

EL DISCRETO ENCANTO DE LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

Autor: ARTURO MENCHACA ROCHA

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [EPÍGRAFE](#)
- [I. INTRODUCCIÓN](#)
- [II. LA HISTORIA DEL ÁTOMO: DE LOS GRIEGOS A FARADAY Y MAXWELL](#)
- [III. EL ELECTRÓN: THOMSON Y MILLIKAN](#)
- [IV. EL FOTÓN: PLANCK, EINSTEIN Y COMPTON](#)
- [V. EL PROTÓN: RUTHERFORD](#)
- [VI. EL NEUTRÓN: CHANDWICK](#)
- [VII. EL POSITRÓN: DIRAC Y ANDERSON](#)
- [VIII. EL NEUTRINO: PAULI, FERMI, REINES Y COWAN](#)
- [IX. EL MUON Y LOS PIONES: YUKAWA, LATTES, OCCHIALINI Y POWELL](#)
- [X. PROLIFERACIÓN HADRÓNICA: MESONES, BARIONES Y SUS DESCUBRIDORES](#)
- [XI. LOS CUARKS: GELL-MANN Y ZWEIG](#)
- [XII. UNIFICACIÓN ELECTRODÉBIL: SALAM, WEINBERG, VAN DEER MEER Y RUBBIA](#)
- [XIII. CONCLUSIÓN](#)
- [BIBLIOGRAFÍA](#)
- [COLOFÓN](#)
- [CONTRAPORTADA](#)



COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García-Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

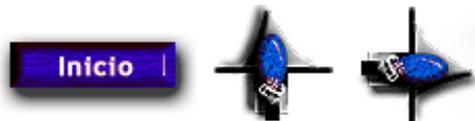
Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora Fundadora:

Física Alejandra Jaidar †

Coordinadora:

María del Carmen Farías



Primera edición, 1987

Quinta reimpresión, 1996

La Ciencia desde México es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D. R. © 1988, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S. A. DE C. V.

D. R. © 1995, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-2949-3

Impreso en México



EPÍGRAFE

Les Philosophes qui font des systèmes
sur la secrète construction de l'univers,
sont comme nos voyageurs qui vont á
Constantinople, et qui parlent du Sèrail:
Ils n'en ont vu que les dehors, et ils
prétendent savoir ce que fait le Sultan
avec ses Favorites.

VOLTAIRE: *Pensées Philosophiques* (1766)



I. INTRODUCCIÓN

EL SER humano, en su afán por comprender la composición del Universo, tiende a reducir la información que la naturaleza le brinda a conceptos *simples*. Ejemplos de ello son las ideas griegas de *elementos*, como unas cuantas sustancias a partir de las cuales se forman todas las demás, y de *átomos o partículas* indivisibles de las cuales, en la última instancia, se componen los propios elementos. Este libro describe los hallazgos más relevantes que durante veinticinco siglos se han dado en la fascinante búsqueda de los constituyentes *últimos* de la naturaleza. El texto está dirigido a un público que, interesado en temas científicos, no necesariamente posea un nivel técnico avanzado. El punto de vista histórico-anecdótico utilizado pretende llevar al lector, en forma amena, a través de la misma serie de razonamientos seguidos por los descubridores, con la esperanza de facilitar una mayor comprensión.

Los doce capítulos que forman el grueso del relato se pueden agrupar en tres etapas, que corresponden a los grandes avances científicos en el tema. Primero se reseña la historia de la química hasta la consolidación de la teoría atómica (capítulo II). Posteriormente se ve cómo el descubrimiento de los dos actores principales de la físicoquímica, el electrón (capítulo III) y el fotón (capítulo IV), viene a demostrar que el átomo tiene una estructura interna. La segunda etapa se refiere a la era de las partículas "nucleares": el protón (capítulo V), el neutrón (capítulo VI), el positrón (capítulo VII), el neutrino (capítulo VIII) y el mesón (capítulo IX). Todas estas partículas fueron consideradas como los bloques más elementales de la naturaleza hasta que su número creciente (capítulo X) puso en duda dicha condición. Finalmente se revisa el surgimiento de la etapa actual en la que la observación de ciertas correlaciones entre las partículas motivó su unificación: unas a través del modelo de cuarks (capítulo XI) y el resto en el grupo que incluye los bosones intermediarios (capítulo XII). El libro termina con una reflexión sobre el estado actual y el futuro previsible en este terreno (capítulo XIII).

El autor agradece a los doctores Jorge Flores Valdés, Ángel Dacal Alonso y María Ester Brandan y a la física Verónica Riquer sus valiosas críticas durante la elaboración de este libro.



II. LA HISTORIA DEL ÁTOMO: DE LOS GRIEGOS A FARADAY Y MAXWELL

II.1 INTRODUCCIÓN

EN EL siglo V a. C., los griegos sugirieron que la materia está compuesta de *partículas elementales* indivisibles. Su intención era explicar las propiedades de la inmensa variedad de sustancias encontradas hasta entonces con base en las de un número reducido de materiales *elementales*. La esencia de estas sustancias, pensaban ellos, se encontraba presente aun en la cantidad más pequeña que se pudiese obtener: los *átomos* (ατομο= indivisible).

Los antiguos griegos también intentaron entender la naturaleza de la luz y de la electricidad, sin sospechar su conexión con la estructura de la materia. Discutían sobre si la luz se transmite instantáneamente de su fuente al observador, o se transporta a una velocidad finita. En cuanto a la electricidad, Platón, en uno de sus *Diálogos*, habla de "las maravillas de la atracción del ámbar", refiriéndose a una resina amarillenta que al ser frotada con piel atrae a objetos ligeros como el pelo (la palabra ηλεκτρον es la voz griega que significa *ámbar*). Otra fenomenología conocida desde entonces era el magnetismo, bautizada así en honor al material que presenta esta propiedad en forma natural: la *magnetita*.

En este capítulo se revisará por separado la evolución independiente de los conceptos de luz, electricidad y magnetismo hasta su fusión hacia fines del siglo XIX. Simultáneamente seguiremos el camino de la hipótesis atómica, con base en el progreso de la química durante el mismo periodo.

II.2 LA ELECTRICIDAD Y EL MAGNETISMO

La capacidad de la magnetita para orientarse con respecto a la tierra fascinó a los antiguos, quienes pronto pudieron aplicarla a la navegación. Hacia fines del siglo XVI el inglés William Gilbert fue el primero en utilizar métodos científicos al estudio de la atracción que ejerce la magnetita sobre algunos metales y la repulsión que ejerce sobre sí misma en cierta orientación. Gilbert mismo fue el primero en sugerir que la tierra posee un campo magnético.

En cuanto a la electricidad, aunque era un fenómeno menos útil, en la Edad Media ya se sabía que, además del ámbar, otros materiales como el vidrio y el copal mostraban propiedades *eléctricas*. La variedad de estos materiales sugirió que la electricidad no era una propiedad intrínseca de las sustancias sino una especie de fluido que se producía o transfería al frotar o tocar unos materiales con otros. Sin embargo, también se observó que la electrificación no sólo causaba la atracción sino la repulsión entre algunos objetos.

En 1773 el químico francés Charles-François de Cisternay Du Fay observó que las limaduras de hierro, luego de estar en contacto con vidrio electrificado, se repelían entre sí, aunque eran atraídas por otras que habían estado en contacto con resina electrificada. De ahí surgió la idea de electricidad *vítrea* y electricidad *resinosa* como dos versiones diferentes del mismo fenómeno. Hacia 1745 el norteamericano Benjamín Franklin llegó a la conclusión de que se trataba de un solo tipo de fluido constituido por *partículas extremadamente pequeñas*.

En el modelo de electricidad de Franklin la materia se comportaba como una esponja capaz de absorber, contener y ceder partículas de electricidad. Así, al frotar ámbar con piel, las partículas pasaban del primer material al segundo y en forma opuesta cuando se frotaba vidrio con seda. Franklin se refería al exceso de electricidad como *carga positiva*, y *carga negativa* en el caso contrario. Un concepto implícito en estos razonamientos es el de la conservación de la carga. Pronto se complementaron las ideas de Franklin con el postulado de que cuerpos cargados de un mismo signo se repelen entre sí y aquellos cargados de signos opuestos se atraen.

II.3 LA LUZ

En lo que se refiere a la luz, la antigua polémica sobre su velocidad permaneció como un tema abierto durante muchos siglos. Una de las primeras evidencias sobre su magnitud finita fue presentada ante la Academia Francesa en 1666 por Ole Roemer, un danés radicado en París que llegó a ser tutor del delfín. Roemer basaba su teoría en la observación astronómica de los eclipses de una de las lunas de Júpiter. Al igual que con los otros planetas, la

Tierra se acerca y se aleja de Júpiter en la medida en que recorre su órbita. Las lunas de Júpiter, en sus propias órbitas, se occultan (eclipsan) tras el planeta con una frecuencia constante. Luego de repetir varias veces las medidas del periodo de los eclipses de la primera luna de Júpiter, Roemer observó que se daban periodos más cortos cuando la Tierra se acercaba a Júpiter que cuando se alejaba. Roemer atribuyó este efecto a la velocidad de la luz y estimó que ésta tardaría 22 minutos en cruzar la órbita terrestre. Desgraciadamente, dado que el diámetro de la órbita terrestre era desconocido en ese entonces, Roemer no pudo dar un valor a la velocidad de la luz.

No sólo la velocidad sino la naturaleza misma de la luz intrigó también a científicos de todos los tiempos. A finales del siglo XVII, el inglés Isaac Newton consideraba que la luz consistía en un haz de corpúsculos, mientras que otros como el holandés Christian Huygens aseguraban que se trataba de un fenómeno ondulatorio. El principal argumento de la hipótesis corpuscular era que la luz viaja en línea recta y proyecta sombras bien definidas, contrariamente al comportamiento de ondas como las de sonido que pueden rodear obstáculos. El *principio* de Huygens establece que, al igual que el sonido, la luz se propaga por frentes de onda. Las partículas de este frente actúan como nuevas fuentes, con lo que causan que sus vecinas vibren con la misma frecuencia. Este modelo explica satisfactoriamente fenómenos como la *refracción*.

La refracción ocurre cuando la luz pasa de un medio a otro de diferentes propiedades ópticas y su manifestación más común es la impresión de que los objetos rectos, como un lápiz, se doblan al ser sumergidos parcialmente en el agua. El ángulo al que parecen doblarse los objetos se conoce como *ángulo de refracción*. Este fenómeno había interesado ya a Ptolomeo, quien en el siglo II notó que el ángulo de refracción dependía de los materiales sobre los cuales se hacía incidir la luz, y al árabe Al Hazen, quien, a fines del siglo X, dedujo varias relaciones geométricas importantes entre el ángulo de la luz incidente, el de refracción y el plano de la superficie de contacto entre los medios. El tratado de óptica de Al Hazen fue posteriormente traducido al latín y era un texto conocido cuando en 1621 el holandés Willebord van Roijen Snell encontró que el cociente entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es una constante característica del medio, que se denomina *índice de refracción*. Posteriormente el abogado y gran matemático francés Pierre Fermat dedujo la ley, hasta entonces empírica de Snell, suponiendo que existía una diferencia en la velocidad de propagación de la luz en cada medio.

El argumento de Fermat considera la trayectoria que seguiría la luz para viajar de un punto (A) en un medio en que su velocidad (V) es mayor, a otro punto (B) en un medio en el que la velocidad de la luz (V') es menor (véase figura 1).

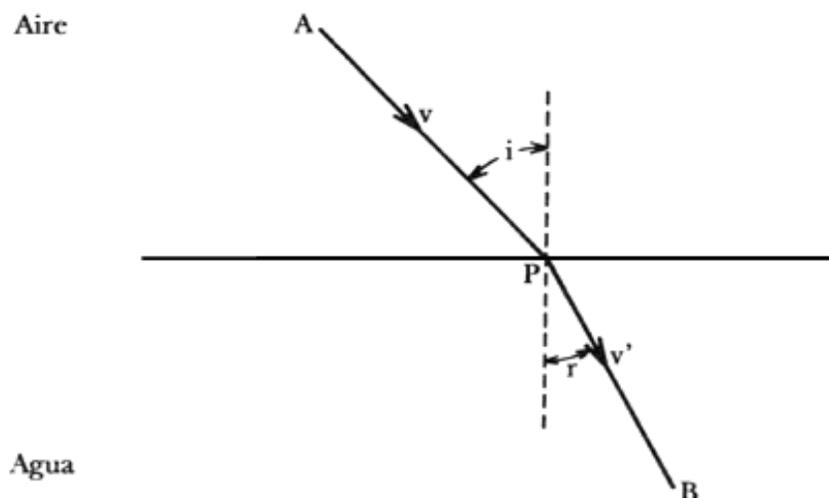


Figura 1. Principio de Fermat. La luz viaja de A a B siguiendo la trayectoria que minimiza el tiempo.

La hipótesis de Fermat es que la trayectoria preferida sería aquella en que la luz tardase menos en llegar de A a B. Tómese como ejemplo el paso de la luz del aire al agua. Si denotamos como P al punto intermedio en que la

trayectoria corta la superficie del agua, es claro que $V = V'$ implica que A, P y B están alineados. Sin embargo, si V es mayor que V' , para hacer más corto el tiempo de recorrido conviene aumentar la longitud de la trayectoria en el aire y disminuirla en el agua donde viaja más despacio. Es decir, el segmento AP sería mayor que en el caso $V = V'$ y el PB menor. Por lo anterior, A, P y B no estarán alineados y el cociente entre el seno de los ángulos que forman AP y PB con la perpendicular a la superficie del agua en el punto P resulta ser igual al cociente V/V' que es el índice de refracción de Snell.

La hipótesis corpuscular fue sostenida en 1644 por el filósofo francés René Descartes, y posteriormente por Newton, quienes explicaban el fenómeno de la refracción como el efecto de una fuerza, de atracción en el caso del paso de aire a agua, que sólo actuaba sobre las partículas de luz durante el instante en que éstas cambiaban de medio. Esta fuerza, perpendicular a la superficie que separa a los medios, provocaba una aceleración en las partículas. Es decir, según el modelo corpuscular descrito por Newton en su trabajo *Optiks*, publicado en 1704, la velocidad de la luz debería ser mayor en el agua que en el aire. Por otra parte, la explicación que da Huygens en su *Traité de la Lumière*, publicado en 1690, implica que las ondas luminosas viajan a mayor velocidad en el aire que en el agua. Bastaría entonces con medir la velocidad de la luz en ambos medios para resolver el problema. Sin embargo, pasó mucho tiempo antes de que esto ocurriera. Mientras tanto, la química dio un paso enorme en el entendimiento de la estructura de la materia.

II.4 DALTON Y LOS PESOS ATÓMICOS

Hacia 1802 el inglés John Dalton encontró ciertas relaciones entre las masas de una gran variedad de elementos. Nacido en 1766, hijo de un tejedor, a principios del siglo XIX encontró que las cantidades relativas de elementos necesarias para formar un compuesto químico son siempre las mismas. Por ejemplo, para formar agua son necesarios ocho gramos de oxígeno por cada gramo de hidrógeno. Cualquier excedente de alguno de los componentes queda sin reaccionar. Según Dalton, estas proporciones constantes indicaban que, si el agua estaba compuesta de partículas —que ahora llamamos moléculas— cada una de las cuales consistía en un átomo de hidrógeno y uno de oxígeno, entonces la relación ocho a uno indicaría que el átomo de oxígeno pasaba ocho veces más que el de hidrógeno. Dalton llamó a este número (ocho) el *peso atómico del oxígeno*, como una medida relativa al hidrógeno^{1*}  Dalton hizo notar también que las masas de los elementos eran muy cercanas a múltiplos enteros de la del hidrógeno, lo que indujo al médico inglés William Prout a proponer, en 1815, que todos los elementos químicos estaban constituidos por números enteros de átomos de hidrógeno.

En 1808 el francés Joseph Luis Gay-Lussac descubrió que, además de la proporción en los pesos encontrada por Dalton, los gases se combinan de acuerdo con una relación de volúmenes fija. Por *volumen* Gay-Lussac se refería al gas contenido en un mismo recipiente en idénticas condiciones de presión y temperatura. Siguiendo con nuestro ejemplo, dos volúmenes de hidrógeno se combinan con uno de oxígeno para formar dos volúmenes de vapor de agua.

II.5 AVOGADRO Y LAS MOLÉCULAS

Amadeo Avogadro, profesor de la Universidad de Turín, interpretó en 1811 los resultados de Gay-Lussac diciendo que dos volúmenes de gas en idénticas condiciones de presión y temperatura contenían el mismo número de *partículas* del gas, a las que bautizó como *moléculas*. Entonces, el hecho de que dos volúmenes de hidrógeno se combinen con uno de oxígeno para formar agua indica que la molécula de agua contiene el doble de átomos de hidrógeno que de oxígeno, pero ¿por qué el resultado son dos volúmenes de vapor de agua y no uno? Avogadro encontró que esto se debía a que, en condiciones normales, el gas de hidrógeno y el de oxígeno están compuestos de moléculas que contienen dos átomos (que él denominó *moléculas elementales*). De esta manera se introdujo el concepto de *peso molecular*, como la suma de los pesos atómicos de los elementos que componen la molécula.

Avogadro utilizó su idea de un número constante de partículas en un mismo volumen de cualquier gas, a temperatura y presión fija, para deducir la fórmula química de una serie de compuestos químicos. En esta labor fue conveniente utilizar como unidad de medida el *mol*, que es el número de gramos de un compuesto, igual a su peso molecular. Por ejemplo, un *mol* de agua pesa 18 gramos (2 de los dos átomos de hidrógeno y 16 del átomo de oxígeno). El número de moléculas por mol, de acuerdo con Avogadro, debe ser siempre el mismo, independientemente de la complejidad de la molécula. A este número se le conoce como *número de Avogadro*, a pesar de que él nunca supo su magnitud. Pasó más de medio siglo antes que alguien lograra tener una idea exacta del enorme valor de la fórmula: 6.02×10^{23} moléculas/mol ^{2*} 

Siguiendo la receta de Avogadro fue posible deducir la fórmula química de un gran número de compuestos. Durante el resto del siglo XIX, estas fórmulas sirvieron para deducir relaciones entre los *pesos atómicos* (relativos al hidrógeno) de los elementos que forman los compuestos, tal como Dalton pretendió hacer en un principio. Como confirmación de las ideas de Avogadro, se encontró que el peso atómico de un mismo elemento contenido en diferentes compuestos químicos es siempre el mismo. Si la hipótesis de Avogadro fuera errónea, las fórmulas químicas que de ella se derivaron difícilmente darían resultados consistentes respecto a los pesos atómicos. El éxito del método para predecir las proporciones necesarias en la preparación de compuestos químicos sirvió de apoyo a los pocos físicos y químicos que, hacia finales del siglo, aceptaban la existencia de los átomos.

II.6 MENDELEV Y LA TABLA PERIÓDICA

La idea de que las moléculas son combinaciones de números enteros de átomos originó el concepto de valencia. La valencia de un elemento se define como el número de pesos atómicos de hidrógeno, o de cualquier otro elemento de *valencia* unitaria, que se combinan con ese elemento para formar un compuesto. Por ejemplo, la valencia del oxígeno es dos. Luego de determinar la valencia de todos los elementos conocidos, los químicos del siglo XIX empezaron a encontrar que las propiedades químicas de los elementos estaban relacionadas con esa valencia. Por ejemplo, una de las familias de elementos de valencia unitaria incluye al flúor, al cloro, al bromo y al yodo, que son gases corrosivos, que reaccionan con metales para formar sales cristalinas. Otra familia de elementos de valencia unitaria incluye el litio, sodio y potasio, que son metales que reaccionan violentamente al contacto con el agua.

Los esfuerzos por clasificar elementos en familias de acuerdo con sus propiedades se intensificaron hacia la segunda mitad del siglo pasado. Por ejemplo, en 1863 el inglés J. A. R. Newlands hizo una tabla cíclica en la que acomodaba los elementos de acuerdo con su peso, utilizando el hecho, por entonces ya establecido, de que los elementos cuyos pesos atómicos difieren en ocho unidades muestran propiedades químicas muy parecidas entre sí.

En 1869 el químico ruso Dmitri Ivanovich Mendeleev propuso una tabla en la que agrupaba a los elementos de acuerdo con sus propiedades físicas y químicas, su valencia y su peso atómico. La tabla de Mendeleev agrupaba a los elementos en 17 columnas, cada una con una familia que poseía propiedades químicas muy parecidas. En 1871, Mendeleev modificó su tabla periódica reduciéndola a sólo ocho columnas. Un detalle interesante en este trabajo fue que al acomodar los elementos en la nueva tabla quedaban seis espacios vacíos. Si tenían validez los arreglos de Mendeleev, se podía considerar como una predicción la existencia de elementos aún no descubiertos que debían llenar los espacios en blanco. Tres de esos elementos (escandio, galio y germanio) fueron descubiertos poco tiempo después y mostraban propiedades muy parecidas a las predichas por Mendeleev. De los otros tres, el renio y el polonio fueron descubiertos hacia fines del siglo XIX y el tecnecio sólo fue descubierto en reacciones nucleares a mediados de nuestro siglo. La capacidad predictiva de la tabla periódica reforzó la confianza en la teoría atómica. Mendeleev, nacido en Siberia en 1834, además de su aportación a la química, tenía ideas revolucionarias en agronomía y en política, al punto de que se ganó enemigos importantes en el gobierno ruso de aquel entonces.

II.7. FARADAY Y LOS IONES

Una propiedad que liga claramente a la materia con la electricidad, también descubierta a principios del siglo XIX, se refiere a la disociación de compuestos químicos por corrientes eléctricas en un proceso conocido como *electrólisis*. Este proceso fue descubierto accidentalmente en 1800 por William Nicholson y Antony Carlisle mientras estudiaban la operación de baterías eléctricas. Utilizando gotas de agua para mejorar el contacto eléctrico de una batería, notaron que se producían burbujas. Luego, al estudiar con más cuidado el fenómeno, se dieron cuenta de que cerca de la terminal negativa de la batería el gas liberado era hidrógeno, mientras que en el lado positivo se producía oxígeno. Pronto se estudió la disociación de otros compuestos utilizando este método. Uno de los trabajos más extensos realizados en este campo fue el de sir Humphrey Davy, quien con la ayuda de la electrólisis descubrió los elementos sodio y potasio al someter ciertas soluciones salinas a la acción de corrientes eléctricas.

La primera interpretación aceptable de esta fenomenología fue desarrollada por el célebre Michael Faraday en la década de 1830. Nacido en 1791, el joven Faraday trabajó como encuadernador de libros, mismos que aprovechaba para educarse. En 1812, lleno de inquietudes, Faraday concursó por una plaza de ayudante en el

laboratorio de Davy, quien quedó tan impresionado que lo contrató inmediatamente. Diecinueve años más tarde, Faraday lo sustituyó como director del laboratorio.

En sus experimentos, Faraday encontró que los productos de la electrólisis siempre aparecían en una proporción fija. Por ejemplo, al pasar una corriente eléctrica por una muestra de agua, se obtienen ocho partes de oxígeno por una de hidrógeno. También observó que una carga eléctrica fija cedida en la electrólisis producía cantidades constantes de elementos disociados. Faraday denominó *iones* a los productos de la disociación y, más específicamente, *aniones* y *cationes* según si éstos eran colectados en la vecindad del *ánodo* —la terminal positiva— o del *cátodo* —terminal negativa—. Esta nomenclatura se utiliza hoy todavía.

Faraday, de acuerdo con la teoría atómica, dedujo que debería existir una cantidad irreducible de carga necesaria para disociar un compuesto. La carga utilizada en producir las cantidades observadas de hidrógeno u oxígeno a partir de agua, por ejemplo, era un múltiplo de la *unidad electrolítica* de carga básica.

Dada la poca precisión de los aparatos desarrollados hasta entonces, a Faraday le era imposible deducir el valor de la carga necesaria para ionizar una sola molécula a través de la electrólisis, es decir, de la *unidad electrolítica de carga*. Esta situación era similar a la que había enfrentado Dalton con la masa de los átomos. Por lo tanto, Faraday, al igual que Dalton, se concretó a establecer relaciones entre las cantidades de elementos producidos por electrólisis con una carga fija. De esta manera determinó que la carga eléctrica para producir un mol de cualquier material es 96 850 coulombs,^{3*}  unidad ahora conocida como *constante de Faraday* o simplemente *Faraday*. Si el número de Avogadro nos indica la cantidad de moléculas contenidas en un mol, su conocimiento habría permitido obtener directamente la masa y la carga de una molécula a partir de los hallazgos de Dalton y Faraday, respectivamente. Sin embargo, incluso sin esa información, el cociente entre el faraday y la masa de un mol de hidrógeno permitió entonces saber la relación entre la carga más elemental y la masa más elemental, que resultó ser 1.044×10^{-8} kg/coulomb.

II.8 LA LUZ COMO UNA ONDA

Otro tema que interesó a Faraday —en el que hizo una de sus más grandes aportaciones— fue la naturaleza de la luz. Como se recordará, a principios del siglo XVIII dos grandes de la física, Newton y Huygens, basados en concepciones diferentes, habían llegado a predicciones que se contradecían en cuanto a la velocidad de la luz en diferentes medios. Esta discrepancia tan clara daba una oportunidad para discernir entre las concepciones corpuscular y ondulatoria de la luz.

Pasaron más de cien años hasta que el físico francés Armand Fizeau hizo la primera medida precisa de la velocidad de la luz en el aire. Utilizando un espejo semitransparente, desde su casa en el barrio de Suresnes en París, Fizeau dirigió un haz de luz hacia un espejo colocado a más de ocho kilómetros en la punta del cerro Montmartre. Observando el reflejo distante a través del mismo espejo semitransparente, Fizeau interrumpió el haz por medio de un engrane giratorio, con cuyos dientes se producía un haz intermitente. Cuando el tiempo que tardaba la luz en ir y volver a Montmartre era igual al tiempo de giro necesario para el avance de un diente, los destellos desaparecían por completo. Una simple relación geométrica le permitió, en 1849, deducir que la velocidad de la luz era de 313 000 km/seg. Posteriormente, en 1862, ayudado ahora por su asistente Jean B. L. Foucault, el cual sustituyó el engrane por un espejo rotatorio, obtuvo un valor un poco menor de 298 000 km/seg, que es apenas un 1% diferente del más preciso obtenido en nuestros días. El propio Foucault determinó que la velocidad de la luz en el agua es menor que en el aire, de acuerdo con la predicción de la teoría ondulatoria apoyada por Huygens, con lo que se dio un duro golpe a la concepción corpuscular de la luz.

