

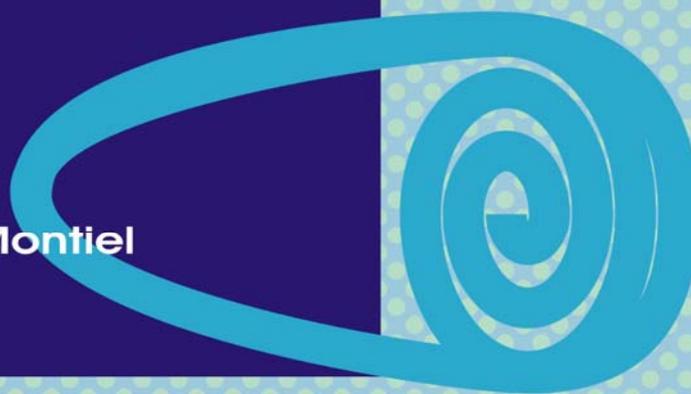
**Colección
MANUALES**



**DIÁLOGOS SOBRE
FÍSICA MODERNA**

José Antonio Montiel

Educación Editora ISBN 84-689-8952-5



Índice

INTRODUCCIÓN	5
1. LOS ORÍGENES DE LA NUEVA FÍSICA	6
1.1. Controversia sobre la naturaleza de la luz.....	6
1.2. Teoría electromagnética de la luz	10
1.3. Efecto fotoeléctrico.....	11
1.4. Teoría cuántica de Planck	13
1.5. Hipótesis de Louis de Broglie	14
1.6. Cuestiones	18
2. EL PRIMER MODELO CUÁNTICO DEL ÁTOMO.....	19
2.1. Evolución del concepto de átomo.....	19
2.2. La filosofía griega y los elementos	19
2.3. Nace la idea de átomo	20
2.4. Vuelven los átomos	21
2.5. Las órbitas electrónicas.....	23
2.6. Un nuevo cambio: el modelo de Böhr.....	26
2.7. Postulados de Böhr.....	26
2.8. Radio y energía de las órbitas	27
2.9. Relaciones con la ecuación de De Broglie.....	29
2.10. Cuestiones	30
3. EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE	32
3.2. Enunciado del principio de incertidumbre.....	32
3.2. Consecuencias del principio de incertidumbre.....	34
3.3. Cuestiones.....	38
4. LAS PARTÍCULAS FUNDAMENTALES.....	40
4.1. Descubrimiento de las primeras partículas subatómicas y sus principales características	40
4.2. El protón	42
4.3. El neutrón.....	43
4.4. Aceleradores de partículas.....	43
4.5. Las partículas fundamentales.....	50
4.6. Cuestiones	51
5. LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD EN EL MUNDO SUBATÓMICO	54
5.1. Antecedentes	53
5.2. Experimento de Michelson y Morley	54
5.3. Postulados de la teoría de la relatividad.....	55
5.4. Consecuencias.....	56
5.5. Equivalencia masa-energía	58
5.6. Antimateria	59
5.7. Cuestiones	60
6. RADIOACTIVIDAD	61
6.1. Descubrimiento y origen de la radiactividad	62
6.2. Tipos de radiaciones	63
6.3. Ley de la desintegración radiactiva	65

6.4. Medida de la radiactividad	66
6.5. Efectos biológicos y precauciones	67
6.6. Energía de enlace nuclear	68
6.7. Reacciones nucleares. Isótopos radiactivos	69
6.8. Aplicaciones de los radioisótopos	72
6.9. Cuestiones	73
7. ENERGÍA NUCLEAR	75
7.1. La fisión nuclear	76
7.2. Reactores nucleares	77
7.3. Medidas de seguridad	80
7.4. La fusión nuclear.....	83
7.5. Cuestiones	86
8. LAS FUERZAS FUNDAMENTALES	88
8.1. Interacción gravitatoria.....	88
8.2. Interacción electromagnética	89
8.3. Interacciones nucleares	90
8.4. Partículas virtuales	91
8.5. Interpretación de las fuerzas fundamentales	94
8.6. Cuestiones	97
9. EL MODELO ESTÁNDAR	98
9.1. Quarks	98
9.2. Leptones.....	103
9.3. Familias de fermiones	105
9.4. Bosones.....	107
9.5. Cuestiones	110
10. TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS	112
10.1. Concepto clásico de campo	112
10.2. Teoría cuántica de campos	114
10.3. Los campos nucleares	115
10.4. Simetrías y leyes de conservación	117
10.5. Electrodinámica cuántica y renormalización.....	120
10.6. Electrodinámica cuántica y simetría de gauge.....	121
10.7. Cromodinámica cuántica	124
10.8. Cuestiones	128
11. UNIFICACIÓN DE LAS TEORÍAS.....	129
11.1. Teoría electrodébil.....	130
11.2. Teorías de gran unificación	132
11.3. Teoría del todo.....	134
11.4. Cuestiones	137
12. TEORÍAS ACTUALES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO.....	138
12.1. Teoría de supercuerdas	138
12.2. Relación entre la teoría inflacionaria y las teorías de gran unificación	144
13. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	149

Introducción

El objetivo de esta obra es la divulgación de las ideas de la Física Cuántica a través de un diálogo profesor-alumno sobre esta parte de la Ciencia. En ella se pretende profundizar en el significado y la interpretación de unos conceptos realmente nuevos que suponen una ruptura con la Física tradicional. En esta última, las leyes se deducen muchas veces mediante una simplificación de la realidad, pero el estudiante las entiende como algo natural, que encaja perfectamente en su marco conceptual. Sin embargo, al reducir el tamaño del objeto estudiado y viajar al mundo subatómico, junto a la miniaturización de la escala se lleva a cabo un cambio mucho más profundo, que afecta al mundo de las ideas. El lector debe entender que su actitud mental ha de flexibilizarse, de manera que los resultados no se cuantifican en números exactos, sino que se mueven en el ámbito de las probabilidades, e incluso los propios objetos –las partículas– también adquieren una nueva naturaleza, más allá de su sola materialidad.

Como es lógico, las explicaciones a veces pueden parecer demasiado simples si las analiza un especialista, aunque mi interés se ha centrado en facilitar la comprensión de los conceptos, a pesar de que en algunos casos se pierda el grado de rigor de un experto. De este modo, la lectura de estos diálogos ofrece un posible material de apoyo para el estudiante que desee profundizar algo más en los fundamentos de la Física moderna o para que el profesor tenga la oportunidad de contrastar algunos tratamientos didácticos que le sirvan en la exposición de estas ideas en clase, y, en definitiva para todo aquel lector interesado en conocer los fundamentos de la Física moderna, los descubrimientos de la Física de partículas y las nociones básicas de las teorías actuales que intentan explicar la estructura de la materia.

Hoy día, el avance de la tecnología de los aceleradores de partículas nos permite reproducir las energías y temperaturas de los primeros instantes del universo, de modo que los hallazgos de la Física de partículas en los últimos años corroboran muchas de las ideas cosmológicas sobre el origen y evolución del universo, al mismo tiempo que deja patente la dependencia absoluta entre el microcosmos que forma el mundo subatómico y el macrocosmos que se estructura en objetos visibles, astros, galaxias, cúmulos y supercúmulos que designamos como universo.

José Antonio Montiel Tosso

1. LOS ORÍGENES DE LA NUEVA FÍSICA

1.1. Controversia sobre la naturaleza de la luz

Alumno: Hoy sabemos que la luz es una onda electromagnética, pero me imagino que esto no ha sido siempre así.

Profesor: Eso tenemos que matizarlo. Pero, antes, voy a contarte la historia de una larga discusión no exenta de agria rivalidad entre dos grandes científicos: Newton y Huygens. Posiblemente Isaac Newton ha aportado a la Física Clásica mucho más que todos sus predecesores y es uno de los más importantes hombres de ciencia en la historia de la humanidad. Este, quizá, sea el motivo por el que su teoría corpuscular de la luz arraigó tanto entre los estudiosos de su tiempo y fuese menospreciada la teoría ondulatoria del holandés Christian Huygens, el otro enfoque antagonista acerca de la naturaleza de la luz.

Alumno: Es decir, no se ponían de acuerdo sobre qué era la luz, a pesar de ser algo cotidiano, imprescindible en nuestro mundo ¿verdad?

Profesor: En efecto. En 1690, Huygens publicó en su obra "Tratado de la luz" que ésta consistía en una onda longitudinal similar a las ondas sonoras.

Alumno: ¿Una onda longitudinal?

Profesor: Sí, análoga a la que se transmite en un resorte cuando lo comprimimos por un extremo mediante un golpe. Si lo observamos a una cierta distancia, las compresiones y dilataciones de los "anillos" del muelle parecen viajar a todo lo largo del mismo. Así se propaga el sonido a través del aire, desde la fuente sonora hasta nuestro tímpano.

Esta teoría ondulatoria permitió explicar algunos fenómenos luminosos como la propagación rectilínea de la luz, la reflexión y la refracción.

Alumno: Un momento. Entiendo la reflexión, pero no acabo de comprender muy bien la refracción.

Profesor: Es muy sencillo. Cuando un haz de rayos luminosos llega a la superficie de separación de dos medios, por ejemplo, aire y agua, una parte del mismo vuelve al primer medio, sin pérdida de energía, es el fenómeno de la reflexión. Puesto que la velocidad no sufre cambios, el ángulo de incidencia i y el ángulo de reflexión r han de ser iguales. Por el contrario, otra parte penetra en el segundo medio alterando su velocidad, lo que provoca en los rayos refractados un cambio de dirección. Eso hace que al introducir una cucharilla en un vaso de agua parezca que se haya quebrado en dos fragmentos, uno por encima y otro por debajo de la superficie del líquido.

Por aquel entonces, los primeros años del siglo XVIII, se sabía ya que el sonido no se propaga en ausencia de aire, que necesita un soporte material. Esto llenó de dudas a Newton, a pesar de que los defensores de la teoría ondulatoria aceptaron la hipótesis de la existencia del *éter*, un fluido muy sutil que envolvía todo el espacio en el que se movían los astros, de manera que nos permitía recibir la luz solar.

Para Newton, la luz es debida a minúsculas partículas emitidas por los focos luminosos en todas direcciones, que alcanzan nuestra retina tras

viajar en línea recta. Al chocar en nuestro ojo producen la sensación luminosa. Esta teoría corpuscular de la luz fue publicada en 1704 en el libro titulado "Óptica", donde Newton afirmaba que los corpúsculos eran distintos para cada color, y explicaba la reflexión de la luz como un choque elástico de estas partículas contra la superficie de los cuerpos opacos, conservando como ángulo de salida (o de reflexión) el mismo valor que el ángulo de incidencia (Figura 1).

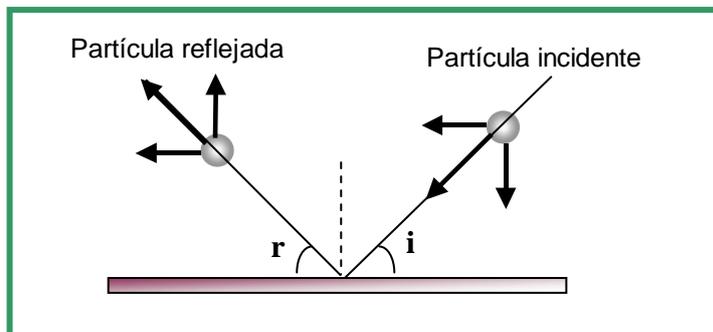


Figura 1.- Reflexión de una partícula.

Alumno: Me parece muy correcta esta interpretación, no obstante preveo que no será tan sencilla para la refracción.

Profesor: Es posible. Newton decía que las partículas luminosas que atravesaban al segundo medio, por ejemplo del aire al agua, eran atraídas de algún modo por las partículas de éste de forma que incrementaban su velocidad en el eje perpendicular a la superficie de separación. El resultado era un rayo refractado que se acercaba a dicha perpendicular (Figura 2). Como consecuencia de esta interpretación la velocidad de la luz en el agua y, en general, en los líquidos, había de ser mayor que en el aire.

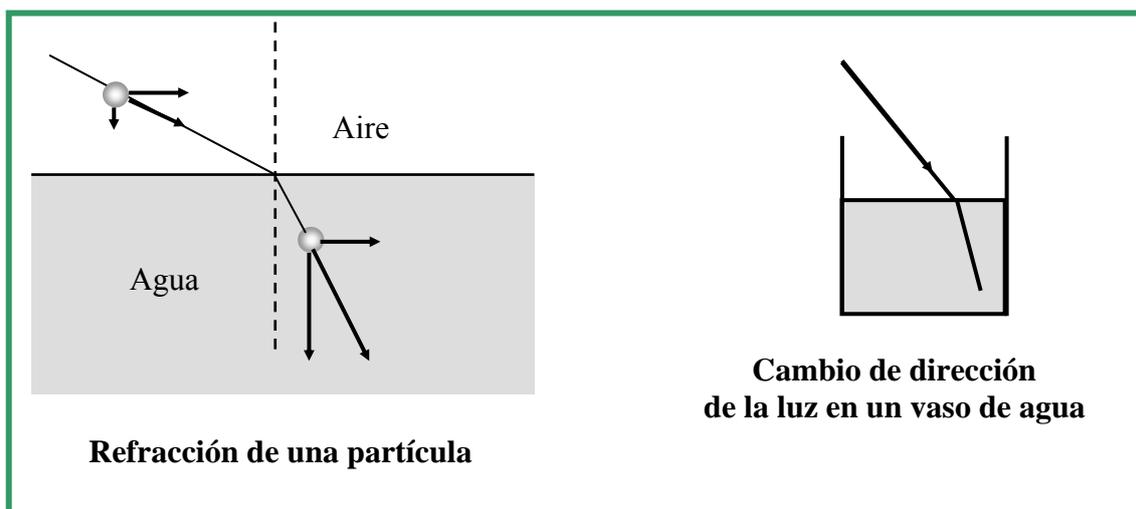


Figura 2. Fenómeno de la refracción interpretado por la teoría corpuscular.

Alumno: Muy fácil. Se mide la velocidad en ambos medios y se acaba la discusión.

Profesor: Claro, hombre. Hubiese sido muy sencillo, pero en esos años la tecnología no estaba lo bastante desarrollada para acometer ese reto experimental.

Alumno: En resumidas cuentas, la polémica estaba servida. Me imagino que se abriría un gran debate a nivel internacional.

Profesor: Lógicamente. Siempre pesó más la opinión de Newton, dada su mayor reputación como científico, que prevaleció durante todo el siglo XVIII. Ahora bien, distintas experiencias realizadas en los albores del siglo XIX, como las de *interferencias* luminosas de Young (1801), el descubrimiento de la *polarización* de la luz en 1808 o las experiencias de Fresnel sobre la *difracción* de la luz (1815), todos ellos fenómenos típicamente ondulatorios, volvieron el interés de la Ciencia hacia la hipótesis ondulatoria.

Alumno: Ha mencionado los fenómenos de interferencia, polarización y difracción de la luz. ¿En qué consisten?

Profesor: La difracción es el fenómeno en el que una onda de cualquier tipo se extiende después de pasar junto al borde de un objeto sólido o atravesar una rendija estrecha, en lugar de seguir avanzando en línea recta (Figura 3). La expansión de la luz por la difracción limita la capacidad de aumento útil de un microscopio, por ejemplo, pues los detalles menores de media milésima de milímetro no pueden verse en la mayoría de los microscopios ópticos.

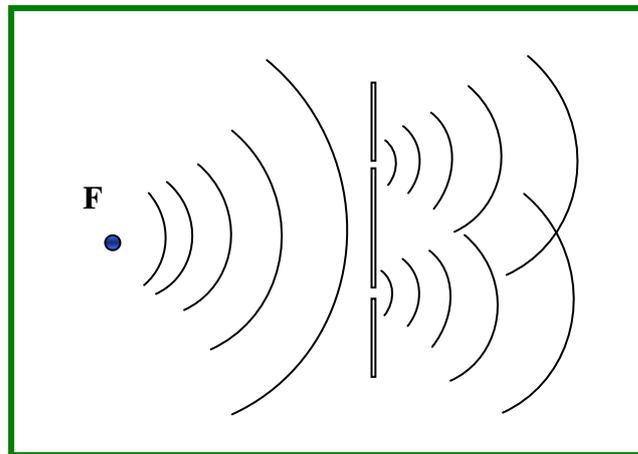


Figura 3.- Difracción de una onda procedente del foco F al llegar a una doble rendija.

La interferencia es el efecto que se produce cuando dos o más ondas se solapan, esto es, se propagan en el mismo medio. Cuando las ondas interfieren entre sí, la *amplitud* (intensidad o tamaño) de la onda resultante depende de las *frecuencias*, *fases relativas* (posiciones relativas de crestas y valles) y *amplitudes* de las ondas iniciales.

Por ejemplo, la interferencia constructiva se produce en los puntos en que dos ondas de la misma frecuencia están en fase; es decir, cuando las crestas y los valles de ambas ondas coinciden. En ese caso, las dos ondas

se refuerzan mutuamente y se forma una onda cuya amplitud es igual a la suma de las amplitudes individuales de las ondas originales (Figura 4).

La interferencia destructiva se produce cuando dos ondas de la misma frecuencia están completamente desfasadas una respecto a la otra; es decir, cuando la cresta de una onda coincide con el valle de otra. En este caso, las dos ondas se cancelan mutuamente. Cuando las ondas tienen frecuencias diferentes o no están exactamente en fase ni desfasadas, el esquema de interferencia puede ser más complejo.

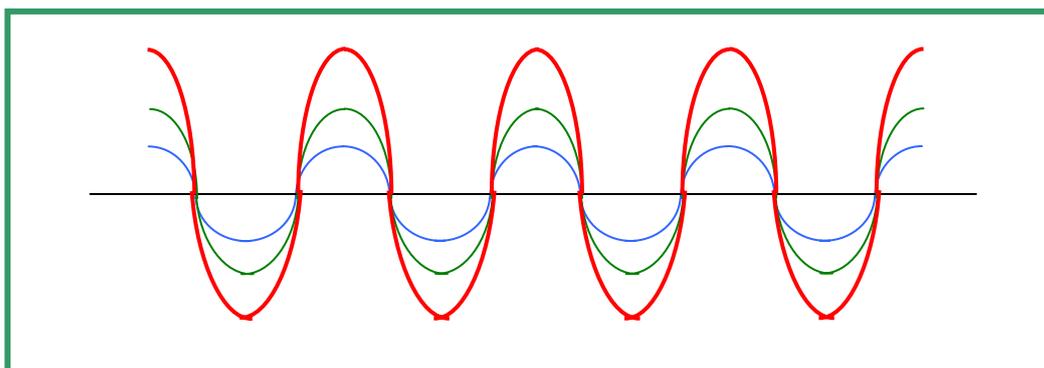


Figura 4.- Interferencia constructiva. La onda mayor es el resultado de la interferencia entre las ondas menores.

Alumno: ¿Y la polarización?

Profesor: Esta fue la mejor aportación de Fresnel. Para explicar esa propiedad afirmó que las ondas luminosas eran *transversales* (Figura 5).

Alumno: ¿Quiere decir que ya no se parecen tanto a las ondas sonoras?

Profesor: Más o menos. Las ondas transversales son aquellas que se propagan en una dirección perpendicular a la vibración de las partículas del medio. Algo así como las ondas formadas en una cuerda, fija por un extremo en posición horizontal y agitada por el otro mediante un movimiento de arriba-abajo de nuestra mano.

Puesto que la luz está formada por numerosos rayos, cada uno vibrando en su propia dirección (siempre perpendicular a la de propagación) el conjunto de planos de vibración es muy grande. Sin embargo, cuando la luz se hace pasar a través de unos materiales especiales –los *polarizadores*– éstos absorben todos los rayos luminosos excepto los que vibran en una determinada dirección. A la luz emergente se la denomina *luz polarizada*.

Alumno: De todos modos, me parecen pocos argumentos para vencer al “gigantesco” Newton.

Profesor: No creas, ya se habían acumulado demasiadas pruebas. Sin embargo, en 1850 llegó la definitiva. ¿Recuerdas que la hipótesis corpuscular tenía la necesidad de que la velocidad de la luz en el agua fuera mayor que en el aire?

Alumno: Por supuesto. ¿No me diga que ya se podía medir?

Profesor: Efectivamente. El francés Foucault comprobó en 1850 que la velocidad de la luz en el agua era menor que en el aire, lo que anulaba la explicación de Newton para la refracción.

Alumno: Y con eso zanjaba la cuestión sobre la naturaleza de la luz después de siglo y medio.

Profesor: Al menos por el momento.

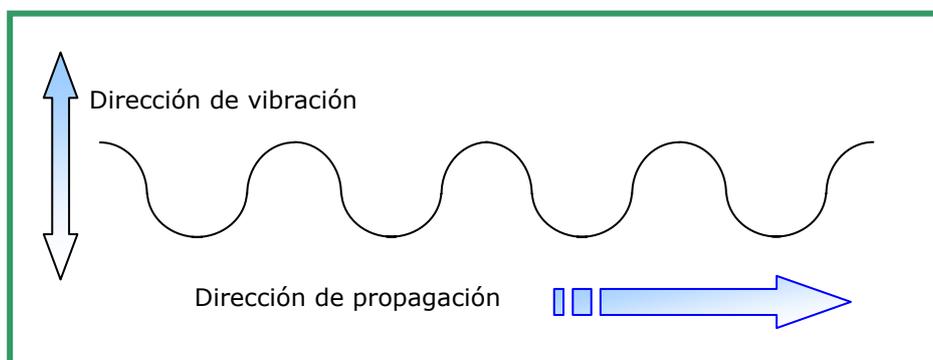


Figura 5.- Onda transversal.

1.2. Teoría electromagnética de la luz

Alumno: Por sus palabras deduzco que la discusión no ha terminado.

Profesor: Evidentemente. Debes saber que entre los años 1861 y 1864 la Física dio un salto cualitativo en su cuerpo teórico. La idea de campo de fuerzas ya existía en la mente de los científicos, pues Faraday explicó así la acción a distancia de un imán, por ejemplo. Sin embargo, el matemático británico James C. Maxwell llegó mucho más lejos, adoptando el concepto de *función potencial* o potencial escalar. Es una función, definida en cada punto del espacio, cuyos valores se corresponden con los del campo vectorial de fuerzas (eléctrico o magnético) existente allí. Matemáticamente, los valores del campo pueden derivarse mediante una sencilla operación, denominada gradiente, aplicada a dicho potencial.

Maxwell fue capaz de resumir en cuatro ecuaciones todas las propiedades de los campos eléctricos y magnéticos, demostrando al mismo tiempo su indisolubilidad y coexistencia en todos los puntos del espacio que rodea a las cargas aceleradas.

Alumno: No tengo muy claro el papel de esa función potencial ni siquiera el significado del campo de fuerzas.

Profesor: Este concepto es una interpretación matemática de las fuerzas existentes en una determinada región del espacio. Podemos "olvidarnos" momentáneamente de la causa de la fuerza y suponer que ella es una "propiedad" del campo.

Alumno: Es decir, del espacio.

Profesor: Sí. A cada punto se le asigna un cierto valor, el que corresponde a la función potencial en dicho punto, lógicamente. Es un valor numérico, pues no tiene carácter vectorial como las fuerzas.

Alumno: Comprendo. Se trata de una simplificación. Es más fácil trabajar con números que con vectores.

Profesor: Claro, siempre que no se pierda información. Pero el cálculo diferencial nos lo permite. De este modo, logramos *reducir* la idea de fuerzas de cualquier tipo a una *característica del espacio*.

Alumno: Me imagino que lo difícil en cada caso será obtener la función escalar.

Profesor: Por supuesto, pero ésa es la tarea de los físicos teóricos. Precisamente, este prodigio de síntesis para el campo electromagnético fue el primer gran éxito del cálculo diferencial e integral en el mundo de la Física y demostró la dependencia de esta disciplina del desarrollo de las matemáticas.

Alumno: Por lo que dice fue algo extraordinario.

Profesor: Imagínate, todos los fenómenos eléctricos y magnéticos, antes tratados separadamente, se pudieron explicar mediante sólo cuatro ecuaciones. Pero, aun hay más, en sus cálculos Maxwell predijo la existencia de las ondas electromagnéticas para explicar la propagación de este campo electromagnético en el espacio, y sin necesidad de soporte material, hallando también que dichas ondas tenían que viajar a la velocidad de la luz.

Alumno: Entonces...según Maxwell, la luz es...

Profesor: Una onda electromagnética. Pocos años después, en 1887, el alemán Hertz, obtuvo experimentalmente estas ondas electromagnéticas, confirmando las geniales suposiciones de Maxwell.

1.3. Efecto fotoeléctrico

Alumno: Por consiguiente, fin de la discusión.

Profesor: No tengas tanta prisa. En los mismos experimentos que produjeron las ondas electromagnéticas, paradójicamente Hertz descubrió un hecho hasta cierto punto desconcertante: *el efecto fotoeléctrico*.

Alumno: ¿En qué consiste?

Profesor: Hertz observó que al producir una descarga eléctrica entre dos electrodos a diferente potencial la chispa saltaba más rápidamente si el cátodo (polo negativo) se irradiaba con luz ultravioleta. En 1888, Hallwachs comprobó que una lámina de cinc, cargada negativamente, se descargaba con gran rapidez cuando era iluminada con radiación ultravioleta. A partir de estas experiencias se estableció la hipótesis de que bajo la acción de ciertas radiaciones electromagnéticas de pequeña longitud de onda algunos metales emiten electrones en un proceso instantáneo, denominándose, a este fenómeno, efecto fotoeléctrico.

Alumno: Si por aquel entonces era muy reciente el descubrimiento del electrón, gracias al tubo de *rayos catódicos*, ¿cómo estaban los físicos tan seguros de que eran electrones las emisiones fotoeléctricas?

Profesor: Bueno, este proceso tardó aproximadamente una década y no fue bien conocido hasta 1902, cuando Lenard verificó que las partículas

emitidas eran electrones, al comparar su comportamiento frente a campos eléctricos y magnéticos externos con el de los rayos catódicos y midiendo su relación carga / masa.

Los resultados de Lenard pueden resumirse diciendo que la luz visible, de frecuencia relativamente pequeña, sólo produce el efecto fotoeléctrico en metales muy *electropositivos*. Por el contrario, la luz ultravioleta, de frecuencia mayor, lo origina en casi todos los metales. Finalmente, pudo contrastar que los *rayos X*, de frecuencia muy elevada, ocasionan este fenómeno en todos los metales.

Alumno: ¿Cuáles son las características de este efecto?

Profesor: Podemos asignar a cada metal una frecuencia mínima propia por debajo de la cual no se produce el efecto, denominada *frecuencia umbral*. Además, la cantidad de electrones emitidos es proporcional a la intensidad de la radiación absorbida por el metal y no depende de la frecuencia de la misma. Por el contrario, la velocidad de los electrones depende de la frecuencia absorbida, pero no de la intensidad de dicha radiación (Figura 6).

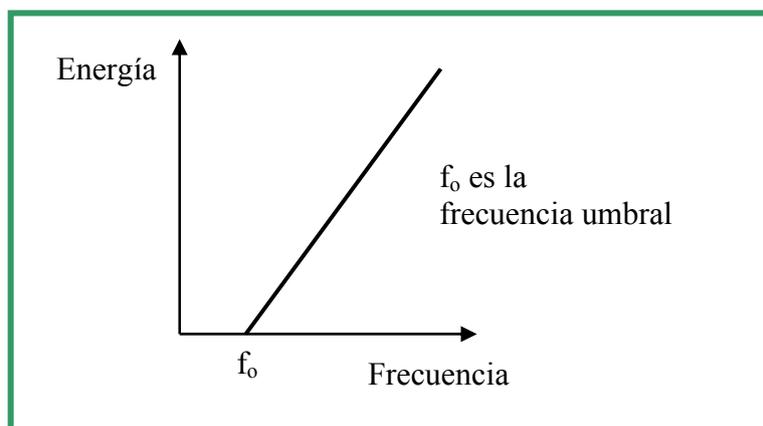


Figura 6.- Energía de los electrones en el efecto fotoeléctrico.

Alumno: Aún así, no entiendo el porqué este descubrimiento tiene influencia en la discusión sobre la naturaleza de la luz.

Profesor: ¡Ah! No sólo eso, su explicación ha contribuido a cambiar las ideas de la Física teórica. La interpretación de este fenómeno se debe a Einstein, quien en un detallado trabajo publicado en 1905 y que le permitió la consecución del premio Nobel, aclaraba que si deseamos arrancar un electrón de la superficie metálica, éste debe absorber como mínimo una energía equivalente a la que lo tiene retenido en ella, es decir, en el átomo metálico. Si el electrón recibe una energía superior, la diferencia se manifestará en forma de energía cinética.

Alumno: O lo que es igual, en una mayor velocidad,

Profesor: En efecto. Dicha relación no puede deducirse de la teoría electromagnética clásica, ya que, según ésta, la energía de la radiación es proporcional a la intensidad y no depende de la frecuencia.

Alumno: Por tanto, existe un fallo en la teoría clásica de la radiación, pues la energía de los electrones es proporcional a la frecuencia.

Profesor: Einstein, en su brillante artículo, demostró que se podían superar estas dificultades aplicando los postulados de la teoría cuántica de Planck al efecto fotoeléctrico y suponiendo que la luz adquiría una naturaleza corpuscular.

1.4. Teoría cuántica de Planck

Alumno: ¡Por fin entra en escena la teoría cuántica! ¿Es muy comprometido pedirle que me la explique?

Profesor: Por supuesto que no. Hoy ya hemos hablado de algunas cosas más difíciles de asimilar. Max Planck, en 1900, señaló que la única forma de interpretar los resultados experimentales de la distribución de la energía emitida por la radiación de un cuerpo negro era suponiendo que los átomos responsables de dicha emisión no pudieran adoptar cualquier valor de energía. La hipótesis de Planck condujo a que la energía emitida por los osciladores atómicos sólo podía tomar unos valores definidos, llamados "cuantos" de luz o fotones, proporcionales a la frecuencia de la radiación emitida.

Alumno: Se ha empleado el término *radiación de un cuerpo negro*. ¿Qué significa?

Profesor: Entendemos por tal aquel sólido que posea la máxima capacidad de absorción de la radiación que le llega, incluyendo lógicamente la luz visible, por lo que realmente se ve negro, lo cual justifica su denominación. No obstante, este material emite radiaciones electromagnéticas no visibles, cuyas frecuencias (y longitudes de onda correspondientes) dependen de su temperatura y no de su composición. En el año 1900, los británicos Rayleigh y Jeans estudiaron experimentalmente la distribución de la cantidad de energía de las radiaciones emitidas por este tipo de sólidos en función de sus longitudes de onda y obtuvieron algo sorprendente: la energía emitida presentaba un máximo en torno a los 2000 nanómetros y disminuía tanto si analizamos las longitudes de onda mayores, como si observamos en las menores.

Los resultados para los valores altos de la longitud de onda estaban de acuerdo con la teoría electromagnética porque las *ondas armónicas* (sinusoidales), como las que describen la propagación de los campos eléctricos y magnéticos, poseen menor energía (proporcional a su intensidad) conforme disminuyen sus frecuencias o aumentan sus longitudes de onda.

Por el contrario, según la teoría ondulatoria clásica, al disminuir la longitud de onda, aumentando consecuentemente la frecuencia, la energía emitida tendría que ser mayor, es decir, debería presentar un crecimiento exponencial a medida que decrece la longitud onda, lo cual estaba en total discordancia con lo observado por Rayleigh y Jeans. A este hecho se le conoció como "la catástrofe ultravioleta", puesto que era a esas longitudes de onda bajas, en la región UV, donde se hallaba la contradicción manifiesta entre los hechos experimentales y lo que podía deducirse de la teoría electromagnética.

Ahora bien, gracias a la idea de Planck, si la energía del fotón es proporcional a la frecuencia de la radiación, siempre será mayor cuanto menor sea la longitud de onda, pues entonces será mayor su frecuencia, en total concordancia con los datos experimentales.

Alumno: Antes de la aclaración previa íbamos a hablar sobre la explicación de Einstein.

Profesor: Él postuló que la luz no sólo se emite en forma discontinua, sino que también se propaga de igual modo. En vez de considerar la luz incidente como una radiación de frecuencia f , la imaginó como un chorro de partículas (los fotones), cada una de las cuales posee una energía proporcional a f . Cuando uno de dichos fotones incide sobre la lámina metálica cede su energía a uno de los electrones γ , si es superior a la energía mínima necesaria o energía umbral, arrancará al electrón de la superficie del metal. Por tanto, la energía cinética del electrón emitido se podrá calcular mediante la diferencia entre la energía del fotón incidente y la energía umbral.

Esta interpretación corpuscular de Planck-Einstein para el efecto fotoeléctrico mostró por vez primera la utilidad de la *teoría cuántica*, que rápidamente fue corroborada por el danés Niels Böhr incorporándola también en la construcción de su modelo atómico pocos años después.

1.5. Hipótesis de Louis de Broglie

Alumno: Ya veo la importancia de la teoría de los "cuantos". Aunque intuyo que debió tratarse de algo revolucionaria para su época.

Profesor: Naturalmente. Incluso el mismo Planck no creyó en la existencia real de los *fotones* en un principio. Su aplicación al análisis de la radiación del cuerpo negro fue casi un juego mental. Y fíjate a lo que nos ha conducido.

Alumno: Sin duda, esos años fueron especialmente interesantes para los hombres de ciencia.

Profesor: Claro. Además, tenían la virtud de apreciar el trabajo en equipo, de reunirse a debatir sus hipótesis y valorar el intercambio de opiniones. La Mecánica Cuántica, base de la Física Moderna, no podía haber sido obra de un solo hombre, sino la integración del trabajo de muchos equipos, primero en Europa, hasta la Segunda Guerra Mundial, y posteriormente, en Estados Unidos.

Alumno: No obstante, creo que estamos de nuevo con la idea de Newton. ¿No es una vuelta al pasado? ¿No es regresar a la teoría corpuscular de la luz?

Profesor: Ni mucho menos. Estos experimentos y otros realizados con electrones en los que presentaban propiedades típicamente ondulatorias, como la difracción o la interferencia llevaron al francés De Broglie en 1924 a enunciar su famosa *hipótesis de la dualidad onda-partícula*. Afirma que la luz tiene una doble naturaleza, es decir, se propaga mediante ondas electromagnéticas y manifiesta el comportamiento ondulatorio, pero que en ciertos experimentos de interacción con la materia ofrece un comportamiento corpuscular. Eso sí, jamás presenta simultáneamente el doble

carácter. Esta hipótesis no la redujo De Broglie exclusivamente a la luz, sino a todas las partículas materiales.

Alumno: ¿Quiere decir que un electrón también puede ser considerado como una onda?

Profesor: En efecto. La longitud de onda λ de la onda asociada a una partícula de masa m que se mueve con velocidad v se calcula, según De Broglie, mediante la expresión:

$$\lambda = \frac{h}{m v} \quad (\text{donde } h \text{ es la constante de Planck igual a } 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})$$

En los años siguientes se llevaron a cabo diversos experimentos con electrones, como los de Davisson y Germer acerca de su difracción en un cristal de níquel o el de G. P. Thomson que produjo interferencias con electrones, en los que estas partículas manifestaban propiedades típicamente ondulatorias, que confirmaron por completo la hipótesis de De Broglie.

Alumno: ¿Me está usted diciendo que hay evidencias experimentales de que los electrones son ondas?:

Profesor: Parece que no te quieres dar por enterado. Realizando cálculos sencillos con la ecuación anterior de De Broglie obtenemos para un electrón que se mueva a una velocidad de $6 \cdot 10^6$ m/s una longitud de onda asociada de unos 10 angstrom. Este valor es del mismo orden de magnitud que las distancias interatómicas en los cristales y se pensó en utilizar dichos cristales como redes de difracción para electrones ya que se habían empleado con anterioridad para difractar con éxito rayos X.

En la figura 7 se representa un esquema de la experiencia llevada a cabo en 1927 por Davisson y Germer. Los electrones emitidos por un filamento de wolframio (F) son acelerados por una cierta diferencia de potencial entre el filamento y la placa metálica P. Los electrones son dispersados por un cristal de níquel, pudiéndose medir la intensidad del haz electrónico en una dirección α determinada gracias a un galvanómetro conectado a la cámara colectora C. Girando convenientemente el soporte de la cámara se obtenían las intensidades de los electrones en distintas direcciones con objeto de representar gráficamente los resultados.

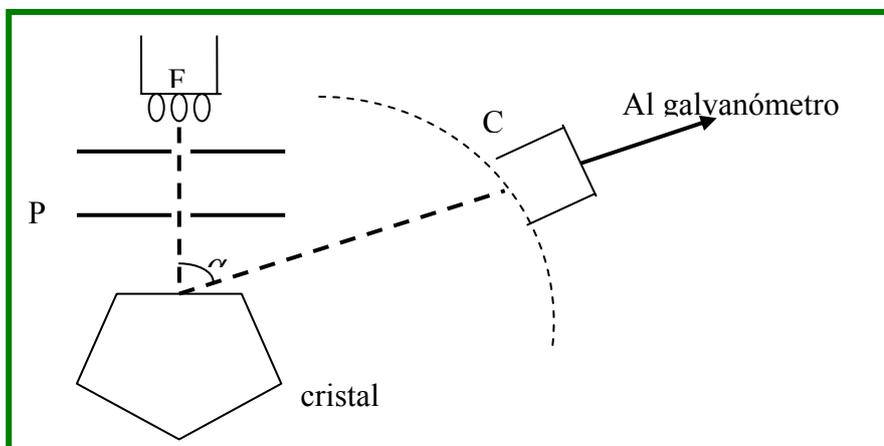


Figura 7.- Experimento de Davisson y Germer.

Los datos revelaron que para un ángulo de 50° existía una interferencia constructiva en la intensidad de los electrones, es decir, se observaba un refuerzo de las ondas asociadas al reflejarse en los átomos de níquel, regularmente espaciados en el cristal.

En la figura 8 se ilustra la explicación de este experimento considerando que las ondas asociadas a los electrones se reflejan en planos paralelos de átomos de níquel, perpendiculares al plano del dibujo.

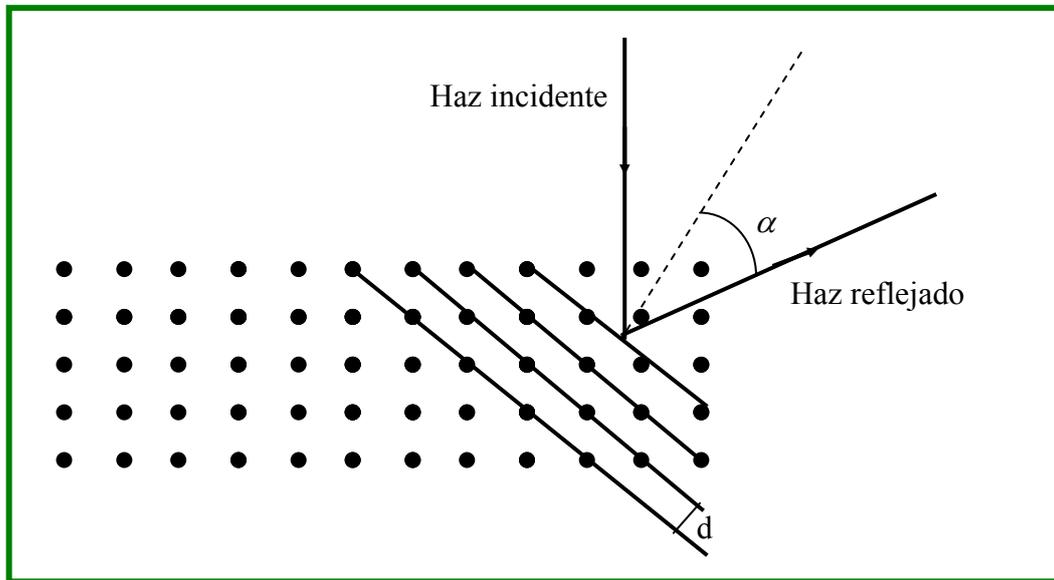


Figura 8.- Explicación del experimento de Davisson y Germer.

Conociendo la distancia d a partir de medidas de *difracción de rayos X* y utilizando el valor de 50° para el ángulo de dispersión hallado experimentalmente, se obtiene un valor para la longitud de onda asociada a los electrones de 1,65 angstrom, que concuerda perfectamente con el deducido al aplicar la hipótesis de De Broglie.

Alumno: Mencionó además otra experiencia similar.

Profesor: Desarrollando un procedimiento parecido al utilizado por Laue para obtener los espectros de rayos X, G. P. Thomson, en 1928, consiguió preparar espectros de difracción de electrones. Utilizó un tubo de gas con potenciales de unos 50.000 voltios para producir *rayos catódicos* que luego enviaba contra una lámina metálica muy delgada. El haz de electrones, tras chocar contra la lámina y ser dispersado incidía sobre la placa fotográfica (Figura 9). El espectro obtenido consistía en un conjunto de anillos perfectamente delimitados, concéntricos y con una mancha central, totalmente análogo a los que se obtienen por difracción de la luz.

Alumno: ¡Asombroso! Unos electrones que producen el mismo efecto que los rayos-X. Nunca lo hubiera creído. Cuántas sorpresas nos reserva la naturaleza.

Profesor: Veo que ya empiezas a darte cuenta de lo gratificante que es el mundo de la ciencia. No sólo tienen interés y misterio las novelas policíacas.

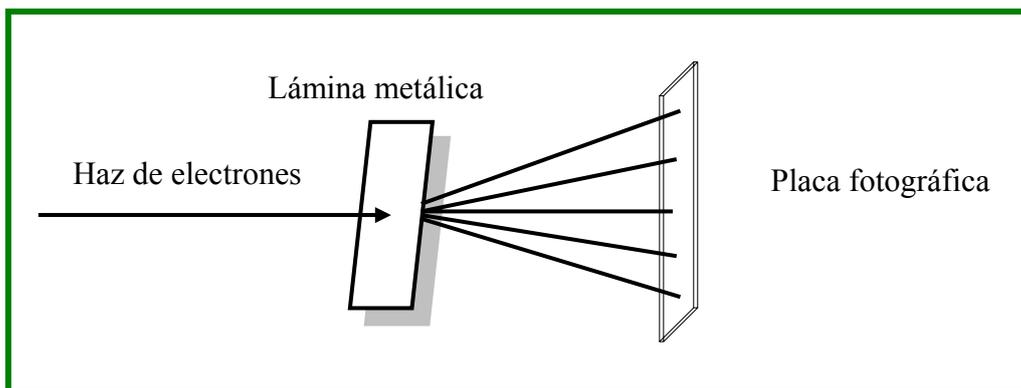


Figura 9.- Experiencia de G. P. Thomson.

Alumno: De todas formas, hay algo que me intriga. Aun admitiendo la enorme capacidad intelectual de todos estos científicos no se me ocurre cómo pudo De Broglie llegar a su ecuación.

Profesor: Como comprenderás, yo no le he conocido. Sin embargo, la ecuación anterior puede inferirse de la relación de equivalencia masa-energía de Einstein ($E = mc^2$ o bien $E = p c$, pues la cantidad de movimiento p es $m c$) sin más que sustituir E por su valor como $h f$, esto es $h f = p c$ y tener en cuenta que $\lambda f = c$:

$$\frac{h c}{\lambda} = p c$$

De donde:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m v}$$

A pesar de que la hipótesis de que toda partícula lleva "asociada" una onda en su movimiento no posee ninguna restricción, sólo es observable en el mundo subatómico. Los cálculos con la ecuación propuesta por De Broglie para obtener la longitud de onda de la onda asociada en objetos macroscópicos dan resultados muy pequeños, que escapan a nuestra capacidad de medición. Sin embargo, los datos obtenidos por Davisson, Germer, Thomson y otros sobre las longitudes de onda electrónicas confirman por completo las predicciones teóricas.

Alumno: ¿Cómo? Esto último no lo entiendo. ¿Todos los cuerpos tienen un carácter ondulatorio? ¿Nosotros también?

Profesor: Vamos por partes. La hipótesis sólo se confirma experimentalmente en el mundo subatómico. No obstante, su validez no puede ser rechazada en el mundo de los objetos "visibles".

Alumno: Comprendo. Ni la luz ni la materia son lo que parecen. Ambas comparten las mismas características, es decir, tienen la misma naturaleza.

Profesor: Exacto. En cada circunstancia predomina o se manifiesta una de las dos. En el mundo macroscópico las distinguimos con claridad. Por el contrario, en el mundo subatómico este doble comportamiento se alterna dependiendo del fenómeno estudiado.

Alumno: Pero nunca se observan los dos al mismo tiempo, ¿no es así?

Profesor: Completamente. Así lo afirma el *principio de complementariedad* enunciado por Böhr. Veo que has entendido el planteamiento de la nueva Física. Sin embargo, cuando intentamos profundizar demasiado en esta idea nos parece cada vez más misteriosa. La luz comportándose como los electrones y éstos como las ondas luminosas...resulta increíble. No obstante, la hipótesis de De Broglie, junto con la Teoría de Planck, son los dos pilares fundamentales sobre los que se ha construido el sorprendente edificio de la Física actual. Y como todo banco tiene como mínimo tres patas te diré que la tercera la forma el Principio de Incertidumbre de Heisenberg... del que hablaremos más adelante.

1.6. Cuestiones

Si no se conocen las respuestas a las siguientes cuestiones es aconsejable una nueva lectura de este capítulo.

- ¿Cuáles fueron las ideas básicas de las hipótesis defendidas por Newton y Huygens acerca de la naturaleza de la luz?
- ¿Qué es un campo? ¿Cómo se representan los campos de fuerzas?
- ¿Cuál fue la aportación de Maxwell a la teoría de la luz?
- ¿En qué consiste el efecto fotoeléctrico?
- ¿Qué es la catástrofe ultravioleta?
- ¿Cuál es la idea principal de la teoría cuántica?
- ¿Cómo explicó Einstein el efecto fotoeléctrico?
- ¿Qué entendemos por dualidad onda-partícula y cuál es su ámbito de validez?

2. EL PRIMER MODELO CUÁNTICO DEL ÁTOMO

2.1. Evolución del concepto de átomo

Alumno: He estado reflexionando sobre lo que hablamos el otro día y, si no me he perdido entre tantas nuevas ideas, creo que la finalidad de todo ello es buscar una explicación sobre el modo en que está constituido el átomo.

Profesor: ¡Enhorabuena! Mis palabras no caen en saco roto. Efectivamente, la Física cuántica proporciona la visión actual del microcosmos.

Alumno: Eso mismo. Ahí quería llegar. Esta visión cuántica nace en el siglo XIX, pero... ¿cómo pensaban los hombres que eran los átomos anteriormente?

Profesor: Has tocado uno de mis temas favoritos. Si analizamos cómo ha cambiado la idea que los hombres han denominado átomo, podemos asistir a uno de los capítulos más apasionantes en la historia de la Ciencia. Siguiendo el hilo cronológico de los modelos teóricos, cada vez más precisos, derivados de los fenómenos observados, es posible apreciar el modo en que evoluciona el conocimiento científico y comprender la esencia de su método.

Alumno: Quisiera preguntarle sobre esto.

Profesor: Naturalmente. Podemos hacer un breve recorrido a lo largo de los 25 siglos que tiene de vida el concepto de *átomo*, recordando los momentos cruciales en los que se produjeron los cambios más drásticos, así como los principales responsables de éstos y los hechos experimentales que los indujeron. Ente todas las teorías científicas, este es un bonito paradigma muy útil para observar el desarrollo de la Ciencia y el modo en que se construye su cuerpo de conocimientos. Cada nuevo avance ha de responder a todos los hechos anteriores y explicar los nuevos fenómenos que la teoría antigua no era capaz de asumir.

Alumno: Así pues, la revisión de la teoría viene demandada por algún hecho experimental desconcertante, que no encaja con el modelo considerado como válido en ese momento.

Profesor: Exactamente. Y el nuevo modelo, una vez completado con éxito, debe permitir realizar predicciones acerca de fenómenos relacionados en el marco de esa teoría. Cuando esto se consigue, la confirmación del modelo se puede dar por alcanzada. Ahora bien, el perfeccionamiento en las técnicas instrumentales y el avance de la tecnología puede, con el tiempo, dar lugar a nuevos fenómenos que obliguen a una ulterior revisión del modelo.

2.2. La filosofía griega y los elementos

Alumno: Pues bien. ¿Cuándo y dónde comenzó todo?

Profesor: Desde la más remota antigüedad, los filósofos griegos se habían preguntado acerca del modo en que estaban constituidas las cosas. Concibieron la idea de elemento primordial que animaba todo lo que hay en

la naturaleza. Así, Tales de Mileto, en el siglo VI a.C. pensó que el *agua* era el componente básico de todas las cosas. De él partió la idea de que este elemento originaba, mediante transformaciones, el resto de sustancias. Dicho pensamiento tuvo eco en sus contemporáneos, aunque no creyeron en el agua como elemento primordial, proponiéndose otros, como el *aire* para Anaxímenes, también de Mileto, o el *fuego* para Heráclito de Éfeso (siglo V a.C.)

No obstante, el salto cualitativo en la noción de elemento lo dio Empédocles de Sicilia, de la escuela pitagórica, en el siglo V a. C., sugiriendo la existencia de varios elementos, los ya conocidos agua, aire y fuego, y un cuarto añadido por él: *tierra*. De este modo, cualquier sustancia natural se hallaba formada por la combinación de esos cuatro elementos en las proporciones adecuadas. En el siglo IV a. C., Aristóteles de Estagira, el más famoso pensador de la Grecia clásica, asumió esta idea e incluyó un quinto elemento (*quintaesencia*): el *éter*, que llenaría los cielos.

