

SEMBLANZAS DE LOS PREMIOS NOBEL DE 1999

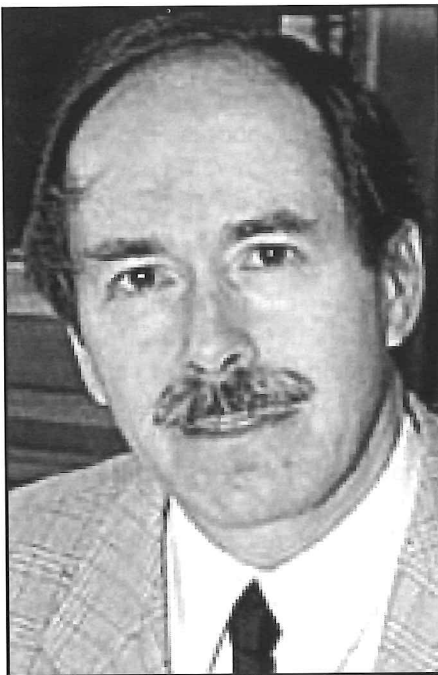
Premio Nobel de Física 1999: la teoría de la interacción electrodébil

En mi época de estudiante, el Profesor de Mecánica Cuántica nos dijo que la Física no busca encontrar el *por qué* de los fenómenos naturales, sino más bien desvelar *cómo suceden*, es decir, la estructura de las leyes de la Naturaleza. Su origen último es más un problema metafísico, difícilmente abordable con el método científico. El premio Nobel de 1999 ha sido otorgado a los Doctores holandeses *Gerardus't Hooft* y *Martinus Justinus Godefriedus Veeltman* (Gerardus y Tini para sus colegas), por una serie de trabajos

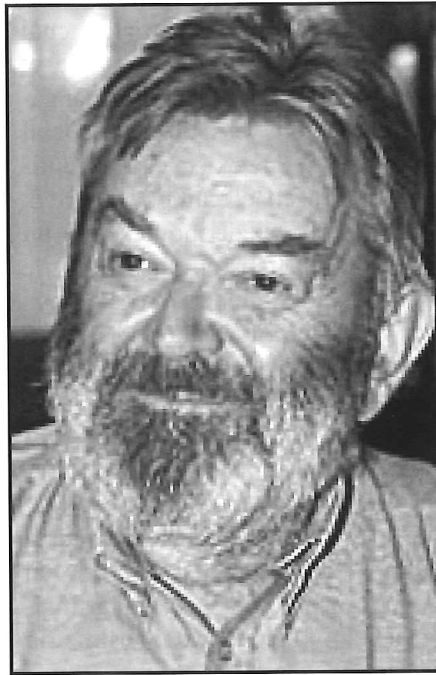
gravitatorias y electromagnéticas son conocidas desde antiguo. Las otras dos, la interacción débil y la fuerte, son más recientes ya que su conocimiento data de poco más de un siglo. Entre los años 1896 y 1898 primero Becquerel y después Pierre y Marie Curie, encontraron que ciertas sustancias como el Uranio y el Radio emitían espontáneamente radiaciones, identificando con ello la primera manifestación conocida de la interacción débil. En los alrededores del año 1910 Ernest Rutherford, en sus experimentos sobre la estructura atómica descubrió las interacciones fuertes. Sin embargo, habrían de pasar más de setenta años hasta que los ahora galardonados convirtiesen, con sus trabajos, nuestro conocimiento en una teoría coherente, teniendo en

EL MODELO ESTÁNDAR

Todos los objetos de la naturaleza están constituidos por átomos y ellos mismos por electrones y núcleos, estos últimos compuestos de protones y neutrones, a su vez constituidos por quarks. El estudio de la materia al nivel de sus constituyentes fundamentales exige la utilización de aceleradores muy potentes. Así, hasta 1950 no fue formulada la primera versión de la *teoría de todo* o de casi todo (las fuerzas gravitatorias no están aún completamente entendidas) que, después de numerosos años de perfeccionamiento, ha dado lugar al nacimiento el modelo estándar en el seno de la física de partículas. Según este modelo todas las partículas elementales pueden ser agrupadas en tres familias de quarks y tres de leptones, que interactúan a través de un cierto número de par-



Gerardus't Hooft.