Otros fenómenos que ilustraban el comportamiento ondulatorio de la luz son la difracción y la interferencia. Los efectos de difracción fueron observados en el siglo XVII por Grimaldi, profesor de matemáticas en la Universidad de Bolonia. Sin embargo, el primer estudio sistemático de este fenómeno se debió al francés Augustin Jean Fresnel a principios del siglo XIX. Un patrón de difracción se puede obtener al observar luz a través del espacio entre los dedos de nuestra mano. Cuando éstos están casi juntos, aparece en la imagen una serie de franjas oscuras. Fresnel explicó este fenómeno utilizando la formulación de Huygens. En 1803, Thomas Young mostró el fenómeno de interferencia de la luz, utilizando una fuente de luz puntual y una pantalla entre las que interponía una lámina con dos pequeños orificios. La imagen proyectada mostraba claramente un patrón de interferencia formado por franjas iluminadas. Tanto Young como Fresnel consideraban a la luz como una onda transversal, igual que las oscilaciones de una cuerda de guitarra. Esto permitió también explicar ciertos fenómenos debidos a

la polarización de la luz.

II.9 EL ELECTROMAGNETISMO

Hacia principios del siglo XIX la idea de que la luz es producto de un fenómeno ondulatorio prevalecía sobre la concepción corpuscular. Sin embargo, poco se sabía acerca de su naturaleza y nadie sospechaba su estrecha relación con los fenómenos *electromagnéticos*. Tanto la electricidad como el magnetismo reflejan su acción en fenómenos como la atracción o repulsión de cuerpos cargados o imanes. En 1785, el francés Charles-Augustin Coulomb demostró que la fuerza entre cargas y entre imanes es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. En 1820 el danés Hans Christian Oersted, profesor de física en la Universidad de Copenhague, durante una de sus clases se percató de que la dirección que indica una brújula se ve afectada al hacer pasar una corriente eléctrica por un alambre cercano. Por aquellas fechas varios investigadores buscaban alguna relación entre la electricidad y el magnetismo, pero a nadie se le había ocurrido acercar un imán tan ligero a un alambre o a una bobina. Oersted, intrigado, estudió más a fondo el fenómeno. La fuerza entre el imán y el alambre aumentaba con la corriente eléctrica, y se invertía al cambiar el sentido de la corriente. También observó que la fuerza se sentía en el alambre, como si se tratara de dos imanes. Oersted publicó sus resultados en julio de 1820, y en septiembre dio una plática en París ante una audiencia que incluía a André Marie Ampère, profesor de matemáticas de la École Polytechnique. Una semana después, el propio Ampère anunciaba que las fuerzas de Oersted también actuaban entre dos alambres que acarrearán corriente eléctrica.

Volviendo a Faraday, en 1831 él buscaba demostrar que si una corriente eléctrica afecta a un imán, entonces el imán debería afectar a la corriente. Con este propósito, primero rodeó imanes con alambres, sin encontrar ningún efecto. Posteriormente utilizó dos bobinas, una conectada a una batería y otra a un medidor de corriente. Con este arreglo Faraday notó que mientras que la corriente fluía uniformemente por la primera bobina, no se registraba ninguna corriente en la segunda, la cual sólo indicaba alguna reacción al conectar o desconectar el circuito de la primera. Pronto se dio cuenta de que el mismo efecto era válido para un imán permanente y un alambre. Al mover el imán, el alambre registraba una corriente. Observaciones similares y aparentemente independientes fueron reportadas por el norteamericano Joseph Henry en 1832.

En 1846 Faraday observó que el plano de oscilación (*polarización*) de un haz de luz podía ser modificado por campos magnéticos intensos. Esto mostraba por primera vez alguna relación entre la luz y el electromagnetismo. Faraday mismo sugirió, con base en lo anterior, que la luz podría consistir en oscilaciones transversales a las líneas de fuerza eléctrica o magnética. Según esto, el origen de la luz debería consistir en algún tipo de vibración eléctrica dentro del cuerpo que emite la luz. En uno de sus últimos experimentos, Faraday expuso una flama de sodio a la acción de un campo magnético para buscar algún efecto sobre el espectro luminoso, pero no logró observar cambio alguno. Como veremos más adelante, un experimento similar dio a Zeeman el Premio Nobel años más tarde.

II.10. MAXWELL Y LA LUZ

Por estas épocas aparece en escena uno de los físicos teóricos más notables de todos los tiempos: James Clerk Maxwell. Nacido en 1831 en el seno de una familia acomodada, Maxwell recibió una educación esmerada; tuvo como maestros a los mejores matemáticos ingleses de su época. Su posición económica le permitió renunciar a los 34 años a su cargo de profesor en el King's College de Londres para dedicar mayor tiempo a la investigación. Su obra expresa, en términos matemáticos de gran elegancia, teorías sobre temas como la termodinámica y la teoría cinética de los gases. Poco antes de dejar el King's College publicó su trabajo *Teoría dinámica del campo electromagnético* y, años después, su *Tratado de electricidad y magnetismo*, en el que reduce a cuatro ecuaciones fundamentales su teoría, la cual describe precisamente la fenomenología de Faraday y otros. Las ecuaciones de Maxwell representan el conjunto de condiciones que determinan el *campo electromagnético*.

Probablemente motivado por la sugerencia de Faraday sobre la naturaleza de la luz, Maxwell consideró la propagación de un campo eléctrico que oscila senoidalmente y en forma perpendicular a un campo magnético que varía en la misma forma. Sus ecuaciones predicen que ambas ondas se propagan simultáneamente, en fase y a una velocidad, en el vacío, de 3×10^8 m/seg. Este resultado, que sólo depende de propiedades eléctricas asociadas al vacío, coincidía con el valor obtenido por Foucault para la velocidad de la luz en el vacío. Con base en esto, Maxwell propuso que la luz es una onda electromagnética.

La producción de ondas electromagnéticas a partir de cargas oscilantes fue comprobada en 1887 por el físico

alemán Heinrich Hertz al producir descargas entre esferas cargadas. Hertz obtuvo ondas con longitudes de hasta 60 cm, que reflejaba, afocaba y hacía interferir utilizando espejos metálicos. Pronto sus estudios encontraron aplicación al permitir enviar señales a distancia. Este es el origen del telégrafo inalámbrico, de la radio, la televisión, y las comunicaciones modernas en general.

II.11. RESUMEN

Hasta el siglo XVIII, los hallazgos más importantes en la búsqueda de respuestas a las interrogantes de los griegos fueron principalmente en el entendimiento de los fenómenos eléctricos y magnéticos (sección II.2) por una parte, y de la luz (sección II.3) por la otra. En cuanto a la constitución de la materia, durante más de dos mil años la alquimia permaneció dominada por brujos y charlatanes, con lo que se obscureció la labor de unos pocos que lograron sistematizar algunas reacciones químicas simples. El trabajo de John Dalton sobre los *pesos atómicos* (sección II.4), a principios del siglo XIX cambió ese panorama y sentó las bases para el establecimiento de la química como una ciencia (secciones II.5-7), con el consiguiente fortalecimiento de la teoría atómica. Otro paso fundamental ocurrido durante el siglo XIX fue la unificación de los fenómenos eléctricos y magnéticos, en una descripción que acabó de explicar la naturaleza misma de la luz (secciones II.8-10).



1 Debido a las imprecisiones de su método experimental, los pesos atómicos que derivó Dalton distaban considerablemente de los que conocemos ahora. También en sus argumentos había fallas cuando suponía, por ejemplo, que la molécula de agua contiene un átomo de hidrógeno, que, por definición, tiene un peso atómico unitario, y uno de oxígeno cuyo peso atómico es de ocho unidades, explicando así la relación uno a ocho que él observaba. En la actualidad sabemos que el agua contiene dos átomos de hidrógeno, que suman dos unidades de peso atómico, y un átomo de oxígeno cuyo peso atómico es dieciséis. Nótese que la relación uno a ocho también es válida en este caso. A pesar de estas imperfecciones, lo trascendental del hallazgo de Dalton fue su idea de *peso económico*, la cual despertó pronto el interés de otros investigadores por entender estas relaciones entre las masas de los elementos.

Inicio |

[Nota 2] 

2 En notación científica el número 10^{23} quiere decir 10 X 10 X 10... veintitrés veces, es decir, un 1 seguido de 23 ceros. Los exponentes negativos representan fracciones, por ejemplo, 10^{-3} significa 0.001. Esta convención será utilizada comúnmente en este libro.

Inicio |

[Nota 3] 

3 Un coulomb es la cantidad de carga eléctrica que circula durante un segundo por un alambre que acarrea una corriente de un amperio.

Inicio |

III. EL ELECTRÓN: THOMSON Y MILLIKAN

III.1. INTRODUCCIÓN

EN EL capítulo anterior vimos cómo, hacia fines del siglo XIX, se logró una descripción unificada de los fenómenos electromagnéticos. Si la luz resulta de la vibración de cargas, la siguiente pregunta a responder es, ¿por qué los átomos emiten luz?, ¿hay algo que vibre dentro de ellos? Como veremos a continuación, la respuesta de la última pregunta es: sí, el electrón. Las primeras evidencias de la existencia de esa partícula son muy antiguas y están asociadas con la electricidad, es decir, con los fenómenos relacionados con el movimiento, acumulación o deficiencia de electrones en la materia.

III.2. DESCARGAS A TRAVÉS DE GASES

El fenómeno eléctrico más espectacular es el de las descargas entre nubes (los *rayos*), que originalmente era asociado al estado de ánimo de algunas deidades; fue Benjamín Franklin el primero en demostrar su naturaleza eléctrica en su famoso experimento con cometas de papel. Sin embargo, los rayos resultaron demasiado esporádicos e incontrolables como para permitir su estudio sistemático.

Las descargas eléctricas a través de gases habían sido observadas en el laboratorio por Francis Hauskbee quien, en 1709, reportó la aparición de una luz *extraña* cuando electrificaba un recipiente de vidrio que contenía aire a baja presión. Otros estudiosos del fenómeno fueron William Watson, quien en 1748 notó la aparición de flamas en la zona de vacío de sus barómetros de mercurio, y Michael Faraday, quien en 1838 realizó experimentos con descargas eléctricas a través de gases enrarecidos. La conducción eléctrica a través de gases intrigó a Faraday, ya que incluso los gases que eran considerados como aislantes, cuando eran enrarecidos, propiciaban fácilmente ese tipo de descargas. ¿Sería posible la conducción eléctrica en el vacío? En tal caso, se podría estudiar directamente la naturaleza del *fluido eléctrico*.

III.3. LOS RAYOS CATÓDICOS

Antes de que se lograra dar respuesta a esta pregunta, debieron desarrollarse tres técnicas experimentales fundamentales: una bomba de vacío eficiente, un sello metal-vidrio que permitiera transmitir el potencial eléctrico a los electrodos dentro de la zona evacuada y la bobina de inducción para obtener las enormes diferencias de potencial requeridas. La necesidad de este tipo de cambios se aprecia mejor si se considera que Faraday utilizaba un tubo de vidrio tapado en ambos extremos por corchos a través de los cuales hacía pasar alambres para conectar los electrodos internos a una batería.

Las primeras bombas de vacío funcionaban con pistones ajustados a sus respectivos cilindros a través de empaques que sellaban muy mal. No fue sino hasta 1855 que Johann Heinrich Geissler inventó en Bonn, Alemania, una bomba que utilizaba columnas de mercurio como pistones, y que eliminaba así los empaques. De este modo, se lograron obtener presiones de una diezmilésima de atmósfera. Simultáneamente, el mismo Geissler desarrolló nuevos tipos de vidrio cuyos coeficientes de dilatación eran iguales a los de algunos metales, con lo que permitió pasar alambres a través de vidrio fundido sin peligro de que se formaran fracturas por las que se perdiera el vacío.

Otra mejora indispensable fue la obtención de grandes diferencias de potencial eléctrico. En este sentido, la contribución de otro alemán, Heinrich Daniel Ruhmkorff, fue importante. Como ya se mencionó, los primeros experimentos con tubos de descarga obtenían sus voltajes de baterías enormes conectadas en serie. Ruhmkorff modificó la bobina de inducción para obtener algo parecido a las bobinas de los automóviles actuales, con las que se producen descargas de miles de voltios a partir de una batería de menos de diez voltios.^{4*}

Con estos avances, en 1858 el profesor alemán Julius Plucker estudió la conducción de electricidad a través de gases a muy baja presión utilizando un tubo de vidrio en el que colocó dos placas metálicas en la parte interior de los extremos. Tal como se había observado antes para un vacío pobre, Plucker vio cómo se iluminaba todo el tubo al aplicar electricidad a las placas. Sin embargo, cuando casi todo el gas era evacuado notó que esa luz desaparecía quedando tan sólo un resplandor verdoso en el vidrio cercano a la zona de la placa conectada a la

terminal positiva de su fuente de electricidad (el ánodo); la imagen luminosa no dependía mucho de la posición de ese electrodo. Más bien, parecía como si la luminosidad en esa zona fuera producida por algún tipo de *rayos* emitidos por la placa conectada al cátodo, y que viajaban de una placa a la otra a través del vacío. Plucker también observó que la posición de la imagen luminosa podía ser modificada si se acercaba un imán a la zona del ánodo. Un alumno de Plucker, J. W. Hittorf, encontró que al interponer objetos entre el cátodo y el ánodo se producían sombras en la imagen luminosa, con lo que reforzó la idea del origen catódico para esos rayos. El nombre de *rayos catódicos* fue introducido años después por el investigador alemán Eugen Goldstein, quien además demostró que las propiedades de esos rayos no dependían del material de que estuviera hecho el cátodo.

Una de las primeras teorías sobre la naturaleza de los rayos catódicos fue propuesta por el inglés William Crookes, quien sugirió que se podía tratar de moléculas de gas, cargadas eléctricamente en el cátodo y, posteriormente, repelidas violentamente por la acción del campo eléctrico. Goldstein puso en duda esta hipótesis basado en la gran penetrabilidad que demostraban tener los rayos catódicos, lo cual había sido interpretado por el físico alemán Heinrich Hertz como una indicación de que, en lugar de partículas, los rayos catódicos serían ondas electromagnéticas tal como él mismo había demostrado que era la luz. Sin embargo, en 1895 el físico francés Jean Baptiste Perrin encontró que los rayos catódicos depositaban carga en un electroscopio, con lo que confirmó que se trataba de partículas cargadas. Fue por aquellas fechas que el inglés Joseph John Thomson se interesó en medir la velocidad de dichas partículas.

III.4. THOMSON Y EL ELECTRÓN

Nacido en 1856, Thomson se ganó en 1880 una posición en el Trinity College de la Universidad de Cambridge, Inglaterra, para trabajar en el Laboratorio Cavendish. Originalmente dedicó su tiempo a estudios matemáticos poco relevantes, hasta que en 1884 fue inesperadamente designado director del laboratorio. El Cavendish había sido construido diez años antes con fondos donados por el Duque de Devon, William Cavendish, descendiente del famoso Henry Cavendish, quien midiera por primera vez la fuerza de atracción gravitacional entre dos objetos de laboratorio. El puesto de director había sido ocupado por James Clark Maxwell y, posteriormente, por John William Strutt (Lord Rayleigh), quien se retiró en 1884.

El nuevo nombramiento implicaba una orientación más experimental para su investigación y, siguiendo los consejos de Rayleigh, Thomson se dedicó a estudiar la naturaleza de los rayos catódicos. Como ya vimos, por esas fechas el tema era atacado también en otros laboratorios. La contribución de Thomson fue publicada en tres artículos aparecidos en 1897. Aun cuando no era demasiado hábil con las manos —uno de sus asistentes decía que ellos preferían que no tocara los instrumentos—, su genio consistió en saber qué hacer luego de cada nueva observación.

Para medir la velocidad de los rayos catódicos, Thomson los hacía pasar por la combinación de un campo eléctrico y uno magnético, producidos por un par de placas conectadas a una batería y por un par de electroimanes, respectivamente (véase figura 2). Tanto la fuerza eléctrica como la magnética ejercidas sobre las supuestas partículas eran directamente proporcionales a la relación entre su carga y su masa. Sin embargo, la fuerza magnética depende, además, de la velocidad. Con este principio, Thomson ajustaba ambos campos para compensar con el segundo la deflexión ocasionada por el primero. En estas condiciones, conocer el cociente de los campos era medir la velocidad. Como información adicional, el experimento permitía medir la relación entre la carga y la masa de las partículas en cuestión.

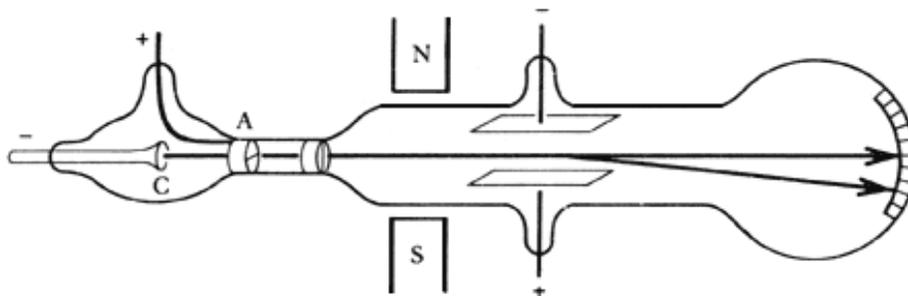


Figura 2. Tubo de rayos catódicos. Los electrones emitidos por el cátodo (C) son acelerados por el campo eléctrico hacia el ánodo (A) que deja pasar algunos por un orificio central. La trayectoria de este haz es afectada por la acción de un campo magnético y uno eléctrico. J.J. Thomson buscaba cancelar esos efectos para determinar la velocidad de los electrones.

Los resultados del trabajo de Thomson indicaban que la velocidad de los rayos con los que él trabajaba era, aproximadamente, diez veces menor que la de la luz. Sin embargo, lo que más llamó su atención es que la relación carga/masa obtenida era mil veces mayor que la esperada para iones (véase II.7). Este resultado sugería que, si los rayos catódicos tenían algún origen atómico, se trataba de partículas (los electrones) mil veces más ligeras que el átomo de hidrógeno. Estas partículas resultaron ser los electrones.^{5*}

Estrictamente, el que la masa del electrón fuese mil veces menor que la del átomo que lo contenía era sólo una de las posibles interpretaciones, que dependía de suponer que la carga del electrón era igual a la unidad electrolítica de carga. Fue entonces necesario determinar experimentalmente, y en forma independiente, la carga y/o la masa del electrón.

III.5. CARGA Y MASA DEL ELECTRÓN

Los primeros experimentos tendientes a determinar la carga del electrón fueron motivados por el descubrimiento de un alumno de Thomson, Charles Thomson Rees Wilson, en el sentido de que los iones podían servir como semillas de condensación de gotas en las nubes. La fascinación de Wilson por los fenómenos ópticos producidos por la luz del sol al pasar por las nubes, lo motivaron a estudiar en el laboratorio la producción de atmósferas gaseosas. Antes que Wilson, Coulier y Aitken habían descubierto un método para producir nubes al expandir una cámara que contuviera una atmósfera húmeda. Siguiendo este método, en 1894 Wilson encontró que, en ausencia de polvo, se podía lograr una atmósfera supersaturada de humedad libre de gotas. La producción de gotas sólo se producía si se rebasaba cierto límite de saturación, o bien si se provocaba algún tipo de ionización de las moléculas del medio. Aparentemente, cada ion atrapaba a las moléculas libres para formar gotas. En 1895, cuando Roentgen descubrió los rayos X, J. J. Thomson propuso a Wilson estudiar el efecto de esos rayos sobre medios supersaturados con su cámara de expansión, y se encontró que esos rayos eran altamente ionizantes. Poco tiempo después, con el descubrimiento de la radiactividad, vio que ésta era capaz de producir gotas en la cámara. La cámara de Wilson fue esencial en el descubrimiento de algunas de las partículas elementales, motivo por el cual recibió el Premio Nobel de física en 1927.

Thomson y otros de sus colegas, J. S. E. Townsend y H. A. Wilson, cada uno por su cuenta, diseñaron métodos para medir la masa de las gotitas que se formaban alrededor de cada ion. Townsend, por ejemplo, separaba el líquido de las gotitas que se formaban alrededor de iones, midiendo la carga total. La masa de cada gotita era deducida de la velocidad de caída bajo la acción conjunta de la gravedad y la viscosidad del aire. La masa total del líquido dividido por la masa de cada gotita determinaba el número de gotitas acumuladas, y la carga total dividida por el número de gotitas daba la carga de cada gotita. En el supuesto de que cada gotita creció alrededor de un ion, la carga de cada gotita sería la carga del ion. Y ya que este tipo de ionización se puede asociar con la pérdida de un electrón por parte de una molécula, la carga del ion es de la misma magnitud que la del electrón perdido, puesto que la molécula no ionizada es eléctricamente neutra. El método de Thomson utilizaba medidas de conductividad eléctrica y térmica de la nube gaseosa para determinar la masa líquida, mientras que H. A. Wilson mejoró el método de Townsend al incluir un campo eléctrico variable, paralelo al gravitacional, que permitía una medida más directa de la carga de cada gotita. Sus resultados, publicados independientemente entre 1897 y 1903, indicaban que la carga iónica era del orden de 10^{-19} coulombs.

Las medidas del grupo de Thomson, a pesar de ser bastante cercanas al valor aceptado actualmente (1.6021×10^{-19} coulomb), fueron vistas con desconfianza y abrieron el camino para medidas más precisas. En 1906, el físico norteamericano Robert Andrews Millikan atacó el problema repitiendo las medidas de H. A. Wilson con la ayuda de Harvey Fletcher, entonces estudiante de doctorado. Pronto se dieron cuenta que la masa de las gotitas variaba rápidamente debido a la evaporación. Para minimizar este efecto empezaron a utilizar gotitas de aceite. Otro cambio importante fue que, en lugar de observar el comportamiento global, Millikan se concentró en el comportamiento de gotas individuales al ser expuestas al efecto combinado de la gravedad y el campo eléctrico a

la manera de Wilson. Los resultados mostraron que, si bien la carga inicial de cada gotita observada era enorme comparada con lo reportado por Thomson y su grupo, ésta fluctuaba de una a otra (para la misma gotita) en pasos discretos. Pronto se dieron cuenta de que estas diferencias eran múltiplos pequeños de una misma carga, aparentemente debidas a la pérdida o ganancia de algunos electrones por interacción con el medio en su trayecto. Luego de un simple análisis estadístico, esto los llevó a deducir 1.592×10^{-19} coulombs como la carga del electrón, que se denota comúnmente con la letra e . Millikan recibió el Premio Nobel en 1923 por este trabajo.

Una vez determinada la carga del electrón, su masa pudo ser deducida utilizando la relación carga/masa medida por Thomson, que dio como resultado 9×10^{-31} kg. El propio Millikan dedujo el número de Avogadro, simplemente dividiendo el faraday por e , que dio como resultado: 6.06×10^{23} moléculas por gramo-mol, y la masa del ion de hidrógeno a partir de la relación carga/masa deducida en electrólisis, que dio 1.66×10^{-27} kg. Es decir, la masa del electrón es casi 1/2000 de la del átomo que lo contiene. Un cálculo aritmético simple también permitió a Thomson deducir que las dimensiones de un átomo son del orden de 10^{-10} metros.

Para terminar, vale la pena hacer notar que, si bien Zeeman y otros realizaron simultáneamente investigaciones cuyos resultados muestran inequívocamente la existencia del electrón, el crédito de este descubrimiento se otorga casi enteramente a Thomson. Esto puede deberse a que, desde su publicación original, Thomson hizo hincapié en el carácter *elemental* del electrón, al considerarlo una fracción del átomo.

III.6. RESUMEN

Los estudios enfocados a entender la naturaleza del *fluido eléctrico* fueron motivados inicialmente por las descargas a través de gases (sección III.2). En tal labor se requirió el desarrollo de técnicas de vacío y de otras que dieron como resultado el *tubo de rayos catódicos* (sección III.3). El descubrimiento de que estos rayos están constituidos por *partículas* cargadas fue la labor de J. J. Thomson (sección III.4) quien, antes de deducir la naturaleza elemental, necesitó demostrar que su masa era mucho menor que la de los átomos que las contenían (sección III.5).



[Nota 4] 

4 Las invenciones de Geissler y Ruhmkorff fueron de enorme importancia en el desarrollo del estudio de la materia. Baste mencionar que Hertz descubrió sus ondas, Roentgen los rayos X, Zeeman su efecto y Thomson el electrón, por mencionar algunos casos de importancia, utilizando tubos y bombas de vacío de Geissler y bobinas de Ruhmkorff. Sin embargo, ni Geissler ni Ruhmkorff obtuvieron grado académico alguno y, no obstante la magnitud de sus contribuciones, son prácticamente desconocidos.

Inicio |

5 Como se verá con más detalle al revisar el descubrimiento del fotón, la idea de que los átomos contuvieran partículas cargadas que, al oscilar, produjeran las ondas electromagnéticas que constituyen la luz, había sido sugerida poco tiempo antes por Zeeman y Lorentz como explicación al ensanchamiento de las líneas espectrales del sodio. La interpretación de Lorentz a los resultados de Zeeman sugería que la relación carga/masa de esas partículas debería ser mil veces mayor que la del átomo de hidrógeno. Al anunciar sus resultados en 1897, Thomson se refirió a esta conclusión de Lorentz para apoyar su interpretación sobre la existencia de electrones dentro del átomo.

Inicio |

IV. EL FOTÓN: PLANCK, EINSTEIN Y COMPTON

IV. 1. INTRODUCCIÓN

VOLVAMOS ahora al viejo problema de la naturaleza de la luz. En el capítulo II vimos cómo, hasta el siglo XVIII, la luz era vista por unos como un haz de partículas y por otros como un fenómeno ondulatorio y cómo, durante el siglo pasado, la interpretación ondulatoria de la luz dominó, quedando sólo un par de fenómenos sin explicar con base en ese modelo. La solución a los problemas que revisaremos a continuación fue tan desconcertante como reveladora: la luz está compuesta por *paquetes* de onda. Estas ondas-partícula se denominan *fonones*, y son las mensajeras del campo electromagnético. No poseen masa y su velocidad impone un límite al que ninguna partícula material puede viajar. En este capítulo se describe la evolución de las ideas y los experimentos que llevaron a tan original conclusión.

IV.2. EL ORIGEN DE LA LUZ

El éxito de la teoría de Maxwell reforzó la idea de que la luz, tal como lo sospechó Faraday, es producida por vibraciones eléctricas dentro del cuerpo emisor. En 1896 Pieter Zeeman, de la Universidad de Leyden, utilizó una finísima malla de difracción recién desarrollada por Rowland en la Universidad Johns Hopkins para repetir el experimento propuesto por Faraday sobre posibles efectos ante la acción de un campo magnético en el *espectro*

de emisión del sodio.^{6*}  Zeeman observó un ensanchamiento en las líneas espectrales tan pronto encendía su electroimán. Tal ensanchamiento, indicó, es proporcional a la intensidad del campo magnético. Su profesor y colega, Hendrik Antoon Lorentz, propuso una explicación teórica para tal efecto. Según Lorentz, la radiación es emitida por cargas que vibran dentro de los átomos del cuerpo luminoso. Esta oscilación estaría separada en dos componentes, una paralela y una perpendicular al campo magnético externo. Ya que sólo la oscilación perpendicular sería sensible al campo, la frecuencia asociada a este movimiento se vería ligeramente afectada. Lorentz concluyó que el efecto debería implicar, no un ensanchamiento, sino la separación de cada línea espectral en tres componentes.