Alumno: Recuerdo haber estudiado la *teoría geocéntrica* y cómo en la Antigüedad se pensaba que las estrellas y planetas giraban en torno a la Tierra suspendidos en un fluido muy sutil, denominado éter.

Profesor: Ptolomeo fue su autor principal y Aristóteles su valedor más famoso. Él ha tenido buena culpa del éxito de esta equivocada teoría que tantos problemas ocasionaron a muchos. Algunos, como Giordano Bruno, incluso murieron por defender su contraria: la *teoría heliocéntrica*. Al mismísimo Galileo casi le sucede lo mismo, de no ser por su reputación y sus amistades entre el clero de su tiempo.

Alumno: Sin embargo, Aristóteles no iba tan mal encaminado al considerar que la combinación de elementos generaba todo lo que existe en la naturaleza.

Profesor: Dicho así, tengo que estar de acuerdo contigo. Pero, en mi humilde opinión, el Aristóteles "naturalista" no estaba a la altura del Aristóteles "pensador".

Alumno: ¿Por qué?

Profesor: Porque la gran idea aportada por la filosofía griega no fue suya.

Alumno: ¿A qué se refiere?

2.3. Nace la idea de átomo

Profesor: Ya en el siglo V a. C., el filósofo jonio Leucipo razonó que todos los cuerpos se pueden dividir por sucesivas particiones hasta llegar a un punto en el cual los tamaños de las partículas sean tan pequeños que impida otra nueva división. Su discípulo Demócrito de Abdera acuñó el término *átomo* para designar a los menores constituyentes de la materia que no admiten más división. Nació definitivamente la *filosofía atomista*, que iba a ser rotundamente denostada por Aristóteles.

Considerando la influencia de Aristóteles en el pensamiento no sólo de su época, sino de muchos siglos posteriores, no es de extrañar que la acertada idea de la existencia de los átomos fuera olvidada por la comunidad científica durante más de dos milenios.

Alumno: ¡Vaya!, otra de las injusticias de la historia de la ciencia.

Profesor: En efecto...y la más duradera. Fíjate cuán larga era la sombra de Aristóteles que se necesitaron 23 siglos para que alguien resucitase al átomo.

Alumno: ¿Cómo fue?

2.4. Vuelven los átomos

Profesor: Desde que en el siglo XVII, y sobre todo en el XVIII, la Química había adquirido carta de naturaleza como una importante rama del conocimiento humano, se habían descubierto un conjunto de leyes sobre los pesos que intervenían en las combinaciones de sustancias para obtener los compuestos, debidas a los franceses Lavoisier y Proust, y al británico Dalton, las cuales se completaron con las *leyes volumétricas* de los gases, enunciadas por el francés Gay-Lussac y el italiano Amadeo Avogadro.

Alumno: Sí. La ley de Lavoisier también se conoce como *ley de la conservación de la masa*, porque afirma que la masa de sustancias reaccionantes es igual a la masa de los productos. O dicho de otra manera: la masa no se puede crear de la nada.

Profesor: Menos mal que Lavoisier no estudió reacciones nucleares.

Alumno: ¿Por qué lo dice?

Profesor: Porque entonces tendría que haber enunciado la ley de la conservación de la masa-energía, puesto que no se cumple exactamente para las reacciones nucleares. De todos modos, ya fue importante su trabajo. No era una ley tan evidente como ahora nos pueda parecer porque tuvo que diseñar buenos montajes experimentales que le permitieran recoger y pesar los gases que eventualmente intervinieran en las reacciones estudiadas, y así comprobar la perfecta validez de la ley. Lavoisier en su libro "*Tratado de Química*" nos dejó un importante legado que sus contemporáneos no supieron valorar. Tuvo la desgracia de trabajar para el Rey en los años de la Revolución Francesa y el pueblo no le perdonó. Murió en la guillotina.

Alumno: ¡Caramba! Otra ironía del destino. La ley de Proust también se llama *ley de las proporciones constantes*, puesto que indica que al combinarse dos elementos para formar un determinado compuesto siempre lo hacen en la misma proporción en peso. Tiene su complemento en la ley de Dalton de las *proporciones múltiples*, cuando se estudian varios compuestos a partir de distintos pesos de los mismos elementos. Dalton comprobó que estos diferentes pesos guardaban entre sí unas relaciones sencillas, que se podían expresar mediante números enteros.

Profesor: Excelente. Me doy cuenta de que dominas perfectamente las *leyes ponderales* clásicas de la química.

Alumno: ¿Ponderales?

Profesor: Se llaman así porque hacen referencia al peso de las sustancias. ¿Recuerdas igualmente las volumétricas?

Alumno: Por supuesto, se trata de la *ley de los volúmenes de combinación*, que se debe al francés Gay-Lussac. Explica que al mezclar varios gases y formar los mismos productos siempre lo hacen en la misma proporción volumétrica.

Profesor: Muy bien. Con el fin de explicar dichas leyes, el propio John Dalton volvió a la antigua idea del átomo como constituyente de la materia en su *teoría atómica* presentada en los inicios del siglo XIX. En su obra, titulada "*Nuevo sistema de filosofía química*", Dalton afirmó que los átomos de un elemento eran iguales entre sí y que los compuestos se originaban por la unión de átomos de los elementos correspondientes en unas cantidades definidas. Poco después, Avogadro denominó *moléculas* a las menores unidades constituyentes de los compuestos, formadas por la unión adecuada de sus átomos. En este momento el átomo se identifica con una partícula indivisible.

Alumno: Pero hoy sabemos que el átomo no es tan simple como lo imaginaba Dalton. ¿Por qué tenemos aún que estudiar su modelo?

Profesor: No te das cuenta de que fue el primer modelo atómico moderno. Ahí reside su interés. Él supo volver la vista a la filosofía griega y hacer resurgir el concepto de átomo. También dio un gran impulso a la sistematización en la formulación química. Por otro lado, el modelo de Dalton tuvo una larga vida, pues hasta finales de siglo, en 1897, no sucedió el hecho que obligó a su revisión: el descubrimiento del electrón, que rompía con el concepto de indivisibilidad del átomo.

El inglés J. J. Thomson consiguió demostrar por primera vez que los *rayos catódicos* obtenidos al someter un gas a elevados potenciales en los tubos de descarga estaban constituidos por unas partículas muy pequeñas, de carga eléctrica negativa, que formaban parte de todos los átomos y que más tarde fueron denominadas electrones. El término para designar a la primera partícula subatómica descubierta se debe a una propuesta de Stoney, porque *electrón* significa ámbar en griego, una resina fósil muy utilizada en los primeros ensayos de electrización. Gracias al experimento del norteamericano Millikan, en 1911, se conocieron los valores de la carga y la masa de estas partículas, confirmándose que son integrantes de todos los átomos y mostrando, por consiguiente, su divisibilidad.

Sin embargo, el modelo de Thomson aún imaginaba un átomo más o menos esférico, con los electrones incrustados en una masa positiva, resultando un conjunto eléctricamente neutro (Figura 10).

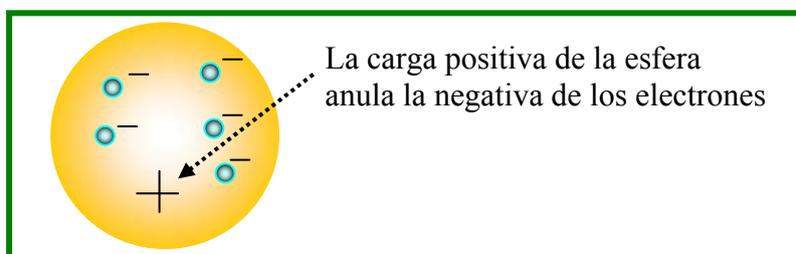


Figura 10.- Modelo atómico de Thomson.

2.5. Las órbitas electrónicas

Alumno: Me imagino que debió suceder algo que hiciera evolucionar la idea que los físicos tenían del átomo.

Profesor: Pues claro, en esto se basa el método científico. Cuando una hipótesis es confirmada mediante los experimentos, se puede transformar en una ley científica que establezca una relación entre determinadas variables, susceptible de ser enunciada o expresada matemáticamente. Al estudiar un conjunto de leyes relacionadas con un mismo tema, en ocasiones es posible hallar algunas regularidades que den lugar a unos principios generales con los cuales se constituye una teoría.

Podemos decir que el método científico es el procedimiento para elaborar teorías, entendiendo éstas como un grupo organizado y jerarquizado de leyes, donde juegan un papel decisivo la inducción y la deducción. Mediante la inducción se obtiene una ley a partir de las observaciones y medidas de los fenómenos naturales, y mediante la deducción se obtienen consecuencias lógicas de una teoría.

Alumno: Si no lo he entendido mal, el método de la ciencia consiste en la reproducción controlada en el laboratorio de los fenómenos observados previamente en la naturaleza.

Profesor: Por esto, para que una teoría científica sea admisible debe relacionar de manera razonable muchos hechos, en apariencia independientes, en una estructura mental coherente. Así mismo, debe permitir hacer predicciones de nuevas relaciones y fenómenos que se puedan comprobar experimentalmente.

Alumno: Comprendo. A partir de los resultados experimentales establecemos una ley y de su expresión matemática realizamos predicciones acerca de nuevos fenómenos, que inmediatamente pasamos a comprobar. No obstante, cuando se descubre un hecho que no se pueda explicar en el marco de una teoría determinada nos veremos obligados a modificarla.

Profesor: Así fue sucediendo en el estudio del átomo. Los avances en el campo tecnológico y en el diseño experimental permitieron constatar diversos fenómenos que, cada cierto tiempo, creaban la necesidad de revisar el modelo.

Alumno: Se refiere usted al modelo atómico. ¿Qué es, en general, un modelo científico?

Profesor: Podemos decir que los modelos se sitúan en un nivel superior, pues se elaboran tomando como base las leyes y las teorías. Los modelos científicos son una abstracción mental, una interpretación de la naturaleza, dotados generalmente de una estructura lógico-matemática, que se utilizan para poder explicar algunos fenómenos relacionados y para representar por aproximación al objeto considerado en la investigación. El modelo será tanto mejor cuanto más se asemeje al comportamiento real del objeto. No es imprescindible que esas interpretaciones sean ciertas, sino que sean útiles y eficaces para el fin que se persigue. Por ejemplo, no importa demasiado saber si los electrones giran en órbitas alrededor del núcleo, sino que lo realmente importante es que se comportan como si lo hicieran. Por

eso, como te decía, el modelo atómico, igual que otros, ha sufrido tantos cambios a lo largo de la historia de la ciencia, debido, por un lado, al avance del conocimiento científico y, por otro, al desarrollo de la tecnología que proporciona a la ciencia unos medios cada vez mejores para estudiar la naturaleza.

En definitiva, hemos de pensar en los modelos científicos como concepciones dinámicas, que se modifican y evolucionan constantemente y que son el resultado de las interacciones entre las observaciones y las hipótesis, centro de la actividad científica.

Alumno: Parece que lo verdaderamente importante no es conocer la realidad sino ser capaces de interpretarla.

Profesor: Bueno, más o menos, siempre que se haga en términos cuantitativos.

Alumno: Me iba a decir el motivo por el que se tuvo que abandonar el modelo de Thomson.

Profesor: Claro. Paralelamente al estudio de los rayos catódicos se realizaron ensayos similares, llevados a cabo por el alemán Goldstein, empleando cátodos perforados. Sus investigaciones condujeron al descubrimiento del protón, otra partícula subatómica, de carga positiva e igual a la del electrón, si bien de una masa casi dos mil veces mayor. Ya no quedaba ninguna duda de que el átomo poseía una estructura interna.

Alumno: ¿Tuvo mucha duración la validez del modelo atómico de Thomson?

Profesor: Lo cierto es que no demasiado. Menos de una década. El comienzo de su declive lo hemos de situar en un famoso experimento realizado por el británico Ernest Rutherford en 1911. En él, bombardeó con *partículas alfa* distintas láminas metálicas y sus resultados le llevaron a proponer una modificación sustancial en el concepto del átomo. Para justificar las desviaciones de las partículas al atravesar las láminas, no había más remedio que considerar al átomo como una *zona central* muy reducida de carga positiva, que contiene a los protones, en torno a la que giran los electrones en órbitas circulares y en número igual al de los protones.

Rutherford calculó que el tamaño de la *corteza*, formada por las órbitas electrónicas, debía ser unas cien mil veces mayor que el del núcleo, si bien la masa total del átomo se hallaba concentrada casi exclusivamente en éste último. Cuando Rutherford explicaba su modelo lo comparaba con un sistema planetario en miniatura. A él se debe la noción de *espacio vacío* en las amplias regiones de la corteza no ocupadas por los electrones (Figura 11).

Alumno: ¿Dio, Rutherford, indicaciones acerca del número de órbitas o de cuántos electrones giraban en cada una?

Profesor: Realmente no. Este modelo no tenía capacidad para determinar lo que me preguntas. Además, el propio autor ya sabía de sus limitaciones. Por ejemplo, la teoría electromagnética clásica no permite que una carga que gira, aunque sea con velocidad constante, no pierda energía. El átomo de Rutherford tuvo los días contados, no era una estructura estable. El

electrón, al ir perdiendo energía, iría describiendo órbitas sucesivamente menores hasta precipitarse contra el núcleo.

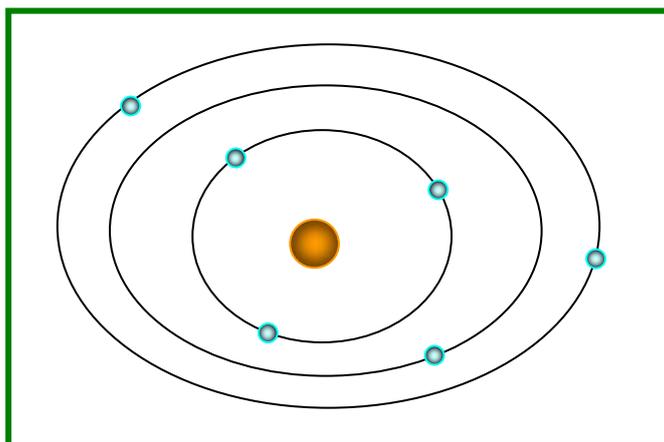


Figura 11. Modelo de Rutherford.

Alumno: Y ello acabaría con el átomo.

Profesor: Sin embargo, no fue sólo eso lo que provocó la crisis. Por dicha época era un misterio la obtención de los *espectros atómicos*.

Alumno: No me suena muy bien eso de los espectros.

Profesor: Su denominación hace referencia a las radiaciones luminosas. Cuando se les comunica energía a los átomos, en estado gaseoso, vuelven a su estado fundamental emitiendo ciertas radiaciones, de unas longitudes de onda o frecuencias características. Si las recogemos sobre una placa fotográfica obtenemos su *espectro de emisión* (Figura 12) que sirve para identificar al átomo en cualquier tipo de muestra. Además, el grosor o intensidad de las rayas nos determina la concentración de ese elemento.



Figura 12. Espectro de emisión.

Alumno: Luego un espectro es algo así como las huellas digitales de un elemento.

Profesor: Muy buena comparación. El caso más curioso que recuerdo es el del estudio del espectro solar. Descubrieron unas rayas que no se correspondían con ningún elemento conocido en la Tierra y lo llamaron helio, lógicamente. Con el tiempo, el helio, un elemento de la familia de los gases nobles, también fue identificado en la Tierra, pues se halla en una pequeña proporción en nuestra atmósfera.

De la misma manera, el *espectro de absorción* de un átomo se obtiene vaporizándolo e iluminándolo con luz blanca, y recogiendo en una placa fotográfica las radiaciones resultantes. Se observa un espectro continuo de

colores con ciertas rayas negras, que son precisamente las radiaciones absorbidas por el átomo y que coinciden exactamente con las de su espectro de emisión.

Alumno: Sospecho que no hubo forma de explicar esto con el modelo de Rutherford.

Profesor: Pues no. El modelo era algo rudimentario, a pesar de su carácter innovador en 1911.

2.6. Un nuevo cambio: el modelo de Böhr

Alumno: Me imagino que existiría un cierto nerviosismo en la comunidad científica por ver cómo se lograba encajar este fenómeno tan misterioso.

Profesor: Si fue así, lo cierto es que hubo que esperar poco tiempo. Después del impacto que la teoría cuántica de Planck causó en el año 1900, el danés Niels Böhr, fue el primero en apreciar su utilidad a la hora de interpretar la emisión y la absorción de energía a escala atómica. Basó su modelo en unos sencillos *postulados* de los cuales derivó las expresiones de los *radios* y las *energías* de las *órbitas electrónica*. Además, aplicó la ecuación de Planck para calcular los cambios energéticos asociados a las *transiciones* o saltos del electrón cuando se mueve desde una órbita a otra en el átomo de hidrógeno, al considerar las interacciones eléctricas con el protón del núcleo.

Este modelo es el primero que incorpora la visión actual de la Física Atómica, porque introduce la idea de que los valores de la energía (y del radio de las órbitas) no pueden ser cualesquiera sino que están *cuantizados*. No obstante, sigue prevaleciendo la existencia de órbitas electrónicas, que concuerdan perfectamente con el concepto clásico de trayectoria.

Alumno: No entiendo bien ese término "cuantizado".

Profesor: Significa que ni el radio ni la energía pueden adoptar cualquier valor sino que sólo les están permitidos algunos de ellos. Se deducen de relaciones matemáticas en las que intervienen los "números cuánticos", cuyos posibles valores son los que sirven para calcular dichos radios y las energías de las órbitas.

Alumno: Algo así como si en una carpintería en lugar de poder comprar tablones de la longitud que deseamos sólo nos ofrecen respectivamente de 50 cm, de 60, de 80 o de 110 cm, por ejemplo.

Profesor: Entonces diríamos que la longitud de los tablones está cuantizada.

Alumno: ¿Es muy complicado el fundamento matemático del nuevo modelo?

2.7. Postulados de Böhr

Profesor: Ciertamente, no. El modelo de Böhr para el átomo de hidrógeno data de 1913 y se construye a partir de dos postulados:

I) El electrón gira en torno al núcleo, sin perder energía, en órbitas circulares que cumplan la condición de que el momento angular del electrón sea un múltiplo entero de la constante de Planck:

$$m v 2 \pi R = n h$$

Donde m es la masa del electrón; v , su velocidad; R , el radio de la órbita; h , la constante de Planck y $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

II) El átomo sólo emite o absorbe energía cuando el electrón pasa de una órbita a otra inferior o superior, respectivamente. La energía emitida o absorbida en forma de radiación electromagnética es igual a la diferencia de energía entre ambos estados (órbitas) y viene expresada por la fórmula de Planck:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h f$$

Siendo E_1 y E_2 las energías de las órbitas inicial y final entre las que se produce la transición, h la constante de Planck y f la frecuencia de la radiación emitida o absorbida.

2.8. Radio y energía de las órbitas

Alumno: ¿Y con dos postulados únicamente se elabora el modelo? Parece fácil.

Profesor: En efecto, sólo se necesita dominar con relativa fluidez los cálculos algebraicos y ciertos contenidos de dinámica y electricidad. Recordemos que el electrón se considera una carga puntual $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ culombios, que gira en trayectorias circulares de radio R , con velocidad uniforme v , alrededor del protón, otra carga puntual del mismo valor absoluto aunque de signo positivo.

En este movimiento de rotación, la fuerza normal ha de ser precisamente la fuerza de atracción eléctrica entre el electrón y el núcleo:

$$\frac{m v^2}{R} = K \frac{e^2}{R^2}$$

De donde:

$$R = \frac{K e^2}{m v^2}$$

Llevando a la fórmula anterior la expresión de v dada por el primer postulado y simplificando, obtenemos los posibles valores para el radio de las órbitas, que dependen del número cuántico n , el cual puede adoptar valores naturales, desde 1, para la órbita *fundamental*, en adelante, para las órbitas sucesivas:

$$R = \frac{n^2 h^2}{4 \pi^2 K m e^2} \quad (1)$$

Por otro lado, la energía del electrón se deduce sumando sus energías cinética y potencial eléctrica:

$$E = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{K e^2}{R}$$

Sustituyendo v de la fórmula del primer postulado y R de la ecuación (1) llegamos a:

$$E = -\frac{2 \pi^2 K m e^4}{n^2 h^2} \quad (2)$$

Sustituyendo en las ecuaciones (1) y (2) las constantes m , e , h y K , resulta:

$$R = 0,53 n^2 \text{ angstroms} \quad \text{y} \quad E = -\frac{13,6}{n^2} \text{ electron-voltios}$$

Como te decía, esas expresiones muestran que tanto el radio de las órbitas como su energía se hallan *cuantizados*.

Alumno: Así, para determinar la energía de la transición electrónica desde la órbita de radio R_1 , obtenido con $n = 1$, hasta la R_2 , con $n = 2$, basta hallar $E_2 - E_1$, haciendo previamente $n = 1$ y $n = 2$ en la expresión de E (Figura 13).

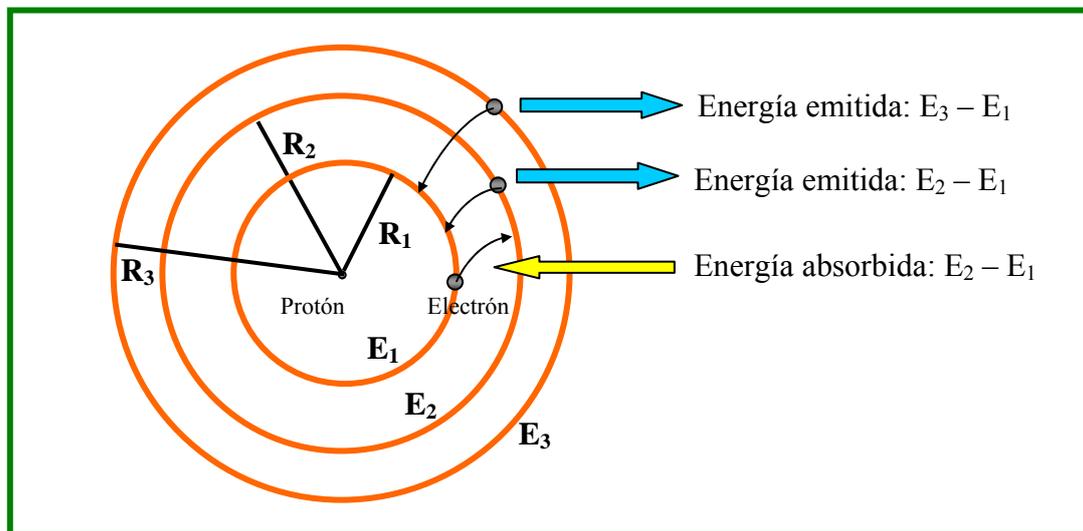


Figura 13. Transiciones electrónicas en el átomo de Bohr.

Profesor: Claro. Estas fórmulas permitían asignar perfectamente todas las rayas del espectro del hidrógeno a sus respectivas transiciones electrónicas.

Alumno: Eso tuvo que ser un gran éxito.

Profesor: Por supuesto. Ahí comenzó de verdad la revolución cuántica. Por cierto, si reflexionamos detenidamente sobre los postulados de Bohr y recordamos la hipótesis de la dualidad onda-corpúsculo, hallamos interesantes relaciones. A pesar de que ésta última fue muy posterior, pues hubo de transcurrir más de una década, nos sorprende la concordancia.

Alumno: Aparentemente, no se me ocurre ninguna.

2.9. Relaciones con la ecuación de De Broglie

Profesor: Recuerda que Louis de Broglie propuso que todas las partículas, incluyendo al electrón, en su movimiento poseen asociada una onda, cuya longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{h}{m v}$$

(h es la constante de Planck; m, la masa y v, la velocidad de la partícula).

Con eso, admitimos que toda partícula subatómica, como el electrón, presenta una doble naturaleza, de onda y de materia, ofreciendo en cada circunstancia experimental una de ambas y nunca las dos al mismo tiempo, lo que se conoce como *principio de complementariedad*.

Pues bien, si suponemos que el electrón en su movimiento alrededor del núcleo del átomo de hidrógeno (Figura 14) no cambia de órbita –y no pierde energía–, se le puede *asociar* una onda *estacionaria* de manera que su longitud de onda debe cumplir la condición:

$$2 \pi R = n \lambda \quad (n = 1, 2, 3...)$$

ya que la longitud de la trayectoria del electrón tiene que ser un múltiplo de la longitud de onda de la onda asociada.

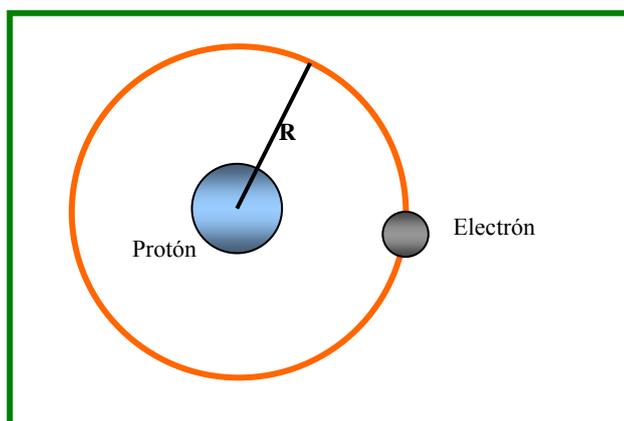


Figura 14. Órbita estacionaria.

Alumno: ¿Por qué han de ser ondas estacionarias?

Profesor: Los átomos, cuando emiten o absorben energía se comportan como osciladores armónicos. Y ya sabes que las ondas estacionarias se pueden generar por la propagación en el mismo medio de una onda armónica y su onda reflejada. De esta manera, no resulta raro comparar los estados de energía del electrón en el átomo con los posibles “modos de vibración” de las ondas estacionarias.

Alumno: Ya comprendo. Seguimos utilizando un modelo. No describimos al átomo, sólo necesitamos compararlo con otro objeto físico ya conocido, en este caso, las ondas estacionarias.

Profesor: Recuerda que el electrón posee también una naturaleza ondulatoria en su comportamiento.

Volviendo a los cálculos, si en la fórmula anterior sustituimos la longitud de onda dada por la ecuación de De Broglie, tendremos:

$$2 \pi R = n \frac{h}{m v}$$

Y, moviendo términos, llegamos fácilmente a la expresión del primer postulado:

$$2 \pi R m v = n h$$

Por otra parte, si comenzamos desde la ecuación del segundo postulado, $\Delta E = h f$, y recordamos la equivalencia masa-energía dada por Einstein, llegamos a:

$$m c^2 = h f$$

O bien:

$$\frac{c}{f} = \frac{h}{m c}$$

Y puesto que la frecuencia se relaciona con la longitud de onda por:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Tendremos: $\lambda = \frac{h}{m c}$, es decir, $\lambda = \frac{h}{p}$, que es la ecuación de De Broglie aplicada a un fotón, donde p es su cantidad de movimiento.

Alumno: O sea, que se puede deducir la hipótesis de De Broglie partiendo del segundo postulado. Muy interesante.

Profesor: No olvides que la dualidad onda-partícula, idea subyacente en la descripción del mundo atómico, es uno de los pilares fundamentales de la mecánica cuántica. Esto nos demuestra, no sólo la permanente interrelación entre los conceptos cuánticos, sino la importancia de los postulados del físico danés, que consciente o inconscientemente, llevaban implícita la idea de la *naturaleza dual* de la materia. La *exigencia matemática*, por decirlo de un modo gráfico, de la hipótesis onda-partícula, nos consuela, en cierto modo, de la dificultad conceptual que supone imaginar este fenómeno, idea central en el desarrollo de la mecánica cuántica y clave en el estudio de las interacciones que afectan a las partículas fundamentales.

2.10. Cuestiones

Si no se conocen las respuestas a las siguientes cuestiones es aconsejable una nueva lectura de este capítulo.

- Explique en qué consiste un modelo científico.
- ¿Cómo pensaban los filósofos griegos que estaba constituida la materia?
- ¿Cómo se llegó al concepto de átomo?
- ¿Cuáles son las leyes clásicas de la química? Enúncielas.
- ¿Cómo imaginó Dalton al átomo?

- ¿Qué hechos condujeron al modelo de Thomson? ¿En qué se diferenciaba del modelo de Dalton?
- Describa el famoso experimento de Rutherford de 1911 y las características de su modelo atómico.
- ¿Qué hechos invalidaban el modelo de Rutherford?
- Enuncie los postulados de Böhr.
- ¿Cómo se pueden obtener el radio y las energías de las órbitas electrónicas según el modelo de Böhr?
- ¿Cuál es la idea que expresa el principio de complementariedad?
- ¿Qué relación es posible establecer entre el átomo de Böhr y la dualidad onda-partícula?

3. EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE

Alumno: Nos quedó pendiente un tema señalado como fundamental en el desarrollo de la Física Moderna. ¿Qué le parece si hablamos de ello?

Profesor: Estupendo. No cabe duda de que se trata del Principio de Incertidumbre de Heisenberg, cuyas consecuencias son importantísimas, tanto para el edificio matemático de la teoría atómica moderna como desde el punto de vista conceptual.

3.2. Enunciado del principio de incertidumbre

Alumno: ¿Cuándo se estableció y por qué?

Profesor: Es una consecuencia directa del carácter dual de la materia. Fue enunciado en 1927 por el alemán Werner Heisenberg y se le conoce también como *principio de indeterminación*.

Alumno: Me parece que los años veinte fueron claves en el mundo cuántico. Todos los avances teóricos se produjeron en esa década.

Profesor: Resulta gracioso que en el mundo contemporáneo hagamos referencia a ese tiempo como *“los locos años veinte”*. En lo que a la mecánica cuántica concierne deberíamos llamarlos *“los prodigiosos años veinte”*. Fue una época muy creativa en el mundo de la Física Teórica.

Alumno: Seguro. Pero, volviendo al Principio de Heisenberg, ¿Por qué es tan importante?

Profesor: De acuerdo con los postulados de la mecánica clásica, si conocemos la velocidad y la posición iniciales de una partícula podemos predecir con exactitud su nueva posición y velocidad al cabo de un cierto tiempo, una vez establecidas las fuerzas que actúan sobre ella, por una sencilla aplicación de las leyes de la dinámica de Newton. Por el contrario, esto no es posible en el mundo subatómico, como lo prueban las experiencias con electrones, ya que su naturaleza ondulatoria hace imposible la determinación exacta y simultánea de la posición y la velocidad. Esto tiene unas consecuencias muy profundas en la Física Moderna.

Alumno: ¿Me puede recordar su enunciado?

Profesor: El Principio de Incertidumbre se enuncia de este modo:

“Es imposible conocer con exactitud y simultáneamente la *posición* y la *cantidad de movimiento* de una partícula, de modo que el producto de los errores cometidos en la determinación de cada una de dichas magnitudes cumplen la relación:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

Siendo Δx la incertidumbre en la medida de las coordenadas de la partícula, Δp la incertidumbre en la medida de su cantidad de movimiento y h la constante de Planck”. Eso implica que al pretender un alto grado de exactitud en el conocimiento de la posición de un electrón, por ejemplo, obtenemos una mala medida de su velocidad.

Alumno: Empiezo a darme cuenta de la envergadura de este asunto. Casi podríamos considerar a este Principio como una limitación experimental que viene marcada por la naturaleza dual de la materia. ¿Obedece a algún planteamiento su expresión matemática?

Profesor: Lógicamente, Heisenberg llevó a cabo una compleja argumentación matemática para justificar su Principio, no obstante podemos hacernos una idea de su enorme validez imaginando un caso simplificado: la medida de la posición y velocidad de un electrón en un átomo. Así, para observarlo será necesario iluminar este electrón con un fotón de una cierta energía y cantidad de movimiento (Figura 15). Podemos tomar como indeterminación en la posición del electrón el valor de su longitud de onda asociada, pues ahora consideramos su naturaleza ondulatoria, que viene dada por la ecuación de De Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{m v} = \frac{h}{p}$$

(h es la constante de Planck y p la cantidad de movimiento).

Por otro lado, el fotón, al chocar, cederá parte de su energía al electrón, modificando así la cantidad de movimiento p de este último. Suponiendo que la incertidumbre en dicha cantidad de movimiento sea su propio valor p, tendremos al multiplicar ambos valores:

$$\Delta x \cdot \Delta p = \lambda \cdot p = \frac{h}{p} \cdot p = h$$

Esto quiere decir que el producto $\Delta p \cdot \Delta x$ es del orden de magnitud de la constante de Planck, como afirma el principio de incertidumbre.

Podemos comprobar su importancia mediante un sencillo cálculo. Supongamos que es posible expresar la posición del electrón con un error de 10^{-12} m (una centésima de angstrom). Sustituyendo en la relación de incertidumbre, obtenemos un valor aproximado:

$$\Delta p \approx 5,27 \cdot 10^{-23} \text{ kg m/s}$$

Este valor en la indeterminación de la cantidad de movimiento será despreciable en *sistemas macroscópicos* pero no en el mundo subatómico, donde con los electrones, por ejemplo, intervienen masas del orden de 10^{-30} kilogramos.

Alumno: Ya veo. Los fotones que "chocan" contra un balón y nos permiten verlo tienen muy poca energía en comparación con la energía cinética del balón, de modo que la determinación de su posición no impide conocer bien su velocidad.

Profesor: Eso es. El Principio no pierde su validez en el mundo de los objetos "visibles", lo que sucede es que su rango de aplicación se halla muy por debajo del umbral de detección y del límite de error de cualquier instrumento de medida. En otras palabras, ni a ti ni a mí nos afecta.

Alumno: Pero sí a nuestros átomos.

Profesor: Si lo planteas así...

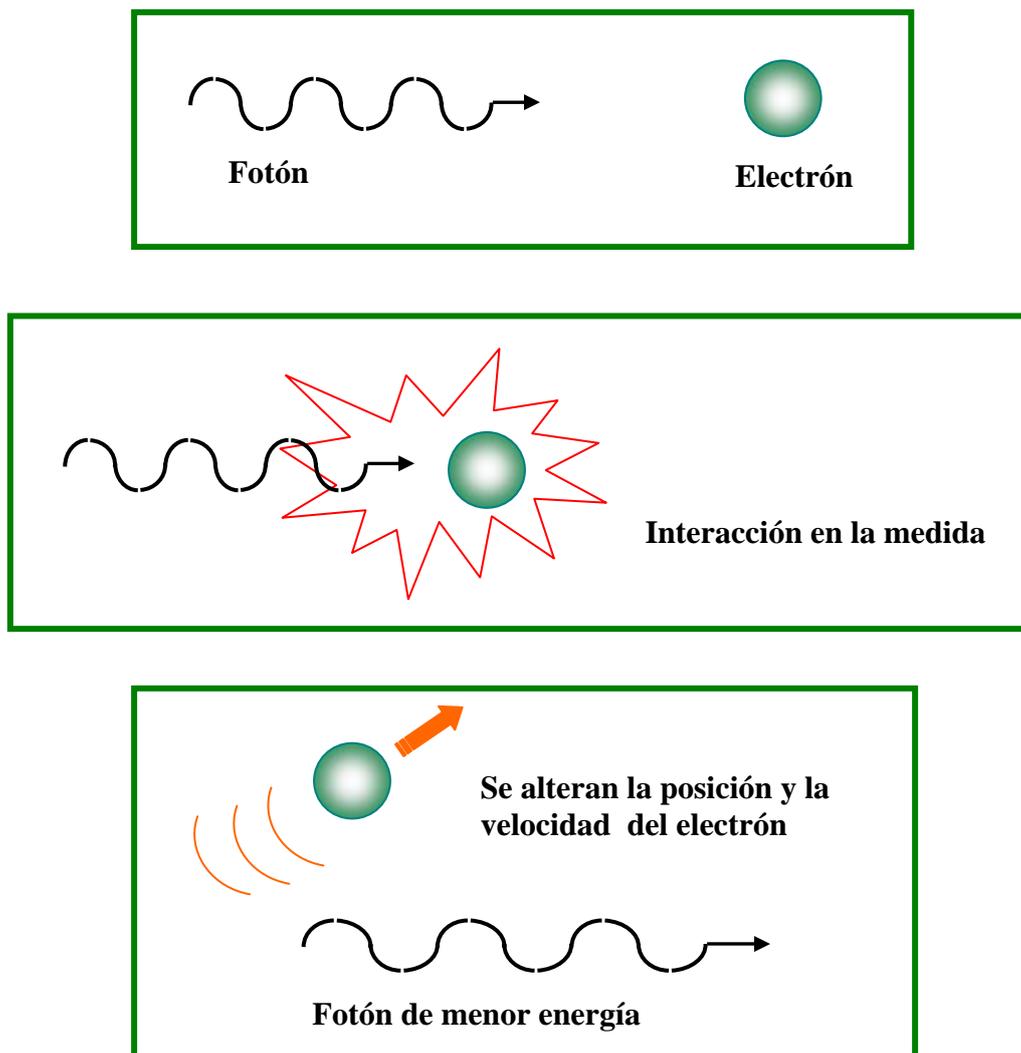


Figura 15. Ilustración del Principio de Incertidumbre.

3.2. Consecuencias del principio de incertidumbre

Alumno: Es sólo un punto de vista humorístico. Volviendo a la cuestión que nos ocupa, ¿cuáles son las consecuencias que tiene este Principio en la escala atómica?

Profesor: Son muy claras. En primer lugar, los conceptos de posición y velocidad de un electrón tienen que ser reemplazados por los de *probabilidad* de que el electrón tenga una *velocidad* y una *posición* dadas. Es decir, la introducción de la idea de probabilidad, fundamental en la Mecánica Cuántica, es una consecuencia directa del principio de incertidumbre. En el desarrollo casi inmediato de la nueva mecánica se describe el estado del electrón mediante unas funciones de onda cuyos *cuadrados* se corresponden con la probabilidad de hallar al electrón en cada punto del espacio, de manera que es factible realizar unas representaciones gráficas que recojan las diferentes zonas en torno al núcleo donde se mueve el electrón la mayor parte del tiempo. En eso consisten los orbitales.

Alumno: Eso quiere decir que está superado el modelo de Böhr desde el momento en que no podemos circunscribir a órbitas el movimiento del electrón. Ahora se le puede "encontrar" en cualquier punto del espacio. ¿No es cierto?

Profesor: Evidentemente. La *mecánica newtoniana* y sus ecuaciones que describen la *trayectoria* de un móvil, ya no sirven. Es necesario formular un nuevo tratamiento matemático que tenga en cuenta los principios básicos de la mecánica cuántica y que los incluya en su desarrollo.

Alumno: Supongo que ya estará hecho.

Profesor: Claro. Ya te he hablado del profundo cambio conceptual que sacudió a la comunidad científica en el primer cuarto del siglo XX. En el mismo año 1927, Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger llevaron a cabo un estudio paralelo del movimiento del electrón en torno al núcleo bajo las nuevas premisas con formulaciones muy distintas en la forma pero idénticas en el fondo. Ambas describían perfectamente la estructura atómica y explicaban por completo los espectros, no sólo el caso del hidrógeno, sino de cualquier átomo polieletrónico.

Alumno: Habla usted de dos tratamientos matemáticos.

Profesor: En efecto. Son la mecánica de matrices de Heisenberg y la mecánica ondulatoria de Schrödinger. Tienen una forma muy distinta aunque un resultado idéntico.

Heisenberg representa la situación del electrón mediante un conjunto de números que describen los estados inicial y final de una transición. Otro conjunto de números similar representa las velocidades en el estado inicial y en el final. En el desarrollo matemático se asimila el comportamiento del electrón en el átomo al de un oscilador armónico y al calcular los valores posibles de la energía se deben aplicar las reglas del producto de matrices.

Alumno: ¿Por qué cree que Heisenberg compara al electrón con un oscilador armónico?

Profesor: Ya lo hemos hablado anteriormente. No obstante, comprendo tus dudas, pues se trata de asumir la validez de un modelo científico y no identificarlo con una realidad. Sabes que, en su comportamiento dual, al electrón se le imagina una onda asociada del tipo estacionaria, es decir, sin pérdidas globales de energía y donde los vientres (crestas) y nodos (puntos de elongación nula) ocupan posiciones permanentes. Y recuerda que las ondas estacionarias son un caso especial de interferencia entre una onda armónica y su onda reflejada.

Alumno: De acuerdo. Y un oscilador armónico es el foco que produce una onda armónica, es decir, el movimiento de dicho foco es armónico simple.

Profesor: Muy bien. No obstante, el desarrollo matemático de la *mecánica matricial* es demasiado abstracto y no atrajo a la comunidad científica a pesar de los excelentes resultados.

Alumno: Por eso se ha impuesto la *mecánica ondulatoria*.

Profesor: En efecto. Nos suministra una imagen que permite *visualizar* en cierta manera a los átomos. Ahora se describe la *posición* del electrón mediante la ecuación de una onda estacionaria. Es decir, se utiliza una

función de onda, cuyo cuadrado en cada punto del espacio es proporcional a su *intensidad*, la cual tiene en este caso el significado de la densidad electrónica en dicho punto. El modelo de Schrödinger proporciona una visión mucho más intuitiva del átomo, puesto que los electrones se mueven en *orbitales*, esto es, regiones del espacio, alrededor del núcleo, en donde existe una mayor *probabilidad* de encontrarlos (Figura 16). Y esta probabilidad se halla directamente relacionada con la densidad electrónica y a su vez con el cuadrado de la función de onda.

La forma, tamaño y orientación espacial, además de la energía de estos orbitales vienen determinadas por un conjunto de tres *números cuánticos*, que se completa con el número que señala el espín del electrón.

Alumno: ¿Qué se entiende por espín?

Profesor: El espín o spin en inglés es una propiedad característica de las partículas subatómicas, y no sólo del electrón, que se asocia con su momento angular intrínseco. Si suponemos por un instante que el electrón es como una peonza, al girar sobre su propio eje de rotación se pueden considerar únicamente dos sentidos, cada uno de los cuales viene expresado por un valor en el número cuántico de spin. En el electrón estos valores son $+\frac{1}{2}$ y $-\frac{1}{2}$.

Alumno: Entonces, podemos decir que el modelo de orbitales es la explicación actual que aceptamos sobre la estructura atómica.

Profesor: Evidentemente, el modelo cuántico explica a la perfección todos los hechos observados, no sólo para el átomo de hidrógeno, sino para todos los átomos polielectrónicos, junto con sus *enlaces* en la formación de las moléculas y proporciona el punto de partida para el estudio del *núcleo*, uno de los principales retos de la Física teórica actual.

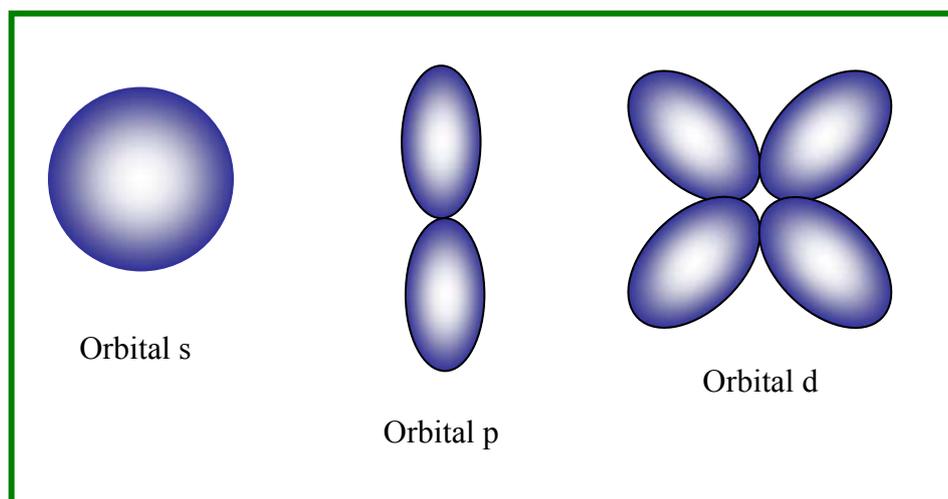


Figura 16. Tipos de orbitales más frecuentes.

Alumno: ¿Quiere decir que el modelo se aplica al movimiento y la energía de los electrones nada más?

Profesor: Claro, el núcleo se considera una carga puntual $+Z$, donde Z es el número atómico o número de *protones* del átomo y cuya masa es A

unidades, siendo A el número másico, la suma de *protones* y *neutrones*. Los orbitales se dibujan suponiendo que el núcleo se halla en el origen de coordenadas.

Alumno: ¿Y es posible aplicar el modelo para interpretar los enlaces entre los átomos de una molécula?

Profesor: Lógicamente, si bien la complejidad matemática es mayor porque las funciones de onda de los orbitales moleculares han de calcularse mediante aproximaciones. Sin embargo, los diversos métodos arrojan unos resultados análogos y muy satisfactorios, que permiten obtener las densidades electrónicas en las zonas que rodean a los distintos núcleos componentes de la molécula y dibujar perfectamente los orbitales moleculares, que son los ocupados por los electrones compartidos en los enlaces. Ten en cuenta que el avance de la informática ha permitido ya tiempo alcanzar aproximaciones con elevadísimo grado de exactitud.

Alumno: Comprendo. Pero...el núcleo atómico es otra cosa, ¿no es cierto?

Profesor: Por supuesto. Ese es el verdadero objeto de estudio de la Física actual, donde también juega un papel principal el Principio de Incertidumbre.

Alumno: Siendo así, ¿existen más consecuencias de dicho Principio?

Profesor: Pues sí. Heisenberg demostró, además, que la relación de incertidumbre puede extenderse a las *magnitudes conjugadas* que tengan las mismas unidades que la constante de Planck (julio·segundo), llamadas unidades de acción. Por ejemplo, a la energía y al tiempo. De este modo otro enunciado alternativo del Principio será: Es imposible conocer con exactitud la *energía* de una partícula en un *instante* dado, sino que el producto de las *indeterminaciones* en la medida de la energía y el tiempo cumplen la relación:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi} .$$

Alumno: No veo qué relación puede tener esa nueva formulación del Principio con el núcleo atómico.

Profesor: Este aspecto del Principio de Incertidumbre tiene una importancia esencial en la *Física de altas energías* porque sirve de base para introducir el concepto de partícula virtual, propuesto por Yukawa en 1935, y así interpretar la naturaleza de las *fuerzas fundamentales* en el mundo subatómico.

Alumno: ¿Se refiere básicamente a las fuerzas entre las partículas elementales?

Profesor: Sí. Cuando dos partículas interactúan, por ejemplo, dos protones, en el interior del núcleo atómico, lo hacen a través de la "creación" de una partícula virtual que se transfiere de uno al otro en un tiempo menor que el Δt permitido por la relación de incertidumbre. En ella, el factor ΔE se corresponde con la *energía* (o *masa*) de la partícula virtual, y cuyo tiempo de "existencia" respectivo, al ser tan breve, inferior a Δt , hace imposible su detección. El intercambio constante de estas partículas

virtuales puede justificar las elevadas *fuerzas nucleares* que mantienen unidos a los neutrones y los protones en las reducidas dimensiones del núcleo atómico, venciendo las fuerzas de repulsión eléctricas entre estos últimos y permitiendo la estabilidad del átomo. Aunque...si quieres que hablemos sobre ello necesitamos más tiempo para exponer muchos nuevos conceptos que se han ido introduciendo en la segunda mitad del siglo XX, por lo que volveremos a tratarlo más adelante.

3.3. Cuestiones

Si no se conocen las respuestas a las siguientes cuestiones es aconsejable una nueva lectura de este capítulo.

- Explique el significado del Principio de Incertidumbre en el mundo subatómico.

- ¿Por qué no es aplicable el Principio de Heisenberg a los objetos macroscópicos?

- ¿Qué es la función de onda y para qué se utiliza?

- ¿Cuáles son las dos posibles formulaciones de la Mecánica Cuántica?

- ¿Qué entendemos por probabilidad cuántica?

- ¿Qué es un orbital y cuáles son los tipos más frecuentes?

- Señale cómo surge el concepto de partícula virtual y cite una aplicación del mismo.

En la Tabla 1 se recogen los hechos puntuales más relevantes en el desarrollo cronológico de la evolución del modelo atómico. Ella nos revela la importancia de la cooperación entre la comunidad científica y, al mismo tiempo, la magnitud de la teoría, ya que los descubrimientos reseñados son sólo la parte visible del iceberg de este capítulo de la Ciencia.

Fecha	Descubrimiento o modelo	Autor
Siglo V a. C.	Teoría de los cuatro elementos	Empédocles de Sicilia
Siglo V a. C.	Filosofía atomista	Leucipo y Demócrito
Siglo IV a. C.	Teoría de los cinco elementos	Aristóteles
1785	Ley de la conservación de la masa	Antoine L. Lavoisier
1792	Ley de las proporciones recíprocas	Richer y Wenzel
1799	Ley de las proporciones definidas	Joseph Louis Proust
1803	Ley de las proporciones múltiples	John Dalton
1808	Ley de volúmenes de combinación	J. L. Gay-Lussac
1808	Teoría atómica	John Dalton
1811	Hipótesis de Avogadro	Amadeo Avogadro
1876	Rayos catódicos	Eugen Goldstein
1886	Rayos canales	Eugen Goldstein
1895	Rayos X	Röntgen
1897	Descubrimiento del electrón	J. J. Thomson
1900	Teoría cuántica	Max Planck
1903	Modelo atómico de Thomson	J. J. Thomson
1905	Explicación del efecto fotoeléctrico	Albert Einstein
1909	Experiencia de Rutherford	Rutherford y Geiger
1911	Medición de la carga y masa del electrón	R. Millikan
1911	Modelo atómico de Rutherford	Ernest Rutherford
1913	Modelo atómico de Böhr	Niels Böhr
1919	Caracterización del protón	Ernest Rutherford
1920	Se predice la existencia del neutrón	Ernest Rutherford
1923	Efecto Compton	Arthur Compton
1924	Dualidad onda-corpúsculo	Louis De Broglie
1925	Principio de Exclusión	Wolfgang Pauli
1927	Principio de incertidumbre	Werner Heisenberg
1927	Modelo de orbitales	Erwin Schrödinger
1932	Descubrimiento del neutrón	James Chadwick

Tabla 1.- Referencias cronológicas más importantes del modelo atómico.

