y de Fermi-Dirac.
7. Partículas y antipartículas. Creación y aniquilación de partículas.
8. Campos e interacciones fundamentales. Cuantificación del campo y partículas (Electrodinámica Cuántica, Cromodinámica Cuántica).
9. Partículas indistinguibles asociadas con el mismo campo (por ejemplo, todos los electrones son idénticos).
10. Modelo estándar de campos y partículas.
El desarrollo y la puesta a prueba de estos nuevos conceptos ha sido posible gracias al desarrollo de métodos de observación y experimentación sofisticados y precisos y a técnicas de computación elaboradas, así como al concurso de algunas pocas personas con un extraordinario sentido físico.

un sistema compuesto de un gran número de unidades, del orden de 10^{23} . Hacia el año 1900 se tenía una visión del mundo físico basada mayoritariamente en nuestras experiencias sensoriales, que creció de una manera poco sistemática, por agregación, la cual volvía borrosa cualquier posible unidad conceptual a nivel macroscópico, resultando de ello diversas ciencias independientes de acuerdo con la fenomenología: Biología, Química, Física. A su vez, la Física llegó a estar dividida desde nuestras experiencias sensoriales en las ramas "clásicas" fenomenológicas: mecánica, calor, acústica, óptica y electromagnetismo, aunque la visión mecanicista del universo, que prevaleció, constituyó una especie de principio unificador, y todavía la Física es enseñada de esta manera. Pero estas ciencias, y en particular las ramas "clásicas" de la Física, se han visto afectadas por la Física Cuántica, y hablamos ahora de biología cuántica, química cuántica, óptica cuántica, teoría cuántica de sólidos o de

la materia condensada, electrodinámica cuántica, etc., que tratan de la fenomenología en sus niveles fundamentales, cuya explicación requiere el formalismo de la Física Cuántica.

Hoy sabemos que todas esas ramas "clásicas" o sensoriales de la Física estudian los fenómenos que son consecuencia de la estructura de la materia y radiación en su nivel fundamental. Por lo tanto, la macro y la micro-física están estrechamente relacionadas, algo que comenzó a ser reconocido a finales del siglo XIX. Sin embargo fue el desarrollo de la Física Cuántica durante el siglo XX lo que hizo posible formular esta relación de una manera precisa y cuantitativa. Por ello no deberíamos hacer más la división entre Física "clásica" y Física "moderna", porque la Física "moderna" tiene ya un siglo de antigüedad. En su lugar deberíamos hablar de "micro", "meso" y "macro" Física, como tres amplios niveles para analizar la naturaleza, dependiendo del tamaño del sistema con el

que se trate y del nivel de resolución en el que lo analicemos. El papel de la Física Cuántica es diferente en cada nivel: es fundamental en micro-física, no tanto en meso-física, y más bien difuso en macro-física.

LA FÍSICA EN 1900

Para entender completamente el impacto científico y tecnológico de la Física Cuántica es importante tener en cuenta la situación de la Física a finales del siglo XIX, cuando fue aceptado por la sociedad que la ciencia era una auténtica búsqueda del conocimiento. Nos dimos cuenta de que interpretábamos todos los fenómenos en el nivel macro en términos de las nociones de "localización" y "extensión", para las cuales son usados los conceptos de "partículas" y "campos". Newton, con sus famosas tres leyes, permitió a la metodología científica trabajar en el nivel macroscópico de baja energía mediante el movimiento de "partículas" bajo la acción de "fuerzas", para lo que las nociones de trayectoria, velocidad, aceleración, etc., eran necesarias, e insinuó una teoría del "campo" gravitatorio, aunque él no usó ese término. Maxwell desarrolló una teoría de "campos" electromagnéticos coherente, científica y macroscópica, que incluyó "ondas" electromagnéticas, es decir, campos electromagnéticos que se propagan en el espacio con una velocidad bien definida y sin distorsión.

Eran también conocidos otros fenómenos ondulatorios de naturaleza macroscópica "mecánica", tales como las ondas elásticas y las ondas en fluidos. Todos estos fenómenos tenían en común que obedecían el mismo tipo de ecuación diferencial de segundo orden:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \nabla^2 u$$

donde v es la velocidad de propagación del campo, aunque otras ecuaciones de primer orden en el tiempo,

como por ejemplo la ecuación de la difusión:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D\nabla^2 u + f(u)$$

admiten también soluciones de “frente de ondas”. Sin embargo, debe ser entendido que no todos los campos dependientes del tiempo obedecen aquel tipo de ecuación y se propagan como una onda, aunque pueda asociárseles una longitud de onda o una frecuencia como resultado de su análisis de Fourier. La visión del universo de Newton y Maxwell en términos de “partículas” y “campos” tuvo éxito y es todavía central en la Física del siglo XX, habiendo sido incorporada dentro de la Física Cuántica, pero de una manera diferente, basada en la Teoría Cuántica de Campos.

Para ser preciso, en Física Cuántica una “partícula” es una entidad física localizable en el espacio-tiempo (x, t) , caracterizada por ciertos parámetros (carga, masa, espín, paridad), su movimiento está gobernado por una ley dinámica, obedece ciertas simetrías y está asociada a un “campo” cuántico. Por otra parte, un “campo” cuántico es una entidad física descrita por una función que se extiende por el espacio y el tiempo $F(x, t)$, que obedece una ley dinámica, tiene ciertas propiedades de transformación y de simetría, y sus componentes son operadores cuánticos que “crean” o “aniquilan” las “partículas” asociadas con el “campo”. En Física Cuántica se pueden utilizar las nociones de “partículas” o de “campos” indistintamente dependiendo de la situación particular o del proceso que esté siendo considerado.

Otro aspecto de la Física del siglo XIX es que la mayoría de los fenómenos son descritos por ecuaciones diferenciales lineales que admiten soluciones deterministas precisas, aunque algunos físicos, como Stokes, Rayleigh y posteriormente Poincaré, comenzaron a reconocer que en algunos casos podían ser necesarias ecuaciones más complejas, como por ejemplo el movimiento de los fluidos, el sonido, el movimiento plane-

tario, etc. Sin embargo, en 1900 parecía que el edificio conceptual de la Física estaba completo y muchos, bastante ingenuos, adelantaron la idea de que la única nueva cosa que podía esperarse en el nuevo siglo era un refinamiento en las técnicas de medida, de observación y de computación. Y esto fue precisamente lo que ocurrió, con profundas consecuencias conceptuales y prácticas, como vamos a poner de manifiesto en lo que sigue, pero quizás la innovación conceptual más importante en el nivel microscópico ha sido la sustitución de la descripción espacio-temporal de los fenómenos en términos de trayectorias, velocidades, etc., por una expresión en términos de una entidad abstracta llamada “función de onda”, “campo de materia” o “vector de estado”. En lugar de presentar una historia sistemática del desarrollo de la Física Cuántica, pondré de relieve solamente las cuestiones conceptuales más críticas relacionadas con la Física Cuántica que afectan a nuestra forma de ver el universo, presentada omitiendo los detalles y muchos desarrollo porque son de sobra conocidos.

LOS COMIENZOS

Desde mediados del siglo XIX la distribución de energía de la radiación de un cuerpo negro, que es la radiación electromagnética confinada en una cavidad y en equilibrio con la energía que se intercambia con los átomos de la cavidad, había sido medida experimentalmente por Kirchhoff y otros, pero quedaba por explicar cómo los átomos en la cavidad mantenían el equilibrio con la radiación electromagnética produciendo la distribución espectral medida. El problema interesó a Max Planck, que era en aquel entonces profesor de Física en la Universidad de Berlín, quien basándose en las medidas realizadas por Rubens y utilizando la noción termodinámica de entropía y la estadística de Maxwell-Boltzmann, obtuvo empíricamente una expresión para la distribución espectral de la energía en la

radiación del cuerpo negro, que en notación actual puede expresarse como sigue:

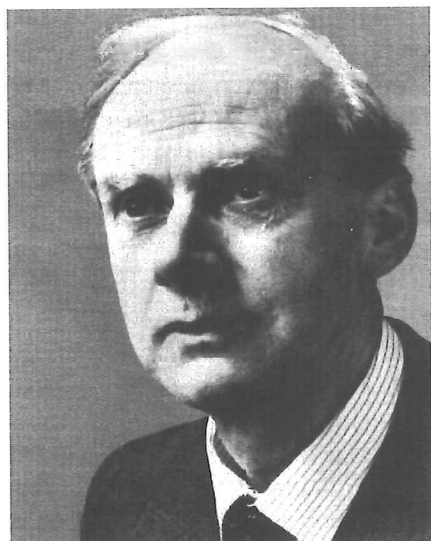
$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

donde la constante h se conoce como constante de Planck, celeberrimo símbolo de la Física Cuántica, y $k = R/N_A$ es la constante de Boltzmann, que introdujo Planck. Es interesante indicar que el mundo está inmerso en una radiación cósmica, remanente del Big Bang, con un espectro de cuerpo negro correspondiente a una temperatura de 2,7 K.

Una de las principales tareas para Planck fue lograr una justificación teórica de esta expresión compatible con la termodinámica y con el concepto de entropía. El método seguido por Planck, basado en la definición de entropía de la estadística de Boltzmann, $S = k \ln W$, es bien conocido y no necesito explicarlo en detalle. El punto importante es que Planck, “en un acto de desesperación”, como él mismo confesó más tarde, encontró que la única manera de reproducir la distribución espectral empírica de la radiación de un cuerpo negro era suponer que los átomos de las paredes de la cavidad se comportaban como osciladores de frecuencia $\nu = \omega / 2\pi$, que absorberían o emitirían radiación electromagnética de frecuencia ν solamente en cantidades, que él llamó *cuantos de energía*, proporcionales a la frecuencia de la radiación, esto es $\Delta E = h\nu$. La consecuencia obvia era que la energía de los osciladores debía ser:

$$E = n h\nu + E_0 \quad \text{o} \quad E = n\hbar\omega + E_0$$

donde E_0 es la energía del punto cero que Planck asumió implícitamente como nula para estar seguro de que su modelo proporcionaba una energía total finita. Sabemos que esto no es correcto, que $E_0 = 1/2 h\nu$, pero no importa demasiado porque también sabemos que la forma en que Planck obtuvo su fórmula no era del todo satisfactoria. La forma



Paul Dirac.

correcta fue desarrollada varios años más tarde por Einstein.

Es bien sabido que el aspecto más importante de la idea de Planck fue la “cuantificación” de la energía de los osciladores atómicos. La cuantificación existía en la Física de Newton y Maxwell pero de manera diferente. Aparecía cuando el movimiento ondulatorio debía ser confinado en una cierta región, dando lugar a ondas estacionarias con un espectro discreto de frecuencias (cuerdas vibrantes, membranas y láminas, tubos de órgano, guías de onda y cavidades, etc.). O de una forma más rigurosa, como consecuencia de una condición de contorno impuesta en una ecuación diferencial satisfecha por un campo, siempre que el campo estuviera confinado en una región finita. Nada en la mecánica de Newton nos llevaba a dicha cuantificación de la energía de una partícula, cuyo movimiento no estaba descrito por una ecuación diferencial en derivadas parciales.

Por esta razón la idea de Planck no era aceptada con entusiasmo, aunque era reconocida como una forma matemática “ad hoc” de obtener el espectro de energía del cuerpo negro. Se necesitaba una justificación basada en algunos principios nuevos, porque, recordemos, la energía de los osciladores estaba cuantificada. Sin embargo, la similitud entre la cuantificación de la energía y las ondas estacionarias

tuvo una profunda influencia en el desarrollo posterior de la Mecánica Cuántica, principalmente en el trabajo de Schrödinger, aunque también condujo a muchas confusiones y conceptos erróneos. Debería notarse que en 1906, año en el que tuvo lugar la primera aplicación de la Física Cuántica a la Física del Estado Sólido, Einstein y muy poco después Debye utilizaron las ideas de Planck sobre la cuantificación de la energía de los osciladores en un sólido combinadas con la estadística de Maxwell-Boltzmann para explicar con éxito la variación de la capacidad calorífica de los sólidos con la temperatura, reforzando así la idea de la cuantificación de la energía de los osciladores.

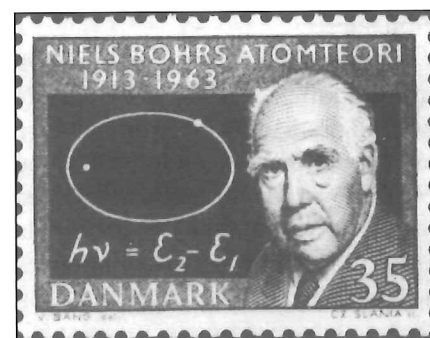
Una importante consecuencia de la idea de Planck fue la necesidad de revisar la forma en que la radiación electromagnética interacciona con la materia. Planck nunca cuestionó la Teoría Electromagnética de Maxwell, pero la manera en que se efectuaba el intercambio de la energía con los osciladores cuánticos seguía siendo una cuestión abierta. El paso crucial en este asunto fue dado por Albert Einstein. En el mes de marzo de 1905, Einstein publicaba en *Annalen der Physik*³ un artículo titulado “Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la absorción y emisión de la luz”, en el cual estudiaba la radiación del cuerpo negro por una nueva vía. Sin cuestionar la validez de la fórmula de Planck para la distribución de la energía de la radiación, Einstein fue más lejos y propuso que la radiación electromagnética era transportada por cuantos de energía, esto es “la energía de un rayo de luz... consiste en un número finito de cuantos de energía... los cuales se mueven sin separarse y solamente pueden ser absorbidos o emitidos como un todo”. De esta manera estableció su revolucionario “principio heurístico”: “si una radiación monocromática se comporta como un medio discreto consistente en cuantos de

energía de magnitud $h\nu$, esto sugiere que las leyes de la absorción y emisión de la luz puedan ser explicadas suponiendo que la luz está también constituida por cuantos de este tipo”. En otras palabras, lo que Einstein estaba proponiendo era reexaminar cómo la energía electromagnética es transportada en el espacio y qué es lo que es absorbido y emitido por la materia como cuantos de energía. De hecho, en 1910 Einstein reiteró que “las propiedades de los procesos elementales hacen casi inevitable la formulación de una verdadera teoría de la radiación”, lo que hizo Dirac veinte años después.

En el mismo artículo, como consecuencia de su propuesta de que la energía de la radiación es transportada por cuantos, Einstein propuso una explicación del efecto fotoeléctrico, tema de investigación candente en aquel momento. Su sugerencia fue que los electrones absorben energía de la radiación electromagnética en paquetes o cuantos de energía $h\nu$, y para explicar la variación observada de la energía cinética con la frecuencia de la radiación introdujo la famosa relación:

$$E_k = h\nu - E_0$$

donde E_0 es la energía requerida para arrancar el electrón del metal. Esta relación ha sido verificada experimentalmente con una gran precisión en muchos materiales y con radiación electromagnética de diferentes frecuencias, confirmando que h es la misma constante usada por Planck para la radiación del cuerpo negro. Pese a la resistencia inicial a estas ideas, Einstein fue



Sello de Niels Bohr.