La precisión del experimento de Zeeman no era lo suficientemente fina como para comprobar una descomposición en tres líneas, por lo que tomó el ensanchamiento observado como una medida de la separación entre las líneas extremas, de acuerdo con la predicción de Lorentz. Para explicar la magnitud del efecto fue necesario suponer que la relación entre la carga y la masa de la partícula oscilante debería ser del orden de 10^{11} coul/kg. Ésta es muy parecida a la obtenida posteriormente por J. J. Thomson, quien usó los resultados de Zeeman como evidencia para apoyar sus argumentos sobre la existencia del electrón como un ente independiente dentro del átomo. Además, según el modelo de Lorentz, la polarización de la luz ^{7*}  asociada a cada línea espectral permitiría inferir el signo de la carga eléctrica del cuerpo oscilante. Zeeman efectuó estas medidas y comprobó que, en efecto, se trataba de cargas negativas.

Motivado por el éxito obtenido al explicar las observaciones de Zeeman, Lorentz extendió la teoría de Maxwell al caso de la emisión y absorción de luz por electrones oscilantes en la materia. Según este modelo, cuando la luz (ondas electromagnéticas) penetra la materia, los campos eléctricos oscilantes inducen oscilaciones en los electrones del medio. La oscilación de estas cargas, a su vez, produce ondas electromagnéticas secundarias en todas direcciones. Tal descripción explica elegantemente el principio de Huygens, la dispersión, reflexión y otros fenómenos ondulatorios de la luz antes descritos.

IV.3. LO QUE MAXWELL NO EXPLICÓ

Hacia fines del siglo XIX era claro que la absorción y emisión de luz por los cuerpos se debía a la interacción de la radiación electromagnética con los electrones del medio, al hacerlos vibrar. Ya que la teoría de Maxwell se refiere a la radiación electromagnética en general, y no sólo a la luz visible, era importante generalizar estas ideas para entender los fenómenos de absorción y emisión de radiación térmica por un medio.^{8*}  Por simplicidad, los teóricos de la época consideraban el caso más simple: un cuerpo negro. Según el modelo ideal, un cuerpo negro es aquel que es capaz de absorber radiación de cualquier frecuencia o color.

Se puede simular bien un cuerpo negro, por ejemplo, con un orificio en una esfera. La radiación que incide en tal orificio se refleja múltiples veces en el interior de la esfera, habiendo en cada reflexión alguna pérdida por absorción. Si las dimensiones del hoyo son pequeñas comparadas con la superficie de la esfera, la probabilidad de que la radiación reflejada internamente escape en su totalidad por el orificio antes de ser absorbida es, idealmente, cero. La radiación que emerge por el orificio refleja el espectro de emisión del propio cuerpo, que es sólo función de su temperatura. La intensidad de esta radiación puede ser medida como función de la frecuencia, o sea el *espectro del cuerpo negro*. Mediciones de este estilo ya habían sido efectuadas por varios laboratorios en el siglo XIX. En principio, debería ser fácil entender la relación observada entre la frecuencia y la intensidad.

El cuerpo negro está compuesto de átomos que contienen electrones. Al calentar el cuerpo, los electrones vibran y emiten radiación electromagnética. Ya que el cuerpo negro absorbe todas las frecuencias con igual probabilidad, y la emisión es sólo el proceso inverso, uno debería esperar que todas las frecuencias fueran emitidas con igual probabilidad. Según este modelo, la energía de una vibración aumenta en una relación proporcional al cuadrado de la frecuencia de la vibración, por lo que una igual probabilidad de emisión implica una energía que aumenta geoméricamente con la frecuencia. Los resultados experimentales, sin embargo, indicaban que la intensidad disminuía a partir de cierta frecuencia máxima, la cual es función de la temperatura del cuerpo.

Existía, además, otro fenómeno asociado a la luz que parecía inexplicable con base en la teoría de Maxwell. Se trata de un efecto conocido como *fotoeléctrico* (véase figura 3). En 1887, Heinrich Rudolf Hertz descubrió que podía inducir la descarga eléctrica entre dos esferas cargadas al iluminar con luz ultravioleta la zona de descarga. Poco después Wilhelm Hallwachs, investigando este efecto, notó también que la luz ultravioleta era capaz de descargar placas de cinc cargadas negativamente. Luego se dio cuenta de que este efecto persistía en otros metales, incluso si disminuía la intensidad de la luz. Sin embargo encontró que el efecto desaparecía si, en lugar de ultravioleta, utilizaba luz roja o infrarroja aun cuando la intensidad fuera aumentada enormemente. Años después, al descubrirse el electrón, quedó establecido que la descarga de las placas se debía a la pérdida de electrones por acción del campo electromagnético de la luz incidente.

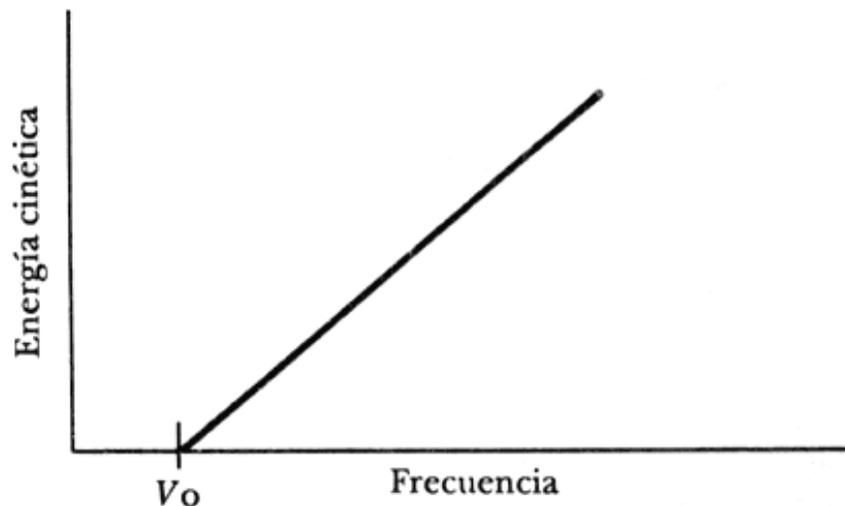


Figura 3. Efecto fotoeléctrico. Hallwachs descubrió que la luz es capaz de arrancar electrones de una superficie siempre que su frecuencia supere un cierto umbral (V_0) relacionado con la energía que liga a los electrones.

Según la teoría electromagnética de Maxwell, la energía asociada a la luz incidente dependía tanto de su frecuencia como de su intensidad. De acuerdo con esto, si bien la luz roja tiene menor frecuencia, al aumentar la intensidad debería vencerse el potencial que ata a los electrones a la superficie. Inversamente, al disminuir la intensidad de la luz ultravioleta, deberían disminuir, proporcionalmente, los *fotoelectrones*. Ambas predicciones

contradecían las evidencias experimentales de Hertz y Hallwachs.

En resumen, la teoría electromagnética de Maxwell, que había explicado con gran éxito la fenomenología de la luz, parecía tropezar ahora con problemas al aplicarse a los fenómenos asociados a la radiación calorífica y al efecto fotoeléctrico. Principia el siglo XX y toca su turno a Max Planck.

IV. 4. EL CUANTO DE PLANCK

Planck nació en Kiel, Alemania, en 1858, en el seno de una familia de abogados. En 1867 los Planck se fueron a vivir a Munich, donde Max inició sus estudios en física. De ahí fue a Berlín, donde tuvo como profesores a Kirchhoff y a Helmholtz. En 1879, de vuelta a Munich, recibió el doctorado con una tesis sobre termodinámica. En Kiel consiguió su primer puesto como profesor, en el que permaneció hasta 1889 cuando, a la muerte de Kirchhoff, Planck heredó su plaza en Berlín. Hacia 1897 comenzó a trabajar en el problema de la emisividad del cuerpo negro. Convencido de que la radiación del cuerpo negro no depende de la naturaleza de las paredes sino, tan sólo, de su temperatura, Planck atacó el problema imaginando que la absorción y emisión de radiación se realizaban a través de osciladores.

Años antes, en 1893, el alemán Wilhelm Wien (Premio Nobel de 1911) había logrado combinar la formulación de Maxwell con las leyes de la termodinámica para tratar de explicar la emisividad del cuerpo negro pero, como sabemos, sus predicciones no coincidieron con el experimento. Impresionado por la elegancia del trabajo de Wien, Planck intentó modificarlo y generalizarlo para ajustar los datos experimentales, usando como truco de cálculo una fragmentación de la energía transferida por los osciladores en *paquetes*, cuyo tamaño pensó reducir para recuperar la forma continua del flujo de energía entre los osciladores. Sin embargo, encontró que sólo se ajustaban los observables experimentales si el tamaño de sus paquetes permanecía finito. Si bien este resultado permitió resolver un problema, el de la radiación del cuerpo negro, la verdadera magnitud del significado de los paquetes, los *cuantos* de Planck, pasó desapercibida hasta que un modesto empleado de la oficina de patentes en Berna, como se verá en seguida, utilizó el concepto para explicar el efecto fotoeléctrico. Planck recibió el Premio Nobel en 1918 por el trabajo recién descrito.

IV.5. EINSTEIN Y EL FOTÓN

Albert Einstein nació en Ulm, Alemania, el 14 de marzo de 1879. Seis semanas después, su familia se trasladó a Munich, donde Albert recibió la educación primaria; posteriormente estudió en Aarau, Suiza, e ingresó en 1896 al Politécnico de Zurich, para prepararse como maestro de física y matemáticas. En 1901 recibió su diploma y se nacionalizó suizo. Al no encontrar trabajo como maestro, tomó un puesto como asistente técnico en la oficina de patentes de Berna. En 1905 obtuvo su doctorado y publicó tres trabajos que pasarían a ser considerados entre los más importantes en la física de nuestro siglo.

En marzo de 1905, Einstein publicó el artículo que nos concierne aquí, y que fue considerado por el Comité Nobel como el principal motivo para otorgarle el premio en 1921. En él explica sus ideas sobre la generación y la transformación de la luz, y aplica su modelo a la descripción del efecto fotoeléctrico. La idea de Einstein utiliza el resultado de Planck sobre la aparente emisión de energía de un cuerpo negro en forma de paquetes; sin embargo, Einstein propone que la *cuantización* es una propiedad intrínseca de la luz y no de los osciladores como había pensado Planck. En este nuevo modelo, la luz es una onda electromagnética, tal como lo propuso Maxwell, sólo que en lugar de tratarse de una onda continua se encuentra modulada en paquetes de energía. Esto implica una dualidad de características pues, a pesar de ser una onda, al estar localizada en el espacio y poseer una energía definida, presenta características similares a las de las partículas.

IV.6. PARTÍCULAS Y ONDAS

El proponer que, tal como la materia, la energía también se encuentra atomizada, fue una idea genial que trajo consigo el desarrollo de la mecánica cuántica. Las predicciones de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico fueron verificadas con precisión por Millikan en 1914-1916. Sin embargo, había una diferencia entre *cuantos* de energía y las partículas, pues estas últimas también se caracterizan por un ímpetu lineal. La posibilidad de asignar ímpetu a los cuantos no puede ser asociada a un solo autor o a un solo trabajo, si bien hacia 1916 el propio Einstein ya se refería a los cuantos en este sentido. Tuvieron que pasar varios años antes que esta hipótesis pudiera ser comprobada. Los primeros experimentos fueron realizados por el norteamericano Arthur Holly Compton (Premio Nobel 1927) y consistían en estudiar la dispersión de rayos X por electrones. Las observaciones de Compton

confirmaron que al chocar un cuanto de luz con un electrón, éstos dividen su energía y su ímpetu de acuerdo con la cinemática que se esperaría del choque entre dos partículas. En octubre de 1926, Gibert Newton Lewis, en un artículo en la revista inglesa *Nature*, se refirió por primera vez a los cuantos de energía como *fotones*, lo que implicaba la aceptación del cuanto de luz en el campo de las partículas elementales.

Paradójicamente, al tiempo que se consolidaba el concepto del fotón como una partícula, el concepto de materia, y por tanto el de partícula, perdió el sentido determinista que hasta entonces se le asociaba. En 1924 el príncipe francés Louis Victor de Broglie propuso una teoría sobre el electrón, que posteriormente fue generalizada para el resto de las partículas, en la cual se consideraba al electrón como un paquete de onda, similar al fotón, pero con masa. La teoría de De Broglie, que le mereció el Premio Nobel en 1929, fue comprobada con éxito tres años después por Clinton Davisson y Lester Germer al observar la difracción de electrones a través de un cristal. Desde entonces, onda y partícula, energía y materia, se confunden, y el paso de una a la otra se rige por las leyes de la relatividad y la mecánica cuántica.

IV.7. RESUMEN

Una vez establecida la naturaleza ondulatoria de la luz, el descubrimiento del electrón permitió postular que la luz se producía como consecuencia de oscilaciones electrónicas en el átomo (sección IV.2). Sin embargo, el resultado de ciertos experimentos tendientes a establecer la relación entre luz y radiación térmica no pudo ser explicado con la célebre teoría de Maxwell (sección IV.3). La *cuantización* de la energía fue propuesta a principios de siglo XX por Planck como posible solución a uno de estos problemas (sección IV.4). Einstein utilizó esta idea para explicar otros efectos (sección IV.5). La división entre ondas y partículas desaparece en la década de 1920 cuando Compton demuestra que los fotones no sólo son absorbidos, sino que pueden ser dispersados como *partículas*, mientras que De Broglie descubre que las partículas *materiales* también se comportan como ondas (sección IV.6).



6 Los átomos de un material que ha sido calentado lo suficiente absorben energía, se *excitan*. Al desexcitarse, por ser sistemas cuánticos, sólo pueden hacerlo emitiendo radiación (luz) de determinadas energías (colores), llamadas *líneas espectrales*; la mezcla de ellas da como resultado luz de un color que es característico de cada material. La luz de sodio, por ejemplo, es amarilla. La descomposición de esta mezcla, en los colores que la componen, se denomina *espectro*. El *arco iris* es el ejemplo más común de un espectro, el solar. En este caso, son las gotas de lluvia las que se encargan de descomponer la luz blanca del Sol, que es la mezcla de las radiaciones emitidas por los materiales que hay en la superficie solar, en sus componentes básicos.

Inicio |

[Nota 7] 

7 La luz es una onda producida por la vibración de una partícula cargada, en este caso el electrón. En una oscilación simple, el movimiento ocurre a lo largo de un plano, denominado de *polarización*. La luz *polarizada* es aquella con un plano, o dirección, de polarización definido.

Inicio |

[Nota 8] 

8 Si bien sabemos que un cuerpo puede ser calentado hasta emitir radiación visible en el rojo, el amarillo, el azul, etc., un objeto a cualquier temperatura se mantiene en equilibrio térmico con el medio a través de la absorción y emisión de radiación electromagnética.

Inicio

V. EL PROTÓN: RUTHERFORD

V. 1. INTRODUCCIÓN

CON EL descubrimiento del electrón se reveló que el átomo es, paradójicamente, divisible. Quedaba entonces por explicar la estructura del átomo. Con el descubrimiento del núcleo atómico se inició una nueva etapa en la búsqueda de lo elemental: las partículas *nucleares*. La primera de ellas, el *protón*, es el núcleo del átomo de hidrógeno y, combinado con neutrones, es constituyente básico de los núcleos del resto de los elementos. Su nombre se deriva de la voz griega para *principal* o *primero* ($\pi\rho\omega\tau\omicron\zeta$)

Comparado con el electrón, el protón posee una carga de idéntica magnitud pero de signo opuesto y una masa casi 2 000 veces superior. Esta relación carga/masa refleja su poca movilidad relativa y, por lo tanto, el que los fenómenos asociados al transporte de carga hayan podido ser entendidos tan sólo tomando en cuenta al electrón. Por otra parte, como se vio en el capítulo II, desde principios del siglo XX y basado en las observaciones de Dalton, Prout intuyó el carácter elemental del protón al proponer que todos los elementos estarían formados de números enteros de átomos de hidrógeno.

V.2. RAYOS X Y RADIOACTIVIDAD

Durante los últimos años del siglo pasado, el mundo de la física se vio conmovido por una serie de descubrimientos revolucionarios que culminaron, como ya vimos, con el del electrón por Thomson en 1897. Primero fueron los rayos X, por Wilhelm Konrad Röntgen en 1895. En Wurzburg, Alemania, Röntgen encontró que los rayos catódicos, al incidir sobre el vidrio del aparato que los generaba, producían radiaciones muy penetrantes capaces de velar placas fotográficas cubiertas y de producir fluorescencia en algunos materiales, aun cuando ante éstos se interponían obstáculos delgados, como hojas de papel. Este descubrimiento sirvió de motivación para ciertos estudios de Henri Becquerel, en París, el cual estaba muy interesado en entender el fenómeno de la fluorescencia.

En febrero de 1896, Antoine Henri Becquerel, profesor de física en el Politécnico de París, y miembro de una familia de tradición académica, exploraba la posibilidad de que los rayos del Sol pudieran inducir la emisión de los rayos de Röntgen en materiales fluorescentes. El método de Becquerel era simple: colocaba trozos de material fluorescente sobre placas fotográficas cubiertas, exponiendo estos arreglos a la luz solar. Entre los materiales y las placas, además, interponía trozos de cobre que obstaculizaran parcialmente la posible producción de rayos X. Si la luz solar inducía la emisión de rayos X en los materiales, estas radiaciones velarían las placas fotográficas a través de la cubierta protectora, dejando grabada la silueta de los trozos de cobre.

Por una casualidad afortunada, entre los materiales fluorescentes utilizados por Becquerel había una sal de uranio. Los primeros experimentos con ese material dieron resultados interesantes pues, luego de un día de exposición, encontró que las placas fotográficas mostraban, tenuemente, las siluetas del cobre. Sin embargo, el clima parisino ese febrero no favorecía mucho sus experimentos, pues estuvo nublado el resto del mes, por lo que decidió guardar sus atados de placas con muestras en un cajón, esperando días más soleados.

El 3 de marzo, cuando el tiempo mejoraba, reinició sus experimentos. Al revelar las placas fotográficas de los días nublados, que habían estado en su cajón la mayor parte del tiempo, se sorprendió al encontrar que éstas se encontraban veladas intensamente con siluetas bien marcadas. A partir de ese momento, y todavía pensando que el fenómeno se debía a algún tipo de fluorescencia inducida por la luz solar recibida anteriormente, decidió repetir sus experimentos pero ahora manteniendo las sales en la obscuridad. Dos meses después, las sales seguían emitiendo radiación con igual intensidad. Además notó que esas radiaciones eran producidas por cualquier sal de uranio, fosforescente o no, con luz o sin ella, por lo que concluyó que el fenómeno estaba directamente relacionado con la presencia de uranio en los compuestos. Becquerel había descubierto la radiactividad.

Poco tiempo después, también en París, la polaca Marie Sklodowska-Curie descubrió que el torio tenía propiedades similares a las del uranio y, junto con su marido, el francés Pierre Curie, descubrió el elemento radio que es millones de veces más activo que el uranio. Por estos descubrimientos, Becquerel, Pierre y Marie Curie recibieron el Premio Nobel en 1903. No obstante, quedaba en pie la pregunta: ¿Qué es la radiactividad?

V.3 RUTHERFORD Y LOS RAYOS α

Rutherford nació en Brighwater, Nueva Zelanda, en 1871 en el seno de una familia de emigrados ingleses. Graduado en física, dedicó sus primeras investigaciones al electromagnetismo. Por sus resultados, obtuvo una beca que le permitió trasladarse a Inglaterra a trabajar con J. J. Thomson en el Laboratorio Cavendish, al que llegó en 1895. En Cambridge, Rutherford siguió la línea de investigación local estudiando los efectos de los rayos X y de las radiaciones de Becquerel sobre la conducción eléctrica de gases enrarecidos. En 1898 demostró que los rayos X y la radiactividad tienen efectos similares sobre los gases y encontró que hay al menos dos tipos diferentes de radiactividad que él bautizó como α y β . Los rayos β resultaban ser casi tan penetrantes como los rayos X, en contraste con los rayos α que eran detenidos con una hoja muy delgada de aluminio. Posteriormente se descubrió otro tipo de radiación, mucho más penetrante que las anteriores, que se denominó rayos γ (véase figura 4). Estos rayos, capaces de penetrar placas gruesas de metal, son radiación electromagnética de más alta energía que los rayos X.

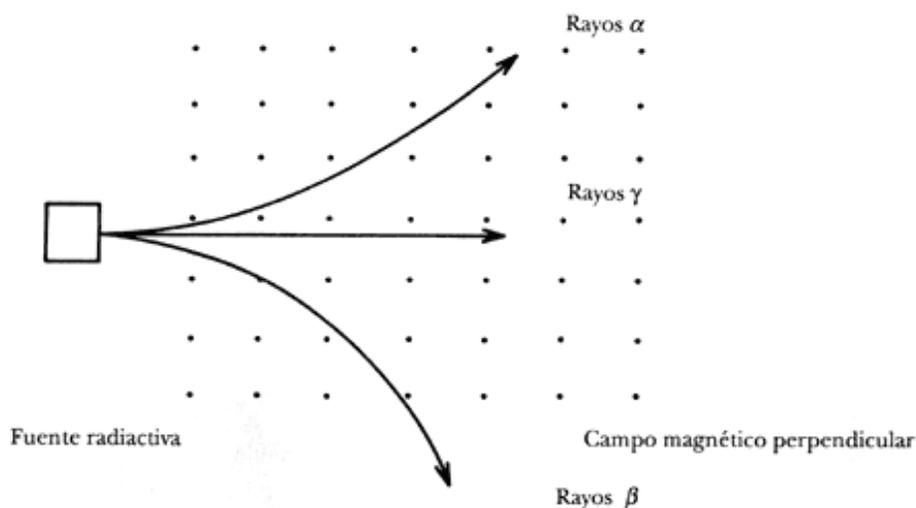


Figura 4. Tipos de radiación nuclear. Rutherford clasificó a los productos del decaimiento de fuentes radioactivas naturales en rayos α , β y γ . Si éstas poseen carga, su signo puede ser inferido con la ayuda de un campo magnético perpendicular (matriz de puntos).

En 1899 el propio Becquerel descubrió que los rayos β podían ser deflectados por un campo magnético y lo hacían en la misma dirección de los electrones de Thomson. Convencido de que se trataba de las mismas partículas, usó la metodología de éste y encontró que la relación carga/masa de los rayos β era, en efecto, muy parecida a la de los electrones.

Rutherford, quien en septiembre de 1898 había aceptado un cargo en la Universidad de McGill en Montreal, recién llegado a Canadá se dedicó a estudiar la naturaleza de los rayos α . Pronto encontró que, si bien más difíciles de deflectar, éstos también eran sensibles a los campos magnéticos y eléctricos. Suponiendo entonces que se trataba de partículas cargadas, a partir de 1903, Rutherford estudió sus deflecciones para determinar la relación carga/masa de los rayos α . Finalmente, en 1906, sugirió que los rayos α no eran otra cosa que iones de helio. Esta hipótesis era apoyada por la aparente emanación de helio en materiales radiactivos, descubierta por William Ramsay (Premio Nobel de química 1904) en 1895 en el uranio y por el mismo Ramsay y Frederick Soddy (Premio Nobel de Química, 1921) en sales de radio hacia 1903. En 1908 Rutherford recibió el Premio Nobel de Química por este trabajo.

V.4. EL NÚCLEO

En 1906 la Universidad de Manchester ofreció a Rutherford un puesto de investigador que le permitió volver al Viejo Mundo. Por aquellas épocas Manchester y Cambridge eran los centros de la ciencia inglesa. En 1907

Rutherford aceptó como ayudantes al joven alemán Hans Wilhelm Geiger (25 años) y al todavía más joven neozelandés Ernest Marsden (18 años). Geiger, a sugerencia de Rutherford, empezó de inmediato a estudiar la dispersión de rayos α por hojas delgadas de oro. Una muestra de radio se ponía en un contenedor con un pequeño orificio por el que escapaba un haz delgado de rayos α que se hacía incidir sobre una placa de sulfato de zinc, la cual tiene la propiedad de emitir luz cuando es alcanzada por un α . Al interponer a este arreglo una hoja delgada de oro podían estudiarse las desviaciones que inducían los átomos de oro en los α incidentes. En 1908, Geiger reportó que el número de α dispersados por el oro decrecía rápidamente con el ángulo de observación, medido respecto a la dirección incidente, y no encontró evidencia de α dispersados a ángulos mayores de 30 grados. Estos resultados no eran sorprendentes pues, por aquel entonces, el propio Thomson pensaba que el átomo era una distribución poco densa de masa con carga positiva en la que flotaban los electrones como *pasas en un pastel*. Materia tan dispersa, se pensaba, sería incapaz de perturbar mayormente la trayectoria de las partículas incidentes. En todo caso, para que Marsden adquiriera experiencia en investigación, Rutherford le encargó que intentara encontrar rayos α a ángulos aun más grandes que los investigados por Geiger. La sorpresa ocurrió cuando, dos días después, Geiger le comunicó que Marsden había observado α dispersados hacia atrás. Según el propio Rutherford, "... era como disparar balas sobre un hoja de papel y ver que rebotan".

Geiger y Marsden se dedicaron a medir entonces la distribución de α con más cuidado y, en 1909, publicaron sus resultados. La deflexión seguía una función bien definida que decrecía pronunciadamente con el ángulo, pero que indicaba que la dispersión de α a ángulos mayores de 90 grados era muy superior a la que podría atribuirse a una fluctuación estadística. En 1911, Rutherford dio una explicación a los resultados de Geiger y Marsden. Según éste, la dispersión a grandes ángulos indicaba que, contrario a lo pensado hasta entonces, la mayor parte de la masa del átomo, y toda su carga positiva, se encontraba concentrada en una región muy reducida en el centro del átomo: el *núcleo*.

V.5. EL NÚCLEO MÁS SIMPLE

El descubrimiento del núcleo puede considerarse como un descubrimiento indirecto del protón, puesto que este último no es más que el núcleo del átomo de hidrógeno. Sin embargo, hay una diferencia, sutil pero importante, entre el núcleo del hidrógeno y el concepto de protón como partícula elemental y constituyente fundamental de la materia. Como veremos a continuación, no fue sino hasta 1919 que el propio Rutherford demostró, a través de la desintegración del núcleo de nitrógeno, que éste estaba constituido por partículas, a las que posteriormente bautizó como protones y que podían ser identificadas con los núcleos del hidrógeno.

Una vez descubierto el núcleo, la pregunta inmediata fue ¿de qué está compuesto? Ya desde los tiempos de Dalton y Faraday un siglo atrás, los pesos atómicos se referían al del hidrógeno. Dalton hizo notar que las masas de los elementos eran muy cercanas a múltiplos enteros de la del hidrógeno, lo que indujo al médico inglés William Prout a proponer, en 1815, que todos los elementos químicos estaban constituidos por números enteros de átomos de hidrógeno. Una vez descubierto el electrón y el núcleo, era razonable suponer que los núcleos de los elementos estuvieran hechos de números variables de protones. Sin embargo, los núcleos no podían estar hechos de simples conjuntos de protones ya que su carga era típicamente la mitad del número de protones que se necesitaría para explicar su masa, lo que contradecía la evidencia sobre la neutralidad eléctrica de los átomos.

