

Examen final para el Modelo Estándar de Partículas

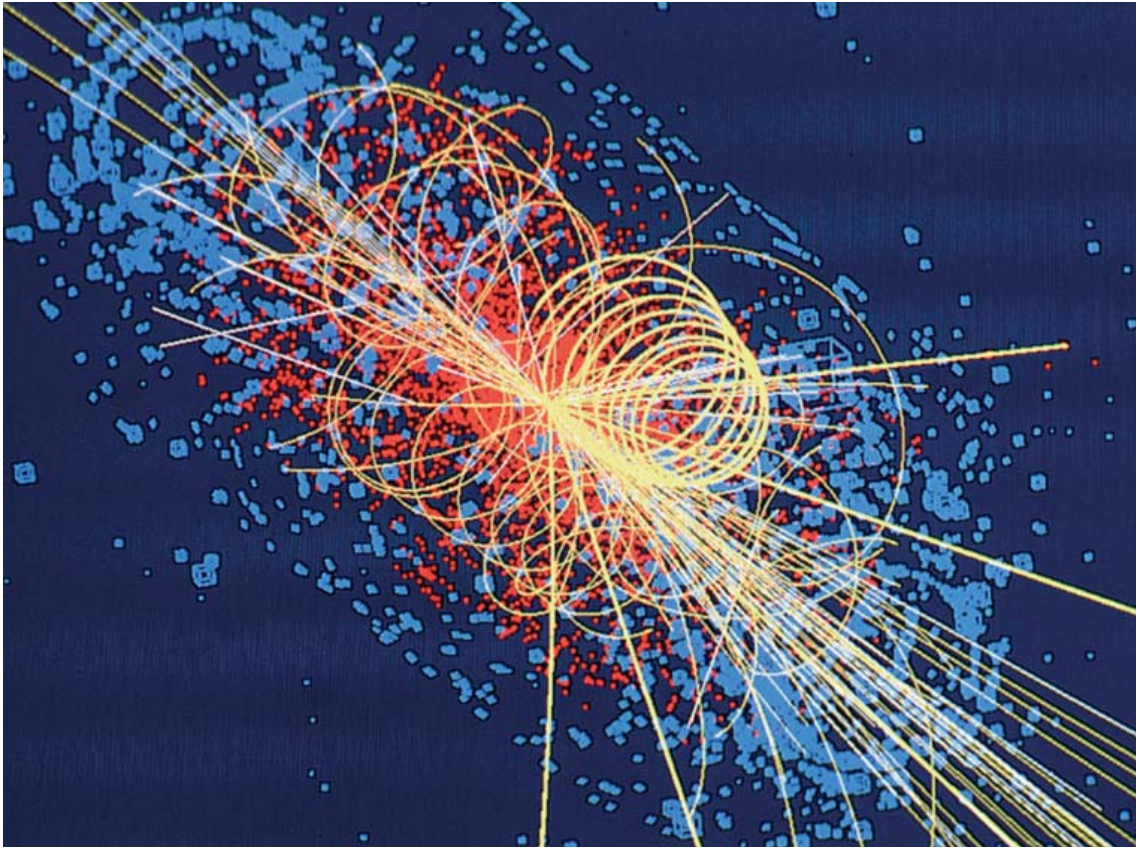
Por Víctor Aldaya y Francisco López (IAA, CSIC)