³ A. Einstein. *Annalen der Physik*. Vol. 17 (1905), p. 132.

galardonado con el Premio Nobel de Física de 1921 por su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico. Huelga decir que la teoría de Einstein del efecto fotoeléctrico ha conducido a un gran número de importantes aplicaciones y ha sido extendida a efectos fotoeléctricos con átomos y núcleos y a procesos químicos y biológicos (fotoionización, fotodisociación, etc.)

Por supuesto, los cuantos de energía propuestos por Einstein, bautizados como "fotones" por G. Lewis en 1926, no eran partículas en el mismo sentido que los electrones. Puesto que se movían a la velocidad de la luz, tenían que tener masa nula y, por lo tanto, según la teoría de la relatividad del propio Einstein, la relación entre su energía y su momentum tenía que ser:

$$E = pc \quad \text{o} \quad p = hv/c$$

Hubo que esperar hasta 1923, cuando A. H. Compton estableció la cinemática relativista para la dispersión de fotones por electrones libres y la verificó con sus experimentos sobre dispersión de rayos X por electrones, para confirmar que los fotones llevaban una energía $h\nu$ y un momentum $h\nu/c$. Así se llegó a aceptar finalmente que la radiación electromagnética se comporta como partículas cuando interacciona con la materia. Pero debido a que los físicos pensaban en partículas y en ondas electromagnéticas de una manera "sensorial" se utilizaron dos modelos de radiación "conflictivos", o quizás complementarios: uno para la interacción con la materia (fenómenos de absorción y emisión) y otro para la propagación (fenómenos de interferencia, difracción, etc.).

Consecuentemente, la cuestión más importante es cómo es posible que si la radiación electromagnética es un fenómeno ondulatorio, su energía pueda transformarse en paquetes o cuantos o ser absorbida en cantidades finitas proporcionales a la frecuencia. Esta representación dual de la radiación electromagnética como ondas y como partículas

era incomprensible en 1905. Apareció pocos años más tarde en Mecánica Cuántica como "dualidad onda-corpúsculo" y en 1909 llevó a Einstein a admitir, como resultado de su análisis sobre las fluctuaciones de la energía en una cavidad llena de radiación electromagnética térmica, que era necesario formular "una teoría de la luz que pudiera interpretarse como una especie de fusión de las teorías ondulatoria y corpuscular", o de "campos" y de "partículas". Esto fue llevado a cabo por Dirac pocos años más tarde cuando formuló la Electrodinámica Cuántica.

Un tercer hito en los preliminares de la Física Cuántica, que puede ser considerado como el precursor de la Mecánica o Dinámica Cuántica, tuvo lugar en 1913 con la publicación de N. Bohr en *The Philosophical Magazine* de sus tres artículos relativos a la estructura de la materia. En el primero, "Sobre la constitución de átomos y moléculas", Bohr estableció sus tres ideas revolucionarias:

1. Solamente son permitidos, o estables (no radiativos), algunos movimientos electrónicos en los átomos, que él llamó *estados estacionarios*, lo que implica que los niveles de energía electrónicos están cuantificados.
2. En la transición entre dos estados estacionarios de energías E_a y E_b y el átomo emite o absorbe radiación de frecuencia ν_{ab} dada por la expresión:

$$E_a - E_b = h \nu_{ab}$$

expresión que se conoce como la "relación de Bohr", que se ha comprobado que tiene validez universal y que es una extensión de la cuantificación original de Planck.

3. El momento angular de los electrones atómicos moviéndose en órbitas circulares está cuantificado según la relación:

$$L = n\hbar$$

El propósito de Bohr era, por una parte, justificar la estabilidad del modelo del átomo nuclear, desarrollado por E. Rutherford en 1911 como resultado de sus experimentos sobre la dispersión de partículas α (o núcleos de He), para lo cual fue necesario suponer la existencia de estados electrónicos estables no radiativos, y por otra, explicar el espectro del átomo de hidrógeno. Utilizando estos postulados y la dinámica newtoniana para el movimiento del electrón, Bohr calculó la energía de los estados estacionarios del átomo de hidrógeno y obtuvo la constante de Balmer para su espectro: un asombroso éxito. Las ideas de Bohr sobre los estados estacionarios y la cuantificación de la energía y del momento angular han sido extendidas a moléculas, núcleos y partículas fundamentales e incluso a estructuras periódicas como los cristales, y son fundamentales en Física Cuántica.

Estrictamente hablando, Bohr utilizó las leyes del movimiento de Newton para obtener la relación:

$$\omega = \frac{2^{3/2}(-E)^{3/2}}{Ze^2 m^{1/2}}$$

donde ω es la velocidad angular del electrón en una órbita circular de energía E (negativa), y modificó la hipótesis de Planck sobre la energía para osciladores atómicos de frecuencia angular ω :

$$E_n = n\hbar\omega$$

introduciendo la suposición *ad hoc* de que:

$$E_n = -xn\hbar\omega$$

donde el factor x se debe ajustar para calcular la energía de los estados estacionarios. El motivo por el que Bohr introdujo el factor x es porque no podía aplicar la regla de cuantificación de Planck establecida para un oscilador armónico lineal, ya que en el caso del movimiento del electrón ω depende de la energía de la órbita circular. Haciendo $x = 1/2$ Bohr pudo reproducir el espectro

del hidrógeno. Debemos darnos cuenta de que $\nu = \omega / 2\pi$ no es la misma que la frecuencia ν_{ab} de la radiación electromagnética producida en la transición entre dos estados estacionarios a y b del átomo de hidrógeno. Solamente al final de su artículo, Bohr hace notar que puesto que $E = \frac{1}{2} \omega L$ para un movimiento circular, su suposición era equivalente a la cuantificación del momento angular, una idea de profunda importancia en Física Cuántica.

Algunos años más tarde se vio que además de la energía $h\nu$ del fotón es necesario considerar su momentum $h\nu / c$, debido a que la ecuación de Bohr requiere su conservación para tener en cuenta la existencia de la energía de retroceso en la emisión o en la absorción de radiación. Así, dependiendo de si se trata de una emisión o de una absorción,

$$E - E' = h\nu \pm \frac{p_{\text{retroceso}}^2}{2M}$$

donde $p_{\text{retroceso}} = h\nu/c$ es debido a la conservación del momentum, y M es la masa del átomo o del núcleo que retrocede. La energía de retroceso es despreciable en las transiciones radiativas de los átomos ($h\nu \ll M_{\text{átomo}} c^2$), pero puede ser importante en las transiciones radiativas de los núcleos ($h\nu \approx M_{\text{núcleo}} c^2$), aunque también es despreciable si el núcleo está inmerso en un cristal ($h\nu \ll M_{\text{cristal}} c^2$), efecto Mossbauer); sin embargo, su verificación experimental refuerza la idea del fotón como una "partícula" con energía y momentum.

Como sabemos, la cuantificación de Bohr del momento angular no es correcta y debe ser reemplazada por la siguiente:

$$L = \sqrt{l(l+1)} \hbar$$

pero debido a la particular degeneración, llamada dinámica o accidental, de la ecuación de Schrödinger para un campo coulombiano, que asigna la misma energía a estados con diferente número cuántico l pero con el mismo n para el movimiento bajo

las fuerzas coulombianas, que Bohr no conocía pero nosotros sí, su cálculo de las energías de los estados estacionarios del átomo de hidrógeno en función de constantes bien conocidas (e, m, h, c) es correcto (en el primer orden de aproximación). Los métodos de Bohr fueron rápidamente ampliados por A. Sommerfeld para órbitas elípticas por cuantificación de las integrales de fase con arreglo a la relación:

$$\oint p dq = nh$$

basándose en el principio de invariancia adiabática de Ehrenfest, pudiendo explicar además cuantitativamente los efectos Zeeman y Stark, e incorporar correcciones relativistas. Sin embargo, el método de Bohr no puede explicar sistemas con más de un electrón.

Las ideas de Bohr de niveles de energía estacionarios, transiciones radiativas entre estados estacionarios y cuantificación del momento angular fueron aplicadas al estudio de las vibraciones y rotaciones de las moléculas. La espectroscopía atómica y molecular, desde las microondas hasta los rayos X, pudo ser interpretada como transiciones radiativas entre niveles de energía, llegando así a ser una ciencia cuantitativa que permitía obtener datos muy relevantes sobre los átomos y las moléculas, de importancia no sólo para la Física sino también para la Química, la Medicina, la Ciencias de los Materiales, etc. La idea de las transiciones radiativas entre estados estacionarios fue extendida años más tarde a los núcleos para explicar los espectros de rayos γ y exci-

taciones hadrónicas, originalmente llamadas "resonancias", a pesar de la gran disparidad de energías involucradas (ver Figura 1), y fue un principio guía para Schrödinger. Así, las tres ideas de Bohr deben ser consideradas como un importante hito en Física Cuántica.

Pronto se hicieron evidentes tres grandes dificultades que motivaron grandes discusiones:

1. ¿Por qué los electrones no radian energía en los estados estacionarios?,
2. ¿cómo y cuándo un electrón determina cambiar de un estado estacionario a otro?, y
3. ¿qué les ocurre al electrón y al campo electromagnético "durante" la transición de un estado estacionario a otro?

La tercera cuestión carece de sentido en Mecánica Cuántica porque no necesitamos describir en detalle el movimiento del electrón, como Bohr intentaba hacer utilizando la mecánica newtoniana. De hecho, ahora sabemos que debemos renunciar a esta descripción detallada. Durante la transición hay un ajuste de la función de onda o "campo de materia" que describe el estado del electrón, con la creación simultánea (emisión) o aniquilación (absorción) de un cuanto de radiación electromagnética o fotón. Las cuestiones primera y segunda fueron explicadas años más tarde en Mecánica Cuántica, pero en un contexto un tanto diferente, con la noción de probabilidades de transición, que pueden ser calculadas precisamente utilizando la Mecánica Cuántica y la Teoría Cuántica de Campos.

Sin embargo, Einstein fue de nuevo pionero introduciendo en

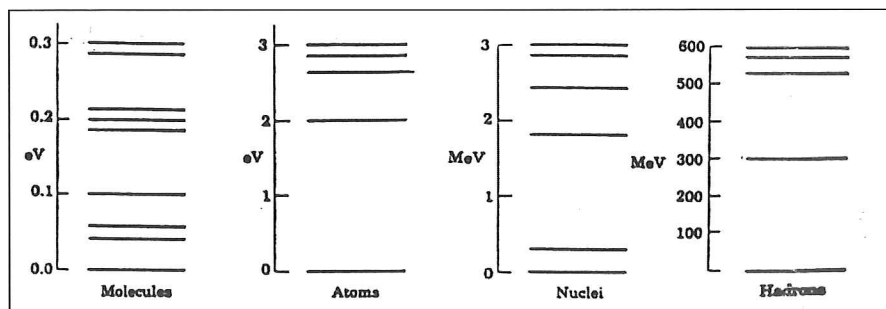


Figura 1. Niveles de energía.

1916 la noción de transiciones radiativas espontáneas e inducidas, asignando ciertos coeficientes para relacionar los estados estacionarios involucrados, que posteriormente fueron identificados con las probabilidades de transición. Incorporando la relación de Bohr en sus cálculos, Einstein obtuvo la expresión para el espectro de energías de la radiación de un cuerpo negro, relacionando así las ideas de Plank con las de Bohr. Sin embargo, Einstein no se sentía completamente feliz con la situación y señaló que “*es un punto débil de la teoría que deja el tiempo y la dirección de los procesos elementales al azar*”. Además de estos asuntos las transiciones espontáneas e inducidas son el fundamento teórico de los láseres, cuyas aplicaciones tecnológicas en comunicaciones, Medicina, procesado de señales, etc., son ampliamente usadas. La idea de las transiciones radiativas inducidas, que muestra el ingenio físico de Einstein, puede ser explicada utilizando Mecánica Cuántica, porque está claro que la presencia de un campo electromagnético externo altera el campo de “materia” de los electrones y estimula tanto la emisión como la absorción de la radiación.

Otra idea con un gran impacto, introducida en la primera etapa del desarrollo de la Física Cuántica, fue la estadística de Bose-Einstein, propuesta originalmente por S.N. Bose y redefinida por Einstein en 1924. La estadística de Bose-Einstein se aplica a sistemas de partículas idénticas que no interactúan, conocidas más tarde como “bosones”. Hoy asumimos que todos los portadores de interacciones son bosones. En general, según exige la conexión entre el espín y la estadística establecida en 1940, reconocemos que todas las partículas con espín entero son bosones y que todos los agregados de bosones deben ser descritos por funciones de onda simétricas. Bose y Einstein demostraron que cuando el número de bosones no es constante, la ley de Planck para la radiación del cuerpo negro conduce a la idea de un gas de fotones, como

era de esperar puesto que los fotones tiene espín 1 (están descritos por un campo vectorial electromagnético transversal). Debe tenerse en cuenta que la noción de partículas indistinguibles, que han sido incorporadas también en la estadística de Fermi-Dirac, propuesta por Fermi en 1928 y utilizada por Dirac para determinar la simetría de la función de onda de sistemas de partículas que obedecen el principio de exclusión, es fundamental en Mecánica Cuántica, siendo una consecuencia natural de la Teoría Cuántica de Campos, puesto que todas las “partículas” que resultan de la cuantificación del “campo” deben ser idénticas y, por lo tanto, indistinguibles.

Einstein también aplicó la estadística de Bose-Einstein a los gases ideales monoatómicos, pero lo que realmente demostró su ingenio para la Física fue el que estableció que un gas compuesto por N bosones que no interactúan en un volumen V debería experimentar una condensación parcial (pasando al estado fundamental de menor energía), ahora llamada condensación de Bose-Einstein, por debajo de una temperatura crítica:

$$T_c = \frac{h^2}{2\pi m k} \left(\frac{N}{2,612 V} \right)^{2/3}$$

siendo la fracción condensada a una temperatura T inferior:

$$\frac{N_0}{N} = 1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^{3/2}$$

lo que más tarde fue reconocido como una transición de fase. La condensación de Bose-Einstein es posible porque aunque los bosones no son interactivos, se acoplan para mantener la simetría de la función de onda del colectivo. Los condensados de Bose-Einstein han sido un tema muy intenso de investigación, estando asociados a la transición de fase He I-He II descubierta en 1928 y confirmada en 1995 por C. Wiman y E. Cornell. Los condensados de Bose-Einstein podrían tener

implicaciones en áreas con aplicaciones tecnológicas potenciales, como por ejemplo la superfluidez. Incluso se ha insinuado que en el universo primordial la condensación de Bose-Einstein de los bosones Higgs (si existen) da origen a la masa de otras partículas. Debe señalarse que la condensación de Bose-Einstein es un buen ejemplo de la Física a nivel mesoscópico.