La constitución del núcleo sólo podía ser revelada si se pudiera romper uno y analizar los pedazos. En 1915, Marsden, antes de volver a Nueva Zelanda como profesor, hizo notar a Rutherford que al bombardear aire con partículas α aparecían algunas partículas que tenían un alcance extraordinariamente largo. En 1917, Rutherford decidió estudiar el problema con la hipótesis de que se trataba de átomos de alguno de los gases presentes en el aire. En junio de 1919, publicó un trabajo en el que anunciaba que estas radiaciones no eran otra cosa que núcleos de hidrógeno arrancados al nitrógeno del aire por las α . En su artículo dice que, habiendo observado por primera vez la desintegración de un núcleo, la aparición de núcleos de hidrógeno demostraba que estos últimos eran parte constitutiva del núcleo atómico.

Como ya se mencionó, Ernest Rutherford recibió el Premio Nobel en química, en 1908, por haber descubierto que las partículas α no son otra cosa que iones del helio. Sin embargo, Rutherford es más conocido por haber descubierto el núcleo.

V.6. RESUMEN

El descubrimiento de los rayos X y de la radiactividad (sección V.2) motivó a varios científicos a investigar su naturaleza. Uno de ellos, Ernest Rutherford, encontró que los rayos α eran átomos de helio (sección V.3). Posteriormente, él mismo utilizó esas partículas para estudiar la estructura de la materia, descubriendo el núcleo atómico en 1911 (sección V.4). Tal hallazgo, sin embargo, no establecía necesariamente al núcleo del hidrógeno como componente fundamental de la materia, por lo que tuvo que probarse su presencia en otros núcleos (sección V.5).



VI. EL NEUTRÓN: CHANDWICK

VI.1. INTRODUCCIÓN

El descubrimiento del protón puso de manifiesto que, si bien éste debía ser uno de los constituyentes fundamentales del núcleo, no era el único. Revisemos ahora los hechos que llevaron al hallazgo de la segunda partícula nuclear, el *neutrón*. Como su nombre lo indica, se trata de un objeto eléctricamente neutro, cuya masa resulta ser parecida a la del protón, además de que es relativamente escaso en la naturaleza pues, en libertad, decae rápidamente emitiendo un protón, un electrón y un (anti) neutrino. Neutrones y protones se mantienen unidos formando núcleos atómicos, debido a una fuerza de atracción cuya magnitud es tal que se le denomina *interacción fuerte*. Bajo esta influencia, el neutrón es capaz de mantenerse dentro del núcleo como un ente estable.

VI.2. LOS ISÓTOPOS

A la similitud entre las masas del protón y del neutrón se debe que el número atómico de los elementos resulte cercano a un múltiplo entero de la masa del átomo de hidrógeno, como se percató Prout el siglo pasado. Sin embargo, químicamente todo elemento se caracteriza sólo por el número de sus electrones, que es el mismo que el de los protones en su núcleo. Es decir que desde el punto de vista de sus propiedades químicas el número de neutrones que posee el núcleo de un átomo es irrelevante. Por otra parte, las fuerzas nucleares restringen la existencia de núcleos estables a aquellos cuyo número de neutrones sea parecido al de protones. En general, para cada elemento hay más de un número posible de neutrones en su núcleo. Para distinguir entre cada tipo de núcleo, de un mismo elemento, se utiliza el nombre de *isótopo* ($\text{ίδιο}\zeta\sigma = \text{igual}$, $\text{τοπο}\zeta = \text{lugar}$, o sea, los que tienen el mismo lugar en la tabla periódica) (véase figura 5).

IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIII	IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIA	O		
H 1															He 2		
Li 3	Be 4									B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10		
Na 11	Mg 12									Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18		
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	* 57-71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	+ 89															
LANTÁNIDOS																	
* La 57 Ca 58 Pr 59 Nd 60 Pm 61 Sm 62 Eu 63 Gd 64 Tb 65 Dy 66 Ho 67 Er 68 Tm 69 Yb 70 Lu 71																	
ACTÍNIDOS																	
+ Ac 89 Th 90 Pa 91 U 92 Np 93 Pu 94 Am 95 Cm 96 Bk 97 Cf 98 Es 99 Fm 100 Mv 101 No 102 Lw 103																	

Figura 5. Tabla periódica de los elementos. En ella se agrupan los elementos en 18 familias (columnas) según sus propiedades químicas. Al ordenar a los miembros de cada familia según su peso atómico se encuentran hasta siete *periodos* (renglones). Los isótopos de un elemento, por poseer las mismas propiedades químicas, ocupan un mismo sitio en esta tabla. De ahí su nombre.

Poco después del descubrimiento de la radiactividad se encontró que existían ciertos elementos con propiedades químicas idénticas pero propiedades radiactivas diferentes. Tal era el caso del plomo encontrado en las muestras radiactivas del uranio. El plomo natural no presentaba una radiactividad apreciable; sin embargo, al separar el

plomo contenido en las sales de uranio, resultaba ser radiactivo. Otros ejemplos hicieron ver que éste era un caso más generalizado, hasta que en 1910 Frederick Soddy, químico graduado en Oxford, que colaboró con Rutherford durante su estancia en Canadá, llamó a las diferentes variedades radiactivas de un elemento *radioisótopos*.

El descubrimiento de que también los elementos no radiactivos podían separarse en isótopos fue hecho por Thomson, quien, al observar la deflexión de haces atómicos de neón, en 1913, encontró dos valores distinguibles de la relación carga/masa: una 20 veces, y la otra 22 veces superior a la del hidrógeno. La intensidad relativa entre los haces era de aproximadamente 9 a 1; el menos abundante era el isótopo más pesado. Con anterioridad se había establecido que el peso atómico del neón es de 20.2. Este resultado es consistente con el hecho de que se tiene 90% de neón con masa 20 y 10% con masa 22. El trabajo de Thomson fue extendido, después de la primera Guerra Mundial, por uno de sus asistentes, Francis William Aston, quien por medio de la deflexión magnética no sólo confirmó el trabajo de su maestro sino que encontró isótopos estables para una gran variedad de elementos. En todos los casos la masa de los isótopos resultó ser casi exactamente un número entero de la masa del hidrógeno, con lo que borró las objeciones que se antepusieron a Prout un siglo antes. Por esta contribución, Aston recibió el Premio Nobel en química en 1922.

VI.3. ¿ELECTRONES EN EL NÚCLEO?

Una vez descubierto el protón, la estructura de la materia parecía ser simple si se suponía que la masa y la carga se concentran en forma elemental en dos partículas fundamentales: el electrón y el protón. Esto explicaba que la carga de cualquier átomo resultara ser un múltiplo entero de la carga del electrón, que es la misma que la del protón pero de signo opuesto. Además, una vez establecida la existencia de los isótopos, se vio que era la masa de éstos la que resultaba ser muy cercana a un múltiplo de la masa de protón. Bastaba entonces con suponer que el núcleo estaba constituido por el número de protones necesario para explicar su masa y un número tal de electrones que neutralizara la carga excedente igualándola a la carga característica de cada elemento.

La idea alternativa de una partícula neutra con masa similar a la del protón había sido propuesta por Rutherford en una conferencia en 1920. Según él, esta partícula podía originarse en un átomo de hidrógeno en el que el electrón habría *caído* al núcleo neutralizándolo eléctricamente.

Esta concepción, sin embargo, parecía innecesaria por aquella época. Por otra parte, la presencia de electrones en el núcleo parecía ser apoyada por el *decaimiento* β , en el que el núcleo emite un electrón de gran energía (el llamado rayo β).

VI.4. PROBLEMAS DEL MODELO

Hacia 1928, con el desarrollo de la mecánica cuántica, surgieron algunas dudas sobre la veracidad del modelo de protones y electrones en el núcleo. Primero, Werner Heisenberg (Premio Nobel de 1932) había postulado que la descripción cuántica de una partícula implica una indeterminación en el conocimiento simultáneo de algunos fenómenos observables, lo que se conoce como *principio de incertidumbre*. Un par de estos fenómenos observables son la posición y el ímpetu, para los cuales el producto de la incerteza en la medida de uno por el de la incertidumbre en la medida del otro no puede ser inferior a una constante, pequeña pero finita, que se conoce como constante de Planck. El ubicar electrones en el núcleo implica que la incertidumbre en la localización de éstos, lógicamente, no podía ser mayor que el núcleo mismo. Tal certidumbre en la localización requería de una incertidumbre enorme en el ímpetu para que el producto se mantuviera superior a la constante de Planck. Esta incertidumbre en el ímpetu, implicaba que las energías de los electrones dentro del núcleo fueran, al menos, diez veces mayores que las observadas en el decaimiento β y muy superiores a las estimadas para el campo eléctrico de atracción debido a los protones, que era la fuerza considerada como responsable del confinamiento de los electrones en el núcleo.

Otra contradicción inquietante para el modelo provenía de la espectroscopía molecular. Las moléculas, como los átomos, por ser sistemas cuánticos sólo pueden absorber o emitir cantidades discretas de energía. El conjunto de estos niveles permitidos de energía forma el espectro del sistema, y estos espectros son característicos de cada molécula. En 1929, Walter Heitler y Gerhard Herzberg hicieron notar que el espectro de las moléculas diatómicas debía cambiar radicalmente dependiendo de si sus núcleos contenían un número par o impar de partículas elementales. A una molécula de este tipo, con dos núcleos idénticos, sólo le sería accesible la mitad de los niveles de los que podría ocupar si sus núcleos fueran distintos. Con base en esto, se comprobó que núcleos como el oxígeno contienen un número par de partículas elementales, lo que está de acuerdo con el modelo de protones y

electrones que predice que estos núcleos deberían estar formados por 16 protones y 8 electrones; existen varios otros ejemplos en que esta regla se cumple. Sin embargo, pronto se observó que existían contraejemplos claros a esta regla, como el del nitrógeno, el cual se comportaba claramente como si sus núcleos estuvieran formados por un número par de partículas elementales. El nitrógeno, según el modelo nuclear de electrones y protones, debería estar compuesto por 14 protones y 7 electrones, lo que da un total de 21 partículas elementales. Este total es impar y por lo tanto contradice lo anterior. Pero, si no contiene electrones, ¿de qué está hecho el núcleo?

VI.5. RADIACIONES PENETRANTES

La primera evidencia experimental de la existencia del neutrón fue observada por Walter Bothe y su alumno Herbert Becker en Alemania, aunque ellos no lo supieron interpretar como tal. Bothe nació en 1892 en el pueblo de Orainenburg, cerca de Berlín. Tomó clases con Planck e inició su carrera como ayudante de Geiger en Berlín. En 1928, Bothe y Becker se interesaron por averiguar si las desintegraciones nucleares reportadas por Rutherford estaban acompañadas por algún tipo de radiación. En sus experimentos bombardeaban berilio con partículas α que eran producto del decaimiento del polonio. Utilizando métodos eléctricos de detección, algo novedoso para su época, encontraron que efectivamente aparecía cierto tipo de radiaciones muy penetrantes que ellos interpretaron como rayos γ . Este tipo de radiaciones también aparecían al bombardear litio y boro. Lo más notable de su hallazgo era que, al determinar la energía de esas radiaciones, a través de su atenuación en diferentes materiales, concluyeron que ésta debería ser mayor que la energía de los α incidentes, lo que fue interpretado vagamente como un *efecto de la desintegración*.

Estos resultados intrigaron a la pareja francesa Joliot-Curie. Irène Curie, nacida en 1897, era hija de Pierre y Marie Curie, pioneros de la radiactividad y descubridores de elementos como el radio y el polonio. Frederic Joliot era ayudante de Marie cuando conoció a su hija Irène, tres años mayor que él y con quien se casó en 1927. Entre los primeros intereses científicos de la nueva pareja estuvieron los de reproducir y profundizar en los resultados de Bothe y Becker, utilizando una fuente muy poderosa de polonio propiedad de Marie. En enero de 1932, los Joliot-Curie publicaron otro hallazgo sorprendente relacionado con las mencionadas radiaciones: éstas eran capaces de expeler protones de una capa de parafina. Al tratar de medir la energía de estos protones encontraron que era enorme. Siguiendo la sugerencia de Bothe, los Joliot-Curie calcularon que, si fuesen rayos γ , éstos deberían tener, al menos, diez veces más energía que los α del polonio que los originaba. Tal resultado los llevó incluso a dudar sobre la conservación de la energía en los procesos de desintegración.

El mecanismo por medio del cual se suponía que la supuesta radiación γ arrancaba los protones de la parafina era un efecto predicho por Einstein en 1905 y confirmado por A. H. Compton en 1923. El efecto Compton, como se le conoce, se debe a la dispersión de fotones por partículas. Este efecto había sido observado en la interacción entre rayos X y electrones, pero es igualmente válido para la dispersión de rayos γ por protones. Sin embargo, los protones son casi 2 000 veces más pesados que los electrones, por lo que, para arrancarlos de un sólido, serían necesarios γ de gran energía. Otro problema con esta interpretación era que, dado el número de protones observados, habría que suponer que la probabilidad de colisión entre estos γ y los protones de la parafina era millones de veces mayor a la que se esperaría de extrapolar el cálculo válido para el electrón.

VI.6. CHADWICK Y EL NEUTRÓN

Tiempo antes, en el Laboratorio Cavendish de Cambridge, Inglaterra, James Chadwick había realizado varios intentos de descubrir una supuesta partícula neutra mencionada por su profesor Rutherford años antes. Según comentarios posteriores, Chadwick pensaba producir neutrones mediante descargas eléctricas que hicieran caer al electrón hacia el protón en átomos de hidrógeno. Chadwick nació en Inglaterra en 1891, fue alumno de Rutherford en Manchester y, cuando su maestro descubrió la desintegración del nitrógeno en 1917, trabajó con él en la desintegración de otros elementos como el flúor, el aluminio y el fósforo.

Su fe en la existencia de tal partícula resurgió al leer los resultados del matrimonio Joliot-Curie, ya que Chadwick consideraba difíciles de creer las interpretaciones de estos trabajos. En menos de un mes, realizó una serie de experimentos que lo llevaron a la conclusión de que las radiaciones de Bothe no eran otra cosa que los neutrones que él buscaba. Chadwick quiso probar la capacidad de las radiaciones de Bothe para arrancar núcleos de superficies. Pronto encontró que podían eyectar núcleos de nitrógeno de un polímero cianurado con energías considerables. Al repetir el cálculo de los Joliot-Curie, suponiendo todavía que se tratase de rayos γ , encontró que la energía necesaria para arrancar esos nitrógenos era casi el doble de la requerida para explicar el caso de los

protones de la parafina. Es decir, la energía estimada, para los mismos rayos γ , difería enormemente de un caso al otro. Sin embargo, si en lugar de rayos γ y se suponía que se trataba de algún tipo de partícula, la masa que se deducía en ambos casos (protones de parafina y nitrógenos del polímero) resultaba ser consistentemente la misma y aproximadamente igual a la del protón. Por otro lado, la gran penetrabilidad de estas radiaciones implicaba que, de ser una partícula, ésta debería ser neutra. Cabe recordar que las partículas cargadas, debido al gran alcance de la fuerza eléctrica, interactúan con las de los átomos a todo lo largo de su trayectoria dentro de un material, por lo que pierden energía rápidamente.

El 27 de febrero de 1932, Chadwick reportó sus resultados, interpretándolos como evidencia de una nueva partícula neutra, a la que llamó *neutrón*, igual a la predicha por Rutherford doce años antes. El descubrimiento de Chadwick, sin embargo, no tuvo una repercusión inmediata en la concepción de la estructura del núcleo, puesto que él mismo imaginaba al neutrón como un compuesto electrón-protón. Sólo en un comentario, al final de su trabajo, menciona que, si el neutrón fuese considerado como *partícula elemental*, podría resolverse el problema de la estadística cuántica del nitrógeno, pero no le dio gran importancia a este punto.

Es difícil definir quién o a partir de cuándo el neutrón pasó a ser considerado como la segunda partícula elemental constituyente del núcleo tal como ahora se concibe. El primer modelo del núcleo con base en neutrones y protones fue propuesto por Heisenberg en 1932. En este modelo los protones y neutrones estaban ligados por el intercambio de electrones, pues todavía se seguía con la idea de que había electrones en el núcleo. Si la fuerza responsable de la interacción entre neutrón y protón surgía de este intercambio, una consecuencia lógica del modelo de Heisenberg sería una diferencia en la interacción neutrón-protón con el sistema protón-protón en que no habría electrones que intercambiar. En 1936, las medidas de dispersión protón-protón hechas por Merle Antony Tuve, N. Heisenberg y L. R. Hafstad demostraron que estas interacciones son tan fuertes como aquellas para el sistema neutrón-protón. Ese mismo año, Gregory Breit y E. Feenberg, así como, independientemente, Benedict Cassen y Edward Uhler Condon, propusieron un modelo de fuerzas nucleares en el que neutrones y protones interactuaban indistintamente entre sí. En estas ideas quedaba ya implícita la condición del neutrón como partícula elemental en el mismo nivel del protón. El propio Chadwick, al recibir el Premio Nobel en diciembre de 1935, ya habló del neutrón como constituyente elemental del núcleo aunque sin dar una idea clara de la naturaleza de su interacción con el protón.

VI.8 RESUMEN

La sistemática derivada de las masas de los núcleos (sección VI.2) indicaba la existencia de masa neutra en ellos. La primera interpretación para esto fue que podría tratarse de combinaciones de protones y electrones (sección VI.3). Tal modelo, sin embargo, pronto encontró dificultades para explicar algunas evidencias experimentales (sección VI.4). En 1928, Bothe y Becker descubrieron un nuevo tipo de radiaciones (sección VI.5) que despertaron el interés de varios investigadores. Entre ellos se encontraba Chadwick, quien había dedicado parte de su tiempo a explorar una hipótesis alternativa de su maestro Rutherford sobre la existencia de una partícula neutra: el neutrón (sección VI.7), que logró esclarecer en 1932.



VII. EL POSITRÓN: DIRAC Y ANDERSON

VII. 1. INTRODUCCIÓN

NOS encontramos a principios de 1932. Con el neutrón, recién descubierto, y el protón, conocemos a los constituyentes básicos del núcleo atómico. Si agregamos al electrón y al fotón, tenemos la impresión de haber, por fin, establecido la estructura básica de los átomos. ¿Se habría cumplido por fin el tan anhelado sueño? ¿Serían éstos todos los bloques elementales de la materia? En agosto del mismo año esta pregunta es respondida con el descubrimiento de la primer *antipartícula*, el *positrón*.

El positrón es un electrón con carga positiva. La interacción con el electrón puede resultar en la *aniquilación* de ambos, con lo que se produce un par de fotones cuya energía equivale a la masa del *par* electrón-positrón. Esta propiedad define al positrón como la antipartícula asociada al electrón. Los primeros indicios de la existencia del positrón surgieron, como veremos a continuación, del esfuerzo teórico por deducir la estructura electrónica del átomo.

VII.2. EL ÁTOMO DE BOHR

Tan pronto como Rutherford descubrió el núcleo y propuso un modelo para el átomo en que los electrones giraban alrededor del núcleo, surgieron las objeciones. Un electrón, debido a que es una partícula cargada, cuando se mueve en torno al núcleo, bajo la acción de atracción de su carga eléctrica, debería irradiar ondas electromagnéticas, con lo que perdería energía. Así, en la concepción clásica de Maxwell, ese arreglo sería altamente inestable. El primero en introducir las ideas cuánticas a este problema fue Niels Bohr.

Niels Hendrik David Bohr nació en Dinamarca el 7 de octubre de 1885. Hijo de una familia de tradición universitaria y amplios medios económicos, Bohr ingresa a la Universidad de Copenhague en 1903, y permanece allí hasta obtener su doctorado en 1911. En marzo de 1912, Bohr visitó a Rutherford en su laboratorio de Manchester. Durante su estancia aprendió las técnicas experimentales usadas en radiactividad e inició trabajos sobre la estructura atómica, enfocándose originalmente a comprender la absorción de partículas en la materia. A finales de julio regresó a Copenhague, su ciudad natal. En abril de 1913 publicó el primer artículo en el que introduce las ideas de Planck sobre la cuantización para explicar las reglas espectrales empíricas derivadas anteriormente por Balmer para el átomo de hidrógeno (véase figura 6). Aunque el éxito de Bohr en este aspecto fue rotundo, sus ideas no fueron tomadas en serio inmediatamente, pues su formulación contenía varios postulados introducidos en forma un tanto arbitraria.

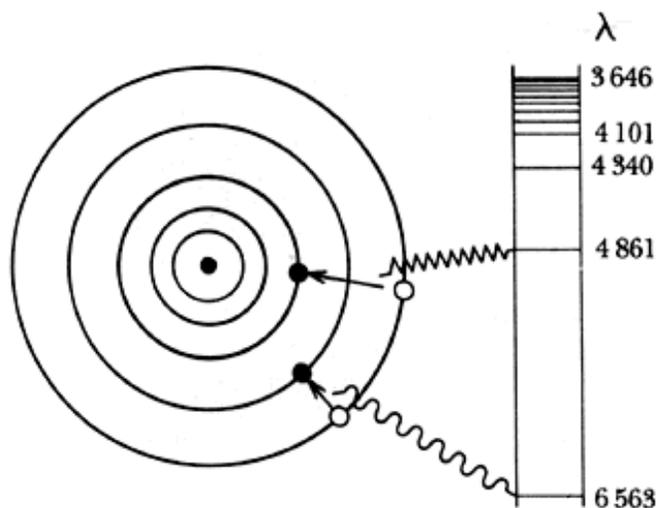


Figura 6. El átomo de Bohr. En un átomo de hidrógeno excitado, el electrón se encuentra en órbitas externas, decayendo a las más internas vía la emisión de la luz. La longitud de onda (λ) correspondiente disminuye al aumentar la energía de la transición. Para una órbita inicial dada, las diversas alternativas de decaimiento forman una *serie*.

Para garantizar la estabilidad del átomo, Bohr propuso que los electrones sólo se mueven en órbitas *estacionarias*. Los únicos cambios energéticos del sistema son aquellos en que los electrones pasan de una órbita estacionaria a otra. El segundo postulado de Bohr indica que la radiación electromagnética esperada clásicamente para un electrón que gira alrededor del núcleo, sólo ocurre durante la transición entre órbitas estables y no mientras la estructura electrónica se mantenga inalterada. Con esto Bohr introducía una explicación para la observación de líneas espectrales bien definidas, en lugar del continuo de radiación predicho por el electromagnetismo de Maxwell.

Ya en 1921 el modelo de Bohr, mejorado por él mismo y por otros autores, describía al átomo como un arreglo de electrones que giran alrededor del núcleo en órbitas caracterizadas por tres *numeros cuánticos*, que determinan el número de cuantos de energía, de momento angular y su orientación. Tal modelo, sin embargo, no explicaba algunos fenómenos como el llamado efecto Zeeman anómalo.

VII.3. PAULI Y EL ESPÍN

Como se recordará, hacia fines del siglo XIX Zeeman realizó un experimento para determinar el efecto del campo magnético sobre el espectro atómico. Lo que observó, con un equipo poco preciso, fue el ensanchamiento de las dos líneas espectrales del sodio. Lorentz interpretó que este fenómeno se debía a una descomposición de cada una de estas líneas primarias en tres, lo que reflejaba las posibles orientaciones del plano de la oscilación respecto al campo magnético. Esta predicción no pudo ser probada sino hasta un año después, en que Alfred Marie Cornu utilizó un equipo más complejo que el de Zeeman. Sin embargo, Cornu encontró que, si bien las líneas espectrales principales del sodio se subdividen, éstas lo hacen en seis y cuatro secundarias respectivamente y no en tres y tres como predijo Lorentz. Este fenómeno, conocido como *efecto Zeeman anómalo*, permaneció sin explicación hasta 1924, cuando el joven austriaco de 24 años Wolfgang Pauli le dio una explicación al postular la existencia de un cuarto número cuántico y de una nueva ley fundamental de la naturaleza: el principio de *exclusión*. Según éste, en el átomo no puede haber dos electrones con los mismos números cuánticos. Esto implica que cada órbita electrónica está poblada por un número máximo de electrones, dependiendo de su momento angular. Una predicción inmediata del modelo es la descomposición de las líneas espectrales del sodio en seis y cuatro, igual a lo observado por Cornu. Pauli recibió el Premio Nobel en 1945 por esta contribución.

En octubre de 1925 George Eugene Uhlenbeck, nacido en 1900 en Sumatra en el seno de una familia holandesa, y Samuel Abraham Goudsmit, nacido en La Haya en 1902, propusieron el *espín* como una explicación para el cuarto número cuántico de Pauli. El equivalente clásico del espín es una rotación sobre sí mismo, similar al movimiento que ocasiona el día y la noche en la Tierra. Poco tiempo después del descubrimiento del electrón, George Francis Fitzgerald propuso que este tipo de rotación del electrón podría explicar el magnetismo. El electrón, visto como una esferita que gira sobre sí misma, se comporta como un giróscopo y, por estar cargada, también tendría las propiedades de un imán pues, como vimos anteriormente, una carga en movimiento genera un campo magnético a su alrededor.

La idea de Uhlenbeck y Goudsmit fue introducida en forma un tanto arbitraria, ya que el electrón debía ser considerado como una esfera de dimensiones finitas. Si bien la idea fue perfeccionada en poco tiempo, permaneció como un agregado a la teoría cuántica no relativista que se desarrolló hasta entonces. Los efectos relativistas pueden ser despreciados siempre que la velocidad de una partícula sea muy inferior a la de la luz. Sin embargo, en el caso del electrón, debido a su masa tan pequeña, las fuerzas a que se encuentra sometido frecuentemente lo aceleran a velocidades cercanas a la de la luz. Otro problema conceptual de esta interpretación semiclásica del cuarto número cuántico de Pauli era que el espín del electrón debía ser sólo la mitad del mínimo momento angular orbital (diferente de cero), lo que permitía la mecánica cuántica.

La introducción de un momento angular *semientero*, o *fraccionario*, acarrea una división interesante en el mundo cuántico, pues el comportamiento estadístico de sistemas de partículas con espín fraccionario, según descubrió el italiano Enrico Fermi en 1926 (Premio Nobel de 1939), resultaba ser diferente del de partículas con

espín *entero*. En honor a aquél, a las partículas con espín fraccionario se les conoce genéricamente como *fermiones*. En contrapartida, la estadística de partículas con espín entero había sido estudiada por el hindú Satendra Nath Bose en 1924, en cuyo honor se denomina *bosones* a ese tipo de partículas.

VII.4. LA ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA

Hacia 1926, la necesidad de una formulación relativista para la mecánica cuántica era evidente y mantenía ocupados a algunos de los físicos teóricos más brillantes de la época. La primera descripción cuántico-relativista para el electrón fue lograda por Paul Adrien Maurice Dirac en Cambridge.

