

LA JUNGLA SUBATOMICA

Enrique Arribas Garde

*Enrique Arribas Garde.
Departamento de Física Aplicada.
Escuela Universitaria Politécnica.
Universidad de Castilla-La Mancha.*

RESUMEN

Propo-**P**roponemos un viaje sorprendente al fascinante mundo de las partículas subnucleares. Vamos a penetrar en el interior del núcleo atómico. Descubriremos una jungla poblada por una gran variedad de partículas, una elementales, y otras compuestas. Hablaremos de los que ahora creemos que son los constituyentes fundamentales de la materia. Intentaremos exponer las últimas teorías que dan cuenta de las interacciones entre las partículas elementales.

“Ha llegado el momento, dijo la morsa, de que hablemos de muchas cosas...”

Lewis Carroll: “A través del espejo y lo que Alicia encontró allí”.

1. PREHISTORIA

“Cuando no había existencia, ni siquiera había nada, y no existía el aire, ni había detrás el cielo,
¿Qué es lo que se movía?
¿Dónde estaba?
¿Quién lo guardaba?
¿Dónde tuvo su origen la creación entera?”

(Rigveda, texto sagrado hindú.
Anónimo)

Desde los tiempos más remotos, el hombre ha sentido curiosidad por la composición última de los cuerpos que le rodean. En la Grecia antigua, las teorías sobre la estructura de la materia eran meramente filosóficas. Anaximandro (griego, Mileto, 611-547 a. C.) imaginó que el elemento básico del Universo estaba constituido por una masa informe que era, al mismo tiempo, el origen y el destino de todas las cosas materiales. A esta sustancia inobservable la llamó apeiron, que significa infinito. Empédocles (griego, Agrigento, Sicilia, 490-430 a. C.) creador de la retórica, supuso que había cuatro elementos: el Agua, el Aire, el fuego y la Tierra, los cuales interactuaban mediante dos poderes opuestos: el Amor y el Odio. Estos cuatro elementos eran irreductibles, invariantes y eternos. En nuestro lenguaje coloquial usamos la frase “la furia de los elementos” cuando queremos decir que el aire y el agua están enfurecidos a causa de una tempestad.

Más tarde, cuatro siglos antes de Cristo, los filósofos griegos Leucipo (griego, Mileto, se duda de su existencia real) y Demócrito (griego, Abdera, Tracia, 470-380 a. C.), como precursores de la doctrina atomista, supusieron que la materia estaba constituida por átomos, los cuales eran eternos, indivisibles, incorruptibles y estaban en perpétuo movimiento. De encuentros casuales de los átomos surgen combinaciones las cuales son el origen de todos los cuerpos que componen el Universo. Las conclusiones de Demócrito nacieron de la introspección y de la intuición.

Hubo que esperar hasta el siglo XIX para que estas ideas tuvieran una confirmación experimental y no fueran meras especulaciones filosóficas. Entre finales del siglo XVIII y principios del XIX, hubo una gran generación de químicos como H. Cavendish (inglés, Niza, 1731-1810), J. Priestley (inglés, Fieldhead, 1733-1804), A. L. Lavoisier (francés, París, 1743-1794), J. L. Proust (francés, Angers, 1754-1826), J. Dalton (inglés, Eaglesfield, 1766-1856), A. Avogadro (italiano, Turín, 1776-1856) y J. L. Gay-Lussac (francés, Saint Léonard, 1778-1850), que descubrieron que había un átomo distinto para cada elemento químico, y combinaciones, más o menos complicadas, daban origen a todas las sustancias químicas conocidas. Los trabajos de todos ellos confirman la validez de la teoría atómica de Dalton:

“La materia, aunque divisible en grado extremo, no es, sin embargo, infinitamente divisible”. (J. Dalton).

D. I. Mendeleiev (ruso, Siberia, 1834-1907) pudo ordenar todos los elementos conocidos en su tiempo (63) según sus masas atómicas. La tabla de Mendeleiev y sus estructuras periódicas sugieren que los átomos estaban compuestos, a su vez, de partes más pequeñas. En

1899 J. J. Thomson (inglés, Cheetham Hall, 1856-1940, Premio Nobel en 1906) descubrió el electrón, partícula elemental cargada negativamente. En 1911 Ernest Rutherford (inglés, Nueva Zelanda, 1871-1937) demostró que el átomo tiene un núcleo central cuyo tamaño es del orden del fermi ($1 \text{ fermi} = 10^{-15} \text{ m}$) También demostró que este núcleo estaba formado por protones (partículas elementales que tienen la misma carga que el electrón, pero positiva y una masa unas 2000 veces mayor), y que estaba rodeado por una nube de electrones de un tamaño del orden de una Angstrom ($1 \text{ Angstrom} = 10^{-10} \text{ m}$).

Para darnos una idea de los tamaños relativos del núcleo y del átomo, podríamos hacer la siguiente suposición: Si el núcleo tuviera el tamaño de un campo de fútbol de dimensiones reglamentarias, el átomo tendría el tamaño de la Tierra. Eso nos da la idea del gran vacío existente entre el núcleo y la corteza electrónica.

En el átomo tenemos un ejemplo típico de un régimen autoritario: Todos los electrones giran alrededor del núcleo atómico, mientras que él mismo permanece fijo. En el núcleo, por contra, el régimen es totalmente democrático: Todos los protones giran alrededor de un centro común, comportándose todos ellos de la misma forma.

En 1932, J. Chadwick (inglés, Manchester, 1895-1974, Premio Nobel en 1935) descubrió el neutrón. Por tanto, el conocimiento de la materia que teníamos en 1932 era el siguiente: los átomos, compuestos por el núcleo y la corteza electrónica, y, a su vez, el núcleo compuestos por protones y neutrones (partículas de igual masa que los protones, pero sin carga eléctrica). También se tenía constancia de la existencia del fotón, partícula sin masa en reposo y sin carga, y que se mueve a la velocidad de la luz. Actualmente creemos que un rayo luminoso está compuesto de un flujo de fotones.