Martinus Justinus Godefriedus Veeltman.

fundamentales sobre la estructura cuántica de la teoría de la interacción electrodébil, una de las interacciones fundamentales de la Naturaleza.

De los cuatro tipos de interacciones que actúan en la naturaleza, las

cuenta correctamente los requisitos cuánticos, y capaz de realizar predicciones concretas; pasando otros diez años hasta que dicha teoría ha sido comprobada experimentalmente más allá de toda duda razonable.

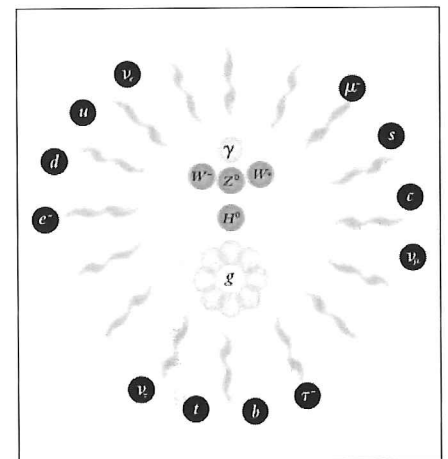


Figura 1. Las partículas fundamentales que forman la materia son seis leptones (ν_e , e , ν_μ , μ , ν_τ , τ) y seis quarks (u , d , t , b , c y s). En el Modelo Estándar de la física de partículas, las fuerzas entre estos elementos son descritas por teorías cuánticas de campos, las cuales son teorías de gauge no abelianas. Según ellas, las fuerzas electrodébiles se transmiten por medio de cuatro partículas: el fotón (masa nula) y tres partículas pesadas W^+ , W^- y Z^0 . La fuerza fuerte es transmitida por ocho gluones g (masa nula). Además de estas doce partículas mediadoras, la teoría predice la existencia de una partícula de campo muy pesada, la partícula de Higgs H^0 (aún no encontrada) y cuyo campo engendraría las masas de todas las partículas.

tículas mediadoras en el caso de las interacciones fuerte y electrodébil (Figura 1).

La estructura teórica del modelo estándar estaba incompleta desde el punto de vista de su coherencia matemática, no siendo posible realizar cálculos detallados de los valores de las magnitudes físicas medibles experimentalmente. *Gerardus't Hooft* y *Martinus Justinus Godefriedus Veeltman* han recibido el premio Nobel por haber dotado a este modelo de una sólida estructura. Así, de ahora en adelante, los investigadores disponen de un edificio teórico coherente que puede dar lugar, entre otras cosas, a predecir las propiedades de las nuevas partículas.

TEORÍAS DE GAUGE

Las teorías modernas utilizadas dentro del modelo estándar de las partículas elementales, para describir la interacción entre ellas reciben el nombre de teorías de gauge¹. El término gauge define una propiedad de estas teorías denominada simetría de gauge², que muchos físicos consideran como una de las propiedades fundamentales de la Naturaleza. En 1860 el físico escocés James Clerk Maxwell formula la teoría del electromagnetismo, que sigue siendo válida en la actualidad y que unifica el magnetismo y la electricidad. Según la terminología actual es una teoría de gauge y cuando fue propuesta pudo anticipar fenómenos desconocidos por entonces, como las ondas hertzianas.