Dirac nació en Bristol, Inglaterra, en 1902, de padre suizo y madre inglesa. Empezó estudiando ingeniería eléctrica en su ciudad natal pero pronto se decidió por las matemáticas. En 1925, ya en Cambridge, se interesó por la teoría cuántica, recientemente desarrollada por Heisenberg. Su habilidad matemática le permitió plantear una formulación nueva de la mecánica cuántica que publicó ese mismo año. En 1928 encontró una manera de escribir una ecuación cuántico-relativista para el electrón. De su derivación surgía automáticamente un grado de libertad con todas las características del espín. Tal predicción dio prestigio y respeto a la formulación de Dirac.

La teoría de Dirac permite calcular la energía del electrón, incluida su masa en reposo. Sin embargo, predecía la existencia de un conjunto de estados de *energía negativa*, idénticos al conjunto de estados de energía positiva que él se proponía encontrar. Esto fue visto, inicialmente, como un *defecto* de la teoría, pues sugería la existencia de una partícula idéntica al electrón pero de carga positiva que hasta entonces nadie había observado.

La presión sobre Dirac fue enorme. Heisenberg encontró que la formulación de Dirac había causado más confusión que orden y la calificó como "el capítulo más triste en la física moderna". Con el ánimo de dar una interpretación creíble a su teoría, Dirac propuso que tal partícula podría ser el protón, pero Hermann Weyl pronto hizo notar que la simetría de las ecuaciones implicaba que la tal partícula debería tener la misma masa del electrón. En 1930, Robert Oppenheimer se dio cuenta de que suponer que se trataba de protones, implicaba que el átomo de hidrógeno se aniquilaría en una fracción de segundo. Convencido, Dirac postuló en 1931 la existencia de electrones positivos como la única interpretación posible a su teoría.

VII.5. LOS RAYOS CÓSMICOS

Los electrones positivos se mantuvieron como un defecto en la teoría de Dirac hasta que el 2 de agosto de 1932 el norteamericano Carl David Anderson, del Instituto Tecnológico de California, al estudiar las trazas que los *rayos cósmicos* dejaban en sus sistemas de detección, observó lo que sería la primera evidencia irrevocable sobre los electrones positivos o *positrones*.

La existencia de rayos cósmicos había sido establecida durante la búsqueda de nuevas fuentes radiactivas en la naturaleza, tarea que se popularizó luego del descubrimiento de la radiactividad. Inicialmente, los investigadores se sorprendieron al encontrar radiaciones en todas las partes donde se las buscó, lagos, montañas, etc. La *inevitabilidad* de las radiaciones, aun cuando los detectores fueran protegidos por capas gruesas de plomo, resultaba inexplicable con base en el conocimiento sobre las fuentes terrestres, e hizo suponer a algunos investigadores que el origen de estas radiaciones, tan penetrantes, podría ser cósmico. Para comprobar esta hipótesis fue necesario medir la intensidad de esta radiación como función de la altura. Los primeros experimentos se limitaron a las edificaciones más altas, como la Torre Eiffel, pero los resultados no fueron muy concluyentes. El siguiente paso fue el uso de globos, con los que se llegaron a medir radiaciones hasta a 4 500 metros de altura, donde el nivel de radiación no parecía disminuir. Esta omnipresencia de la radiación ayudó a descartar las fuentes en la superficie de la Tierra como sus posibles generadoras.

Entre 1911 y 1912 el austriaco Victor Franz Hess investigó sistemáticamente este fenómeno y encontró que la radiación aumentaba a partir de los mil metros, y llegaba a ser el doble de lo medido en la superficie de la Tierra a cinco mil metros de altura. Hess propuso entonces que, en efecto, existe un flujo importante de radiaciones proveniente del espacio. La intensidad de estas radiaciones resultó estar poco correlacionada con el día o la noche, lo que llevó a suponer que el origen de estas radiaciones no era solar necesariamente.

La siguiente pregunta acerca de los rayos cósmicos se refería a su propia naturaleza. Siendo excepcionalmente penetrantes podría tratarse por ejemplo de algún tipo de radiación diferente de los α , β o γ hasta entonces descubiertos en la Tierra. El método obvio para discernir entre partículas cargadas, positivas o negativas, y

fotones, era hacer pasar la radiación cósmica por un campo magnético. La visualización de las trayectorias se haría a través de las trazas dejadas por las partículas en *cámaras de Wilson*. Como ya vimos, estos artefactos consisten en un tanque que contiene una atmósfera supersaturada de vapor. La radiación incidente interactúa con el medio causando ionización a lo largo de su trayectoria. La carga de estos iones atrae moléculas hasta formar gotitas. La imagen de las columnas de gotitas se puede fotografiar para permitir el análisis posterior de las trayectorias seguidas por los rayos incidentes. Desgraciadamente, los primeros experimentos de este tipo mostraban que la radiación incidente parecía no ser afectada por los campos magnéticos utilizados. Este hecho podía implicar que, o bien las partículas incidentes, aunque cargadas, poseían una energía tan alta que la curvatura de las trayectorias debida al campo magnético fuera imperceptible, o bien que se tratase de otro tipo de radiación. Este dilema sólo podría ser resuelto mediante la intensificación de los campos. Otro método que se estudió por aquellas fechas consistió en utilizar el campo magnético de la Tierra, y buscar alguna diferencia en la intensidad de la radiación cósmica entre el ecuador y los polos.

En 1930, Robert Andrews Millikan, el mismo que midiera la carga del electrón, decidió montar un experimento equipado con cámaras de Wilson e imanes más poderosos que los utilizados hasta entonces. Para dirigir este proyecto, Millikan escogió a Carl David Anderson.

VII. 6. EL POSITRÓN

Nacido en septiembre de 1905 en Nueva York, Anderson estudió física en el Instituto Tecnológico de California, donde se graduó en 1927, y obtuvo en la misma institución el doctorado bajo la dirección de Millikan en 1930. El montaje del experimento de los rayos cósmicos tomó más de un año, al cabo del cual se empezaron a tomar fotografías, día y noche, cada quince segundos.

El primer análisis de los resultados fue publicado en 1931. En su artículo, Anderson describía la aparición de varios tipos de radiación que podían ser interpretados como protones, núcleos más pesados y electrones. Por su mayor penetrabilidad y la marcada curvatura de sus trayectorias, los electrones podían ser identificados con gran facilidad en sus fotografías. Ocasionalmente, sin embargo, Anderson encontró evidencias de trayectorias muy similares a las de los electrones pero con una curvatura invertida, como si se tratara de partículas con carga positiva. Intrigado, Anderson mejoró sus técnicas y buscó evidencias más convincentes de la existencia de estas irregularidades. En agosto de 1932, obtuvo la primera imagen clara de una partícula que, luego de atravesar una placa de plomo, se detenía en la cámara de niebla. Por el tipo de trayectoria, debería tratarse de un electrón, sólo que su curvatura era inversa a la de una partícula negativa. Anderson, quien aparentemente no conocía la predicción de Dirac, publicó su resultado concluyendo que se trataba de un electrón positivo o *positrón*. Anderson fue laureado con el Premio Nobel por su descubrimiento en 1936. Compartió este premio con Franz Hess.

Aparentemente, Anderson no fue el primero en tener evidencias sobre el positrón. Anteriormente Bruno Rossi realizó un experimento en el que medían eventos coincidentes en tres detectores Geiger-Muller. Las coincidencias de Rossi eran difíciles de explicar, a menos que se supusiera la presencia simultánea de dos partículas cargadas: un electrón y un positrón. En un informe previo al de Anderson, Irène Curie y Frederic Joliot también describían evidencias claras de la existencia de positrones en un experimento con una cámara de niebla y fuentes radiactivas. Sin embargo, los Joliot-Curie no supieron interpretar correctamente su resultado, pues creyeron que se trataba de un electrón casual que viajaba en sentido contrario. Aparentemente, la pareja estaba condenada a no escribir su nombre en los anales de la física de las partículas elementales, a pesar de haber tenido frente a ellos las primeras evidencias tanto del neutrón como del positrón, como ya vimos.

VII.7. RESUMEN

El modelo *planetario* del átomo implicaba, para el electrón, una pérdida constante de energía de traslación, por lo que debía *caer* al núcleo en poco tiempo. En 1913 Bohr dio una solución a este dilema haciendo uso de la cuantización de Planck (sección VII.2). El éxito de este modelo fue modesto, ya que sólo explicaba los espectros atómicos más simples. En 1924 Pauli propuso la existencia de una cualidad extra para el electrón que, un año después, fue interpretada por Uhlenbeck y Goudsmit como el *espín* (sección VII.3). Estos modelos cuánticos no consideraban los efectos relativistas a los que está sujeto el electrón. En 1928 Dirac logró una descripción cuántico-relativista del electrón (sección VII.4), cuyo único *defecto* fue predecir la existencia de la *antimateria*. La comprobación experimental de esto, basada en la observación de los rayos cósmicos (sección VII.5), fue realizada por Anderson en 1932.

Inicio |



VIII. EL NEUTRINO: PAULI, FERMI, REINES Y COWAN

VIII.1 INTRODUCCIÓN

LA IMAGEN simplista de un núcleo compuesto de neutrones y protones unidos por una gran fuerza de atracción dejaba sin explicar una fenomenología bien conocida: el decaimiento β . Como se ha visto, algunos núcleos son capaces de emitir electrones y positrones. La pregunta es: Si éstos no existían previamente dentro del núcleo, ¿cómo se producen las partículas? A finales de la década de 1920, surgió el modelo que explicó esta fenomenología postulando la existencia de una nueva fuerza nuclear, denominada *débil* porque su magnitud relativa era pequeña frente a las otras relevantes en el núcleo. Bajo la acción de la fuerza débil, el núcleo puede transformar neutrones en protones, y viceversa, emitiendo electrones o positrones. El único problema del modelo era que, para explicar las observaciones, requería de la existencia de una nueva partícula, el *neutrino*.

Durante mucho tiempo sólo el éxito de esa teoría apoyó la existencia del neutrino, pero tuvieron que pasar veinticinco años antes de su confirmación experimental. A la fecha se conocen dos tipos diferenciados de neutrinos, y es muy probable que haya un tercero. Sin embargo, la masa de ninguno de ellos se ha medido, aunque sí se sabe con certeza que es muy pequeña, o que incluso puede ser cero.

VIII.2. EL DECAIMIENTO β

Como se vio antes, en 1898 Rutherford clasificó los modos de decaimiento de los elementos radiactivos de acuerdo con su penetrabilidad, en rayos α (menos penetrantes) y β (más penetrantes). Posteriormente Villard detectó la presencia de rayos aun más penetrantes que, por consistencia, denominó rayos γ . Al inicio del presente siglo, las investigaciones revelaron que los rayos α son iones del elemento helio; que los β son electrones de alta energía y que los γ son radiación electromagnética, también de gran energía.

Una incógnita que pronto se planteó fue la forma del espectro de energía de estas radiaciones. En 1904 William Henry Bragg, ex alumno de Thomson que por esas fechas trabajaba en Adelina, Australia, midió la energía de los α a través de su penetrabilidad en diferentes medios. Un año después, en un trabajo publicado con su ayudante Richard Daniel Kleeman, Bragg demostró que en el espectro de las partículas α emitidas por un elemento dado aparecían grupos (*líneas*) de energías bien definidas que eran características de cada elemento radiactivo. Esto revelaba que no sólo los núcleos de un elemento eran idénticos, sino que al desintegrarse emitían α de la misma velocidad. Bragg y su hijo, William Lawrence, recibieron el Premio Nobel en 1915 por su análisis de estructuras cristalinas en el que utilizaban rayos X, tema que también fue de su interés y por el que son más conocidos.

La siguiente incógnita en este tema fue el espectro de las radiaciones β . En 1906, Otto Hahn y Lise Meitner empezaron a investigar el problema con la idea de generalizar los resultados de Bragg al decaimiento β . Sin embargo, en este caso el problema era más complicado ya que los β , por su masa tan reducida, al interactuar con la materia son dispersados rápidamente y resulta difícil establecer una relación entre energía y alcance lineal. En 1909, Hahn y Meitner^{9*}  publicaron sus primeros resultados, de los que se deduce que medir el alcance de los β no era el mejor método para deducir su espectro. En 1910 Hahn intentó una nueva técnica en que utilizaba un campo magnético, para separar la energía de los β , y una placa fotográfica. Como este método mostrara líneas en la imagen, fue inicialmente tomado como la anhelada confirmación de que los β , igual que los α , eran emitidos con energías fijas, características de cada elemento. Sin embargo, en 1913, James Chadwick, quien posteriormente descubriría el neutrón, sustituyó la placa fotográfica por un detector eléctrico y demostró que el espectro de los β es más bien un continuo al que se superponen algunos grupos de menor importancia.

Poco después de este trabajo, Chadwick viajó a Berlín para pasar una temporada y trabajar con Geiger, pero lo sorprendió la primera Guerra Mundial y fue tomado prisionero y enviado a un campo de concentración. Ahí conoció a Charles Drummond Ellis, militar inglés, quien le ayudó en algunos experimentos llevados a cabo durante el cautiverio. Contagiado con el entusiasmo de Chadwick, Ellis decidió dedicarse a la física. Al fin de la guerra se fue a Cambridge a trabajar con Rutherford. En su primera publicación, Ellis demostró que las líneas superpuestas al espectro continuo de los β se debían a electrones arrancados al átomo tras absorber la energía de un rayo γ . En 1925 publicó un trabajo junto con William Alfred Wooster, en el que, por un método diferente,

llegaron a demostrar que el espectro de los β es un continuo (véase figura 7).

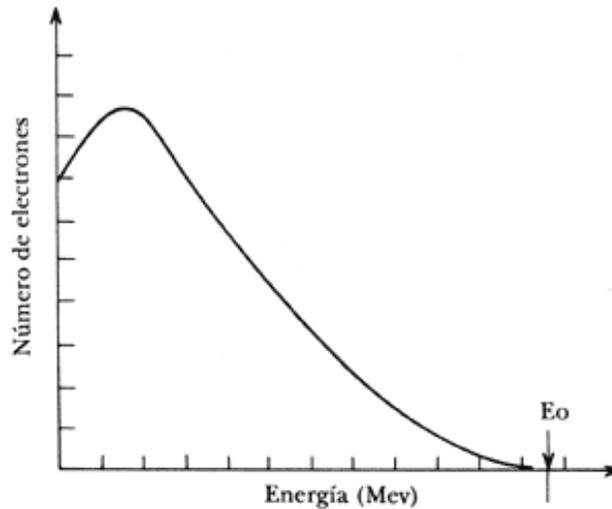


Figura 7. Espectro del decaimiento β . En una transición débil, la energía queda repartida arbitrariamente entre el electrón y el antineutrino. Por esta razón, a pesar de tratarse del decaimiento de un estado cuántico con energía definida (E_0), en el espectro de las β 's no se forman grupos sino un continuo que se extiende hasta la energía máxima.

Este resultado llevaba a conclusiones contradictorias con respecto a la imagen que se tenía de los núcleos y de su decaimiento. Si todos los núcleos son idénticos, antes y después del decaimiento, ¿a qué se debe que la energía de los β que emiten no sea la misma? En 1929, Bohr interpretó este fenómeno como evidencia de que en el núcleo no se conserva la energía! Un año después, Pauli propuso una interpretación alterna, en la que suponía la existencia, en el núcleo, de una partícula neutra (que originalmente denominó *neutrón*) de masa pequeña que era emitida al mismo tiempo que el β , de manera que la energía del decaimiento quedaba repartida en forma arbitraria entre ellas. Cabe recordar que por esa fecha el núcleo era considerado como un agregado de protones y electrones. En este sentido, Pauli propuso que si su neutrón tuviese un espín idéntico al del protón y el electrón, se resolvería simultáneamente el dilema del nitrógeno 14 (véase capítulo VI)10*

VIII.3. EL MODELO DE FERMI

En 1933 Enrico Fermi desarrolló una teoría sobre el decaimiento β en la que incorpora la partícula de Pauli, a la que llamó *neutrino*, que es el equivalente italiano a *neutronicito*. Según Fermi, cuando un neutrón se transforma en un protón, lo hace emitiendo un electrón y un neutrino11* Estas partículas son creadas en el momento del decaimiento, en el mismo sentido que el fotón se crea en una transición electromagnética. En este caso se trataría de una transición inducida por una nueva fuerza a la que, por su pequeña magnitud, se le conoce como *débil*. La predicción de Fermi para el espectro de las β permitió deducir que la masa del neutrino debería ser muy pequeña. El neutrino, por carecer de carga eléctrica y poseer una masa despreciable, sólo es sensible a la fuerza débil, por lo que su probabilidad de interactuar con la materia es verdaderamente baja. Esto dificulta su detección, al punto que tuvo que transcurrir mucho tiempo antes de que su existencia pudiese ser confirmada experimentalmente. Sin embargo, ante la alternativa de poner en duda un principio tan sólido como el de la conservación de la energía, los físicos aprendieron a vivir con un neutrino, a la vez misterioso y necesario.

VIII.4. EL NEUTRINO

Una manera de detectar neutrinos sería un proceso inverso al del decaimiento β , en el que un neutrino y un

electrón convergen simultáneamente sobre un protón para convertirlo en un neutrón. Este encuentro debe ser realmente raro; sin embargo, otro proceso equivalente sería aquel en el que un neutrino y un protón

interaccionaran para producir un neutrón y un positrón (*positrón*).^{12*} Para poder observar este proceso es necesario un flujo enorme de neutrinos que compense la baja probabilidad de la interacción. Tal condición sólo se presentó con la invención de los reactores nucleares, de los que emergen grandes cantidades de neutrinos. A principios de la década de 1950, Frederick Reines y Clyde Lorrain Cowan iniciaron el diseño de un detector capaz de registrar un evento como el descrito.

El experimento de Reines y Cowan debía contar con un gran volumen de algún compuesto químico rico en hidrógeno para aumentar las probabilidades de que el neutrino interactuase con un protón del medio. La interacción que se buscaba dejaba como residuos un positrón y un neutrón, partículas que serían detectadas por métodos indirectos. El positrón, a poco de ser creado, se topa con un electrón del medio para aniquilarse produciendo dos rayos γ , cuya energía es equivalente a la de la masa del electrón. La detección del neutrón requiere añadir al líquido algún material que sea eficiente para absorber en su núcleo neutrones, produciéndose una reacción nuclear en la que se emite un rayo γ característico. El problema se reduce pues a detectar tres rayos γ . Para observar este tipo de rayos se utilizan medios llamados *centelleadores*, que tienen la propiedad de transformar la energía de los γ que absorben en destellos de luz visible a la que, además, son transparentes. La intensidad de cada destello es proporcional a la energía del rayo γ absorbido. De esta manera, con detectores de luz colocados en las paredes del contenedor del líquido centelleador, se colecta la luz producida en cada evento y se analiza.

Un detector como el descrito fue colocado en la vecindad del reactor de Savannah River, EUA, cuyo flujo de neutrones es de 10^{13} por cm^2/seg . Se comenzaron a registrar eventos desde 1953, pero sólo luego de ciertas mejoras, en 1956, Reines y Cowan enviaron un telegrama a Pauli anunciándole la primera comprobación experimental de la existencia del neutrino. La historia del neutrino resultó demasiado larga para Fermi, quien había muerto dos años antes.

VIII.5. RESUMEN

Por su modo de interactuar con la materia, los rayos α y γ , productos del decaimiento radiactivo, se agrupan en energías muy definidas, lo que permitió apreciar en forma inmediata la naturaleza cuántica de las transiciones correspondientes. Por el contrario, los rayos β (electrones) emitidos por el núcleo no mostraban esta característica (sección VIII.2). En 1930, Pauli dio una interpretación a este fenómeno que fue posteriormente desarrollada por Fermi (sección VIII.3). El modelo sugería que en el decaimiento β , además del electrón, se emitía simultáneamente otra partícula, neutra y de masa muy pequeña, que compartiría la energía del decaimiento. De esta forma se "borraba" la estructura de grupos del espectro, y se observaba solo el continuo. El *neutrino*, como se le denominó por ser pequeño y neutro, es una partícula muy difícil de detectar, al punto que pasó un cuarto de siglo antes de que Reines y Cowan la descubrieran experimentalmente (sección VIII.4). A este neutrino, asociado sólo al decaimiento β , se le conoce ahora como *neutrino electrónico*, para diferenciarlo de otros cuya historia se reseñará después (véase capítulo X).



9 La colaboración de Hahn y Meitner duró muchos años, y culminó con el Premio Nobel de química de Hahn, en 1943, por el descubrimiento de la fisión nuclear. Lise Meitner no compartió el Premio porque se vio obligada a huir del nazismo poco antes del descubrimiento de Hahn. Sin embargo, fue Meitner, con su sobrino Otto Frisch, los que dieron la interpretación correcta a los datos descritos por Hahn en una carta enviada a Lise.

Inicio

[Nota 10] 

10 Nótese que este *neutrón* no es el mismo que el de Chadwick, el cual fue descubierto un par de años después.

Inicio |

11 Una regla de conservación descubierta posteriormente requiere que el neutrino utilizado aquí sea, en realidad, un antineutrino. Por ser neutros, la diferencia entre neutrino y antineutrino, aunque la hay, es muy sutil y no afecta a la formulación de Fermi. El resto del capítulo se refiere genéricamente a *neutrinos*, sin aclarar si se trata de la partícula o de la antipartícula.

Inicio |

[Nota 12] 

12 Nótese que la diferencia entre ambos procesos consiste en que se consideró que un electrón inicial equivale a un antielectrón final.

Inicio |

IX. EL MUON Y LOS PIONES: YUKAWA, LATTES, OCCHIALINI Y POWELL

IX.1. INTRODUCCIÓN

LA INTERACCIÓN *fuerte* que mantiene unidos a protones y neutrones dentro del núcleo requirió de una formulación sólida que permitiera entender la estructura interna del núcleo. Veamos ahora cómo, siguiendo el modelo de Maxwell para el electromagnetismo, Hidekei Yukawa propuso que (como el fotón) deberían existir las partículas mensajeras de la interacción fuerte, los *mesones*.

En el presente capítulo se revisarán los descubrimientos de dos partículas. La relación entre ellas es simplemente anecdótica pues el descubrimiento de la primera, el *muon*, ocurrió durante la búsqueda de los mesones, cuyos primeros ejemplares son los *piones* o *mesones* π , que causaron la confusión correspondiente. El muon es miembro de la familia del electrón y el neutrino, en el sentido de ser insensibles a la interacción fuerte. Por el contrario, por ser mesones, los piones son emisarios de esa fuerza.

IX.2. LA FUERZA NUCLEAR (FUERTE)

La aparición del neutrón permitió dar una explicación satisfactoria a casi todas las dificultades que emergían del antiguo modelo de la estructura nuclear con base en protones y electrones. Sólo quedaba pendiente describir la fuerza que une al núcleo. Varias cualidades se pueden deducir de la información sistemática que se acumuló a lo largo de varios años. Por ejemplo, la física atómica, que tanto éxito tenía en ese entonces, ignoraba por completo el efecto de una fuerza extraña en el núcleo. Esto indica que la fuerza nuclear sólo es importante a distancias nucleares. Esta fuerza, denominada por esto mismo de *corto alcance*, debería ser predominantemente de atracción para garantizar la estabilidad del núcleo al contrarrestar la repulsión eléctrica entre los protones. Otras evidencias imponían más restricciones sobre el tipo de fuerza en cuestión.

En 1935 el físico japonés Hidekei Yukawa introdujo la idea de campo nuclear, en el mismo sentido en que las ecuaciones de Maxwell describen el campo electromagnético. Yukawa nació en Tokio en 1907, hijo de un profesor de geología de apellido Ogawa; sin embargo, en 1932 Yukawa se casó con Sumiko Yukawa de quien adoptó el apellido.

La teoría de campo introduce la idea de interacción a distancia a través del intercambio de algún tipo de partícula intermedia. En el caso del campo electromagnético, esta partícula es el fotón. Al buscar un símil con estas ideas, Yukawa se dio cuenta de que existe una relación inversa entre el alcance de la fuerza a describir y la masa de la partícula intermedia. Por ejemplo, el campo electromagnético es de alcance infinito, por lo que la masa del fotón resulta ser cero. Siendo la fuerza nuclear de *corto alcance*, Yukawa dedujo que la partícula intermedia debería tener una cierta masa. Ya anteriormente, cuando aún se creía en la existencia de electrones en el núcleo, Heisenberg propuso que la fuerza de atracción entre los protones resultaba del intercambio de electrones, tal como las fuerzas intermoleculares. Sin embargo, usando los argumentos de Yukawa, resultaba que, si la partícula intermedia era el electrón, su masa correspondería a un alcance unas cien veces mayor al requerido para las fuerzas nucleares. En 1935, Yukawa propuso la existencia de un nuevo tipo de partículas responsables de transmitir la fuerza nuclear, cuya masa debería ser aproximadamente doscientas veces mayor que la del electrón. Originalmente, Yukawa se refirió a estas partículas como *pesadas*. Poco tiempo después se propusieron nombres como *yukón* y *mesón* (por poseer una masa intermedia entre la del electrón y el protón, del griego $\mu\epsilon\sigma\zeta$ = medio), perdurando este último.

IX.3. EL MUON

La idea del mesón quedó, en apariencia, olvidada hasta 1937, en que C.D. Anderson, el descubridor del positrón, y sus colaboradores, S. H. Neddermeyer, C. E. Stevenson y J. C. Street reportaron haber observado en las trazas dejadas por rayos cósmicos partículas de masa aproximadamente de doscientas veces la del electrón. La relación con lo predicho por Yukawa parecía clara. A esta partícula se le denominó *mesotrón* por un tiempo, y actualmente se le denomina *muon*, o *leptón* (μ)

Hacia el fin de la guerra, en 1945, los observadores de rayos cósmicos habían establecido la existencia de dos

componentes principales en la radiación, una denominada suave por ser atenuada fácilmente en los detectores y que consiste principalmente de electrones y fotones, y otra denominada *dura*, por su gran penetración y que estaba formada predominantemente de muones. Una serie de experimentos realizados hacia fines de la década de 1930 y principios de la de 1940 demostraron que los muones eran inestables pues decaían en dos millonésimas de segundo. La masa de estas partículas, inferida a partir de su penetración, había sido medida desde 1937 por el grupo de Anderson, y resultó ser unas 210 veces mayor que la masa del electrón. También se observó la existencia de muones de carga positiva y muones de carga negativa; en ambos casos, la carga era idéntica en magnitud a la carga del electrón.

Durante la guerra, los expertos en radiación cósmica acumularon bastante información sobre la naturaleza y forma de interactuar de los muones, mientras que los teóricos hacían esfuerzos por reconciliar lo observado con las predicciones de Yukawa.

En 1947 Marcello Conversi, Ettore Pancini y Oreste Piccioni reportaron un estudio, realizado mientras se refugiaban en un sótano de Roma, sobre la interacción de muones con núcleos. En su trabajo demuestran que los muones positivos siempre decaen produciendo positrones y que los muones negativos son, de preferencia, capturados por núcleos pesados; por otro lado, aseguraban que al interactuar con núcleos ligeros se desintegran y producen electrones. Estas observaciones contradecían el comportamiento predicho para los mesones negativos de Yukawa, los que deberían ser absorbidos por cualquier núcleo, pesado o ligero. Además, la vida media esperada para las partículas de Yukawa debería ser, al menos, cien veces inferior a la que se midió para los muones.