El fenómeno de condensación también ocurre con sistemas de fermiones, que obedecen la estadística de Fermi-Dirac, pero debido a que además obedecen el principio de exclusión van llenando sucesivamente los estados de menor energía, según la degeneración de cada estado, en lugar de concentrarse en el estado de energía mínima, como hacen los bosones.

LA MAYORÍA DE EDAD

Hacia 1925 se reconoció que la teoría cuántica de la estructura del átomo basada en el modelo de Bohr no era completamente satisfactoria. En primer lugar, Bohr no podía ir más allá de sistemas de un sólo electrón, es decir, los átomos de hidrógeno y de He^+ , porque su cuantificación del momento angular requería una fuerza central. Incluso en este caso la teoría de Bohr no podía explicar la estructura fina del espectro del hidrógeno y fueron necesarios varios ajustes *ad hoc* para reproducir los resultados experimentales. Esta situación condujo a W. Pauli, además de a otros, a proponer hacia 1925 que los electrones tenían un momento angular “intrínseco” o espín S , con componentes $S_z = \pm 1/2 (\hbar / 2\pi)$, y un momento angular total $J = L + S$. Esto implicaba una interacción espín-órbita proporcional a $S \cdot L$ y un momento magnético de espín o intrínseco $M_S = 2\mu_B S$, donde $\mu_B = e\hbar / 2mc$ es el magnetón de Bohr, por lo que el momento magnético total de un electrón en su órbita es $M = -\mu_B (L + 2S)$. Esta suposición fue verificada experimentalmente por G. Uhlenbeck y por S. Goudsmit, y es un efec-

to relativista como demostró más tarde Dirac.

Posteriormente se encontró que todas las “partículas” tienen un momento angular intrínseco o espín, que puede ser un entero o un medio de \hbar , y cumplen la estadística de Bose-Einstein o la de Fermi-Dirac, respectivamente. Por esta razón son llamados “bosones” si tienen espín entero o “fermiones” si tienen espín $1/2$. Pero lo más importante desde el punto de vista conceptual es reconocer que las partículas, incluso si están en reposo con respecto al sistema de referencia del observador, poseen un momento angular o espín que no puede ser asociado con la rotación de la partícula como una bola, porque como ya dijimos antes no estamos describiendo a las partículas como objetos geométricos, sino que es una propiedad determinada por la naturaleza del “campo” asociado a la partícula: escalar, espinorial, vectorial, tensorial. Éste es otro hito de la Física Cuántica que pone en evidencia que no se pueden transferir nuestras nociones macroscópicas al mundo microscópico.

Pauli hizo en 1925 otra importante contribución *ad hoc* para explicar la estabilidad de la estructura atómica: el “principio de exclusión” para los electrones que, en términos simples, establece que dos electrones atómicos no pueden tener el mismo conjunto de números cuánticos n , l , m_L , m_s , o n , l , j , m . Esto condujo al modelo de capas del átomo (ver Figura 2), que combinado con las “reglas de selección” empíricas explicaron la tabla periódica (formulada por D. Mendeleieff en el siglo XIX), los espectros atómicos y moleculares, el origen de los rayos X, permitió explicar también las propiedades de los elementos llamados “tierras raras”, clarificó la noción química de valencia, etc. Aplicado a la teoría de bandas de los sólidos permitió explicar la existencia de conductores, semiconductores y aisladores y estableció las bases para el modelo nuclear de capas.

Cuando surge la Mecánica Cuántica poco después resulta claro que

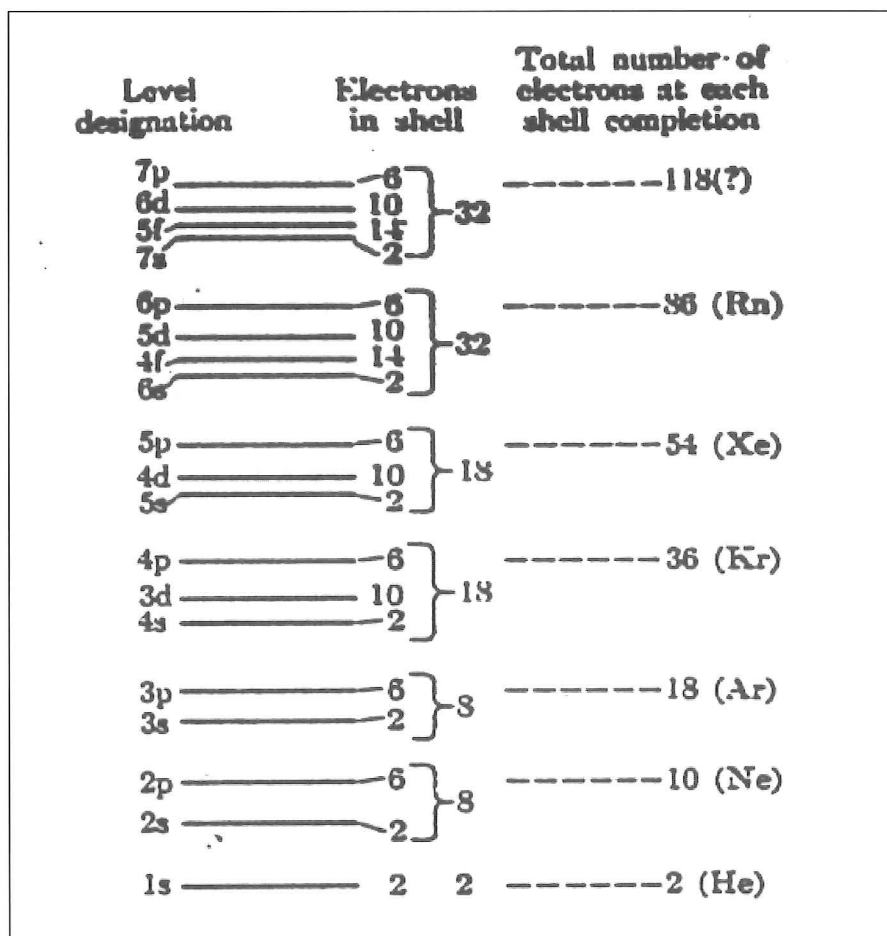


Figura 2. Modelo de capas de los átomos.

el principio de exclusión implica que la función de onda de un conjunto de electrones debe ser antisimétrica para los números cuánticos, incluido el espín. Esta importante idea fue aplicada por Dirac a todos los sistemas compuestos por partículas idénticas indistinguibles con espín $1/2$, ahora llamadas fermiones, y ello condujo rápidamente a la formulación de la estadística de Fermi-Dirac para este tipo de partículas. No pienso que sea necesario elaborar la importancia del principio de exclusión en su formulación mecánico-cuántica, pero debe ser señalado que llevó a un modelo del mundo compuesto por dos clases de partículas, bosones y fermiones, con espín entero o semientero, que obedecen dos estadísticas diferentes, la de Bose-Einstein y la de Fermi-Dirac, exhibiendo así dos clases de simetría opuestas, descritas por diferentes clases de campos. Otro hito de la Física Cuántica.

El año 1925 marca también el nacimiento de la Mecánica Cuántica,

en primer lugar con los trabajos de Heisenberg, Born y Jordan en la versión matricial, en la cual las variables dinámicas están representadas por matrices que pueden no conmutar. La relación básica fue el conmutador $qp - pq = i\hbar$ entre las variables dinámicas conjugadas canónicamente, lo que condujo al bien conocido pero no tan bien entendido “Principio de Incertidumbre”. Para obtener la energía de los estados estacionarios era necesario diagonalizar la matriz correspondiente al Hamiltoniano $H(p,q)$, lo que resultaba ser un proceso algebraico largo y laborioso. La versión de Heisenberg-Born-Jordan de la Mecánica Cuántica fue considerada abstracta y muy difícil de manejar en problemas concretos, incluso en uno tan simple como el oscilador armónico, y la aplicación al átomo de hidrógeno, llevada a cabo independientemente por Pauli y Dirac en 1926, resultaba también extremadamente laboriosa. Sin embargo, la metodología de Heisenberg-Born-Jordan sirvió para señalar

cómo desarrollar una teoría cuántica de campos. Debe señalarse que el término Mecánica Cuántica fue utilizado por primera vez por Born en 1924.

Una versión alternativa de la Mecánica Cuántica basada en una ecuación diferencial para determinar los estados estacionarios fue elaborada en nueve seminales artículos publicados por E. Schrödinger entre enero de 1926 y junio de 1927, que constituyen otro hito en la evolución de la Física Cuántica. En estos trabajos Schrödinger presentó el formalismo que él llamó "mecánica ondulatoria", que debería eliminar la consideración de movimientos "micro-mecánicos" de los electrones atómicos. Cuatro de los trabajos de Schrödinger se ocupan de "La cuantificación como un problema de valores propios", y el resto se ocupan de algunos problemas particulares. Es interesante señalar que Schrödinger confesó que hasta después de haber acabado cada artículo no tenía una idea clara de lo que iba a elaborar en el siguiente. Sin embargo, el resultado asombroso fue un formalismo teórico basado en las ecuaciones diferenciales "en el espacio de configuración", que llevan su nombre y que él llamó ecuaciones "de onda o de vibración", para determinar el estado de un sistema. En estos trabajos Schrödinger aplicó con éxito las ecuaciones al átomo de hidrógeno, al oscilador armónico y a otros problemas (el método de perturbaciones, el efecto Stark y el rotor no rígido). El método de Schrödinger, en la forma redefinida por Pauli y Dirac, ha sido adoptado como la forma estándar de la Mecánica Cuántica. Sin embargo, algunos comentarios son deseables debido a sus implicaciones a largo término.

Es importante recordar que Schrödinger estuvo buscando un método cuya cuantificación no tuviera que ser una suposición *ad hoc* y pensó que las "ondas" o las "vibraciones" estacionarias eran la respuesta, y es por lo que él llamó a su método "mecánica ondulatoria".

Schrödinger partió de la ecuación de Hamilton-Jacobi:

$$H\left(q, \frac{\partial S}{\partial q}\right) = E$$

Haciendo $S = K \ln \psi$, y utilizando un procedimiento variacional, Schrödinger obtuvo la ecuación independiente del tiempo:

$$-\left(\frac{K^2}{2m}\right)\nabla^2\psi + V\psi = E\psi$$

Nótese que Schrödinger primero llamó a ψ "campo mecánico escalar". Insertando en V la expresión del potencial coulombiano, imponiendo las condiciones adecuadas de frontera para ψ que limitan los valores de E , y haciendo $K = \hbar$, obtenemos la fórmula de Bohr para los niveles de energía del átomo de hidrógeno, sin ninguna referencia a las órbitas electrónicas. Schrödinger insistió en que "la ecuación se establece para vibraciones periódicas puras sinusoidales con respecto al tiempo", sin explicar a qué vibraciones se refería.

Por analogía con las relaciones para los fotones, Schrödinger introdujo en un segundo artículo:

$$\nu = E/h \text{ y } \lambda = h/p = h/mv = h/\sqrt{2m(E-V)}$$

para la frecuencia y la longitud de onda del sistema de "ondas" estacionarias asociado con el movimiento de la partícula, y suponiendo que oscilaba de acuerdo con una ley sinusoidal, tal como $\sin 2\pi\nu t$ o $\sin Et/\hbar$, entonces:

$$\psi(x,t) = \psi_E(x) \sin Et/\hbar$$

Consecuentemente, Schrödinger escribió la ecuación de ondas:

$$\nabla^2\psi - 2m\frac{(E-V)}{E^2}\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = 0$$

para el "campo mecánico escalar" ψ . Tenía que ser de segundo orden en el tiempo para repetir el factor sinusoidal, que debía ser separado para vibraciones estacionarias.

Schrödinger vio las lógicas dificultades con su ecuación y en su cuarto artículo, en un interesante razonamiento heurístico, substituyó la dependencia del tiempo de la función $\psi(x,t)$ por el factor complejo $\exp i(2\pi\nu t)$, entonces:

$$\psi(x,t) = \psi_E(x) \exp \{iEt/\hbar\}$$

obteniendo la nueva ecuación:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + V\psi = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}$$

en la notación corriente; ésta es la ecuación de Schrödinger estándar dependiente del tiempo para un "campo mecánico" escalar, pero ahora llamó a ψ "función de onda", un nombre desafortunado utilizado todavía.

Este ajuste tuvo dos consecuencias trascendentales que influenciaron los desarrollos futuros de la Mecánica Cuántica. Una es que la ecuación es de primer orden en el tiempo y, por lo tanto, no es una ecuación de ondas y no describe un campo escalar que puede propagarse como una onda viajera. Desafortunadamente el nombre de "ecuación de ondas" ha permanecido en uso. La segunda es que puesto que el campo escalar ψ es complejo, dependiente del tiempo a través de la función exponencial $\exp\{iEt/\hbar\}$, no es un observable. Esto originó una intensa discusión que quedó resuelta por la interpretación probabilística de M. Born de $|\psi|^2$, lo que condujo, tal y como Schrödinger había ya insinuado en sus artículos, a aceptar que no podemos describir la dinámica de un electrón atómico en términos de órbitas newtonianas, como Bohr y Sommerfeld habían intentado años antes.

En un artículo Schrödinger probó este método incluía la formulación matricial de Heisenberg-Born-Jordan, y para justificar las reglas de conmutación de Heisenberg introdujo la idea de asociar el operador $\partial/\partial q$ con el momentum p_q , o $\mathbf{p} \rightarrow -i\hbar\nabla$, y consecuentemente, como reconoció más tarde, un operador $L_{op} = -i\hbar \mathbf{r} \times \nabla$ para el momento

angular orbital $L = r \times p$. Las componentes del operador L_{op} obedecen la regla de conmutación:

$$[L_x, L_y] = i\hbar L_z, \text{ etc.}; L \times L = i\hbar L$$

y su valor propio es:

$$L^2 = l(l+1)\hbar^2$$

Estas relaciones de conmutación han llevado a la prescripción de la Mecánica Cuántica para cuantificar el momento angular, $J \times J = i\hbar J$, reemplazando la consideración original de Bohr de órbitas circulares. Por esta razón, puesto que el espín o momento angular intrínseco no tiene un equivalente dinámico, Pauli propuso expresarlo como:

$$S = \frac{1}{2} \hbar \sigma$$

donde σ es un conjunto de tres matrices 2×2 asociadas con el grupo $SU(2)$, de modo que S obedece las mismas reglas de conmutación que las componentes del operador L_{op} , una suposición que tuvo una gran importancia para la Física Cuántica en general y para la Teoría Cuántica de Campos en particular.