Además de estas cuatro partículas elementales que entonces se conocían, había cuatro interacciones, denominadas nuclear fuerte, electromagnética, nuclear débil y gravitatoria.

La fuerza nuclear fuerte es la que mantiene unido al núcleo. Es de corto alcance, del orden del fermi. Le asociaremos un valor 1 a su intensidad. Esta es la responsable de toda la Física Nuclear.

La fuerza electromagnética es proporcional a la inversa de la distancia al cuadrado; su alcance es infinito, y su intensidad relativa es de $1/10^2$. Es la responsable, esencialmente, de toda la Química y toda la Biología. Las fuerzas eléctricas y magnéticas son conocidas desde la Antigüedad. En el siglo XVIII Ch. A. de Coulomb (francés, Angulema, 1736-1806) formuló la ley fundamental de la electrostática. Durante siglos la electricidad y magnetismo eran disciplinas separadas; pero en 1820 H. Ch. Oersted (danés, Rudkobing, 1777-1851) descubrió que una corriente eléctrica produce un campo magnético y, por tanto, ambos fenómenos debían estar íntimamente liga-

dos. En 1873 J. C. Maxwell (escocés, Edimburgo, 1831-1879) formuló una teoría completa del campo electromagnético, logrando así una unificación total de la electricidad y el magnetismo. Las ecuaciones de Maxwell se completan con la fórmula de H. A. Lorentz (holandés, Arnhem, 1853-1928)) que nos da la fuerza sobre una partícula cargada que se mueve en el seno de un campo magnético.

La fuerza nuclear débil es la responsable de las desintegraciones β^+ y β^- de los núcleos. Su intensidad relativa es de 10^{-5} y es de muy corto alcance, una centésima de fermi.

Por último, tenemos la interacción gravitatoria, que es siempre atractiva y también es proporcional a la inversa de la distancia al cuadrado. Su intensidad relativa es de 10^{-39} , y es la responsable del movimiento de los planetas y de todo lo que ocurre en el Macrocosmos. Su alcance, como el de la interacción electromagnética, es infinito. La gravitación es conocida desde la más remota Antigüedad, aunque hubo que esperar hasta el siglo XVII para que Isaac Newton (inglés, Woolsthorpe, 1642-1727) formulara la ley universal de la gravitación en su obra Principia.

En 1932, W. Pauli (austriaco, Viena, 1900-1958, Premio Nobel en 1945) postuló el neutrino, el cual hubo de esperar hasta 1956 para ser descubierto por C. Cowan y F. Reines (estadounidense, Paterson, 1907-) El neutrino es una partícula sin masa y sin carga, muy difícil de descubrir y que, al carecer de masa, ha de viajar necesariamente a la velocidad de la luz. En 1935, H. Yukawa (japonés, Kyoto, 1907-1984) postuló la existencia de unas partículas denominadas piones –partículas mediadoras de la interacción fuerte–. En 1947 C. L. G. Lattes, G. P. S. Occhialini y C. F. Powell (inglés, Tonbridge, 1903-1969, Premio Nobel en 1950) descubren efectivamente el pión. Diez años antes, en 1937, S. H. Neddermeyer y C. D. Anderson (estadounidense, Nueva York, 1905-, Premio Nobel en 1936) habían descubierto el muón.

2. LA ELECTRODINAMICA CUANTICA (QED)

En el aspecto teórico, la situación estaba en plena ebullición. En 1928, P. A. M. Dirac (inglés, Bristol, 1902-1984, Premio Nobel en 1933) formuló la teoría mecánico-cuántica relativista de la materia, dando lugar a la predicción de la existencia de la antimateria; o, lo que es lo mismo, cada partícula tiene su antipartícula. Postuló así la existencia del positrón, la antipartícula del electrón. Cuatro años después, en 1932, C. D. Anderson descubre el positrón.

La electrodinámica cuántica, universalmente conocida como QED (Quantum Electro Dynamics), describe en particular la interacción de los fotones con los electrones y, en general, la interacción entre partículas cargadas. El camino hacia una formulación correcta

de la QED fue largo, casi veinte años de esfuerzos [Pa-86], desde los trabajos de P. A. M. Dirac en 1928 hasta los de S. Tomonaga (japonés, Tokio, 1906-1979, Premio Nobel en 1965), J. Schwinger (estadounidense, Nueva York, 1918-, Premio Nobel en 1965) y R. P. Feynman (estadounidense, Nueva York, 1918-1988, Premio Nobel en 1965), con sus cabalísticos diagramas.

La QED es la teoría más precisa de toda la Física. Por ejemplo, [Pa-87], el valor experimental del momento magnético del electrón vale

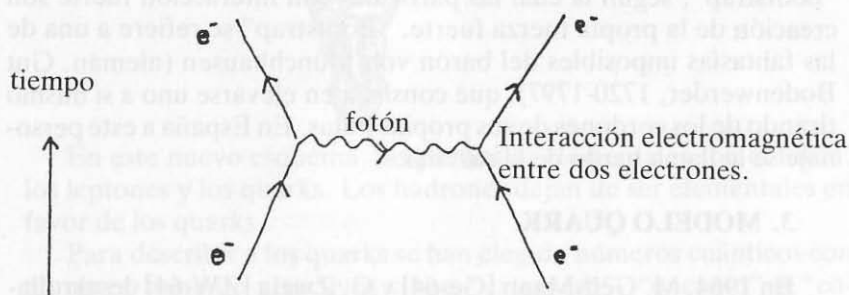
$$a = 1159652209(31) * 10^{-12} \text{ (experimental)}$$

y el valor predicho por la QED es

$$a = 1159652460(171) * 10^{-12} \text{ (teórico)}$$

El acuerdo teoría-experimento es impresionante.