IX.4. EL PION

Como una posible explicación a estos problemas, varios investigadores, entre ellos Hans Albrecht Bethe, Robert Eugene Marshak, y los japoneses Yasutaka Tanikawa, Shoichi Sakata y Takesi Inoue sugirieron que lo observado hasta entonces no correspondía a los mesones de Yukawa sino a residuos de su decaimiento. En 1947 apareció publicado un trabajo de Lattes, Occhialini y Powell con evidencias experimentales en favor de esta interpretación. Cesare Mansueto Giulio Lattes nació en Curitiba, Brasil, en 1924. Durante la guerra, el italiano Giuseppe Paolo Stanislao Occhialini se refugió en Sao Paulo, donde tuvo como alumno a Lattes. Al emigrar a Inglaterra, Occhialini se llevó a Lattes con él a Bristol a trabajar en el laboratorio de Cecil Frank Powell. El trabajo de Lattes y sus colaboradores se basó en imágenes de trazas dejadas por partículas cargadas en emulsiones fotográficas (véase figura 8). Estas trazas muestran claramente trayectorias en las que un mesón se detiene en la emulsión y al final de su trayectoria aparece un muon, de menor energía y masa. La interpretación de los autores es que los primeros mesones, bautizados por ellos mesones π , son los verdaderos mesones de Yukawa, mientras que los muones, producto de su decaimiento, son otras partículas que tienen poco que ver con las partículas responsables de la fuerza nuclear. Por el descubrimiento del mesón π , o *pion*, Powell recibió el Premio Nobel en 1950 (¡con lo que quedaron sin un reconocimiento equivalente el brasileño y el italiano!)

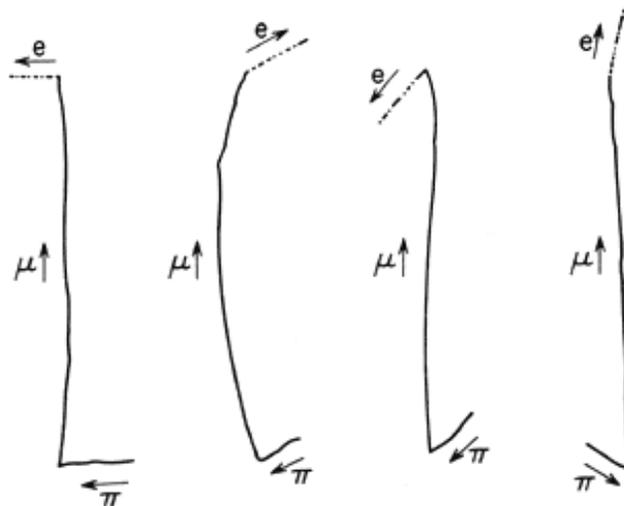


Figura 8. Decaimiento del pion. Las trazas que deja un pion al decaer en placas fotográficas muestran dos vértices. En esta figura se muestran cuatro ejemplos de esto. En la parte inferior, un pion deja una traza corta (debido a su vida media), que termina con el decaimiento en un muon más un neutrino (que no deja huella en la placa). En el vértice superior, el muon (cuya vida es mayor) decae en un electrón más dos neutrinos.

La teoría de Yukawa explica el origen de la fuerza nuclear como debida al intercambio de piones. En este sentido, los piones encontrados por Lattes y otros (el pion positivo y el pion negativo) sólo explicarían la fuerza de intercambio entre un neutrón y un protón. Por conservación de la carga, cuando un neutrón interactúa con un protón, el intercambio de piones cargados transforma al neutrón en protón y viceversa. Sin embargo, la interacción entre dos protones o dos neutrones sólo puede ocurrir a través del intercambio de mesones neutros.

Las primeras evidencias de la existencia de piones neutros fueron anunciadas por R. Bjorklund, W. E. Crandall, B. J. Moyer y H. F. York, como resultado de experimentos realizados en 1949 con los aceleradores de Berkeley, California. En su artículo, este grupo informa de la aparición de pares de fotones muy energéticos en la interacción de protones de alta energía. Entre cinco posibles interpretaciones para este fenómeno, Bjorklund y sus colaboradores sugieren la posibilidad de que se trate del decaimiento de piones neutros. Medidas posteriores de este grupo confirmaron esta hipótesis y determinaron que la vida media de los piones neutros es cien millones de veces más corta que la de sus compañeros cargados. La masa de los piones neutros es ligeramente menor que la de los piones cargados aunque el espín de todos ellos es cero. Nótese que los piones neutros fueron las primeras partículas elementales, literalmente, producidas en aceleradores y no, como hasta entonces, asociadas a la radiación cósmica.

Los piones neutros aparecen en cualquier combinación de la interacción entre *nucleones* (protones o neutrones); además, por ser menos masivos, el intercambio de estas partículas es más frecuente en el núcleo. Sin embargo, a pesar de lo fundamental de su descubrimiento, el trabajo de Bjorklund y sus colaboradores es relativamente poco conocido.

Los muones pertenecen a una familia de partículas cuya característica principal es la de no *sentir* la fuerza nuclear *fuerte*; por esta razón, no son considerados como *mesones*. Además de los muones, existen otras partículas insensibles a la fuerza fuerte, como el fotón, el electrón, el positrón, y los neutrinos. Sin contar el fotón, a estas partículas se les conoce como *leptones*, nombre histórico derivado de la raíz $\lambda\epsilon\pi\tau\omicron\zeta$ = ligero, por su masa pequeña comparada con las partículas que sí sienten la fuerza fuerte, denominados *hadrones* ($\alpha\delta\rho\zeta$ = fuerte). Hasta donde se sabe, el parecido entre la masa de los piones y de los muones, que tanta confusión causó en un principio, es sólo una coincidencia curiosa.

Una vez más, hacia octubre de 1947 parecía que se había logrado el anhelado sueño de entender la estructura de la materia. Con los fotones, electrones, protones, neutrones, positrones y piones descubiertos y la certeza de la existencia del neutrino, todo parecía tener explicación y orden dentro de lo entonces considerado como elemental. Todo... menos el muon, a quien algunos llamaron *la broma divina*. Sin embargo, este panorama, casi perfecto, fue sólo el fin de otra etapa, que podríamos denominar *nuclear*, de la búsqueda de lo *elemental*.

IX.5. RESUMEN

Una vez establecida la constitución del núcleo, formado por protones y neutrones, el problema siguiente fue entender la fuerza que los mantiene unidos (sección IX.2) En su primer modelo teórico sobre esta fuerza, Yukawa predijo la existencia de una partícula emisaria de ese campo, partícula cuya masa debía ser intermedia entre la del electrón y el protón: el *mesón*. Poco tiempo después, una partícula tal, el *muon*, fue descubierta en los rayos cósmicos (sección IX.3); sin embargo, sus propiedades eran muy diferentes a las predichas para el mesón. Años después, Lattes, Occhialini y Powell descubrieron la verdadera partícula de Yukawa (sección IX.4).

Início



X. PROLIFERACIÓN HADRÓNICA: MESONES, BARIONES Y SUS DESCUBRIDORES

X.1. INTRODUCCIÓN

EL DESCUBRIMIENTO del pion completó una etapa en la física de las partículas elementales. La materia era concebida como hecha de átomos ligados por fuerzas eléctricas. Una perturbación suficiente, en este nivel, implica la emisión de fotones debida al reacomodo de electrones. En el centro del átomo, el núcleo ejerce su atracción sobre los electrones, y contiene la totalidad de la carga eléctrica positiva y casi toda la masa. El núcleo está constituido por protones y neutrones que interactúan entre sí a través de nuevas fuerzas, una de ellas responsable de la atracción y estabilidad del núcleo, mientras la otra, de menor intensidad, se manifiesta en el decaimiento β , en el que el núcleo emite electrones o positrones. La fuerza electromagnética tiene al fotón, y la fuerza nuclear fuerte tiene al pion. Por otra parte, la fuerza nuclear débil requiere de la existencia de una partícula aún no descubierta (el neutrino). En cambio, aparece el muon como miembro *sorpresita* entre la familia de las partículas descubiertas.

Tras medio siglo de investigación, el número de constituyentes elementales había llegado sólo a ocho. ¿Serían los únicos? Decididamente no. Desde 1947 el número de partículas aumentó en forma notable. El desarrollo tecnológico de la posguerra impulsó el desarrollo de aceleradores y detectores. Como consecuencia, en los diez años que siguieron, el número de partículas *elementales* se quintuplicó, llegando a ser casi un centenar en 1964. En el presente capítulo se reseña esta *explosión demográfica* en el dominio de las partículas elementales.

X.2. LAS V, LA T Y OTRAS

En diciembre de 1947, George Dixon Rochester y Clifford Charles Butler, de la Universidad de Manchester, publicaron evidencias sobre un nuevo tipo de partículas. Como otros, Rochester y Butler estudiaban las trazas dejadas por los rayos cósmicos en emulsiones fotográficas (véase figura 9). Los dos eventos en que se basó su anuncio dejaron trazas con una forma que recuerda la letra V, por lo que les dieron ese nombre: partículas V. El primer evento registrado en octubre de 1946 fue interpretado como una partícula neutra (que no deja huella en emulsiones fotográficas) que decae en dos partículas cargadas (los brazos de la V). La segunda traza, registrada en mayo de 1947, muestra la trayectoria recta de una partícula cargada que se quiebra en un punto, resultando en una V cuyos brazos están muy abiertos. El punto de quiebre (el vértice) se interpretó como el decaimiento de una partícula cargada en otra cargada y una neutra. En ambos casos, a la partícula que decae se le estimó una masa más de mil veces mayor que la masa del electrón.

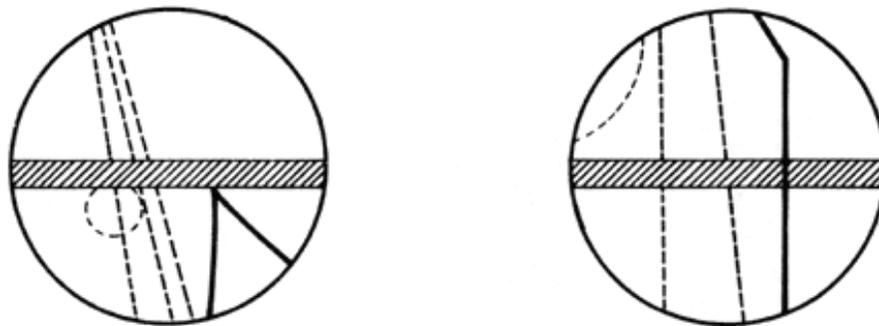


Figura 9. Decaimiento de las partículas V o Λ . Las líneas gruesas representan las trazas dejadas por una de estas partículas al decaer en una cámara de Wilson. La imagen de la izquierda corresponde a una partícula neutra (que no deja huella) decayendo en dos cargadas, y la de la derecha una carga que decae en otra cargada más una neutra.

Menos de un año después, Robert B. Brode, de Berkeley (California), y Louis Leprince-Ringuet, de París, anunciaron evidencias independientes sobre la existencia de otra partícula cuya masa es 700 veces mayor que la del electrón. El francés la denominó T. Pocos meses después, el grupo de Bristol encontró el primer ejemplo del decaimiento de una partícula T en tres piones cargados.

El interés por la nueva fenomenología atrajo a varios laboratorios a dedicar esfuerzos en este tipo de investigaciones. A principios de 1950, Anderson encontró más de treinta ejemplos de trazas de partículas V. Mientras tanto, en octubre de ese año, el grupo de Manchester logró identificar a un protón como uno de los productos del decaimiento de una V, siendo el otro un pion o un muon. Por estas fechas las partículas V pasaron a llamarse Λ .

Hacia 1953 los expertos intentaron coordinar sus esfuerzos y, como primera acción, adoptaron la nomenclatura de *mesones* Λ para los piones y los muones, *mesones* K para aquellos de masa intermedia entre el pion y el protón, e *hiperones* para aquellas partículas con masa superior a la del protón y el neutrón, como las Λ . Posteriormente se introdujo el término de *barión* para congregarse a los *nucleones* (protón o neutrón) y a los hiperones en un solo grupo.

Entre lo que se da a conocer ese año de 1953, destaca la identificación de un protón y un pion negativo en el decaimiento de una Λ neutra. También se encontraron casos de Λ cargadas que decaen, ya sea en un protón más un pion neutro o en un neutrón más un pion positivo. Más sorprendente aún, el grupo de Anderson encontró un fenómeno en el que una Λ cargada decaía en otra Λ neutra más un pion cargado. Era claro que había más de un tipo de hiperones.

En cuanto a los mesones K, se encontraron dos grupos: aquellos que decaen vía la emisión de dos partículas (piones), denominados θ y aquellos que decaen en tres partículas (ya sean piones, muones y/o neutrinos), entre los que se hallaban las T, las K y las X. Entre los mesones K parecía haber ciertas similitudes. Por ejemplo, las T, las K y las X mostraban tener vidas medias muy parecidas. Además, las mediciones de las masas de las T y las θ resultaron ser idénticas.

X.3. VIOLACIÓN DE LA PARIDAD

¿Se trataría simplemente de modos alternativos de decaimiento de un mismo tipo de partícula? Esta hipótesis sencilla desafortunadamente se encontraba reñida con una ley empírica conocida como *conservación de la paridad*, para la que, hasta entonces, no se conocían contraejemplos. Tal principio se refiere a la indistinguibilidad de un fenómeno físico observado ya sea directamente o a través de un espejo. Las fuerzas gravitacionales, electromagnéticas, así como la nuclear fuerte, obedecen a este principio fielmente, de manera que todo lo que vemos a través de un espejo es tan descriptible con base en la física que conocemos como lo que vemos en forma directa. Por esta razón, los físicos consideraban a la paridad como inviolable.

Hacia 1955 la evidencia experimental acumulada seguía indicando una notable similitud entre las vidas medias, por un lado y las masas de las partículas T y θ , por otro. Escépticos sobre una coincidencia tal, los chinos Cheng Ning Yang y su alumno Tsung Dao Lee se dieron cuenta de que, respecto de la fuerza débil propuesta por Fermi años atrás, nadie había comprobado la validez del principio de paridad, e hicieron notar que, si esta regla fuera violada por la fuerza de Fermi, no habría problema en unificar la T y la θ en una sola partícula. Las pruebas experimentales sobre esta hipótesis fueron realizadas por primera vez por otro investigador chino, la señora Chien Shiung Wu de la Universidad de Columbia. Por su trabajo teórico, Lee y Yang recibieron el Premio Nobel en 1957.

En su experimento, Wu observó el decaimiento del $\text{Co}60$ por emisión de rayos β (electrones). Como se vio antes, los electrones poseen un momento magnético intrínseco debido a su espín, de manera que se les puede considerar como pequeños imanes. Si la muestra radiactiva es expuesta a un campo magnético externo, los β emitidos se alinean con el campo rompiendo la isotropía. Es decir, los electrones se polarizan por la influencia del campo magnético externo. Si el decaimiento β conservase la paridad, deberían emitirse tantos electrones cuyo espín fuese paralelo respecto al campo externo como en una dirección antiparalela, es decir, dirigida en el sentido inverso. La observación de Wu indicó claramente que esta simetría no existía.

La violación de la paridad fue sólo el primero de los golpes que recibieran los llamados principios de conjugación PTC (paridad, tiempo y carga). Según estos, no sólo el cambio de paridad, sino también la inversión en el sentido del tiempo o el intercambio de partículas por sus antipartículas debería dejar inalterada la descripción física. En la actualidad sólo sobrevive, como principio, aquel en el que la conjugación simultánea de las tres variables P, T y C deja invariante la descripción de cualquier fenómeno físico, incluido el decaimiento β , efecto de la fuerza débil.

X.4. LAS PARTÍCULAS "EXTRAÑAS"

Otra sorpresa acarreada por las nuevas partículas, en este caso las Λ , se refiere a una marcada asimetría entre la relativa facilidad con que éstas se producen, comparada con su vida media. La asociación entre la probabilidad de crear una partícula y su vida media indica que las partículas que se crean fácilmente viven poco y viceversa. Sin embargo, las partículas V parecían tener una vida media notablemente mayor que la esperada de acuerdo con esta regla. Para resolver este dilema, el estadounidense Murray Gell-Mann, de quien sabremos más en el próximo capítulo, propuso la existencia de un nuevo número cuántico llamado *extrañeza*, que se conserva en las interacciones en que actúa la fuerza fuerte, pero no en aquellas en que actúa la débil. De esta forma, en la creación de partículas Λ , que ocurre vía la interacción fuerte se conserva la extrañeza al crearse simultáneamente una partícula asociada. Sin embargo, al decaer por acción de la fuerza débil, la violación de la extrañeza aumenta la vida media.

El decaimiento de unas partículas Λ , en otras partículas Λ , indicaba, claramente, la existencia de un espectro de masas. Las primeras mediciones de estas masas permitieron la identificación de partículas más pesadas. La denominación propuesta siguió utilizando a la letra Λ , para los hiperones más ligeros, seguida de la Σ y la Ξ en orden ascendente de masa.

X.5. Y... MUCHAS MÁS

La mayoría de los resultados descritos hasta ahora habían sido obtenidos, como siempre, con base en observaciones de rayos cósmicos. Este panorama habría de cambiar hacia mediados de la década de 1950, pues los aceleradores de partículas por esas fechas alcanzaron las energías necesarias, con la enorme ventaja de producir haces muy intensos de partículas con energía uniforme.

Entre los primeros estudios interesantes estuvieron los de Fermi, quien, con un ciclotrón en la Universidad de Chicago, produjo haces de piones que utilizaba para bombardear protones. En 1953 sus observaciones indicaron la existencia de *resonancias* pion-nucleón, que él denominó partículas Δ . Las resonancias pueden verse como partículas de vida media muy corta.

Hacia 1955 entró en operación el acelerador Bevatron, en Berkeley, capaz de producir haces de protones de energías del orden de los miles de MeV.^{13*}  Esta energía es la mínima necesaria para producir antiprotones. El experimento, realizado por O. Chamberlain, Emilio Segre, C. E. Wiegand y T. Ypsilantis, demostró que la predicción de Dirac sobre la existencia de antimateria era válida también para el protón. Segre y Chamberlain recibieron el Premio Nobel 1959 por este logro. En 1956, B. Cook, G. R. Lambertson, O. Piccioni y W. A. Wentzel, con el mismo acelerador, descubrieron el antineutrón. La simetría entre materia y antimateria, en el sentido de que cada partícula tiene su antipartícula, ha sido comprobada sistemáticamente desde entonces.

Como ya vimos, en 1956 Reines y Cowan demostraron la existencia del neutrino, utilizando el reactor de Savannah River. Poco tiempo después, mientras el dilema sobre la paridad se resolvía, los físicos experimentales intentaron producir haces de neutrinos para poder estudiar con detalle la interacción débil. Un proceso que debía ocurrir con cierta frecuencia, pero que jamás se había observado, era el decaimiento de un muon en un electrón más un rayo γ . Tal proceso se entendió como la emisión de un electrón acompañado de un par neutrino-antineutrino en que la aniquilación de estos últimos producía la γ mencionada. ¿Qué inhibía este mecanismo? Una posibilidad era que hubiera algo que evitara que el par neutrino-antineutrino se aniquilara, indicando la existencia de dos tipos distinguibles de neutrinos.

A principios de la década de 1960 en el laboratorio americano de Brookhaven se montó un experimento para comprobar esta hipótesis. El resultado, luego de casi un año de experimentación, fue que efectivamente existen dos tipos de neutrino, uno asociado al electrón y otro asociado al muon. De esta forma, al decaer el muon se emite

un electrón con su antineutrino más un *neutrino muónico*, de manera que neutrino y antineutrino no se aniquilan por no ser una antipartícula del otro.

Además de las resonancias Δ del nucleón, en 1960 M. Alston y su grupo encontraron la primera resonancia asociada a una partícula *extraña*, la Σ^- . El año siguiente, el mismo grupo descubrió la primera resonancia para una Λ , y en 1962, G. M. Pjerrou informó sobre la primera resonancia para una Ξ . Entre los mesones, las sorpresas aparecieron casi simultáneamente en 1961, en forma de resonancias *no extrañas*. Primero apareció la p , descubierta por D. Stonehill y sus colaboradores; posteriormente el grupo de B. Maglic observó la ω y, finalmente la η fue encontrada por A. Pevsner y colaboradores.

Hacia 1963, el número de partículas *elementales* había aumentado hasta casi un ciento. Las sensibles a la interacción fuerte, ahora denominadas *hadrones*, que englobaban a los bariones y a los mesones, formaban el grueso de ellas. Con sólo cuatro leptones, sin contar sus respectivas antipartículas, el número considerablemente mayor de hadrones descubiertos hasta entonces, y especialmente la existencia de estados excitados para muchos de ellos, indicaba marcadamente la existencia de una estructura interna en estas partículas, es decir que su calidad de elementales era ya cuestionable. ¿De qué están hechos los hadrones?

X.6. RESUMEN

El mismo año en que se descubrió el pion cargado, Clifford y Butler iniciaron el descubrimiento de nuevas partículas (sección X.2). La nueva fenomenología puso de manifiesto la violación, por parte de la interacción débil, de la *simetría especular* (sección x.3). Otra propiedad interesante de las nuevas partículas se explica si se supone una nueva cualidad en la naturaleza: la *extrañeza* (sección X.4). La construcción de aceleradores de partículas cada vez más potentes dio por resultado el descubrimiento de una nueva espectroscopía (sección X.5).



[Nota 13] 

13 Un mega electrón-volt o MeV es la energía cinética que adquiere un electrón en un campo eléctrico generado por una diferencia de potencial de 10^6 voltios. Mil MeV, son un GeV, es decir, un giga electrón-volt.

Inicio |

XI. LOS CUARKS: GELL-MANN Y ZWEIG

XI.1. INTRODUCCIÓN

DEL gran volumen de datos acumulados hacia principios de la década de 1960, comenzaron a hacerse evidentes ciertas regularidades interesantes. Como se ha visto, las partículas podían ser clasificadas, según si eran o no sensibles a la fuerza nuclear fuerte, en hadrones y leptones. Los hadrones más ligeros son cientos de veces más pesados que el electrón, lo que podría indicar alguna relación entre su masa y la magnitud de la fuerza que los gobierna. Además, los hadrones aparecen en grupos. Por ejemplo, el neutrón y el protón, desde el punto de vista de sus números cuánticos, son idénticos excepto por su carga eléctrica y la ligera diferencia de sus masas. Esto fue tomado como indicación de que podría tratarse de dos aspectos de una misma partícula: el *nucleón*. A partir de entonces siguieron apareciendo familias de partículas de este tipo, denominadas *multipletes de carga*, como los piones (3), las Σ (3) y las Ξ (2). Otro hallazgo notable fue el descubrimiento de todo un espectro de *estados excitados* para varios de los hadrones. ¿Podría existir una subestructura?

XI.2. BUSCANDO UN ORDEN

Ya en 1949 Fermi y su alumno chino Chen Ning Yang, el mismo que predijo la violación de la paridad para los procesos débiles, habían sugerido la posibilidad de que los mesones no fueran elementales sino que estuvieran compuestos de pares nucleón-antinucleón. El descubrimiento de las partículas extrañas motivó luego al japonés Shoichi Sakata a extender estas ideas con la inclusión de la Λ como constituyente fundamental de los mesones. Se trataba entonces de encontrar una manera de asociar un par específico de estos bariones a cada mesón. Debido a las diferentes maneras de acoplar los números cuánticos, cada par barión-antibarión podía, según ellos, generar una variedad de mesones distintos. En 1959 los alumnos de Sakata, M. Ikeda, Y. Ohnuki y S. Ogawa, estudiaron este problema, encontrando que los tres hadrones, el *triplete* (n, p, Λ), podían ser asociados a una configuración tridimensional de un grupo de transformaciones matemáticas denominado $SU(3)$, y las respectivas antipartículas a otra configuración del mismo tipo.

Los fundamentos matemáticos de la teoría de grupos utilizada entonces fueron desarrollados en el siglo XIX por el noruego Sophus Lie. Las siglas $SU(3)$ significan (grupo) unitario especial de matrices de 3 X 3 dimensiones. En el caso de mesones de espín cero, el acoplamiento barión-antibarión estudiado por los alumnos de Sakata permite nueve alternativas, ocho de las cuales forman una familia u *octete*. Sakata y sus alumnos relacionaron a este octete con el conjunto de los siete mesones entonces conocidos: los tres piones, los cuatro mesones K, más una octava partícula aún desconocida. Esta última, el mesón $-\eta$, fue descubierta dos años después.

El propósito de agrupar hadrones en multipletes era encontrar una *simetría mayor* que permitiera descubrir relaciones más estrechas entre estas partículas. Por ejemplo, la similitud entre la masa del protón y del neutrón puso de manifiesto la idea de *isospín*. Este número cuántico distingue entre los dos estados de carga del nucleón (protón o neutrón). Si la masa de p y n fuera idéntica la simetría sería exacta; sin embargo, las fuerzas electromagnética y débil alteran (o rompen) esta simetría separando las masas de los nucleones. La separación, en este caso, es pequeña porque la fuerza responsable de la ruptura es también pequeña comparada con la fuerza fuerte. Este mismo argumento permite entender la ligera desviación entre las masas de los piones y también entre los mesones K. La mayor separación entre las masas de los piones y los mesones K se pensó, podría deberse al rompimiento de una simetría mayor asociada a diferentes componentes de la fuerza nuclear fuerte.

XI.3. LA VÍA DEL OCTETE

A pesar de que la propuesta del triplete (n, p, Λ) como componente fundamental pronto encontró objeciones serias, el *juego de las simetrías* había empezado y varios investigadores comenzaron a tratar de encontrar relaciones entre grupos de partículas. En 1961 el físico estadounidense Murray Gell-Mann, el israelí Yuval Ne'eman, y otros, observaron que era posible agrupar a los nucleones, las Λ las Σ y las Ξ en otro octete (véase figura 10). Uno de los éxitos de este método fue la predicción de una relación entre las masas promedio de los miembros del octete de bariones: la masa del nucleón más la masa de la Ξ debe ser igual a la mitad de la suma de la masa de la Λ más un tercio de la masa de la Σ . Esta igualdad se cumple con una precisión mejor al 1 %, lo que es de notarse si se toma en cuenta que las relaciones de simetría eran casi una adivinanza, dada la gran

separación entre masas. Todo esto apoyaría, entonces, la idea de una ruptura de la simetría mayor. Pronto se encontró que las resonancias de los bariones también se agrupan en octetes. Si los bariones fueran partículas independientes entre sí, cualquier similitud sería fortuita. Por lo tanto, las regularidades observadas indicaban alguna relación íntima entre ellas.