Para ilustrar el concepto de simetría de gauge podemos utilizar la teoría electromagnética; en ella los campos eléctrico y magnético, que poseen realidad física, se pueden expresar en términos de los potenciales, funciones matemáticas sin ninguna entidad física. Estas funciones se pueden variar siguiendo cier-

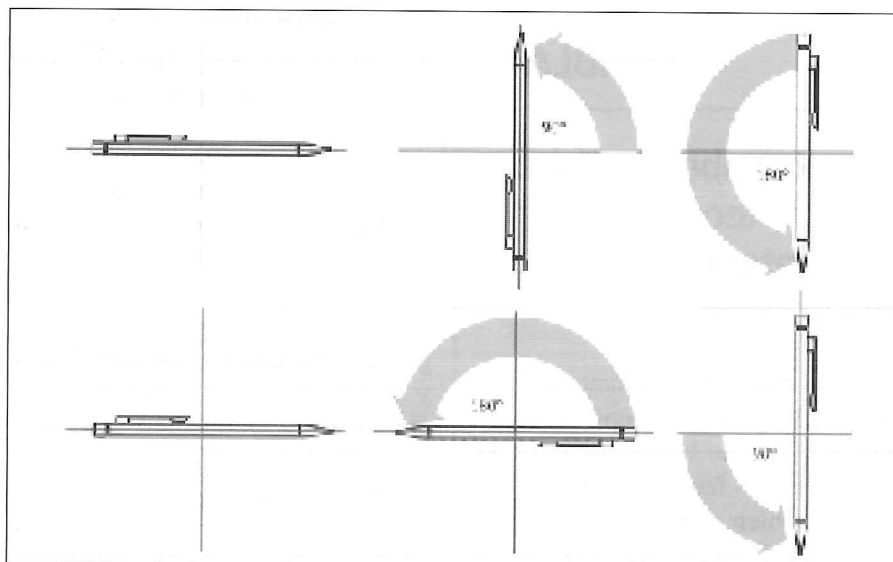


Figura 2a. Las rotaciones en un plano bidimensional constituyen un ejemplo de un grupo de transformaciones abelianas. El orden en que se realicen las rotaciones no influye en el resultado final.

tas reglas sin que ello provoque la modificación de los campos. Así, por ejemplo, la transformación más simple consistiría en sumar una constante al potencial eléctrico, es decir, es posible variar el punto cero del espacio-tiempo a partir del cual se calcula el potencial, sin que el campo eléctrico sufra ninguna variación. Hemos variado el potencial de gauge sin que exista el más mínimo cambio en el campo eléctrico. (Un pajarillo puede moverse por un cable de alta tensión sin riesgo de electrocutarse mientras no extienda una patita para tocar la otra línea o el suelo.) Las teorías basadas en voltajes o potenciales, en las cuales sólo las diferencias son significativas, son las llamadas teorías de gauge o de contraste. Así, el hecho de que el cero de potencial se pueda trasladar como hemos mostrado en el ejemplo anterior ilustra una simetría en el modelo teórico: la simetría de gauge.

Cuando efectuamos dos transformaciones de gauge sucesivas y el orden en que han sido realizadas no tiene ninguna importancia, como ocurre en caso del electromagnetismo, se dice que se trata de una teoría de gauge abeliana, en honor del matemático Niels Henrik Abel (1802-1829). La figura 2a muestra un ejemplo de transformaciones abelianas.

LA MECÁNICA CUÁNTICA PLANTEA NUEVOS PROBLEMAS

Desde que la Mecánica Cuántica fue formulada en 1925, se trató de cuantificar el campo electromagnético. Pero los investigadores se encontraron con problemas muy complicados, pues la electrodinámica cuántica se reveló como una teoría muy compleja y que daba lugar a resultados absurdos. Esto es debido a que la teoría cuántica predice que el campo electromagnético en las cercanías de un electrón o un protón engendra una gran cantidad de partículas o antipartículas virtuales. Un electrón se transforma en un sistema constituido por una multitud de partículas.