Según la QED, la interacción electromagnética es debida al intercambio de fotones entre partículas cargadas. Como el fotón tiene masa nula, el alcance de dicha fuerza es infinito. El alcance de una interacción es inversamente proporcional a la masa de la partícula intercambiada. Uno de los posibles diagramas de Feynman que describe la interacción electromagnética entre dos electrones es el siguiente



Allá por los años 50 se produjo una verdadera erupción en el descubrimiento experimental de partículas. Al llegar a los años 60 ya teníamos alrededor de 30 partículas subatómicas, y en esa década aparecieron 70 nuevas partículas, las cuales se podían agrupar en varias familias. La primera, la del fotón; la segunda, la de los leptones (de la voz griega que significa débil, pequeño) entre los cuales estaban el electrón, el neutrino electrónico, el muón y el neutrino muónico. Y luego estaba la familia de los hadrones, la cual se subdividía en dos subfamilias: los bariones (de la voz griega que significa pesado) y los mesones (de la voz griega que significa intermedio). Entre los bariones estaban el protón y el neutrón; entre los mesones, estaban los piones, los kaones... Los mesones tienen spin entero y los bariones semientero. (El spin es un número cuántico asociado con el momento angular intrínseco de cada partícula). Había que poner un

poco de orden en esta caótica jungla de las partículas.

Un modelo que tuvo mucha aceptación en los años 60 fue denominado "Eightfold way", o "vía del octete", el cual usaba ocho números cuánticos para describir todas las partículas existentes. Este modelo fue propuesto en 1964 por M. Gell-Mann (estadounidense, Nueva York, 1929-, Premio Nobel en 1969) e Y. Ne'eman (israelita, Tel-Aviv, 1925-) [GN-64], los cuales se basaron en un aforismo de Buda que dice lo siguiente:

"Ahora, hermanos, ésta es la noble verdad que lleva al cese del dolor: Este el noble camino óctuple, a saber: recto juicio, recta intención, palabras rectas, rectas acciones, recto vivir, recto tesón, recta mente y recta concentración".

Esta vía del octete se basa matemáticamente en $SU(3)$, que tiene la estructura algebraica de un grupo de Lie. Los físicos siempre han preferido utilizar el lenguaje de las matemáticas para intentar describir la Naturaleza.

Por esa mismas fechas tuvo su origen la teoría denominada del "bootstrap", según la cual las partículas con interacción fuerte son creación de la propia fuerza fuerte. "Bootstrap" se refiere a una de las fantasías imposibles del barón von Münchhausen (alemán, Gut Bodenwerder, 1720-1797), que consistía en elevarse uno a sí mismo tirando de los cordones de sus propias botas. En España a este personaje se le llama barón de la castaña.

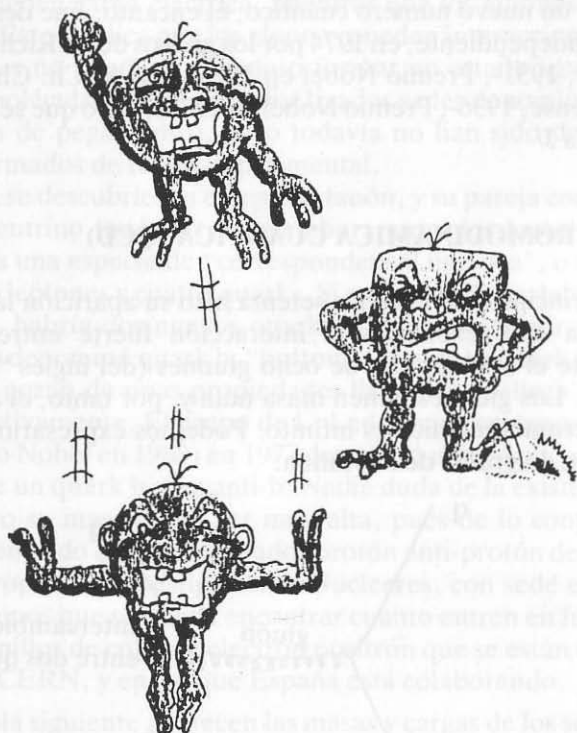
3. MODELO QUARK

En 1964, M. Gell-Mann [Ge-64] y G. Zweig [ZW-64] desarrollaron independientemente el modelo de quarks. El nombre proviene de un pasaje de la obra "Finnegan's wake", de James Joyce, en que se dice: "Three quarks for Musther Mark".

Según este modelo, los hadrones (bariones o mesones) son estados ligados de varios quarks. Los bariones son estados ligados de tres quarks, y los mesones son estados ligados de un quark y un anti-quark.

En esta época, se postulaban tres quarks: el quark u, "up" (arriba), el quark d, "down" (abajo) y el quark s "strange" (extraño). Cada quark tiene su correspondiente antipartícula, el antiquark. Por ejemplo, el protón está constituido por los quarks uud, el neutrón por los quarks udd, y el pión está constituido por los quarks u y anti-u. El quark u tiene una carga fraccionaria, $2/3$ veces la del electrón (que creemos que es la carga fundamental); el quark d tiene como carga $-1/3$, al igual que el quark s. El modelo quark presentaba un

problema estético, pues los físicos teóricos opinaban que las cargas fraccionarias de los quarks eran terriblemente feas, las preferían enteras.



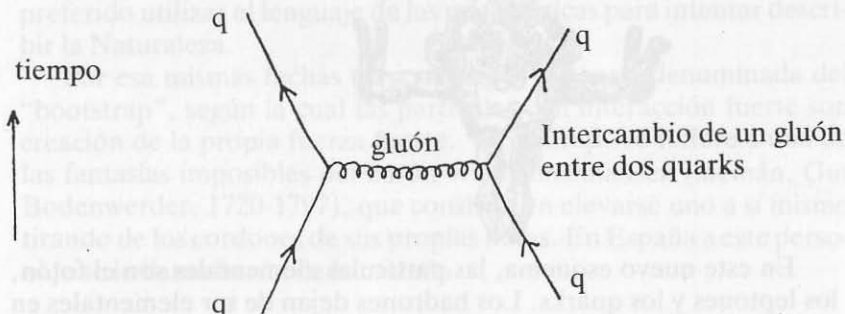
En este nuevo esquema, las partículas elementales son el fotón, los leptones y los quarks. Los hadrones dejan de ser elementales en favor de los quarks.