4. LAS PARTÍCULAS FUNDAMENTALES

Alumno: Me han surgido algunas dudas sobre las *partículas elementales*. En primer lugar, ¿hay diferencias cuando hablamos de *partículas fundamentales* o es lo mismo?

Profesor: Aunque a veces se les ha otorgado ciertos matices, últimamente son términos análogos. Podemos definir las partículas elementales como las que constituyen el componente último de la materia. No obstante, el concepto de partícula elemental ha evolucionado considerablemente a lo largo de los años.

Recuerda que, en un principio, se pensaba que los átomos eran partículas indivisibles, pero pronto cedieron esta característica a sus componentes: electrones, protones y neutrones, que hasta la década de 1930 se creían partículas elementales. Esta hipótesis fue refutada por Dirac de manera teórica y los posteriores descubrimientos pusieron en evidencia que también éstas eran partículas formadas por otras más elementales y que, además, existía un gran número de ellas. Hoy se sabe que muchas de estas partículas son sumamente complejas, pero se las sigue llamando partículas elementales.

Alumno: Por lo que dice, no es un término tan claro.

Profesor: En la actualidad, se emplea también la denominación de partículas subatómicas en general. El área de conocimiento que se ocupa de ellas es la Física de Partículas, es decir, el estudio de las partículas elementales y sus interacciones. También se llama Física de Altas Energías, porque la energía necesaria para estudiar distancias extremadamente pequeñas es muy elevada, como consecuencia del principio de incertidumbre. Así, para explorar el interior del núcleo atómico en los modernos aceleradores, se lanzan contra ellos electrones de muy alta energía. Los resultados de estas colisiones indican que los nucleones no son partículas elementales, sino compuestos por partículas aún menores, denominadas *quarks*.

Alumno: Eso quiere decir que en este campo de la Ciencia es esencial el desarrollo de los medios experimentales, ¿verdad?

Profesor: Me temo que sí. Pero hay otro hecho curioso que te quiero comentar. Conforme avanza la tecnología y se alcanzan niveles de energía mayores, se observan más analogías entre el microcosmos subatómico y el macrocosmos que constituye nuestro universo, de manera que la Cosmología y la Física de Partículas no son más que dos ramas de un mismo tronco.

Alumno: De eso también tenemos que hablar pero ahora me interesa mucho más centrarme en las *partículas subatómicas*. ¿Cuándo podemos decir que comenzó su estudio?

4.1. Descubrimiento de las primeras partículas subatómicas y sus principales características

Profesor: Hasta 1932 sólo se conocían tres partículas subatómicas, el electrón, el protón y el neutrón, que se consideraban elementales. Algunos

años antes, Pauli había pronosticado la existencia del *neutrino* con el fin de explicar los cambios energéticos en ciertas desintegraciones radiactivas y en determinados procesos nucleares. Sin embargo, aún no se disponía de pruebas reales de su existencia.

Alumno: Empecemos por el electrón. Cuando me explicó la evolución de los modelos atómicos me dijo que fue descubierto por Thomson.

Profesor: Efectivamente. A finales del siglo XIX, Thomson había estado estudiando los rayos catódicos, continuando las investigaciones de Crookes y Goldstein iniciadas dos décadas atrás. Al introducir gases, a muy baja presión, en un tubo de vidrio que tenía soldados en su interior dos electrodos y someterlos a potenciales eléctricos de 20.000 a 100.000 voltios se producía la descarga, pero no se observaba luminosidad alguna en el interior del tubo. Sin embargo, en la zona situada frente al cátodo (polo negativo) aparecía una especie de *fluorescencia verdosa*, atribuida a ciertas radiaciones procedentes del cátodo: los rayos catódicos.

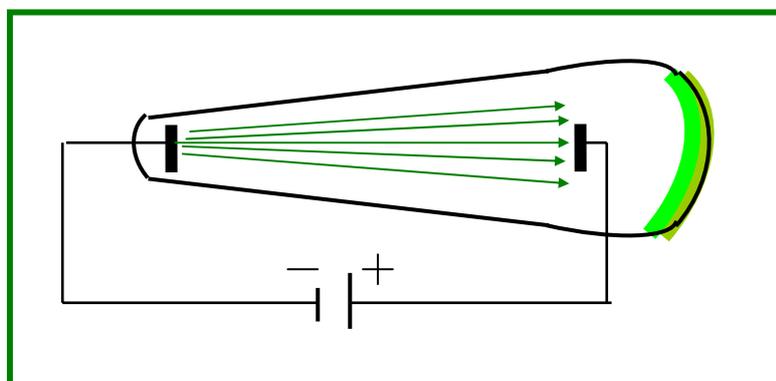


Figura 17. Tubo de rayos catódicos.

Thomson estudió las propiedades y efectos de estos rayos y llegó a la conclusión de que estaban constituidos por partículas, con carga eléctrica negativa, dotadas de gran velocidad, casi dos mil veces más pequeñas que el átomo de hidrógeno. Además, las partículas eran idénticas aunque cambiase el gas del tubo. A propuesta de Stoney, les dio el nombre de *electrones*. Los electrones tienen una masa en reposo de $9,109 \cdot 10^{-31}$ kilogramos y una carga eléctrica negativa de $1,602 \cdot 10^{-19}$ culombios, que es la unidad básica de electricidad.

Alumno: ¿Cómo llevó a cabo Thomson el estudio de estos rayos?

Profesor: Mediante la aplicación de campos eléctricos y magnéticos consiguió desviar los electrones, habida cuenta de que son partículas cargadas. Analizando sus trayectorias se puede deducir la relación carga/masa.

Alumno: Pero... ¿verdaderamente los rayos catódicos salen del cátodo? No entiendo bien su origen.

Profesor: Cuando efectuamos la descarga eléctrica a tan grandes potenciales, se liberan electrones de los átomos metálicos que constituyen

el cátodo y al mismo tiempo se "ionizan" las moléculas del gas, que naturalmente eran neutras.

Por tanto, se producen cargas negativas, es decir, electrones, y positivas, los iones del gas. Estos últimos son atraídos por el cátodo (negativo) y, al chocar contra él, no provocan efectos visibles. Ahora bien, los electrones libres se mueven hacia el polo opuesto, el ánodo (positivo), chocando contra el otro extremo del tubo y produciendo la luminosidad característica ya comentada. Lógicamente, los electrones arrancados al gas por la descarga también se dirigen hacia el ánodo y se mezclan con los rayos catódicos propiamente dichos.

Alumno: Y esto sucedió en 1897. Ya sé que unos años después Millikan determinó con gran exactitud la carga del electrón mediante su experimento de la gota de aceite. ¿Cómo fue?

Profesor: Básicamente consiste en ionizar pequeñas gotas de aceite, que se hacen caer por el hueco entre dos placas metálicas. Se ajusta el potencial entre ellas de modo que la fuerza eléctrica aplicada detenga la caída de las gotas cargadas. Mediante sencillos cálculos, que tienen en cuenta las fuerzas de *rozamiento* (*viscosidad* del aceite), es posible hallar la carga de las gotas. Todas ellas son múltiplos de una unidad fundamental, la carga del electrón, e , antes mencionada. Y finalmente, conocida la carga y la relación carga/masa de Thomson, es inmediato despejar el valor de la masa del electrón.

Alumno: Yo he estudiado que los componentes del núcleo atómico son los protones y los neutrones. ¿Cómo se descubrieron?

4.2. El protón

Profesor: En un tubo de vacío, muy semejante al de la figura anterior, pero con el cátodo perforado, en 1886, Goldstein efectuó la descarga correspondiente y observó otra luminiscencia situada detrás del cátodo. Pensó que eran unas radiaciones susceptibles de atravesar los *canales* o agujeros del cátodo y que se movían en sentido contrario a los rayos catódicos. Se denominaron rayos canales por razones obvias. La carga eléctrica era *positiva* y su masa dependía del gas empleado, siendo los más pequeños los producidos al utilizar hidrógeno. Algunos años después, se comprobó que su masa era mucho mayor que la del electrón, su carga igual y de signo contrario, y se les denominó protones.

Era evidente que los protones formaban parte del átomo, generados al destruirse por causa de la descarga eléctrica dichos átomos de gas.

Alumno: O sea, no sucede igual que con los rayos catódicos. La carga y la masa de los rayos canales varían según el gas. Sólo son protones cuando utilizamos hidrógeno ¿no es cierto?

Profesor: Así es, ya que están constituidos por los iones positivos provenientes de los átomos del gas, cuando la descarga eléctrica les arranca electrones. Puesto que son positivos, se dirigen rápidamente hacia el cátodo y la mayoría atraviesa por sus agujeros, yendo a parar contra el extremo del tubo. Cuando el cátodo no está perforado, es imposible observar estos rayos *positivos* y sólo se ven los rayos catódicos.

La masa de un protón es de $1,6726 \cdot 10^{-27}$ kilogramos, aproximadamente 1.836 veces la del electrón. Su carga positiva es igual en magnitud a la carga negativa del electrón y está presente en todos los núcleos atómicos. El número atómico de un elemento es característico e indica su número de protones, que lógicamente será igual al de electrones.

4.3. El neutrón

Alumno: ¿Por qué fue el neutrón la última partícula en descubrirse?

Profesor: Es la última de las partículas consideradas estables. La existencia del neutrón fue profetizada en 1920 por el físico británico Ernest Rutherford y por científicos australianos y estadounidenses, pero la verificación experimental resultó difícil debido a que la carga eléctrica del neutrón es nula y la mayoría de los detectores de partículas sólo registran las partículas cargadas.

Alumno: Puedo imaginarme la "carrera" de los científicos de los años veinte por "cazar" al neutrón.

Profesor: Más o menos fue así. El neutrón fue identificado en 1932 por el británico James Chadwick, que interpretó correctamente los resultados de los experimentos realizados en aquella época por los físicos franceses Irene y Frédéric Joliot-Curie, entre otros. Ellos habían producido un tipo de radiación, anteriormente desconocida, mediante el bombardeo de *núcleos de berilio* con partículas *alfa*. Cuando esta misteriosa radiación se hacía pasar a través de una capa de parafina, las colisiones entre la radiación y los átomos de hidrógeno de la parafina originaban protones. Chadwick se dio cuenta de que la radiación estaba formada por neutrones.

La masa de un neutrón es de $1,675 \cdot 10^{-27}$ kilogramos, aproximadamente un 0,125 % mayor que la del protón. Es una partícula constituyente de todos los núcleos, salvo el del hidrógeno ordinario. Ahora sabemos que los neutrones libres, que no forman parte de un núcleo atómico, se producen en reacciones nucleares. Pueden ser expulsados de los núcleos con diferentes velocidades o energías, y son fácilmente frenados mediante choques con núcleos ligeros como los del hidrógeno, el deuterio o el carbono. Cuando es expulsado del núcleo, el neutrón es inestable, y se desintegra para dar lugar a un protón, un electrón y un antineutrino en apenas unos quince minutos.

4.4. Aceleradores de partículas

Alumno: Esta es la idea de partícula elemental que he tenido hasta ahora, es decir, el núcleo formado por protones y neutrones, que contiene casi toda la masa del átomo en un espacio mínimo y la corteza, donde se mueven los electrones en sus diferentes orbitales. ¿Son éstas todas las partículas elementales?

Profesor: Ciertamente no. El electrón no parece tener estructura interna y sí la podemos considerar elemental en el sentido que deduzco de tu exposición, no obstante desde los años treinta se han ido detectando numerosas partículas subnucleares.

Alumno: ¿Cómo ha podido ser eso? ¿Con qué medios experimentales?

Profesor: En un principio, mediante la observación detallada de la naturaleza, concretamente de los rayos cósmicos.

Alumno: Por su nombre, diría que proceden del espacio.

Profesor: En efecto. Los rayos cósmicos son generalmente protones, aunque también contienen núcleos más pesados, emitidos en las reacciones nucleares de las estrellas, incluyendo a nuestro sol, que alcanzan la Tierra muy acelerados. Por término medio, su recorrido en la atmósfera es de unos 800 metros hasta chocar contra algún núcleo, originando nuevas partículas, que a su vez pueden volver a chocar, produciendo lo que se conoce como "cascada". Estudiando, con detectores adecuados, dichas colisiones, los físicos de la primera mitad del siglo XX obtuvieron mucha información acerca de la estructura del átomo.

Alumno: Supongo que el estudio se completaría luego con la ayuda de los medios más sofisticados.

Profesor: Eso sucedió desde la década de los cincuenta, con el empleo de los aceleradores de partículas. La investigación de la estructura atómica con más detalle no habría sido posible sin el desarrollo tecnológico que permite concentrar las enormes cantidades de energía requeridas en el estudio del mundo subatómico. El avance teórico viene ligado al perfeccionamiento de los aceleradores y detectores de partículas.

Para estudiar las partículas fundamentales que componen el núcleo se emplean aparatos con energías superiores a un Gigaelectrón-voltio (GeV, mil millones de electrón-voltios). Los aceleradores son enormes instalaciones de varios kilómetros que permiten generar violentas *colisiones* entre partículas. Son los instrumentos de mayor tamaño y más costosos utilizados en Física. Todos tienen los mismos componentes básicos: una *fente* de partículas elementales o iones, un *tubo* donde existe un vacío parcial en el que las partículas pueden desplazarse libremente y un *sistema para aumentar la velocidad* de las partículas.

Alumno: ¿En qué consiste ese sistema?

Profesor: Ha ido perfeccionándose a lo largo del tiempo. En los inicios, las partículas cargadas se aceleraban mediante un campo electrostático. Por ejemplo, situando electrodos con una gran diferencia de potencial en los extremos de un tubo de vacío, los británicos Cockcroft y Walton consiguieron acelerar protones hasta 250.000 eV. A principios de la década de 1930, Van de Graaff diseñó un acelerador estableciendo un potencial entre dos electrodos y transportando cargas mediante una cinta móvil. Este tipo de aceleradores lineales puede alcanzar energías de 15 Megaelectrón-voltios (MeV, un millón de eV).

Alumno: ¿Por qué se llama acelerador lineal?

Profesor: El acelerador lineal, también llamado "linac" al utilizar las primeras letras de su nombre en inglés, fue concebido a finales de la década de 1920. Emplea tensiones alternas elevadas para impulsar partículas a lo largo de una línea recta, sincronizadas de forma que la partícula sea impulsada hacia delante cada vez que pasa por un hueco entre dos tubos metálicos. Este diseño se encuentra dentro de un cilindro en el que se ha hecho el vacío.

Alumno: ¿Qué tamaño alcanza?

Profesor: El más grande del mundo se halla en la Universidad de Stanford (Estados Unidos) y tiene una longitud de 3,2 km. Puede acelerar electrones hasta una energía de 50 GeV. En teoría, pueden construirse aceleradores lineales de cualquier energía, pero existe un inconveniente. Conforme los experimentos demandan más energía, se hace necesario incrementar el recorrido de las partículas aceleradas y eso nos acarrea graves problemas en su construcción.

Alumno: Me imagino que a partir de un cierto tamaño sería imposible aumentar las dimensiones del acelerador. No se me ocurre ninguna solución al problema.

Profesor: Pero la tuvo. El físico estadounidense Ernest Lawrence, de la universidad de Berkeley, recibió el Premio Nobel de Física en 1939 por un avance en el diseño de aceleradores llevado a cabo a principios de la década de 1930. Lawrence desarrolló el ciclotrón, el primer *acelerador circular*.

Alumno: Comprendo, se trata de hacer que las partículas den vueltas consiguiendo así un recorrido mucho mayor.

Profesor: El ciclotrón diseñado por Lawrence era una especie de acelerador lineal arrollado en una espiral. En vez de tener muchos tubos, la máquina sólo tiene dos cámaras de vacío huecas, que actúan como electrodos, llamadas *des*, cuya forma es la de dos letras *D* mayúsculas opuestas entre sí. Un campo magnético producido por un potente electroimán hace que las partículas cargadas se muevan en una trayectoria curva, de forma que se aceleran cada vez que atraviesan el hueco entre las *des*. A medida que las partículas acumulan energía, el radio de sus trayectorias se incrementa y se acercan al borde externo del acelerador, por donde acaban saliendo (Figura 18).

Alumno: Parece que Lawrence halló la solución definitiva al principal problema de estas "máquinas", pues ahora no estamos limitados por el espacio que necesitan sus largos recorridos.

Profesor: Sin embargo, surgió otra dificultad. Cuando las partículas aceleradas en el ciclotrón alcanzan una velocidad próxima a la de la luz, su masa aumenta de modo apreciable, tal como predice la *teoría de la relatividad*. Esto hace que sea más difícil acelerarlas, y lleva a que los pulsos de aceleración en los huecos entre las *des* queden desfasados.

Alumno: Tengo la impresión de que hemos cambiado un problema por otro.

Profesor: No exactamente. El hecho de incrementarse la masa a medida que aumenta a esos niveles relativistas la velocidad de las partículas es independiente del tipo de trayectoria. Si se hubieran construido aceleradores lineales con la longitud suficiente para que los protones o los electrones alcanzasen energías del orden de los 500 GeV, por ejemplo, también existiría esta grave dificultad. Ahora bien, en 1945, el físico soviético Veksler y el estadounidense McMillan sugirieron una solución a este problema diseñando el *sincrociclotrón*, denominado a veces *ciclotrón de frecuencia modulada*.

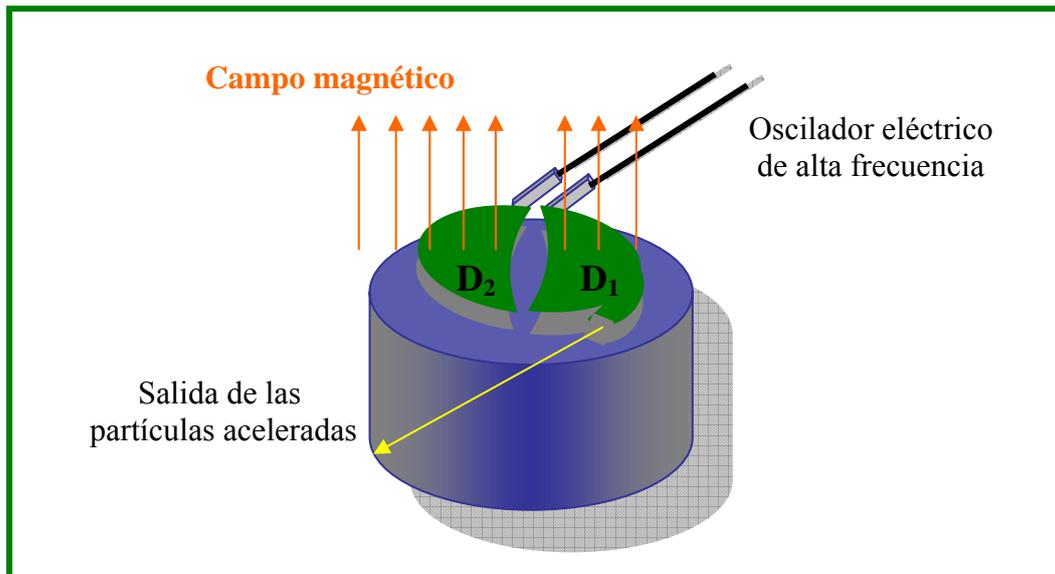


Figura 17.- Esquema de un ciclotrón.

Alumno: Podemos decir que constituye un modelo avanzado del original, o en términos actuales, un ciclotrón de segunda generación.

Profesor: En dicho instrumento, el oscilador o generador de radiofrecuencias que crea el campo magnético que acelera las partículas alrededor de las *des*, se ajusta automáticamente para mantenerse en fase con las partículas aceleradas. Mientras la masa de las partículas aumenta, la frecuencia de aceleración disminuye para seguir su ritmo.

Alumno: Eso quiere decir que el radio de la trayectoria se logra mantener constante, a pesar del aumento de masa porque es compensado con una menor aceleración.

Profesor: Exacto. Por otro lado, a medida que crece la energía máxima de un sincrociclotrón, se incrementa su tamaño, porque las partículas exigen unas trayectorias de mayor radio. El sincrociclotrón más grande tiene seis metros de diámetro y se encuentra en el Instituto de Dubna, en Rusia. Es capaz de acelerar los protones hasta más de 700 MeV y sus imanes pesan unas 7.000 toneladas. El ciclotrón más potente del mundo, el K1200, empezó a funcionar en 1988 en Michigan (Estados Unidos) y puede acelerar núcleos hasta una energía cercana a los 8 GeV.

Además, para los electrones, el aumento de masa por efectos relativistas es mucho mayor que en el caso de los protones y no es válido el método del sincrociclotrón, ya que no es posible adaptarlo a un aumento de masa tan grande. Por ejemplo, un electrón con energía de 1 MeV tiene una masa tres veces mayor que su masa en reposo. Para estos casos se utiliza otro tipo de acelerador cíclico, el betatrón, diseñados de modo que permiten modificar no sólo la *frecuencia* de la corriente alterna que alimenta el electroimán sino el *campo magnético* existente en la cámara del acelerador.

Alumno: De todos modos, creo que las energías requeridas actualmente en los experimentos de colisiones entre partículas han de ser mayores. ¿Verdad?

Profesor: En la carrera tecnológica siempre se busca mejorar las prestaciones de los medios experimentales. El siguiente avance fue el sincrotrón, el miembro más reciente y con mayor potencia de la familia de aceleradores. Consta de un tubo, en forma de un gran anillo, por el que se desplazan las partículas, rodeado de imanes que hacen que éstas se muevan por su centro. Las partículas entran en el tubo después de haber sido aceleradas a varios millones de electronvoltios y ya en el interior del anillo son nuevamente aceleradas en uno o más puntos cada vez que describen un círculo completo alrededor del acelerador. Para mantener las partículas en una órbita constante, las intensidades de los imanes del anillo se aumentan a medida que las partículas ganan energía.

El primer acelerador que superó la barrera de los Giga-electrón-voltios fue el sincrotrón de protones del *Brookhaven National Laboratory* (Long Island, Nueva York), que alcanzó valores de 3 GeV. En los años sesenta entró en escena otro sincrotrón situado cerca de Ginebra (Suiza), controlado por el CERN, la Organización Europea para la Investigación Nuclear, que ya en 1965 logró energías de 40 GeV.

A principios de los años 1980 se llegó a los niveles de 500 GeV y entró en escena el Fermilab, nombre con el que se conoce al *Fermi National Accelerator Laboratory*, situado en Batavia, a unos 80 km de Chicago. La capacidad de este último aumentó hasta un límite potencial de un TeV (Tera-electrón-voltio), es decir, un billón de voltios, en 1983 al instalar imanes superconductores, lo que le convirtió en el acelerador más potente del mundo.

Alumno: ¿No se ha producido ningún avance en las instalaciones de estos gigantescos complejos experimentales desde los años ochenta?

Profesor: En los últimos quince años se ha registrado el avance que, hoy por hoy, se puede calificar como la vanguardia de las altas energías. Me refiero al colisionador con anillo de almacenamiento.

Alumno: Parece una combinación de métodos ya conocidos.

Profesor: Se podría decir eso mismo. Un colisionador es una combinación de un acelerador y uno o más anillos de almacenamiento, que produce colisiones más energéticas entre partículas que un acelerador convencional. Este último lanza partículas aceleradas contra un blanco estacionario, mientras que un colisionador acelera dos conjuntos de partículas que se inyectan en el *mismo anillo*, como los electrones y los positrones, que tienen cargas eléctricas opuestas y circulan en sentido contrario. Cuando hay que hacer colisionar partículas con la misma carga, circulan en *anillos distintos* de almacenamiento y después se hacen chocar de frente.

El colisionador LEP del CERN, que empezó a funcionar en 1989, es de este tipo. El LEP, siglas en inglés de gran colisionador de electrones-positrones, abarca una zona extensa de terreno entre la frontera de Suiza y Francia, con un enorme anillo de 27 km de diámetro construido a una profundidad de 100 metros. Por su parte, en 1987, el Fermilab convirtió su sincrociclotrón en un colisionador con anillo de almacenamiento e instaló un detector de tres pisos de altura para observar y medir los productos de los choques frontales entre partículas.

Aunque los colisionadores que se utilizan en la actualidad son extremadamente potentes, aún se necesitan superiores energías para comprobar las teorías actuales. Si bien, por desgracia, el montaje de anillos mayores es muy cara. Ya se ha concluido la construcción del *gran colisionador de hadrones* (LHC, siglas en inglés de Large Hadron Collider) del CERN que comparte el túnel que alberga el LEP y se espera inaugurar pronto con unas prestaciones de 14000 GeV (14 TeV) para los choques entre protones con velocidades cercanas a la de la luz.

En 1988, Estados Unidos empezó a planificar la construcción de un supercolisionador de 87 km en el estado de Texas, pero el Congreso de dicho país decidió cancelar el proyecto por razones económicas, cuando ya se había construido aproximadamente una quinta parte.

Alumno: Hemos hablado sobre el modo en que los físicos nucleares obtienen las altas energías para los choques que provocan entre las partículas. Pero... ¿cómo saben qué ha ocurrido tras esas colisiones tan violentas?

Profesor: En ese punto entran en acción los detectores de partículas. Básicamente, son los instrumentos que ponen de manifiesto, y en muchos casos hacen visibles, las partículas subatómicas. Es necesario que reúnan las características de alta resolución espacial y corto tiempo de respuesta, para obtener la *masa, carga, energía y trayectoria* de las partículas producidas. La gran sofisticación de dichos aparatos se refleja en los premios Nobel concedidos a sus diseñadores, como Wilson y Charpak. Distinguimos varios tipos, dependiendo del procedimiento de detección utilizado.

Alumno: ¿Cuáles son las clases de detectores más utilizadas y que características las diferencian entre sí?

Profesor: En primer lugar, tenemos la cámara de ionización. Se trata de un recipiente lleno de gas y provisto de dos electrodos con potenciales diferentes. Las partículas ionizan el gas y estos iones se desplazan hacia el electrodo de signo contrario, creándose una corriente que puede amplificarse y medirse. Las cámaras de ionización adaptadas para detectar las partículas individuales y de radiación se denominan *contadores*, como el de Geiger, desarrollado en 1928.

Alumno: Conozco el "*clic*" tan familiar que emite ese contador cada vez que registra la presencia de una partícula radiactiva.

Profesor: Es muy conocido, en parte debido a su aparición en algunas películas. Otro tipo es el contador de *centelleo*. Allí, las partículas cargadas, que se mueven a gran velocidad en los materiales centelleantes, producen destellos visibles a causa de la ionización, y pueden registrarse. Dichos materiales son determinados sólidos y líquidos como sulfuro de cinc, yoduro de sodio o antraceno.

Los detectores de trazas permiten observar las señales (o trazas) que deja a su paso una partícula en la sustancia que contiene el detector. Son de este grupo las *emulsiones nucleares*, semejantes a las fotográficas, la *cámara de niebla* y la *cámara de burbujas*.

Alumno: ¿Es cierto que la cámara de niebla fue el primer tipo de detector utilizado para el estudio de los rayos cósmicos?

Profesor: Así fue. El principio fundamental de la cámara de niebla fue descubierto por Wilson en 1896, aunque el instrumento no llegó a construirse hasta 1911. Contiene aire, saturado con vapor de alcohol, que inmediatamente se condensa sobre los iones que producen las partículas nucleares o atómicas cargadas a su paso por la cámara, lo que hacen visibles sus trayectorias.

La cámara de burbujas, inventada en 1952 por Glaser, tiene un funcionamiento similar a la cámara de niebla. Su diferencia más acusada reside en utilizar un líquido bajo presión a una temperatura algo inferior a su punto de ebullición, en lugar de aire saturado de alcohol. A lo largo de las trayectorias de las partículas que atraviesan el líquido, se produce la ionización de sus átomos, y en torno a dichos iones se forman minúsculas burbujas, que permiten visualizarlas.

Estos métodos ópticos de detección han sido paulatinamente sustituidos por métodos electrónicos de recogida de datos desde que Charpak, en 1968, inventó el contador proporcional multicable, que permiten el registro de un número mayor de sucesos.

Otros tipos de detectores emplean muchas otras interacciones entre la materia y las partículas elementales distintas a las eléctricas. Por ejemplo, el detector de Cherenkov se basa en una radiación especial emitida por las partículas cargadas al atravesar medios no conductores a una velocidad superior a la de la luz en dichos medios.

Alumno: Algo parecido a lo que sucede cuando un avión supersónico atraviesa la barrera del sonido. ¿No es cierto?

Profesor: Salvo que ahora se ven destellos luminosos en lugar de un sonido.

Alumno: En todos los casos anteriores se trata de procesos donde intervienen cargas eléctricas. ¿Y cuando queremos detectar neutrones?

Profesor: Las partículas neutras como neutrones o neutrinos no pueden detectarse directamente, pero sí de forma indirecta a partir de las reacciones nucleares que tienen lugar cuando colisionan con ciertos núcleos de las sustancias empleadas en el detector. Así, los neutrones lentos producen *partículas alfa*, detectables con facilidad, al colisionar con los núcleos de boro del trifluoruro de boro.

Los neutrinos, que apenas interactúan con la materia, se detectan en depósitos enormes de percloroetileno (C_2Cl_4), gracias a los núcleos radiactivos de argón que producen cuando chocan con núcleos de cloro. Este tipo de detector de neutrinos, situado a gran profundidad bajo tierra para evitar la radiación cósmica, se utiliza actualmente para medir el flujo de neutrinos procedente del Sol.

Alumno: ¿Cuáles son los detectores más empleados en los últimos años?

Profesor: Los detectores de última generación son un tipo de cámara de burbujas conocida como cámara de proyección temporal. Pueden medir las trazas que dejan los haces incidentes en las tres dimensiones, y cuentan

con detectores complementarios para registrar otras partículas producidas en las colisiones de alta energía. En el CERN, por ejemplo, existen detectores de varios pisos de altura, formados a su vez por distintos tipos de *detectores concéntricos*. Examinando las trazas puede deducirse la historia de las partículas desde su formación hasta la desintegración.

4.5. Las partículas fundamentales

Alumno: Con todos estos medios para llegar a tan elevadas energías y estos detectores tan desarrollados, el dibujo, relativamente sencillo, de la constitución del átomo supongo que se habrá modificado.

Profesor: Puede decirse que ese modelo del átomo tuvo validez en el primer tercio del siglo XX. En el segundo tercio, la profusión de nuevas partículas que se incorporaban a las ya conocidas resultó casi alarmante. El físico finlandés Roos confeccionó el primer catálogo de partículas en 1963 con cerca de cuarenta identificadas, y en los años setenta y ochenta se catalogaron varios cientos de ellas.

Alumno: Me imagino que sería urgente buscar una clasificación útil de todas ellas. Tuvo que ser algo parecido a la época en que Mendelejeff y Meyer propusieron la tabla periódica de los elementos.

Profesor: Se han clasificado bajo distintos criterios; no obstante, los principales responden al tipo de *interacción* que les afecta y al valor de su *espín*.

De este modo, llamamos leptones a las partículas que no se ven afectadas por las interacciones nucleares fuertes, como el *electrón* o el *muón*, mientras que los hadrones son las partículas sensibles tanto a las interacciones nucleares fuertes como a las débiles. Dentro de los hadrones están el *protón* y el *neutrón*, pero también un elevado número de partículas muy inestables, que se desintegran rápidamente. Cuando estas partículas tienen masas mayores que la de los conocidos nucleones, en sus productos de desintegración se encuentran protones, y las encuadramos en el grupo de *bariones*. Si, por el contrario, son de masa inferior y sus productos de desintegración sólo muestran fotones y leptones, las clasificamos como *mesones*. Este último es el caso del mesón pi (π), la partícula K o el mesón rho (ρ).

Alumno: Entonces, ¿cuáles son ahora las partículas elementales?

Profesor: Si nos atenemos a las que existen en los átomos ordinarios serían las ya conocidas de antiguo, esto es, el protón, el neutrón y el electrón; pero, si tenemos en cuenta aquéllas que se producen en los aceleradores de alta energía, el número se puede elevar porque hay algunas, como los mesones, de masa intermedia entre el protón y el electrón.

Es evidente que el concepto de *elementalidad* debe ampliarse o modificarse respecto a las ideas clásicas. La Física de altas energías ha proporcionado un gran número de datos experimentales, es decir, muchos *sucesos* que afectan a colisiones y desintegraciones de partículas, los cuales han conducido al descubrimiento de una subestructura en la mayoría de estas partículas subatómicas.

Alumno: Por decirlo de alguna manera, es como si hubiéramos reducido el tamaño de las "unidades básicas", de los *ladrillos* que componen los átomos.

Profesor: Más o menos es eso. El estudio de las interacciones entre ellas y los fenómenos de desintegración ha permitido elaborar un nuevo modelo, el llamado modelo estándar, que reduce mucho el número de partículas elementales, limitándolas exclusivamente a aquéllas que no ofrecen una estructura inferior, volviendo un poco de nuevo al concepto antiguo de la elementalidad (Tabla 2). Pero antes de revisar el modelo estándar, es necesario concretar qué son las fuerzas fundamentales, sus características más relevantes y el modo en que se transmite la interacción.

Grupo de partículas	Nombre	Masa (MeV)	espín
Leptones	Electrón	0,511	1/2
	Muón	106	1/2
	Tauón	1784	1/2
	Neutrinos	<0,03	1/2
Mesones	Pi	140	0
	Kaón	498	0
	Rho	470	1
Bariones	Protón	938	1/2
	Neutrón	940	1/2
	Lambda	1116	1/2
	Delta	1232	3/2
	Omega	1672	3/2
	Sigma	2455	1/2

Tabla 2.- Algunos datos de las principales partículas subatómicas.

4.6. Cuestiones

Si no se conocen las respuestas a las siguientes cuestiones es aconsejable una nueva lectura de este capítulo.

- Cuanto hablamos de partículas elementales, ¿a qué nos referimos? ¿Qué rama de la Física las estudia?
- ¿Cuáles son las principales características del electrón, del protón y del neutrón? ¿Cómo fueron descubiertos?
- Describa el fundamento de los aceleradores de partículas, señalando las diferencias entre los distintos tipos.

- Dibuje el esquema del ciclotrón, indicando sus principales componentes.
- ¿En qué principios se basan los detectores de partículas? ¿Cuántos tipos conoce?
- ¿Cuál es la diferencia fundamental entre leptones y hadrones? ¿Y entre mesones y bariones?

5. LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD EN EL MUNDO SUBATÓMICO

Alumno: Hemos resaltado mucho el cambio tan drástico que sacudió los cimientos de la Física atómica con el desarrollo de la *teoría cuántica*, sin embargo, no fue menos importante el impacto que la *teoría de la relatividad* tuvo en la Física Clásica. ¿No es cierto?

Profesor: Completamente de acuerdo. De hecho, la Física es otra antes y después de la publicación de las ideas de Einstein. Incluso las distinguimos como *Física Clásica* (o newtoniana) y *Física Moderna* (o relativista).

Alumno: ¿Por qué la mayoría de las veces no tenemos en cuenta las ecuaciones de Einstein en los fenómenos físicos y continuamos usando las expresiones clásicas?

Profesor: Porque solamente es aplicable la *Mecánica Relativista* en el tratamiento de supuestos donde intervengan grandes velocidades, cercanas a la de la luz.

Alumno: Entonces, no es muy aventurado pensar que las consideraciones relativistas afectarán a las partículas subatómicas, puesto que sus velocidades son muy elevadas. ¿Me equivoco?

Profesor: En absoluto. Estás en lo cierto. Para realizar los cálculos con precisión en los experimentos con partículas subatómicas es imprescindible introducir las correspondientes correcciones relativistas. Si queremos, por ejemplo, hacer un balance energético en un proceso nuclear, debemos corregir los valores de las masas y energías de las partículas implicadas de acuerdo con sus velocidades.

5.1. Antecedentes

Alumno: No obstante, en 1905, cuando Albert Einstein publicó su teoría de la relatividad, aún no existían datos sobre reacciones nucleares. ¿Bajo qué planteamientos o exigencias se pudo elaborar esta nueva teoría?

Profesor: Estás en lo cierto cuando afirmas que en esa época no se conocían las reacciones nucleares, pues apenas se acababa de descubrir la radiactividad natural. Sin embargo, Einstein tenía noticia de dos hechos notables, que se encontraban estrechamente relacionados, aunque, hasta ese momento, nadie había reparado en ello.

Alumno: ¿A qué hechos se refiere?

Profesor: Por un lado, Maxwell había demostrado definitivamente el *carácter ondulatorio* de la luz y, mediante sus ecuaciones del campo electromagnético había calculado teóricamente su velocidad, resultando ser

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}}$$

donde c es la *velocidad de la luz*, ε es la constante dieléctrica del medio y μ su permeabilidad magnética.

Para el vacío, esa expresión arroja un valor de c muy cercano a 300.000 km/s, es decir, $3 \cdot 10^8$ m/s, una velocidad límite inalcanzable para cualquier cuerpo de nuestro universo.

Por aquel entonces, los físicos tenían una visión del mundo puramente *mecanicista*, y las ondas que se conocían eran *mecánicas*, similares al sonido. Estas ondas requieren siempre un medio material para propagarse y se aferraron a la idea de que la luz necesitaba algo que le permitiera viajar por el vacío espacial y llegar hasta nosotros desde las estrellas y el sol.

Alumno: Recuerdo que ésa es la vieja teoría del éter de los filósofos griegos, defendida, entre otros, por el insigne Aristóteles.

Profesor: Lógicamente, el hipotético éter debía ser una "sustancia" sin masa, puesto que la luz se propaga en el vacío, pero, al mismo tiempo, había de poseer propiedades elásticas como las de un sólido para permitir las vibraciones transversales del movimiento ondulatorio.

Alumno: Es lo que llamaríamos un auténtico enigma. ¿Y el otro hecho notable al que antes se hacía referencia?

5.2. Experimento de Michelson y Morley

Profesor: Con el fin de acabar de una vez por todas con la polémica acerca de la existencia del éter, los físicos norteamericanos A. A. Michelson y E. W. Morley realizaron en 1887 un singular experimento, cuyo objetivo era medir la velocidad relativa del éter respecto a la Tierra, ya que, según las ideas imperantes, ésta se movía en su seno al describir su órbita alrededor del Sol. Ahora bien, tengo que decir que sus resultados fueron sorprendentes.

Alumno: ¿Cuál era el diseño del experimento?

Profesor: Ciertamente, la idea no era muy complicada. Básicamente, Michelson y Morley utilizaron un foco luminoso (F), dos espejos (E_1 y E_2) y una lámina semiplatedada (L).

Alumno: ¿Una lámina semiplatedada?

Profesor: Es aquélla que refleja una parte del rayo luminoso que incide sobre ella y deja pasar sin desviarse otra parte del mismo.

Alumno: ¿Y cómo se disponían estos componentes?

Profesor: Formaban un dispositivo que denominaron interferómetro (Figura 18).

Del foco F parte un rayo de luz que llega a la lámina L, la cual es atravesada por la mitad del mismo sin desviación, dirigiéndose hacia el espejo E_1 , mientras que la otra mitad el rayo se refleja en el espejo E_2 . A continuación, los rayos vuelven a L desde direcciones perpendiculares y, gracias a las propiedades de dicha lámina, son dirigidos hacia el observador.

Como la distancia entre L y E_1 es igual a la que separa L y E_2 , ambos rayos llegarán en fase al observador si no hay "viento del éter". Por el contrario, en el supuesto de que exista velocidad relativa Tierra-éter, el rayo que se mueve en la dirección paralela al movimiento de la Tierra se retardaría algo, no viéndose afectado el rayo perpendicular. Entonces,

dichos rayos llegarán con un cierto desfase temporal, lo que nos permitiría medir la velocidad relativa del éter.

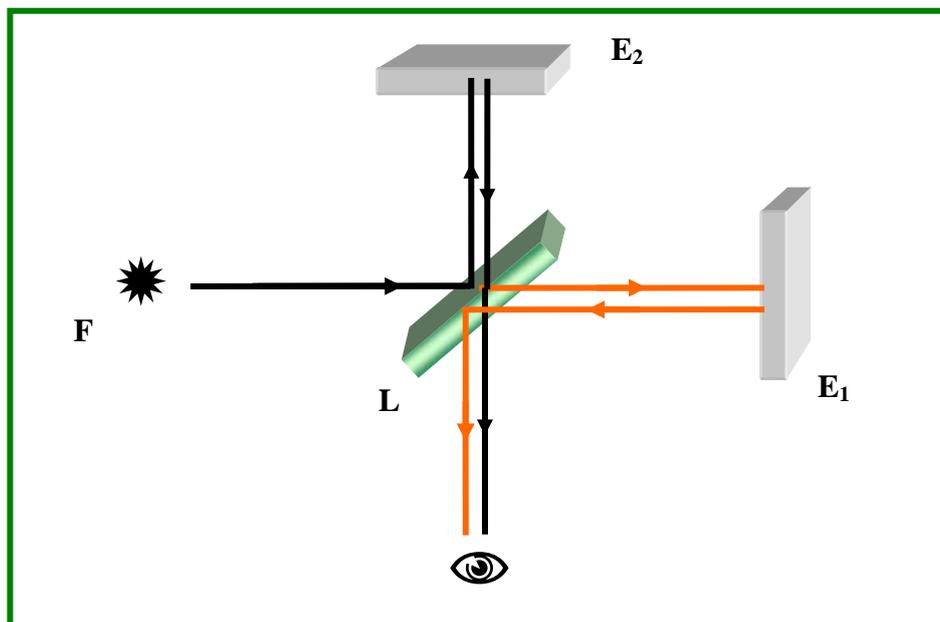


Figura 18. Esquema del experimento de Michelson y Morley.

Alumno: Ya supongo el resultado del experimento. Ambos rayos llegaron en fase.

Profesor: Efectivamente. Eso era lo que se comprobaba cada vez que se repitió el ensayo.

Alumno: Así pues, el experimento de Michelson y Morley demostró la inexistencia del *famoso* éter.

Profesor: No sólo eso. Al reproducir las experiencias en distintos lugares y posiciones, y no observar desfase alguno entre los rayos luminosos, se gestó la idea de que la velocidad de la luz es constante e independiente del movimiento del observador y del foco luminoso, postulándose la falsedad de la teoría del éter. Como consecuencia de ello, no puede existir el movimiento absoluto, pues no hay nada fijo en el universo que sirva como referencia absoluta. De ahí que Einstein eligiese el nombre de *Relatividad* para su asombrosa teoría.

5.3. Postulados de la teoría de la relatividad

Alumno: ¿Cuáles son los principios básicos de la Teoría de la Relatividad?

Profesor: Einstein propuso dos *postulados* en su Teoría Especial de la Relatividad, publicada en 1905, que aplicó a todos los sistemas físicos, tanto mecánicos como electromagnéticos.

El primero dice que "un observador inercial no puede distinguir el estado de reposo del movimiento rectilíneo y uniforme" y es una generalización del *Principio de la Relatividad de Galileo* para la cinemática.

Alumno: ¿Qué es un observador *inercial*?

Profesor: Los observadores inerciales o los *sistemas inerciales* son los que no se mueven uno respecto del otro o bien lo hacen con movimiento rectilíneo y uniforme. Carecen, por tanto, de aceleración.

Alumno: ¿Cuál es el enunciado del segundo postulado?

Profesor: "En todos los sistemas inerciales, la velocidad de la luz es una constante, y no depende ni del movimiento del foco luminoso ni del observador".

De estos dos postulados, en apariencia sencillos, se derivan unas consecuencias muy importantes que cambiaron la Física del siglo XX.

5.4. Consecuencias

Alumno: ¿Y cómo afectan las consideraciones relativistas a las partículas fundamentales?

Profesor: Para responder a esa pregunta es necesario profundizar un poco más en las consecuencias de la teoría.

En primer lugar, para que la velocidad de la luz (c) sea una constante universal debemos asumir que cada observador mide o "siente" un tiempo propio, de modo que si se mueve en la misma dirección del rayo luminoso el tiempo se "dilata" y cuando se mueve en dirección opuesta, su tiempo propio se "acorta" proporcionalmente a su velocidad, de manera que, al calcular c , cada observador obtiene el mismo resultado.

Alumno: Según ello, ¿cada uno de nosotros tenemos un tiempo propio?

Profesor: Teóricamente sí. Pero, como las velocidades con que nos desplazamos son muy pequeñas, comparadas con c , nuestro tiempo propio es el mismo. De ahí que la Física Clásica tuviese el tiempo como una magnitud absoluta.

Alumno: Ya empiezo a ver algunas peculiaridades en el mundo subatómico, pues las partículas elementales se mueven a gran velocidad y sus tiempos propios habrán de ser diferentes. ¿Verdad?

Profesor: Por supuesto. Además, la verificación de este hecho constituye una de las pruebas más sólidas de la validez de la Teoría de la Relatividad.

Alumno: ¿Cómo puede verificarse?

Profesor: Por ejemplo, cuando se determina la *vida media* de un mesón pi (o pión) en experimentos de laboratorio de altas energías, se obtienen valores en torno a los microsegundos (millonésimas de segundo). Sin embargo, sabemos que su vida media es una cien veces inferior, es decir, poco más de 10^{-8} segundos.

Alumno: Existe una cierta contradicción.

Profesor: Pero solo en apariencia, ya que la velocidad de los mesones en los experimentos es muy elevada, cercana a la de la luz. Si se aplican las ecuaciones relativistas, deducidas de los postulados, y se calcula el tiempo propio de dichas partículas, los resultados coinciden con los experimentales.

Alumno: Por consiguiente, nosotros detectamos que los mesones *alargan su vida* cuando viajan a altas velocidades en el acelerador.

Profesor: Pero sólo nos lo parece así a nosotros. El mesón "no advierte" que su vida se alarga. Para él, su tiempo no ha cambiado. Parece una paradoja, pero los datos la confirman.

Alumno: Entonces, serán capaces de recorrer mucha mayor distancia en los aceleradores sin desintegrarse.

Profesor: Claro. Si el tiempo fuera absoluto y no dependiera de la velocidad del mesón, éste siempre recorrería unos pocos centímetros antes de desaparecer. Sin embargo, a altas energías, los mesones pueden recorrer más de un kilómetro. Asombroso ¿no?

Alumno: Me gustaría saber qué tipo de cálculos propuso Einstein para modificar las coordenadas de las partículas relativistas.

Profesor: El tratamiento matemático exige una especial transformación, desarrollada previamente por Lorentz, en las coordenadas de un observador que se mueva a una cierta velocidad con respecto a otro en reposo.

Si (x, y, z, t) son las coordenadas espaciotemporales de un observador inercial y (x', y', z', t') las de otro que se mueve con velocidad v respecto al primero, se pueden expresar las coordenadas del observador en movimiento de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}x' &= (x - v t) \gamma \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= \left(t - \frac{v}{c^2} x\right) \gamma \quad \left(\text{donde } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\right).\end{aligned}$$

Estas son las ecuaciones de transformación de Lorentz

Para simplificar hemos supuesto que el observador móvil se desplaza únicamente en la dirección x' , paralela a x .

Alumno: Mediante dichas ecuaciones de Lorentz, si hacemos la velocidad del observador muy pequeña con respecto a c , pueden deducirse las leyes de la Física newtoniana sobre adición de velocidades. ¿No es cierto?

Profesor: Evidentemente. La mecánica newtoniana es un caso límite y, por tanto, se halla contenida en la mecánica relativista. Además, recuerda que dichas transformaciones tienen importantes consecuencias. Por ejemplo, los sucesos simultáneos para un observador no lo son para otro que se mueva respecto al primero, puesto que el tiempo de un sistema en movimiento aparentemente se dilata si lo comparamos con el tiempo propio de un sistema en reposo.

Alumno: ¿Sólo repercuten en el tiempo los efectos relativistas?

Profesor: Evidentemente, no. El planteamiento matemático comienza por definir un espacio de cuatro dimensiones, el denominado "*espacio de Minkowski*", añadiendo el tiempo a las tres dimensiones espaciales clásicas. Por ello, las longitudes de los objetos en la dirección del movimiento parecen disminuir respecto a sus longitudes en reposo. Esto se conoce como "*contracción de Lorentz-Fitzgerald*", porque fue este último quien

primero lo propuso como hipótesis a raíz del experimento de Michelson y Morley.

Alumno: Verdaderamente, el cambio teórico fue grande.

Profesor: Sin embargo, con ser muy importante todo lo anteriormente dicho, en mi opinión aún no hemos comentado el asunto que más afecta al mundo subatómico. Me refiero al aumento de masa al crecer la velocidad de la partícula.

Alumno: Es decir, otra consecuencia directa de la Teoría de la Relatividad.

Profesor: Aplicando el *principio de conservación de la cantidad de movimiento*, que, como sabes, es una ley inquebrantable de la Física, Einstein dedujo que la masa de una partícula en movimiento depende de su velocidad de acuerdo con la expresión

$$m = m_0 \gamma$$

donde m_0 es la masa de la partícula en reposo y γ es el factor que aparecía en las transformaciones de Lorentz y cuyo valor es siempre mayor o igual a la unidad. Es decir, se acerca a la unidad conforme la velocidad se hace menor. En los objetos macroscópicos, $\gamma = 1$, por lo que su masa en movimiento coincide con la masa en reposo, como estamos acostumbrados a observar.