El problema fue resuelto en los años 1940 por Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger y Richard P. Feynman (que obtuvo en 1965 el premio Nobel por sus trabajos). El método desarrollado por estos investigadores se denomina *renormalización*, en el cual no es necesario considerar individualmente los pares de partículas virtuales, es suficiente considerar la existencia de una nube de tales partículas virtuales que sombrea a la partícula inicial. Utilizando la terminología moderna podemos decir que Tomonaga, Schwinger y Feynman

¹ En castellano se las puede denominar teorías de calibre o de contraste.

² Invarianza de contraste.

renormalizaron una teoría de gauge abeliana. La electrodinámica cuántica ha sido comparada de una manera muy precisa con las medidas experimentales, encontrándose que en al menos las 10 primeras cifras significativas hay una concordancia perfecta entre los resultados medidos y los predichos por la teoría.

UNIFICACIÓN DE LAS INTERACCIONES ELECTROMAGNÉTICA Y DÉBIL: LA INTERACCIÓN ELECTRODÉBIL

En el año 1930 se formuló la primera teoría cuántica de campos para la interacción débil. Esta primera teoría encerraba muchos más serios problemas que los encontrados en la electrodinámica cuántica. Así parecía imposible su renormalización tal como habían hecho Tomonaga, Schwinger y Feynman. En los años cincuenta se presenta la primera teoría cuántica para campos de gauge no abelianos. Esto es, campos en los que el resultado de las transformaciones de gauge depende del orden en que han sido realizadas, como se muestra en el ejemplo de la figura 2b. En ese caso, a diferencia de lo que ocurre en el caso 2a, se dice que se ha roto la simetría.

A partir de 1960, muchos investigadores en vista de sus posibilidades contribuyeron a desarrollar una teoría de gauge no abeliana capaz de combinar las interacciones electromagnéticas y débil en una interacción electrodébil (el Premio Nobel de 1979 se concedió a Sheldon H. Glashow, Abdus Salam y Steven Weinberg por esta unificación). Esta teoría cuántica de campo predecía la existencia de dos nuevas partículas W y Z, que fueron encontradas en 1983 en el CERN en Ginebra (el Premio Nobel de 1984 fue concedido a Carlo Rubbia y Simon van der Meer por este descubrimiento).

LA HISTORIA SE REPITE

La teoría de la interacción electrodébil constituía un gran paso en el camino a un modelo unificado de la Naturaleza, pero la comunidad científica no lo aceptaba completamente. Pues cuando se intentaba utilizarla para efectuar cálculos precisos de las propiedades de entidades físicas mensurables, tal como las de las partículas W y Z, los investigadores obtenían resultados absurdos. Esta situación era parecida a la de 30 años antes cuando Tomonaga, Schwinger y Feynman consiguieron renormalizar la elec-

trodinámica cuántica. Sin embargo, lograrlo ahora con la interacción electrodébil parecía imposible.

Martinus J. G. Veeltman pertenecía al grupo de físicos que aún creían posible renormalizar una teoría de gauge no abeliana. A finales de los años 60 acababa de ser nombrado catedrático de la Universidad de Utrech. Veltman había elaborado a principios de los años 60 un programa informático al que llamó Schoonship³ (limpiar/ordenar el barco en holandés) capaz de realizar de forma simbólica las simplificaciones algebraicas de las complejas expresiones que aparecían en las teorías cuánticas de campos cuando se intentaban realizar cálculos cuantitativos. Veinte años antes Feynman había sistematizado el problema de dichos cálculos e introducido los diagramas conocidos como diagramas de Feynman. Veltman estaba convencido de que de hallar un medio para renormalizar la teoría electrodébil, su software se constituiría en la herramienta fundamental a la hora de comprobar los diferentes modelos.