Las interacciones de la vida real

ANTES DEL NACIMIENTO DE LA TEORÍA CUÁNTICA, la Física se manejaba solamente con las dos interacciones que se manifiestan dentro de las escalas de la vida corriente, esto es, la interacción *gravitatoria* y la *electromagnética*. Ambas tienen en común su largo alcance, es decir, su acción se deja sentir a grandes distancias. Este hecho se expresa matemáticamente por un decaimiento como el inverso de la distancia del potencial del que deriva su fuerza. Incluso su analogía puede llevarse tan lejos como para comparar el movimiento kepleriano de los astros con el de los electrones en torno al núcleo de los átomos. Sin embargo, hay una diferencia cualitativa que las distingue más allá de las escalas humanas, y es la inexistencia de masas (cargas gravitatorias) negativas. En efecto, una carga eléctrica positiva rodeada más o menos simétricamente por cargas de distinto signo da lugar a un potencial efectivo con un decaimiento muchísimo mayor. Así pues, solo la interacción gravitatoria se hace sentir a escalas cosmológicas, y gobierna la evolución del Universo en el régimen clásico actual. En los comienzos de la Mecánica Cuántica, o Física de las escalas muy pequeñas, en un intento por describir la estructura de los propios núcleos atómicos, compuestos por protones y neutrones, hubo de introducirse una nueva interacción que aglomerara tales componentes. Es la interacción *fuerte*, que ha tenido un carácter fenomenológico hasta entrada la segunda mitad del siglo XX. En esos momentos, lo que podríamos denominar *materia de diario* estaba constituida por *electrones* e^- , en la corteza de los átomos, *protones* p y *neutrones* n , en los núcleos atómicos, y, también desde el punto de vista corpuscular, el *fotón* γ . A estos componentes hay que añadir sus antipartículas (e^+ , p^- , \bar{n} , $\gamma = \bar{\gamma}$). En 1930, sin embargo, fue necesario imaginar la existencia de una nueva partícula, e incluso una nueva interacción, que explicara la desintegración (desintegración β) de los neutrones libres, dando lugar a protones y electrones de acuerdo con el esquema de reacción:



La nueva partícula, el *neutrino*, era requerida en la reacción anterior para satisfacer la conservación de la energía. Esta nueva interacción fue denominada *débil* por ser aproximadamente un millón de veces más débil que la fuerte y unas diez mil veces más débil que la electromagnética, grosso modo; esta interacción resultaba ser de muy corto alcance en contraposición a las interacciones que se manifiestan en la vida corriente. La comprobación experimental de la existencia del neutrino no tuvo lugar hasta 1956.



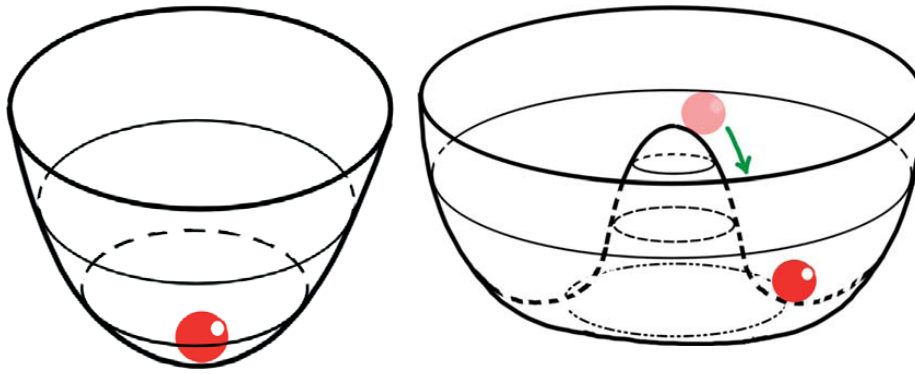
Simulación de un suceso típico en el CMS del LHC.

Teoría Cuántica de la Interacción

A la Mecánica Cuántica primitiva pronto siguió una Teoría Cuántica del Campo electromagnético como mediador de la interacción entre cargas eléctricas elementales. Así, el fotón toma consideración de partícula cuántica propiamente, de modo que la acción a distancia de dos partículas cargadas tiene lugar por intercambio de una partícula mediadora, el fotón, que les intercambia momento y energía preservando la carga de cada una. Gráficamente se representa por un *diagrama de Feynman* del tipo:



Electrón protón yendo a electrón protón



Izda. Potencial correspondiente a una partícula con masa real. Dcha. "Potencial" de Higgs.