5.5. Equivalencia masa-energía

Alumno: Según la ecuación anterior, cuando una partícula gana velocidad γ , en consecuencia, aumenta su masa, debería ser cada vez más grande. No lo entiendo.

Profesor: Lo que sucede, como puede derivarse de dicha fórmula y de la expresión clásica de la energía cinética, es que el incremento de masa que experimenta la partícula se acumula en forma de energía cinética relativista, cuya expresión es

$$E_c = \Delta m c^2$$

siendo Δm el aumento de masa debido a la velocidad.

Alumno: Esa fórmula relaciona la masa y la energía cinética de una partícula relativista. Pero, ¿podemos hallar otra relación similar entre la energía total de dicha partícula y su masa?

Profesor: Claro que sí. Es la consecuencia más conocida de la teoría de Einstein, la *equivalencia masa-energía*. Es sencillo deducir, desde la fórmula de la energía cinética, la siguiente ecuación

$$E = m c^2$$

donde E es la energía total relativista y m es la masa de la partícula en movimiento.

Alumno: Quizá sea la fórmula más popular de la Física. ¿Cómo se deduce dicha ecuación?

Profesor: Si partimos de la fórmula de la energía cinética relativista de una partícula de masa en reposo m_0 , tenemos que

$$E_C = \Delta m c^2$$

$$E_C = (m - m_0) c^2$$

$$E_C = m c^2 - m_0 c^2$$

El término $m_0 c^2$ es la energía en reposo de la partícula, la que se asocia con su masa en reposo, que designaremos por E_0 .

Por consiguiente,
$$E_C = m c^2 - E_0$$

De donde:
$$m c^2 = E_C + E_0.$$

El término $m c^2$ representa la suma de la energía cinética relativista de una partícula y su energía en reposo; por lo tanto, constituirá justamente la energía relativista total que buscamos y que designaremos por E . O sea:

$$E = E_C + E_0 = m c^2$$

que constituye la famosa ecuación de Einstein tantas veces utilizada en la Física de Partículas y en las reacciones nucleares.

5.6. Antimateria

Alumno: Junto a la equivalencia masa-energía, ¿hay alguna otra consecuencia relevante de la teoría de la relatividad sobre las partículas fundamentales?

Profesor: En 1928, Paul Dirac introdujo los efectos relativistas en la ecuación de ondas de Schrödinger que describe el comportamiento del electrón en el átomo y, al calcular las soluciones de la energía, obtuvo la expresión:

$$E^2 = m^2 c^4,$$

De la que se deriva:
$$E = \pm m c^2$$

Alumno: Es la energía cinética relativista cuando se toma con signo positivo, pero no tiene sentido real con el signo negativo.

Profesor: Eso fue, precisamente, lo que pensaron los físicos de finales de los años 20. Bueno, todos excepto el propio Dirac, quien intentó afanosamente hallar una explicación a los valores negativos de la energía.

Alumno: ¿Y la encontró?

Profesor: Muy pronto, Dirac propuso que el vacío estaba constituido por un *mar de electrones de energía negativa*, con todos los niveles ocupados. De este modo, no los podemos observar, puesto que no se pueden producir transiciones entre dichos niveles completamente llenos. Sin embargo, en un momento dado, un fotón de alta energía es posible que colisione con uno de dichos electrones y en ese instante lo hace "visible" al comunicarle la suficiente energía como para que el electrón pase a un nivel de energía positivo. Al mismo tiempo que detectamos el electrón en el "mundo real", éste habrá dejado un "hueco" en los niveles de energía negativos que lo interpretaremos como la aparición de otra partícula, de masa igual a la del electrón, pero con carga positiva (Figura 19).

Alumno: Tengo entendido que a dicha partícula se le llamó *positrón*, como abreviatura de *electrón positivo*.

Profesor: Así es. La hipótesis de Dirac fue confirmada muy pocos años más tarde, en 1932, cuando Carl Anderson y Robert Millikan, del Instituto de Tecnología de California, detectaron al positrón en los rayos cósmicos.

Alumno: Me imagino que el nuevo positrón tendría todas las características predichas por Dirac.

Profesor: En efecto. No sólo el electrón tiene su antipartícula, sino que ese mismo concepto acerca de la estructura del vacío cabe extenderse al resto de las partículas. De tal manera que hablamos así de la existencia de la *antimateria*, constituida por las partículas simétricas. Podemos crear una pareja partícula-antipartícula en experimentos con fotones de alta energía y, lógicamente, cuando se encuentre una partícula con su correspondiente antipartícula, se aniquilarán mutuamente, transformándose en energía.

La antipartícula del protón es el antiprotón, que tiene sus mismas propiedades y una carga eléctrica igual en valor numérico, aunque negativa.

Alumno: ¿Por qué, entonces, no existe la antimateria en el universo?

Profesor: Es muy probable que en los primeros instantes del universo, poco después del Big Bang, se creara tanto materia ordinaria como antimateria y que, debido a la asimetría introducida en la rápida etapa inflacionaria, en cada región del espacio predominaran las cantidades de una sobre las de la otra. De este modo, una vez concluida la aniquilación, el resultado final fuera o bien una zona de materia, como la nuestra, o una de antimateria.

Alumno: Por lo tanto, puede ser que la luz de alguna de las galaxias lejanas que observamos corresponda a regiones de antimateria.

Profesor: Y también es muy posible que algunas de las radiaciones procedentes de las zonas remotas del espacio sean debidas a los fotones originados en la destrucción mutua de la materia y la antimateria que ocasionalmente se hayan acercado lo bastante en esas regiones del universo.

5.7. Cuestiones

Si no se conocen las respuestas a las siguientes cuestiones es aconsejable una nueva lectura de este capítulo.

- ¿Qué hecho intentaba comprobar el experimento de Michelson y Morley? ¿En qué consistió dicho experimento? Dibuje un esquema del mismo.
- ¿Qué consecuencias dedujo Einstein del experimento de Michelson y Morley?
- Enuncie los postulados de la Teoría de la Relatividad Especial.
- ¿Qué es el tiempo propio? ¿Y la contracción de Lorentz-Fitzgerald?
- ¿En qué consiste la equivalencia masa-energía?
- ¿Qué es la antimateria?
- ¿Cómo interpretó Dirac la estructura del vacío y la formación de la antimateria?

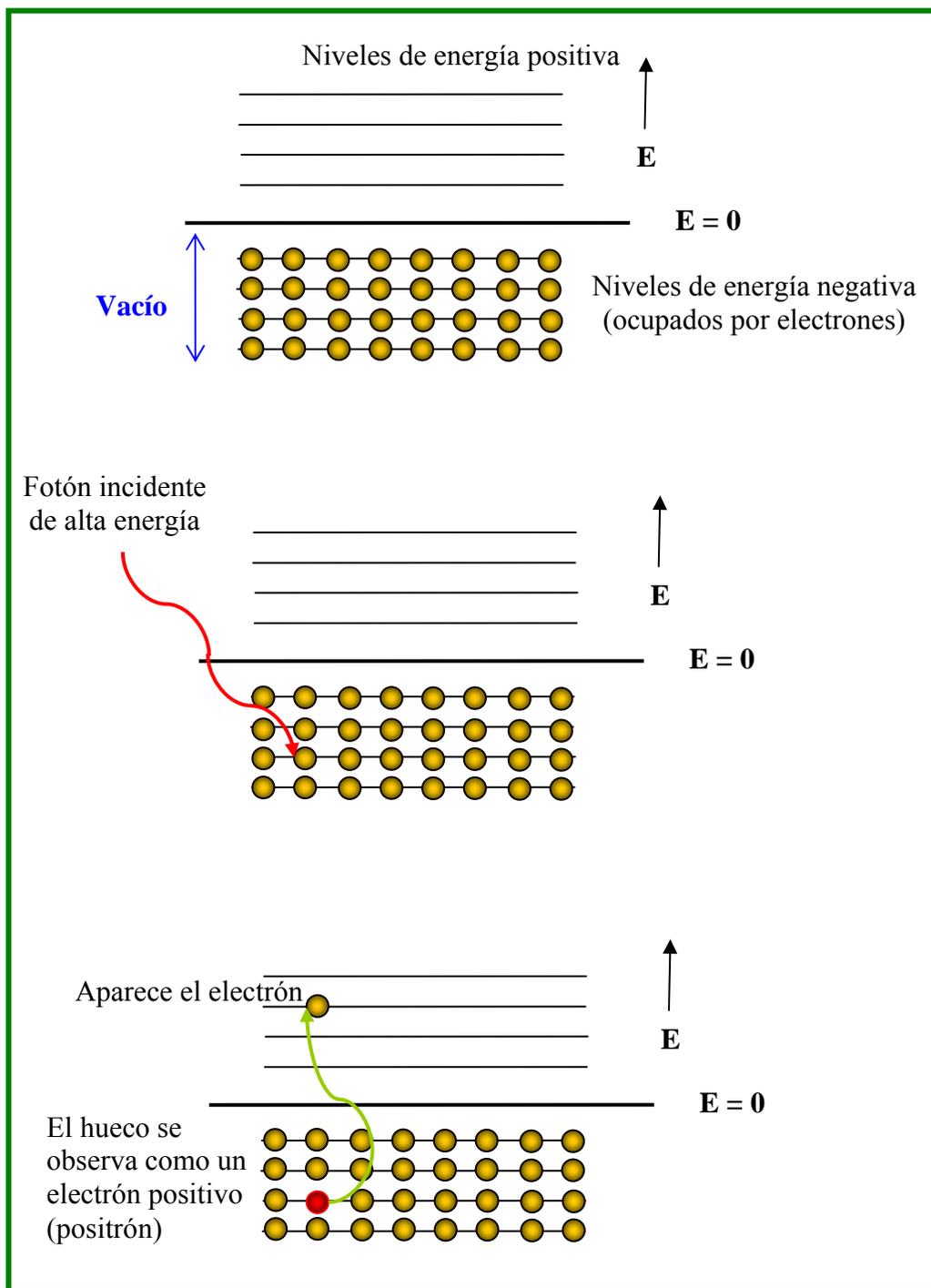


Figura 19.- Creación de un par electrón-positrón, según Dirac.

6. RADIATIVIDAD

Alumno: Dentro de los fenómenos relacionados con el núcleo atómico no cabe duda de que el más interesante sea la radiactividad.

Profesor: Posiblemente es cierto. Además, cabe añadir que ya se conoce desde hace un siglo, por lo que ha sido muy bien estudiado

Alumno: ¿Tanto tiempo?

Profesor: Concretamente, desde 1896. Y como algunos de los descubrimientos científicos importantes...ocurrió por *casualidad*.

Alumno: Es increíble. Lo que puede ser la fuente de energía del siglo XXI se descubrió por azar. ¿Cómo sucedió?

6.1. Descubrimiento y origen de la radiactividad

Profesor: El francés Henri Becquerel estaba trabajando en su laboratorio con *sales de uranio* y cerca de ellas, en uno de los cajones de su armario tenía unas placas fotográficas nuevas, dentro de un paquete, convenientemente envueltas y sin estrenar. Cuál no sería su sorpresa cuando, en un momento dado, se dispuso a utilizar la primera de ellas encontrando que se había velado. Comprobó que todo el paquete había corrido la misma suerte.

Alumno: Yo habría ido inmediatamente a reclamar a la tienda de suministros del laboratorio.

Profesor: No sé si Becquerel reclamó, pero es evidente que en lo primero que pensó fue en un defecto de fabricación o en una manipulación inadecuada de las placas. Ahora bien, lo que ya le sacó de dudas fue la repetición del suceso con nuevas placas. Tenía que existir algo en el laboratorio que, de una forma u otra, *velaba* las placas. Se afanó en buscar la causa de esas misteriosas "emanaciones" o "radiaciones" que impresionaban las placas fotográficas a pesar de hallarse cubiertas con papeles negros y separadas, incluso, por una lámina de vidrio.

Alumno: Claro. Por eso se imaginó que existirían unos rayos que atravesaban el envoltorio y alcanzaban las placas.

Profesor: Exacto. Fue descartando posibles fuentes hasta descubrir el origen de estas radiaciones. No era otro sino las sales de uranio. También comprobó que los rayos podían descargar un electroscopio o ionizar el aire circundante.

Desde ese instante, muchos de los físicos de la época se lanzaron al estudio de este fenómeno. Los pioneros, y más destacados, fueron el matrimonio Curie; los cuales, nada más tener noticia del descubrimiento de Becquerel, se dedicaron a tratar en su propia casa toneladas de *pechblenda*, mineral de *uranio*, con el fin de concentrar este elemento. En 1898, confirmaron que la radiactividad es un fenómeno asociado al núcleo atómico, independiente del estado físico de la sustancia o del tipo de compuesto que forme y descubrieron dos nuevos elementos, el *polonio* y el *radio*, por lo que recibieron conjuntamente el Premio Nobel de Física en 1903.

Alumno: Resultaría extraño en esos primeros años del siglo XX que una mujer recibiera tan alto galardón.

Profesor: El caso de María Sklodowska, pues así se llamaba de soltera, era excepcional. Consiguió ahorrar para trasladarse desde su Varsovia natal hasta la universidad de la Sorbona en París, donde estudió Física. Cuando murió su marido, en un accidente en el año 1906, prosiguió ella sola las investigaciones y, en 1911, volvió a recibir otro Premio Nobel, en esta ocasión de Química.

Otros científicos realizaron también notables avances como el francés Debierne, que descubrió el *actinio*, otro elemento radiactivo. Rutherford y Soddy encontraron un gas desconocido, también radiactivo, que se formaba en la desintegración del radio y que fue denominado *radón*. Con ello se comprobó que las emisiones radiactivas provocan cambios en la naturaleza de los elementos. También llamó la atención su enorme capacidad para producir energía, pues el matrimonio Curie determinó que un gramo de radio generaba unas cien calorías cada hora, manteniendo este ritmo de manera constante.

Alumno: ¿Quiere decir que no se consumía?

Profesor: Prácticamente se podría decir eso, ya que después se supo que tendrían que pasar unos 1600 años para que ese gramo de radio redujera su peso a la mitad.

Alumno: Ya entiendo el por qué del interés en el desarrollo de la energía nuclear. Es una fuente muy rentable.

Profesor: Ese es uno de los grandes retos de la tecnología del siglo XXI. Dominar la energía nuclear. Conseguir ganar en seguridad y sobre todo solucionar el problema de la contaminación radiactiva.

Alumno: Si la radiactividad es un hecho natural no puede ocasionar riesgos.

Profesor: Hay que tener en cuenta que los elementos radiactivos se encuentran diseminados por toda la Tierra y así no ofrecen peligro alguno. Por el contrario, cuando se concentran en las instalaciones nucleares los niveles de radiación, en caso de algún escape o accidente, pueden ser mucho mayores.

6.2. Tipos de radiaciones

Alumno: ¿Cuántas clases de emisiones radiactivas existen?

Profesor: Rutherford y Robinson sometieron las emisiones de unas muestras de radio y otros isótopos radiactivos a la acción de campos eléctricos y magnéticos con objeto de calcular su masa y su carga, de acuerdo con las trayectorias observadas. Encontró dos tipos de radiaciones que denominó con las dos primeras letras del alfabeto griego (Figura 20).

Así, la radiación alfa resultó estar integrada por *núcleos de helio*, pues su carga positiva era equivalente a la de dos protones y su masa aproximadamente igual a cuatro veces la del protón. En todo caso, quedo fehacientemente comprobada su naturaleza cuando, después de dejar varios días junto a una muestra radiactiva emisora de radiaciones alfa un

recipiente de vidrio en el que se había hecho el vacío, se detectaba helio en su interior por medidas espectroscópicas.

Las partículas alfa, como también se las conoce, se emiten con gran velocidad, unos 16000 km/s, con una energía cinética de varios MeV (Megaelectrón-voltio). No obstante, dado su apreciable tamaño no son capaces de atravesar una hoja de papel ni la piel humana. Sin embargo, poseen un alto poder ionizante, pues no llegan a recorrer ni once centímetros en el aire y tienen tiempo de provocar miles de iones en sus choques con diferentes moléculas.

Los datos obtenidos por Rutherford para la radiación beta confirmaron que era de la misma naturaleza que los rayos catódicos, es decir, se trataba de *electrones* a gran velocidad, cercana a la de la luz, arrojando una energía cinética alrededor de 1 MeV (un millón de electrón-voltios). A causa de su menor tamaño, el poder de penetración de las partículas beta es mucho mayor que el de las anteriores. Por ejemplo, mientras que las partículas alfa no pueden atravesar una delgada lámina de aluminio de apenas 40 micras, las beta atraviesan espesores de varios milímetros.

Poco después, Villard encontró el tercer tipo de emisión radiactiva, los rayos gamma. Carecen de masa y de carga, son, por consiguiente, *fotones* de alta energía, es decir, radiaciones electromagnéticas de frecuencia superior a los rayos X. Esta emisión se asocia siempre a las alfa o las beta y corresponde a un cambio energético del átomo, ya que tras "perder" una partícula alfa o una beta, el nuevo elemento debe "reorganizar" su nuevo núcleo.

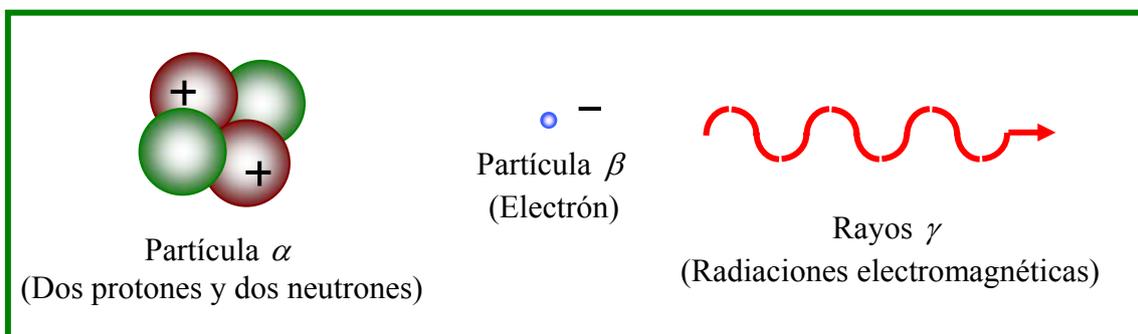


Figura 20.- Tipos de emisiones radiactivas.

Alumno: No cabe duda de que son los rayos más peligrosos.

Profesor: Evidentemente, pues tienen una energía cinética cercana a un GeV (Gigaelectrón-voltio) y una capacidad de atravesar la materia muy grande. Por ejemplo, los rayos gamma pueden penetrar varios centímetros en un bloque de plomo antes de ser absorbidos por sus átomos.

Alumno: Si la radiactividad es debida al *núcleo*, ¿cómo pueden ser electrones las partículas beta?

Profesor: La explicación es relativamente sencilla. Soddy y Fajans afirmaron que un átomo es emisor beta cuando un *neutrón* de su núcleo se

transforma en un *protón* y un *electrón*. El primero queda retenido en el núcleo, por lo que el nuevo elemento posee un número atómico superior en una unidad al elemento primitivo, y el electrón es inmediatamente expulsado a gran velocidad .

Alumno: Entonces, cuando el elemento sea emisor alfa se convierte en otro átomo con dos unidades menos en el número atómico y cuatro unidades menos en el número másico, ya que hay que descontarle dos protones y dos neutrones.

Profesor: Exacto. Y si es emisor gamma no se modifica su naturaleza química, es decir no cambia dicho elemento, puesto que es una emisión de energía simplemente. Sigue siendo el mismo átomo en un nivel energético diferente.

6.3. Ley de la desintegración radiactiva

Alumno: Supongo que no todos los elementos son radiactivos.

Profesor: Evidentemente, no. Se conocen unos cuarenta isótopos radiactivos naturales, unos de número atómico bajo, como el carbono-14 y otros muy elevado, como el uranio-235. Aunque también se preparan diversos isótopos radiactivos artificiales, como los de la familia de los lantánidos y la de los actínidos, destinados a muy diversos usos.

Alumno: ¿Cómo sabemos cuando un átomo se va a desintegrar?

Profesor: Para un átomo concreto es imposible. Es lo mismo que si afirmamos que la vida media de una persona en un país determinado es de 80 años. Eso no significa que todo el mundo llegue a cumplir esa edad, ni que no haya nadie con 90 años. Se trata de datos *estadísticos*. Hay que tener en cuenta que en una muestra de sustancia radiactiva hay un enorme número de átomos y los cálculos estadísticos se cumplen con un grado de confianza total.

Alumno: ¿Cuáles son los parámetros estadísticos que caracterizan a un elemento radiactivo?

Profesor: Básicamente son tres, la *constante radiactiva*, el *período de semidesintegración* y la *vida media* del elemento radiactivo.

Alumno: ¿Qué expresa cada uno de ellos?

Profesor: En primer lugar, debemos recurrir al cálculo diferencial para expresar la actividad de una sustancia radiactiva. Recordemos que la velocidad instantánea de un móvil en cinemática se define como la derivada del espacio recorrido respecto del tiempo, o dicho en otras palabras, la variación del espacio respecto del tiempo:

$$v = \frac{ds}{dt}$$

Pues bien, está claro que la actividad radiactiva de una sustancia, o dicho con otras palabras, su ritmo o velocidad de desintegración, que se define como la variación en el número de átomos de la misma con respecto al tiempo (dN/dt), será proporcional a la cantidad de átomos presentes en un

momento determinado (N). En este caso, es lógico que cuanto mayor sea la muestra, más actividad radiactiva tendrá, por lo que se podrá escribir:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

Siendo λ la constante de proporcionalidad o constante radiactiva. Representa la *probabilidad* de desintegración de un átomo. Su magnitud inversa se denomina vida media y nos mide justamente la *esperanza de vida* de un átomo radiactivo, que puede ser desde menos de un segundo hasta muchos años.

Alumno: ¿Y el tiempo de semidesintegración?

Profesor: Cuando se aplica el cálculo integral a la fórmula anterior se obtiene la ley de Elster y Geitel o ley de emisión radiactiva:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (N_0 \text{ es el número inicial de átomos de la muestra})$$

Si en esa fórmula se calcula el valor de t para el que la cantidad inicial N_0 de la muestra radiactiva se ha reducido a la mitad, $N_0/2$, se obtiene el período de semidesintegración del elemento.

Alumno: Supongo que con sus valores ocurrirá algo parecido a la vida media.

Profesor: Sí. Presenta un amplio rango de variación. Por ejemplo, para el berilio-8 es de 10^{-16} segundos, para el radón-222 es 3,8 días, para el carbono-14, es de 5700 años y para el uranio-238 es de 4500 millones de años.

6.4. Medida de la radiactividad

Alumno: ¿En que unidad se mide la actividad radiactiva?

Profesor: Para la medida de la radiactividad existen diversas unidades según se quiera expresar la velocidad de desintegración de una sustancia o bien la cantidad de radiación existente en un área concreta o, incluso, la dosis de radiación absorbida por el organismo. Y en cada uno de estos casos, siempre se tienen varias unidades que muchas veces no guardan una relación decimal entre sí.

Alumno: Por consiguiente, es un poco complejo el hacer una clasificación de todas ellas.

Profesor: No demasiado si nos centramos en las más empleadas, sobre todo en lo que respecta a la cantidad de radiación.

La unidad que mide la radiación existente en el aire es el roentgen (r), que representa una energía de 83,7 ergios por cada gramo de aire.

Son mucho más interesantes las unidades que miden los efectos biológicos de la radiación. Así, cuando se absorbe una energía de un julio por cada kilogramo de masa decimos que la dosis de radiación absorbida es de un gray, la unidad en el Sistema Internacional, cuyo símbolo es Gy.

Alumno: ¿Y da lo mismo el tipo de radiación que sea?

Profesor: Por supuesto que no. La peligrosidad de las radiaciones es distinta. No es igual absorber partículas beta que rayos gamma. Por ello se tiene en cuenta un coeficiente de corrección para aplicárselo a la dosis de una radiación determinada absorbida por un organismo y así calcular la dosis equivalente, lo cual permite comparar todo tipo de radiación y conseguir una medida objetiva de dicha dosis. La unidad en este caso se denomina sievert (Sv).

Un sievert es la cantidad de radiación que produce el mismo efecto biológico que la absorción de un julio de rayos gamma en un kilogramo de materia orgánica. Como es un poco grande, se define el rem como la centésima parte del sievert, de modo que, en muchas ocasiones, se dan los datos expresados en rem.

6.5. Efectos biológicos y precauciones

Alumno: ¿Realmente son tan peligrosas las radiaciones?

Profesor: Las consecuencias sobre los tejidos de los organismos vivos pueden llegar a ser muy graves. La radiación aporta energía a las moléculas de las células, lo que puede alterar sus funciones de forma temporal o permanente y ocasionar incluso la muerte de las mismas. La *gravedad* de la lesión depende sobre todo de la dosis equivalente absorbida y de la sensibilidad del tejido frente a la radiación.

Alumno: ¿Pueden afectar los daños a las *células reproductoras*?

Profesor: Claro. Ninguna célula está a salvo. Es una de las principales preocupaciones de la opinión pública cuando se habla en materia de accidentes nucleares. Las consecuencias pueden transmitirse a una nueva generación, ya que unos gametos que contengan errores en la información genética son susceptibles de provocar graves malformaciones al feto.

Alumno: No me extraña que haya, en general, un cierto recelo hacia los asuntos relacionados con la radiactividad. Concretamente, ¿cuáles son los niveles de radiación peligrosos para el ser humano?

Profesor: Se ha determinado que una cantidad de radiación superior a 40 Gy produce un grave deterioro en el sistema vascular humano, que lleva al edema cerebral, trastornos neurológicos y coma profundo en menos de dos días. Cuando el organismo absorbe entre 10 y 40 Gy de radiación, los trastornos vasculares son menores, pero se produce en las células pérdida de fluidos y electrolitos, lo cual provoca la muerte de la persona antes de diez días por el deterioro de la médula ósea y la infección terminal que se produce, como consecuencia de ello. Si la cantidad absorbida oscila entre 1,5 y 10 Gy se destruye la médula ósea, provocando infección y hemorragia, por eso la persona puede morir cuatro o cinco semanas después.

Las consecuencias menos graves de una dosis inferior se manifiestan en muchos órganos a través de efectos retardados por causa de las alteraciones vasculares, que ocasionan lesiones en la médula ósea, riñones, pulmones y cristalino. No obstante, el principal efecto retardado posible es el aumento de casos de cáncer y leucemia, sobre todo a partir de 1 Gy.

Se hace necesario, por tanto, adoptar medidas de seguridad contra la radiación y para el tratamiento y almacenamiento de residuos radiactivos. En principio, para los trabajadores de laboratorios y centrales nucleares se recomienda no superar los 0,02 rem diarios, además de pasar controles médicos periódicos. Para el resto de los ciudadanos el límite se sitúa en 0,5 rem anuales.

Alumno: De cualquier modo, una vez producido el accidente ¿cómo evitar la exposición a la radiación?

Profesor: En realidad, no podemos. Básicamente hemos de tomar medidas preventivas dirigidas a minimizar los efectos de una radiación. En primer lugar, como es lógico, conviene aumentar la separación entre la fuente radiactiva y las personas, de ahí que las centrales nucleares se construyan en zonas poco pobladas. También es fundamental reducir al máximo el tiempo de exposición y utilizar pantallas o *escudos*, es decir, trajes especiales protectores para los trabajadores con acceso a las áreas de mayor radiactividad.

6.6. Energía de enlace nuclear

Alumno: ¿Es tan importante la cantidad de energía emitida en las radiaciones para justificar tantas medidas de seguridad y la preocupación que existe en la opinión pública acerca de estos asuntos?

Profesor: Observar con rigor las normas de seguridad por parte de los trabajadores en instalaciones nucleares, civiles o militares, además, lógicamente del personal científico, es imprescindible. Las energías que se ponen en juego en estos procesos son muy superiores a la de las reacciones químicas ordinarias.

Sabemos que un núcleo atómico se compone de protones y neutrones. Pues bien, si quisiéramos separar por completo todos sus componentes necesitaríamos aplicar una considerable energía, que denominamos energía de enlace nuclear. El valor de dicha energía es igual a la que se obtendría en el proceso inverso, es decir, si constituimos un nuevo núcleo a partir de sus protones y neutrones libres.

Alumno: Pero, si no hay reacción química... ¿de dónde procede esa energía?

Profesor: Está muy claro. Si calculamos la masa de cualquier núcleo, simplemente sumando la masa de todos sus nucleones, siempre obtenemos un resultado superior al dato experimental de dicha masa para el núcleo estudiado.

Alumno: Interpreto que al formarse un núcleo hay una especie de pérdida de masa.

Profesor: Eso es lo que tiene lugar. Ya lo había manifestado Einstein en una de las consecuencias de la teoría de la relatividad, la famosa conversión masa-energía. A estos niveles subatómicos, las velocidades son cercanas a la de la luz e impera el mundo relativista. Por eso la equivalencia masa-energía viene dada por la fórmula: $E = m c^2$, en la cual c es la velocidad de la luz en el vacío, m es la pérdida de masa y E es su equivalente en energía.

Alumno: Supongo que al hacer los cálculos para la energía de enlace de un núcleo determinado su valor coincidirá con el predicho por la fórmula de Einstein.

Profesor: Exactamente. Constituye una prueba más de la validez de la teoría de la relatividad. Además, para comparar unos átomos con otros se recurre a hallar la *energía de enlace por nucleón*, o sea, dividiendo la energía de enlace debida a dicha pérdida de masa entre el número total de protones y neutrones, llamados conjuntamente nucleones, que tenga el átomo.

Alumno: ¿Y coinciden los valores para todos los núcleos?

Profesor: Ni mucho menos. Esta energía de enlace crece con el número atómico, muy rápidamente al principio, hasta un valor de 8,8 MeV en torno al hierro, y muy similar en los elementos con número atómico próximo a 50. Luego desciende lentamente hasta llegar a 7,6 MeV para el uranio, de número atómico 92.

Este hecho, aparentemente sin importancia, tiene grandes consecuencias. Como es de suponer, los núcleos con mayor energía de enlace por nucleón son los más estables. De los datos comentados, se deduce que si los núcleos pesados, tales como el uranio, se dividen en núcleos ligeros, lo cual sucede en las reacciones de fisión, se libera energía en el proceso. Del mismo modo, la combinación de núcleos ligeros como el hidrógeno y el litio para formar núcleos más pesados en las reacciones de fusión, viene acompañada de liberación de energía.

Alumno: Y considerando el orden de magnitud de estas energías, dichas reacciones nucleares de fisión y de fusión ofrecerán grandes posibilidades. No obstante, ¿son las únicas posibles?

6.7. Reacciones nucleares. Isótopos radiactivos

Profesor: Ciertamente, no. Desde que Rutherford, en 1919, consiguió la primera reacción nuclear artificial al bombardear nitrógeno con partículas alfa y obtener un isótopo estable del oxígeno, de número másico 17, junto a la liberación de un protón, se han llevado a cabo numerosas reacciones nucleares. Realmente fue la búsqueda de nuevos isótopos y el estudio de estas reacciones lo que condujo en 1942 al descubrimiento de la fisión nuclear.

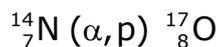
Alumno: Vayamos por partes. En primer, lugar estas reacciones no son ordinarias y sus ecuaciones químicas serán peculiares.

Profesor: En efecto. Por ejemplo, la primera reacción de Rutherford se expresa de este modo:



Los *números atómicos* de los núcleos implicados se escriben como *subíndices* y a la izquierda de sus símbolos químicos, y sus *números másicos* como *superíndices*. En el caso anterior, la partícula alfa se expresa como un núcleo de helio, y el protón como un núcleo de hidrógeno. Evidentemente, en una reacción nuclear la suma de los números atómicos y la suma de los números másicos ha de coincidir en ambos miembros.

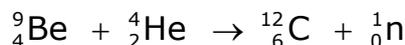
A menudo, para simplificar se utiliza la siguiente notación en lugar de la anterior:



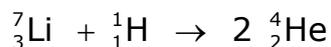
Indicando, entre paréntesis, primero la partícula utilizada como proyectil y luego la emitida por el núcleo bombardeado.

Como cabe suponer se han ido produciendo un gran número de *transmutaciones* atómicas artificiales, como también denominamos a estas reacciones, en las que se capturan distintos proyectiles y no sólo partículas alfa. Para hacernos una idea, lo mejor es señalar algunas de las reacciones que han tenido relevancia en el desarrollo de este campo de la investigación que tantas aplicaciones nos brinda a nuestra sociedad.

En una reacción estudiada por Bothe y Becker, en 1930, se observó la emisión de neutrones al bombardear berilio con partículas alfa. Los nuevos isótopos producidos eran de carbono 12, el más común de este elemento:



Los proyectiles utilizados tampoco han de ser necesariamente partículas alfa. Así, en 1932, los británicos Cockcroft y Walton fueron los primeros en usar partículas aceleradas artificialmente para desintegrar un núcleo atómico. Mediante un dispositivo de alto voltaje, llamado multiplicador de tensión, se produjo un haz de protones con gran velocidad. A continuación, se emplearon esas partículas para bombardear un núcleo de litio-7, que se escinde en dos núcleos de helio:



Las partículas cargadas necesitan una energía considerable de algunos MeV para penetrar en el núcleo venciendo la repulsión electrostática. Gracias al desarrollo tecnológico de los aceleradores se logra imprimir a las partículas las altas velocidades requeridas, mediante la aplicación de intensos campos eléctricos o magnéticos.

Alumno: No obstante, otra alternativa habría sido emplear partículas sin carga. ¡Y qué mejor candidato que el neutrón, la más pequeña de ellas!

Profesor: Ciertamente. Pero no olvidemos que el neutrón fue la última en descubrirse. Por ello se incorporó más tarde al posible grupo de proyectiles, como sucede en la reacción con el aluminio, el cual se convierte en el isótopo del magnesio, de número másico 27, emitiendo a la vez un protón:



A pesar de la ventaja de carecer de carga, presentan dificultades para disponer de ellos, pues se debe recurrir a reacciones nucleares previas que suministran neutrones con una energía de salida determinada. En algunos procesos se necesitan neutrones "lentos", por lo cual se debe reducir su velocidad haciéndoles atravesar ciertas sustancias, los moderadores, que los frenan mediante choques con sus propios átomos.

Alumno: Con tantas reacciones nucleares que se han efectuado, es fácil pensar que se hayan formado una gran cantidad de isótopos nuevos.

Profesor: Las transformaciones nucleares artificiales frecuentemente conducen a isótopos *inestables* que se desintegran a través de un proceso similar al de los elementos radiactivos naturales. Este fenómeno se denomina radiactividad artificial o inducida.

Alumno: ¿Cuándo se tuvo conocimiento de la existencia de la radiactividad artificial?

Profesor: Hasta 1933 no se demostró que estas reacciones nucleares podían llevar en ocasiones a la formación de nuevos núcleos radiactivos. Los químicos franceses Irène y Frédéric Joliot-Curie produjeron aquel año la primera sustancia radiactiva artificial bombardeando aluminio con partículas alfa. Los núcleos de aluminio capturaban estas partículas y emitían neutrones, formándose un isótopo del fósforo que se desintegraba rápidamente. Los Joliot-Curie también produjeron un isótopo del nitrógeno, a partir de boro, y uno del aluminio, a partir de magnesio.

Desde entonces se han descubierto muchísimas reacciones nucleares y se han utilizado distintos proyectiles, como partículas alfa, protones, neutrones y deuterones (núcleos de deuterio). Como resultado, se conocen en la actualidad varios cientos de isótopos radiactivos artificiales.

Alumno: Por lo tanto, el trabajo de los Joliot-Curie abrió un nuevo camino y, a juzgar por los resultados de hoy día, en su tiempo muy prometedor.

Profesor: No es de extrañar que el premio Nobel que Irene Curie recibió poco después volviera a hacer historia. Es el primer caso, único hasta ahora, en el que madre e hija son galardonadas con el Nobel.

Alumno: ¿Sólo se pueden preparar los isótopos radiactivos utilizando *aceleradores* o es posible obtenerlos de otro modo?

Profesor: Hay otros dos medios fundamentales para producir isótopos radiactivos, a partir de los *productos de fisión* o por *irradiación en un reactor nuclear*.

Alumno: ¿La fisión no tiene por objeto la producción de energía?

Profesor: Así es, aunque no es el único objetivo. En realidad, el estudio de las reacciones nucleares y la búsqueda de nuevos isótopos radiactivos artificiales, sobre todo entre los elementos más pesados, llevó al descubrimiento de la fisión nuclear y al desarrollo de la bomba atómica.

Pero, además, en los procesos de fisión se preparan nuevos isótopos como consecuencia de la desintegración de los productos resultantes de dicha fisión. Tanto es así que, desde los años cuarenta hasta hoy, el desarrollo de los reactores nucleares hizo posible la tercera vía ya mencionada para la producción a gran escala de isótopos radiactivos de casi todos los elementos de la tabla periódica, de modo que la disponibilidad de estos isótopos supone una ayuda incalculable para la investigación química y biomédica, entre otras muchas aplicaciones.

Alumno: Si los reactores están diseñados para producir energía y ya sabemos que estas reacciones son muy violentas ¿cómo se consigue separar los isótopos deseados de los residuos radiactivos que se generan conjuntamente?

Profesor: En los reactores existen dispositivos con canales especiales por los que se separa una parte del flujo total de neutrones con objeto de irradiar las sustancias para producir los isótopos radiactivos deseados al margen de la reacción de fisión principal.

Alumno: ¿Para que sirven los isótopos radiactivos?

6.8. Aplicaciones de los radioisótopos

Profesor: Los isótopos radiactivos ofrecen múltiples *aplicaciones* en muchos campos de la *tecnología*, la *industria*, la *ciencia* y la *medicina*.

Alumno: ¿Podemos comentar los usos más interesantes?

Profesor: No cabe duda que lo que a todos nos parece más relevante son sus múltiples aplicaciones en medicina, prácticamente en todos los sectores, tanto para diagnóstico como es el caso de los isótopos trazadores, como para fines terapéuticos.

Alumno: ¿Qué son los isótopos trazadores?

Profesor: Son isótopos radiactivos que se incorporan a un organismo y gracias a su radiactividad se les puede seguir en su recorrido y posterior evolución en aquél. Por ejemplo, en el estudio de la fotosíntesis se puede utilizar agua isotópicamente marcada con oxígeno 15 ó 19. Se inyecta este agua en las raíces y por medio de un detector de radiación, como un contador de tipo Geiger o similar, se puede seguir su recorrido por toda la planta y conocer qué parte del oxígeno producido por ella proviene del agua, entre otras cosas. Otros isótopos como el carbono 14 han permitido avanzar mucho en el conocimiento del complejo de reacciones bioquímicas que se agrupan en la fotosíntesis.

Alumno: ¿Y en cuanto a los usos terapéuticos?

Profesor: Tiene muchos. Quizás el más conocido sea la *radioterapia*. Consiste en la exposición de una zona determinada del organismo a una fuente de radiación ionizante, principalmente isótopos radiactivos, aunque también se utilizan rayos X de alta energía. Se suele emplear para el tratamiento del cáncer, que se efectúa en dosis periódicas.

La radiación ionizante actúa contra el *ácido desoxirribonucleico* (ADN) del núcleo de las células malignas, impidiendo la división celular normal. Con el fin de evitar lesiones en las células normales, la radioterapia debe tener en cuenta la localización exacta del tumor para minimizar la exposición de los otros tejidos.

Alumno: ¿No hay otros usos en medicina algo menos "agresivos"?

Profesor: Por supuesto. En el escáner de *huesos* con contraste se introduce en los tejidos un isótopo radiactivo que muestra el recorrido del flujo sanguíneo, el cual, al pasar por los huesos, se ve alterado en algunas enfermedades, por lo que estas imágenes son de gran valor para los diagnósticos. También se utiliza calcio radiactivo para el estudio de la *fijación de calcio* en los huesos y otros órganos.

Alumno: Observo que el abanico de aplicaciones es enorme. Pero no hemos dicho nada acerca de la industria ni la investigación química.

Profesor: Los isótopos radiactivos se emplean en ciertos tipos de *análisis químicos*, sobre todo en control de calidad y son muy útiles para el seguimiento de *mecanismos* de reacción, principalmente.

Alumno: ¿Mecanismos de reacción?

Profesor: Sí. Podemos decir que se trata de saber el modo en que transcurre una reacción química. Es decir, conocer todos los pasos o etapas individuales que tienen lugar en un proceso dado. Se trata de llegar a los detalles elementales de una reacción química.

Alumno: Recuerdo haber oído hablar sobre el método del carbono-14 para hallar la antigüedad de los fósiles. ¿En qué consiste?

Profesor: Efectivamente. Es muy interesante el empleo de los isótopos radiactivos en la *datación de fósiles*, sobre todo mediante el carbono-14. En la atmósfera terrestre existe una cantidad muy pequeña de carbono-14, y todos los organismos vivos asimilan trazas de este isótopo. Durante su vida, renuevan de forma continua su provisión de radiocarbono al respirar y al comer, por lo que su proporción se mantiene constante. Tras su muerte, el organismo se convierte en un fósil y el carbono-14 decae, es decir, se desintegra, sin ser reemplazado. Midiendo la cantidad de C-14 que aún permanece y comparándola con la de C-12, el isótopo estable y más abundante del carbono, se puede determinar la cantidad de radiocarbono que se ha desintegrado y así datar el fósil.

Alumno: ¿Cómo se mide la cantidad de carbono-14 en un fósil?

Profesor: Se incinera un fragmento pequeño para tener el carbono-14 en fase gaseosa, formando dióxido de carbono. Se utilizan contadores de radiación para detectar los electrones emitidos (partículas beta) por el decaimiento de carbono-14 en nitrógeno y así determinar su proporción en la muestra.

Un método similar, pero aplicado a otros isótopos como uranio-238 y torio-232, han permitido establecer las edades de las rocas y así comparar los datos con meteoritos y con rocas lunares. Los cálculos para la edad de la Tierra oscilan en torno a unos 4.600 millones de años. Estos valores coinciden con los obtenidos para los meteoritos que han caído a la superficie terrestre y con los de muestras lunares traídas por el Apolo XI en julio de 1969, lo que indica que todo el Sistema Solar tiene probablemente una edad similar a la Tierra.

Al mismo tiempo, constituye una prueba casi definitiva para la teoría de un origen común tanto del Sol como de los planetas a partir de la condensación de nubes de polvo y gas interestelar que, por contracción gravitacional, formó en su centro, mucho más caliente, el Sol, y a su alrededor se condensaron los planetas, satélites y asteroides.

6.9. Cuestiones

Si no se conocen las respuestas a las siguientes cuestiones es aconsejable una nueva lectura de este capítulo.

- ¿Cómo se descubrió el fenómeno de la radiactividad? ¿En qué consiste?

- ¿Cuántos tipos de radiaciones conoce y cuáles son sus características más relevantes?
- ¿Qué parámetros se utilizan para referirse a la actividad de una sustancia radiactiva? ¿Qué representa cada uno de ellos?
- ¿Cómo se miden las emisiones radiactivas?
- ¿Qué efectos pueden tener las diferentes dosis absorbidas de radiación?
- ¿De dónde proviene la energía de enlace nuclear? ¿Es lo mismo que energía de enlace por nucleón?
- Indique cómo se representa simbólicamente una reacción nuclear y señale qué relación han de guardar los números que aparecen.
- Explique las tres maneras de preparar isótopos radiactivos.
- Cite las principales aplicaciones de los isótopos radiactivos.

7. ENERGÍA NUCLEAR

Alumno: Hemos hecho hincapié en la importancia de la energía nuclear para la sociedad de nuestro tiempo, pero me consta que sus primeros pasos se dieron hace muchos años, ¿no es cierto?

Profesor: Los estudios sobre la radiactividad desembocaron en la fisión del uranio 235, realizada en 1939 por Hahn y Strassmann. Ellos descubrieron que, bombardeando uranio con neutrones, los núcleos se rompían y se liberaban energía y más neutrones, que podían producir más fisiones, obteniendo así *una reacción en cadena*. Justo tres años después, en 1942, el grupo dirigido por el premio Nobel Enrico Fermi, en la universidad de Chicago, construyó el primer reactor nuclear experimental utilizando esta reacción en cadena.

Durante el breve período de tiempo que duró la segunda guerra mundial se produjeron grandes avances en Física Nuclear. No en balde, los mayores físicos del momento, como Böhr, Einstein, Fermi, Gell-Mann, Feynman, entre otros, fueron reunidos en Los Álamos y dotados con la mayor infraestructura y recursos que jamás ha tenido la investigación científica, en el llamado proyecto Manhattan, para conseguir un único objetivo: disponer de la bomba atómica antes que el dictador alemán Hitler.

Alumno: No es necesario que me diga lo que sucedió, pues la historia de las primeras bombas nucleares de Hiroshima y Nagasaki es de todos conocida.

Profesor: Quizás sea esa la razón por la que la opinión pública ha mostrado siempre recelo hacia la energía nuclear. El recuerdo de ese fatídico 6 de agosto de 1945 siempre ha acompañado a los temas nucleares. No creo que esa "demostración" haya favorecido en absoluto a la imagen social de esta fuente de energía.

Alumno: Verdaderamente, no debemos confundir el uso industrial de la energía nuclear con el empleo bélico de la bomba atómica. Por otro lado, ¿ocurre como en el caso del petróleo, que es una fuente de recursos limitados?

Profesor: Se puede decir en parte que sí, aunque en mucha menor escala. Debido a la pequeña fracción de uranio 235 que existe en la Tierra, los reactores basados en su fisión no podrán satisfacer durante mucho tiempo más nuestras necesidades energéticas.

Una de las grandes promesas del futuro está en los reactores de fusión nuclear, es decir, basados en la unión de los núcleos en lugar de su destrucción. La principal ventaja radica en que la fusión no genera residuos radiactivos y puede utilizarse Tritio como combustible, de gran abundancia en la Tierra. En contraposición, la tecnología necesaria para estos reactores es muy avanzada, pues requiere el uso de altísimas temperaturas y el confinamiento magnético del plasma, y es un área que genera una gran actividad investigadora tanto en Europa como en Estados Unidos.

7.1. La fisión nuclear

Alumno: Concretamente, ¿en qué consiste la fisión nuclear?

Profesor: La fisión nuclear, es decir, la *escisión* de un núcleo pesado en núcleos más ligeros, es un tipo de reacción nuclear de gran importancia práctica porque proporcionan cantidades enormes de energía. Pensemos, por ejemplo, que en una sola reacción de fisión se libera una energía equivalente a diez millones de reacciones químicas. Esta reacción libera a su vez neutrones, con lo que puede causar una reacción en cadena con otros núcleos. En la explosión de una bomba atómica se produce una reacción en cadena incontrolada. Las reacciones controladas, por otra parte, pueden utilizarse para producir calor y generar así energía eléctrica, como ocurre en los reactores nucleares.

El descubrimiento data de 1939, como decía anteriormente, cuando Otto Hahn y sus colaboradores comprobaron que el núcleo de uranio bombardeado con neutrones lentos, es decir, frenados con moderadores tales como agua, agua pesada, carbón o berilio, se volvía inestable y se escindía en dos núcleos ligeros, de números másicos comprendidos entre 72 y 149 y de números atómicos comprendidos entre 34 y 57. Al mismo tiempo se producía una *tremenda* liberación de energía, con desprendimiento de nuevos neutrones, generalmente dos, que podían seguir la reacción iniciada. A este proceso se le denominó fisión nuclear.

Böhr postuló que, de todos los isótopos del uranio, el menos estable era el uranio-235 y que éste debía ser el causante de la reacción observada, lo que pudo comprobarse posteriormente.

En diciembre de 1942, en la Universidad de Chicago (Estados Unidos), el físico italiano Enrico Fermi logró producir la *primera reacción nuclear en cadena controlada*. Para ello empleó un conjunto de bloques de uranio natural distribuidos dentro de una gran masa de grafito puro. En la "pila" o reactor nuclear de Fermi, el moderador de grafito frenaba los neutrones y hacía posible el control de la reacción en cadena.

Alumno: ¿Es tan rentable esta energía como se afirma?

Profesor: La producción práctica de energía nuclear resulta evidente desde la ecuación de Einstein sobre la equivalencia masa-energía ya comentada. La energía liberada por la fisión es muy grande, por ejemplo, la fisión de un kilogramo de uranio-235 libera 18,7 millones de kilowatios-hora en forma de calor. Además, el proceso de fisión iniciado por la absorción de un neutrón en el uranio-235 libera un promedio de 2,5 neutrones en los núcleos fisionados. Estos neutrones provocan rápidamente la fisión de varios núcleos más, con lo que liberan otros cuatro o más neutrones adicionales e inician una serie de fisiones nucleares *automantenidas*, una reacción en cadena que lleva a la liberación continuada de energía nuclear.

Esta característica tan interesante se cuantifica mediante el factor de multiplicación k de una reacción nuclear en cadena, definido como el cociente entre el número de neutrones emitidos y la suma de los neutrones absorbidos y perdidos. Se elige esta relación porque, según el valor de k , es muy sencillo determinar si se producirá o no una reacción en cadena. Así, la reacción será estacionaria (o crítica), si k es igual a 1, supercrítica, si k es

superior a 1, y entonces tendrá lugar efectivamente la reacción en cadena, o subcrítica, cuando k es menor que 1, y no tendrá lugar.