Para describir a los quarks se han elegido números cuánticos con nombres bastante atractivos como “extrañeza”, “encanto” o “color”. El número cuántico de color tiene tres posibles valores para los quarks: rojo, verde y azul. Los antiquarks tienen anticolores que pueden representarse mediante los complementarios de los anteriores: cian, magenta y amarillo, respectivamente. Por supuesto, ninguno de estos términos guarda relación con su significado convencional, son nombres totalmente arbitrarios. Usando esta jerga se suele decir que hay quarks de tres sabores diferentes: u, d y s; y que el quark de un determinado sabor puede tener tres colores diferentes o, lo que es lo mismo, tenemos nueve quarks. La combinación de estos tres colores fundamentales da lugar al blanco, de tal forma que los bariones no tienen color, ni tampoco los mesones, pues un color con su anticolor también dan lugar a un color blanco. El blanco lo consideramos como la ausencia de color. Se puede interpretar el color como una nueva clase de carga, diferente de la eléctrica pero de similares características.

En 1970, S. L. Glashow, J. Iliopoulos y L. Maiani postularon la existencia de un nuevo quark; el quark c , "charm" o quark encantado, con un nuevo número cuántico, el encanto. Fue descubierto, de forma independiente, en 1974 por los grupos de B. Richter (estadounidense, 1931-, Premio Nobel en 1976) y de S. Ch. Ch. Ting (estadounidense, 1936-, Premio Nobel en 1976), en lo que se denominó la partícula J/ψ .

4. CROMODINAMICA CUANTICA (QCD)

A principios de los años setenta hizo su aparición la cromodinámica, la cual explicaba la interacción fuerte entre los quarks mediante el intercambio de ocho gluones (del inglés "glue", pegamento). Los gluones tienen masa nula y, por tanto, el alcance de la fuerza cromodinámica es infinito. Podemos expresarlo mediante el siguiente diagrama de Feynman:



Todavía no se ha descubierto ningún quark libre, tan sólo hay indicios indirectos de su existencia. El color es una simetría exacta de la Naturaleza, es decir, todas las partículas conocidas son singletes de color, o, equivalentemente, no tienen color, son blancas. Los quarks y gluones son partículas coloreadas, por tanto, no pueden observarse en estado libre, están condenadas a estar confinadas. Intentar separar un quark de un antiquark es análogo a intentar separar un polo Norte de un polo Sur en un imán, siempre aparecen parejas de polos Norte-Sur. La QCD presenta dos propiedades interesantes: el confinamiento de los quarks dentro de los hadrones (al aumentar la distancia entre ellos aumenta la fuerza, como en un muelle), y a la libertad asintótica (al disminuir la distancia entre los quarks, la fuerza entre ellos decrece, nuevamente como en un muelle).

Para explicar el confinamiento de los quarks, se han propuesto dos modelos: el de la "cuerda", y el del "saco". En el de la cuerda se supone que los quarks están unidos por una cuerda que gira a la velocidad de la luz, y en el del saco se supone que los quarks hinchan un saco de una forma análoga a la presión que ejerce un gas dentro de

un globo.

Una diferencia fundamental entre la QED y la QCD es que los fotones no tienen carga eléctrica, mientras que los gluones sí están coloreados. Esto implica que los gluones pueden interactuar entre sí (los fotones no pueden), e incluso formar un estado ligado, una especie de molécula. A estos estados ligados se les denomina "glueballs" (bolas de pegamento), pero todavía no han sido definitivamente confirmados de forma experimental.

En 1975, se descubrieron el leptón, tauón, y su pareja correspondiente, el neutrino tauónico. Hasta ahora entre los leptones y los quarks había una especie de "correspondencia unívoca", o sea, que había cuatro leptones y cuatro quarks. Si esta relación se debía seguir cumpliendo, habría dos nuevos quarks aún por descubrir. A estos quarks se les denominó quark b, "bottom", (fondo) y quark t, "top", (cima), que gozan de unas propiedades llamadas "belleza" y "verdad", respectivamente. El grupo de L. Lederman (norteamericano, 1922, Premio Nobel en 1988) en 1977 descubrió una nueva partícula, que contiene un quark b y un anti-b. Nadie duda de la existencia del quark t; pero su masa debe ser muy alta, pues de lo contrario lo habrían encontrado en el colisionador protón anti-protón del CERN (Centro Europeo de Investigaciones Nucleares, con sede en Ginebra). Esperemos que se pueda encontrar cuanto entren en funcionamiento los anillos de colisión electrón positrón que se están construyendo en el CERN, y en los que España está colaborando.

En la tabla siguiente aparecen las masas y cargas de los seis sabores de quarks conocidos hasta ahora

	masa (MeV)	carga (veces la del electrón)
u	5	2/3
d	8	-1/3
s	150	-1/3
c	1350	2/3
b	5300*	-1/3
t	≈ 40000**	2/3

* más pesado que el átomo de Helio.