En la primavera de 1969, Veltman admite a un alumno de 22 años, Gerardus't Hooft, que estaba interesado en estudiar la física de altas energías. En el otoño del mismo año comienza a preparar su tesis doctoral, cuyo objetivo era la investigación de un método para la renormalización de las teorías de Gauge no abelianas. T'Hooft, en contra de toda esperanza, supera las dificultades publicando en 1971 dos artículos que iluminan el camino hacia el objetivo del programa de investigación. Con ayuda del programa informático de Veltman se verificaron los resultados parciales de t'Hooft y ambos consiguieron desarrollar

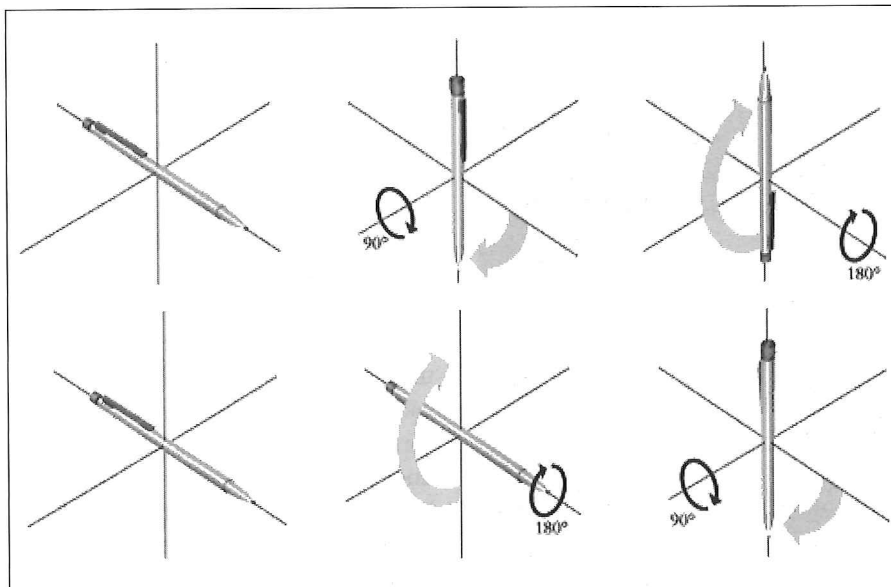


Figura 2b. Las rotaciones en un espacio tridimensional constituyen un ejemplo de un grupo de transformaciones no abelianas. El orden en que se efectúen dichas rotaciones condiciona el resultado final.

³ Escrito directamente en lenguaje de máquina, ya que de otra manera no hubiera sido operativo dada la lentitud y escasez de memoria de los ordenadores de la época, este lenguaje fue durante los siguientes 20 años el más potente de los existentes en el mercado; sin sus capacidades no hubieran podido realizarse muchos de los delicados y largos cálculos que, en particular, requiere la física de altas energías; todavía a mediados de los años ochenta Schoonship era la herramienta más rápida para realizar cálculos simbólicos.

completamente el método de cálculo. Así, la teoría de gauge no abeliana de la interacción electrodébil adquiere una maquinaria teórica completamente sólida que hace posible, como había ocurrido con la electrodinámica cuántica 20 años antes, realizar el cálculo de magnitudes físicas medibles.

La teoría de la interacción electrodébil había predicho desde el comienzo la existencia de dos nuevas partículas W y Z. Sólo a partir de los trabajos de los Premios Nobel del presente año se han podido realizar predicciones precisas de los valores de las propiedades de dichas partículas. Estos valores han sido medidos recientemente en el acelerador LEP (Large Energy Particles) del CERN, comprobándose que coinciden exactamente con las predicciones de la teoría.

Una cantidad predicha utilizando la maquinaria teórica de t'Hooft y Veltman es la masa del *quark top*, el más pesado de los dos quark incluidos en la tercera familia del Modelo Estándar. Este quark ha sido observado por primera vez el año 1995 en el laboratorio Fermilab (USA) y el valor medido de su masa coincide con el predicho por la teoría.