Es interesante señalar que Schrödinger reconoció en su primer artículo que se había inspirado en la idea original de de Broglie, expresada en su Tesis Doctoral de 1923, de una "onda piloto" de longitud de onda $\lambda = h/mv$, que guiaría a los electrones atómicos en su movimiento alrededor del núcleo. La tesis de de Broglie fue publicada en *Phil. Mag.*, Vol. 47 (1924), con el título: "Una teoría tentativa sobre los cuantos de luz". El propósito de de Broglie fue establecer un paralelismo entre la dinámica y la óptica geométrica, introduciendo la misma relación entre la longitud de onda λ y el momentum mv de una partícula que para el fotón. Aunque parezca extraño, como dije anteriormente, sólo para una partícula libre la ecuación de Schrödinger tiene como solución la función de onda compleja $\psi \sim \exp \{i(p \cdot r - Et) / \hbar\}$ con

longitud de onda $\lambda = h/mv$, pero no se aplica para un electrón confinado en un átomo. Schrödinger también puntualizó que mientras de Broglie estaba pensando en ondas "progresivas", su idea fue de vibraciones estacionarias en el átomo, descritas por el campo ψ , "que es una aproximación mucho más cerca de la realidad que la de las órbitas electrónicas... cuya existencia está siendo cuestionada". En su sexto artículo Schrödinger estableció la necesidad de "atribuir a ψ un significado físico, concretamente electromagnético", por ello "una distribución ψ en el espacio de configuración puede ser interpretada como una distribución continua de electricidad... en el espacio real".

Así fue el origen de la famosa y controvertida "dualidad onda-partícula" para partículas, que llegó a incorporarse en la Mecánica Cuántica. Esto ha sido más desafortunado porque la declaración correcta hubiera debido ser "descripción dual campo-partícula", puesto que todas las partículas tienen un campo asociado con ellas y, dependiendo del proceso, debemos usar la noción de "partícula" o la del "campo". Solamente las partículas con masa nula, como es el caso del fotón, son descritas relativísticamente por una verdadera "ecuación de ondas", la ecuación de Klein-Gordon, y así exhiben el comportamiento dual onda-partícula. La situación llegó a ser más confusa cuando en 1927 C.J. Davisson y L.H. Germer en los Estados Unidos y G.P. Thompson en Gran Bretaña obtuvieron con electrones patrones de difracción similares a los de los rayos X, que fueron interpretados como una muestra del comportamiento ondulatorio de los electrones, ignorando que la distorsión del campo de un electrón libre de energía definida y, por lo tanto, de frecuencia definida, puede mostrar este tipo de patrones, incluso si no es estrictamente una onda.

En sus primeras etapas la Mecánica Cuántica fue desarrollada casi a base de ensayo y error, utilizando como punto de partida la dinámica newtoniana en la versión de Hamil-

ton. Fue P.A.M. Dirac quien dio una estructura formal en un artículo titulado *Las ecuaciones fundamentales de la Mecánica Cuántica*, publicado en los *Proc. Roy. Soc.*, Vol. A109, pág. 642 (1925). El formalismo de Dirac está basado en lo que él llamó teoría de transformación, utilizando operadores para representar observables y sus famosos vectores "ket" $|\alpha\rangle$ y "bra" $\langle\alpha|$ para designar los estados de un espacio abstracto de Hilbert. La innovación más significativa del método de Dirac fue formular una ecuación dinámica lineal en el tiempo para determinar la evolución espacio-temporal de un sistema:

$$i\hbar \frac{d|\psi\rangle}{dt} = H|\psi\rangle$$

donde $H(p, q)$ es el operador Hamiltoniano del sistema y $|\psi\rangle$ es el vector de estado que lo describe. En esta formulación, las ecuaciones de Schrödinger y el campo ψ aparecen de forma natural cuando se utiliza la representación q . Por esto, la cuestión clave en Mecánica Cuántica es encontrar el hamiltoniano adecuado para el sistema considerado, por lo que a veces se requiere de consideraciones *ad hoc*. El formalismo innovador de Dirac, elaborado con más detalle en el libro "*Los Principios de la Mecánica Cuántica*" (1.^a edición, 1930), es ahora universalmente aceptado como el fundamento metodológico de la Mecánica Cuántica y la sitúa para el nivel microscópico en pie de igualdad con el formalismo de Newton-Maxwell para el nivel macroscópico.

El siguiente desarrollo crucial de la Física Cuántica fue la formulación de Dirac en 1928 de la ecuación cuántica relativista de un electrón, que en presencia de un campo electromagnético es:

$$\left[\sum_{\mu} \gamma_{\mu} \left(p_{\mu} + \frac{e}{c} A_{\mu} \right) - imc \right] \psi = 0$$

donde γ_{μ} son matrices 4×4 , $p_{\mu} = -i\hbar \partial_{\mu}$ es el operador cuadrivector

energía-momentum, las ∂_μ son las derivadas parciales con respecto a las tres coordenadas espaciales y al tiempo, y A_μ son las componentes del potencial cuadrivector (A, V) , relacionado con el campo electromagnético por $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$. Como es bien conocido, el principio que guió a Dirac fue obtener una ecuación relativista de primer orden en la derivada temporal, con objeto de conservar la ley dinámica:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi$$

para lo cual el hamiltoniano relativista:

$$H = (c^2 p^2 + m^2 c^4)^{1/2}$$

tiene que ser también de primer orden en las coordenadas del operador cuadrivector energía-momentum p_μ . Esto requiere introducir las matrices de cuarto orden γ_μ , relacionadas con las matrices σ de Pauli, que obedecen la relación:

$$\gamma_\mu \gamma_\nu + \gamma_\nu \gamma_\mu = 2\delta_{\mu\nu}$$

y el campo ψ tiene que ser un espinor de cuatro componentes. Con el campo ψ y las matrices γ_μ se pueden desarrollar formas bilineales que bajo las transformaciones de Lorentz se comportan como un escalar, un vector polar, un tensor, un vector axial y un pseudo-escalar. El formalismo de Dirac se hizo esencial en la Física Cuántica de partículas y campos, imponiendo que todas las ecuaciones fueran invariantes bajo una transformación de Lorentz.

Sin hacer ninguna otra consideración *ad hoc*, Dirac obtuvo el valor correcto para el momento angular de espín del electrón, para el momento magnético $M_s = -2\mu_B S$, para la interacción espín-órbita $S \cdot L$ y los niveles de energía relativista para el átomo de hidrógeno, aunque correcciones radiativas tuvieron que ser añadidas más tarde. Una de las primeras aplicaciones del formalismo de Dirac fue la obtención del espectro de energía de los electrones en la desintegración β , una

teoría formulada por Fermi en 1934, que interpreta la desintegración β como la transformación de un neutrón en un protón con la creación de un electrón y un neutrino. La teoría de Fermi condujo a la introducción de una nueva partícula, el neutrino, propuesta por Pauli para asegurar la conservación de la energía, e implicó la existencia de una interacción “débil” de corto alcance, distinta de la electromagnética, que no podía ser estudiada utilizando una función energía potencial basada en el formalismo de la Mecánica Cuántica de Schrödinger. Estas contribuciones de Dirac y de Fermi fueron otro hito en el desarrollo de la Física Cuántica.

Un resultado inesperado que surgió de la ecuación relativista de Dirac fue la existencia de estados de energía negativa, que, debido a la consistencia matemática de la teoría, no debían ser ignorados, aunque planteaban una dificultad: no se habían observado estados de energía negativa de partículas libres. En 1930 Dirac propuso que el vacío consistía en que todos los estados de energía negativa estaban ocupados por electrones, que no podían ser observados, pero que si uno de ellos transitaba hacia un estado de energía positiva dejaba tras de sí un “hueco” que se comportaba como un electrón positivo o “positrón”: una partícula que fue observada por primera vez en 1934 por C.D. Anderson. Los positrones son emitidos por muchos núcleos radiactivos y se les ha encontrado diversas aplicaciones, como por ejemplo la “tomografía por emisión de positrones” (PET) usada en los hospitales, y son utilizados en los aceleradores de partículas, como en el anillo para producir colisiones electrón-positrón del CERN en Ginebra (LEP, Large Electron Positron), que ha sido parado en el año 2001 para construir otro mejor. Los positrones son también llamados “antipartículas”, denominación introducida por de Broglie en 1934.

En consecuencia, otra idea innovadora en Física Cuántica ha sido

la aceptación de que toda partícula tiene su antipartícula, aunque en algunos casos la partícula y la antipartícula son idénticas, como es el caso del fotón, y en otros, como el de K^0 , la partícula puede transformarse en su antipartícula. Además, partícula y antipartícula pueden ser creadas y aniquiladas por parejas. No obstante, la noción de antipartícula como hueco ha sido reemplazada por una aproximación conceptual distinta, según la cual partícula y antipartícula son tratadas en pie de igualdad. Por otro lado, la idea de “huecos” de electrones ha sido de gran utilidad en la Teoría Cuántica del Sólido, en particular en relación con los estados electrónicos en los semiconductores.

La siguiente etapa en la evolución de la Física Cuántica fue el desarrollo del formalismo de la Electrodinámica Cuántica. Para expresar la interacción de la radiación electromagnética con las partículas cargadas, Dirac, utilizando las ideas propuestas previamente por Born, Heisenberg y Jordan, procedió a la formulación de lo que ha sido conocido como la Electrodinámica Cuántica, que ha dado forma a la evolución de la Física Cuántica, y de manera más general a la Teoría Cuántica de Campos, y que ha llevado a un modelo de funcionamiento del universo en su nivel fundamental. En la Electrodinámica Cuántica el campo se transforma en un operador capaz de crear y aniquilar electrones, positrones y fotones, una idea innovadora que ha sido incorporada en la Teoría Cuántica de Campos, en la cual los pares partícula-antipartícula pueden ser creados o aniquilados mediante la intervención de bosones. Esta idea es consistente con la conservación de la energía, del momentum y del espín, pero representa un profundo cambio en la concepción de la materia, rechazando el principio de conservación de la masa, como fue formulado por Lavoisier en el siglo XIX, que ya resultaba inadecuado desde el establecimiento de la equivalencia

entre la masa y la energía en la Teoría de la Relatividad mediante la relación:

$$E = mc^2$$

La Electrodinámica Cuántica ha sido desarrollada a lo largo de los años por muchos físicos creativos, tales como Feynman, Dyson, Schwinger, Weinberg, Salam, etc., en particular, la muy elegante formulación de la Mecánica Cuántica llamada el “método de las integrales de camino”, propuesto por R.P. Feynman en un artículo titulado “Aproximación espacio-temporal a la Mecánica Cuántica no Relativista”, publicado en Rev. Mod. Phys., Vol. 20, pág. 267 (1948), es fundamental para el desarrollo de la Teoría Cuántica de Campos. El método de Feynman, refinado por Dyson, tiene su expresión gráfica en los bien conocidos “diagramas de Feynman” (ver Figura 3), que J. Schwinger llamó “diagramas espacio-temporales” y que son muy útiles para el cálculo de los elementos de la matriz asociada a los procesos fundamentales cuando se usa la teoría de perturbaciones, ayudando a visualizar de qué manera funciona la naturaleza en el nivel fundamental, sin que deban ser considerados como representaciones pictóricas reales. Hoy en día la Electrodinámica Cuántica continúa siendo la teoría física más precisa.

La Teoría Cuántica de Campos difiere de la versión original de Dirac de la Mecánica Cuántica, basada en una versión del operador hamiltoniano:

$$H = T(q, p) + V(q)$$

en el sentido de que utiliza una función lagrangiana L como la utilizada en el análisis de los sistemas continuos descritos por un campo clásico. Debe recordarse que el lagrangiano para sistemas conectados está definido como $L = T - V$, donde T es la energía cinética del sistema y V su energía potencial. Las bien conocidas ecuaciones dinámicas o de Lagrange del sistema son:

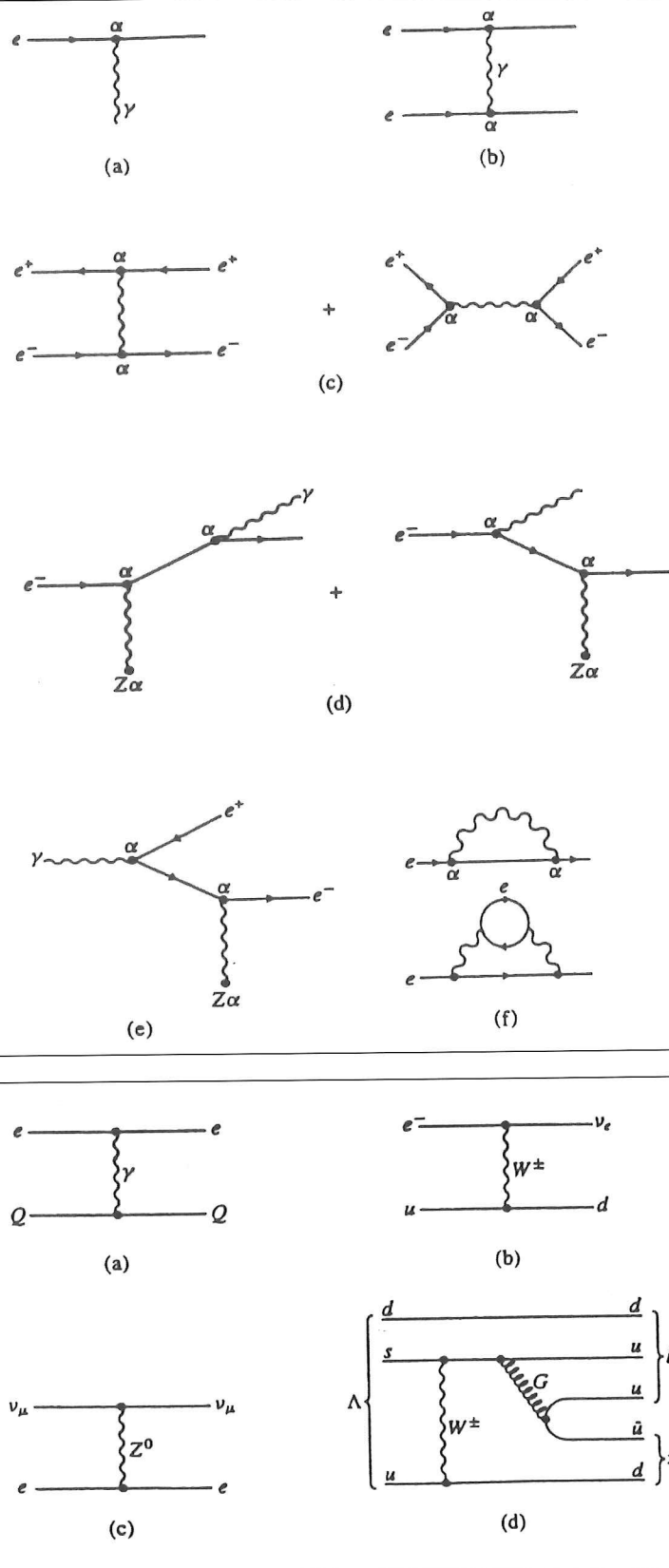


Figura 3. Diagramas de Feynman en Electrodinámica Cuántica.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = 0$$

La transición a los sistemas continuos descritos por un campo ψ ,

requiere una densidad lagrangiana L , que debe ser una función escalar invariante relativista, y que dependa solo del campo ψ y de sus primeras derivadas $\partial\psi/\partial t$, $\partial\psi/\partial x$, etc., o $\partial_\mu\psi$. Las ecuaciones dinámicas son:

$$\sum_{\mu} \partial_{\mu} \left[\frac{\partial L}{\partial (\partial_{\mu} \psi)} \right] - \frac{\partial L}{\partial \psi} = 0$$

La clave del éxito en teoría de campos es definir bien el lagrangiano.