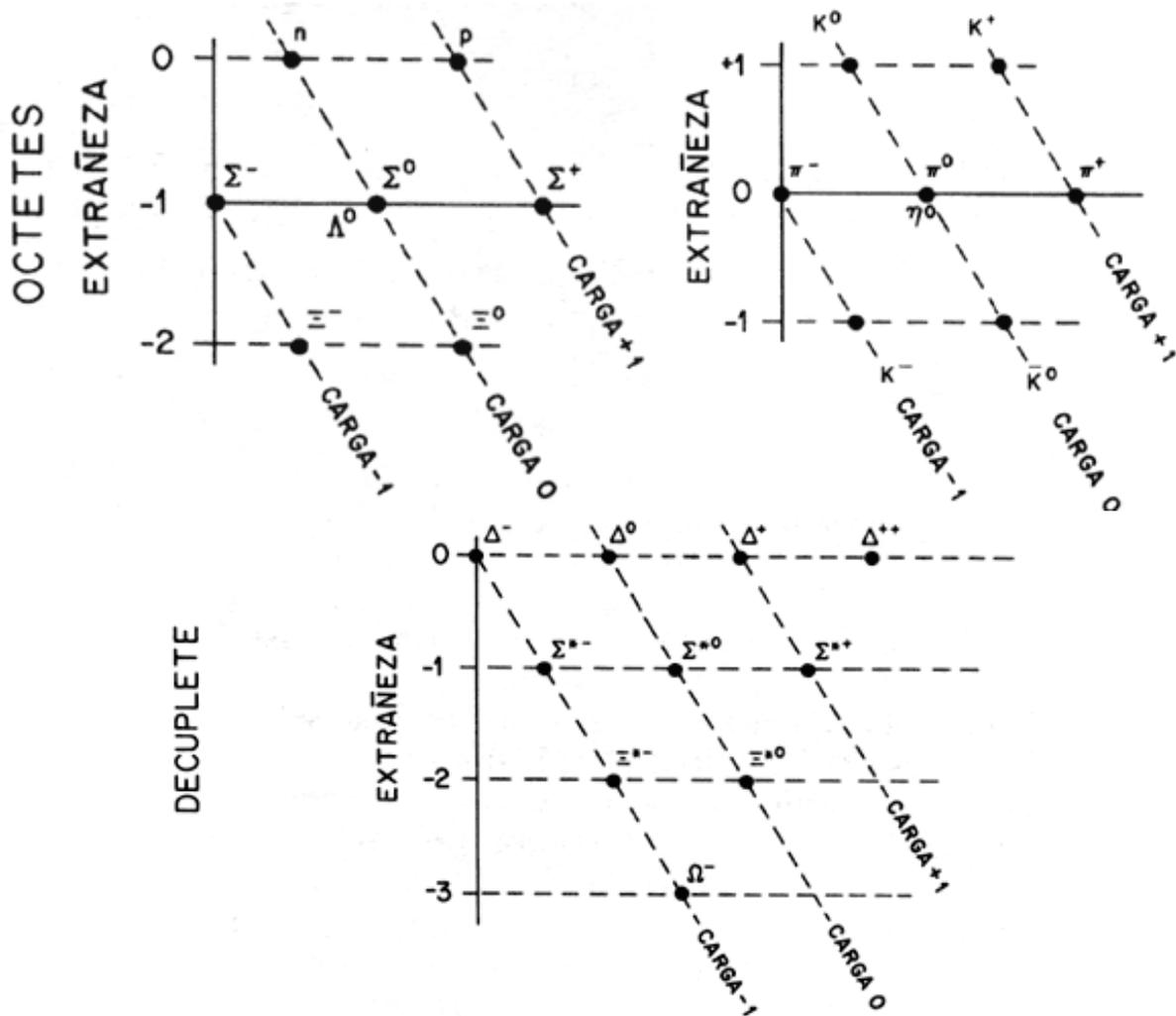


Figura 10. Múltiples hadrónicos. Sakata, Gell-Mann y Ne'eman encontraron que al considerar la extrañeza y la carga eléctrica de los hadrones, éstos pueden ser agrupados según su masa en *supermultipletes*. Los bariones más ligeros (arriba izquierda) y los mesones (arriba derecha) en octetes y los bariones más pesados en un decuplete. Originalmente, dos huecos en estos diagramas (el mesón η y la ω) quedaron como predicciones cuya confirmación dio gran fuerza al modelo de los cuarks.

Hacia fines de 1963, el juego de las simetrías no era la única línea de investigación para encontrar relaciones entre partículas elementales. Otras opciones incluían buscar correlaciones entre la masa de las partículas y su momento angular, en las llamadas *trayectorias de Regge*, en honor al físico italiano Tullio Regge, quien las introdujo por primera vez en 1959. Otros grupos buscaban explicar un modelo *democrático*, en el que, sin considerar a ninguna partícula como elemental, se postulaba que estaban compuestas por diversas combinaciones de ellas mismas. Sin embargo, estas y otras ideas parecidas fueron cediendo terreno al modelo de simetrías en la medida en que éste fue teniendo mayor éxito.

En 1962, luego del descubrimiento de la primera resonancia Ξ , Gell-Mann sugirió que esta partícula podía formar

un *decuplete*, también predicho por SU (3), con los multipletes Δ y Σ . De ser así, debería existir un nuevo barión: la *omega- Ω^-* . A principios de 1964, V. E. Barnes y su grupo observaron una partícula con las propiedades predichas por Gell-Mann. Quedaban, sin embargo, dos problemas evidentes: el SU (3) predice muchos más *supermultipletes* que los que observamos y, más importante aún, no existía una interpretación física que respaldase al modelo.

XI.4. LOS CUARKS

A principios de 1964, Gell-Mann y George Zweig, independientemente, hicieron notar que las simetrías observadas hasta entonces podían ser explicadas si se suponía la existencia de subpartículas, que Gell-Mann llamó *cuarks*, de las que estarían constituidos todos los hadrones. El modelo postula tres tipos (*sabores*) de cuarks: *u*, *d* y *s* (del inglés *up*, *down* y *strange*), que se agruparían por temas para formar bariones y por pares cuark-anticuark para formar mesones. Con estas reglas, se puede demostrar que sólo hay nueve combinaciones posibles cuark-anticuark para generar mesones y que éstas se agrupan en un octete más un singlete. En el caso de los bariones, hay 27 combinaciones de tres cuarks que se separan en un singlete, dos octetes y un decuplete. Estos supermultipletes coincidían exactamente con las familias observadas de hadrones.

El modelo de Gell-Mann y Zweig, sin embargo, mostraba un inconveniente: los cuarks deberían tener por carga eléctrica una fracción ($1/3$ para *u* y *s*, y $2/3$ para *d*) de la carga del electrón. Partículas con esa propiedad deberían ser fáciles de identificar y, sin embargo, jamás se habían observado. ¿Se trataría, tan sólo, de una regla nemotécnica para reproducir lo observado, o habría una explicación física que respaldase tal modelo? Los experimentos para buscar cuarks proliferaron. Hasta la fecha, sin embargo, no existe evidencia convincente de su existencia como entes aislados. Quedaban, además, muchas preguntas pendientes; por ejemplo, era necesario explicar qué une a los cuarks, qué fuerzas son responsables de la estabilidad de los hadrones, qué previene que los cuarks se unan en grupos de cuatro o más, por qué los núcleos no colapsan en una sopa de cuarks.

Otra objeción que surgió de inmediato se relaciona con la estadística de los cuarks. Estas partículas deben tener espín semientero, es decir, son fermiones. Como tales, debido al principio de exclusión de Pauli, un barión no debería contener dos cuarks con los mismos números cuánticos. Sin embargo, en las reglas del modelo original de Gell-Mann para construir bariones, era necesario introducir dos, y hasta tres cuarks idénticos.

XI.5. EL COLOR

El mismo año en que apareció el modelo de los cuarks, Oscar Wallace Greenberg propuso que los cuarks no obedecen ni la estadística de Fermi, ni la de Bose, sino una *paraestadística* en que se permitía a tres cuarks idénticos ocupar un mismo estado. Una alternativa, aparentemente independiente, fue publicada por Moo-Young Han y Yoichiro Nambu en 1965. Ésta consistía en asociar a los cuarks una cualidad extra, parecida a la carga eléctrica, sólo que en tres variedades, que posteriormente se denominó *color*.

Según el modelo de Han y Nambu, existen tres colores, por ejemplo: *rojo*, *amarillo* y *azul*. Los cuarks están dotados de *color* (color *positivo*) y los anticuarks de *anticolor* (color *negativo*). La suma de un color con su anticolor, así como la suma de los tres colores, da como resultado partículas *incolores* (color cero). Color y anticolor, así como colores distintos, se atraen. Colores o anticolors iguales se repelen. El resultado: los cuarks tienden a agruparse, ya sea por pares cuark-anticuark de un mismo color, formando mesones incolores, ya sea por ternas de cuarks de diferentes colores, formando bariones incolores. En resumen, el color de los hadrones es siempre cero. En 1966 Greenberg demostró que el modelo del color era equivalente a su modelo de la paraestadística, razón por la cual algunos autores atribuyen a Greenberg la introducción del color en la teoría de los cuarks.

El modelo del color resuelve elegantemente el problema de la estadística, ya que ninguno de los cuarks que forman un barión son idénticos, pues poseen distinto color. Los colores introducidos al formalismo de los grupos agregan una nueva representación de SU(3). La fuerza entre los cuarks es transmitida por los *gluones* (del inglés *glue*, pegamento). Los gluones intercambian el color de los cuarks. Con tres colores y tres anticolors se pueden lograr nueve combinaciones; sin embargo, una de ellas recibe contribuciones iguales de rojo combinado con antirrojo, azul con antiazul y amarillo con antiamarillo, lo que da por resultado una mezcla incolora. Las ocho combinaciones restantes generan el octete de gluones de color.

La introducción del color tiene como consecuencia multiplicar el número de cuarks por tres. Sin embargo, la

condición de que los hadrones sean incoloros evita que aumente el número de hadrones predichos, pues todas las combinaciones de cuarks que contienen color diferente de cero se eliminan. Si bien la inclusión del color daba una salida al problema de la estadística, restaba elegancia al modelo original que parecía explicar el origen de más de ochenta hadrones conocidos entonces con base en sólo tres cuarks. Otra complicación era justificar las reglas de interacción entre los cuarks de colores, y dar una formulación para el *campo gluónico*.

XI.6. LOS PARTONES

El modelo de los cuarks siguió siendo visto con escepticismo hasta que en 1968 aparecieron las primeras evidencias experimentales directas sobre la existencia de una estructura interna para el protón. Siguiendo un criterio parecido al que usó Rutherford sesenta años antes para estudiar la distribución de carga en el átomo, un grupo de científicos norteamericanos guiados por Henry W. Kendall y Wolfgang K. H. Panofsky realizaron una serie de experimentos para determinar la distribución de carga dentro del protón. El experimento consistió en bombardear protones con electrones de muy alta energía.

El modelo de los cuarks sólo sugería la existencia de tres partículas dentro del nucleón. Se ignoraba cómo estaban ordenados dentro y la forma de la fuerza que los unía, si bien ésta debería ser lo suficientemente grande como para que jamás se hubiera visto un cuark libre. Con estas bases, se desarrolló una teoría de la dispersión de leptones por un conjunto de partículas altamente correlacionadas. Sin embargo, los resultados experimentales no concordaban con las predicciones. Poco tiempo después, el controvertido pero genial físico estadounidense Richard Phillips Feynman propuso un modelo alternativo.

Según Feynman, el leptón incidente ve al protón como una bolsa llena de partículas sin estructura, que él denominó *partones*, y que, con excepción de las paredes de la bolsa, se mueven libremente dentro del nucleón. Las predicciones del modelo de Feynman reproducían algunos aspectos importantes de los datos, pero quedaba por especificar qué eran los partones.

Los resultados anteriores despertaron gran interés entre las comunidades teóricas y experimentales. Pronto el grupo Kendall-Panofsky y otros en Europa utilizaron haces de muones y de neutrinos para estudiar el fenómeno. Como resultado se llegó a la conclusión de que los centros dispersores dentro del protón eran consistentes con partículas de espín $1/2$ y carga eléctrica fraccionaria.

¿Qué eran los partones? La suposición de que se tratara simplemente de cuarks no ajustaba los datos experimentales. Se intentó agregar un *mar* de pares cuark-anticuark generado por el campo de atracción fuerte, con resultados igualmente negativos. Sólo al suponer la presencia de partículas neutras se logró ajustar los datos. Los gluones, como los fotones, son partículas neutras, sin masa y con espín 1, por lo que fue lógico suponer que eran éstas las partículas postuladas por el cálculo. Sin embargo había necesidad de una evidencia independiente sobre la existencia de color en los cuarks.

XI.7. CROMODINÁMICA CUÁNTICA

En ausencia de cuarks libres, la idea de color sólo podía comprobarse indirectamente comparando predicciones de modelos con y sin color. Un experimento de este tipo fue realizado en 1970 por un grupo del laboratorio de Frascati, cerca de Roma. Las colisiones entre electrones y positrones de gran velocidad disipan energía produciendo pares partícula-antipartícula (leptones y/o hadrones). La producción relativa entre pares de hadrones y, digamos, pares de muones depende de un coeficiente llamado R . A energías suficientemente altas, R es simplemente la suma de los cuadrados de las cargas de todos los cuarks y todos los leptones. Suponiendo que sólo hay dos leptones cargados, el electrón y el muon, el valor medido de R puede utilizarse para deducir el número de cuarks que existen. Por ejemplo, si sólo hay tres cuarks, R debería valer $2/3$, mientras que si hay nueve cuarks el resultado debería ser 2. El experimento de Frascati, medido a 1.5 GeV (1 GeV = 1 000 MeV), encontró que el parámetro R era de 2.5, hecho que apoyaba fuertemente la teoría del color.

La confirmación de la existencia de cuarks de colores abrió el camino para un enorme esfuerzo teórico por entender la dinámica caprichosa de estos objetos. Los cuarks, contra lo que se pensaba, parecen moverse libremente dentro de los hadrones, y sin embargo, no escapan. La solución a esta paradoja requirió una formulación cuántica de la teoría del campo gluónico: la *cromodinámica cuántica (CC)*. Esta teoría es equivalente a la electrodinámica cuántica (*EC*), la cual explica el campo fotónico. En el caso de la *EC*, como se ha visto, la magnitud del campo electromagnético disminuye con el cuadrado de la distancia entre las cargas eléctricas. Esta

ley presenta un problema serio cuando se trata de una partícula como el electrón que, supuestamente, carece de dimensiones. Si el electrón no tiene un radio finito, por ser *puntual*, el campo eléctrico que genera tiende a ser infinito en la medida en que nos acercamos a él.

El problema de los *infinitos* en *EC*, que causó ciertos dolores de cabeza al propio Dirac mientras desarrollaba la primera versión de esa teoría, fue resuelto por un método conocido como *renormalización*. Este consiste en suponer que, si bien el electrón no tiene dimensiones, la energía del campo se *materializa* produciendo un *mar* de pares (partícula-antipartícula) *virtuales*. La generación de estos pares es *virtual* en el sentido de que, al crearse, violan temporalmente el principio de conservación de la energía, solapadas por otro principio, el de la incertidumbre de Heisenberg, lo que garantiza que no pueden ser observadas directamente. Sin embargo, estas partículas se encargan de *apantallar* la carga eléctrica infinita que tendría un electrón *desnudo* (sin su *mar* de pares virtuales), disminuyendo el campo eléctrico que ésta genera. El número de pares aumenta con la distancia, y se reduce en la misma proporción el campo eléctrico, lo que da por resultado un campo equivalente al de una carga finita.

XI.8. EL CONFINAMIENTO

En el caso de la *CC*, los cuarks desnudos también están rodeados por un mar de pares cuark-anticuark virtuales que apantallan la *carga de color*. Sin embargo, a diferencia del caso de la *EC*, en la que los emisores del campo son neutros, en *CC* los gluones poseen una carga de color neta, diferente de cero. Esto tiene como consecuencia que, al aumentar el número de gluones con la distancia, la carga de color aumenta en la misma proporción. Es decir, la fuerza entre cuarks no disminuye con la distancia sino que aumenta. Esto, denominado *confinamiento*, evita que los cuarks escapen de los hadrones que los contienen.

El efecto neto es equivalente a imaginar que los hadrones estén compuestos por conjuntos de cuarks ligados por *resortes*. Mientras se mantienen juntos, la fuerza de los resortes es débil y se comportan como libres. Si se agrega energía, de manera que los cuarks tiendan a alejarse, la fuerza de atracción entre ellos aumenta por la acción de los resortes. Un cuark puede alejarse de un hadrón hasta el punto en que la energía de atracción del campo es equivalente a la masa de un par cuark-anticuark. Entonces, el resorte se *rompe* pero el cuark no queda libre, pues, por atracción de color, el antiquark recién creado se le une a través de un nuevo resorte, mientras que el nuevo cuark toma el lugar del cuark que se separó. En resumen, la predicción es que, tal como la evidencia experimental lo indica, los cuarks no pueden quedar aislados por mucho tiempo, y que al estar unidos en un hadrón se comportan casi como si estuvieran libres. El confinamiento gluónico da una explicación a la bolsa del modelo de partones de Feynman.

Desde el punto de vista de las cuatro fuerzas fundamentales, gravitacional, electromagnética, fuerte y débil, la aparición de los cuarks no agregó una más, sino que dio una explicación más básica a la fuerza fuerte. En este sentido, la fuerza nuclear fuerte que sienten los nucleones en el núcleo pasó a ser vista como una interacción efectiva externa, resultado de las interacciones entre cuarks. Esta situación se asemeja a la fuerza entre moléculas, denominada de Van der Waals, que es la expresión externa de la interacción electromagnética entre los electrones y el núcleo atómico.

XI.9. EL "ENCANTO"

Desde la postulación del modelo de los cuarks, en 1964, los norteamericanos James Daniel Bjorken y Sheldon

Lee Glashow propusieron la existencia de un cuarto *sabor* para los cuarks: el *encanto*^{14*}  Con miras a una posible teoría unificada de las partículas elementales se buscaban simetrías entre leptones y cuarks. Como se ha dicho, hasta entonces se habían descubierto cuatro leptones (el electrón, el muon, y sus respectivos neutrinos) y sólo tres sabores de cuarks (*u*, *d* y *s*) ¿Habría un cuarto sabor? La sistemática observada en la interacción de partículas, hacia 1967, también motivó a John Iliopoulos, Luciano Maiani y al propio Glashow a insistir en la existencia de un cuarto sabor. Sin embargo, estos argumentos aislados no eran suficientes para tomar en serio tal hipótesis.

Desde 1970 las medidas del coeficiente *R* en la interacción entre leptones fueron repetidas a energías cada vez mayores, a medida que los aceleradores lo permitían. Como se mencionó, el valor de *R* debería tender a una constante, a altas energías. En 1973, sin embargo, las medidas a 2 GeV dieron un valor de $R = 4.7$ y, posteriormente, una medida a 2.5 GeV mostró un valor de $R = 6.0$. De ser cierto, esto implicaría que las

conclusiones sobre el color de los cuarks eran prematuras. Intrigado por este fenómeno, en el laboratorio SLAC de Stanford, Burton Richter y su grupo iniciaron un programa de medidas sistemáticas de R , a intervalos de energías más finos. En noviembre de 1974, descubrieron que el aumento en R se debía a la presencia de una resonancia enorme y muy aguda localizada a 3.1 GeV, que denominaron partícula Ψ . La interpretación de este fenómeno requería, inequívocamente, la existencia del cuarto sabor.

Curiosamente, por la misma época, pero con una motivación diferente, Samuel Ting y un grupo del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) que trabajaba en el laboratorio de Brookhaven buscaban un nuevo mesón. Meses antes que el grupo de SLAC, Ting había encontrado la misma resonancia pero, cauteloso, repetía sus medidas para confirmar su hallazgo. Horas después de enterarse del descubrimiento de Richter, el propio Ting anunció sus resultados bautizando a su partícula como J . Esta discrepancia en nomenclaturas dio como resultado que, en la actualidad, a esa resonancia se le conozca como J/Ψ . Diez días después de este descubrimiento, el grupo de SLAC encontró una nueva resonancia a 3.7 GeV, llamada Ψ' .

La aparición de un nuevo tipo de cuark, más pesado, implicaba un aumento en el número de hadrones y resonancias hadrónicas. Las J/Ψ y Ψ' son resonancias de cuark-anticuark encantados. En la actualidad se conocen nueve resonancias de este tipo. En junio de 1976 el grupo dirigido por Gerson Goldhaber anunció las primeras evidencias de bariones encantados neutros y, poco después, los primeros bariones cargados de este tipo. La espectroscopía de bariones encantados también se ajustó al postulado de un nuevo sabor. El encanto quedó establecido, aumentando así el número de cuarks a doce.

XI.10. UN NUEVO LEPTÓN

Como tantas otras veces, los cuatro leptones y los cuatro sabores de cuarks daban la impresión de haber llegado a una etapa de armonía, que sugería el fin del camino. Pero, como también es costumbre, este panorama habría de cambiar en pocos meses. Una vez resuelto el dilema de las resonancias encantadas, se podía extraer un valor estable para R . Con un nuevo cuark, cuya carga eléctrica resultó ser $2/3$ de la del electrón, el valor previsible de R debería ser 3.3; sin embargo, el valor observado era cercano a 5.

En agosto de 1975, un grupo del SLAC dirigido por Martin Lewis Perl reportó haber encontrado evidencias para la existencia de un nuevo leptón, al que nombraron T (por ser el tercero). Un nuevo miembro de la familia de leptones era bastante inesperado; sin embargo, llegaba justo a tiempo para explicar la mayor parte de la discrepancia en el valor de R , ya que la T tiene, como el electrón y el muon, una carga eléctrica unitaria. El nuevo leptón es casi cuatro mil veces más pesado que el electrón, o sea, tiene veinte veces la masa del muon. Pero... ¿y la simetría entre el número de cuarks y el de leptones?

XI.11. LA "BELLEZA" Y LA "VERDAD"

Nuevamente, motivados por una posible simetría, Leon Max Lederman y su grupo del *Fermilab*, cerca de Chicago, analizaron las predicciones para la masa de un nuevo cuark. Llevando casi hasta el límite de capacidad a su acelerador, en 1977 descubrieron una nueva resonancia que denominaron τ . Pocos meses después, al mejorar su resolución en energía, el mismo grupo descubrió que se trataba de tres resonancias, y no sólo de una. Eran los primeros miembros del espectro de resonancias de mesones asociados a un nuevo sabor de cuarks: la *belleza*^{15*}

 fue descubierta y dada a conocer por primera vez en 1980 por D. Andrews y su grupo de la Universidad de Cornell.

El descubrimiento del leptón T sugiere la existencia de un neutrino que lo acompañe. En tal caso, la famosa simetría leptón-cuark implicaría un sexto sabor para los cuarks: la *verdad*^{16*}  Sin embargo, en los diez años posteriores al descubrimiento de la T y la belleza, no se han podido encontrar evidencias experimentales ni del nuevo neutrino ni de la verdad. En el primer caso, se puede deber a un problema de estadística, ya que la producción de leptones T dista mucho de concretarse en un haz lo suficientemente intenso como para estudiar sus interacciones. En cuanto a los cuarks con verdad, se estima que su masa debe ser superior a los 23 GeV, pero nadie sabe qué tanto. Por ello éste es actualmente uno de los temas favoritos en las solicitudes de apoyo económico para aumentar la energía de los aceleradores.

En lo descrito hasta ahora, el panorama de las partículas que hoy consideramos como *verdaderamente*

elementales comienza, nuevamente, a verse sobrepoblado. El *menú* actual contiene casi sesenta partículas: cinco leptones, quince cuarks (cinco sabores de tres colores), ocho gluones, las antipartículas de todos éstos y además el fotón. Todo ello sin considerar partículas que aún no hemos discutido como las transmisoras del campo débil y del campo gravitatorio, además de la certeza sobre la existencia de, al menos, los sextos miembros de las familias de los cuarks y los leptones. ¿Estaremos en la víspera de una nueva síntesis?

XI.12. RESUMEN

Los primeros intentos por descubrir una subestructura para los hadrones se dieron en la década de 1950, años en los que se introdujeron las ideas matemáticas de grupos de simetrías (sección XI.2); luego de algunos fracasos, surgieron algunas regularidades que permitieron, incluso, predecir con éxito la existencia de nuevas partículas (sección XI.3). Gell-Mann, especie de Mendeleev moderno, pronto se dio cuenta de que un modelo simple, con base en tres partículas, los *cuarks*, explicaba gran parte de la fenomenología observada (sección XI.4). Pronto surgen algunas inconsistencias que requieren agregar al modelo una nueva cualidad: el *color* (sección XI.5). El escepticismo de muchos por los cuarks de colores se redujo al aparecer evidencias experimentales de una subestructura para el protón (sección XI.6). Con esto, la física teórica tuvo que desarrollar el formalismo que permitiese cálculos más cuantitativos: la *cromodinámica cuántica* (sección XI.7). Los primeros resultados de este esfuerzo permitieron explicar algunas incógnitas, como el confinamiento de los cuarks (sección XI.8). La armonía de esta teoría con la fenomenología de las interacciones débiles sugirió la existencia de un nuevo cuark: el *encantado* (sección XI.9). La aparición de nuevos leptones (sección XI.10) requirió más añadidos al modelo de los cuarks (sección XI. 11).



14 El símbolo para los cuarks *encantados* es una *c*, del inglés *charm*.

Inicio |

[Nota 15] 

15 Los cuarks *bellos* se simbolizan por la letra *b* del inglés *beauty*. Otros autores denominan *bottom* a este mismo sabor.

Inicio |

[Nota 16] 

16 El símbolo en este caso es una t de *truth*. Otros autores lo llaman *top*.

Inicio |

XII. UNIFICACIÓN ELECTRODÉBIL: SALAM, WEINBERG, VAN DEER MEER Y RUBBIA

XII.1 INTRODUCCIÓN

EXISTE una relación muy estrecha entre el concepto de partícula y el de fuerza. A las partículas se les clasifica según el tipo de fuerza al que son sensibles, mientras que los campos de fuerza son transmitidos por partículas. Otra idea íntimamente ligada a las partículas y fuerzas es la de simetría. Hasta ahora se ha revisado el avance en el descubrimiento de la estructura *más elemental* de la materia en lo referente a sus partículas. Este capítulo enfoca la evolución de la idea de una *fuerza elemental*, las simetrías encontradas, sus predicciones en términos de partículas *intermediarias* y su confirmación experimental.

XII.2. SIMETRÍA ENTRE FUERZAS

El ser humano se vale constantemente de simetrías para aplicar a diversas situaciones una cantidad reducida de leyes físicas fundamentales. Galileo y Newton, por ejemplo, descubrieron que las leyes de la caída libre son simétricas con respecto a los desplazamientos en la posición, la orientación y el tiempo. O sea, si se eliminan factores externos, la descripción del movimiento es independiente de dónde se realicen los experimentos, desde qué ángulo se les observe o cuándo ocurran.

Cada simetría tiene como consecuencia una ley de *conservación*, entendida ésta como una cualidad que no cambia en el tiempo. Por ejemplo, que los resultados de un experimento sean independientes del lugar en el que se realicen es una invariancia *translacional* en el espacio que implica la conservación del ímpetu o momento lineal. Lo inverso también es cierto: cuando una cantidad se conserva, esto indica la existencia de una simetría. La conservación de la energía implica una invariancia *translacional* en el tiempo, es decir, que no importa a partir de cuándo empezamos a medir el tiempo. La invariancia respecto de la orientación se refleja en la conservación del momento angular.