Alumno: ¿Es muy descabellado pensar que la fisión pueda darse en la naturaleza?

Profesor: Ya lo creo. El uranio presente en la naturaleza sólo contiene un 0,71 % de uranio-235, el resto corresponde al isótopo no fisionable uranio-238. Una masa de uranio natural, por muy grande que sea, no puede mantener una reacción en cadena, porque sólo el uranio-235 es fácil de fisionar. Si por alguna causa se produjese una fisión, es muy improbable que un neutrón producido por la misma, con una energía inicial elevada de aproximadamente 1 MeV, inicie otra fisión, por lo que es imposible que se produzca una reacción en cadena. Ahora bien, esta probabilidad puede aumentarse cientos de veces si se frena el neutrón a través de una serie de colisiones elásticas con núcleos ligeros como hidrógeno, deuterio o carbono. En ello se basa el diseño de los reactores de fisión empleados para producir energía.

Alumno: Considerando las elevadas energías que se producen serán necesarios instalaciones y equipos de seguridad muy especiales.

7.2. Reactores nucleares

Profesor: Es lógico, dadas las altas temperaturas que se alcanzan y la necesidad de controlar el proceso. Básicamente, podemos resumir diciendo que en las centrales nucleares se aprovecha el calor de la fisión para calentar vapor que sirve para impulsar una turbina.

Alumno: Me imagino que el elemento principal de una central nuclear es el reactor.

Profesor: Evidentemente, aunque no es el único importante. El *reactor* de una central nuclear cumple el mismo propósito que una caldera de vapor. Actúa como una intensa fuente de calor, utilizada para generar el vapor que luego hará girar las turbinas del sistema productor de electricidad (Figura 21).

En el corazón del reactor se dispone el material fisionable, encerrado herméticamente en tubos cilíndricos. Estas barras se sumergen en el material moderador, que frena los neutrones producidos en la fisión y controla la reacción. Para aumentar la seguridad existe un sistema de control, externo al reactor, integrado por barras de cadmio. Ellas capturan el exceso de neutrones cuando la fisión corre cierto riesgo de no poder ser controlada, ya que si se produce con excesiva rapidez existe grave peligro de explosión.

Finalmente, la energía producida se transfiere, en el intercambiador de calor, al agua ordinaria, que se convierte en vapor y se envía a la turbina. Para mayor protección, el reactor está encerrado entre gruesos muros de hormigón, los cuales sirven de blindaje para que la radiación no salga al exterior.

Otro elemento de la central es el *sistema de refrigeración*, cuyo cometido es evitar un posible calentamiento excesivo del reactor. Lógicamente, también posee distintas *bombas* para mover el agua o el refrigerante del

sistema, *reguladores de presión* para el vapor y *alternadores* para llevar a cabo el último paso de la conversión de la energía.

A pesar de que el primer reactor nuclear experimental se construyó en 1942, los primeros reactores nucleares a gran escala no hicieron su aparición hasta el año 1944, comenzando por el de Hanford, en el estado de Washington (Estados Unidos), para la producción de material con destino a la fabricación de armas nucleares. El combustible era uranio natural y el moderador, grafito. Estas plantas tenían como objetivo la producción de plutonio mediante la absorción de neutrones por parte del uranio-238, sin embargo, el calor generado no se aprovechaba.

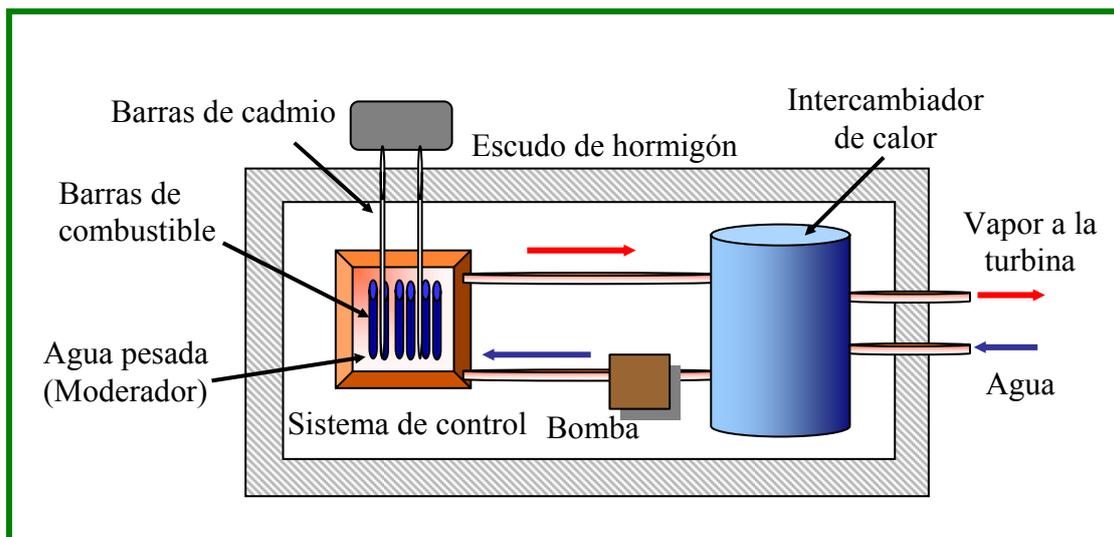


Figura 21.- Esquema de un reactor nuclear y sistemas de control

Alumno: De lo dicho anteriormente deduzco que todos los reactores nucleares presentan muchas similitudes.

Profesor: Aunque su fundamento es muy parecido, se distinguen varios tipos de reactores, caracterizados por el combustible, moderador y refrigerante que utilizan.

El reactor de agua ligera (RAL) tiene por combustible óxido de Uranio isotópicamente enriquecido (3 % U-235). Como moderador y refrigerante se emplea agua pura.

El reactor de agua a presión (RAP) es una variante del sistema RAL, donde el refrigerante es agua a 150 atm, que se mantiene líquida a 325 °C.

El reactor de agua en ebullición (RAE) es otro tipo de RAL, donde el refrigerante es vapor de agua a presión elevada.

En el reactor de agua pesada, el combustible es uranio natural, no enriquecido. Como moderador y refrigerante se emplea agua pesada, que absorbe menos neutrones.

El reactor refrigerado por gas (RAG) presenta uranio natural o enriquecido como combustible, el moderador es grafito y el refrigerante es CO_2 a presión.

El reactor de propulsión es un tipo de RAP con uranio enriquecido dado su pequeño tamaño.

En el reactor de investigación, el combustible es uranio enriquecido total o parcialmente. Como moderador y refrigerante se emplea agua. Permiten introducir sustancias, extraer neutrones y producir isótopos.

Por último, cabe citar al reactor autorregenerativo, que utiliza parte de los neutrones para fabricar plutonio a partir de U-238. El combustible es óxido de plutonio y de uranio y el refrigerante es metal fundido. Aprovechan el 75 % de la energía del uranio natural, lo que constituye un importantísimo avance frente al 1 % del RAL.

Alumno: ¿Cuáles son los principales problemas que nos plantea la fisión en un reactor nuclear?

Profesor: Yo diría que los más preocupantes son la *manipulación del combustible* nuclear y los *residuos*.

El uranio, con un contenido aproximado del 0,7 % de uranio-235, el isótopo útil como combustible nuclear, se obtiene en minas subterráneas o a cielo abierto. Se concentra y se transforma en el gas hexafluoruro de uranio (UF_6) para tratarlo en una planta de enriquecimiento isotópico por difusión, donde se consigue alcanzar un 3 % de uranio-235. Los residuos contienen en torno al 0,3 % de uranio-235. El producto enriquecido se lleva a una planta de fabricación de combustible, donde el gas UF_6 se convierte en óxido de uranio en polvo que se carga en barras resistentes a la corrosión y se transportan a la central nuclear para su fisión.

Una vez agotado, el combustible es enormemente *radiactivo* debido a los productos de fisión que contiene, por lo que sigue desprendiendo una cantidad de energía considerable. Puesto que un reactor de agua a presión típico tiene unos 200 elementos de combustible, y considerando que cada año se repone una tercera parte, es imprescindible proceder al tratamiento de estos residuos. Como primera medida, se colocan en piscinas de agua situadas en las instalaciones de la central, donde permanecen un año. Transcurrido ese plazo, los elementos de combustible agotados se envían, en contenedores blindados, a una instalación de almacenamiento permanente o a una planta de *reprocesamiento químico*, donde se recuperan el uranio no empleado y el plutonio-239 producido en el reactor, y se concentran los residuos radiactivos.

Cuando el combustible se reprocesa, el uranio que aún contiene se recicla en la planta de difusión, y puede ser reutilizado en la central. Además, el plutonio recuperado puede sustituir parcialmente al uranio-235 en los nuevos elementos de combustible. No es necesario extraer uranio adicional en las minas, puesto que las existencias actuales de las plantas de separación podrían proporcionar indefinidamente el suministro de combustible a los reactores autorregenerativos, teniendo en cuenta que este tipo de reactores permite obtener con el reciclado un 20 % más de combustible del que se ha consumido.

Alumno: ¿Cómo es posible ganar combustible?

Profesor: Porque el diseño de esos reactores permite que parte de los neutrones liberados en la fisión del Uranio-235 sean absorbidos por el otro isótopo, el Uranio-238, no fisionable directamente, pero que se convierte en Plutonio-239, el cual sí es fisionable. De ahí que al final del ciclo haya una ganancia neta de combustible nuclear.

7.3. Medidas de seguridad

Alumno: ¿No es cierto que en la sociedad actual, a pesar de la dependencia que tiene con respecto a la energía nuclear, existe una opinión desfavorable para su empleo?

Profesor: Durante los primeros años de la segunda mitad del siglo XX se pensó que la energía nuclear podía ofrecer un futuro halagüeño, pues se confiaba en que sustituiría a los combustibles fósiles, cada vez más escasos, disminuyendo el coste de la electricidad. Incluso se esperaba una reducción de la contaminación atmosférica y de la minería a cielo abierto.

La opinión pública era, en general, favorable a esta nueva fuente de energía, a pesar de que su empleo se inició en el terreno militar. Sin embargo, después de esta euforia inicial, han crecido las reservas en torno a la energía nuclear, a medida que se estudiaban más profundamente las cuestiones relacionadas con la seguridad nuclear y la proliferación de armamento.

El golpe definitivo parece haberlo asestado el trágico accidente de Chernobyl, localidad de la antigua URSS, a unos 130 kilómetros al norte de Kiev, en Ucrania. Tuvo lugar, la desgraciada noche del 25 al 26 de abril de 1986, pasadas la una y treinta de la madrugada. Como resultado del mismo han fallecido ya cerca de doscientas mil personas y existen unos siete millones de afectados, sin contar con los niños con graves malformaciones genéticas que todavía pueden nacer.

Alumno: ¿Cómo sucedió esa catástrofe?

Profesor: Por lo que sabemos, uno de los cuatro reactores de la central de Chernobyl, a unos 130 km al norte de Kiev en Ucrania, hizo explosión la citada noche, si bien se mantuvo en secreto un par de días hasta que se enteró la comunidad internacional. El informe soviético, pues aún no se había producido la división política en los estados que hoy conocemos, señaló que un fallo humano, por realizar pruebas no autorizadas, permitió un excesivo aumento de la temperatura del reactor por encima de 1500 °C, de manera que entró en ignición y causó explosión. De inmediato, se liberó a los alrededores una inquietante nube radiactiva, que se dirigió hacia el oeste, extendiéndose por la Península Escandinava y el norte de Europa. En los días subsiguientes a la explosión fueron evacuadas más de 135000 personas en un radio de 1600 km.

Es obvio que la reacción de asociaciones ecologistas o humanitarias, como Greenpeace, pusieron el grito en el cielo y atacaron duramente a los países con instalaciones nucleares y a la política de construcción de este tipo de centrales.

Alumno: ¿Ha sido el de Chernobyl el único accidente nuclear?

Profesor: Por supuesto que no, aunque su magnitud ha superado con mucho cualquier otra incidencia anterior o posterior al mismo. Recuerdo, en 1979, el accidente de la central de Three Miles Island, cerca de la localidad de Harrisburg en Pennsylvania (Estados Unidos), en el que una válvula defectuosa ocasionó una pérdida de refrigerante.

El sistema automático de seguridad desconectó el reactor y comenzó a enfriarlo. Pero, por un error humano, se apagó el sistema de refrigeración de emergencia y se produjeron graves daños en el núcleo del reactor, liberándose algunos productos de fisión de la vasija del reactor. Afortunadamente el edificio de contención evitó que el gas radiactivo saliera al exterior, de modo que los niveles de exposición de las personas de las cercanías apenas aumentaron.

En cualquier caso, los daños materiales se cifraron en más de mil millones de dólares y la tensión psicológica a la que se vio sometida la población, especialmente los trabajadores y los vecinos que vivían próximos a la central nuclear, llegó a ser muy grave en algunos casos.

Alumno: ¿Y en España?

Profesor: También hemos sufrido algún contratiempo. En todo caso ni siquiera han sido comparables al de Harrisburg. Quizás el suceso más grave tuvo lugar en la central de Vandellós en Tarragona, el 19 de Octubre de 1989. Allí se produjo un incendio en un edificio de las instalaciones de la central que ocasionó graves fallos de sistemas, aunque se pudo parar el reactor sin mayores consecuencias.

Por estas razones, a las que se añade la amenaza de la proliferación de las armas nucleares, en todos los países del mundo existen grupos opuestos a la energía nuclear y las normas estatales se han hecho complejas y estrictas hasta el punto de que muchos países han limitado, e incluso cancelado, su programa de expansión de la energía nuclear.

Por ejemplo, en Estados Unidos se produjo la entrada en vigor de leyes que exigían a la Comisión de Regulación Nuclear que adoptara normas mucho más estrictas para el diseño y la construcción de centrales nucleares, y obligaban a las compañías eléctricas a ayudar a las distintas administraciones a preparar planes de emergencia para proteger a la población en caso de otro eventual accidente semejante. Las cargas financieras impuestas por estas exigencias han hecho tan difícil la construcción y el funcionamiento de nuevas centrales nucleares que las compañías eléctricas de algunos estados se han visto obligadas a abandonar centrales en construcción.

Alumno: No estoy seguro de que el temor a la contaminación radiactiva tenga verdadero fundamento. En concreto, ¿cómo se organiza la seguridad de un reactor nuclear?

Profesor: Es un tema al que se ha dedicado una enorme atención, por razones obvias. En un reactor en funcionamiento, la mayor fuente de radiactividad, con diferencia, son los elementos de combustible, de los cuales el medio ambiente se protege mediante una serie de *barreras y sistemas de seguridad*.

Alumno: ¿Barreras?

Profesor. Así las denominamos. Los tubos resistentes a la corrosión, que contienen el combustible, constituyen la *primera* barrera. Las gruesas paredes de acero del sistema de refrigeración primario del reactor forman una *segunda* barrera, ayudado por la propia agua de refrigeración que absorbe parte de los isótopos biológicamente importantes, como el yodo. Finalmente, el edificio de acero y hormigón supone una *tercera* barrera.

Durante el funcionamiento de una central, las principales preocupaciones se localizan en la liberación de productos radiactivos, causada por accidentes en los que se ve afectado el combustible y fallan los dispositivos de seguridad.

El principal peligro para la integridad del combustible es un accidente con pérdida de refrigerante, en el que el combustible resulta dañado o incluso se funde. Los productos de fisión pasan al refrigerante, y si se rompe el sistema de refrigeración, penetran en el edificio del reactor. Por lo tanto, el diseño de los reactores incluye sistemas de control que emplean una compleja instrumentación para vigilar constantemente su situación y su seguridad, y que sirven para desconectar el reactor en circunstancias anómalas.

Por ejemplo, en los del tipo RAP se incluyen sistemas de seguridad de refuerzo que inyectan boro en el refrigerante para absorber neutrones y detener la reacción en cadena, con lo que la desconexión está aún más garantizada.

En los reactores de agua ligera, el refrigerante está sometido a una presión elevada y en caso de que se produjese una rotura importante en una tubería, gran parte del refrigerante se convertiría en vapor, y el núcleo dejaría de estar refrigerado. Para evitar una pérdida total de refrigeración del núcleo, dichos reactores están dotados con sistemas de emergencia, que empiezan a funcionar automáticamente en cuanto se pierde presión en el circuito primario de refrigeración. Por otro lado, si tiene lugar una fuga de vapor desde una tubería rota del circuito primario de refrigeración hacia el edificio de contención, se ponen en marcha refrigeradores por aspersión para condensar el vapor y evitar un peligroso aumento de la presión en el edificio.

Alumno: ¿Y los residuos nucleares, ofrecen realmente peligro?

Profesor: Está muy claro que el paso final en cualquiera de los ciclos del combustible nuclear es el almacenamiento a largo plazo de los residuos, altamente radiactivos, que continúan presentando peligro para los seres vivos durante miles de años.

Los elementos de combustible pueden conservarse en depósitos blindados y vigilados hasta que se tome una decisión definitiva sobre su destino, o pueden ser transformados en compuestos estables, fijados en material cerámico o vidrio, encapsulados en bidones de acero inoxidable y enterrados a gran profundidad en formaciones geológicas muy estables.

Por ejemplo, en 1988, el gobierno de Estados Unidos eligió un lugar en el desierto de Nevada, con una gruesa sección de rocas volcánicas porosas, como el primer depósito subterráneo permanente de residuos nucleares del país. En España, contamos con un almacén de residuos nucleares en la

localidad de El Cabril, provincia de Córdoba, que nos ofrece una total garantía.

Alumno: De todos modos siempre sobrevuela sobre nosotros el peligro nuclear.

Profesor: Por eso es de vital importancia el desarrollo de la tecnología de la fusión nuclear, el otro tipo de reacciones nucleares que nos puede servir como una excepcional fuente de energía. Yo creo que es el reto de la civilización del siglo XXI.

7.4. La fusión nuclear

Alumno: ¿En qué consiste la fusión nuclear?

Profesor: Recuerda que al hablar sobre la liberación de energía nuclear cabe la posibilidad de jugar con los átomos pequeños, en la zona de bajas energías de enlace, a través de la fusión de dos núcleos ligeros en uno más pesado.

Ya en 1938, los físicos alemanes Weizsacker y Bethe explicaron que la energía irradiada por el Sol se debe a reacciones de fusión de esta clase, que se producen en su interior a gran profundidad. A las enormes presiones y temperaturas que existen allí, los núcleos de hidrógeno se combinan mediante una serie de reacciones que equivalen a la ecuación global señalada seguidamente y producen casi toda la energía liberada por el Sol. En estrellas más masivas que el Sol, otras reacciones similares llevan al mismo resultado.



Dicha reacción fue comprobada experimentalmente y denominada *fusión nuclear*, ya que consiste en la unión de dos núcleos ligeros para producir uno más complejo. La energía obtenida, procedente de la pérdida de masa, por átomo de helio formado, es de unos 27 MeV. En el caso del Sol, por ejemplo, la conversión en helio de un gramo de su masa produce una energía de unos 55000 kilowatios-hora.

Alumno: Comparativamente, se libera más energía incluso que en la fisión. ¿Se ha conseguido ya la fusión nuclear *experimental*?

Profesor: La fusión nuclear artificial se consiguió por primera vez a principios de los años 30, bombardeando un blanco que contenía deuterio con deuterones, es decir, núcleos de deuterio, de alta energía mediante un ciclotrón. Así se logró formar helio. Sin embargo, para acelerar el haz de deuterones se necesitaba una gran cantidad de energía, superior a la liberada en el proceso de fusión. La mayor parte de ella aparecía como calor *no aprovechable* en el blanco y, en definitiva, no se produjo una energía útil neta.

Alumno: Yo tenía la idea de que la fusión nuclear era mucho más reciente.

Profesor: Prácticamente, podemos considerarla de la misma antigüedad que la fisión. Lo que sucede es que las exigencias tecnológicas de ésta han sido muy inferiores y se logró dominar antes el proceso.

Alumno: En el empleo bélico de estas reacciones no se requiere su control y es de suponer que será más fácil conseguirlas.

Profesor: Es cierto. En la década de 1950 tuvo lugar la primera liberación a gran escala de energía de fusión, aunque incontrolada, en las pruebas de armas termonucleares realizadas por Estados Unidos, la URSS, Gran Bretaña y Francia. No obstante, una liberación tan breve e incontrolada no puede emplearse para la producción de energía eléctrica.

Alumno: ¿Cuál es el *principal obstáculo* que presenta la fusión nuclear?

Profesor: En las reacciones de fisión estudiadas anteriormente, el neutrón, que no tiene carga eléctrica, puede acercarse fácilmente a un núcleo fisionable, por ejemplo, uranio-235 y reaccionar con él. En una reacción de fusión típica, en cambio, cada uno de los dos núcleos que reaccionan tiene una carga eléctrica positiva y, antes de que puedan unirse, hay que superar la repulsión eléctrica que ejercen entre sí. Dicho en términos cinéticos, la reacción de fusión nuclear posee una gran energía de activación, que es imprescindible superar. Esto ocurre cuando la temperatura del gas es suficientemente alta, entre cincuenta y cien millones de grados.

Así pues, en un gas formado por los isótopos pesados del hidrógeno, deuterio y tritio, a esa temperatura se produce la reacción de fusión:



que libera unos 17,6 MeV por cada fusión. La energía aparece en un primer momento como *energía cinética* del núcleo de helio 4 y el neutrón, pero pronto se convierte en calor en el gas y los materiales próximos.

Si la densidad del gas es suficiente, y a esas temperaturas basta una presión de sólo 10^{-5} atm, o sea, casi un vacío prácticamente, el núcleo de helio-4 puede transferir su energía al gas hidrógeno circundante, con lo que mantiene la temperatura elevada y permite que se produzca una reacción de fusión en cadena. En esas condiciones se dice que se ha producido la *ignición nuclear*.

Alumno: Concretamente, ¿dónde reside la dificultad?

Profesor: Los problemas básicos para alcanzar las condiciones para la fusión nuclear útil son dos, *calentar* el gas a temperaturas muy altas y *confinar* una cantidad suficiente de núcleos durante un tiempo lo bastante largo para permitir la liberación de una energía mayor que la necesaria para calentar y confinar el gas, o, en otras palabras, para que se produzca la fusión en cadena. Un tercer problema importante que surge después es la *captura* de esta energía y su conversión en electricidad.

Alumno: ¿Por qué es tan difícil confinar el gas?

Profesor: A temperaturas superiores a los 100.000 °C, todos los átomos de hidrógeno están *ionizados*. El gas está formado por un conjunto eléctricamente neutro de núcleos con carga positiva y electrones libres con carga negativa. Este estado de la materia se denomina *plasma*. Los materiales ordinarios no pueden contener un plasma lo suficientemente caliente para que se produzca la fusión. El plasma se enfriaría muy

rápidamente y las paredes del recipiente se destruirían por las altas temperaturas.

Alumno: Entonces, no es posible contener el plasma en recipientes materiales. ¿No existe una alternativa?

Profesor: Puesto que el plasma está formado por núcleos y electrones cargados, que se mueven en espiral alrededor de líneas de campo magnético intensas, podrá contenerse en un *campo magnético* intenso, de la forma apropiada.

Alumno: ¡Solucionado!

Profesor: No es tan sencillo. Como hemos indicado, para que un dispositivo de fusión resulte útil, la energía producida debe ser mayor que la energía necesaria para confinar y calentar el plasma con el campo magnético requerido. Para que esta condición se cumpla, los investigadores afirman que el producto del tiempo de confinamiento y la densidad del plasma debe superar el valor 10^{14} .

Desde 1950 se han llevado a cabo numerosos proyectos en Estados Unidos, la antigua Unión Soviética, Gran Bretaña, Japón y otros países. Se han logrado reacciones termonucleares, pero el producto observado fue pocas veces superior a 10^{12} , unas cien veces inferior que el valor mínimo considerado como aceptable. Sin embargo, uno de los dispositivos, el Tokamak, surgido originalmente en la antigua Unión Soviética, comenzó a arrojar resultados prometedores a principios de la década de 1960.

Alumno: ¿Cómo funciona el Tokamak?

Profesor: La cámara de confinamiento de un Tokamak tiene forma toroidal, es decir, como una cámara de camión tamaño gigante, con un diámetro interior de un metro, aproximadamente, y un diámetro exterior de alrededor de tres. En ella se establece un campo magnético también toroidal de unos 5 teslas mediante grandes electroimanes, cuyas líneas de campo son espirales dentro de la cámara que confina el plasma.

La intensidad de este campo es unas cien mil veces mayor que la del campo magnético de la Tierra en la superficie del planeta, de modo que las bobinas que rodean la cámara inducen en el plasma una corriente longitudinal de varios millones de amperios. Después de que en algunos laboratorios funcionaran con éxito tokamaks pequeños, a principios de la década de los ochenta se construyeron dos dispositivos de gran tamaño, uno en la Universidad de Princeton, en Estados Unidos, y otro en la antigua URSS, que intentan aumentar, por otros procedimientos, un poco más la temperatura que alcanza el plasma gracias al calentamiento producido por la inmensa corriente toroidal.

Otra posible vía para obtener energía de la fusión es el confinamiento inercial. En esta técnica, el combustible, integrado por los isótopos pesados del hidrógeno, tritio o deuterio, está contenido en una pequeña bolita que se bombardea desde distintas direcciones con un haz láser de pulsos. Esto provoca la implosión de la bolita, lográndose una temperatura tal que se desencadena una reacción termonuclear que causa la ignición del combustible.

Alumno: ¿Qué es el láser?

Profesor: La palabra LASER está formada por las siglas en inglés de "Luz amplificada por emisión estimulada de radiación". Básicamente es una radiación monocromática, es decir, de una longitud de onda determinada, muy intensa y que permite concentrar mucha energía en un punto dado. Por eso se puede pensar en su utilización para alcanzar la energía de activación necesaria para la reacción de fusión.

Alumno: Observo que todavía queda camino por recorrer en este aspecto.

Profesor: Los avances en la investigación de la fusión son prometedores, pero probablemente harán falta décadas para desarrollar sistemas prácticos que produzcan más energía de la que consumen. Además, las investigaciones son sumamente costosas. Sin embargo, a principios de los años noventa, se realizaron algunos progresos.

De este modo, en 1991, se generó por primera vez en la historia una potencia significativa, alrededor de unos 1,7 MW (megavatios) a partir de la fusión nuclear controlada, en el laboratorio de la Cámara Toroidal Conjunta Europea (JET), en Gran Bretaña. En 1993, los investigadores de la Universidad de Princeton emplearon el Reactor Experimental de Fusión Tokamak para producir una reacción de fusión controlada que generó 5,6 MW. No obstante, tanto el JET como el Reactor Experimental de Fusión Tokamak consumieron más energía de la que produjeron durante su funcionamiento.

Alumno: ¿Merece la pena invertir tanto tiempo y dinero en la fusión?

Profesor: Si la energía de fusión llega a ser practicable, ofrecería diversas ventajas. En primer lugar tiene a su disposición una fuente ilimitada de combustible, ya que sería el deuterio procedente de los océanos. En segundo lugar, descartamos la posibilidad de un accidente en el reactor, ya que la cantidad de combustible en el sistema es muy pequeña, y lo más importante desde el punto de vista ecológico, sus residuos son mucho menos radiactivos y más sencillos de manejar que los procedentes de sistemas de fisión.

Si a todo ello unimos que la energía que se puede obtener es *más de tres veces mayor* que la de la fisión, resulta obvio el interés práctico que tiene el dominar esta fuente de energía para la sociedad tan industrializada en que vivimos.

7.5. Cuestiones

Si no se conocen las respuestas a las siguientes cuestiones es aconsejable una nueva lectura de este capítulo.

- ¿Por qué fue tan importante el proyecto Manhattan?
- ¿Cómo tiene lugar la fisión nuclear y por qué es tan rentable?
- ¿Cuál fue el primer isótopo fisionable?
- ¿Para qué sirve el factor de multiplicación k de una reacción nuclear?
- Enumere los principales componentes de un reactor nuclear y describa la misión de cada uno.

-
- ¿Por qué es tan útil el reactor autorregenerativo? ¿Cómo se produce la ganancia de combustible?
 - ¿Qué tratamientos reciben los residuos de un reactor nuclear?
 - Haciendo una retrospectiva histórica, ¿Cuáles han sido los mayores accidentes en las centrales nucleares? ¿Cómo se produjeron?
 - Describa las barreras de protección y los sistemas de seguridad de las centrales nucleares.
 - ¿En qué consiste la fusión nuclear y cuáles son los mayores obstáculos que presenta?
 - ¿Qué ventajas posee la fusión nuclear frente a la fisión?

8. LAS FUERZAS FUNDAMENTALES

Alumno: ¿Qué entendemos por fuerzas fundamentales?

Profesor: Denominamos fuerzas fundamentales a aquellas fuerzas de la naturaleza que no se pueden explicar en función de otras más básicas y que rigen los procesos en el mundo subatómico. Las fuerzas o interacciones fundamentales conocidas hasta ahora son cuatro: *gravitatoria*, *electromagnética*, *nuclear fuerte* y *nuclear débil*. Las dos primeras se conocen desde hace mucho tiempo, sin embargo, las nucleares son de reciente descubrimiento, hace apenas un siglo.

Alumno: Puesto que son fuerzas que afectan a las partículas elementales, su estudio también necesitará de los *aceleradores* de alta energía.

Profesor: Por supuesto. El disponer de proyectiles de enormes energías nos permite profundizar en la estructura de los núcleos atómicos e ir descubriendo multitud de nuevas partículas, al mismo tiempo que observamos los diversos tipos de interacciones existentes entre ellas.

Alumno: En resumen, que el estudio de las fuerzas y de las partículas fundamentales se hace de manera conjunta.

Profesor: Así es en la práctica, aunque nosotros lo tratemos por separado para facilitar su comprensión. Todo se integra en el modelo estándar, que intenta explicar la constitución de la materia y las fuerzas fundamentales.

Alumno: De las cuatro fuerzas, ya conozco dos de ellas, la gravitatoria y la electromagnética.

8.1. Interacción gravitatoria

Profesor: La interacción gravitatoria es la fuerza de atracción que una porción de materia ejerce sobre otra, y afecta a todos los cuerpos. Su intensidad es mínima entre las partículas que intervienen en los procesos atómicos, pero es importante a gran escala porque su alcance es infinito, aunque decrece de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, según la ley de Newton.

Alumno: Si es tan débil, carecerá de importancia.

Profesor: Su importancia reside en que siempre es atractiva y, por tanto, se *acumula*, aumentando con el número de partículas en juego. De este modo, la gravitación es la *fuerza preponderante* a escala macroscópica, a pesar de que se trata de la más débil de todas las interacciones. Es la responsable de la atracción universal entre los cuerpos, de la cohesión de los astros (planetas, estrellas, satélites...) y regula sus movimientos.

En 1915, Einstein, tras formular su teoría especial de la relatividad, sugirió que la gravedad no era una fuerza como las otras, sino una consecuencia de la deformación del espacio-tiempo por la presencia de masa (o energía, que es lo mismo), formulando su teoría general de la relatividad. Entonces, cuerpos como la Tierra no se mueven en órbitas cerradas porque haya una fuerza llamada gravedad, sino que describen trayectorias parecidas a líneas rectas, pero en un espacio-tiempo que se encuentra deformado por la presencia del Sol.

Alumno: No cabe duda de que, en su época, la interpretación de Einstein era innovadora.

Profesor: Con todo, Einstein propone una teoría de campo clásica, en el sentido de que no introduce los conceptos cuánticos que describen el mundo microscópico. Los intentos realizados por cuantizar la interacción gravitatoria, igual que las demás interacciones, y de los que pronto hablaremos, implican la existencia de una partícula especial, el gravitón, de masa nula y número cuántico de espín 2, que no ha podido ser detectada aún.

8.2. Interacción electromagnética

Profesor: La fuerza electromagnética afecta exclusivamente a los cuerpos con carga eléctrica y es la responsable de las transformaciones físicas y químicas de átomos y moléculas, donde une a los electrones y los núcleos. Es mucho más intensa que la fuerza gravitatoria y su alcance es también infinito. Sin embargo, no es acumulativa como la gravitación. Ahora, según el tipo de cargas presentes, las interacciones electromagnéticas son atractivas o repulsivas, de manera que la neutralidad eléctrica de la materia anula sus efectos a larga distancia.

A raíz del triunfo de la teoría general de la gravitación de Newton, el francés Coulomb la adaptó para explicar las fuerzas de atracción y repulsión experimentadas por los objetos cargados eléctricamente, demostrando que ésta era directamente proporcional al producto de las cargas eléctricas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia. Mostró, también, que las cargas de igual signo se atraen y las de distinto signo se repelen, y que los cuerpos imanados también sufrían una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

Experimentos posteriores realizados por el danés Oersted, el francés Ampère y el británico Faraday revelaron que los fenómenos eléctricos y magnéticos estaban relacionados.

Alumno: Fue cuando se descubrió la existencia del campo electromagnético, es decir que los fenómenos eléctricos y magnéticos poseen un *origen común*, las cargas eléctricas, ya estén en reposo o en movimiento.

Profesor: El estudio del campo electromagnético fue sistematizado por el físico escocés J. C. Maxwell en su teoría electromagnética, en la que predijo que la transmisión de los campos eléctrico y magnético, perpendiculares entre sí, se realizaba ondulatoriamente a la velocidad de la luz. En el orden macroscópico, la teoría de Maxwell constituye un modelo de economía al unificar el tratamiento de los fenómenos eléctricos y magnéticos.

Ahora bien, cuando se aplica a las dimensiones atómicas la teoría del electromagnetismo se denomina electrodinámica cuántica, cuyos fundamentos se deben a Bethe, Tomonaga, Schwinger y Feynman, principalmente, en la cual se lleva a cabo una corrección cuántica de las ecuaciones de Maxwell. De esto ya hablaremos más adelante.

8.3. Interacciones nucleares

Alumno: ¿Cómo surge el conocimiento de las fuerzas nucleares?

Profesor: Hasta hace sólo poco más de medio siglo nos bastaba suponer válida la ley de Coulomb para el estudio del átomo. Este escaso conocimiento permitió descubrir la existencia de un núcleo cargado positivamente y una corteza electrónica externa, con carga opuesta. La atracción entre el núcleo y los electrones se puede explicar por medio de la interacción electromagnética.

Sin embargo, el descubrimiento de la *radiactividad* y, concretamente, el de las desintegraciones de tipo beta, han llevado a pensar que ciertos átomos tienen un exceso de neutrones, algunos de los cuales se desintegran. Cada neutrón que desaparece se convierte en un protón, un electrón y un neutrino a través de un proceso regido por la interacción nuclear débil o de Fermi, que sólo se manifiesta a distancias de 10^{-17} ó 10^{-18} metros, la fuerza de menor alcance.

Alumno: ¿En qué consiste la emisión de neutrinos?

Profesor: Fue propuesta por primera vez en 1929 por Wolfgang Pauli. Postuló que, junto a los tres tipos de radiaciones conocidos, alfa, beta y gamma, debían emitirse otras partículas a las que llamó *neutrinos* y *antineutrinos*, sin carga eléctrica y cuya masa o bien era muy pequeña o bien era nula, como en el caso del fotón. En la emisión beta, un neutrón se convierte en un protón, una situación no prevista ni en Física Clásica ni en Física cuántica y que tanto desconcertó a los físicos de partículas, y se crean un electrón y un antineutrino.

En resumidas cuentas, la fuerza nuclear débil es la responsable de la desintegración beta de los neutrones y otros procesos similares. Recibe este nombre porque su intensidad es 10^{14} veces inferior que las interacciones fuertes.

Alumno: ¿Cuándo se vieron confirmadas las predicciones de Pauli?

Profesor: En el momento en que fueron descubiertos los neutrinos por Frederick Reines y Clyde Cowan, en Los Álamos, en el año 1956.

El neutrino es el mejor ejemplo de las interacciones débiles. Aunque tiene una sección eficaz extremadamente baja y como consecuencia de ello muy poca interacción con la materia, es muy importante en astrofísica, pues los procesos termonucleares de las estrellas implican una producción masiva de neutrinos. Esto ha posibilitado su estudio, pues la escasa interacción se ve suplida por el gran número que se genera de ellos.

Experimentalmente, se ha demostrado que los neutrinos producidos en reacciones en las que interviene el electrón son distintos de los asociados a las otras partículas sometidas sólo a las interacciones débiles y no existe evidencia de que puedan ocurrir transiciones entre tipos distintos.

Alumno: Ya que nos referimos a las fuerzas nucleares, existe un hecho que me parece raro. En un núcleo atómico hallamos un buen número de protones reunidos en un espacio muy reducido, lo que hace pensar en una repulsión eléctrica muy elevada. No es posible entender muy bien la estabilidad de un átomo bajo este punto de vista.

Profesor: Para explicar la estabilidad de los núcleos, que contienen protones a una distancia increíblemente pequeña, Rutherford postuló la existencia de la interacción nuclear fuerte, una fuerza atractiva de corto alcance, unos 10^{-15} m, es decir, muy intensa para distancias del orden de los diámetros nucleares, capaz de vencer la repulsión electrostática entre los protones.

Podemos afirmar que la fuerza o interacción nuclear fuerte es la que mantiene unidos los *componentes* de los *núcleos* atómicos y actúa indistintamente entre dos nucleones cualesquiera, protones o neutrones.

Alumno: Comparando todas las interacciones ¿cómo son sus intensidades relativas?

Profesor: La menor de todas sin duda es la interacción gravitatoria. Si a ésta la asignamos una intensidad de 1, la fuerza nuclear débil sería de 10^{17} , considerablemente mayor, seguida por la electromagnética, en torno a 10^{30} y la de mayor intensidad, la interacción nuclear fuerte, con 10^{32} .

Alumno: Teniendo en cuenta el especial carácter de las fuerzas nucleares al compararlas con las dos interacciones clásicas, me imagino que su formulación no será similar a las ecuaciones de Newton y de Coulomb, sino que irá por otros derroteros.

Profesor: Evidentemente. La descripción que actualmente se utiliza de la fuerza débil se realiza de manera unificada con la electromagnética en la denominada interacción electrodébil. Sus autores, Sheldon L. Glashow, Abdus Salam y Steven Weinberg, recibieron el Premio Nobel de Física 1979 por su trabajo.

La teoría actual de la interacción fuerte, debida principalmente a Yang y Mills, fue completada a mitad de los años 70 y se llama cromodinámica cuántica, desarrollada por analogía con la electrodinámica de Feynman y colaboradores. Ya tendremos ocasión de detenernos en ella con más detalle.

8.4. Partículas virtuales

Alumno: Cuando hablamos del Principio de Incertidumbre quedó claro que una de sus aplicaciones más exitosas fue la del concepto de *partícula virtual*, que a su vez se utilizó para explicar las interacciones fundamentales. ¿Estoy en lo cierto?

Profesor: Efectivamente. Ya hemos comentado que la *relación de incertidumbre* puede extenderse a otras variables conjugadas además de la posición y la cantidad de movimiento. Por ejemplo, el producto de la *energía* y el *tiempo* también posee las unidades de la constante de Planck. Si designamos por ΔE la incertidumbre en nuestro conocimiento de la energía de una partícula y por Δt la incertidumbre respecto al tiempo en el que la energía adquiere un cierto valor, recordemos que también se cumplirá la relación de incertidumbre:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

Para comprender esta relación pensemos en lo que implica el proceso de medición de la energía de una partícula. La observación requerirá

obviamente algún tipo de sonda que empleará un tiempo en la realización de la medida durante el cual la sonda interactúa con la partícula. Podemos definir ese tiempo como la incertidumbre Δt . La incertidumbre ΔE representa nuestra capacidad de obtener información sobre la energía de la partícula en una escala de tiempo menor a Δt . En este sentido, la relación de incertidumbre tiempo-energía da lugar a un concepto muy interesante de la Física actual, el concepto de partícula virtual.

Así, si sustituimos en la expresión de Heisenberg el valor de la energía por su equivalencia relativista con la masa ($\Delta E = \Delta m c^2$) y despejamos ésta, obtenemos:

$$\Delta m \geq \frac{h}{c^2 \Delta t}$$

Vemos que si Δt es lo suficientemente pequeño, es posible que la indeterminación en el valor de la masa sea lo bastante grande para que durante ese tiempo no podamos conocer si en un punto del espacio hay una partícula de masa m o un conjunto de partículas de masa $m + \Delta m$.

Dicho de otro modo, podríamos tener una sucesión de hechos en donde una partícula se convierte por un instante en una pareja de partículas y luego vuelve a ser una sola. Decimos que la partícula original "fluctúa" entre dos partículas y llamamos al objeto adicional partícula virtual (Figura 22).

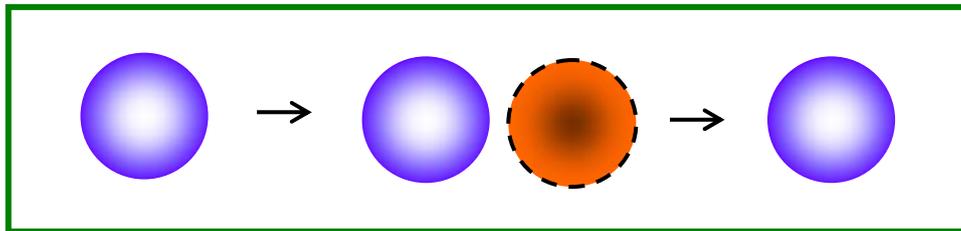


Figura 22. Una partícula (izquierda) fluctúa entre sí misma y una partícula virtual (centro) y otra vez vuelve a convertirse en sí misma.

La primera aplicación del concepto de partícula virtual vino como explicación de la interacción fuerte, sugerida por el japonés Yukawa. Si tenemos dos partículas a una distancia d lo suficientemente pequeña como para que pueda ser recorrida por una partícula virtual en el tiempo que dura su "fluctuación", puede acabar siendo absorbida por la segunda partícula antes de desaparecer (Figura 23).

Esto se conoce como intercambio de una partícula virtual y de nuevo el Principio de Incertidumbre nos dice que estos procesos pueden darse sin que seamos capaces de detectar ninguna violación del principio de conservación de la energía.

Yukawa demostró matemáticamente que si la masa de las partículas virtuales tuvieran aproximadamente $1/9$ de la masa del protón, el resultado neto del intercambio sería una fuerza lo bastante elevada como para superar la repulsión electromagnética entre dos protones y conservarlos unidos. Es decir, el *intercambio* de la partícula virtual produciría la enorme fuerza necesaria para mantener la cohesión del núcleo.

Posteriormente, los cálculos de Yukawa sobre la masa necesaria fueron confirmados por el descubrimiento de los mesones. De este modo, ahora se piensa que todas las interacciones fundamentales son debidas, en última instancia, al intercambio de partículas virtuales.

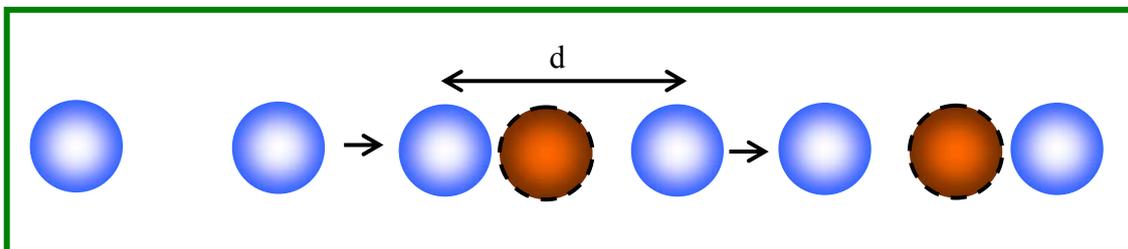


Figura 23.- Dos partículas pueden intercambiar una partícula virtual sin violar la conservación de la energía.

Alumno: Pero si son virtuales ¿cómo se pueden detectar?

Profesor: No todas las que se han propuesto se han podido observar, pero sí muchas de ellas, como los fotones de la interacción electromagnética, los gluones de la interacción fuerte y las partículas, designadas por W^+ , W^- y Z , mediadoras de las interacciones nucleares débiles en los experimentos.

Todos los intentos de hallar una explicación para las interacciones débiles, como los estudios llevados a cabo por Pauli y su continuador Fermi, conducían a resultados absurdos si se tenían en cuenta los efectos relativistas. No obstante, en 1961 se alcanzó la dirección correcta gracias a los estudios de Glashow. Supuso que las interacciones débiles eran transmitidas por unas partículas de elevada masa y de "vida muy corta", de ahí las dificultades de su detección, que finalmente fueron encontradas en el laboratorio europeo CERN, a principios de los años ochenta.

Alumno: Según ello, a cada tipo de interacción se asocia una partícula de intercambio característica.

Profesor: Así es. Cada interacción tiene una intensidad y un alcance concreto que la distingue de las otras, como ya hemos comentado con anterioridad. Por ejemplo, sabes que las fuerzas electromagnéticas y gravitatorias tienen un alcance infinito, mientras que las otras dos se reducen al ámbito nuclear. Pues bien, cuando el alcance es infinito, los cálculos exigen que la partícula virtual de intercambio, también llamada *bosón*, tenga masa nula. Esto es lo que le sucede al fotón y al hipotético gravitón. Mientras menor sea el alcance, mayor es la masa requerida para el bosón de la interacción. Por eso, los bosones mayores corresponden a las fuerzas débiles, las de menor alcance.

Alumno: No tengo muy clara la razón de esas exigencias de masa.

Profesor: Un símil te puede ayudar. Si dos personas se intercambian un objeto pesado serán capaces de hacerlo a mucha distancia conforme el objeto disminuya su peso. Si se intercambian un objeto grande, pongamos por caso un saco de cemento, han de estar muy cerca una de otra. Por el

contrario, si el objeto es pequeño, como una canica, se la podrán pasar una a otra aun cuando estén alejadas.

Alumno: ¿Cuál es la partícula de intercambio o bosón de la interacción nuclear fuerte?

Profesor: Igual que la fuerza débil, la interacción nuclear fuerte se explica por el intercambio de unas partículas específicas, denominadas en este caso *gluones*, que responden a una propiedad cuántica llamada *color*. Es decir, el gluón es el cuanto del campo color, igual que el fotón es el cuanto de radiación electromagnética.

Basándose en las analogías existentes entre la teoría de la interacción fuerte y la electrodinámica cuántica, se construye la llamada cromodinámica cuántica, una generalización de las anteriores. Esta teoría es análoga a la electrodinámica, aunque difiere al presentar ocho distintos gluones en vez de un solo fotón. Además, estos gluones, al ser partículas que tienen color, pueden interactuar entre sí, mientras que los fotones, sin carga eléctrica, no pueden.

El nombre de cromodinámica aparece por buscar una cierta similitud con la teoría cromática, pues, al contrario que la carga eléctrica, que únicamente puede darse en dos variedades, positiva y negativa, la carga color puede darse en seis: tres principales, llamadas rojo, azul y verde, y tres complementarias que poseen las antipartículas, y que se suelen llamar antirrojo, antiazul y antiverde.

8.5. Interpretación de las fuerzas fundamentales

Alumno: Por consiguiente y dejando a un lado las particularidades matemáticas que detallan y describen las diferencias entre cada tipo de interacción y que justifican una teoría distinta para representar cada una de ellas, es muy evidente que todas se pueden explicar bajo un marco común. Así, dos partículas materiales, con mayor o menor estabilidad según el caso, interactúan mediante el intercambio de una partícula virtual, de existencia efímera. ¿Es correcta esta simplificación?

Profesor: Perfectamente. Como hemos dicho, las *diferencias* en la magnitud de las respectivas intensidades de cada tipo de fuerza se explican de acuerdo con la *masa* de la partícula de intercambio y la *constante de acoplamiento*. Richard Feynman ideó un sencillo diagrama para representar la interacción de cualquier tipo entre dos partículas, donde los estados iniciales y finales de ambas se dibujan unidos por la partícula de intercambio (Figura 24).

Alumno: ¿Qué representa la constante de acoplamiento en las interacciones?

Profesor: La constante de acoplamiento es un número adimensional que mide la eficacia relativa de la interacción y es tanto mayor cuanto más intensa sea la fuerza. Para la gravitación, el valor de dicha constante es del orden de 10^{-38} , mucho menor que las del resto de interacciones fundamentales, por eso las fuerzas gravitatorias son prácticamente despreciables respecto a las energías que entran en juego en la física de partículas. El supuesto gravitón, mediador de la interacción gravitatoria, ha

de tener necesariamente una masa nula, igual que el fotón, mediador de la fuerza electromagnética, ya que sus alcances son infinitos. No obstante, la constante de acoplamiento para esta última fuerza es $1/137$, mucho mayor que la gravitatoria.

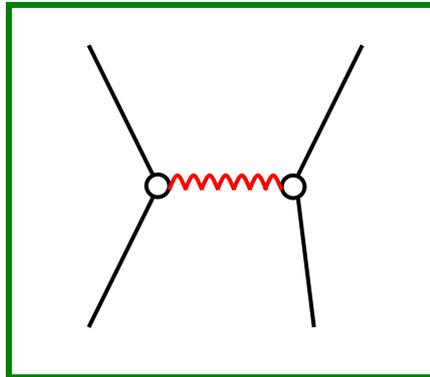


Figura 24.- Representación del proceso teórico de las cuatro interacciones.

Alumno: Volviendo al diagrama anterior, ¿cómo será para cada interacción?

Profesor: Si queremos representar los cuatro tipos de fuerzas obtendremos los diagramas de Feynman de la Figura 25. En el esquema, e representa al electrón, p al protón, n al neutrón, M es una partícula cualquiera de masa M y q es alguno de los componentes de los protones o de los neutrones.