En líneas generales, las ideas básicas de la Teoría Cuántica de Campos son las siguientes:

1. Todas las "partículas" están asociadas con "campos"; que pueden ser escalares, espinoriales, vectoriales, etc., dependiendo del espín de las partículas; presumiblemente la proposición inversa también es válida.
2. Los "campos" están representados por operadores que obedecen relaciones de conmutación que dependen de si las "partículas" asociadas son bosones o fermiones.
3. Los "campos" se expresan por un lagrangiano invariante relativista que contiene algunos de los parámetros asociados a las "partículas", como por ejemplo la masa, la carga, el color, así como la intensidad de sus interacciones.
4. Los operadores del "campo" pueden crear o aniquilar pares de "partículas" y "anti-partículas", permitiendo que podamos observar muchos procesos.
5. Para describir los procesos fundamentales que tienen lugar en la naturaleza "partículas" y "campos" deben interactuar entre ellos.
6. La interacción entre fermiones es llevada a cabo por partículas y campos de bosones "virtuales".

Por ejemplo, el lagrangiano para un electrón libre es:

$$L = \psi^{\dagger} (i\gamma^{\mu} \partial_{\mu} - m) \psi$$

pero en presencia de un campo electromagnético $A_{\mu}(A, V)$, el lagrangiano completo es:

$$L = \psi^{\dagger} [i\gamma^{\mu} (\partial_{\mu} + iqA_{\mu}) - m] \psi - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

que contiene al campo espinorial ψ relacionado con los electrones, al campo electromagnético $F_{\mu\nu} = \partial_{\mu} A_{\nu} - \partial_{\nu} A_{\mu}$ relacionado con los fotones, con A_{μ} llamado campo gauge, y con un término de acoplamiento $(\psi^{\dagger} \gamma^{\mu} \psi) A_{\mu}$ que relaciona ambos campos y que describe la interacción entre los electrones y el campo electromagnético. El término de interacción se utiliza para calcular la probabilidad de un proceso utilizando teoría de perturbaciones. Debería tenerse en cuenta que si los fotones transportan una masa m_{γ} deberíamos añadir un término:

$$\frac{1}{2} m_{\gamma}^2 A_{\mu} A^{\mu}$$

a la anterior ecuación. De igual manera, el lagrangiano de dos electrones contiene términos de acoplamiento con los espinores de las dos partículas, llevándose a cabo la interacción por fotones "virtuales". Es el acoplamiento lo que realmente contiene la física del problema y hace la teoría cuantitativa e interesante.

La Electrodinámica Cuántica nos ha proporcionado un modelo para las interacciones electromagnéticas y ha tenido un éxito extraordinario en la descripción y el análisis cuantitativo con gran precisión en los procesos de altas energía que implican partículas cargadas. Por ejemplo, según la Electrodinámica Cuántica una "partícula" cargada no es una entidad aislada o desnuda sino que está rodeada por una nube de fotones virtuales que son emitidos y reabsorbidos continuamente; por lo tanto se supone que un electrón está rodeado por una nube de fotones virtuales (tal y como se explicará para los bosones débiles más tarde), que ocasionalmente crean y subsecuentemente aniquilan pares virtuales de electrón-positrón (constituyendo un lazo en el diagrama de Feynman). La interacción eléctrica de dos electrones proviene del intercambio de cada fotón virtual cuando chocan entre sí (Figura 4). Similarmente, se supone que la interacción de los electrones atómicos con un

núcleo es debida a intercambios de fotones virtuales. Así, podemos imaginar que los átomos están llenos de fotones virtuales que pueden también crear y aniquilar pares electrón-positrón. (Como veremos más tarde, la Teoría Cuántica de Campos admite que los quarks están rodeados por fotones virtuales y bosones débiles, porque transportan carga eléctrica, y también por gluones virtuales, porque transportan color y son los bosones dominantes.) Esto constituye claramente una idea innovadora de la materia.

Se asume que la nube de fotones virtuales que rodean a un electrón es modificada cuando el electrón está en un campo eléctrico (éste es el caso del electrón en un átomo de hidrógeno) o cuando está en un campo magnético. Este efecto modifica algunas de las propiedades del electrón, tales como su masa o su momento magnético. Utilizando este modelo la Electrodinámica Cuántica ha permitido calcular las correcciones radiativas de los niveles de energía del hidrógeno correspondientes a los diferentes movimientos orbitales (desplazamiento Lamb-Retherford de los niveles $S_{1/2}$ y $P_{1/2}$ descubierto en 1947), la energía de ionización del helio con un error de 10^{-9} y el momento magnético de espín anómalo del electrón con un error de 4×10^{-12} . Todavía más, los fotones (reales y virtuales) pueden producir pares electrón-positrón reales y virtuales, pueden aniquilarse de nuevo resultando diversos efectos como la polarización del vacío. Otros procesos, tales como la dispersión Compton (fórmula de Klein-Nishina), interpretado como un proceso de dos etapas en el cual el fotón incidente es primeramente aniquilado y seguidamente un fotón de frecuencia (energía) inferior es creado (Figura 4), etc., han sido calculados con mucha precisión.

A pesar de sus éxitos, la Electrodinámica Cuántica tiene todavía algunos problemas, tales como la necesidad de apelar a procedimientos de renormalización, una metodología iniciada en 1948 para ocuparse

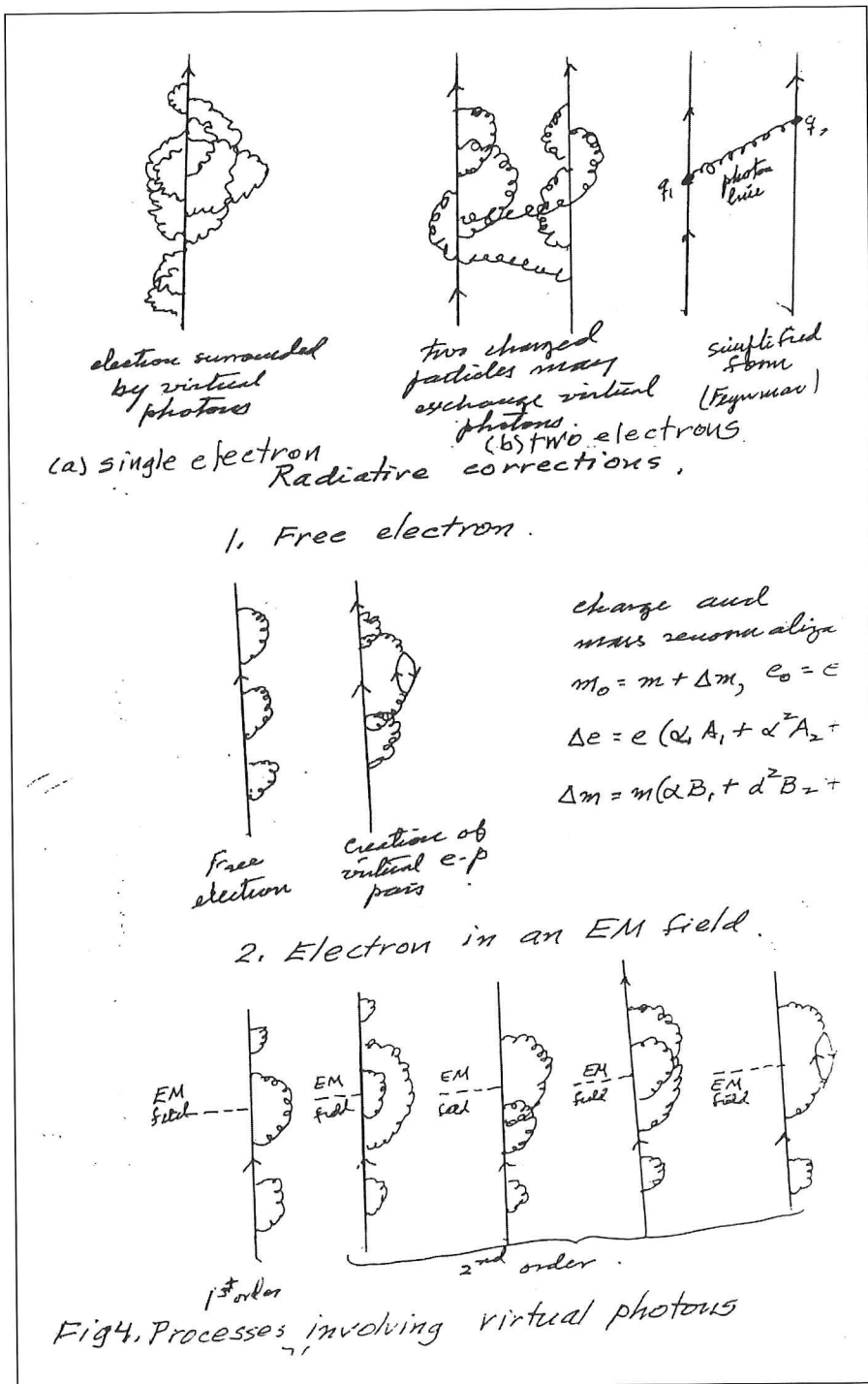


Figura 4. Electrones y fotones virtuales.

Podemos afirmar que después de cinco décadas de innovaciones conceptuales y de descubrimientos experimentales acertados, hacia el final de los años cincuenta la Mecánica Cuántica llega a ser una teoría formal con gran capacidad predictiva que puede reproducir con extraordinaria precisión muchos resultados experimentales y explicar las principales características de la estructura atómica y molecular, incluso de grandes agregados de átomos y moléculas, y ha establecido los fundamentos de la Teoría Cuántica de Campos. Quizá el aspecto más espectacular relacionado con la Mecánica Cuántica durante este periodo ha sido la aplicación de la teoría de bandas para explicar las propiedades eléctricas de los sólidos, particularmente de los conductores y de los semiconductores. Esto marcó el principio de lo que ha llegado a ser conocido como Física del Estado Sólido, y más recientemente como Física de la Materia Condensada. Ésta ha sido el área donde la Física Cuántica ha tenido más impacto tecnológico después del desarrollo de los transistores y de los circuitos integrados compactos llamados "chips", componentes esenciales de cualquier dispositivo que necesite procesar señales y datos. Nuestras vidas están completamente dependientes de los chips: computadoras, radios, TV, cámaras, coches, teléfonos, dispositivos de imagen, etc., que dependen de la estructura cuántica de los sólidos. Sin embargo, hacia finales de los años cincuenta, la Mecánica Cuántica, y en particular la Teoría Cuántica de Campos, todavía no era una teoría completa, y permaneció abierta a nuevas ideas.

DESARROLLOS PARALELOS

Mientras que la Mecánica Cuántica resultaba muy adecuada para explicar la estructura de átomos, moléculas y sólidos, y los procesos radiativos, presentaba más dificultades para explicar la estructura nuclear. Varios desarrollos relaciona-

de algunas divergencias que aparecían en los cálculos de perturbación. Sin embargo, la Electrodinámica Cuántica se acepta como una teoría bien establecida y sus ideas básicas se han extendido a la Teoría Cuántica de Campos. Una teoría similar para explicar la estructura quark de los hadrones, la Cromodinámica Cuántica, a la cual me referiré más tarde, ha sido desarrollada a partir de la introducción en 1964 del modelo estándar de partículas y campos. Por

lo tanto, yo pienso que es seguro decir que en el momento actual podemos considerar que las entidades fundamentales en Física Cuántica son los "campos", que en su forma cuantificada dan lugar a las "partículas", y todos los procesos fundamentales pueden ser explicados en términos de "interacciones" entre campos. Encontrar la interacción es saber la solución del problema. Quizá ésta sea la idea más innovadora de la Física Cuántica.

dos con la estructura y los procesos nucleares tuvieron lugar a partir de los experimentos de Rutherford en 1911. Después de los experimentos de Chadwick en 1932, fue aceptado que los núcleos estaban compuestos por protones y neutrones, llamados "nucleones" desde 1941, que permanecían juntos debido a lo que llegó a llamarse fuerza "nuclear", y se dedujeron muchas propiedades empíricas de los núcleos. El formalismo de la Mecánica Cuántica en términos de la ecuación de Schrödinger no podía explicar completamente en términos de una energía potencial newtoniana el más simple de los núcleos, el deuterón, un sistema de dos cuerpos, y mucho menos núcleos más complejos, que son sistemas de muchos cuerpos sin una fuerza central dominante. Se aceptó que la interacción nuclear era mucho más fuerte que la interacción electromagnética y que tenía un alcance más corto, pero no puede encontrarse para ella una energía potencial satisfactoria.

De hecho, se intentaron varios potenciales empíricos para explicar el deuterón y la difusión (scattering) nucleón-nucleón (paredes de potencial con y sin núcleo duro, potencial de Yukawa, una interacción tensorial para acoplar los espines de los dos nucleones, e incluso potenciales dependientes de la velocidad,...), todos ellos para ser insertados en la ecuación de Schrödinger. Se obtuvieron algunos resultados concretos pero no surgió una teoría general. Más tarde se llegó a reconocer que la interacción "nuclear" era una fuerza "residual", de lo que actualmente se conoce como interacción "fuerte", debido al intercambio de gluones virtuales, que existen entre algunas partículas llamadas "hadrones", similar a la interacción eléctrica residual entre átomos y moléculas. La conclusión inevitable fue que la interacción "fuerte" no podía ser tratada utilizando una función potencial, como se había hecho para partículas cargadas, y que la ecuación de Schrödinger no era la adecuada para esta interacción. Esto no fue un fracaso

para la Física Cuántica sino del formalismo utilizado para tratar la interacción fuerte, como había ocurrido anteriormente con la interacción débil, y tuvo que desarrollarse un nuevo formalismo.

No obstante, fueron propuestas varias ideas para explicar algunos aspectos de la estructura nuclear. C.V. Weiszacker propuso en 1935 una ecuación empírica para la energía de enlace de los núcleos, que proporcionó herramientas útiles para discutir la fisión nuclear. En 1939 N. Bohr y J.A. Wheeler sugirieron que algunos núcleos grandes podrían ser tratados como gotas líquidas y aplicaron el modelo para explicar la fisión nuclear de los isótopos de uranio, resultado que fue crucial para el desarrollo de la bomba nuclear y más tarde para la liberación controlada de energía nuclear en los reactores nucleares.