Hacia principios del siglo pasado se sabía de la existencia de tres tipos de fuerzas en la naturaleza: la gravitacional entre las masas, la eléctrica que actúa entre las cargas y la magnética entre los imanes. Los trabajos de Faraday y Ampère demostraron la existencia de una simetría entre las fuerzas eléctrica y magnética al observar que cargas en movimiento generan campos magnéticos y que campos magnéticos variables generan corrientes eléctricas. La interdependencia de estas fuerzas indicó que se trataba de distintas manifestaciones de una sola fuerza: la *electromagnética*.

La formulación de la teoría de los campos correspondientes a las dos fuerzas mencionadas fue propuesta por James Clerk Maxwell (la electromagnética) en 1868 y por Albert Einstein (la gravitacional) a principios del presente siglo. Existen ciertas similitudes interesantes entre ellas, como el que ambas poseen alcance infinito, y que su dependencia con la distancia es la misma. Este parecido motivó a varios investigadores, entre ellos al propio Einstein y a Hermann Weyl, a tratar de unificarlas. Objetivo que, por cierto, aún no se ha logrado.

XII.3. TEORÍAS DE CAMPO

Hacia 1920 Einstein había obtenido una formulación matemática de la teoría de la relatividad general que describía la fuerza de la gravedad en términos de la estructura del espacio-tiempo. Ese año, Weyl descubrió que tanto la relatividad general como el electromagnetismo pertenecen a una familia denominada *teorías de norma con simetría local*.

Las simetrías se pueden clasificar como *globales* y *locales*. Para ilustrar el concepto de simetría global, considérese un experimento en el que se mida el campo eléctrico generado por un conjunto de cargas, de ambos signos, colocadas arbitrariamente en un laboratorio. En esas condiciones, la teoría de Maxwell establece que el campo eléctrico entre dos puntos se da simplemente por la diferencia de potencial entre ellos. Esto implica una simetría, ya que el campo permanece invariante ante la suma o resta, global, de un potencial constante

arbitrario.^{17*}  Por depender de medidas relativas, el campo eléctrico es independiente de la convención o

escala que se haya escogido para medir la carga eléctrica. Esto constituye una invariancia de *norma* global. El término *norma* se refiere a la elección de una escala o patrón de longitud, si bien la palabra también es comúnmente sustituida por *calibre*, *aforo*, o el término inglés *gauge*.

Una teoría general del campo eléctrico debe tomar en cuenta, no sólo cargas estáticas, sino experimentos con cargas en movimiento. Si sólo actuase la fuerza eléctrica, el movimiento arbitrario de las cargas en el laboratorio rompería la simetría del campo electrostático. Sin embargo, al moverse, las cargas generan campos magnéticos que permiten restablecer la simetría en forma *local*. Es decir, cualquier cambio en el potencial eléctrico puede combinarse, localmente, con un cambio en el potencial magnético de manera que los campos eléctricos y magnéticos sean invariantes.

La teoría del campo asocia a cada fuerza algún tipo de partícula, o partículas *intermediarias*, es decir, responsables de acarrear la información del campo. A principios de siglo, Planck y Einstein propusieron al fotón como mensajero del campo electromagnético. En la década de 1930, se puso de manifiesto la existencia de dos nuevas fuerzas fundamentales, que sólo actúan a distancias nucleares: la fuerte y la débil. Por ese entonces, Yukawa sugirió que el emisario correspondiente al campo fuerte sería el mesón. Ahora creemos que no es el mesón, sino el gluón el responsable de esta tarea, aun cuando nadie ha visto un gluón libre. Otro campo sin partícula identificada experimentalmente es el gravitacional, si bien los esfuerzos por detectar *gravitones* no han sido pocos.

XII.4. EL CAMPO DÉBIL

La primera formulación teórica sobre la fuerza débil fue propuesta por Enrico Fermi en 1934. Esta teoría es una analogía con la del campo electromagnético en el que las partículas interactuantes emiten y absorben fotones. Sin embargo, el decaimiento β implica la emisión de partículas (electrones o positrones) cargadas, por lo que debería haber partículas intermediarias con carga eléctrica (véase figura 11), las denominadas partículas *W* (*weak* = débil). En este sentido, y basado en la aparente similitud de alcances entre las fuerzas nucleares, Yukawa propuso, en su primer trabajo sobre el campo nuclear, que el mediador de la fuerza débil podía ser el mismo mesón. Esta idea fue refinada, poco después, por varios autores, como Nicholas Kemmer (alumno de Pauli) y el sueco Oskar Klein. En 1937 Kemmer propuso la existencia de un tercer mediador, neutro. En 1938 Klein, usando una idea primitiva de grupo de simetrías, sugirió que el compañero neutro de las *W* podía ser el propio fotón. En los años cuarenta, las evidencias experimentales demostraron ciertas similitudes entre el decaimiento β y el decaimiento muónico del pion. Esto fue tomado como evidencia de la *universalidad* de las interacciones débiles.

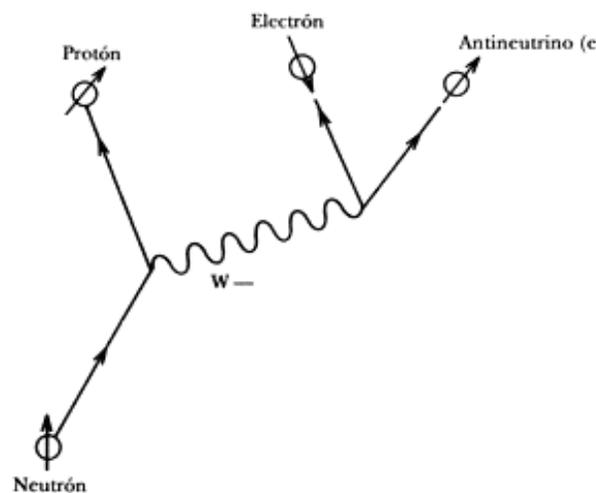


Figura 11. El decaimiento β del neutrón. Según el modelo de los bosones intermediarios, este proceso ocurre en dos etapas. Primero, el neutrón se transforma en un protón emitiendo una partícula *W* virtual, misma que decae en una segunda etapa en un electrón y un antineutrino. Ya que la creación de la *W* viola temporalmente la conservación de la energía (de ahí lo *virtual*), la distancia que ésta recorre está limitada

por el principio de incertidumbre de Heisenberg.

La versión cuántico-relativista de la formulación de Maxwell, la electrodinámica cuántica, fue iniciada por Dirac hacia finales de la década de 1920 y, completada, en lo esencial, por Richard Feynman, Julian Schwinger y Sin-itiro Tomonaga hacia 1948. En la electrodinámica cuántica el electrón es representado como una onda. Para definir en forma completa una oscilación de este tipo deben conocerse su amplitud y su *fase*, la fase mide el desplazamiento de la onda desde un punto de referencia arbitrario. Experimentalmente sólo se pueden medir diferencias de fase, mas no la fase en sí. Es decir, esta teoría cuántica es invariante ante cambios globales de fase, lo que, nuevamente, constituye una simetría global de norma. Una formulación más general debe considerar cambios arbitrarios de fase. Como en el caso del electromagnetismo, este cambio altera la simetría global. La simetría se restablece localmente a través de la inclusión de un nuevo campo, el cual resulta ser el mismo campo electromagnético del fotón. Cuando un electrón absorbe o emite un fotón, las fases del campo del electrón y del fotón se combinan garantizando así la simetría de norma local. La ley asociada a esta simetría es la de la conservación de la carga eléctrica. Por su contribución, Feynman, Schwinger y Tomonaga recibieron el Premio Nobel en 1965.

A mediados de la década de 1950, había evidencias de una relación íntima entre las interacciones electromagnéticas y las débiles por el hecho de que el momento angular intercambiado en procesos débiles es unitario, idéntico al del fotón. Sin embargo, el corto alcance de la fuerza débil revelaba que, de existir, las W deberían tener una gran masa. Por poseer un espín entero, las W serían bosones, y por ser éste distinto de cero, a las W se les conoce como *bosones vectoriales intermediarios*.

XII.5. SIMETRÍA ENTRE LOS CAMPOS DÉBIL Y ELECTROMAGNÉTICO

En 1958 John Ward y su alumno pakistaní Abdus Salam encontraron que, si la formulación que describe a la fuerza débil pertenece a la familia de las teorías de norma con simetría local, debería existir entonces un bosón intermediario con masa pero sin carga. Originalmente a esta partícula se le llamó X (por ser la letra que sigue de la W), aunque ahora se le denomina Z . Esta nueva partícula mediaría, por ejemplo, en la dispersión neutrón-neutrino, en la que no participa el campo electromagnético. Si hubiese una unificación entre estos dos campos, es decir si las fuerzas débil y electromagnética fueran sólo dos manifestaciones de una misma fuerza, la *electro-débil*, ¿a qué se debe que una de ellas tenga alcance infinito y la otra sólo se sienta a distancias nucleares? Dicho en otras palabras, ¿por qué el multiplete de mediadores del campo electrodébil contiene a la vez partículas con masa (las W y la Z) y sin masa (el fotón)?

Los primeros intentos por unificar las fuerzas débil y electromagnética se inspiraron en el intento fallido de unificar a la fuerte y a la electromagnética que había sido realizado por Yang y su colega Robert Lawrence Mills en 1954. Como se recordará, la fuerza fuerte es simétrica con respecto al intercambio de protones y neutrones; es decir que si se ignoran los efectos de la carga eléctrica del protón, un núcleo en el que se intercambien todos sus protones por neutrones y viceversa no sería distinguible del núcleo original. Esto indica una simetría global de norma. Una formulación completa de las interacciones fuertes debe considerar el caso más general de intercambios locales neutrón-protón. Como antes, la simetría global se pierde y para restablecerla localmente es necesario agregar algo. En este caso, sin embargo, es necesario suponer la existencia, no de una, sino de cuatro partículas sin masa. Dos de éstas, denominadas *partículas de Yang-Mills*, son neutras, y una de ellas podría identificarse con el fotón. Las dos restantes tienen la peculiaridad de poseer carga eléctrica, una positiva y otra negativa.

La teoría de Yang-Mills fue objetada casi de inmediato por varias razones fundamentales. Entre las más obvias estaba su predicción de la existencia de fotones cargados. Si hubiera partículas cargadas con masa inferior a la del electrón, el Universo sería totalmente distinto del que conocemos. Sin embargo, esta formulación posee algunas características matemáticas tan especiales que motivaron a los físicos teóricos a buscar alguna manera de modificarla para eliminar sus defectos más que a desecharla.

En la teoría de Yang-Mills, si se aplica una operación de simetría, llamémosla A , y luego otra B , el resultado es diferente de que se apliquen inversamente: primero B y luego A . Por esta razón, se dice que se trata de una teoría *no-abeliana*. Esta terminología se deriva del trabajo del matemático noruego Neils Henrik Abel, el cual a principios del siglo pasado estudió las propiedades de los grupos de transformaciones en las que se obtiene el

mismo resultado si se conmutan. Uno de los mayores atractivos de las teorías de norma no-abelianas con simetría local es que la relatividad general pertenece a esta familia, por lo que una formulación de este tipo para cualquiera de las otras fuerzas sería un paso importante hacia la unificación.

XII.6. ROMPIMIENTO ESPONTÁNEO DE LA SIMETRÍA

La aparición de mediadores cargados y neutros en la teoría de Yang-Mills motivó a los interesados en la teoría del campo débil a buscar soluciones al problema de la falta de masa para los mediadores cargados. En 1964 el escocés Peter Ware Higgs encontró un método para dotar de masa a los campos de Yang-Mills sin romper la simetría local. La idea de Higgs se basa en un proceso conocido como *rotura espontánea de simetría*. Este mecanismo se puede ilustrar tomando como ejemplo una canica en el fondo de una botella de vino. Las botellas, en general, presentan simetría cilíndrica, por lo que la posición simétrica de la canica en el fondo sería el centro. Sin embargo los envases de vino se caracterizan por tener un bordo central en el fondo que obliga a una canica a permanecer en un estado asimétrico, en una orilla. En otros términos, el estado simétrico es de mayor energía potencial que el asimétrico. Si se deja a la canica sobre el bordo, por un instante habrá simetría pues la canica tendría libertad de caer en cualquier dirección. Sin embargo, cuando cae, hay un rompimiento espontáneo de la simetría, y la simetría queda *escondida*.

Según Higgs, refiriéndose a la masa de los campos de Yang-Mills, el estado simétrico corresponde al caso de campos sin masa; sin embargo, la existencia de un nuevo campo elevaría la energía de este estado por encima de otro en el que las partículas de Yang- Mills adquieren masa.

XII.7. UNIFICACIÓN ELECTRO-DÉBIL

En 1967 Steven Weinberg, por un lado, y Salam y Ward por otro, propusieron una teoría de interacciones débiles basada en una versión de la teoría de Yang-Mills según la cual tres de las partículas del campo correspondiente, una neutra y las otras dos cargadas, adquirirían masa mediante un proceso de rompimiento espontáneo de la simetría. En este modelo, el campo de Higgs, responsable del rompimiento de simetría, introduce, a su vez, cuatro nuevas partículas, pero tres de ellas se *mezclan* con las partículas de Yang-Mills de manera que las dos cargadas y una de las neutras adquieren masa, y son identificadas con la W y la Z . La cuarta partícula de Yang-Mills, que es neutra, permanece sin masa, y resulta ser el fotón. De este nuevo arreglo sobra una partícula de Higgs que no se mezcla y, por lo tanto, queda como una predicción de la teoría. Había, sin embargo, algunos problemas serios por resolver. En cuanto a la teoría misma, había que probar que el modelo fuese *renormalizable*, en el mismo sentido en que Feynman y otros tuvieron que probar esto para la electrodinámica cuántica. Pero la mayor dificultad era experimental ya que, excepto por el fotón, ninguna de las otras partículas habían sido observadas.

En junio de 1971, el holandés Gerard't Hooft, entonces estudiante de doctorado, encontró una formulación sobre un rompimiento espontáneo de la simetría que es renormalizable. Este paso resolvió la dificultad teórica del modelo de Weinberg-Salam-Ward. El descubrimiento de Hooft causó gran revuelo entre los físicos de partículas y las propuestas experimentales para detectar bosones intermedios llovieron. Experimentalmente, las Z son más fáciles de identificar pues aparecen en situaciones en las que el campo electromagnético no juega ningún papel, tal como la dispersión de neutrinos por protones. En julio de 1973, en el CERN, F. J. Haert y sus colaboradores observaron las primeras evidencias de la dispersión de neutrinos por electrones, lo que puso en evidencia la existencia de las partículas Z .

XII.8. LAS W Y LAS Z .

La masa predicha para la Z y las W estaba entre 80 y 90 GeV, razón por la cual tuvieron que pasar diez años antes de que estas partículas pudieran ser producidas directamente en un laboratorio. Ésta fue la labor de Simón van der Meer y Carlo Rubbia. El primero desarrolló la técnica de aceleradores que hacía falta para observar colisiones de protones con antiprotones a más de 90 GeV. El segundo construyó un sistema de detección de más de 500 metros cúbicos llenos de cables y artefactos con un peso total superior a las 2 000 toneladas. Hacia enero de 1983, Rubbia anunció los resultados de sus primeros experimentos, en los que se observaron más de mil millones de eventos, seis de los cuales caían en la posición predicha para la masa de las W . El trabajo fue publicado por 135 coautores de catorce instituciones de investigación, la mayor parte de ellas europeas. En junio del mismo año, otra publicación del mismo grupo anunciaba los cinco primeros eventos en los que se identificaba una Z . Dos meses después ya eran ocho. En diciembre de 1984, Van der Meer y Rubbia recibían el último Premio Nobel en partículas elementales del periodo que cubre este libro.

XII.9. RESUMEN

La invariancia ante desplazamientos espaciales o temporales fue la primera forma de simetría que se encontró en las formulaciones físicas de Galileo y Newton. Otra simetría entre el magnetismo y la electricidad permitió a Faraday proponer su unificación, hace más de un siglo (sección XII.2). Una vez establecidas las formulaciones de los diferentes campos de fuerza que se conocen, aparecen simetrías que sugieren, también, una nueva unificación entre fuerzas (sección XII.3). En particular, Salam y otros encontraron que el campo débil (sección XII.4) acepta una formulación que es similar a la del electromagnetismo (sección XII.5). Una unificación de este estilo, sin embargo, debió encontrar una explicación a la enorme diferencia de alcances entre estas dos fuerzas (sección XII.6). La solución al problema fue propuesta por Weinberg, Salam y Ward (sección XII.7), quienes predijeron adecuadamente la masa de nuevas partículas que fueron descubiertas hace no mucho tiempo (sección XII.8).



[Nota 17] 

17 Una comprobación cotidiana de esto es el hecho de que los pájaros que se posan en los cables de alta tensión no mueren electrocutados.

Inicio

XIII. CONCLUSIÓN

HEMOS revisado, brevemente, la obra de muchos en la búsqueda de lo elemental. Esta empresa científica ha resultado en un entendimiento detallado de la estructura de la materia en niveles increíblemente pequeños. Curiosamente, la información obtenida ha permitido, asimismo, comprender la física de los sistemas más grandes que conocemos, como las de las estrellas, las galaxias e incluso el origen del Universo. La ciencia misma se ha modificado, borrando las fronteras entre la física, la química y, en algunos aspectos, la biología. Las implicaciones tecnológicas correspondientes también han cambiado radicalmente el modo de vida del ser humano, para bien... o para mal.

Desde la hipótesis atómica de los griegos, en tres ocasiones el ser humano creyó haber alcanzado el anhelado nivel de lo verdaderamente elemental e indivisible. Primero, los átomos, luego los componentes del núcleo y, recientemente, los cuarks y los leptones. En cada paso una relación entre los constituyentes más básicos del momento permitió inferir la existencia de bloques más elementales y, aparentemente, menores en número. La motivación misma de todo esto es sólo la intuición de que cada estructura tiene una infraestructura que es más simple que las anteriores. Esta tendencia a la simplificación, también aplicada a la idea de fuerza, es un concepto meramente estético y representa el punto de contacto más extraordinario entre la ciencia y el arte.

Como se ha visto, en la actualidad el número de partículas *verdaderamente elementales* está rebasando el límite de lo simple. Hay evidencias experimentales, directas o indirectas, de cinco sabores y tres colores de cuarks, cinco leptones, el fotón, ocho gluones y tres bosones intermedios. Además, se tiene la seguridad de la existencia de un sabor más de cuark, un neutrino, y un campo de Higgs. Contando las antipartículas correspondientes, el número supera las sesenta partículas.

El futuro inmediato, naturalmente, se enfoca a la búsqueda de las partículas predichas por la teoría actual. El nuevo sabor de cuark, aparentemente, sólo requiere aumentar la energía de los aceleradores. En el caso del neutrino τ se trataría de un problema de estadística, es decir, hace falta desarrollar haces intensos de leptones τ . El panorama de la partícula de Higgs es menos claro pues no existe una predicción clara sobre su masa, aunque se cree que no debería rebasar por mucho los límites actuales de energía. ¿Qué sigue después?

Los primeros indicios de una nueva síntesis han empezado a aparecer. Hemos visto surgir ciertas simetrías interesantes entre leptones y cuarks. Primero, los leptones aparecen por parejas de partículas cargadas y sus correspondientes neutrinos. Por otra parte, parece haber tantos sabores de cuark como leptones. Más aún, cuando se toman en cuenta las masas de las partículas (exceptuando a los neutrinos) ellas permiten arreglar a los leptones y a los cuarks por *generaciones*. La primera generación (la más ligera) tiene al electrón y su neutrino por una parte y a la pareja de cuarks u y d por la otra. La segunda generación, con masas cientos de veces superiores, contiene al muon con su neutrino y a los cuarks s y c . A la tercera generación, con masas un orden de magnitud mayores que las de la segunda generación, pertenecen el leptón τ con su neutrino y los cuarks b y t .

El arreglo de masas de las diversas generaciones podría estar sugiriendo un nuevo espectro de resonancias, es decir, una subestructura, ahora común a cuarks y leptones. Los primeros esfuerzos teóricos en esta línea han dado resultados interesantes, aunque modestos. Uno de los modelos, propuesto en 1979 por Haim Harari, del Instituto Weizmann de Israel, postula la existencia de sólo dos nuevas partículas *verdaderamente elementales* denominadas

rishons (del hebreo *rishon* que significa primero o primario)^{18*}  la T (carga $-1/3$) y la V (neutra).

Asociándoles color y tomando en cuenta sus antipartículas, Harari puede explicar fácilmente la primera generación de leptones y cuarks como combinaciones de rishons. Sin embargo, hasta ahora, falla cuando predice las generaciones superiores.

En lo que se refiere a las fuerzas de la naturaleza, la tendencia es hacia una *gran* unificación (GUT, del inglés *grand unified theory*) entre el campo electrodébil y el campo fuerte. De existir tal unificación, la teoría predice ciertos observables experimentales interesantes. Uno de ellos es el decaimiento del protón, que hasta ahora había sido considerado como un ente estable. Otra predicción es la existencia de *monopolos magnéticos*, es decir,

partículas con *carga* magnética.^{19*}  Además de estas metas, a más largo plazo existe el proyecto último de una *teoría de todo* (TOE, de *theory of everything*) que integre también al campo gravitacional.

Si el cuark tiene una subestructura, ésta aún no se hace aparente en los experimentos de dispersión a las energías más altas alcanzadas hasta ahora (mil GeV, es decir 1 Tera eV, o TeV). Por otra parte, así como la comprobación experimental de la unificación electrodébil ocurre vía bosones intermedios cuya masa implicó experimentos a energías cercanas a 100 GeV, la próxima unificación (GUT) debería ser mediada por partículas con masas muchos órdenes de magnitud mayores a lo alcanzado hasta ahora. Es decir, la nueva física requerirá de un esfuerzo enorme en cuanto a la tecnología de aceleradores. ¿Qué tan factible es esto?

La energía de los aceleradores ha aumentado enormemente en los últimos años con máquinas que ya son de las dimensiones de ciudades enteras. Por lo mismo, el progreso tiene límites evidentes. El costo de esos equipos ha llegado a un punto en el que sólo las grandes superpotencias o consorcios de países europeos son capaces de financiar proyectos mayores. Una última limitación sería, naturalmente, las dimensiones terrestres. Sin embargo, esto no significa el fin de la física de partículas sino un simple cambio de filosofía asociado a un retorno a las observaciones en rayos cósmicos para los cuales no existe un límite energético conocido.

En la cruzada por lo fundamental el ser humano ha tenido que abandonar una serie de principios basados en la observación de lo macroscópico. Tal es el caso de las diferencias entre materia y energía, espacio y tiempo, conceptos que aún forman parte de nuestra educación primaria. Otro ejemplo es el del determinismo, las partículas y las ondas se confunden y el mundo microscópico nos ha enseñado que lo único que podemos predecir con precisión es la probabilidad de que algo ocurra... ¿Desistiremos algún día de preguntarnos de qué estamos hechos?



[Nota 18] 

18 Otros autores las llaman "prequarks".

Inicio |

19 Si bien existe una simetría entre la electricidad y el magnetismo, hasta ahora ha resultado imposible aislar un polo, el *norte* o el *sur* de un imán, aun cuando es posible aislar carga eléctrica de un signo.

Inicio

BIBLIOGRAFÍA

- F. Close: *The Cosmic Onion. Quarks and the Nature of the Universe*. Heinemann Educational Books, Londres, 1985.
- J. E. Dodd: *The Ideas of Particle Physics. An Introduction for Scientists*. Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
- G. Finberg: *What is the World Made of. Atoms, Leptons, Quarks and other Tantalizing Particles*. Anchor Press, Nueva York, 1978.
- J. H. Mulvey (Comp.): *The Nature of Matter. Wolfson College Lectures 1980*. Clarendon Press, Oxford, 1981.
- Y. Ne'eman y Y. Kirsh: *The Particle Hunters*. Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
- A. Pais: *Inward Bound: of Matter and Forces in the Physical World*. Oxford University Press, Nueva York, 1986.
- P. Pascual (Comp.): *Partículas elementales. Quarks, leptones y unificación de las fuerzas*. Libros de Investigación y Ciencia. Scientific American. (Publicada en castellano por Prensa Científica, Barcelona, 1984.)
- E. Segre: *De los rayos X a los quarks. Los físicos modernos y sus descubrimientos*. Folios Ediciones, México, 1983.
- J. G. Stipe: *The Development of physical Theories*. McGrawHill Book Company, Nueva York, 1967.
- S. Weinberg: *The Discovery of Subatomic Particles*. Scientific American Library, Nueva York, 1983.



COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de diciembre de 1996 en Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEPSA), Calz. de San Lorenzo, 244; 09830 México, D.F.

Se tiraron 2000 ejemplares.

La Ciencia desde México es coordinada editorialmente por MARCO ANTONIO PULIDO Y MARÍA DEL CARMEN FARÍAS .



Si, como dice el refrán, el león no es como lo pintan, el átomo todavía lo es menos y, a la fecha, su descripción continúa eludiendo la de los físicos. Así, si se intentara representarlo en un dibujo que incluyera todas las propiedades y los componentes que la física moderna ha ido descubriendo en él, el resultado sería una traición al modelo, y es que cada uno de los elementos del átomo, por insignificante que parezca, constituye la base de las diferencias que observamos en toda la materia que nos rodea que, como se sabe, está compuesta por átomos.

"El ser humano —dice el doctor Arturo Menchaca— en su afán de entender la composición del Universo tiende a reducir a conceptos simples la información que la naturaleza le brinda. Un ejemplo es la idea griega del átomo o partícula indivisible, de la cual se componían los elementos entonces considerados, que eran también muy pocos, cuatro o cinco."

La historia del átomo, gracias a los griegos, se extiende por veinticinco siglos, aunque sólo en los últimos dos se han logrado avances importantes en su estudio.

El autor introduce al lector al mundo de las partículas utilizando, como dice, el punto de vista histórico-anecdótico para llevarlo, en forma amena, a través de la misma serie de razonamientos seguidos por los descubridores. En consecuencia, reseña primero la historia de la química hasta la consolidación de la teoría atómica de la materia; a continuación aparecen los dos primeros actores de la fisicoquímica, el electrón y el fotón, que entre otras cosas sirvieron para demostrar que el átomo tiene estructura interna. Viene a continuación la época de las partículas nucleares, el protón, el neutrón, el positrón, el neutrino y el mesón, que en un principio fueron consideradas los bloques más elementales de la materia hasta que su número creciente —casi un centenar, entre el cual los físicos distinguieron categorías como "verdad", "extrañeza", "color", "encanto"— puso en duda tal condición. Los físicos encuentran ahora correlaciones entre las partículas, lo que ha motivado su unificación a través del modelo de cuarks y el de bosones intermedarios.

El doctor Menchaca se licenció en la Facultad de ciencias de la UNAM e hizo su doctorado en la Universidad de Oxford, Inglaterra. Realizó también un posdoctorado en la Universidad de Berkeley en California. Autor de numerosos artículos científicos y de divulgación, es actualmente investigador titular del IFUNAM e investigador nacional.