** cerca de la masa del átomo de Calcio.

K. G. Wilson (estadounidense, Premio Nobel en 1982), en 1974 establece una analogía entre la Teoría Cuántica de Campos y la Mecánica Estadística, dando origen a un nuevo campo de trabajo en el que los ordenadores juegan un papel esencial [Cr-83], es el denominado modelo de redes (lattices), en el que se sustituye el continuo espacio-tiempo por un conjunto finito de puntos formando un retículo (regular o no) los cuales se tratan mediante la ayuda de un orde-

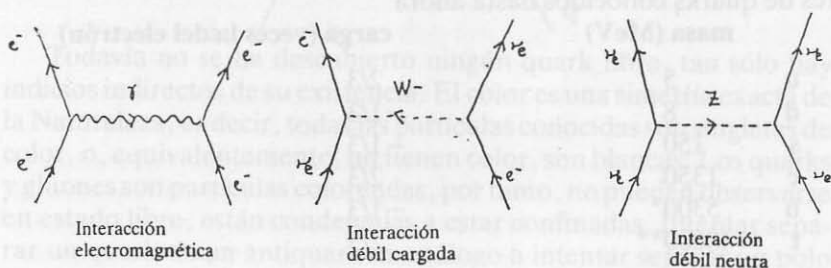
nador. En este modelo juegan un papel fundamental los métodos numéricos, especialmente el método de Monte Carlo para generar números aleatorios.

5. TEORIA ELECTRODEBIL

En el siglo XVII, en 1686, se produjo la primera unificación, Isaac Newton unificó la Mecánica Celeste con la Mecánica Terrestre, es decir, la fuerza que actúa entre dos planetas es del mismo tipo que la que actúa entre la Tierra y una manzana. Fue la denominada Ley de la Gravitación Universal.

En 1873, J. C. Maxwell unificó los campos eléctrico y magnético, dando lugar a lo que desde entonces llamamos electromagnetismo. El campo eléctrico y el magnético son distintas facetas de una misma cosa, el campo electromagnético. Mediante un cambio de sistema de referencia podemos transformar uno en otro. El electromagnetismo es la base de nuestra actual ingeniería eléctrica, radio y televisión.

Entre 1961 y 1968 hizo su aparición la teoría electrodébil de S. L. Glashow (estadounidense, 1932-, Premio Nobel en 1979), A. Salam (pakistaní, 1926-, Premio Nobel en 1979) y S. Weinberg (estadounidense, 1933-, Premio Nobel en 1979) la cual unificaba la interacción electromagnética y la nuclear débil [BP-81]. Podemos expresarlo mediante los siguientes diagramas de Feynman



Según esta teoría, también conocida como modelo estándar, así como el fotón se intercambia entre las partículas cargadas en la interacción electromagnética, los bosones W^+ , W^- y Z se intercambian entre las partículas dando lugar a la interacción débil. Es decir, las partículas interaccionan mediante el intercambio de otras partículas denominadas bosones intermedios. Un ejemplo macroscópico y familiar para todos es la interacción entre dos patinadores sobre hielo intercambiándose bolas de nieve.



G. 'T. Hooft (holandés) demostró en 1971 que la teoría electrodébil es renormalizable, es decir, que podemos eliminar los numerosos infinitos que aparecen en toda teoría cuántica de campos. Desde entonces estas ideas han sido ampliamente aceptadas.

Démosnos cuenta de que entre los leptones existen tres neutrinos con masa nula, y cada uno de ellos tiene asociado otro leptón de masa no nula. Cada pareja leptón-neutrino, además tiene asociado un quark. A este fenómeno se le denomina generaciones ¿Cuántas generaciones hay? Si el modelo estándar que actualmente estamos utilizando es correcto, a lo sumo hay cinco generaciones.

En 1983, C. Rubbia (italiano, Premio Nobel en 1984) y D. B. Cline, descubrieron los bosones del modelo estándar de la interacción electrodébil (los bosones W^+ , W^- y Z). Hay 50 sucesos que confirman la existencia de los bosones W , y 12 que confirman la existencia del bosón Z . Fueron hallados en los detectores UA1 y UA2 del CERN en Ginebra. Fue una espectacular confirmación experimental de la teoría electrodébil. Las masas de los bosones intermedios del modelo estándar, medidas experimentalmente, son:

$$\begin{aligned} \text{Masa (W)} &= 81.8 \text{ 1.5 GeV} \\ \text{Masa (Z)} &= 92.6 \text{ 1.7 GeV} \end{aligned}$$

Esta confirmación experimental del modelo estándar de la teoría electrodébil ha sido un hito fundamental en nuestro actual conocimiento de los componentes fundamentales de la Naturaleza.

6. TEORIAS DE GRAN UNIFICACION (GUTs)

En 1974 hicieron su aparición las Teorías de Gran Unificación o GUTs (Grand Unified Theories) las cuales unificaban la interacción electrodébil y la cromodinámica cuántica, para lo cual hacía falta utilizar un grupo de Lie conocido como SU(5). Las GUTs son fruto de los trabajos de J. C. Pati, A. Salam, H. Georgi y S. L. Glashow, de forma independiente, entre 1973 y 1974.

En 1896, Antoine Henri Becquerel (francés, París, 1852-1908, Premio Nobel en 1903) descubrió accidentalmente la radiactividad (una muestra más del serendipismo que tanto abunda en Ciencia). Esto fue un paso fundamental en nuestra concepción de la Naturaleza, puesto que entonces los átomos ya no eran inmutables, como pensó Demócrito, sino que podían descomponerse. Por suerte, son muy pocos los elementos radiactivos.

Las GUTs conducen a un hecho fundamental: la desintegración del protón. Esto querría decir, que si las GUTs son ciertas, todos los elementos, absolutamente todos, serían inestables. Para confirmar esta importante predicción de las GUTs se están llevando a cabo numerosos experimentos para tratar de “cazar” a un protón en el acto de desintegrarse. Los experimentos tienen lugar en sitios recónditos:

- Mina de oro de Homestake, Dakota del Sur.
- Mina de Soudan, en Minnesota.
- Mina de oro de Kolar, Sur de la India.
- Túnel de Mont-Blanc, entre Francia e Italia.
- Valle de Baksan, en el Cáucaso, URSS.
- Mina de Sal de Morton, Ohio.
- Mina de Silver King, Utah.