Entre 1948 y 1955, M.G. Mayer, J.H.D. Jensen y otros elaboraron un modelo empírico de capas para el núcleo similar al modelo de capas de los átomos, asumiendo un potencial central empírico colectivo para el núcleo, utilizando el principio de exclusión separadamente para los protones y los neutrones, y según una sugerencia de Fermi, con una interacción espín-órbita fuerte de signo contrario, por lo que los estados nucleares fueron designados por n, l, j (Figura 5). El modelo, elaborado más tarde en mayor detalle por I. Talmi y A. de Shalit y otros, y todavía en uso, reproduce bastante bien el espín y la distribución del nivel de energía para protones y neutrones en muchos núcleos, incluyendo los núcleos de "números mágicos" o más estables, y el espectro electromagnético asociado con las transiciones de los nucleones individuales, pero carece de una explicación general del origen del potencial central y de la interacción espín-órbita y de cómo calcular los niveles de energía.

Muchos núcleos con masas entre las de los números mágicos, como los de las tierras raras, muestran un espectro muy similar a los espectros moleculares de vibración y de rota-

ción, y exhiben grandes momentos cuadrupolares eléctricos, sugiriendo que esos núcleos están deformados y experimentan vibraciones y rotaciones colectivas, pero no necesariamente como cuerpos rígidos. Esta idea fue desarrollada con detalle en 1952/53 por A. Bohr y B. Mottelson. Poco después, se reconoció que el modelo de capas, que supone estados de partículas independientes, y el modelo colectivo, que implica grados de libertad colectivos de partículas acopladas fuertemente, son complementarios, resultando un modelo unificado, para el cual son necesarias las técnicas de la Mecánica Cuántica. Sin embargo, a pesar de todos estos desarrollos, todavía no era una teoría cuántica satisfactoria para la interacción fuerte.

Durante el mismo periodo de tiempo que los físicos luchaban por formular una teoría nuclear, se establecieron en varias partes del mundo (EE.UU., Europa, Unión Soviética, Japón) laboratorios para estudiar experimentalmente problemas de física nuclear y de física de partículas. Los rayos cósmicos fueron una fuente de nuevas partículas y condujeron al descubrimiento de los piones y de los muones. Fueron construidos nuevos aceleradores de partículas (sincrotrones, sincrociclotrones, aceleradores lineales), cada uno de los cuales con intensidad del haz o energía y luminosidad más alta. Fueron diseñados varios detectores de partículas (emulsiones, cámaras de burbujas, cámaras de chispas, calorímetros de partículas), los reactores nucleares llegaron a ser fuentes intensas de neutrones. La existencia de los neutrinos fue confirmada experimentalmente por Cowan y Reines en 1956. La desintegración pión-muón fue observada por primera vez en los rayos cósmicos en 1947 y fue explicada utilizando una teoría similar a la de la desintegración β . Los anti-protones y los anti-neutrones fueron observados en 1955 y 1956 respectivamente y producidos en el laboratorio. Y fueron producidas en los aceleradores o identificadas en los rayos cósmicos.

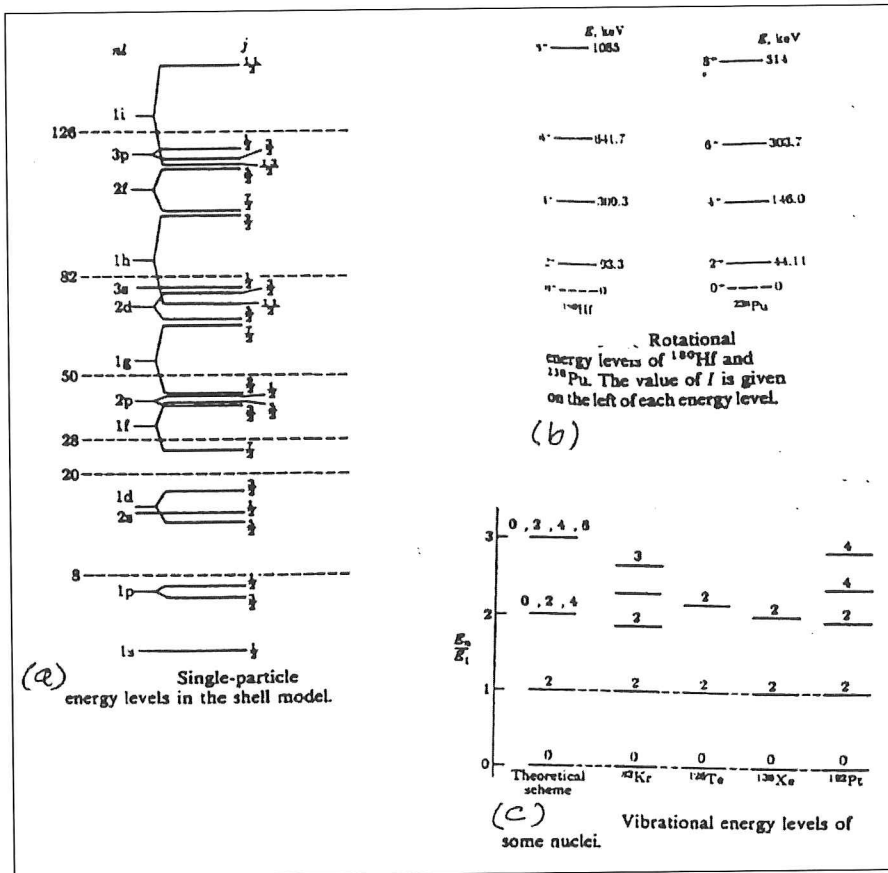


Figura 5. Modelo de capas de núcleo.

micos más de cien nuevas “partículas” inestables, llamadas posteriormente “resonancias”, con sus correspondientes vidas medias extremadamente cortas. El papel de las simetrías en todos estos resultados, en el contexto del teorema CPT, fue estrechamente analizado por la posibilidad de violaciones y para explicar los procesos observados se propusieron varios números cuánticos nuevos, leyes de conservación y reglas empíricas. Huelga decir que la teoría de grupos y las técnicas de la Mecánica Cuántica fueron muy útiles para analizar los resultados experimentales. Fue un periodo muy apasionante con necesidad urgente de nuevas ideas.

NUEVAS IDEAS

Desde 1960 se han hecho varios importantes avances para sistematizar la Física de Partículas (ver Tabla III). Se introdujeron nuevas ideas, pretendiendo principalmente incorporar las interacciones fuerte y débil dentro del esquema de la Teoría

Cuántica de Campos, y eventualmente formular una teoría de la gran unificación de los campos de las tres interacciones: electromagnética, fuerte y débil, utilizando la noción de campos “gauge”, similar al campo electromagnético. Debido a su impacto conceptual, los revisaré sin entrar en grandes detalles porque son un poco complejos. En primer lugar, llegó a ser claro que había una gran diferencia entre las masas de las partículas, incluyendo las “resonancias” de vidas cortas, que llegan a agruparse en “bariones”, “meso-

nes” y “leptones”, términos introducidos por A. Pais. En segundo lugar, también llegó a ser claro que solamente algunas partículas (bariones y mesones) eran sensibles a la interacción “fuerte”, y en 1962 fueron llamadas “hadrones”. En tercer lugar, para ser consistente con la Teoría Cuántica de Campos, era necesario identificar los bosones responsables de las interacciones fuerte y débil, como lo son los fotones para la interacción electromagnética. Y lo que fue más atractivo, después de experimentos tales como la fuerte difusión (scattering) inelástica profunda de electrones de alta energía por protones realizados a finales de los años sesenta, se concluyó que los hadrones no eran partículas elementales y podían tener una estructura compuesta por centros de dispersión (scattering) con espín 1/2. Este resultado podría explicar el espectro de “resonancias” como excitaciones hadrónicas, mientras que los leptones eran partículas puntuales o sin estructura, no afectadas por las interacciones fuertes.

Junto al extraordinario progreso en las técnicas experimentales a partir de los años sesenta, los dos desarrollos conceptuales de mayor importancia en Física Cuántica, que han contribuido más a un modelo coherente y más sencillo de la materia al nivel fundamental, fueron la formulación, basada en consideraciones teóricas de grupo, del modelo quark de hadrones, por M. Gell-Mann y G. Zweig en 1964, y la teoría de campos electrodébil que armoniza las interacciones débil y electromagnética,

Tabla III

Objetivos de la Física de Partículas

1. Entender la fenomenología: clases de partículas, masas, cargas, espín, paridad, modos de extinción (desaparición, desintegración, decaimiento,...), tipos y dependencia energética de las reacciones y procesos, etc.
2. Determinación de las reglas de selección, leyes de conservación, reglas de simetría, tipos y fuerzas de interacción.
3. Desarrollo de una teoría cuantitativa del campo basada en un lagrangiano escalar, invariante y relativista, que incorpore las interacciones a través de campos y explique la fenomenología utilizando la teoría de perturbaciones, $L = L_{\text{libre}} + L_{\text{interacción}}$, donde la primera parte corresponde a los campos libres o sin interacción, y la segunda al acoplamiento entre los campos.

utilizando la formulación lagrangiana de la Teoría Cuántica de Campos, por S.L. Glashow, A. Salam y S. Weinberg en 1968. Eventualmente estos dos desarrollos condujeron a la propuesta en 1977 del Modelo Estándar de partículas elementales que afirma que el mundo está compuesto por fermiones “elementales” interactuando a través de campos, de los cuales son las fuentes, mediante el intercambio de sus bosones asociados, aportando de este modo una visión coherente del mundo al nivel fundamental basado en la Teoría Cuántica de Campos. La importancia conceptual y práctica del Modelo Estándar para comprender el mundo es comparable a la del modelo nuclear del átomo desarrollada sesenta años antes. La mayoría de los principios del Modelo Estándar han sido verificados experimentalmente.

En pocas palabras, el Modelo Estándar (ver Tabla IV) supone que las interacciones eléctrica y débil entre fermiones son llevadas a cabo por cuatro bosones vectoriales de espín 1: el fotón, sin masa, y los bosones débiles W^+ , W^- y Z^0 , con masas del orden de 90 GeV, tal y como es requerido por el corto alcance de la interacción débil, alrededor de 10^{-3} fm (recordar la relación $\Delta E \Delta t \approx \hbar$, y hacer $\Delta E = Mc^2$ y $\Delta x = c\Delta t$), mientras que la interacción fuerte es llevada a cabo por ocho “gluones” de masa cero y espín 1. Un conjunto de fermiones básicos son los seis leptones: electrón e^- , muón μ^- , y tauón τ^- , y sus correspondientes neutrinos, ν_e , ν_μ , ν_τ . Los leptones están sólo sujetos a la interacción electrodébil. Debe mencionarse de pasada que aunque los muones y los tauones son en cierto sentido muy similares a los electrones, debido a que son mucho más masivos son inestables y pueden descomponerse en electrones y neutrinos, y algunas de sus propiedades, tales como el momento magnético de espín, son más difíciles de calcular debido a que involucran a los bosones virtuales débiles W^+ , W^- y Z^0 .

El otro conjunto de fermiones contiene quarks de seis “sabores”

Tabla IV
El modelo estándar

Partículas constitutivas de la materia (fermiones)			
Quarks	Masa	Carga eléctrica (e)	
Arriba (up) u	2-8 MeV	2/3	
Abajo (down) d	5-15 MeV	-1/3	
Encanto (charmed) c	1-1,6 GeV	2/3	
Estraño (strange) s	100-300 MeV	-1/3	
Cima (top) t	168-192 GeV	2/3	
Fondo (bottom) b	4,1-4,5 GeV	-1/3	
Leptones			
Leptones	Masa (MeV/c ²)	Vida media (s)	Carga eléctrica
Electrón e^-	0,5110	∞	-e
Neutrino electrónico ν_e	$< 1,5 \times 10^{-6}$	$\infty?$	0
Muón μ^-	105,658	$2,197 \times 10^{-6}$	-e
Neutrino muónico ν_μ	$< 0,17$	$\infty?$	0
Tauón τ^-	$1,777 \times 10^3$	$(291,0 \pm 1,5) \times 10^{-15}$	-e
Neutrino tauónico ν_τ	< 24	$\infty?$	0
Partículas portadoras de las interacciones (bosones)			
Campo de interacción	Bosón	Espín	
Débil	W^+, W^-, Z^0	1	
Electromagnético	Fotones γ	1	
Fuerte	Gluones	1	

Tabla V
Algunos hadrones que interactúan fuertemente

Bariones	Estructura quark	Masa (MeV)	Mesones	Estructura quark	Masa (MeV)
p	uud	938	π^+	$u\bar{d}$	140
Λ^0	uds	1116	K^0	$d\bar{s}$	498
Λ^{++}	uuu	1232	D^0	$c\bar{u}$	1865
Ξ^0	uss	1315	D_s^+	$c\bar{s}$	1969
Ω^-	sss	1672	J/ψ	$c\bar{c}$	3097
Λ_c^-	udc	2285	B^+	$u\bar{b}$	5279
Ξ_c^0	dsc	2470	B_s^0	$s\bar{b}$	5370
Λ_b^0	udb	5624	Γ	$b\bar{b}$	9460

(arriba (up) u , abajo (down) d , encanto (charm) c , extraño (strange) s , cima (top) t y fondo (bottom) b), con carga eléctrica fraccional $+2e/3$ y $-e/3$, y tres clases de “carga de color” llamadas “rojo”, “verde” y “azul”. El “color” lo portan ocho gluones, que portan color y anti-color.

Los quarks están sujetos a las interacciones fuerte y electrodébil. El cambio en el sabor puede tener lugar por medio de una interacción electrodébil. Una ilustración de los procesos electrodébiles con los quarks es la descomposición de quarks con carga $+2e/3$ en los correspondientes quarks con carga

$-e/3$ con la emisión de un bosón débil W^+ , que a su vez se descompone en dos leptones (positrón y neutrino), $u \rightarrow d + W^+$, y $W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ (ésta es la forma en que el Modelo Estándar explica la desintegración β). Otro ejemplo es la difusión de electrones por protones intercambiando un fotón virtual entre el electrón incidente y un quark u en el protón (Figura 6). Como tercer ejemplo, los pares e^+e^- pueden aniquilar pares quarks-antiquarks por medio de los bosones γ , W^\pm y Z^0 , dando lugar a chorros de partículas. Sin embargo, el cambio de color es solamente posible en la interacción fuerte por absorción o emisión de gluones.

Los quarks tienen la propiedad adicional de "confinamiento" debido a que la interacción quark/gluón incrementa a distancias por encima de 1 fm, haciendo virtualmente imposible observar quarks y gluones libres, que tienen que ser reconocidos por sus "firmas", como ocurrió en 1995 con el quark top en el Fermilab (Figura 7). También a distancias menores de unos 0,2 fm la interacción es tan pequeña que pueden considerarse los quarks y los gluones como partículas libres; esto se conoce como "libertad asintótica".