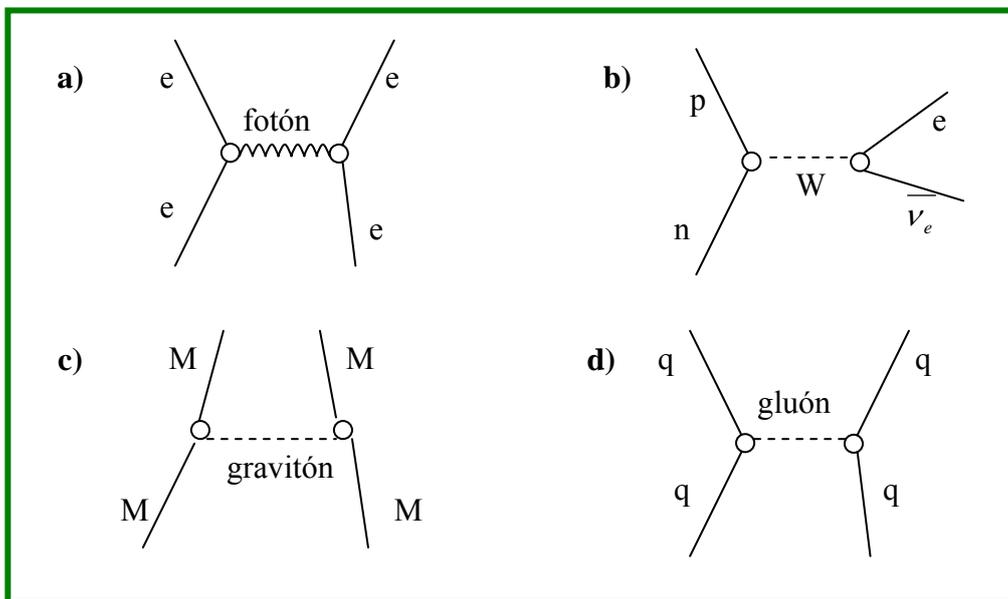


Figura 25.- Diagramas de Feynman para las interacciones: a) Electromagnética. b) Débil. c) Gravitatoria. d) Fuerte.

Todo lo que sucede en el Universo es debido a la actuación de una o varias de estas fuerzas que se transmiten gracias al intercambio de un tipo distinto de partícula, de modo que así se diferencian unas de otras. Estas partículas de intercambio o intermediarias son bosones, es decir, tienen

espín entero o nulo y obedecen a la estadística de Bose-Einstein, mientras que las partículas origen de la interacción son fermiones, esto es, partículas de materia que cumplen la estadística de Fermi-Dirac, con espín semientero.

Alumno: No es muy clara la diferencia entre bosones y fermiones.

Profesor: Son necesarias dos formulaciones de la mecánica estadística para describir el comportamiento de las partículas cuánticas porque los fermiones y los bosones tienen propiedades significativamente distintas.

Los fermiones cumplen el principio de exclusión de Pauli, que afirma que dos fermiones no pueden encontrarse en el mismo estado cuántico. Esto se traduce, como sabemos, en que los números cuánticos que se asocian a sus estados energéticos no pueden ser todos iguales, al menos uno debe ser distinto, como el espín, que puede ser positivo o negativo. Entre los fermiones se hallan los electrones, los protones o los núcleos de helio 3, por ejemplo.

En cambio, los bosones no cumplen el principio de exclusión de Pauli. Algunos ejemplos de bosones son los fotones o los núcleos de helio 4. Mientras que en cada momento sólo puede haber un fermión en un estado cuántico determinado, pueden existir múltiples bosones en un único estado. Ello explica la *superfluidez* del helio a bajas temperaturas y el fenómeno láser.

En la actualidad, las investigaciones van algo más lejos y pretenden demostrar que las cuatro fuerzas en realidad son manifestaciones diferentes de un solo tipo básico. Esta idea es compartida al mismo tiempo por la Cosmología, de forma que, en la teoría más aceptada que explica el origen del universo, se propone la existencia de una fuerza única después de la Gran Explosión, que fue dando origen a las cuatro fuerzas conocidas en los primeros instantes del universo.

Alumno: ¿En qué momento tuvo lugar dicha diversificación?

Profesor: Antes de que hubieran transcurrido menos de 10^{-40} segundos, parece ser que ya se había separado la gravitación. Después de la *era inflacionaria*, en torno a 10^{-30} segundos tras la Gran Explosión, tuvo lugar la separación de la interacción nuclear fuerte, continuando unidas todavía la fuerza nuclear débil y la electromagnética, hasta unos 10^{-10} segundos desde el principio. Desde ese instante, todas las interacciones se habían diversificado.

Alumno: Resulta increíble pensar que en menos de un segundo se completó el proceso de separación de las fuerzas.

Profesor: Has exagerado el tiempo. Podemos decir, prácticamente, que la diferenciación entre la fuerza nuclear débil y la electromagnética tuvo lugar en torno a los 10^{-8} segundos después del Big Bang.

Alumno: Por eso, los estudios de la Física de altas energías sirven para hacer un recorrido hacia atrás en el tiempo y quizás, entender qué sucedió en los primeros instantes de su nacimiento. ¿No es así?

Profesor: En efecto. De ahí el interés por alcanzar una *teoría del campo unificado*, siguiendo el camino iniciado en la electrodinámica cuántica, que

permita reunir a las nuevas teorías, de modo que dos o más de las cuatro fuerzas fundamentales aparezcan como si fueran básicamente idénticas. Una aspiración más ambiciosa es la *teoría de la gran unificación*, es decir, el intento de reunir en un único marco teórico las interacciones nucleares y la fuerza electromagnética.

Alumno: ¿No se han abierto líneas de investigación para intentar unificar también la fuerza de gravedad?

Profesor: Sí las hay, aunque son algo más especulativas que las anteriores. Por ejemplo, otra teoría de campo unificado alternativa es la *teoría del todo*, la cual pretende, en efecto, proporcionar una descripción unificada de las cuatro fuerzas fundamentales. En los últimos años, ha ganado muchas opciones para convertirse en una teoría del todo la *teoría de supercuerdas*, aunque, para hablar de todo ello es necesario primero dar un recorrido por el *modelo estándar*, que sirve de punto de partida para los planteamientos actuales.

8.6. Cuestiones

Si no se conocen las respuestas a las siguientes cuestiones es aconsejable una nueva lectura de este capítulo.

- ¿A qué se denominan fuerzas fundamentales?
- ¿Dónde reside la importancia de la gravitación a nivel macroscópico?
- ¿Por qué decimos que los fenómenos eléctricos y magnéticos están relacionados?
- Describa los dos tipos de interacciones nucleares, su ámbito de validez y los fenómenos más conocidos que rigen.
- ¿Cómo podemos justificar el concepto de partícula virtual a la luz del Principio de Incertidumbre? ¿Y las interacciones fundamentales?
- ¿Hallamos algún paralelismo entre el alcance e intensidad de las interacciones y la masa del bosón?
- ¿En qué consisten y qué representan los diagramas de Feynman?
- ¿En qué se distinguen bosones y fermiones?
- ¿Por qué relacionamos la Cosmología con la Física de Partículas?

9. EL MODELO ESTÁNDAR

Alumno: Creo que ya estoy en condiciones de abordar el modelo actual que la Física Moderna propone para explicar la estructura de la materia, el ya mencionado *modelo estándar*.

Profesor: Podemos asegurar que el modelo estándar es la teoría física que resume los conocimientos actuales sobre las *partículas elementales* y las *fuerzas fundamentales* de la naturaleza. Utiliza los supuestos de la *Mecánica Cuántica relativista*, y considera, como ya hemos comentado antes, que la materia está formada por partículas denominadas *fermiones*, mientras que las fuerzas corresponden a la interacción o intercambio de otras partículas llamadas *bosones*.

En este modelo estándar (standard en su denominación original en inglés), los fermiones principales se agrupan en tres familias, cada una de ellas compuesta por determinados quarks y leptones. Así, los quarks se combinan para formar partículas mayores, tales como el protón o el neutrón, mientras que los leptones son simples, como el electrón y su neutrino.

9.1. Quarks

Alumno: Eso quiere decir que en este modelo ya no se consideran elementales ni el protón ni el neutrón, ¿no es cierto?

Profesor: Actualmente hay evidencias incuestionables de que los nucleones no son realmente partículas elementales, sino que se hallan a su vez constituidos por algunas de las seis partículas verdaderamente elementales, denominadas quarks, de carga eléctrica fraccionaria. El concepto de quark fue propuesto independientemente en 1964 por los físicos estadounidenses Murray Gell-Mann y George Zweig, primero como mera construcción matemática para presentar las propiedades de los hadrones (partículas sometidas a las interacciones fuertes) de una forma más sencilla, pasando luego a postularse su posible existencia física.

Alumno: El término quark me resulta gracioso. ¿Tiene algún significado?

Profesor: El nombre de quark le fue sugerido a Gell-Mann por un pasaje bastante oscuro del libro de James Joyce "*Finnegans Wake*" donde puede leerse: "...*Three quarks for muster Mark...*", un juego de palabras. Supuso una ruptura con la tradición de bautizar nuevas partículas y fenómenos con palabras derivadas de raíces griegas. El término que había elegido Zweig para dichos componentes elementales, y que luego no fue utilizado, era el de "aces".

Alumno: A lo mejor sus autores pretendían acercar un poco la Física de Partículas a las personas no especializadas.

Profesor: Es muy posible que ellos pretendieran quitarle ese halo de misterio que tradicionalmente ha rodeado al mundo invisible de lo atómico. No sólo con la palabra quark, sino con muchos términos que hoy día son de uso común entre expertos y que facilitan, en cierta manera, su comprensión a los que se inician en estos temas cuando se refieren a las partículas y sus propiedades. No sé si la idea fue ésta, pero al menos resulta divertido.

Alumno: ¿Cuántos quarks existen?

Profesor: Al principio se pensó que existían tres tipos de quark: up (u), down (d) y strange (s), arriba, abajo y extraño, en nuestro idioma. Se cree que el protón está formado por dos quarks u y un quark d y el neutrón por un quark u y dos del tipo d, los cuales se mantienen unidos por otro tipo de partículas elementales, sin masa, llamadas gluones, responsables de la interacción fuerte. Esto es posible al considerar que la carga eléctrica de los quarks es fraccionaria, $+2/3$ para u y $-1/3$ para d.

Alumno: Por eso el protón debe ser uud, para que su carga total sume +1. Y el neutrón udd, para que sea 0. ¿Y se han detectado ya en algún experimento?

Profesor: Su existencia fue puesta de manifiesto a fines de los años 60 en Palo Alto (California) por medidas de dispersión electrón-nucleón en el acelerador lineal SLAC, donde electrones acelerados a 20 GeV se hacían chocar contra protones y neutrones. Se vio que los nucleones estaban formados por tres partículas puntuales, que fueron identificadas como quarks. Más tarde, los teóricos postularon la existencia de un cuarto quark, denominado charm (c), o encanto.

Alumno: ¡Vaya! Seguimos con los nombres curiosos.

Profesor: En 1970, Glashow, Iliopoulos y Maiani propusieron este quark para explicar que el proceso de desintegración de un kaón neutro conduce a piones cargados en lugar de a una pareja de muones.

Alumno: Esas tres partículas, muón, kaón y pión son mesones, ¿verdad?

Profesor: El kaón y el pión, sí, pero los muones realmente son partículas elementales similares al electrón, aunque de mayor masa.

Este quark c había sido ya demandado por Glashow aduciendo motivos de simetría, pues se conocían dos parejas de leptones, el electrón y el muón con sus correspondientes neutrinos, y parecía lógico pensar en dos parejas de quarks. La prueba experimental llegó en 1974 de la mano de dos equipos distintos, el de Ting, en el laboratorio Brookhaven de Nueva York, y el de Richter, en el SLAC de California.

En dichos experimentos se observó la existencia de una partícula, llamada J/psi, que era el estado de mínima energía, correspondiente al menor valor de un nuevo número cuántico llamado C o encanto, de un par quark-antiquark nuevo, el c-anti c. Por dicho descubrimiento Ting y Richter fueron galardonados con el premio Nobel de 1976.

Posteriormente se planteó la hipótesis de un quinto y un sexto quark, llamados respectivamente bottom o beauty (b) y top o truth (t), fondo y cima o belleza y verdad en castellano, también por razones teóricas de simetría.

En 1977, en los experimentos en el Fermilab, a cargo del equipo de investigadores dirigido por Lederman, se detectó una nueva partícula, de masa 9640 MeV, que ofrecía grandes posibilidades para estar constituida por un nuevo tipo de quark más masivo que los conocidos hasta esa fecha.

La evidencia definitiva la proporcionó el acelerador DESY de Hamburgo (Alemania) en 1978. Sus experimentos de aniquilación electrón-positrón

demonstraron la existencia del quark bottom. De este modo, la partícula *úpsilon*, nombre con el que fue designada por Lederman, era interpretada como un estado ligado quark-antiquark, y dicho quark fue bautizado como beauty (belleza). Como es lógico, por añadidura se estableció un nuevo número cuántico del mismo nombre.

Alumno: Parece como si a cada movimiento teórico le sucede la confirmación experimental, que a su vez demanda una nueva predicción. Como un juego por turnos.

Profesor: Así parecía en un principio. Pero el quark top no fue hallado por los investigadores hasta 1995, cuando los físicos del Fermilab de Batavia, anunciaron que habían encontrado pruebas experimentales de su existencia. Para crear un quark top, pues, hubo que concentrar inmensas cantidades de energía en una región ínfima de espacio. Se esperaba que, entre unos cuantos *billones* de colisiones de protones, al menos un puñado crease un quark cima a partir de la energía del impacto, aunque se desconocía la energía necesaria. El modelo estándar predecía muchas propiedades del quark cima, como la carga, el espín o momento angular intrínseco, pero no determinaba la masa.

Alumno: Claro, como la masa determina la energía necesaria en los choques el trabajo experimental tuvo que ser una carrera a ciegas buscando las energías mayores.

Profesor: Más o menos. Finalmente, los experimentos efectuados en el Fermilab arrojaron para dicha masa el valor aproximado de unos 175 GeV, tanta como un átomo de oro y mucho más que lo previsto por la mayoría de los teóricos. La del protón, que consta de dos quarks arriba y uno abajo, como ya hemos dicho, es ligeramente inferior a 1 GeV.

Alumno: Por lo tanto, el honor del descubrimiento del último quark fue para Chicago.

Profesor: Su mérito fue grande porque el colisionador del Fermilab empezó a funcionar en 1985, ocho años después de haberse iniciado ya la búsqueda del quark top. Las primeras tentativas, en el Centro del Acelerador Lineal de la Universidad de Stanford (SLAC), en Palo Alto, California, y en el DESY de Hamburgo no dieron resultado. Con los años, las mayores probabilidades de *caza* fueron pasando de un acelerador a otro, conforme se disponía de haces de partículas de mayor energía, hasta llegar al quark top.

Sin embargo, también Europa ha tenido su recompensa, ya que, a principios de los años ochenta, el choque de haces de protones y antiprotones a energías de 315 GeV generó en el CERN, el laboratorio europeo de Física de grandes energías, próximo a Ginebra, dos nuevas partículas, el bosón W y el Z.

Alumno: Es decir, los bosones de intercambio de la interacción débil.

Profesor: Así es. Este descubrimiento fue una nueva confirmación del modelo estándar, que había predicho con exactitud sus masas. Muchos creían que por aquel entonces era inminente el descubrimiento del quark top (cima) en el CERN, pero las dificultades fueron grandes.

Por ejemplo, cuando los protones y los antiprotones chocan entre sí con altas energías se produce una colisión entre sus quarks y *gluones* internos. Cada quark o gluón lleva sólo una pequeña fracción de la energía total de su protón o antiprotón, pero el choque ha de tener la suficiente energía para que se generen los quarks top. De este modo, en 1988 no se había descubierto todavía el quark top en el CERN y se concluyó que su masa tenía que ser mayor de 41 GeV. Mientras tanto, el colisionador del Fermilab probó que dicha masa no podía ser inferior a 77 GeV.

Afortunadamente, en marzo de 1995 y tras varios años de intensos experimentos, se produjo la tan esperada colisión, probándose la existencia del quark top por el grupo de investigadores del Fermilab, coordinados por Liss y Tipton. Por consiguiente, ha quedado establecido que el número total de quarks es de seis, pues cada familia está integrada por dos de ellos, y de tal modo que cada una tiene una masa muy superior que la de la familia precedente. Se dice que los quarks se presentan en seis *sabores* distintos, continuando con esta nomenclatura tan especial.

Alumno: O sea, el término sabor se emplea en Física de partículas para referirse a los tipos o variedades que hay de cada una de ellas.

Profesor: En efecto. La primera familia está formada por el quark u y el quark d, con masas bastante inferiores a la del protón. La segunda familia está formada por el quark s y el quark c, uno mayor que el protón y el otro menor. La tercera está compuesta por el quark b y el quark t, de los cuales el segundo tiene una masa mucho mayor. En cualquier caso es muy difícil determinar el valor de la masa de un quark e incluso decidir claramente lo que se entiende por tal, ya que los quarks no se pueden tener aislados (Tabla 3).

SABOR del quark	Masa (MeV/c ²)	Carga eléctrica
Up	5	+2/3
Down	10	-1/3
Charm	1500	+2/3
Strange	200	-1/3
Top	180000	+2/3
Bottom	4700	-1/3

Tabla 3.- Tipos de quarks.

Por otro lado, la carga eléctrica de los quarks es una fracción de la unidad fundamental de carga. Así, por ejemplo, el quark u tiene una carga igual a 2/3 de la unidad elemental. Aunque no se pueden observar tampoco cargas fraccionadas aisladas, ya que los quarks siempre están combinados. Es decir, los quarks forman partículas compuestas llamadas hadrones, palabra

derivada de la griega *hadrys* (fuerte), de modo que la suma de las cargas de los quarks que constituyen un hadrón es siempre un número entero.

Los diversos quarks se pueden combinar entre sí para dar lugar a todas las partículas conocidas, salvo los leptones y los bosones, y con este modelo se puede llegar a una buena aproximación en el conocimiento de las partículas elementales.

Alumno: Muy interesante. Parece que este modelo puede justificarlo todo a partir de la carga eléctrica. ¿No es así?

Profesor: Casi todo. Sin embargo, deja sin explicar numerosas cuestiones. Por ejemplo, no se sabe por qué no existen partículas formadas sólo por dos quarks ni tampoco por qué los quarks no aparecen aislados. Para abordar éstas y otras interrogantes relativas a la estructura más íntima de la materia fue necesaria la introducción de un nuevo número cuántico, el color, cuyos tres valores caracterizan las partículas con mayor precisión.

Además, cada tipo de quark tiene su antipartícula correspondiente, distinguiéndose tres clases o colores diferentes dentro de cada quark o antiquark. Los quarks pueden ser *rojos*, *azules* o *verdes*, mientras que los antiquarks pueden ser *antirrojos*, *antiazules* o *antiverdes*.

Alumno: Siguiendo con la terminología de costumbre, es de esperar que la propiedad de los quarks designada por el nombre de color no signifique lo mismo que sugiere dicha palabra.

Profesor: Por supuesto. Los colores de los quarks y antiquarks no tienen nada que ver con los colores que distingue el ojo humano, sino que representan una propiedad cuántica. Su significado es análogo al de la carga en la interacción electromagnética, pues dos quarks con distinto color se atraen. Las interacciones entre quarks corresponden a la interacción fuerte y están mediadas por *gluones*, quienes carecen de masas y de carga eléctrica aunque tienen color, al contrario que los fotones en la interacción electromagnética.

Los gluones transportan pares color/anticolor, sin que sea necesario el mismo color. Por ejemplo se pueden dar gluones rojo/antiazul. Si bien hay nueve combinaciones posibles de pares color/anticolor, debido a consideraciones teóricas hay que eliminar una de ellas, quedando pues establecido en ocho el número total de gluones diferentes.

Alumno: Hemos establecido que para constituir un hadrón se necesitan tres quarks. ¿Pueden ser de cualquier color? Ya hemos visto que las combinaciones cuando se tiene en cuenta la carga eléctrica han de dar un resultado entero, ¿sucede lo mismo con el color?

Profesor: Ocurre exactamente lo mismo. El modelo exige que al combinarse para formar hadrones, partículas sensibles a la interacción nuclear fuerte, los quarks y antiquarks sólo pueden existir en determinadas agrupaciones de colores, de modo que el resultado final sea un estado "singlete blanco", o dicho de otro modo, color neutro. Antes del desarrollo de la cromodinámica cuántica, los físicos no podían explicar por qué los quarks sólo se combinan en bariones, partículas de tres quarks, y en mesones, partículas quark-antiquark, pero no, por ejemplo, en grupos de cuatro quarks. Ahora entendemos que sólo estas combinaciones pueden dar

color neutro. Partículas tales como u o d , que no pueden ser combinadas en estados de color neutro, nunca han sido observadas.

Alumno: Me interesa analizar otra analogía con la carga eléctrica. En los procesos permitidos, es decir, los observados en la naturaleza, sabemos que la carga eléctrica se mantiene constante. Eso lo llamamos conservación de la carga eléctrica. ¿Podemos hablar también de una *conservación del color*?

Profesor: Efectivamente, también se conserva el color. De hecho, existen tantas analogías que ya se habla de "*carga de color*" y no simplemente de color. Cuando un quark absorbe o emite un gluón en su interacción con otro, su color debe cambiar de modo que el resultado final de la interacción mantenga el mismo color inicial. Por ejemplo, si un quark rojo emite un gluón rojo/antiazul, ha de transformarse en un quark azul para que el resultado global siga teniendo color rojo.

Alumno: Ya veo que el modelo estándar es capaz de explicar los tipos de agrupaciones de quarks, pero no tengo muy claro la razón sobre la imposibilidad de mantener un quark aislado.

Profesor: El hecho de que los gluones transporten carga de color hace que se sientan atraídos por las cargas de color de los otros quarks y otros gluones, de forma que la fuerza entre quarks es constante e independiente de la distancia. Ello implica que para separar dos quarks a una distancia mayor se requiere cada vez más energía, de modo que si pretendemos separarlos una distancia infinita, es decir, ver un quark aislado, es necesario ejercer una fuerza infinita. Esto explica el hecho denominado *esclavitud infrarroja*, lo que significa que no se pueden observar quarks libres, pues quedan confinados por la interacción fuerte.

Alumno: ¿Por qué se le califica de infrarroja a la situación de los quarks? ¿Tiene algo que ver con el espectro electromagnético?

Profesor: La razón es simple. En mecánica cuántica, a veces, las grandes distancias se designan como *distancias infrarrojas*. Por eso, esclavitud infrarroja es un término apropiado para describir el aumento de las interacciones entre quarks conforme se hace grande la distancia. Por otro lado, en el polo opuesto de las pequeñas distancias, unos 10^{-18} m, la dependencia o esclavitud de los quarks de su propia carga de color desaparece, quedando prácticamente libres. Este fenómeno se llama *libertad asintótica*.

Alumno: En definitiva, parece que la teoría del color puede explicar por qué los quarks son partículas elementales dentro de los hadrones y se encuentran confinados para siempre en el núcleo atómico. Ahora bien, junto con los quarks, ¿existe algún otro grupo de partículas elementales?

9.2. Leptones

Profesor: Naturalmente. Se encuadran bajo la denominación de leptones, término tomado del griego *leptos* (ligero), al conjunto de partículas elementales que no interactúan a través de la fuerza nuclear fuerte.

Alumno: Es decir, que de los dos tipos de fuerzas nucleares a los leptones sólo les afecta la débil.

Profesor: Sólo son sensibles a dicha interacción, además de a la gravitatoria, lógicamente, o a la electromagnética, cuando posean carga. Los leptones son eléctricamente neutros o tienen carga unidad, y, lógicamente, son fermiones. Al contrario que los hadrones, que están compuestos por quarks, los leptones no parecen tener ninguna estructura interna.

Alumno: ¿Cuántos leptones se conocen?

Profesor: Este grupo de leptones está integrado por el *electrón*, el *muón*, el mesón *tau* y las tres clases de *neutrinos* asociadas respectivamente con cada uno de los otros tres leptones. Además, igual que sucedía en el caso de los quarks, cada una de estas partículas tiene su antipartícula correspondiente (Tabla 4).

Leptón	Masa (MeV/c ²)	Carga eléctrica
Electrón	0,511	-1
Neutrino electrónico	Menos de 10 ⁻⁵	0
Muón	106	-1
Neutrino muónico	Menos de 0,3	0
Partícula tau	1780	-1
Neutrino tauónico	Menos de 30	0

Tabla 4.- Tipos de leptones.

Aunque todos los leptones son relativamente ligeros, de espín igual a 1/2 y masa inferior a la de los mesones, sus propiedades son muy diferentes.

El electrón, por ejemplo, tiene carga negativa, una masa de 0,511 MeV y es estable, lo que quiere decir que no se desintegra para dar lugar a otras partículas elementales.

Sin embargo, el muón, aunque también tiene carga negativa, posee una masa alrededor de 200 veces superior a la del electrón. A diferencia del electrón, que es completamente estable, el muón es inestable, y se desintegra después de una vida media de $2,2 \cdot 10^{-6}$ segundos, en un electrón, un neutrino y un antineutrino. Este proceso, al igual que la desintegración beta, ocurre por interacción débil. Los experimentos han demostrado que la intensidad subyacente a ambos procesos es la misma, lo que indica que la fuerza nuclear débil actúa igualmente sobre leptones y sobre quarks.

Finalmente, encontramos el leptón tau, con una masa mucho mayor, más pesado que el protón. El tau es una partícula muy inestable y poco conocida: se desintegra tras una vida media de $3 \cdot 10^{-13}$ segundos, produciendo diversos tipos de leptones o hadrones y un neutrino tauónico.

Alumno: Según lo dicho hay varios tipos de neutrinos, ¿por qué?

Profesor: Los neutrinos poseen una propiedad característica que los asocia específicamente con algún tipo de leptón cargado. Por ejemplo, el neutrino emitido en la desintegración del muón es un neutrino muónico, mientras que el antineutrino producido es un antineutrino electrónico.

Se ha encontrado experimentalmente que cuando un neutrino electrónico interacciona con la materia siempre se producen electrones y nunca muones u otro tipo de leptones. Lo mismo ocurre con el resto de las clases de neutrinos. Cuando un leptón pesado decae, es decir, se desintegra, una de las partículas resultantes es siempre el neutrino correspondiente. Las otras pueden ser cualquier leptón más su correspondiente antineutrino, o cualquier quark con su antiquark.

Alumno: ¿Cuál es su masa?

Profesor: Los neutrinos son los leptones más ligeros. Las medidas experimentales indican que la masa del neutrino electrónico, si la tiene, es *menor* que diez electrón-voltios. Además, carece de carga, por lo que sólo experimenta las dos fuerzas más débiles de la naturaleza, es decir, la fuerza gravitatoria y la fuerza nuclear débil. Por esta razón, los neutrinos reaccionan con la materia de forma extremadamente leve. Así, los neutrinos producidos por el Sol pueden atravesar la Tierra sin ser absorbidos. Esto hace difícil su detección y el estudio experimental de sus propiedades físicas.

9.3. Familias de fermiones

Alumno: ¿Todas las partículas elementales y sus combinaciones posibles en partículas compuestas existen en la naturaleza?

Profesor: La *única familia* de fermiones que tiene existencia en la materia ordinaria está formada por quarks y leptones de poca masa, y concretamente, se compone de los quarks *u* y *d*, el electrón y su neutrino, además de sus antipartículas correspondientes, es decir, los dos antiquarks (anti-*u* y anti-*d*), el positrón y el antineutrino electrónico.

Los quarks se unen en tríos para constituir los neutrones y los protones, los cuales, a su vez, se agrupan en los núcleos, que interaccionan con los electrones dando lugar a los átomos. Los neutrinos de los electrones participan en la desintegración beta radiactiva, en la que los neutrones se convierten en protones emitiendo electrones, según el proceso:



Los protones también sufren algunos procesos de desintegración en ciertas reacciones nucleares, transformándose en neutrones, liberando un positrón y un neutrino.

Alumno: ¿Y que sucede con el resto de las partículas elementales?

Profesor: Las partículas que componen las otras dos familias de fermiones no están presentes en la materia ordinaria, pero pueden crearse en aceleradores de partículas potentes. Así, la segunda familia está formada por los quarks *c* y *s*, el muón y el neutrino muónico, y sus antipartículas correspondientes. La tercera familia incluye los quarks *t* y *b* y la partícula

tau y su neutrino, con sendas antipartículas para todos ellos. En la Tabla 5 se recogen los componentes de estas tres familias:

Familias de fermiones	Quarks	Leptones
I	Up y down	Electrón y neutrino electrónico
II	Charm y strange	Muón y neutrino muónico
III	Top y bottom	Tau y neutrino tauónico

Tabla 5.- Componentes de las familias de fermiones.

Alumno: Parece ser que en los experimentos de altas energías "creamos" partículas que no existen en la naturaleza. Es algo inquietante ¿no es cierto?

Profesor: Dicho así, lo parece. Pero no es sustancialmente distinto de la obtención de un elemento artificial de la serie de los lantánidos o los actínidos, por ejemplo el nobelio. Lo que sucede es que, tanto esos elementos artificiales como esas partículas, son tan inestables que su "vida media" o tiempo real de existencia es tan corto, a veces menos de un microsegundo, que no tiene sentido plantearse su existencia fuera de los experimentos. Eso sí, en ciertos procesos naturales, como los ocasionados por rayos cósmicos o por la radiactividad natural, es posible detectar la rápida formación y desintegración de algunas de dichas partículas.

Alumno: ¿Mediante qué procesos se desintegran los fermiones de las dos familias más pesadas? (Tabla 6)

Bariones	Quarks	Carga eléctrica	Masa (MeV/c ²)	Spin
Protón	uud	+1	938	1/2
Antiprotón	Anti(uud)	-1	938	1/2
Neutrón	udd	0	940	1/2
Partícula lambda	uds	0	1116	1/2
Partícula omega	uss	-1	1672	3/2
Partícula sigma	uuc	+2	2455	1/2

Tabla 6.- Composición y propiedades de algunos bariones.

Profesor: Hoy sabemos que las interacciones débiles son las responsables de que todos los quarks y leptones más pesados decaigan, para producir quarks y leptones más ligeros de la familia I. Cuando un quark o un leptón cambian de tipo, por ejemplo, un muón cambiando a un electrón, se dice

que cambia de *sabor*. Por lo tanto, todos los cambios de sabor son producidos por la interacción débil.

Por consiguiente, cuando una partícula decae, ella desaparece y surgen en su lugar dos o más partículas. La suma de las masas de las partículas producidas es siempre menor que la masa de la partícula original, por eso la materia estable que nos rodea contiene sólo electrones y los dos quarks más livianos, up y down.

Alumno: Me imagino que es algo parecido a lo que sucederá con los *mesones*.

Profesor: A propósito, otra prueba adicional de la validez de este modelo es la interpretación de la estructura de los mesones. Recordemos que son partículas de masa generalmente comprendida entre la de los electrones y la de los neutrones y sometidas a interacciones fuertes, de espín nulo o entero. Fueron identificados por Powell en 1947 en los rayos cósmicos, aunque su existencia había sido postulada por Yukawa en 1935. Son inestables, pues los piones y kaones, de existencia más larga, tienen una vida media del orden de la cienmillonésima de segundo.

El modelo estándar explica perfectamente las propiedades de los mesones suponiéndoles constituidos únicamente por dos quarks, en concreto un quark y un antiquark (Tabla 7), que den como resultado un color neto blanco (o neutro).

Mesones	Quarks	Carga eléctrica	Masa (MeV/c ²)	Spin
Pi	u-anti d	+1	140	0
K ⁻	s-anti u	-1	494	0
K ⁰	d-anti s	0	498	0
Rho	u-anti d	0	770	1
D ⁺	c-anti d	+1	1869	0
J/Psi	c-anti c	0	3097	1

Tabla 7.- Composición y propiedades de algunos mesones.

9.4. Bosones

Alumno: En suma, para completar el mapa de las partículas elementales sólo nos restan los bosones.

Profesor: Sí. El modelo estándar propone que cada tipo de interacción entre las partículas materiales o fermiones tiene lugar mediante el intercambio de ciertas partículas: los bosones. Sus características, *masa, carga, isospín, color, etc.*, vienen determinadas, como ya hemos señalado, por el alcance e intensidad del tipo de interacción. Por ejemplo, para la interacción electromagnética la partícula de intercambio es el fotón, de

carga y masa nulas, pero de alcance infinito. Los bosones mediadores son doce, agrupados como siguen:

- Ocho tipos de gluones, portadores de la interacción fuerte, sin masa ni carga eléctrica. Se caracterizan por su carga de color (el análogo a la carga eléctrica) y cambian el color de los quarks con los que interaccionan.

- Tres bosones vectoriales intermediarios de la interacción débil, que son W^+ , W^- y Z^0 .

- El fotón, mediador de la interacción electromagnética.

A estos mediadores habría que añadir un nuevo tipo de bosón, el llamado *bosón de Higgs*, que sería una partícula colocada expresamente en la teoría para poder unificar todas las interacciones, en un tratamiento matemático que permita ampliar lo que ya se ha hecho con las fuerzas electromagnética y débil. La teoría debe permitir unificar las partículas con masa cero, como el fotón, con los bosones vectoriales, cuya masa es bastante apreciable, alrededor de 80 GeV.

Alumno: Entonces, debemos entender que el bosón de Higgs también es hipotético, igual que el gravitón. Por ello, no podemos incluirlo en la lista de partículas elementales (Tabla 8).

Profesor: Lógicamente. Los bosones de Higgs no se han detectado aún, quedando como la parte más especulativa de la teoría y, por tanto, uno de los retos más atractivos de la Física de Altas Energías. No obstante, en septiembre de 2000 unos experimentos, aún sin confirmar, llevados a cabo por C. Tully en el LEP (Large electron-positron Collider) del CERN parecen sugerir la aparición del bosón de Higgs con una masa de unos 115 GeV.

Bosón	Masa (GeV/c ²)	Carga eléctrica	Spin	Vida media	Interacción
Fotón	0	0	1	Infinita	Electromagnética
8 Gluones	0	0	1	Infinita	Fuerte
W^+	80	+1	1	10^{-25} s	Débil
W^-	80	-1	1	10^{-25} s	Débil
Z	91	0	1	10^{-25} s	Débil
¿Gravitón?	0	0	2	Infinita	¿Gravitatoria?

Tabla 8.- Propiedades de los bosones.

Alumno: Me han surgido dos interrogantes acerca de los bosones y ambas se refieren a los causantes de la interacción débil. En primer lugar, ¿por qué se denominan bosones vectoriales? Y en segundo lugar, ¿por qué dos de los bosones de la fuerza débil tienen carga eléctrica, en contraposición con el resto de bosones, que no la poseen?

Profesor: Cuando una partícula tiene un spin igual a la unidad, como es el caso de los *debilones* W^+ , W^- y Z , se dice que son bosones vectoriales.

Por otro lado, el desarrollo por etapas de las desintegraciones a través de las interacciones débiles exige, a veces, una carga positiva o negativa para el bosón W , con el fin de cumplir en cada paso la *ley de la conservación de la carga eléctrica*. Cuando ello no es necesario, el decaimiento o desintegración transcurre a través del bosón Z y se dice que es un proceso de *corriente neutra*.

Por ejemplo, en la desintegración beta del neutrón hay que considerar, en principio, la emisión de una partícula W^- por parte de dicho neutrón, para convertirse en protón (Figura 26). Es evidente que el bosón W debe llevar una carga negativa para compensar la carga positiva del protón. Luego, en un segundo paso, el bosón vectorial se desintegra originando un electrón y un antineutrino electrónico.

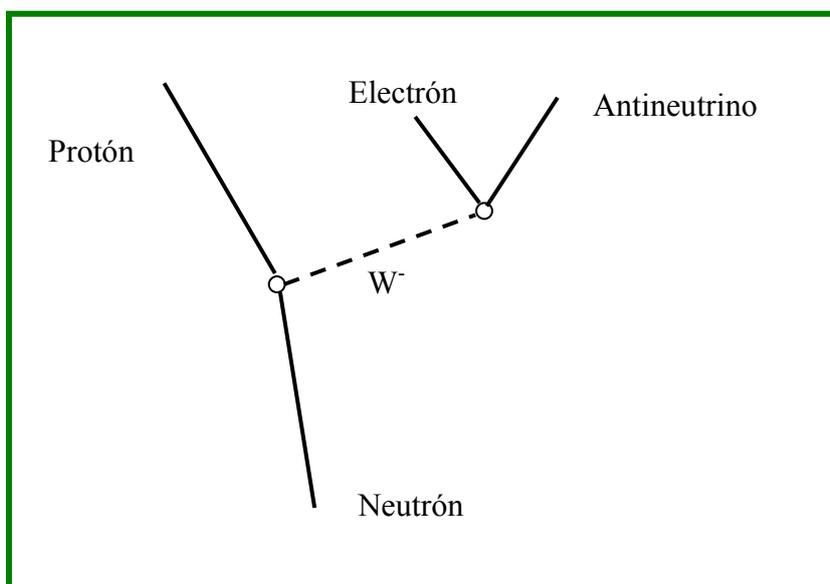


Figura 26.- Desintegración del neutrón mediante el bosón W^- .

Para explicar interacciones en las que un neutrino no sufre cambios de naturaleza, y sin embargo, aparecen en ellas nuevas partículas, se hace uso de las corrientes neutras. Mediante una primera etapa, dicho neutrino emite un bosón Z^0 y luego éste se desintegra en etapas posteriores, originándose las nuevas partículas.

Alumno: Según lo que hemos visto, ¿cuáles serían verdaderamente las partículas que podemos considerar elementales de acuerdo con el estado actual de nuestros conocimientos?

Profesor: Gracias a la Física de altas energías hemos llegado a un nivel de profundización en la estructura del mundo subatómico que hace medio siglo habría sido inimaginable para cualquier científico. Hasta lo que sabemos, son elementales los *seis quarks*, que se unen en grupos de tres o en parejas quark-antiquark para formar los hadrones, y los *seis leptones*, con sus correspondientes *antiquarks* y *antileptones*, junto a los *bosones* de intercambio, es decir, los ocho gluones, los tres debilones y el fotón. Queda por demostrar la existencia o no del gravitón (Figura 27).

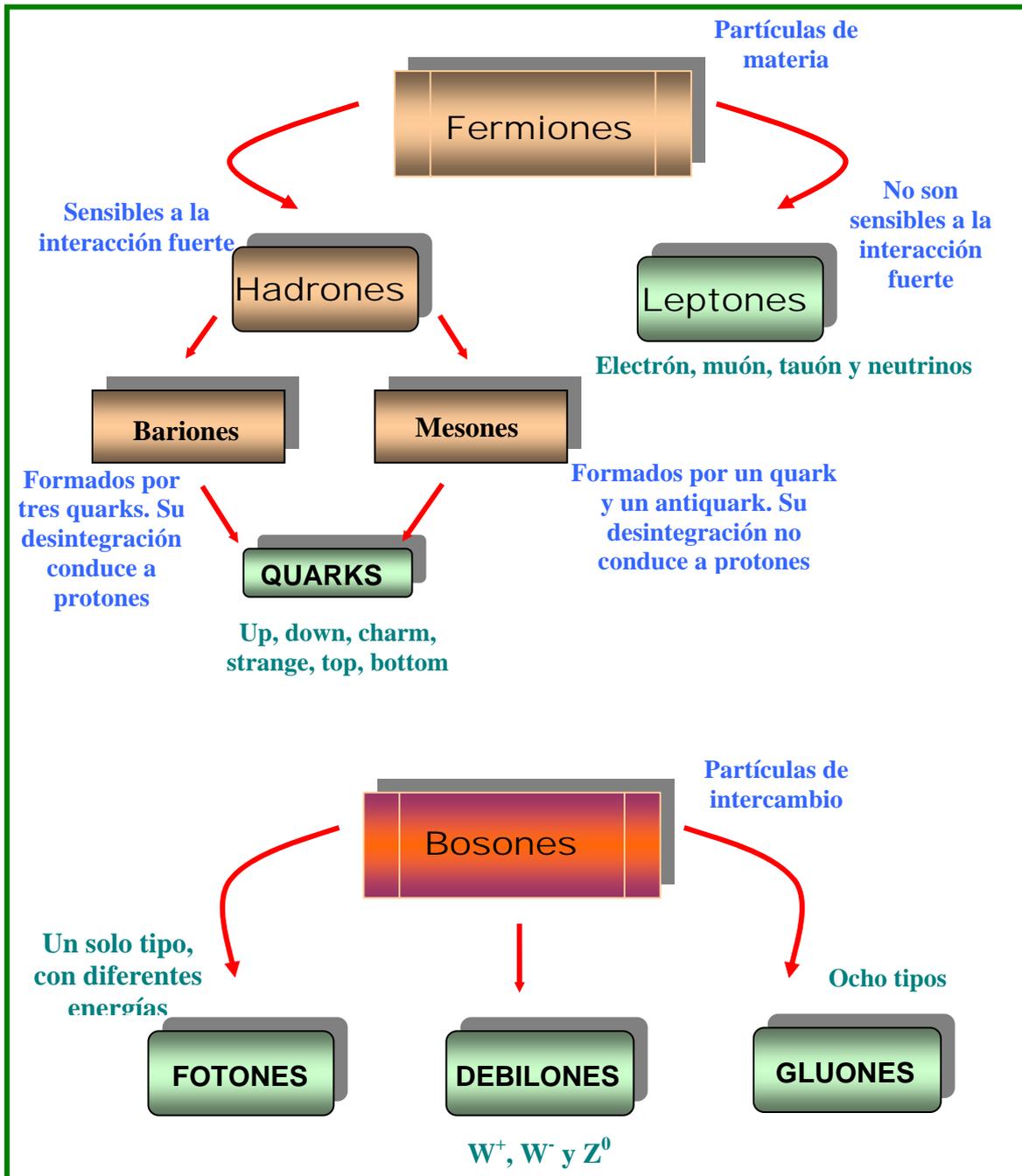


Figura 27.- Clasificación de las partículas subatómicas.

9.5. Cuestiones

Si no se conocen las respuestas a las siguientes cuestiones es aconsejable una nueva lectura de este capítulo.

- ¿Qué objeto tiene el modelo estándar?
- Explique la idea de quark, el origen de su nombre y los tipos y familias que podemos distinguir.

- ¿A qué llamamos sabor de un quark? ¿Y color?
- ¿Por qué hay ocho tipos de gluones?
- ¿Qué es un singlete blanco?
- Describa en qué consisten los fenómenos denominados esclavitud infrarroja y libertad asintótica.
- ¿Qué son los leptones y cuántos tipos conoce?
- Confeccione una tabla con las tres familias de fermiones. ¿Tienen todas existencia real en la naturaleza?
- ¿Cómo justifica el modelo estándar las propiedades de los mesones?
- ¿Qué son los bosones y qué papel desempeñan en el modelo estándar? Haga una relación de los bosones conocidos y de los hipotéticos.
- ¿De qué depende la masa de un bosón?

10. TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS

Alumno: ¿Es suficiente con describir las interacciones mediante las partículas de intercambio para poder realizar predicciones teóricas?

Profesor: En una primera aproximación es muy útil y resulta muy cómodo contentarnos con explicar el alcance y la intensidad de las fuerzas fundamentales a través de los bosones específicos de cada una de ellas, dotándoles de las características, masa, carga, espín... requeridas. Sin embargo, en un esfuerzo por profundizar en el mecanismo de las interacciones y en el concepto mismo de interacción, es necesario abordar la teoría cuántica de campos.

Alumno: Su denominación sugiere, de entrada, un fuerte contenido matemático.

Profesor: No se puede negar. Es evidente que el tratamiento completo de la teoría cuántica de campos está sólo al alcance de los especialistas, los únicos capaces de realizar predicciones teóricas. Pero, sus fundamentos, es decir, los planteamientos que condujeron a ella, así como las ideas básicas que la conforman, resultan bastante asequibles a cualquier lector interesado en reflexionar un poco sobre ella. Se debe apelar ciertamente a la imaginación, pues intervienen diversos conceptos un tanto abstractos, que han de entenderse buscando similitudes en ejemplos simplificados, mucho más cercanos.

En esta parte de la Física Cuántica es, quizás, donde mayor protagonismo adquieren las matemáticas. A veces se plantean serias dudas sobre si es la Física quien se sirve de las matemáticas para describir la realidad del mundo cuántico o son las matemáticas las que "dirigen" las investigaciones de los físicos de altas energías. En cualquier caso, es una simbiosis enriquecedora para ambas disciplinas, pues, por un lado, la Física Teórica no podría avanzar y por otro, las matemáticas demuestran su enorme utilidad y el valor de sus contenidos.

Alumno: La primera pregunta que surge es sobre el concepto de campo.

10.1. Concepto clásico de campo

Profesor: El concepto de campo, al igual que otros de la Física Clásica, ha experimentado unas variaciones sustanciales. De todas maneras, para entender el significado actual es requisito previo hablar del original.

Cuando una carga eléctrica se coloca en un punto del espacio cercano a otra carga ya existente, la Física Clásica dice que esta segunda carga se halla sometida a la acción del campo eléctrico creado por la primera. Dicha acción se manifiesta en forma de una fuerza que atrae o repele a la segunda carga. Además, puede verificarse experimentalmente que la magnitud o intensidad de la fuerza eléctrica depende del punto donde hayamos situado la segunda carga. Se podría interpretar el fenómeno pensando que la primera carga, por el hecho de estar presente, manifiesta en la región del espacio próxima a ella una cierta influencia que se hace patente cuando introducimos allí otra carga. Es como si el *espacio* adquiriese unas *determinadas propiedades* que conserva latentes hasta que aparece una segunda carga.

Pero la utilidad del concepto clásico de campo va más allá. Si tenemos cierto gas encerrado en un recipiente, podemos medir para cada una de sus partículas, que es admisible suponer puntuales, la temperatura, una magnitud escalar. Es lo mismo que medir la temperatura en cada punto del espacio de ese recipiente, por eso se dice que el *campo de temperaturas* es un tipo de campo escalar. De igual manera, en cada punto del espacio, es decir, para cada partícula, es posible medir su velocidad, que al tener dirección y sentido ha de ser representada por un vector, de ahí que el *campo de velocidades* sea un tipo de campo vectorial.

Alumno: En definitiva, mediante el campo de temperaturas y el de velocidades, en esa región del espacio que se halla en el interior del recipiente, somos capaces de describir las propiedades del gas.

Profesor: Y además, utilizando sus valores estamos en condiciones de calcular distintas propiedades del gas, como la energía cinética media de sus moléculas o la presión que ejercen sobre el recipiente.

Alumno: Podríamos olvidarnos incluso del gas y sería lo mismo. Únicamente con los valores de los campos describimos el sistema, ¿no es cierto?

Profesor: Así es. Resulta de una enorme ayuda esta simplificación matemática.

Alumno: ¿Se remonta a mucho tiempo atrás la idea de campo?

Profesor: Su creador fue el genial autodidacta Michael Faraday, en el primer cuarto del siglo XIX, cuando se estudiaron por Oersted, Ampère y el propio Faraday, entre otros, los fenómenos magnéticos y su relación con los eléctricos. El rigor matemático de James C. Maxwell culminó en 1865 con las ecuaciones que describen el campo electromagnético, un prodigio de síntesis y un gran ejemplo del poder descriptivo de las matemáticas en el ámbito de la Física .

Alumno: Hemos hablado del campo electromagnético, pero ¿y el otro campo vectorial clásico?

Profesor: Te refieres al campo gravitatorio. En sus dos artículos sobre la Teoría de la Relatividad, la Especial en 1905, para movimientos uniformes, y la General en 1916, que incluye los movimientos acelerados, Albert Einstein culminó la obra de sus predecesores. Él concibió la atracción gravitatoria como una consecuencia de la deformación del *espacio-tiempo de Minkowski...*

Alumno: ¿No hemos hablado ya del espacio de Minkowski?

Profesor: Sí. Recuerda que es un tratamiento matemático del espacio y del tiempo, de modo que no se consideran por separado las tres coordenadas espaciales (x, y, z) de la temporal (t), sino que se hace una agregación de las cuatro coordenadas *espaciotemporales*, resultando un nuevo espacio de cuatro dimensiones en el que cualquier *suceso* necesita ser definido por cuatro coordenadas.

Pues bien, Einstein plantea en su Relatividad General que en dicho espacio se producen deformaciones causadas por la presencia de objetos con masa y se obtiene el denominado *espacio-tiempo de Riemann*. Por

tanto, se describe la *interacción gravitatoria* como una manifestación del *campo gravitatorio* en este nuevo espacio-tiempo.

Bajo la premisa de la constancia de la velocidad de la luz y su independencia del posible movimiento del observador, el genio de Einstein llega a la conclusión de que los movimientos en el campo gravitatorio han de verificar las transformaciones de Lorentz. Esto implica un tipo especial de cambios en las coordenadas de los objetos, que sirven para obtener sus nuevos valores cuando se modifica el sistema de referencia.

Alumno: No acierto a distinguir con claridad las diferencias entre los espacios de Minkowski y de Riemann.

Profesor: El espacio-tiempo de Minkowski, podríamos decir que posee una métrica lineal, constante. En otras palabras, es homogéneo y uniforme. Si nos referimos al espacio-tiempo de Riemann, hemos de considerarlo no lineal, pues al estar sometido a deformaciones por la presencia de cuerpos masivos adopta una configuración curva. En él se habla de líneas geodésicas cuando queremos describir los caminos o trayectorias curvilíneas donde es mínima la energía. En definitiva, el espacio de Riemann es curvo, con una métrica variable.