Aparte de los trabajos directamente relacionados con la interacción electrodébil, t'Hooft y Veltman han continuado realizando aportaciones notables en el conocimiento de la naturaleza, aunque siguiendo caminos separados. T'Hooft se orientó hacia las interacciones fuertes, y en la actualidad se interesa especialmente por la relatividad general. Veltman ha seguido trabajando en el dominio de las partículas elementales, y podemos citar sus trabajos sobre la existencia o no del campo de Higgs, que es un ingrediente esencial de la interacción electrodébil. Así mismo, ha mantenido una estrecha relación con la Universidad Española, más concretamente, ha sido Profesor Extraordinario adscrito al Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.

BIBLIOGRAFÍA

- M. Veltman, *Nuclear Physics B7* (1968) 637.
 G.'t Hooft, *Nuclear Physics B35* (1971) 167.
 G.'t Hooft and M.Veltman, *Nuclear Physics B44* (1972) 189; *B50* (1972) 318.
 G.'t Hooft, *Teorías de Gauge de las fuerzas entre las partículas elementales* en *Partículas Elementales: Quarks, leptones y unificación de las fuerzas*. Libros de Investigación y Ciencia – Scientific American, pp.188-206, Ed. Prensa Científica (1984).
 K. Moriyasu, *An Elementary Primer for Gauge Theory*, Word Scientific Publishing (1983).
 Martinus J.G. Veltman, *The Higgs Boson*, *Scientific American*, p. 88 (1986).
 G.'t Hooft, *In Search for the Ultimate Building Blocks*, Cambridge University Press (1997).
 Francisco J. Ynduráin, *Revista Española de Física*, Vol. 13, N.º5, p. 2 (1999).
 Enrique Álvarez, *Revista Española de Física*, Vol. 13, N.º5, p. 5 (1999).

Miguel Giménez Murria
 Depto. de Física de los Materiales

Premio Nobel de Química 1999

El Premio Nobel de Química del año 1999 ha recaído sobre el investigador Ahmed H. Zewail del *California Institute of Technology*, por desarrollar una nueva técnica que permite extraer información sobre la dinámica de las reacciones químicas.



Ahmed H. Zewail.

por desarrollar una nueva técnica que permite extraer información sobre la dinámica de las reacciones químicas.

Ahmed H. Zewail, de 53 años, es egipcio y posee la doble nacionalidad egipcia-estadounidense. Ocupa la cátedra Linus Pauling de Química y es Profesor de Física en el *California Institute of Technology* y Director del *NSF Laboratory for Molecular Sciences (LMS)*. Recibió sus grados de B.S. y M.S. en la Universidad de Alejandría, y después de doctorarse (Ph.D.) en la Universidad de Pennsylvania, comenzó a trabajar en la Universidad de California. A lo largo de su vida profesional ha recibido numerosos premios y condecoraciones, que vienen resumidas en la página Web dedicada a su biografía: [<http://www.its.caltech/%Efmto/zewal.html>].

Según palabras del propio Dr. Zewail, sus trabajos de investigación permiten “comprender en sus aspectos fundamentales la forma en que los átomos se comportan en una reacción química”. Se considera a este investigador como el impulsor de la llamada espectroscopía de femtosegundos, mediante la cual se estudian los estados transitorios de las reacciones químicas.

Cuando los átomos o moléculas intervienen en reacciones químicas, se mueven de forma muy rápida, de tal forma que no se puede observar el proceso que tiene lugar. Imaginemos que mediante una cámara de alta velocidad se filma este proceso, y con posterioridad se analiza la película a cámara lenta (similar a las cámaras de cine de alta velocidad). El trabajo del Dr. Zewail ha consistido en desarrollar esta supuesta cámara para poder observar ciertas reacciones químicas que se producen en un tiempo muy corto. No obstante, estas reacciones no se producen de forma inmediata: los reactantes se unen formando especies intermedias, hasta llegar al producto final de la reacción. Durante este proceso, se rompen los enlaces químicos y se originan otros, pudiendo observar esta evolución mediante el uso de la espectroscopía de femtosegundos.