A la relación anterior de 24 "partículas" debemos añadir las antipartículas. Esto podría parecer muy elaborado pero su belleza consiste en que proporciona una visión simple del universo en el nivel fundamental, en que explica la mayoría de los procesos fundamentales y es el argumento para el análisis cuantitativo y la verificación experimental. Para completar, elaboraré algunos rasgos del modelo, sin ir a los detalles, porque el tema es suficientemente conocido.

En primer lugar, todos los sistemas compuestos de quarks son hadrones, y pueden ser de dos clases, bariones y mesones. Los bariones están compuestos de tres quarks y los mesones de un quark y de un anti-quark, en combinaciones que no tienen color (las combinaciones estables no deben tener color en el

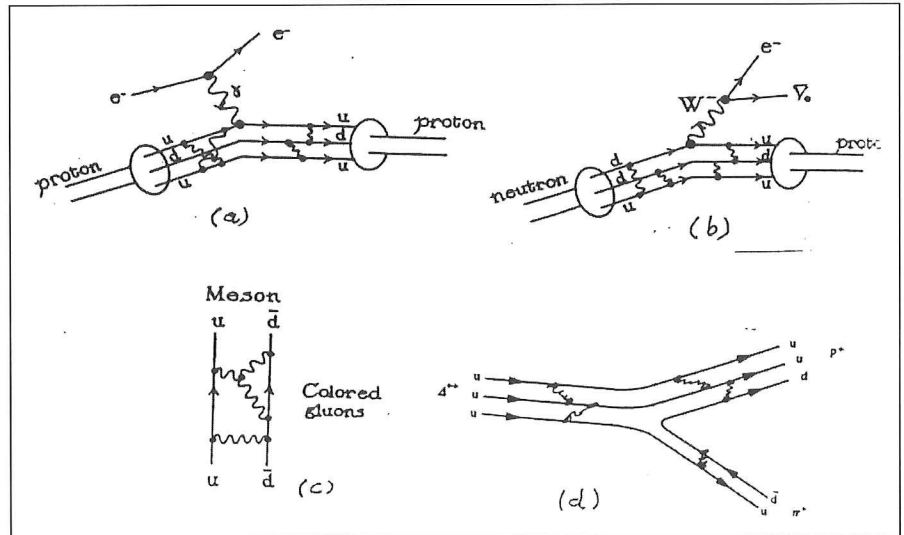


Figura 6. Procesos que implican a quarks y a bosones electrodébiles.

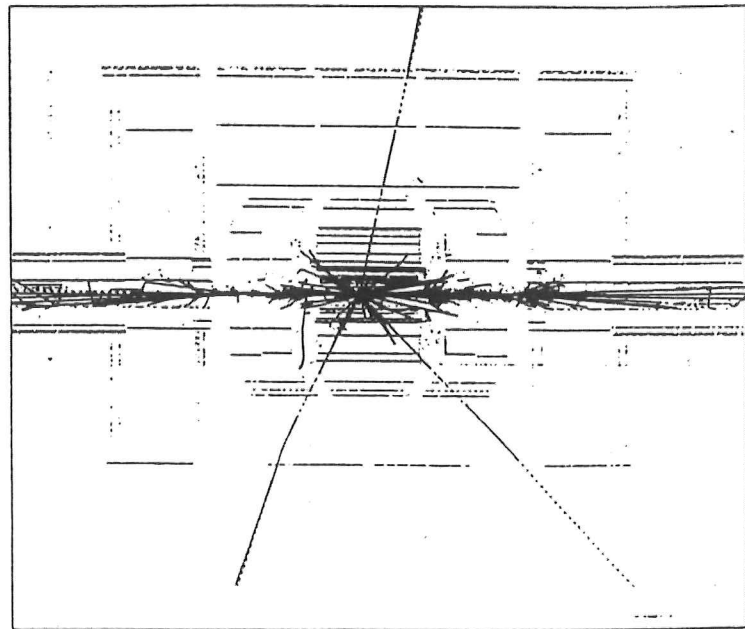


Figura 7. Descubrimiento del quark Top.

mismo sentido en que los átomos deben ser eléctricamente neutros), manteniéndose juntos por el intercambio de gluones coloreados. Dos hadrones sin color son prácticamente insensibles a la interacción fuerte excepto cuando están muy próximos, en cuyo caso experimentan una "fuerza residual", originalmente llamada "fuerza nuclear", que es de corto alcance y es debida al intercambio de gluones virtuales que saltan entre ellos (esto es similar a las fuerzas interatómicas e intermoleculares, que son fuerzas eléctricas residuales debidas al intercambio de fotones virtuales). En segundo lugar, los quarks son ordenados en

hadrones de manera similar a la estructura de capas de los átomos y de los núcleos. Los estados excitados de hadrones, en los cuales los quarks están en niveles de energía más alta, dan lugar a todas las resonancias que han sido observadas (ver Figura 8). En tercer lugar, los hadrones son realmente aglomerados (clusters) o "sopas" que contienen a los quarks, a los gluones que saltan entre ellos, y a varios pares "virtuales" de partículas que aparecen y desaparecen muy rápidamente, incluyendo quarks y bosones débiles. Es esta estructura dinámica de hadrones lo que da lugar a la riqueza de propiedades y procesos

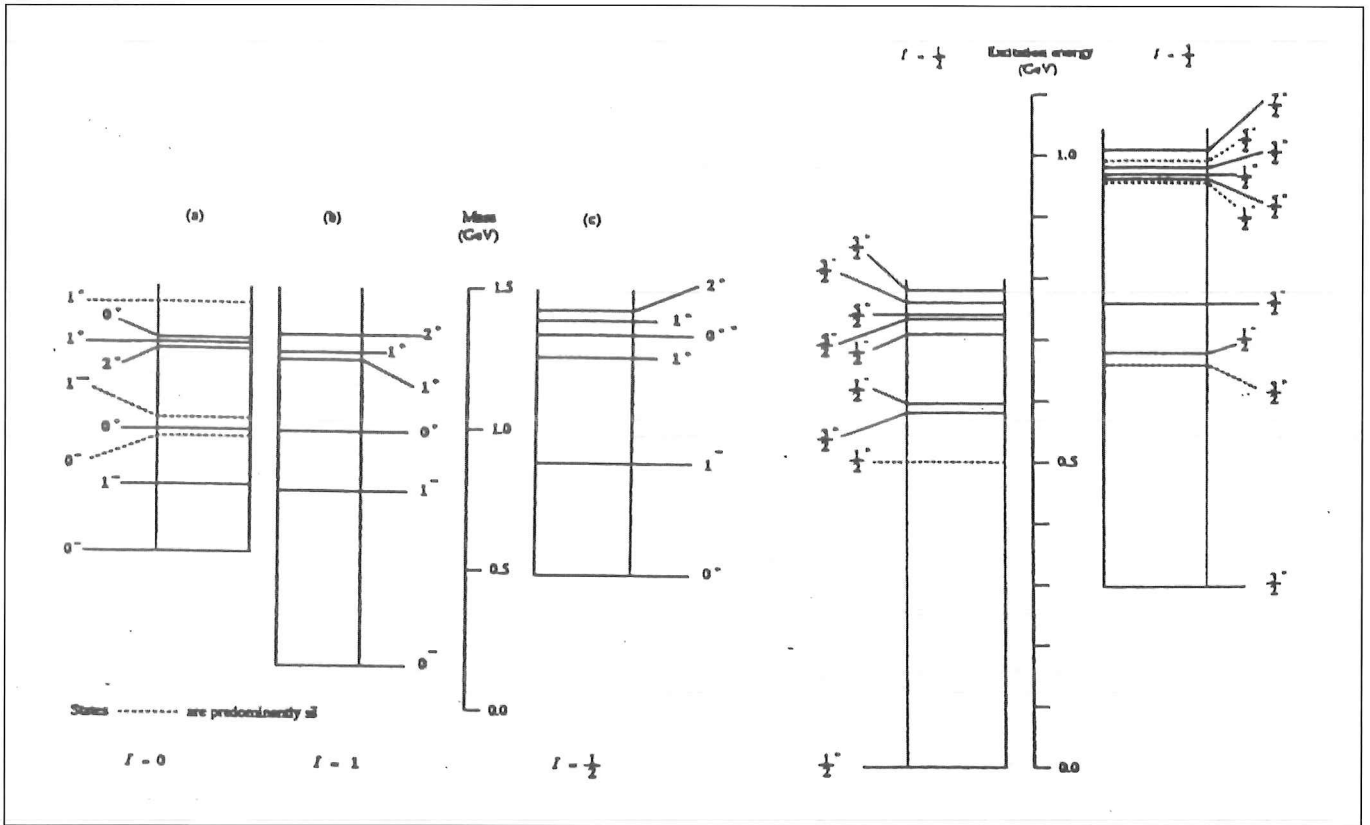


Figura 8. Niveles de energía de los hadrones.

de las partículas. Un resultado interesante del Modelo Estándar es que ha colocado a los niveles de energía de los quarks en hadrones de forma similar a los niveles de energía nucleónicos en los núcleos y los niveles electrónicos en los átomos, las moléculas y los sólidos, aunque se trata de niveles de energía muy diferentes, desde el orden del electrón-voltio (eV) hasta varios gigaelectrón-voltios (GeV), ver de nuevo la Figura 1.

No quiero dejar la impresión de que el Modelo Estándar es sólo descriptivo. Para permitir el análisis cuantitativo el Modelo Estándar ha sido formulado dentro del formato de la Teoría Cuántica de Campos utilizando teorías gauge similares a la Electrodinámica Cuántica, con una partícula y una constante de acoplamiento asociada con cada campo gauge. Ha sido desarrollada una Teoría Cuántica de Campos gauge para la interacción electrodébil, basada en la simetría $U(1) \times SU(2)$, que requiere la introducción de los campos de los bosones γ , W^+ , W^- , Z^0 en el lagrangiano. La interacción

fuerte requiere una nueva teoría de campos gauge, basada en la simetría $SU(3)$, llamada Cromodinámica Cuántica, asociada con los campos de los ocho bosones coloreados o gluones que deben ser incorporados al lagrangiano. El procedimiento matemático para transformar las interacciones fenomenológicas fuerte y electrodébil en una Teoría Cuántica de Campos ha consistido en desarrollar lagrangianos cuánticos invariantes gauge y relativista para partículas con masa, que involucran a todos los campos y contienen una parte de la interacción, y son renormalizables, para los cuales fueron fundamentales el trabajo pionero sobre teorías gauge no abelianas de C.N. Yang y R.L. Mills de 1954 y la idea de la ruptura de la simetría basada en el mecanismo propuesto por P. Higgs en 1964 (aunque P.W. Anderson había sugerido un mecanismo similar en 1963), que proporcionó un método para obtener las masas de los bosones electrodébiles, de los leptones y de los quarks. Así la Teoría Cuántica de Campos en cierto sentido regresa al método de

Schrödinger para obtener su ecuación, pero no parte de la Mecánica Cuántica convencional, constituyendo otra innovación conceptual de la Física Cuántica.

El aspecto importante del mecanismo de Higgs es que permite la interacción de los bosones gauge con masa en un lagrangiano renormalizable, como demostró G. t'Hoff en 1971, y utilizando la interacción electrodébil ha sido posible justificar la masa de los bosones W^+ y Z^0 , así como la masa de los leptones y los quarks. La búsqueda de los bosones Higgs escalares, cuya masa tiene un límite experimental inferior a 100 GeV, ha continuado durante muchos años sin éxito (ver Figuras 9 y 10). El 2 de noviembre de 2000 las autoridades del CERN decidieron parar la búsqueda del bosón de Higgs en su colisionador LEP, que será desmantelado y sustituido por un supercolisionador de hadrones (LHC) que será construido en el mismo lugar, y ofrecerá probabilidades más altas de observar el bosón de Higgs debido a la estructura más compleja de los hadrones,

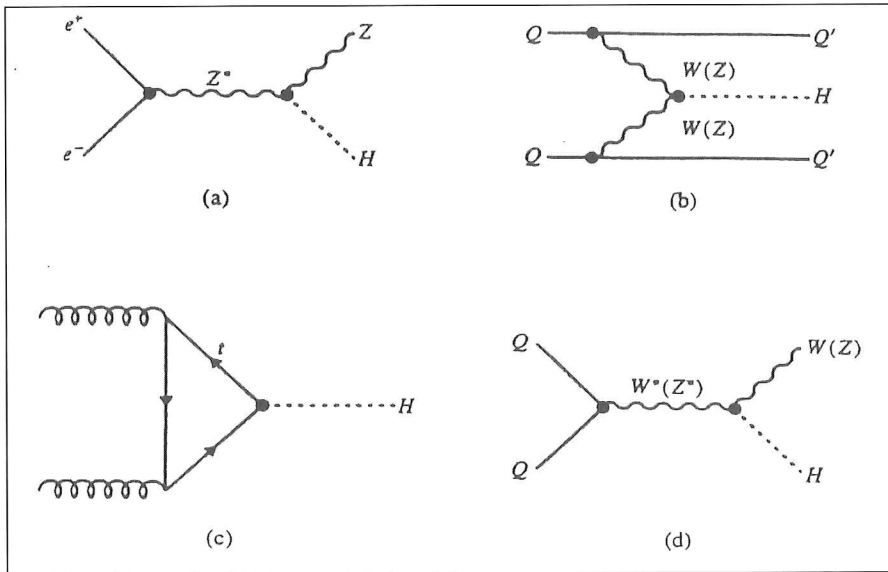


Figura 9. Procesos que involucran bosones Higgs.

aunque mientras tanto la búsqueda del bosón de Higgs continuará en el Fermilab.