En cierta manera, esta concepción de Einstein para explicar la interacción gravitatoria encierra el germen del nuevo enfoque de las modernas teorías sobre las interacciones, pues se pasa de un espacio-tiempo lineal, con una simetría global, a un espacio-tiempo de métrica variable, dependiente del punto considerado. Ello implica una simetría de tipo local o simetría gauge, que es una idea clave en las teorías actuales de unificación de las fuerzas fundamentales.

Alumno: Según este planteamiento, debemos entender también que la *acción a distancia* que tiene lugar por efecto de la atracción gravitatoria viene representada por una serie de *propiedades matemáticas* del campo.

Profesor: De algún modo nos permitimos "olvidar" la existencia física de los cuerpos y centrarnos solamente en las propiedades locales del campo. Concretamente, los puntos donde este espacio-tiempo sufre una mayor deformación son los lugares donde se encuentran los objetos masivos. O sea, una mayor intensidad en el campo en un lugar se corresponde por la existencia allí de un cuerpo.

10.2. Teoría cuántica de campos

Alumno: ¿Cómo se modifica el concepto clásico de campo cuando nos movemos en el mundo subatómico?

Profesor: Recordemos que en él las partículas se mueven a grandes velocidades, con lo que están sujetas a consideraciones relativistas. Por ello, la aplicación de la Teoría Cuántica a la Teoría de la Relatividad Especial dio como resultado la Teoría Relativista del Campo Cuántico o *Teoría Cuántica de Campos*.

Alumno: ¿Cuándo surgió esta nueva teoría?

Profesor: Sus pioneros fueron Jordan, Heisenberg y Born, a los que pronto se unieron Wigner y Pauli, de manera que hacia 1930 ya se había completado.

Alumno: ¿Cuál es la idea principal que la distingue de la teoría clásica?

Profesor: En el concepto clásico hay una clara diferenciación entre los campos y las partículas, pues son entidades distintas. En la teoría moderna, las segundas son manifestaciones de los primeros, es decir, las entidades fundamentales son los campos. Ahora, en los lugares donde la intensidad del campo es mayor suponemos situadas a las partículas, o, mejor dicho, decimos que es más probable encontrar allí a la partícula.

En la Teoría Cuántica de Campos hemos de dejar a un lado la vieja idea de partícula material y continuar con la imagen "abstracta" dual, centro de los conceptos de la nueva mecánica. Por esta razón recurrimos a la descripción matemática de las partículas, o lo que es igual, de los *campos cuánticos*, que vienen representados por ellas, dotándolas de una serie de propiedades, como carga, masa, espín, color, etc. En un artículo, publicado en 1939 por Eugene Wigner de la Universidad de Princeton, se estableció el modo de calcular la masa en reposo de las partículas y la utilidad de su clasificación basada en su espín.

Alumno: ¿Cómo describimos el estado de una partícula o campo cuántico?

Profesor: Los estados se pueden expresar mediante un conjunto de números, los *números cuánticos*. Están sujetos a unas reglas muy estrictas y sus cambios, que indican las transformaciones en las partículas, sólo se permiten desde el punto de vista teórico si obedecen a las distintas restricciones que les han sido establecidas por las exigencias matemáticas de la teoría.

Alumno: Ya voy comprendiendo el proceso de matematización, si se me permite la palabra, al que se hacía referencia al principio. Ahora no necesitamos imaginar a las partículas como entes materiales, con la dificultad que eso entraña, sino como entes matemáticos, con un lenguaje mucho más conciso y concluyente.

Profesor: Precisamente a esto se debe el enorme desarrollo de la Física de partículas en tan poco tiempo. Las dificultades se han presentado cuando las verificaciones experimentales de las nuevas predicciones teóricas exigen mayores requerimientos energéticos.

10.3. Los campos nucleares

Alumno: ¿Este modelo sirve también para explicar las fuerzas nucleares?

Profesor: En efecto. Antes del conocimiento de las modernas técnicas matemáticas de *renormalización* y de la *simetría gauge*, de las que luego tenderemos ocasión de hablar, fueron Fermi y Yukawa quienes describieron las fuerzas nucleares débiles mediante el intercambio de partículas virtuales. El primero supuso, en 1934, que dichas partículas eran fotones y el segundo afirmó poco después que se trataba de mesones. Hacia 1937, el sueco Oskar Klein predijo la existencia de los bosones cargados W^+ y W^- , aunque se equivocó al suponer que el tercer bosón intermediario, que debía

ser neutro, era el fotón. Se puede decir que correspondió a John Ward, en 1958, el honor de cerrar el tratamiento de la interacción débil con la propuesta del bosón Z como mediador sin carga eléctrica en el campo débil, que fue finalmente detectado en el acelerador LEP del CERN en noviembre de 1989.

Corresponde al físico japonés Hideki Yukawa, en 1935, el primer tratamiento matemático de la interacción nuclear fuerte. Basándose en el dato ya conocido de que el alcance de dichas fuerzas era de unos 10^{-15} m, las dimensiones del núcleo atómico, pudo determinar la masa de la partícula de intercambio, entre unos 100 MeV y 150 MeV. Teniendo en cuenta que las masas en reposo del protón y del neutrón se hallan en torno a los 940 MeV, el valor calculado por Yukawa supone para la masa del bosón entre un 10 % y un 16 % de la masa de un nucleón. Cuando en 1945 se detectaron los mesones pi, uno con carga positiva, otro negativa y un tercero neutro, todos con una masa aproximada de 140 MeV se creyó que eran efectivamente las partículas de intercambio propuestas por Yukawa.

Alumno: Es decir, Yukawa también proponía mesones para la interacción fuerte, lo mismo que para la débil.

Profesor: Ten presente que sus predicciones se basaron, sobre todo, en el alcance real de la interacción y el de la débil es unas cien veces menor aún. Los mesones para la interacción débil habían de tener más masa, pero eso no era excesivo problema ya que se iban detectando sucesivamente mesones, cargados o no, con una amplia variedad de masas, que incluso podía ser muy superior a la del protón y neutrón. Por ejemplo los mesones B^+ y B^- tienen 5260 MeV, cerca de seis veces la masa del protón y el mesón Y, neutro, 9460 MeV, unas diez veces la masa del protón.

Alumno: Por ello no resulta difícil suponer un tratamiento matemático paralelo al de los campos débiles.

Profesor: Aparentemente sí. Sin embargo, hubo una grave dificultad en el caso de la interacción fuerte. Cuando se citan las características de las fuerzas hablamos también de la constante de acoplamiento. En los cálculos, una constante de acoplamiento mayor, como sucede con la interacción fuerte, se traduce en necesitar un mayor número de términos a la hora de calcular las intensidades, porque no sólo hay que pensar en la posibilidad de intercambio de una partícula, sino en dos o más.

Alumno: Eso me recuerda los ejercicios de cálculo del campo gravitatorio o del campo eléctrico de un conjunto de masas o de cargas, con una geometría dada, en un punto determinado del espacio. Cuantas más cargas o masas nos propongan, más términos tiene el campo total.

Profesor: En eso consiste el principio de superposición, un recurso matemático muy útil en el cálculos de los campos creados por diversas fuentes en la misma región del espacio. Ahora no se trata del mismo caso, pero podríamos decir que su fundamento es análogo. En las teorías cuánticas de campos, estos cálculos se concocen como *teoría de perturbaciones* o serie perturbativa. Si la interacción exige incluir los intercambios múltiples de partículas, los cálculos se hacen técnicamente inabordables y poco exactos.

Esta situación se prolongó hasta mediados los sesenta, momento en que surgió el concepto de carga de color, o simplemente color, como la propiedad característica de las interacciones nucleares fuertes y con el desarrollo de la Cromodinámica Cuántica en los primeros años de la década de los setenta.

10.4. Simetrías y leyes de conservación

Alumno: Se aprecia que conforme se van conociendo más datos experimentales y se tienen que justificar teóricamente, los cálculos se tornan más complejos.

Profesor: Digamos que no se avanza tan rápido como quisiéramos. Pero no nos adelantemos a los acontecimientos. Llegados a este punto, es necesario recordar que la utilidad más importante que se deriva de la concepción matemática de los campos o las partículas es la opción de asignarle unas ciertas simetrías, o lo que es igual, de representar sus propiedades mediante su tipo de simetría empleando la teoría matemática de grupos.

Alumno: ¿Es similar a la clasificación que se hace de los cristales en Geología?

Profesor: Se podría comparar con ellos. Sabemos que las propiedades de un cristal, es decir, un sólido iónico como la sal, vienen determinadas por la estructura interna de sus partículas, que se hayan dispuestas en una red espacial tridimensional. La cristalografía ha comprobado que todas las redes se pueden asimilar a uno de los siete tipos de sistemas cristalinos básicos y que todas ellas se generan por la repetición en el espacio de una estructura fundamental o *celda unidad*.

Este ladrillo fundamental puede ser un cubo, un prisma hexagonal, rómbico, etc., y presentará ejes, planos y centros de simetrías en los que la figura no se modificará después de su aplicación, o centros de inversión, por ejemplo, donde la posición final de la misma se invierte respecto a la situación inicial. Estos elementos de simetría se asignan a cada grupo de simetría, de forma que si una figura, en este caso, una celda unidad, pertenece al mismo poseerá todos los elementos de simetría del grupo determinado.

Así pues, las partículas, a pesar de ser elementales, como los quarks o los leptones, poseen ciertas *simetrías* igual que los cristales. Sus transformaciones, que vienen como resultado de sus interacciones, también presentan estas simetrías, que se clasifican en la categoría correspondiente según la teoría de grupos. Por lo tanto, han de cumplir las leyes que se derivan de las simetrías, denominadas *leyes de conservación*. Hay un famoso teorema, que se debe a Emmy Noether, enunciado en 1918, que afirma que si una transformación guarda un tipo determinado de simetría lleva asociado el cumplimiento de una determinada ley de conservación.

Alumno: De las leyes de conservación ya tengo constancia en la Física Clásica, por ejemplo, sabemos que la energía, la cantidad de movimiento y el momento angular se mantienen constantes siempre que no actúen fuerzas exteriores sobre un sistema, según nos demuestra la mecánica de Newton como consecuencias de sus leyes. ¿Es éste el mismo caso?

Profesor: Lógicamente, la dinámica de las partículas elementales obedece a las leyes de Newton con las correcciones relativistas pertinentes, de modo que siguen vigentes estas leyes de conservación generalizadas. No obstante se han ido descubriendo otras adicionales de suma importancia.

Alumno: ¿Cuáles son estas nuevas simetrías?

Profesor: Comencemos por la simetría de paridad, conocida también por simetría de reflexión espacial. Es la más sencilla. Una transformación, por ejemplo, una colisión entre dos partículas A y B que produce las nuevas partículas C y D, posee simetría de paridad o muestra conservación de la paridad (P) cuando, al cambiar de signo las coordenadas espaciales de todas ellas, la probabilidad con la que tiene lugar el proceso no varía.

Alumno: Eso es lo mismo que decir que si al cambiar de signo las cantidades de movimiento de todas las partículas implicadas en la transformación, la probabilidad de ésta no se ve modificada.

Profesor: En efecto. Supongamos que la colisión o interacción entre las dos partículas A y B, cuyas cantidades de movimiento designaremos por p_A y p_B , tiene una determinada probabilidad de producir otras dos partículas C y D con cantidades de movimiento p_C y p_D , respectivamente. Llamemos R a esta reacción:



Si ahora las mismas partículas A y B con cantidades de movimiento $-p_A$ y $-p_B$ producen las partículas C y D con cantidades de movimiento $-p_C$ y $-p_D$ con la misma probabilidad que R, significa que el proceso es invariante bajo paridad (P), o bien diremos que presenta simetría P.

Alumno: Entonces, si se habla de proceso invariante o de *invariancia* en general nos referimos a la conservación de cierta simetría.

Profesor: Así es. Otro principio de simetría es la conjugación de carga. Una transformación es invariante bajo la conjugación de carga cuando tiene la misma probabilidad de producirse siempre que hayamos sustituido cada partícula por su propia antipartícula, es decir, hayamos realizado la transformación conjugada con la misma probabilidad que la original.

Alumno: Ahora lo que hacemos es cambiar el electrón por el positrón, o un quark por su antiquark correspondiente.

Profesor: Sí. Continuando con el ejemplo anterior de la transformación R, si se sustituyen las partículas A, B, C y D por sus respectivas antipartículas, R se convierte en su reacción conjugada, que denotaremos por C(R):

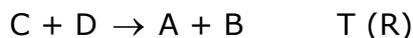


donde \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} y \bar{D} son las correspondientes antipartículas.

Si C(R) tiene lugar y se produce además con la misma probabilidad que R, decimos que el proceso es invariante bajo conjugación de carga (C), o lo que es igual, presenta simetría C.

Alumno: ¿Existe algún tipo más de simetría que debemos considerar?

Profesor: Finalmente, encontramos el principio de simetría de inversión temporal, o reversibilidad del tiempo, el cual se define de forma similar. El principio afirma que si un proceso R, como el ya descrito en nuestro ejemplo, es invariante bajo T, la probabilidad de la reacción inversa, que denotaremos por T(R):



es igual a la probabilidad de R.

Alumno: Lógicamente, las cuatro interacciones fundamentales responderán a distintos tipos de simetría puesto que se deben a propiedades diferentes. ¿Es cierto?

Profesor: Se ha demostrado que los cuatro tipos de interacción presentan, no sólo distinta intensidad y alcance, sino clases de simetría muy diferentes.

Hasta 1956 se creía que la simetría de reflexión espacial (o conservación de la paridad) se daba en todas las interacciones. Sin embargo, en dicho año, los físicos estadounidenses de origen chino Tsung-Dao Lee y Chen Ning Yang indicaron que en realidad no se había comprobado la conservación de la paridad en la interacción débil, y sugirieron varios experimentos para hacerlo. Uno de ellos fue realizado al año siguiente por la profesora, también de origen chino, Chien-Shiung Wu y sus colaboradores en la Universidad de Columbia (Figura 28).

Alumno: ¿En qué consistió dicho experimento?

Profesor: A pesar de las dificultades técnicas, la idea básica del experimento era relativamente sencilla. Una muestra de material radiactivo, el isótopo cobalto-60, se enfría hasta unas décimas por encima del cero absoluto y se somete a la acción de un intenso campo magnético con el fin de alinear los espines de todos los núcleos en la misma dirección.

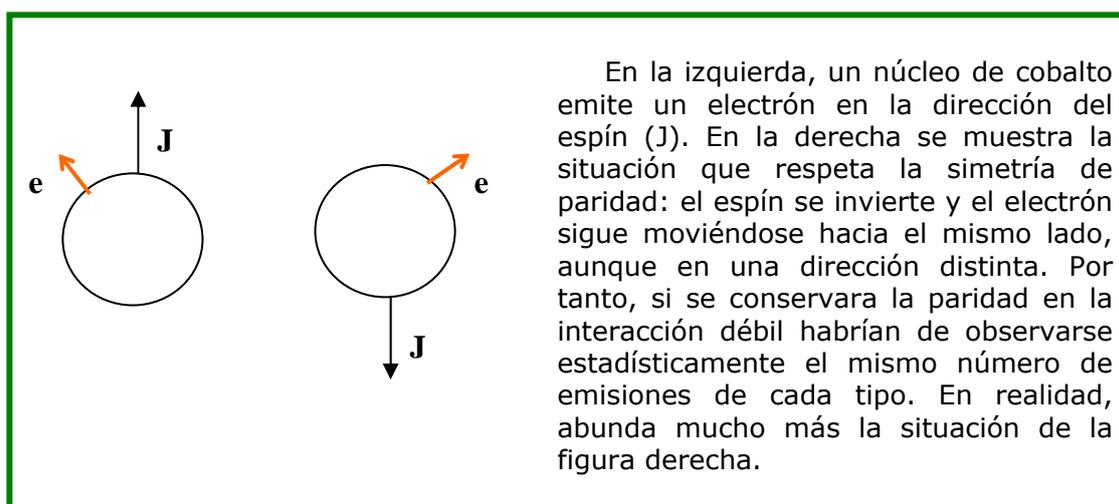


Figura 28.- Experimento de Wu.

Alumno: ¿Por qué se tiene que llegar una temperatura tan baja?

Profesor: Es necesaria para evitar que las oscilaciones atómicas desordenen dicho alineamiento. El isótopo estudiado sufre la desintegración beta y se pudo comprobar que los electrones emitidos salían preferentemente con su espín contrario al del núcleo emisor, en lugar de mostrar una probabilidad del 50 % para ambas situaciones como exigiría la conservación de la paridad.

La consecuencia más inmediata fue el descubrimiento de que las partículas emitidas en la interacción débil tienden a mostrar una relación determinada entre su espín y su sentido de movimiento. En particular, los neutrinos electrónicos y muónicos, que sólo están implicados en las interacciones débil y gravitatoria, siempre tienen un espín levógiro, es decir, de sentido opuesto a su movimiento.

Posteriormente, los físicos estadounidenses James Cronin y Val Fitch descubrieron en 1964 que la interacción débil no es simétrica tampoco bajo inversión temporal.

El estudio comparativo de las simetrías en los cuatro tipos de interacciones ha puesto de manifiesto un hecho importante: parecen estar dispuestas jerárquicamente, es decir, cuanto mayor es la fuerza, más propiedades se conservan. Por ejemplo, la interacción fuerte no depende de la carga eléctrica de las partículas que intervienen y presenta simetría CPT. Pero si descendemos en un peldaño hasta la fuerza electromagnética, esa afirmación ya no es totalmente cierta, puesto que el neutrón no se ve afectado por la fuerza electromagnética que sí actúa sobre el protón. Del mismo modo, tanto la fuerza electromagnética como la nuclear fuerte conservan la paridad, mientras que la débil no lo hace.

10.5. Electrodinámica cuántica y renormalización

Alumno: Es obvio que las consideraciones de simetría han simplificado bastante el tratamiento matemático de las interacciones en la teoría cuántica de campos. Me pregunto si habrá surgido en algún momento una dificultad grave que haya podido poner en peligro dicha teoría.

Profesor: Claro. Su desarrollo no ha sido, como vulgarmente se dice, un camino de rosas. La primera, y más grande, espina se presentó en la década de los cuarenta. En ese tiempo, la moral había subido por el éxito que supuso para la teoría el haber confirmado la existencia de la antimateria, predicha por Paul Dirac, como ya hemos comentado antes. El respaldo experimental llegó en 1932 al ser descubierto el positrón en el Instituto de Tecnología de California por Carl Anderson.

Pero la alegría se vio empañada al aplicar la teoría al cálculo de las interacciones, pues surgían *valores infinitos* para ciertas magnitudes, como la carga o la masa, debido a los campos extraordinariamente intensos que debían existir en las inmediaciones de las partículas. Era una grave dificultad, si bien esperable por el tipo de planteamiento que hace la teoría.

Alumno: ¿En qué sentido afecta el planteamiento a los valores infinitos de esas propiedades?

Profesor: Se puede entender si nos trasladamos a un caso muy similar que ya hemos estudiado. En el modelo de Schrödinger de la mecánica

ondulatoria, el cuadrado de la función de onda que describe el movimiento del electrón representa la probabilidad de hallarlo en cada punto del espacio. Pues bien, por pequeña que sea, siempre existe una cierta probabilidad. Cuando queremos calcular la probabilidad total en una región, por ejemplo, en un cierto orbital, sumando las probabilidades de todos sus puntos, nos dará un valor infinito.

Alumno: ¡Eso es absurdo!

Profesor: Por supuesto. Esta aberración matemática se soluciona muy fácilmente estableciendo la condición obligatoria de que la probabilidad total sea 1. En los cálculos que se derivan de ello, las funciones de onda del electrón vienen corregidas por determinados coeficientes y se dice que están *normalizadas*.

Alumno: Comprendo. La solución pasa por aplicar los recursos matemáticos precisos. ¿Cuáles fueron en el caso de la teoría cuántica de campos?

Profesor: Aparentemente, no pareció en exceso complicada. Había que eliminar esos infinitos sustrayendo cantidades infinitas, en un método llamado de renormalización. El conflicto surgió porque esas cantidades no son parámetros físicos propiamente dichos.

Alumno: Volvemos a ser pesimistas. No es tan sencilla la solución.

Profesor: El túnel se estrechaba y oscurecía hasta que, entre los años 1947 y 1949, el trabajo del físico japonés Sinitiro Tomonaga, los norteamericanos Julian Schwinger y Richard Feynman y el estadounidense de origen británico Freeman Dyson dio sus frutos. Aplicaron los métodos de renormalización a las interacciones fotón-electrón y dedujeron los parámetros a partir de los datos experimentales de dichas interacciones. Con ello demostraron que las dificultades de divergencia, es decir, estas cantidades infinitas, efectivamente pueden aislarse y eliminarse de forma sistemática, realizando un número limitado de "*sustracciones*".

Alumno: ¿Quiere decir que para que una teoría sea *renormalizable* el número de sustracciones necesarias tiene que ser finito?

Profesor: Exactamente, porque eso significa que el número de parámetros físicos relacionados con ellas, y que deben ser calculados de modo experimental, es también limitado. Así pues, ésta fue la primera teoría cuántica de campos "renormalizada", conocida como electrodinámica cuántica.

Alumno: Se podría afirmar que es el resultado de describir el campo electromagnético a la luz de la Teoría Cuántica de Campos.

Profesor: Sí. Además, abrió el camino para el tratamiento matemático del resto de las interacciones.

10.6. Electrodinámica cuántica y simetría de gauge

Profesor: Al profundizar en el desarrollo matemático de las diversas teorías de campo se observó en todas un *sustrato común*, algo así como un lugar de encuentro de todas ellas. Este fue el primer paso realmente útil de lo que hoy conocemos como *teorías de unificación*.

Alumno: ¿Quiere eso decir que se puede utilizar un marco único para todas las teorías cuánticas de campo?

Profesor: Eso mismo. Se debió fundamentalmente a los trabajos del alemán Herman Weyl, el británico Peter Higgs y los norteamericanos Yoichiro Nambu, de origen japonés, Chen Ning Yang y Robert Mills. Observaron que todas las interacciones permiten una descripción común, denominada simetría local o *simetría gauge*, que viene de una palabra alemana cuyo significado es ambiguo, que se podría traducir como calibre, aforo o carril.

Alumno: ¿En qué consiste la simetría gauge o simetría de aforo?

Profesor: Básicamente, la interpretación de las cuatro interacciones a través del campo gauge es "relativamente sencilla". Cada tipo de interacción entre las partículas materiales o fermiones ocasiona una *ruptura local* de la simetría, de modo que su restablecimiento exige la existencia de una partícula de intercambio (bosón) cuyas características, masa, carga, isospín, color, etc., vienen dadas por el alcance e intensidad del tipo de interacción y por la ley de conservación que tenga asociada, por ejemplo la carga eléctrica en la electrodinámica. Es decir, el campo gauge para la interacción electromagnética es, lógicamente, el campo electromagnético, y la partícula de intercambio es el fotón, de carga y masa nulas, pero de alcance infinito.

Alumno: Por lo tanto, podríamos describir una interacción como una alteración en los parámetros que describen un campo cuántico, seguida, naturalmente, de una pérdida local de su simetría. A continuación, gracias al intercambio de bosones específicos, se *restablece* la simetría del campo cuántico.

Profesor: Correcto. Así pues, el planteamiento teórico postula primero la existencia de campos de materia sin interacción, los denominados campos cuánticos, que obedecen a cierta simetría, según al tipo de partículas que correspondan. Mediante la interacción ha de mantenerse la simetría local, por lo que es necesario introducir los campos gauge portadores de las interacciones. Finalmente, esto obliga a postular la existencia de nuevas partículas, los bosones de intercambio, con unas propiedades determinadas. Es curioso subrayar que no sólo se derivan las interacciones de ciertos principios de simetría, sino que las características de dichas interacciones se hallan condicionadas por la simetría.

Alumno: Luego, sucedió igual que en el método de renormalización, la electrodinámica fue la primera teoría cuántica que incorporó en su descripción la simetría de gauge.

Profesor: Evidentemente, la primera *teoría de gauge* propiamente dicha fue la Electrodinámica Cuántica. No podemos negar el inestimable valor de la QED, siglas internacionales para abreviar el nombre de esta teoría. Como sabemos, constituye un conjunto de ecuaciones que explican el electromagnetismo a partir de la naturaleza cuántica del fotón, el portador de la fuerza, y que proporcionan una base teórica para describir las interacciones de la radiación electromagnética con los átomos y sus electrones. La Electrodinámica Cuántica permite explicar el comportamiento

químico y fácilmente observable de la materia, y lógicamente engloba en su límite macroscópico la teoría electromagnética de Maxwell.

Alumno: Me imagino que esta novedad pronto tendría repercusiones.

Profesor: Creo que las consecuencias más importantes fueron la previsión de la existencia de la antimateria, que ya hemos citado anteriormente, y la determinación de la relación entre el espín de las partículas y el tipo de estadística seguido por éstas, con la distinción entre partículas de Fermi-Dirac, o fermiones, y partículas de Bose-Einstein, o bosones.

Alumno: O sea, partículas de materia y partículas de intercambio.

Profesor: En efecto. El éxito de la electrodinámica cuántica, debido a la eficacia del formalismo matemático introducido por ella y a las numerosas confirmaciones experimentales que siguieron, indujo a los físicos a aplicar el esquema formal de la teoría de gauge a las teorías cuánticas de campos de todos los tipos de interacción. De ahí surgieron la Cromodinámica Cuántica, para la interacción fuerte, y la Teoría Electrodébil, para la débil y la electromagnética.

Alumno: ¿Es tanta la importancia de la simetría de gauge para estas teorías?

Profesor: La invariancia de gauge, que es básicamente una propiedad de simetría, es importante, en primer lugar, porque su verificación implica siempre una ley de conservación. Por ejemplo, la invariancia propia de la electrodinámica cuántica implica el principio de conservación de la carga eléctrica, del mismo modo que la invariancia de la cromodinámica cuántica, otra teoría de gauge de la que luego hablaremos, exige la conservación de una magnitud cuántica propia de los nucleones, denominada espín isotópico o isospín, junto con la carga color. En segundo lugar, otra característica muy importante, que vincula a todas las teorías de gauge, atañe a la posibilidad de *resolver* las denominadas *dificultades de divergencia* que afectan generalmente a las teorías cuánticas de los campos mediante la compleja técnica matemática de renormalización, como señalábamos con anterioridad.

Alumno: En definitiva, hemos de asociar una teoría de tipo gauge al *cumplimiento* de algunas *leyes de conservación*, que nos sirven, entre otras cosas para discutir las transformaciones permitidas o posibles y descartar las no permitidas por la teoría y, al mismo tiempo sabemos que es *renormalizable*, o sea, que no va a presentar graves dificultades de cálculo. Pero, ¿son tan homogéneas este grupo de teorías? ¿No presentan algunas diferencias entre sí?

Profesor: A pesar de las similitudes, es obvio que denotarán ciertas diferencias. Por ejemplo, según las características del grupo en que se basa, una teoría de gauge puede ser abeliana o no abeliana. La electrodinámica cuántica es una teoría de gauge abeliana, ya que el grupo de transformaciones respecto al cual resulta invariante es abeliano, es decir, está constituido por elementos que cumplen la propiedad conmutativa.

Alumno: ¿Y eso que implica?

Profesor: Que al aplicar dos operaciones sucesivas en una teoría abeliana el resultado no depende del orden en que dichas transformaciones se

hagan. Por el contrario, las otras teorías de gauge, entre las que se encuentran la cromodinámica cuántica y la teoría electrodébil, no tienen las mismas propiedades, pues dos operaciones sucesivas han de llevarse a cabo en un determinado orden, pues de lo contrario, conducirían a resultados distintos.

10.7. Cromodinámica cuántica

Alumno: ¿Cuáles son las peculiaridades de la Cromodinámica Cuántica?

Profesor: Esta teoría de las interacciones fuertes, propuesta por Yang y Mills, representa la aplicación de los conceptos de la simetría gauge al campo nuclear fuerte. También se la conoce como QCD, las siglas de su nombre en inglés "*Quantum Chromodynamics*" y por analogía con QED, "*Quantum Electrodynamics*", con la que guarda grandes similitudes, como ya se ha dicho.

Alumno: ¿En qué momento surge?

Profesor: En una primera etapa, desarrollada en los años cincuenta del pasado siglo, Yang y Mills se basan en la *simetría de isospín*, propia de las interacciones fuertes. Consiste en mostrar que estas fuerzas son independientes de la carga eléctrica. Por lo tanto, el protón y el neutrón son los dos componentes de un campo único.

Alumno: Es como decir que representan dos estados diferentes para el campo, o dos estados diferentes para una partícula.

Profesor: Sí. De este modo, la simetría de isospín implica la propiedad que tienen los protones de mantenerse unidos en el núcleo igual que los neutrones, *ignorando*, por decirlo así, su carga eléctrica positiva y eludiendo de algún modo la fuerza de repulsión eléctrica.

Alumno: ¿Cómo situamos a la QCD dentro de la teoría de grupos?

Profesor: En la teoría matemática de grupos, que recordemos es un concepto que engloba a los diversos tipos de simetrías, se demuestra que las transformaciones entre sus componentes cumplen siempre tres *axiomas*.

Alumno: ¿Todas las teorías cumplen únicamente tres axiomas? ¿Cuáles son?

Profesor: Son tres axiomas comunes. Luego pueden darse más propiedades según la categoría del grupo. Así pues, un grupo es un conjunto de operaciones de simetría de modo que el producto de dos de ellas da lugar a una operación del grupo; es el primer axioma. En segundo lugar, existe sólo una operación identidad en el grupo y como tercer axioma, se cumplirá que para cada operación existe una inversa.

Alumno: Y si además se verifica la propiedad conmutativa, el grupo será abeliano.

Profesor: Pero no ocurre así con la simetría de isospín. El grupo que constituye se corresponde con el tipo SU(2) de la teoría matemática general de todos los grupos posibles. Es un grupo no conmutativo o no abeliano, porque no poseen dicha propiedad.

Alumno: ¿Por qué?

Profesor: En nuestro caso, el cumplimiento de la propiedad conmutativa exigiría que los bosones de intercambio fueran de *masa en reposo nula* y que la interacción fuerte tuviese un *alcance infinito*.

Alumno: Afortunadamente esto no es así, porque de lo contrario el universo no existiría tal y como es.

Profesor: Pero, al mismo tiempo, es un obstáculo para la descripción completa de la teoría. Sin embargo, los trabajos de Wally Greenberg en 1965, que se vieron completados por el de Y. Nambu y T. Han acerca del spin de las partículas y el principio de exclusión de Pauli culminaron en 1970 con la propuesta de Murray Gell-Mann y Harald Fritzsch del *número cuántico color*, lo que sirvió para que Yang y Mills conformaran definitivamente su teoría en una segunda etapa, a principios de los setenta.

Alumno: ¿Podemos concretar algo más el concepto de *color*?

Profesor: La carga de color puede adoptar tres valores en los quarks, componentes de los hadrones como sabemos. Ahora bien, estos últimos son acromáticos, sin color final. Eso se interpreta desde el punto de vista matemático diciendo que se trata de una simetría interna, o lo que es igual, afirmando que los hadrones son *escalares de color*. En suma, la cromodinámica cuántica es una teoría de gauge no abeliana que se encuadra en el grupo $SU(3)$, basada en la invariancia gauge del grupo respecto al campo de color de los quarks.

Alumno: En el modelo estándar se indicaba que hay ocho gluones responsables de la conservación del color. ¿Se puede deducir eso a partir del tipo de grupo de la QCD?

Profesor: Por supuesto. Ya hemos comentado lo útil que resulta estudiar las simetrías de las interacciones aplicando la teoría de grupos. Es decir, según la teoría de grupos gauge, para un grupo general que designaremos por $SU(N)$ se demuestra que tiene N componentes en el campo de materia y $N^2 - 1$ en el campo gauge. En el caso de la QCD, para la que N es igual a tres, hay precisamente tres quarks, con tres colores posibles, agrupados en las partículas materiales o fermiones (concretamente en las que llamamos hadrones) y ocho bosones de intercambio en el campo gauge, los ocho gluones.

Alumno: Puesto que los gluones tienen color, encontramos otra particularidad de la QCD, es decir, los gluones interaccionan entre sí. ¿Es correcto?

Profesor: En efecto. Si utilizamos diagramas de Feynman para representar tres ejemplos de interacciones en QCD, podemos observar cómo un quark puede modificar su color, cómo cambian de color dos quarks a través de su gluón mediador de la interacción, o finalmente, cómo interactúan los gluones (Figura 29).

Alumno: Me imagino que la QCD habrá podido explicar la estructura interna de quarks de todos los hadrones conocidos, incluyendo sus diferentes propiedades.

Profesor: Por supuesto. E incluso se ha aplicado para describir la estructura de los mesones, compuestos por las parejas quark-antiquark y, lo más importante, desde su desarrollo completo hacia 1974, la teoría ha

permitido realizar predicciones sobre partículas desconocidas que respondían a ciertas combinaciones de quarks aún no observadas y que posteriormente fueron detectadas en los aceleradores como la partícula J/ψ (J/ψ) o el barión Λ (lambda).

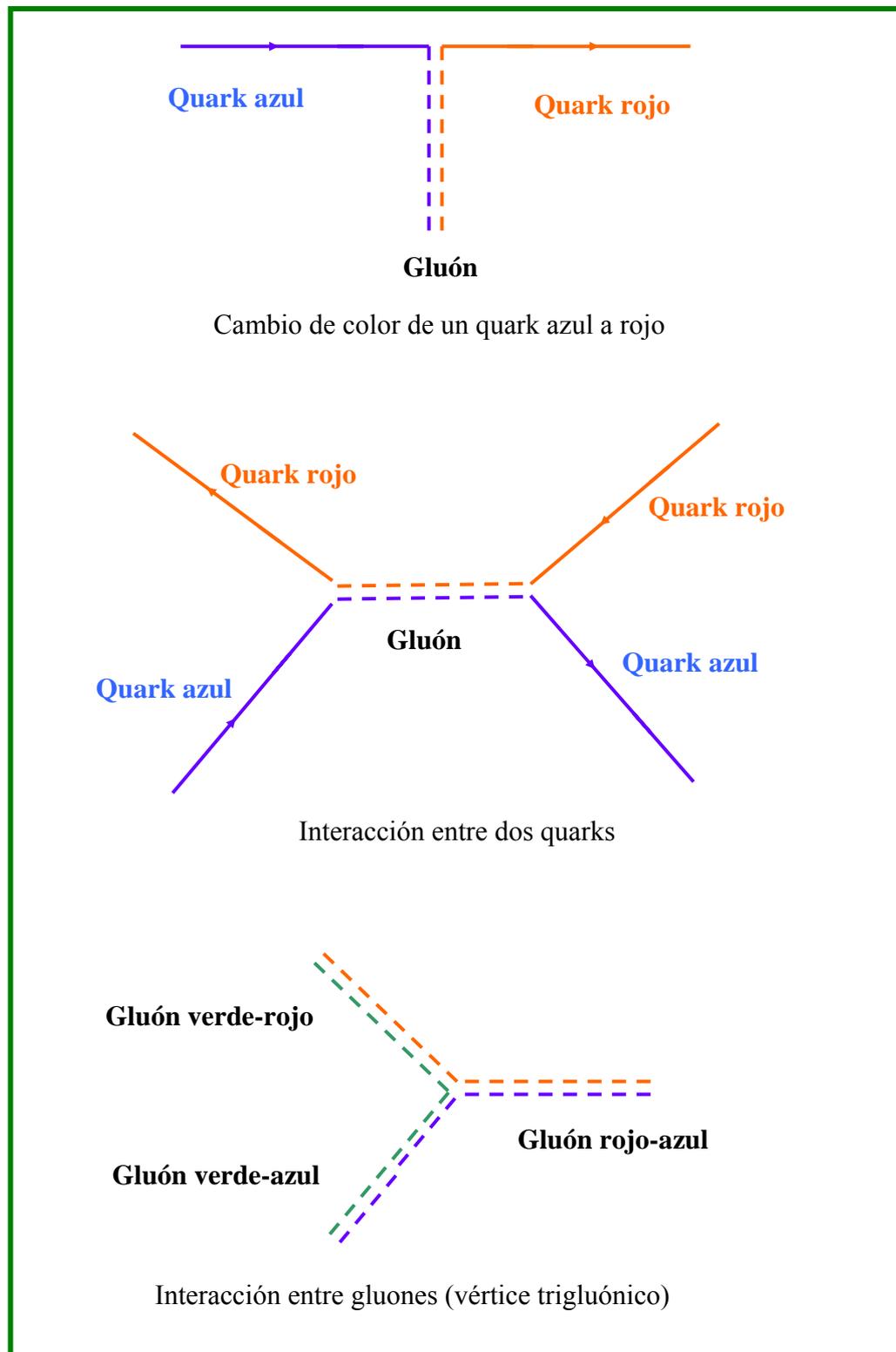


Figura 29.- Ejemplos de interacciones en Cromodinámica Cuántica.

Alumno: Una última pregunta acerca de la Cromodinámica Cuántica. ¿Por qué es precisamente tres el número de colores y no otra cantidad cualquiera de ellos?

Profesor: Hay suficientes razones que demuestran irrefutablemente a lo largo del desarrollo matemático de la QCD que el número de colores necesarios es exactamente tres, lo cual, dicho sea de paso, viene muy bien para situar a dicha teoría en el grupo denominado $SU(3)$, aunque, como supondrás esa razón tan simple no justificaría tal postulado.

Las mejores pruebas las aportan todas y cada una de las partículas conocidas, bariones o mesones, cuya estructura interna de quarks quedan perfectamente explicadas. A título ilustrativo podemos discutir uno de los muchos ejemplos, como es el caso de la partícula Δ^{++} , muy indicado porque no se necesita profundizar en exceso para dejar claro la necesidad manifiesta de los *tres estados de color* (Figura 30).

Sabemos que su masa es de 1232 MeV y su espín vale $3/2$. Además, lógicamente su carga eléctrica es $+2$. Pues bien, la única estructura de quarks compatible para dicha partícula es uuu , es decir, los tres quarks ligeros del tipo up (de carga $+2/3$, cada uno) con sus espines paralelos. Esto último es estrictamente necesario porque el espín del quark u , al igual que el todos los quarks, es $1/2$.

Alumno: Entonces, queda completamente justificada la estructura de la partícula delta. No veo la necesidad de introducir el color.

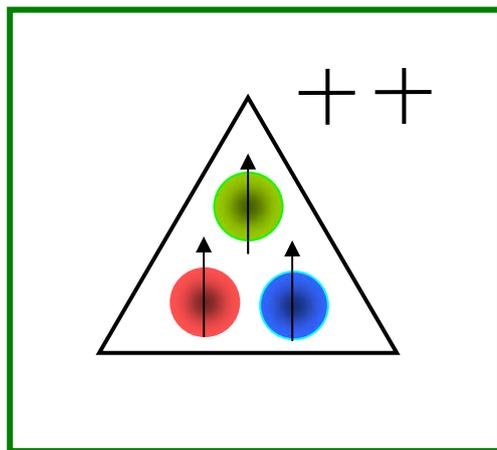


Figura 30.- La partícula Δ^{++} está compuesta por tres quarks u , con espines paralelos.

Profesor: Un momento. Sabemos que hay un principio fundamental de la mecánica cuántica que afecta a todos los fermiones y lógicamente deberán cumplir también los quarks, me refiero al principio de exclusión de Pauli. Básicamente afirma que dos fermiones no se pueden encontrar en el mismo estado cuántico, es decir, no pueden tener todos sus números cuánticos iguales.

Alumno: Lo recuerdo. Por ejemplo dos electrones de un mismo orbital tienen idénticos los valores de sus números cuánticos n , l y m , pero se diferencian en el espín, ya que uno es $1/2$ y el otro $-1/2$.

Profesor: Como no puede permitirse que tres quarks u con sus respectivos espines alineados formen una partícula, debe postularse la existencia del número cuántico de color, que además es necesario que posea tres valores posibles. Así uno de los quarks u tiene color rojo, otro azul y el tercero verde. Ya no se hallan en el mismo estado cuántico y cumplen, por consiguiente, el principio de exclusión.

10.8. Cuestiones

Si no se conocen las respuestas a las siguientes cuestiones es aconsejable una nueva lectura de este capítulo.

- En un sentido clásico, ¿qué entendemos por campo?
- Señale las principales diferencias entre el espacio-tiempo de Riemann y el de Minkowski.
- ¿Cuál es la idea principal de la Teoría Cuántica de Campos?
- ¿Para qué sirven los números cuánticos?
- ¿Cómo afecta la constante de acoplamiento de las interacciones nucleares fuertes a la hora de desarrollar un tratamiento matemático similar al de las fuerzas débiles?
- ¿Qué significado tiene la simetría de las interacciones? ¿Qué nos dice el teorema de Noether?
- Discuta en qué consisten las técnicas de renormalización.
- ¿En qué consiste la simetría de gauge y qué consecuencias tiene en el estudio de las interacciones fundamentales?
- ¿Qué representa la simetría de isospín y cómo se aplicó a la Cromodinámica Cuántica?
- ¿Para qué sirve el número cuántico color?
- Justifique la existencia de la partícula Δ^{++} , cuya masa es de 1232 MeV y su espín vale $3/2$, a la luz de la Cromodinámica Cuántica.

11. UNIFICACIÓN DE LAS TEORÍAS

Alumno: Observando las grandes similitudes entre las teorías cuánticas de campo para las diferentes fuerzas ¿no sería descabellado pensar en una formulación común, al estilo del campo electromagnético de Maxwell?

Profesor: Es una idea que ha preocupado a los físicos desde hace casi un siglo. Prácticamente, desde el mismo momento en que surgieron dichas teorías. El propio Einstein dedicó grandes esfuerzos a este asunto durante los últimos treinta años de su vida, aunque no se vieron coronados por el éxito.

Alumno: ¿En qué se equivocó?

Profesor: Fundamentalmente, él intentó darle el mismo enfoque que a la Teoría de la Relatividad, en lo que denominó *Teoría del Campo Unificado*, y buscó la explicación de todas las interacciones mediante una transformación de la *geometría* del espacio-tiempo motivada por las propiedades de los cuerpos. Einstein intentó desarrollar una teoría que representara las fuerzas y las partículas materiales exclusivamente por campos, y en la que las partículas serían regiones con una intensidad de campo muy elevada.

Alumno: Son planteamientos muy parecidos a los de la Teoría Cuántica de Campos.

Profesor: Sin embargo, el desarrollo de la Mecánica Cuántica y el descubrimiento de muchas partículas nuevas oscurecieron estos intentos, al ofrecer mejores líneas de investigación, e impidieron que Einstein lograra formular una teoría unificada basada exclusivamente en la Relatividad y la Física clásica.

Alumno: En cualquier caso, Einstein señaló el camino.

Profesor: El uso de estas ideas ha sido muy útil en la unificación parcial de dos interacciones, la electromagnética y la nuclear débil, y será con toda seguridad una seña de identidad en la Física de Partículas de los próximos años. Ya se ha intentado una ampliación cualitativa del concepto de simetría de gauge para tratar de unificar todas las interacciones con las teorías de la *supersimetría* y la *supergravedad*.

Alumno: Me imagino que eso llevará algún tiempo, pero tengo la impresión de que sus resultados, si se consiguen, compensarán con creces todos los esfuerzos.

Profesor: Indudablemente. El objetivo último es comprender la estructura fundamental de la materia a partir de unos principios de simetría unificados. Desgraciadamente, no es probable que se alcance esta meta en un futuro cercano, pues hay muchas dificultades de tipo teórico y experimental.

Alumno: ¿Cuáles son los problemas más serios?

Profesor: En el aspecto teórico, las complejidades matemáticas de la teoría cuántica de gauge son muy grandes. Por ejemplo, a determinadas energías, todas las interacciones deben ser invariantes bajo las operaciones de conjugación de carga, paridad e inversión temporal, lo que designa por simetría CPT, y como sabemos, en este marco difícilmente encaja la fuerza

débil. Además, han surgido también fundadas sospechas de que siempre se cumpla en todas ellas, con exactitud, la simetría de inversión temporal.

En el aspecto experimental, el estudio de la estructura de partículas elementales de dimensiones cada día menores presenta unos requerimientos energéticos sucesivamente mayores, lo que exige la construcción de aceleradores y detectores de partículas más potentes. Aunque, hoy por hoy, los gobiernos de Estados Unidos y la Unión Europea continúan apoyando estas investigaciones, los recursos humanos y financieros necesarios para seguir progresando son tan tremendos que el ritmo del avance es muy posible que no pueda mantenerse en el futuro.

Alumno: De todas maneras, ya se han conseguido unificaciones parciales, ¿no es así?

11.1. Teoría electrodébil

Profesor: Hasta los años sesenta aún se estudiaban separadamente las interacciones, pero entre 1967 y 1968 se produjo otro hecho importante en el devenir de las teorías de campo, que también ha marcado el modo de actuación de los físicos de partículas desde entonces, señalando las líneas teóricas con mayores posibilidades de éxito.

Alumno: ¿A qué logro se refiere?

Profesor: Sheldon Glashow, Steven Weinberg y Abdus Salam lograron unificar la teoría electromagnética con las interacciones débiles, apoyándose en los trabajos de Yang y Mills sobre simetrías no abelianas de 1957 y los de Higgs, Brout y Englert, hasta el año 1965, acerca de la ruptura espontánea de la simetría en teorías no abelianas.

Alumno: ¿Debemos entender, pues, que la descripción de las fuerzas electromagnéticas y las débiles se puede hacer mediante una sola teoría?

Profesor: En efecto. Según esta teoría electrodébil, la interacción electromagnética corresponde al intercambio de fotones, y la interacción débil al intercambio de bosones W y Z . Se postula que estos bosones pertenecen a la misma familia de partículas que los fotones, por lo que el desarrollo teórico impone cuatro bosones de gauge de masa nula.

Alumno: Entonces, ¿cómo se explica que los tres mediadores de la interacción débil tengan masa, mientras que el de la fuerza electromagnética no la tenga?

Profesor: El trabajo de Higgs lo justifica a partir de un mecanismo matemático, que consiste en introducir una nueva partícula de espín y carga eléctrica nulos, designada como bosón de Higgs. Esta partícula virtual es la materialización del hipotético campo de Higgs, el responsable de la ruptura de la simetría electrodébil, a una energía determinada, dejando subsistir sólo la *simetría residual* del electromagnetismo. Así, los tres bosones, W^+ , W^- y Z , que hasta entonces, es decir, a mayores energías, carecían de masa, la adquieren gracias al bosón de Higgs, y en cambio la del fotón sigue siendo nula. De esta forma, las dos interacciones, la débil y la electromagnética, ahora están diferenciadas, a energías menores.

Alumno: En otras palabras, cuando nos hallamos en niveles de energía muy altos, del orden de los TeV, las fuerzas débiles y las electromagnéticas son indistinguibles, esto es, se comportan como una sola fuerza. No obstante, a energías un poco menores, del orden de los MeV, dichas interacciones se separan y se identifican como dos fuerzas distintas.

Profesor: Sí. En eso consiste la idea de unificación de las interacciones.

Alumno: Ahora bien, ¿dónde radica la aportación de Weinberg y Salam?

Profesor: En apreciar algo que ni el propio Higgs advirtió. Pues, lo que él, igual que la mayoría de los físicos teóricos de los sesenta, creía un simple *juego matemático* para explicar el posible mecanismo de la ruptura de simetría en un campo gauge, Weinberg y Salam, con la importante colaboración del también norteamericano Sheldon Glashow, se dieron cuenta de que podía utilizarse para unificar ambas interacciones.

Es decir, según el mecanismo de Higgs, hay que introducir un nuevo campo, el campo de Higgs, en el propio campo cuántico de medida, de manera que ambos se hallan superpuestos. Esto lleva a considerar que el vacío, es decir, el nivel de mínima energía, está degenerado infinitamente y corresponde a un valor del campo de Higgs distinto de cero.

Alumno: Volvemos, en cierta manera, al antiguo planteamiento que Pauli hizo sobre el vacío, salvo que ahora no se le supone constituido por un mar de partículas con energía negativa, sino formando un "misterioso" campo de Higgs.

Profesor: Así es. Cuando la naturaleza elige un determinado estado en el vacío se rompe la simetría y el efecto provocado es que todas las partículas conocidas, con masa nula a muy altas energías, adquieren masa a energías inferiores.

Por su trascendental trabajo de la unificación electrodébil, Glashow, Weinberg y Salam recibieron el premio Nobel en 1979.

Alumno: Lo lógico es centrarse en la búsqueda del bosón propuesto por Higgs. ¿Se ha hecho ya?

Profesor: Desgraciadamente, la teoría electrodébil no dice nada acerca de la masa del bosón de Higgs, salvo que difícilmente puede exceder de 1 TeV. Se estima cercana a unos 100 GeV e inferior a 250 GeV con un nivel de confianza del 95 %. Su determinación es tarea de los aceleradores de partículas en el futuro. Ya hemos mencionado a C. Tully, que trabajando en el colisionador LEP (Large Electron-positron Collider) del CERN, afirmó haberlo detectado en el año 2000, con una masa de 115 GeV.

Alumno: Por consiguiente, no debemos lanzar las campanas al vuelo.