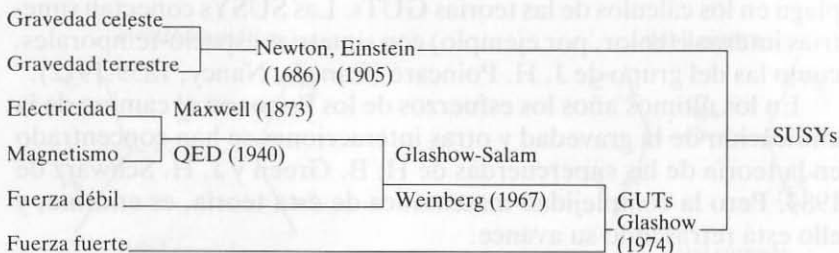
Todavía no se ha detectado ninguna desintegración del protón. Actualmente, las teorías predicen que la vida media del protón sería de unos 10^{31} . Tampoco habría que preocuparse mucho ya que se estima que la edad del Universo es de unos 10^{10} años. Pero las implicaciones metafísicas son profundas: el Universo, tal como lo conocemos, no es eterno; tarde o temprano se desintegrará por completo y desaparecerá.

Otra consecuencia importante de las GUTs, es que existe una asimetría cósmica entre la materia y la antimateria. Según parece, el Universo actual está formado, casi en su totalidad, por materia.

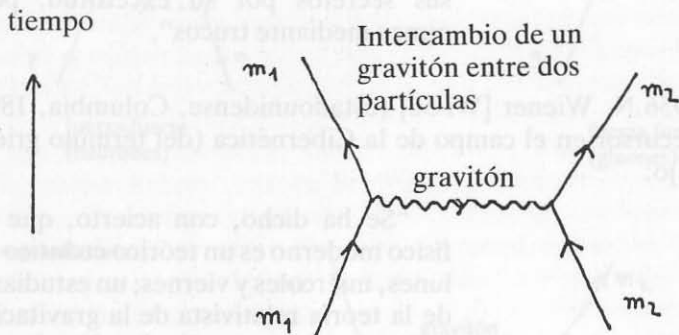
7. SUPERSIMETRIAS (SUSYs)

I. Newton y A. Einstein (alemán, suizo, estadounidense, Ulm, Alemania, 1879-1955, Premio Nobel en 1921) lograron la unificación

de la gravedad terrestre con la celeste. J. C. Maxwell, en 1873, unificó la electricidad y el magnetismo, desarrollándose posteriormente, en el siglo XX, la Electrodinámica Cuántica. En 1967, Glashow, Salam y Weinberg unificaron el electromagnetismo con la fuerza nuclear débil. Alrededor de 1974 Glashow ideó el modelo de la gran unificación (por ahora sólo supuesta) que unificaba la fuerza fuerte con la electrodébil. Y queda por unificar la gravedad con la unificación anteriormente realizada. La teoría resultante se denomina supergravedad. La gravedad parece ser distinta a las restantes interacciones. Las fuertes, electromagnéticas y débiles actúan dentro del marco del espacio-tiempo, mero contenedor de los sucesos físicos. La gravedad, en cambio, consiste (de acuerdo con la teoría de la gravitación de Einstein) en una distorsión del propio espacio-tiempo.



La gravedad, a diferencia de las otras interacciones, debe venir mediada por el intercambio de una partícula de masa nula y spin 2 (el gravitón) para poder explicar su carácter siempre atractivo. Un diagrama de Feynman típico puede ser el siguiente



Todos los intentos realizados para obtener una teoría cuántica de la gravedad (gravitación cuántica) han fracasado al conducir a teorías no renormalizables. Se han logrado, no obstante, algunos éxitos como las famosas leyes de la radiación de los agujeros negros dedu-

cidas por S. W. Hawking (británico, Oxford, 1942-) [Ha-74].

Por razones estéticas e intentado incluir la gravedad dentro de la unificación, los físicos han dedicado una cantidad considerable de energía a desarrollar la siguiente hipótesis: por cada bosón la Naturaleza ha producido un fermión hermano y viceversa. El electrón, un fermión con spin $1/2$, debe tener una hermana, el selectrón, un bosón con spin cero. Análogamente, el fotón, un bosón vectorial con spin 1, se espera que tenga un fermión hermano, el fotino con spin $1/2$. Las hermanas bosónicas supersimétricas de los fermiones básicos toman el nombre de sus hermanos con el sufijo -s. Los hermanos fermiónicos de los bosones básicos forman su nombre añadiendo el diminutivo latino -ino a los nombres de los bosones. El gravitón tiene un fermión hermano, el gravitino.

Las teorías SUSY son formalmente atractivas y proporcionan un alto grado de cancelación en los infinitos que aparecen como una plaga en los cálculos de las teorías GUTs. Las SUSYs conectan simetrías internas (color, por ejemplo) con simetrías espacio-temporales, como las del grupo de J. H. Poincaré (francés, Nancy, 1859-1912).

En los últimos años los esfuerzos de los físicos en el camino de la unificación de la gravedad y otras interacciones se han concentrado en la teoría de las supercuerdas de H. B. Green y J. H. Schwarz de 1984. Pero la complejidad matemática de esta teoría, es enorme, y ello está retrasando su avance.

Aún estamos muy lejos de entender todas las complejidades del mundo que nos rodea. Poco a poco nos vamos acercando a la comprensión de los secretos íntimos de la Naturaleza. Tarde o temprano los alcanzaremos, porque, como dijo Albert Einstein,

“Dios es sutil (Subtle is the Lord), pero no malicioso. La Naturaleza oculta sus secretos por su excelsitud, pero nunca mediante trucos”.

En 1956 N. Wiener [Wi-56] (estadounidense, Columbia, 1894-1964) precursor en el campo de la Cibernética (del término griego piloto) dijo:

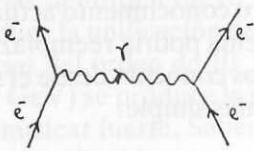
“Se ha dicho, con acierto, que un físico moderno es un teórico cuántico los lunes, miércoles y viernes; un estudiante de la teoría relativista de la gravitación los martes, jueves y sábados. Los domingos se los pasa rezándole a su Dios y pidiéndole que alguien, preferiblemente él, encuentre la reconciliación entre estas dos teorías”.