MÁS NUEVAS IDEAS

Sin embargo, a finales del siglo pasado la Teoría Cuántica de Campos no estaba todavía completa y hay muchas áreas activas de investigación que, con optimismo, proporcionarán respuestas en los años venideros. El Modelo Estándar no es su forma final y todavía algunas cuestiones necesitan una respuesta: ¿el mecanismo de Higgs es necesario para producir las masas de las partículas?, ¿por qué los leptones y los quarks tienen masas tan diferentes?, ¿puede ser reducido el número de parámetros, en torno a 18? Los físicos, en aras de la simplicidad, la unidad y la simetría, están buscando una Teoría de la Gran Unificación, que fusionará la Teoría Electrodébil de Campos y la Cromodinámica Cuántica en una teoría sencilla unificada de campos con un alto orden de simetría. La Teoría de la Gran Unificación implica nuevas propiedades cuánticas de las partículas, tales como la desintegración del protón, cuya vida media está estimada en 10^{31} años, mucho más larga que la edad estimada del universo, gluones X que podrían convertir los quarks en leptones y viceversa, varios cam-

pos de Higgs, monopolos, espacios con más de cuatro dimensiones, etc. Algunos progresos se han hecho en esta dirección pero todavía la Teoría de la Gran Unificación es una cuestión abierta que requiere muchos esfuerzos e imaginación. Otra cuestión abierta es la inclusión de la Gravitación dentro del formato de la Teoría Cuántica de Campos. Una teoría cuántica de campos de la gravitación requiere la existencia de una "partícula" o bosón con espín dos, el "gravitón", que pueda dar lugar a la interacción gravitacional, que se expresa por un tensor de

segundo orden. Esto no es compatible con la teoría general de la relatividad, pero este bosón todavía no ha sido observado. Sin embargo, hay buenas razones y observaciones para creer que existen ondas gravitacionales asociadas con perturbaciones de la métrica del espacio-tiempo, puesto que cualquier perturbación en un campo gravitacional debe propagarse en el espacio. Además, la teoría de campos de Einstein de la gravitación no es renormalizable. Mayor desafío es intentar unificar la gravitación con las otras interacciones, esto es, unificar una Teoría Cuántica de Campos de la Gravitación con la Teoría de la Gran Unificación, reduciendo las interacciones a una sola interacción fundamental unificada. Muchas ideas interesantes para tal súper Gran Unificación, tales como la posibilidad de transformar campos fermiónicos en campos bosónicos y viceversa, dando origen a un "supercampo", resultando lo que es llamado supersimetría. Por supuesto, para reproducir el mundo observado la supersimetría tiene que ser rota por supercampos de Higgs. Han sido propuestos una constelación de nuevos campos y partículas (gravitinos, leptinos, fotinos, quarkinos, higgisinos, etc.). Sin embargo todavía no han sido obtenidos resultados concretos. De nuevo, esto es un problema para el futuro.

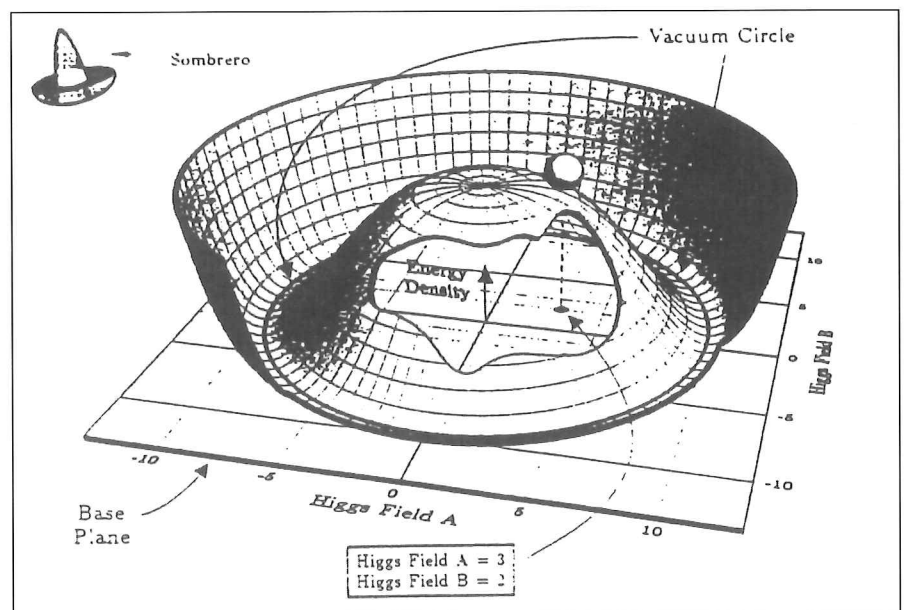


Figura 10. Potencial de Higgs.

Personalmente tengo la opinión de que la Gravitación no puede ser incorporada a la Teoría Cuántica de Campos por la simple razón de que, de acuerdo con la Teoría General de la Relatividad; la Gravitación se expresa en términos de una distorsión en la métrica del espacio-tiempo debida a la distribución de masa, siendo la consecuencia dinámica que las fuerzas “gravitacionales” son extremadamente pequeñas comparadas con las otras tres interacciones. Solamente tendría sentido una Teoría Cuántica de Campos de la Gravitación a energías del orden de la energía de Planck, $(hc^5/2\pi G)^{1/2} \approx 10^{19}$ GeV y a distancias del orden de la longitud de Planck, $(hG/2\pi c^3)^{1/2} \approx 10^{-35}$ m, como podrían haber existido en el instante del Big Bang o en la vecindad de objetos masivos como los agujeros negros, donde la distorsión del espacio-tiempo es muy grande y la Gravitación puede llegar a ser comparable a las otras interacciones. Pero de nuevo esto es un problema para las nuevas generaciones de físicos. A modo de un pie de página podría recordarse que desde los años veinte hasta su muerte en 1955 Einstein intentó unificar sin éxito la Gravitación y el electromagnetismo.

OTRAS CUESTIONES

Durante los cien años de desarrollo de la Física Cuántica han surgido y continúan surgiendo muchas preguntas interesantes que quizá puedan ser consideradas “filosóficas”, motivadas quizá porque algunos intentaron mirar los principios de la Mecánica Cuántica en un contexto macroscópico. Mencionaré brevemente tres de ellas por su especial interés. Sin embargo, personalmente debería decir que yo estoy bastante satisfecho con la Física Cuántica como un paradigma que ha tenido éxito para describir el mundo en el nivel fundamental, y así evito consideraciones filosóficas que aunque son importantes no las considero necesarias para tratar con problemas concretos relacionados con la materia y la radiación. (Por supuesto, los

filósofos tienen que hacer su trabajo como los físicos el suyo).

Uno de los asuntos más críticos que surgió al principio de la Mecánica Cuántica fue el significado de la “función de onda” ψ , que, como indicamos anteriormente, Schrödinger asumió en un principio que representa una clase de vibraciones estacionarias de “campos mecánicos” en el átomo. Lo que movió a P. Debye a preguntarle de qué clase de ondas estacionarias estaba hablando. Sin embargo, ψ es una función compleja y no un observable. En 1926 Born, en un artículo titulado “*Mecánica Cuántica de Procesos de Colisión*”, en *Zets. F. Physik*, Vol. 37, pág. 863, propuso que $|\psi|^2$ corresponde a la probabilidad de encontrar un electrón alrededor del punto (x,t) . Esta sugerencia fue aceptada, y combinada con el principio de incertidumbre de Heisenberg condujo a la interpretación probabilística de la Mecánica Cuántica y a la “interpretación de Copenhague” propuesta por Bohr y por Heisenberg, lo que ha sido la fuente de muchas discusiones, como la que puede verse en el artículo de Bohr en *Nature*, Vol. 121, pág. 580 (1928). El hecho es que la Mecánica Cuántica es determinista en su propia forma probabilista, que no es la misma que la probabilidad clásica de los acontecimientos aleatorios, y la causalidad toma su propia forma en la Mecánica Cuántica.

Otro asunto, todavía considerado por muchos, es cuál es el “significado” de la Mecánica Cuántica, o en otros términos, qué “realidad” es descrita por la Mecánica Cuántica. Es bien conocido que Einstein consideró poco satisfactoria la caracterización de la realidad “objetiva” en Mecánica Cuántica. Este asunto comenzó en 1927 con una discusión entre Einstein y Bohr, alcanzando su apogeo en 1935 con la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen (que no es una paradoja), propuesta en un artículo titulado “*¿Puede considerarse completa la descripción mecano-cuántica de la realidad?*”, *Phys. Rev.*, Vol. 47, pág. 477, un poco más elaborada en el libro de Bohr “*Física Atómica y Conocimiento Humano*”, Wiley, 1958, y por J.S. Bell, “*Sobre la para-*

doja de Einstein-Podolsky-Rosen”, *Physics*, Vol. 1-3, pág. 195 (1964), en la cual formuló sus famosas desigualdades. La discusión ha continuado hasta ahora. No puedo abordar aquí este asunto porque requiere definir en primer lugar lo que entendemos por “realidad” en Física y el papel de las medidas y de la observación en el estudio de la realidad.

Sin embargo, me gustaría puntualizar, de pasada, que en nuestros esfuerzos por comprender el mundo físico hay tres “realidades”: (1) una realidad “objetiva” independiente del observador; (2) la realidad “observada”, que es el resultado de observaciones y medidas, que puede cambiar si mejoran las técnicas de observación; y (3) la realidad “percibida”, que es nuestra construcción mental o interpretación de las observaciones y medidas, y a menudo depende de las realidades percibidas previas. El problema es que para la realidad “percibida” usamos nociones sensoriales o macroscópicas, que pueden no ser aplicables al nivel fundamental microscópico, pero incluso así tenemos que desarrollar un formalismo, la Mecánica Cuántica, que es adecuado para describir la naturaleza en el nivel fundamental basado en la realidad “observada”. Sin embargo, desde un punto de vista riguroso no podemos ignorar el papel del observador, que en la búsqueda de una realidad “observada” podría afectar el estado del sistema observado y así cambiar la realidad “objetiva”. Esto ha conducido a la noción de “colapso” de la función de onda como un resultado de una medida. Por otra parte, sin medir y sin observar no puede existir la Física.

Un tercer asunto muy relacionado con el anterior y de gran interés en la actualidad es el de la “separabilidad” y el del “enredo” (entanglement), término introducido por Schrödinger, sobre el cual se está escribiendo mucho. Por ejemplo, si tenemos un sistema compuesto por dos subsistemas 1 y 2 interactuando, la función de onda del sistema es una combinación de las funciones de onda para los estados de los dos subsistemas. Si hago una medida en un subsistema, por ejemplo el 1, podría alterar su estado, y, depen-

diendo de la simetría de la función de onda completa y de la intensidad de la interacción, el estado del subsistema 2 debe también cambiar y uno puede predecir su nuevo valor sin necesidad de medir. Esto es, los estados de los dos subsistemas que interactúan están enmarañados incluso si aparecen separados. Quizá, como expresó Schrödinger en 1935, esto “es el rasgo característico” de la Mecánica Cuántica. El problema comienza cuando los dos subsistemas están separados a una gran distancia tal que su interacción decrece a un valor muy pequeño y debe haber un retraso entre la medida en el subsistema 1 y el cambio en el subsistema 2. Yo digo que en este caso el “enredo” también tiende a desaparecer, pero estoy seguro que otros tienen una opinión diferente e introducen una serie de nociones tales como “variables ocultas”, ahora descartadas, y “coherencia”, “decoherencia” y “teleportación”, acerca de los cuales no quiero discutir, y términos dramáticos tales como “medidas de no-demolición cuántica”. Hay una literatura muy rica sobre el tema que los interesados pueden consultar.

Un punto interesante, pero un poco especulativo, es que la Mecánica Cuántica puede contribuir a entender los fenómenos de la vida que dependen muy críticamente de muchos factores físicos, de elementos químicos y de procesos que tienen lugar en sistemas vivos basados en el carbono. Los sistemas vivos son sistemas complejos abiertos adaptativos muy especiales, que como Jacques Monod ha indicado, tienen tres características que no se encuentran en la materia inerte: teleonomía, morfogénesis autónoma e invariancia reproductiva. No obstante, el funcionamiento de los sistemas vivos obedece a leyes de la materia inerte aunque depende de la actividad de unos pocos elementos químicos. Los elementos más importantes son el carbono, el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno, que aparecen en varios compuestos. Pero igualmente importante es que la energía disponible de estos elementos y sus compuestos debe estar estrechamente relacionada con sus estados cuánticos; de lo contrario ellos no serían

estables o reaccionarían. El Principio Antrópico (del cual existen varias versiones) especula sobre este punto, analizando cómo los valores de algunas cantidades físicas (carga eléctrica, constante de estructura fina, constante gravitacional, etc.) relacionadas con las componentes fundamentales del mundo, hacen posible la vida o están designadas para hacer posible la vida basada en el carbono, en algún tiempo durante la evolución del universo.

Los seres vivos son sistemas muy complejos e inestables, pero predecibles, que dependen para su organización y funcionamiento de muchas interacciones moleculares a las cuales se aplica el formalismo de la Mecánica Cuántica. La visión, por ejemplo, comienza con la absorción de fotones por la retina, que induce señales eléctricas en el nervio óptico, que finalmente son procesadas por el cerebro, todo ello constituye una serie de procesos cuánticos. El cerebro en particular es el sistema más complejo que funciona moviendo electrones alrededor de barreras de potencial de acuerdo con la Mecánica Cuántica, y está regulado por iones transportados por varios compuestos moleculares a través de diferencias de potencial eléctrico, siguiendo las reglas de la Mecánica Cuántica. Los procesos físicos a nivel molecular que explican, por ejemplo, la conciencia, la percepción y el conocimiento en general, y la memoria en particular, todavía no son bien conocidos, e incluso lo es menos cómo la Mecánica Cuántica puede ayudar a entenderlos. Por ello parece razonable esperar que los físicos, trabajando con los biólogos, encontrarán nuevas percepciones acerca de la vida, aplicando la Mecánica Cuántica a los procesos biológicos, y darán bases sólidas a la Biología cuántica.

Por el lado más práctico, un área en la que la Física Cuántica puede tener un importante impacto durante las próximas décadas es la “computación cuántica”. La idea básica es muy simple. Se podría utilizar un sistema con solo dos estados, tal como un electrón que tiene el espín hacia arriba o hacia abajo en un campo magné-

tico, o un fotón con dos estados de polarización, para manipular los bits cuánticos o “qubits”. En el lenguaje binario del ordenador, a un estado se le designaría con 0 y al otro con 1. Sin embargo, la puesta en práctica de esa interesante idea está todavía en su más tierna infancia y es muy arriesgado intentar predecir su futuro, aunque muchos trabajos teóricos están tratando sobre este tema y sobre un área relacionada, la criptografía.

Finalmente, la “miniaturización” es el primer paso para el diseño de dispositivos microelectrónicos más rápidos, y la pregunta es “¿Cuánto queda para que podamos lograr la miniaturización sin violar los principios básicos de la Mecánica Cuántica y sin entrar en conflicto con el principio de incertidumbre?”. El tiempo lo dirá.

EPÍLOGO

En conclusión, durante el siglo XX la Física Cuántica nos ha proporcionado una imagen sencilla, coherente y fiable del mundo microscópico que se escapa de nuestra experiencia sensorial directa, y que ha requerido apartarse de muchos conceptos que son resultado de tales experiencias sensoriales, o fueron heredados de siglos anteriores, pero que todavía podemos aplicarlos al mundo macroscópico. La imagen del mundo de la Física Cuántica está todavía por completarse y nadie puede predecir qué nuevas ideas surgirán o incluso si surgirá un nuevo modelo del mundo. La Ciencia es por su propia naturaleza una actividad muy dinámica, en la cual la creatividad y las habilidades de los seres humanos juegan un papel fundamental pero impredecible. Los físicos del siglo XXI tendrán un papel importante en relación a nuestra visión del mundo, pero perfeccionando y jugando con el formalismo de la Física Cuántica desarrollado en el siglo XX y aplicándolo a una variedad de viejos y nuevos asuntos.

Marcelo Alonso

Florida Institute of Technology (USA)