Profesor: Ni mucho menos. A pesar del tiempo transcurrido, por el momento no se han ratificado los datos de Tully, así pues, la búsqueda continúa tanto en Europa como en el Fermilab. Precisamente en el CERN de Ginebra se está construyendo un colisionador más potente, el LHC, que se espera tener a pleno rendimiento en breve plazo y cuyo objetivo principal será la detección de esta partícula.

Es importante resaltar que la confirmación de la existencia del bosón de Higgs no sólo servirá para abrir definitivamente las puertas a la unificación de las interacciones sino que ofrece un nuevo e interesante enfoque del *concepto de vacío*, un gran interrogante de la Física Moderna. No podemos definirlo como una "nada", sino como un estado de energía mínima que contiene campos correspondientes a partículas que se vuelven observables si se les proporciona energía. Y una vez más nos encontramos con los grandes colisionadores como los verdaderos jueces de estas interpretaciones.

11.2. Teorías de gran unificación

Alumno: Entonces, ahora ¿cuál es el objetivo más inmediato?

Profesor: En la actualidad, los físicos teóricos tratan de ampliar la teoría electrodébil de Glashow, Weinberg y Salam a la interacción nuclear fuerte, empleando, como es lógico, teorías de simetría. Durante varias décadas los científicos han tratado de demostrar que esas fuerzas son distintas manifestaciones de una única fuerza subyacente. Esos intentos se conocen como teorías de gran unificación (GUT, de acuerdo con sus siglas en inglés de Grand Unification Theory) y, por el momento, son bastante especulativos.

Alumno: Me da la impresión de que esas consideraciones obedecen a una actitud de prudencia. Después de conocer las semejanzas entre las líneas maestras de las diferentes teorías parciales de las interacciones no sería pecar de exceso de optimismo cuando se dice que es posible hallar una teoría unificada.

Profesor: No debemos perder la perspectiva al comparar la QCD con la QED. Hay una diferencia enorme, que dificulta el desarrollo matemático de la unificación, mientras que la Electrodinámica Cuántica sólo necesita cuatro bosones, la Cromodinámica presenta ocho gluones de intercambio.

Alumno: Además hay que tener en cuenta otro hecho. Sabemos que los quarks se ven afectados tanto por las interacciones débiles como por las fuertes, y sin embargo, los leptones sólo responden a las fuerzas débiles, al margen, lógicamente de las electromagnéticas y las gravitatorias.

Profesor: Muy bien puntualizado. Los primeros intentos para resolver estos problemas fueron llevados a cabo en 1973 por Jogesh Pati y Abdus Salam y, naturalmente, requieren la no diferenciación entre quarks y leptones a muy altas energías, proponiendo que los leptones fuesen considerados como un *cuarto color* de los quarks.

Esta idea ha sido madurada un año después por Howard Georgi y Sheldon Glashow de la universidad de Harvard, desarrollando una variante del grupo de simetrías designado por SU(5) en la que es necesario admitir la existencia de *doce bosones X* y donde, lógicamente, son intercambiables los quarks y los leptones a muy altas energías. Este hecho ofrece una consecuencia muy interesante, la posibilidad de que el protón no sea estable a valores muy elevados de energía. Incluso se le ha calculado una vida media de 10^{31} años, un dato que ahora mismo se encuentra en el límite de nuestra observación.

Alumno: No observo la relación entre la unificación de las interacciones débiles y fuertes con una posible desintegración del protón.

Profesor: Pues hay una razón muy clara. Suponiendo que a muy grandes energías, pongamos por caso, 10^{15} GeV, las fuerzas cromodinámicas y electrodébiles estén unidas, quiere decir que a esos niveles desaparece la distinción entre leptones y quarks, siendo todos ellos distintas manifestaciones de un mismo tipo de fermiones. De este modo, carece de sentido la conservación del número de bariones en los posibles procesos, por lo que el protón teóricamente ya puede desintegrarse, por ejemplo en un mesón pi y un positrón.

Alumno: En cualquier caso, nos enfrentamos a un dilema difícil de resolver. Si la edad del universo se puede expresar con una potencia de 10^{10} no veo cómo podemos dilucidar si la vida media del protón es o no es de 10^{31} años.

Profesor: Muy sencillo, reuniendo una suficiente cantidad de protones en un mismo experimento. Así, se han dispuesto en Cleveland unas instalaciones subterráneas en el interior de una mina a 800 m de profundidad, con un gran depósito de agua pura con capacidad para unas 7000 toneladas, es decir unos 10^{34} protones. Otros dispositivos semejantes se han construido en diversas instalaciones, como las del laboratorio subterráneo de Modane, situado en el túnel de Fréjus que une a Francia e Italia, o las del túnel del Mont-Blanc, entre otras. No obstante, y tras unos 25 años de observación, aún no se ha detectado la desintegración de un solo protón.

Alumno: ¿Y el aspecto matemático de la teoría unificada? ¿Permite explicar las propiedades de las interacciones por separado, a "bajas energías"?

Profesor: Por supuesto. Es una condición necesaria. Ten en cuenta que el grupo de simetría SU(5) engloba en una misma simetría gauge a los grupos U(1) de la interacción electromagnética, SU(2) de las interacciones débiles y SU(3) de las interacciones fuertes. Así, puesto que SU(5) es un grupo de orden cinco, ha de presentar 24 generadores o bosones de interacción. Por lo tanto, contiene al fotón, a los tres bosones vectoriales de la fuerza débil y a los ocho tipos de gluones de las interacciones fuertes, es decir, al total de los doce tipos de bosones ya conocidos. Para completar las otras doce partículas virtuales se postula la existencia de los doce bosones X antes mencionados, cuyas cargas tienen que ser $-1/3$ ó $-4/3$ y cuyas masas deben rondar los 10^{15} GeV.

Alumno: ¿Cómo se puede estimar su masa a tan altos niveles de energía?

Profesor: Dentro de lo que cabe, es bastante sencillo. Pensamos que los bosones X permiten el intercambio entre quarks y leptones y sabemos que esto sólo puede tener lugar cuando las tres interacciones sean indistinguibles y presenten el mismo valor de sus constantes de acoplamiento. Por lo tanto, únicamente hemos de calcular el orden de magnitud de las energías necesarias para dicha convergencia y resulta ser de unos 10^{15} GeV. Precisamente se ha propuesto la denominación de leptokuarks X para dichas partículas.

Alumno: De todas maneras, todavía nos queda abordar la *unificación de la gravedad*. Esta interacción es la que plantea más problemas, ¿no es cierto?

Profesor: En general, ya hemos dicho que la unificación del tratamiento de las interacciones presenta importantes obstáculos. Si, además, intentamos añadir la gravitación, se agravan las dificultades de naturaleza formal, que complican el equilibrio matemático de estas teorías de campo, haciendo necesarios procedimientos de renormalización, de los que ya hemos hablado.

Existe el grave inconveniente de que aún falta una teoría cuántica apropiada para la interacción gravitacional, pues al desarrollar los cálculos sólo disponemos de dos cantidades ajustables para eliminar los infinitos en el correspondiente procedimiento de renormalización, que son el valor de la constante cosmológica y el de la intensidad de la gravedad. Obviamente, estos dos únicos parámetros no bastan para evitar las divergencias en las ecuaciones.

Si a todo ello unimos los enormes requerimientos energéticos de las comprobaciones experimentales, es evidente que las dificultades para abordar la unificación de las diversas interacciones conocidas en una única teoría, denominada precisamente *Teoría del Todo*, justifican que no haya encontrado todavía una formulación definitiva.

Alumno: ¿Hay forma de estimar el orden de magnitud de las energías que deberían alcanzar los experimentos?

Profesor: Se puede hacer con una buena aproximación si expresamos el valor de la *constante de gravitación universal*, G , que describe la intensidad de las fuerzas gravitatorias en unidades de energía, lo que conocen los físicos de partículas como *energía de Planck*. Su valor resulta ser de unos 10^{19} GeV, muy por encima de las disposiciones actuales.

11.3. Teoría del todo

Alumno: Comprendo las dificultades. Sin embargo, en el supuesto de que se lograran soslayar todos los obstáculos, ¿qué puede significar la Teoría del Todo?

Profesor: Entendemos por "*Teoría del todo*" o "*Teoría Unificada*", designada abreviadamente por sus siglas en inglés TOE (Theory Of Everything), una estructura teórica hipotética que, en caso de ser formulada, proporcionaría una descripción unificada de todas las fuerzas de la naturaleza, incluyendo, lógicamente, a la gravedad. Además de resumir brevemente la Física fundamental, una TOE podría explicar por qué las leyes físicas son precisamente las que conocemos, es decir, dicho de otro modo, por qué el universo es como es. El físico estadounidense Steven Weinberg ha argumentado que una teoría del todo estaría "lógicamente aislada", lo que significa que no se podría modificar sin destruirla.

Alumno: Dicho vulgarmente, o la tomas o la dejas.

Profesor: Claro. Si se completa y se verifica ya no habrá lugar a la discusión, pues todas las fuerzas estarán integradas. Sin embargo, llegados

a este punto nos asalta una interrogante. ¿Será esto posible o sólo es un ideal teórico, una ambición de la Física Teórica carente de realidad?

Alumno: Pero... ¿hay algún modo de saberlo?

Profesor: Apostar sobre seguro es prácticamente imposible. No obstante, la historia de la Física sugiere que podría ser posible una teoría definitiva así, pues algo parecido ya ha sucedido con anterioridad.

Así, la teoría de la gravitación formulada por el físico británico Isaac Newton en 1687 proporcionó una descripción unificada del movimiento de los astros y del movimiento de la caída de una manzana, es decir reunió la mecánica celeste y la mecánica terrestre en un mismo tratamiento. De un modo similar, la teoría del electromagnetismo de Maxwell, enunciada alrededor de 1873, unificó los fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos. Alrededor de 1968, Weinberg y Salam formularon independientemente la teoría electrodébil, que unifica la interacción débil y la fuerza electromagnética (Tabla 9).

Por todo eso, estamos legitimados para pensar que las GUT, que estudian actualmente los físicos, alcanzarán pronto una posible unificación de las interacciones electrodébil y fuerte y que, con el tiempo, se pueda aspirar a la culminación de la TOE. Por cierto, en el grupo de las actuales teorías candidatas a ser una TOE destaca la *teoría de supercuerdas*.

Alumno: No obstante, este razonamiento me parece poco fundamentado. ¿No hay algún indicio que nos permita confiar en la unificación de las interacciones gravitatorias con las restantes fuerzas?

Profesor: Ciertamente, lo hay. Cuando una estrella masiva, varias veces mayor que nuestro Sol, entra en su última fase de evolución que la lleva a un colapso gravitacional, es decir, en una etapa donde las reacciones nucleares han cesado y la única fuerza reinante es la atracción gravitatoria entre sus partículas, se origina un agujero negro.

Alumno: He oído hablar de ellos. Pero, creía que sólo eran simples conjeturas, no los tenía por "objetos" reales.

Profesor: Fue una idea propuesta por el alemán Karl Schwarzschild en 1916 como consecuencia de la Teoría de la Relatividad. Este cuerpo es tan masivo que ni siquiera la luz puede salir de allí, dado el intenso campo gravitatorio existente en él. Hasta 1994 no se tuvo constancia experimental de un agujero negro gracias al telescopio espacial Hubble, que lo detectó en el centro de la galaxia M 87. Desde entonces se han descubierto más agujeros negros en las galaxias M 105, NGC 3377 y NGC 4486B por distintos astrofísicos americanos. Lo más interesante es que J. Bekenstein y Stephen W. Hawking demostraron en los años setenta que los agujeros negros podían emitir determinados tipos de radiación, lo cual estableció la una primera relación entre Mecánica Cuántica y Gravitación.

Alumno: Entonces, el estudio de las propiedades de los agujeros negros puede servir de guía para buscar caminos alternativos para diseñar las teorías de unificación. En todo caso, deduzco que actualmente ya existen diversas opciones y supongo que habrá algunos equipos de investigadores analizando cada una de ellas. Todo ello me produce un cierto optimismo.

Profesor: En efecto, este aspecto de la Física se ha convertido en un campo apasionante para los teóricos. En estos inicios del siglo XXI nos encontramos en un momento clave de la historia de la Ciencia, que puede resultar tan espectacular como el vivido hace justamente un siglo (Tabla 9). En mi opinión, la Física Teórica va a dar un salto cualitativo en los próximos años que nos puede deparar consecuencias muy interesantes.

AÑO	TEORÍA	AUTORES (aportaciones principales)
1687	Mecánica clásica y Gravitación	Isaac Newton (Galileo, Kepler)
Final s. XVI primera mitad s. XVIII	Electricidad	Coulomb, Poisson, Gauss, Ampère, Joule, Ohm, Faraday
Final s. XVI primera mitad s. XVIII	Magnetismo	Oersted, Ampère, Faraday, Biot, Savart
1873	Campo electromagnético	James Clerk Maxwell (Faraday, Ampere, Lenz, Lorentz)
1905	Relatividad Especial	Albert Einstein (Lorentz, Minkowski)
1916	Relatividad General	Albert Einstein
1924—1927	Mecánica cuántica	Schrödinger, Heisenberg (Plank, Böhr, Dirac, Fermi, Rinstein, De Broglie, Pauli, Born)
1930	Teoría cuántica de campos	Jordan, Heisenberg, Born, Wigner, Pauli
1934—1958	Interacción Nuclear Débil	Fermi, Yukawa, Klein, Ward
1935	Interacción Nuclear Fuerte	Hidaki Yukawa
1947—1949	Electrodinámica Cuántica	Tomonaga, Schwinger, Feynman, Dyson
1950—1970	Cromodinámica Cuántica	Yang y Mills (Greenberg, Nambu, Han, Higss, Gell-Man, Fritsch)
1967-1968	Teoría electrodébil	Weingber, Salam, Glashow (Yang, Mills, Brout, Higgs, Englert)
Desde 1973	Teorías de Gran Unificación	J. Pati, A. Salam, H. Giorgi, S. Glashow
Desde 1970	Supercuerdas	E. Witten (G. Veneziano, Schwarz, Scherk)

Tabla 9.- Cronología del desarrollo y unificación de las teorías físicas.

11.4. Cuestiones

Si no se conocen las respuestas a las siguientes cuestiones es aconsejable una nueva lectura de este capítulo.

- ¿Cómo se justifica la diferenciación de las fuerzas débiles y electromagnéticas a unos determinados valores de la energía de las interacciones?
- Explique cómo afectan los planteamientos de las teorías de campo unificado a la idea que tenemos del vacío.
- ¿Qué pretenden las Teorías de Gran Unificación?
- ¿Por qué relacionamos la validez de las Teorías de Unificación con la posible desintegración del protón?
- ¿Qué son los bosones X?
- Cite los dos principales problemas que plantea la unificación de la interacción gravitatoria con las demás fuerzas.
- ¿En qué consiste una Teoría del Todo? ¿Hay indicios de que pueda existir?

12. TEORÍAS ACTUALES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

12.1. Teoría de supercuerdas

Alumno: Entre las diversas líneas teóricas que tratan de explicar los procesos que pueden tener lugar en la Física de Altas Energías correspondientes a los niveles de gran unificación... ¿hay alguna que nos ofrezca garantías suficientes?

Profesor: Por supuesto. En la actualidad, la mejor situada para convertirse en una TOE es la *Teoría de Supercuerdas*, iniciada hacia 1970 por G. Veneciano con la intención de explicar las interacciones fuertes. Ya en 1974, J. Schwarz y J. Scherk estimaron la posibilidad de que sirviera para unir la Gravedad con la Mecánica Cuántica, pero no fue hasta mediados los ochenta cuando se ha visto seriamente la opción de unificar bajo dicha teoría las cuatro interacciones fundamentales. En los años más recientes, el mayor impulsor de estas teorías es E. Witten, que parece bastante cerca de completar el desarrollo.

Alumno: ¿Cuáles son las principales peculiaridades de estas teorías?

Profesor: Según ellas, la totalidad del Universo, esto es, todas las partículas y tal vez el propio espacio-tiempo, está compuesta por cuerdas relativistas increíblemente diminutas bajo una tensión inmensa, que vibran y giran en un espacio de *diez dimensiones*. La teoría predice una longitud para estas cuerdas de 10^{-33} centímetros, llamada *longitud de Planck*, lo que explicaría porqué no son observables con las energías de hoy en día, que permiten alcanzar distancias de alrededor de 10^{-15} centímetros.

Alumno: Ahora las partículas elementales no se conciben como "objetos puntuales" adimensionales, sino todo lo contrario.

Profesor: Es una clara diferencia con todas las teorías cuánticas de campo. Las cuerdas que se postulan ahora como objetos elementales poseen un grado de libertad, denominado *tensión*, por analogía con los modos de vibración de una cuerda ordinaria. Al modo fundamental, de energía más baja, corresponderían los quarks, los leptones y los bosones mediadores de las interacciones. El resto de partículas fundamentales constituirían los modos de vibración, alargamiento, rotación, etc., de las cuerdas correspondientes a energías más elevadas, que lógicamente están cuantizados. Además, las cuerdas se pueden presentar en dos conformaciones, *abiertas* como un segmento, o *cerradas* como un círculo, aunque la interacción entre cuerdas abiertas produce también sectores cerrados. Finalmente, estas cuerdas, al desplazarse por el espacio, describirían una superficie.

Si representamos el desplazamiento de una partícula en función del tiempo se obtiene lo que se conoce como su línea del tiempo. Esta misma representación para una cuerda abierta origina una superficie, denominada hoja del tiempo, e incluso, si la cuerda es cerrada, la figura obtenida es un cilindro (Figura 31).

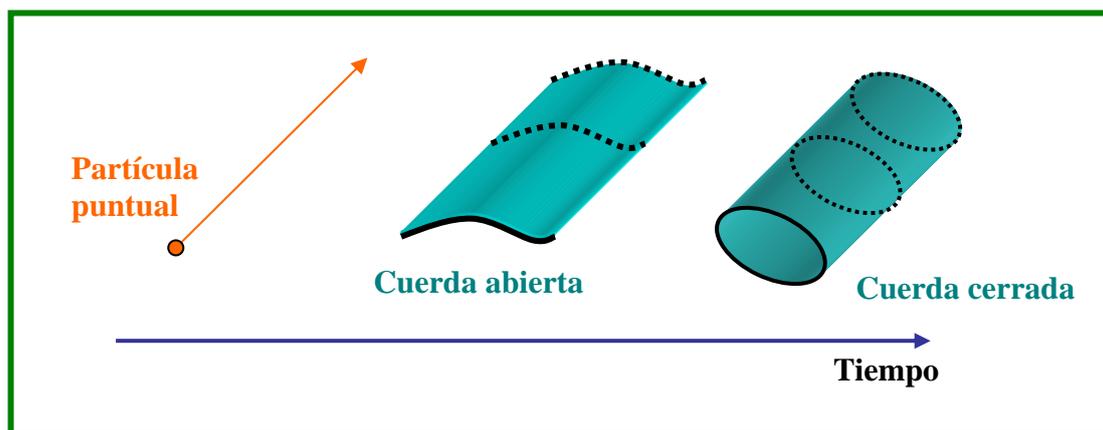


Figura 31.- Diferencias en la evolución de una partícula y de los dos tipos de cuerdas en el espacio-tiempo.

Alumno: ¿Y dónde encaja la *gravedad* en la teoría de supercuerdas?

Profesor: Precisamente, el gravitón aparecería en esta teoría como el modo de más baja energía de una cuerda cerrada.

Alumno: ¿Por qué son necesarias tantas dimensiones para las cuerdas?

Profesor: El desarrollo matemático exige la existencia de diez dimensiones para evitar los *taquiones*, nombre con el que se conoce a las hipotéticas partículas de masas imaginarias y más rápidas que la luz. También es necesario eludir otras partículas, que podrían derivarse de los cálculos, cuya probabilidad de existir es negativa, y que algunos designan con el nombre un tanto jocoso, aunque muy descriptivo, de *fantasmas*. Se cree que seis de esas dimensiones se compactan, o sea, se contraen en círculos minúsculos, por lo que no son observables.

Alumno: Si no me he perdido, resulta que para evitar estos resultados incongruentes con partículas más rápidas que la luz o con probabilidades negativas, es un requisito aumentar el número de dimensiones de las cuerdas.

Profesor: En efecto, son necesarias para que la teoría sea consistente y puedan evitarse estos resultados sin realidad física. Además, también se debe introducir la supersimetría, una transformación matemática que hace corresponder a cada partícula fermiónica, o de materia, una compañera bosónica, de intercambio, llamada compañera *supersimétrica*, de la misma masa.

Alumno: Esto es un cambio radical con las teorías cuánticas de las interacciones, pues los bosones de intercambio poseen sus masas características, exigidas por el tipo de interacción.

Profesor: Evidentemente. Así, la supersimetría, propuesta a principios de la década de los años 70 por Golfand, Likhtma, Volkov y otros autores, permite modificar el espín de una partícula de fermión a bosón y viceversa. Por ejemplo, según este planteamiento, es de esperar que al electrón le corresponda un *electrino*, no detectado a pesar de tener una masa fácilmente accesible a su "fabricación" en cualquier acelerador de energía.

Alumno: Resulta un poco extraño que no se haya observado. Da motivos para pensar en que la supersimetría carece de fundamentos verdaderos.

Profesor: Pudiera ser. Por otro lado, la teoría hace conjeturas para el campo gravitatorio y plantea la existencia de un cuanto de interacción, el *gravitón* y su compañero supersimétrico *gravitino*, cuya masa aún no es alcanzable a las técnicas experimentales.

Alumno: De cualquier modo, es una línea teórica que tiene ya más de treinta años. Por eso, aunque aparentemente haya ciertas incongruencias, sobre todo por la falta de verificaciones experimentales, no sería correcto ignorarla.

Profesor: De ningún modo. La teoría de supercuerdas, que se ha desarrollado en *tres períodos*, cuenta ya con una importante tradición entre los físicos teóricos.

Alumno: ¿Cuánto tiempo duró cada uno de dichos períodos y qué avances tuvieron lugar?

Profesor: El *primero* duró unos cuatro años, desde 1970 a 1973, estableciéndose las bases estructurales del nuevo enfoque teórico. En él se efectúa la restricción a 26 dimensiones para la cuerda bosónica, que aún admite las partículas *superlumínicas* como estados excitados de las cuerdas relativistas de género espacial, los antes citados taquiones, o sólo a 10 dimensiones, al incorporar los fermiones al esquema teórico. Al finalizar esta primera etapa, la existencia de estados sin masa, fotones y gravitones, permitidos por la teoría, hizo ya pensar a los pioneros, como Schwarz en 1974, que quizás la gravitación y las teorías de gauge podrían tener cobijo en las teorías de supercuerdas.

En el *segundo* período, desarrollado entre 1984 y 1985, se delimitan con más claridad las líneas conceptuales, pues en esos años se determina que sólo hay cinco teorías de cuerdas posibles, designadas por I, de cuerdas abiertas, II A, II B, de cuerdas cerradas, y dos tipos de teorías heteróticas, también para cuerdas cerradas, designadas por HO, cuerda heterótica-ortogonal, del grupo SO(32) y HE (grupo $E_8 \times E_8$). Todas con diez dimensiones, en las que aparecen grupos de simetría internos gauge, sin taquiones ni divergencias y que contienen la gravitación relativista a baja energía.

Alumno: Parece que en este período tuvo lugar la verdadera construcción matemática de este modelo.

Profesor: Podemos decir que así fue. En esta época se incorpora la supersimetría a las teorías de cuerdas, es decir, la existencia de ciertas transformaciones continuas que cambian la estadística, mezclando bosones y fermiones, ya comentada con anterioridad. Entonces se pensaba que sólo una de esas cinco teorías podría tener existencia en la Naturaleza, precisamente la que mostrase una menor energía límite al compactar las diez dimensiones del espacio-tiempo en las cuatro observables.

Finalmente, el *tercer* período se inicia en 1995 con la llamada teoría M, que nace al relacionarse entre sí las cinco teorías anteriores junto a otra teoría de 11 dimensiones, todas ellas unidas por un conjunto de simetrías

conocido por dualidades S y T, iniciales que provienen de las palabras inglesas *Strong* y *Target*.

Alumno: ¿Qué significado tiene ahora el término dualidad?

Profesor: Si dos teorías se hallan relacionadas por una dualidad significa que cada una de ellas se puede *transformar* en la otra y se afirma que ambas teorías son *duales* bajo esa clase de transformación. Además, las citadas dualidades sirven para unir conceptos que antes se tenían por antagónicos y que marcaban los límites en el comportamiento de los sistemas físicos al comparar la Teoría Clásica de Campos con la Teoría Cuántica. Por ejemplo, las escalas de grandes y pequeñas distancias o las fuerzas de acoplamiento débiles y fuertes.

Alumno: ¿En qué consiste la simetría de dualidad entre las *escalas* de distancias grandes y pequeñas?

Profesor: Este tipo de simetría que hace *indistinguibles* ambas escalas se denomina dualidad-T y se deriva de la compactación de todas las dimensiones espaciales en una teoría de supercuerdas de diez dimensiones. Ahora, al suponer que nos encontramos en un espacio de diez dimensiones, nueve de ellas tendrán que ser realmente espaciales mientras que una será temporal.

Si tomamos una dimensión espacial cualquiera y trazamos un círculo de radio R, de modo que al movernos en dicha dirección una distancia L, igual a la longitud del círculo, nos volvemos al punto de partida, podemos distinguir dos situaciones distintas al comparar una partícula con una cuerda. Por un lado, una partícula que viaje alrededor de este círculo tendrá cuantizada su cantidad de movimiento, la cuál contribuirá a su energía total de una manera determinada. Por otro lado, en el caso de la cuerda, no sólo puede trasladarse por la circunferencia dada sino que puede plegarse en torno a ella, de manera que el número de veces que la cuerda se enrolla también está cuantizado.

Lo curioso de la teoría de cuerdas es que podemos relacionar el radio de la circunferencia con la longitud de la cuerda de forma que los modos de la cantidad de movimiento de la partícula y los modos de enrollamiento de las cuerdas se intercambian.

Alumno: Si no entiendo mal, lo que se pretende es asimilar el comportamiento de una partícula al de una cuerda.

Profesor: Eso es lo que te he dicho desde el principio. No obstante, el desarrollo matemático lo permite siempre que intercambiemos el radio de la circunferencia con la cantidad L_C^2/R , en la que L_C es la longitud de la cuerda.

En la expresión anterior vemos que si R es mucho más pequeño que L_C , la relación se hace muy grande. Por eso cambiando los modos posibles de la cantidad de movimiento con los de plegamiento de la cuerda podemos pasar de una escala grande a una pequeña. Es decir, lo que parece una longitud muy grande para un modo de cantidad de movimiento se convierte en una distancia muy pequeña al considerar un modo de enrollamiento de la cuerda.

La dualidad T, que elimina las diferencias de escala, relaciona por un lado las teorías de los tipos II A y II B y por otro las dos heteróticas.

Alumno: Y el acoplamiento fuerte y débil, ¿en qué consiste?

Profesor: Recuerda que la *constante de acoplamiento* es un número que nos refleja la fuerza relativa de una interacción, pues cuanto mayor sea dicha constante se traduce en una fuerza mayor. Para el electromagnetismo es proporcional al cuadrado de la carga eléctrica, y a energías normales su valor es pequeño.

Así, en la aplicación del *método perturbativo* en la Electrodinámica Cuántica, los primeros términos presentan una constante pequeña y muestran una buena aproximación al valor real, pero en cuanto la constante aumenta este método de cálculo se aleja de los valores experimentales y pierde utilidad. Este problema también puede presentarse en la Teoría de Cuerdas, sin embargo, en ella la constante de acoplamiento no viene representada sólo por un número, sino que depende de uno de los modos de oscilación de la cuerda denominado "*dilatón*". Los cálculos muestran que cambiando de signo el *campo dilatón*, en la denominada simetría de dualidad S, se convierte una constante de acoplamiento grande en una pequeña.

Alumno: Eso quiere decir que si dos teorías, una de constante de acoplamiento grande y la otra pequeña, están relacionadas por una simetría de dualidad S, ambas son equivalentes.

Profesor: Sí. Además, es importante observar que una teoría con elevada constante de acoplamiento no puede expresarse mediante términos en serie, mientras que la de constante pequeña sí. Por consiguiente, cuando dos teorías poseen simetría de dualidad S sólo es necesario desarrollar la teoría débil, ya que sus resultados serán equivalentes a los de su teoría simétrica fuerte.

Las teorías de supercuerdas relacionadas por la simetría de dualidad S son las del tipo I con la heterótica SO(32) y las del tipo II entre sí.

Alumno: Así pues, si se consigue elaborar la teoría M, se habrá llegado a un mayor nivel de unificación gracias a estas nuevas simetrías.

Profesor: Evidentemente. La simetría de dualidad T es exclusiva de las cuerdas, ya que una partícula no puede replegarse alrededor de un círculo. La ansiada teoría M, de conseguirse, implicaría eliminar la distinción entre las escalas de distancias grandes y pequeñas en un nivel más profundo. Igualmente, la simetría de dualidad S permitiría a la teoría M describir a una teoría de cuerdas con una constante de acoplamiento fuerte mediante otra de constante débil, lo cual tiene una resonancia especial a la hora de pensar en una teoría cuántica de la gravedad.

Alumno: ¿Por qué?

Profesor: Porque la teoría de Einstein de la gravedad habla de cómo se miden los tamaños de los objetos y la magnitud de las interacciones en un espacio-tiempo curvado, no como el concepto clásico de partículas en un espacio tridimensional. Las partículas puntuales pueden interactuar a *distancia cero*, es decir, pueden constituir un *vértice* en su diagrama de interacción, mientras que esto no sucede en las cuerdas, pues su vértice de interacción no es un punto, sino una superficie y ofrece, de este modo, la opción de un tratamiento cuántico (Figura 32).

En resumen, su principal impulsor, Edward Witten, dice que M significa *mágico, misterio, membrana, matriz...* Ahora, las cinco teorías de cuerdas aparecen como diferentes límites de una misma teoría, de modo que, mediante determinadas transformaciones, se puede pasar de un tipo de cuerda a otro.

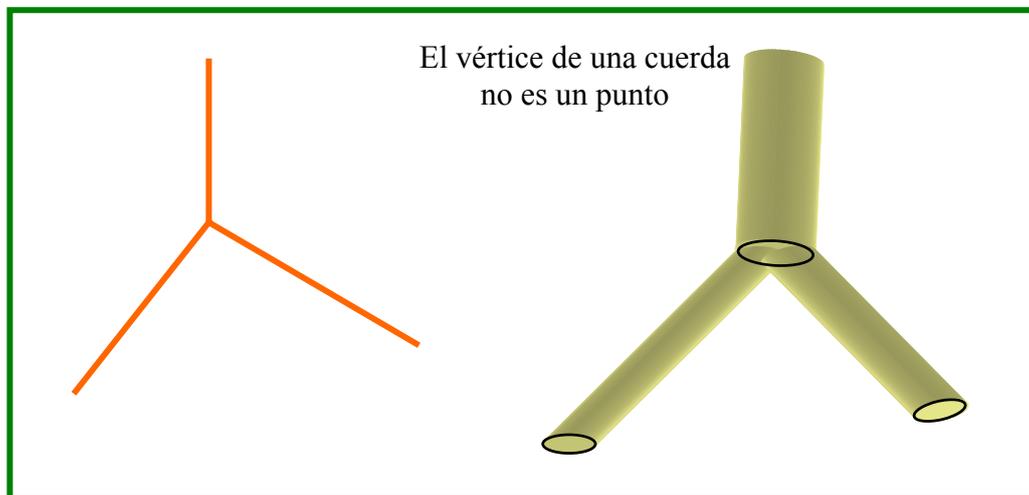


Figura 32.- Interacción entre dos partículas puntuales y dos cuerdas.

Alumno: ¿Qué estructura matemática tiene la teoría M?

Profesor: La idea más aceptada es una estructura similar a la mecánica cuántica de matrices, y fue propuesta en 1996 por T. Banks, W. Fischer, S. Shenker y L. Susskind.

Las simetrías de dualidad, a las que antes se hacía referencia, requieren a su vez de la existencia de nuevos objetos conocidos como p-branas, con varias dimensiones que vienen señaladas según el valor de p (entre 0 y 9), en los que pueden terminar los extremos de las cuerdas. Así, en términos de p-branas, o mejor dicho, de M-branas, si se emplea particularmente la teoría M, el valor de M es cero para las partículas puntuales, 1 para las cuerdas y 2 para las *membranas*. Un tipo especial de p-branas son las D-branas, también designadas por Dp-branas, que tienen la particularidad de ser los extremos comunes de varias cuerdas abiertas, es decir, como un estado excitado colectivo de varias cuerdas.

Alumno: Resulta un poco farragosa la nueva terminología de M-branas, p-branas, D-branas, etc. Algo ciertamente confuso.

Profesor: Ten en cuenta que todo esto es muy actual y se halla en plena elaboración. De cualquier modo todos tienen significado muy similar, pues intentan describir las posibles terminaciones o extremos de las cuerdas.

Precisamente, una variante de la teoría M, que emplea p-branas con dos dimensiones espaciales, denominadas M 2-branas, conduce a la teoría de supercuerdas II A como solución límite. Además, un trabajo de Strominger y Vafa demostró que si se consideraban los M-branas como estados cuánticos del campo gravitatorio en cierto tipo de agujeros negros, se logra reproducir con exactitud las propiedades termodinámicas predichas por Bekenstein y Hawking para dichos agujeros negros. Estos hechos nos

proporcionan una evidencia clara de que la teoría de cuerdas, y concretamente, la teoría M, pudiera ser la teoría cuántica correcta del campo gravitatorio. Falta ahora por desarrollar la conexión con las otras interacciones del modelo estándar.

Alumno: Entonces, ¿cabe afrontar el futuro con optimismo en este campo?

Profesor: Desgraciadamente, la Teoría de Supercuerdas plantea muchas dificultades para trabajar con ella y todavía no ha proporcionado predicciones verificables. No en vano las energías necesarias para que los fenómenos propios de esta teoría sean visibles son del orden de 10^{19} GeV, mientras que hoy día nos movemos en torno a 1000 GeV. En cualquier caso, con el avance de la teoría M se está dando un paso importante en el camino hacia la Teoría del Todo, si bien queda mucho por recorrer. Entre los problemas más gráficos cabe citar que de la teoría M se desprende que la masa del electrón es de 3 MeV, muy lejos de su verdadero valor.

Alumno: Es un poco inquietante. ¿No hay ninguna otra alternativa?

Profesor: Otro intento de Gran Unificación lo constituyen las Teorías de Supergravedad, conocidas por sus siglas SUGRA. Hacen una reformulación cuántica de la gravedad y elaboran una teoría general bajo la condición matemática de supersimetría local, ya comentada previamente. Este grupo de planteamientos se desarrollaron en los años sesenta, hasta un total de ocho teorías, que se diferenciaban básicamente en el número de bosones de intercambio necesarios, los hipotéticos *gravitones*, y en el de sus partículas supersimétricas, los *gravitinos*. Por ejemplo, para la teoría más compleja se requieren un total de 163 campos de bosones. En cualquier caso, los graves problemas de renormalización que todas presentan, aún no superados, las han relegado a un *segundo plano* frente a la Teoría de las Supercuerdas.

Alumno: Es decir, hoy por hoy, queda claro que las bases más sólidas nos las ofrecen las supercuerdas.

12.2. Relación entre la teoría inflacionaria y las teorías de gran unificación

Profesor: Al menos, eso es lo que parece, hasta el momento.

Alumno: Sin embargo, aún me surgen algunas reticencias en contra de las teorías de unificación. Por ejemplo, una de las dudas más acuciantes que se me ocurren es saber si verdaderamente tenemos razones objetivas para creer en la unificación de todas las fuerzas. Ya sé que hemos hablado de ello, pero, hasta ahora no estoy plenamente convencido de esa unión subyacente por la que abogan los teóricos.

Profesor: En mi opinión, estimo que ya se han expuesto suficientes justificaciones. No obstante, hay también otro hecho muy significativo que hemos de añadir a la lista de razones para confiar en las teorías GUT. Así, de las teorías de gran unificación es posible predecir tanto la *inflación* de los primeros instantes de vida del universo tras del Big Bang, como la presencia de *materia oscura*, sin las cuales la Cosmología tendría graves problemas. Sin embargo, estas teorías fueron desarrolladas de forma aislada de la

Cosmología, sin pensar que sus resultados podían aplicarse al Universo en su conjunto, lo que puede animarnos a creer en su veracidad con mayores argumentos.

Alumno: ¿Qué nos dice la Teoría Inflacionaria?

Profesor: Según ella, después de la Gran Explosión inicial tuvieron lugar unos procesos en los que una sola fuerza unificada de la naturaleza se *dividió* en las cuatro fuerzas fundamentales que existen hoy, la gravitación, el electromagnetismo y las interacciones nucleares fuerte y débil, a medida que la densidad de energía del universo iba disminuyendo conforme aumentaba su tamaño.

La fuerza inflacionaria sólo actuó durante una minúscula *fracción de segundo*, pero en ese tiempo duplicó el tamaño del Universo más de cien veces, haciendo que una esfera de energía unas 10^{20} veces menor que un protón se convirtiera en una zona de unos diez centímetros de extensión en sólo $1,5 \cdot 10^{-32}$ segundos. El empuje hacia afuera fue tan violento que, aunque la gravedad está frenando las galaxias desde entonces, la expansión del Universo continúa en la actualidad (Tabla 10).

Alumno: De este modo, es comparable la situación de los primeros momentos de vida del universo a los procesos a muy altas energías que intentamos reproducir en los modernos colisionadores. Pero, ¿hay pruebas de esta gran inflación?

Profesor: Según se expandía el Universo, después de la Gran Explosión, la *radiación residual* de la misma continuó enfriándose, hasta llegar a una temperatura de unos 3 K, según predijeron los norteamericanos Alpher y Herman. Estos vestigios de radiación de fondo de microondas fueron detectados por Penzias y Wilson en 1964, proporcionando así lo que la mayoría de los astrónomos consideran la confirmación de la teoría de la Gran Explosión.

Además, la estructura detallada de ondulaciones en la radiación de fondo de microondas, detectada por el satélite *COBE*, provenientes de todas las direcciones del espacio, revela la influencia de la materia oscura, que actuó gravitatoriamente sobre la materia ordinaria algunos cientos de miles de años después del principio y que debió originar el tipo de estructuras a gran escala que corresponde a la distribución actual de las galaxias, es decir, sus agrupaciones en cúmulos y supercúmulos.

Alumno: ¿Qué entendemos por materia oscura?

Profesor: Es un tipo especial, al parecer integrado por entidades como los agujeros negros, enanas marrones, que son residuos de antiguas estrellas, y por partículas subatómicas.

Alumno: ¿Como los protones y los neutrones?

Profesor: No. Podrían ser los conocidos neutrinos, si se confirma finalmente que poseen una pequeña masa, u otras partículas extrañas aún no detectadas. Esta materia no es observable en el espectro electromagnético y su presencia sólo se advierte por la acción gravitacional.

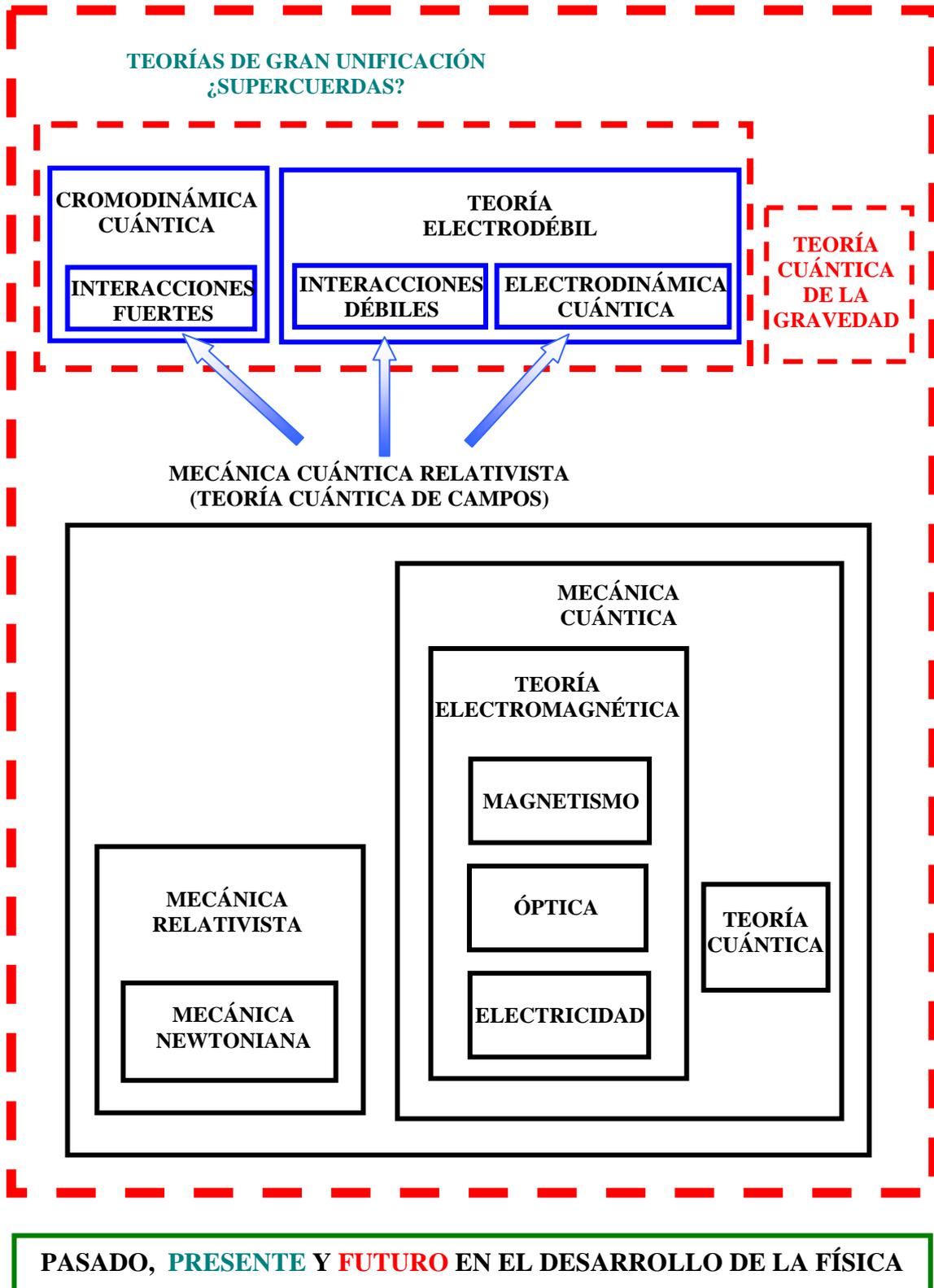
EDAD DEL UNIVERSO	ESTADO DEL UNIVERSO	FUERZAS
15·10 ⁹ años	Actual (predomina la materia sobre la radiación, a 2,7 K)	Las cuatro son independientes
1.000.000 años	Galaxias indiferenciadas (equilibrio materia-radiación, a 3000 K)	Las cuatro son independientes
500.000 años	Formación de átomos	Las cuatro son independientes
3 minutos	Formación de núcleos	Las cuatro son independientes
1 milisegundo	Formación de partículas fundamentales	Las cuatro son independientes
10 ⁻⁵ segundos	Existencia de quarks, leptones, gluones y fotones libres	Las cuatro son independientes
10 ⁻¹⁰ segundos	Separación de las fuerzas débil y electromagnética	Electromagnética + Débil + Fuerte + Gravitación
10 ⁻³⁵ segundos	Separación de las fuerzas electrodébil y fuerte	Electrodébil + Fuerte + Gravitación
10 ⁻⁴³ segundos	Separación de las fuerzas gravitatorias	GUT + Gravitación
?	Fermiones y bosones son intercambiables. Supersimetría	TOE (Todas las fuerzas están unificadas)
0	Gran Explosión	Singularidad

Tabla 10.- Evolución del universo y de las fuerzas fundamentales.

Alumno: Después de tantas evidencias, es difícil no creer en las teorías de gran unificación.

Profesor: Quizás esta última sea de las más concluyentes. En definitiva, la coincidencia entre los hallazgos de la Física de Partículas, esto es, del mundo de lo extremadamente pequeño, obtenidos en experimentos terrestres y la estructura del Universo en expansión, el mundo de lo extremadamente grande, deducida de las observaciones astronómicas, por un lado convence a los cosmólogos de que la idea general del origen del Universo es esencialmente correcta y por otro sirve de estímulo a los físicos teóricos para abordar con esperanzas la difícil tarea que representa el desarrollo de la teoría correcta de gran unificación que aclare, en última instancia, todas nuestras dudas (Figura 33).

TEORÍA DEL TODO ¿TEORÍA M?



PASADO, PRESENTE Y FUTURO EN EL DESARROLLO DE LA FÍSICA

Figura 33.- Evolución de las teorías de unificación y perspectivas de la Física.

Alumno: En cualquier caso, encontramos un gran estímulo para investigar en ambos campos de la Física.

Profesor: Es evidente, que los avances más significativos en el edificio conceptual de esta disciplina que van a tener lugar en los próximos años se centrarán en describir la estructura del universo en sus distancias más pequeñas, es decir, en la constitución de las porciones más pequeñas de materia, lo que nos llevará inexorablemente a conocer también los secretos más antiguos del origen del Universo.

12.3. Cuestiones

Si no se conocen las respuestas a las siguientes cuestiones es aconsejable una nueva lectura de este capítulo.

- ¿Cuáles son los planteamientos básicos de las teorías de cuerdas?
- ¿Por qué es necesario postular la existencia de diez dimensiones para las cuerdas?
- Resume brevemente los avances conseguidos en cada uno de los tres períodos en los que puede dividirse la evolución de las teorías de cuerdas.
- ¿Cuándo decimos que dos teorías de cuerdas son duales?
- ¿En qué consiste la simetría de dualidad T? ¿Y la dualidad S?
- ¿Cuál sería el objetivo principal de la teoría M?
- ¿Qué problemas presentan las Teorías de Supergravedad frente a las de Supercuerdas?
- ¿Qué evidencias relacionan la Teoría Inflacionaria con las Teorías de Gran Unificación?

13. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Libros

- Armero, J. y otros. (1999). *Física*. Barcelona. Editorial Guadiel.
- Cohen-Tannoudji, G. y Spiro, M. (1988). *La material-espacio-tiempo*. Madrid. Espasa Universidad.
- Einstein, A. y Infeld, L. (1986). *La evolución de la Física*. Barcelona. Biblioteca Científica Salvat.
- Einstein, A y otros. (1989). *La Teoría de la Relatividad*. Madrid. Alianza Universidad.
- Farouki, N. (1994). *La Relatividad*. Madrid. Editorial Debate.
- Fernández, A. (1999). *Principio y fin del Universo*. Madrid. Editorial Espacio y Tiempo.
- Feynman, R. P. (1988). *Electrodinámica Cuántica*. Madrid. Alianza Universidad.
- Fritzsche, H. (1988). *Los quarks, la materia prima de nuestro universo*. Madrid. Alianza Universidad.
- Gribbin, J. (1986). *En busca del gato de Schrödinger*. Barcelona. Biblioteca Científica Salvat.
- Hawking, S. W. (1990). *Historia del tiempo. Del Big Bang a los agujeros negros*. Madrid. Alianza Editorial. Madrid.
- Hidalgo, J. A. y Fernández, M. (1987). *Física General*. León. Editorial Everest.
- Klein, E. (1994). *Las partículas elementales*. Madrid. Editorial Debate.
- Tagle, J. A. (1995). *La fusión nuclear*. Madrid. Editorial Debate.
- Tipler, P. A. (1978). *Física*. Barcelona. Editorial Reverté.
- Trefil, J. S. (1985). *De los átomos a los quarks*. Barcelona. Biblioteca Científica Salvat.
- Ynduráin, F. J. (1983). *The Theory of Quark and Gluon Interactions*. New York. Springer-Verlag.

Artículos de revistas

- Alcaraz, J. y Josa, M. I. (2000). Búsqueda experimental del bosón de Higgs. *Revista Española de Física* 14 (2), 27-30.
- Boya, L. J. (1999). La Teoría M. *Revista Española de Física* 13 (5), 32-37.
- Rodríguez Danta, M. (2000). Matemáticas y electromagnetismo. *Revista Española de Física* 14 (5), 31-37.
- Sánchez Ron, J. M. (2000). La cuantización de la Física. *Revista Española de Física* 14 (1), 6-9.
- Santander, M. (2000). Matemáticas y mecánica cuántica. *Revista Española de Física* 14 (5), 25-30.

Ynduráin, F. J. (2000). Mecánica cuántica y Física de partículas elementales. *Revista Española de Física* 14 (1), 54-64.

Referencias electrónicas

Ampudia, J. (2002). *El momento de la creación*.

Sitio web: <http://personales.com/espana/bilbao/BigBang/>

Díaz Pazos, P. (2002). *A horcajadas en el tiempo*. 1ª edición.

Sitio web: <http://www.astrocosmo.cl/h-foton/h-foton.htm>

Enciclopedia Microsoft Encarta.

Sitio web: <http://es.encarta.msn.com/>

Gómez Camacho, J. (2001). *Partículas elementales*. Universidad de Sevilla.

Sitio web: <http://www.cica.es/~dfamnus/cursos/particulas/index.html>

Schwarz, P. *The Official String Theory Web Site*.

Sitio web: <http://www.superstringtheory.com/>

The Particle Data Group of Lawrence Berkeley National Laboratory.

Sitio web: <http://particleadventure.org/particleadventure/>