8. PRESENTE

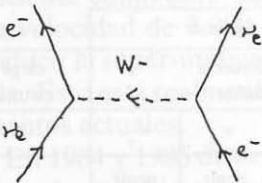
Actualmente se cree que los constituyentes fundamentales de la materia son:

- leptones: $(e^-, \nu_{e^-}), (\mu, \nu_\mu), (\tau, \nu_\tau)$
- quarks: $(u, d), (s, c), (t, b)$
cada quark tienen tres colores.
- bosones intermedios: fotón, W^+, W^-, Z , gluones y gravitón.

y sus interacciones son:

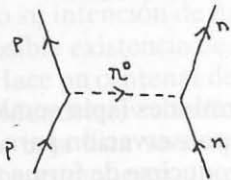


electromagnética

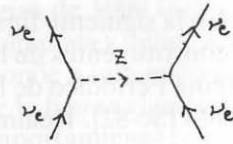


débil cargada

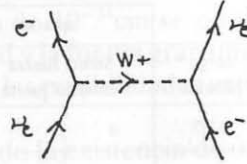
- cromodinámica cuántica.



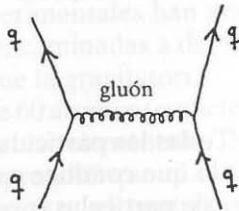
fuerza fuerte
(hadrones)



débil neutra

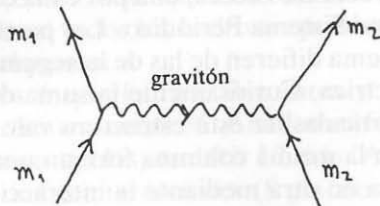


débil cargada



fuerza fuerte
(gluones)

- gravitatoria.



gravitatoria

Los bosones intermedios que actúan como mediadores o emisarios en todas estas fuerzas aparecen en la siguiente tabla:

partícula	masa (GeV)	Fuerza	
fotón	0	electromagnética	} electrodébil
W+	82	débil	
W-	82	débil	
Z	93	débil	} cromodinámica
pión	0'14	fuerte (hadrones)	
gluón	0	fuerte (gluones)	
gravitón	0	gravitatoria	

En la siguiente figura resumimos nuestro conocimiento actual de los constituyentes de la materia. Este esquema podría reemplazar al Sistema Periódico de los elementos químicos conocido desde el siglo pasado [Sc-82]. Realmente parece mucho más simple.

		quarks			leptones			
carga eléctrica	Siente fuerza nuclear fuerte							carga eléctrica
	No siente fuerza nuclear fuerte							
+2/3	u	c	t(?)	ν_{e-}	ν_{μ}	ν_{τ}	0	
	arriba	encan.	cima	neutr. elect.	neutr. muóni	neutr. tauón	-1	
-1/3	d	s	b	e-	$\mu-$	$\tau-$		
	abajo	extra.	fondo	elect.	muón	tauón		

Sistema Periódico de las partículas elementales.

Todas las partículas de esta tabla son fermiones (spin semienteros) lo que conduce a que existía una ley de conservación para cada clase de partículas y, por tanto, no pueden producirse de forma aislada, sino en forma de pares partícula-antipartícula.

Hay dos clases de partículas en esta tabla, los leptones que no sufren la fuerza nuclear fuerte, y los quarks que sí la sufren. Los quarks tienen tres colores, es decir, la parte izquierda de la tabla debería aparecer tres veces, una por cada color. En total hay 24 partículas en este Sistema Periódico. Las partículas en la primera línea de este esquema difieren de las de la segunda línea en una unidad en la carga eléctrica. Curiosamente la suma de las cargas eléctricas de todas las partículas de esta estructura vale cero. Las dos partículas que están en la misma columna forman una familia y pueden transformarse una en otra mediante la interacción débil. La masa de las partículas aumenta de izquierda a derecha.

9. FUTURO

Actualmente estamos en un período de expectación. Estamos esperando una confirmación clara de las teorías de gran unificación, estamos esperando que entren en funcionamiento los nuevos aceleradores para descifrar el enigma de la existencia de partículas predichas y también estamos esperando que la teoría de las supercuerdas haga alguna predicción clara que pueda ser comprobada con las técnicas experimentales que en ese momento se dispongan.

Cuando alcanzamos energías que nos permiten llegar hasta distancias del orden de 10^{-17} cm (es decir, energías de 1000 GeV), se produce la unificación de las fuerzas electromagnética y débil. A distancias del orden de 10^{-29} cm (lo que corresponde a una energía de 10^{15} GeV) se produce la gran unificación entre la fuerza electrodébil y la nuclear fuerte. Sabemos poco sobre el comportamiento cuántico de la gravitación, pero parece que a energías de 10^{20} GeV (energía suficiente como para hacer que una masa de una tonelada alcance una velocidad de 3.000 Km/h) o a distancias de 10^{-34} cm se podría producir la super-unificación entre la gravedad y la fuerza gran unificada. Esto está realmente demasiado lejos de las posibilidades experimentales actuales.

En 1984 y 1986 diversos físicos han sugerido la existencia de una quinta fuerza. Si fuera cierto, sobre un cuerpo en caída libre actuaría, además de la fuerza gravitacional, otra fuerza repulsiva proporcional al número de nucleones (protones o neutrones) que contuviera por unidad de masa. Hay polémica sobre la interpretación de los datos experimentales. Varios grupos experimentales han anunciado su intención de hacer nuevas medidas encaminadas a detectar la posible existencia de fuerzas más débiles que la gravitatoria.

Hace un centenar de años, los alrededor de 60 átomos (o núcleos) que Mendeleiev clasificó constituían las partículas elementales. Más tarde esta lista se simplificó cuando se comprendió que el núcleo estaba compuesto únicamente por dos elementos, el neutrón y el protón. Alrededor de 1950 parecía que toda la materia estaba construida con unos pocos hadrones (el neutrón, el protón y los piones) y leptones (electrón, muón y neutrino).

Posteriormente la lista de hadrones se incrementó hasta más allá del centenar; pero se redujo drásticamente cuando apareció el modelo quark, según el cual todos los hadrones pueden construirse con tres quarks y tres antiquarks.

Actualmente tenemos 6 quarks, con 3 colores y que con sus correspondientes antipartículas suman 36. Añadamos 6 leptones con sus correspondientes antipartículas, es decir 12 más. Añadamos los 12 bosones mediadores de las interacciones (8 gluones, fotón, W^+ , W^- y Z). En total tenemos 60 partículas elementales. Parecen

muchas.

¿Habrán subquarks como componentes de los quarks?, ¿Habrán su-subquarks que forman los subquarks?. Está en plena ebullición la comunidad de físicos teóricos desarrollando modelos de subquarks, también llamados preones. Desde luego, todavía no se ha podido establecer ningún vínculo entre dichos modelos y las evidencias experimentales [Ad-87].

El viejo sueño del Hombre es encontrar la Clave del Universo, la unidad de su variedad infinita. Hasta ahora, siempre que el Hombre ha querido alcanzar una respuesta a la cuestión, ha acabado hallando una puerta que, desde la aparente unidad, ha conducido a una nueva variedad. La teoría atómica es un buen ejemplo.

10. GLOSARIO DE TERMINOS TECNICOS

Presentamos una lista, ordenada alfabéticamente, de todas las palabras técnicas que han aparecido a lo largo de este artículo.

agujero negro

angstrom

antimateria

barión

belleza

bosón

color

confinamiento

encanto

extrañeza

fermi

fermión

GeV

glueball

grupo de Lie

hadrón

libertad asintótica

MeV

unificación

quark

radiactividad

renormalización

spin

verdad

11. DICCIONARIO DE NOMBRES PROPIOS

Aquí aparecen los nombres de todos los científicos citados en este artículo cuyas contribuciones creemos que han sido fundamentales, junto a la de otros, a la hora de comprender cuales son los constituyentes fundamentales de la Naturaleza.

Anaximandro

Anderson

Avogrado

Becquerel

Cavendish

Cline

Coulomb

Cowan

Mendeiev

Neddermeyer

Ne'eman

Newton

Occhialiani

Oersted

Pati

Pauli

Chadwick
 Dalton
 Demócrito
 Dirac
 Einstein
 Empédocles
 Fermi
 Feynman
 Gay-Lussac
 Gell-Mann
 Georgi
 Glashow
 Green
 Hawking
 Iliopoulos
 Lattes
 Lavoisier
 Lederman
 Leucipo
 Lorentz
 Maiani
 Maxwell

Poincaré
 Powell
 Priestley
 Proust
 Reines
 Richter
 Rubbia
 Rutherford
 Salam
 Schward
 Schwinger
 T. Hooft
 Thomson
 Ting
 Tomonaga
 Van der Meer
 Weinberg
 Wiener
 Wilson
 Yukawa
 Zweig

12. REPARTO DE PARTICULAS

Como si de una película se tratara, aquí tenemos el reparto de estrellas que, evidentemente, son las partículas que en cada momento han ido saliendo a escena. Las listamos por orden de aparición.

apeiron	J/
electrón	gluón
protón	tauón
neutrón	neutrino tauónico
fotón	b
neutrino	t
pión	
muón	W^+
positrón	W^-
kaón	Z
quark	gravitón
u	selectrón
d	fotino
s	gravitino
c	preón

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Ricardo López sus encantadores dibujos y a José Beltrán el haberme animado a escribir una comunicación sobre este tema para la Reunión anual de Mensa (RAM) que tuvo lugar en Zaragoza durante el mes de septiembre de 1988.

REFERENCIAS

Zaragoza durante el mes de septiembre de 1988.

Le agradezco también al doctor Ramón Varón una lectura crítica del manuscrito.

Resulta difícil resumir toda la Física subatómica en unas pocas palabras, pues es un terreno conceptualmente difícil y en el cual se producen continuas convulsiones de forma casi periódica. Cualquier error que se haya deslizado en estas páginas es imputable única y exclusivamente al autor de estas letras. En estos momentos me vienen a la mente la siguiente frase:

“El que sabe no habla,
el que habla no sabe”
Lao Tzu: “Tao Te Ching”

REFERENCIAS

[Ad-87] R. K. ADAIR: *The Great Design*. Oxford University Press, NY, 1987

[BP-81] J. BERNABEU y P. PASCUAL: *Electro-Weak Theory*, Grupo Interuniversitario de Física Universitaria (GIFT), 1981.

[Cr-83] M. CREUTZ: *Quarks, Gluons and Lattices*, Cambridge, U. P., Cambridge, 1983.

[Ge-64] M. GELL-MANN, *Physics Letters* 8 (1964) 214.

[GN-64] M. GELL-MANN e Y NE'EMAN: *The eightfold way*, Benjamín, NY, 1964.

[Ha-74] S. W. HAWKING, *Nature*, 248 (1974) 30.

[Pa-86] A. PAIS: *Inward Bound*, Oxford U. P., NY, 1986.

[Pa-87] P. PASCUAL: *De rerum natura*, Servicio de Publicaciones, Universitat de València, 1987.

[Sc-82] H. SCHOPPER: *Elementary particles physics - where it is going*, CERN 82-08, 1982.

[Wi-56] N. WIENER: *I am a mathematician*, MIT Press, 1956.

[Zw-64] G. ZWEIG: Preprints del CERN TH-401 y TH-412 (1964). No llegó a publicarse nunca, al ser considerado como descabellado.