Dos características fundamentales que garantizan la consistencia general de una teoría cuántica de la interacción son la finitud y la unitariedad. En el caso de la Electrodinámica Cuántica estas propiedades están garantizadas fundamentalmente en virtud a una simetría conjunta de las partículas elementales cargadas, a la que se acoge como a un Principio (Principio de Invariancia Gauge). Hay que remarcar, no obstante, que la simetría gauge requiere necesariamente que la masa de la partícula mediadora, el fotón en este caso, sea cero. Afortunadamente, la caracterización cuántica del campo electromagnético mediante una partícula de masa nula está en completo acuerdo con el alcance "infinito" (es decir, como el inverso de la distancia) de la interacción.

Modelo Estándar de Partículas

Con este nombre se designa un modelo teórico de unificación de las interacciones electromagnética y Débil entre las partículas fundamentales que sienten su acción y que se denominan leptones. Fue formulado originariamente por Steven Weinberg [Phys. Rev. Lett. 19, 1264 (1967)], aunque lleva también asociados los nombres de Salam y Glashow, así como el de Higgs.

El inconveniente esencial que previene la unificación de estas dos interacciones es el alcance "finito" de la fuerza débil (puede decirse que es puntual), que requiere de las supuestas partículas mediadoras una masa considerable (es decir, no despreciable en ninguna aproximación) y, como se ha comentado antes, no es posible realizar una simetría gauge análoga a la de la interacción electromagnética. La "solución" que se adoptó consiste en dar originalmente a la interacción débil una estructura gauge, es decir, asociada a una simetría gauge análoga a la electromagnética, aunque con tres campos mediadores W^+ , W^- y Z , originalmente sin masa, y dotarlos de masa posteriormente mediante lo que se conoce como *mecanismo de Higgs*. En realidad, por el mismo precio se dota de masa a todas las partículas de la teoría, que hay que suponer también originariamente sin masa. Con arreglo a la estructura de teoría gauge, la desintegración β se expresa simbólicamente con el diagrama de Feynman:

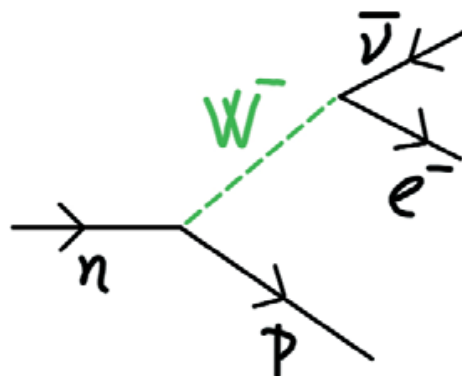


Diagrama de Feynman de la desintegración beta

su existencia. Si el bosón de Higgs existe, podrá ser descubierto con el Espectrómetro Compacto de Muones (del inglés *Compact Muon Spectrometer* o CMS), uno de los cuatro experimentos del LHC. Uno de los canales más limpios para su descubrimiento en un amplio rango de masas es su desintegración en cuatro muones a través de dos bosones Z.

El lector que haya llegado hasta aquí podrá ver recompensada su paciencia al identificar en la figura inferior la traza de cuatro muones característica de la desintegración de un bosón de Higgs a través del llamado *canal de oro*. En la imagen del recuadro se muestra cómo se observaría, en este canal, la señal del Higgs sobre la de fondo (ruido) para distintos valores posibles de su masa [CMS Collaboration, *J. Phys. G* 34, 995-1579 (2007)].

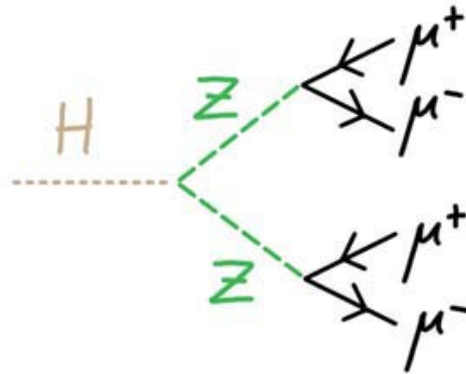
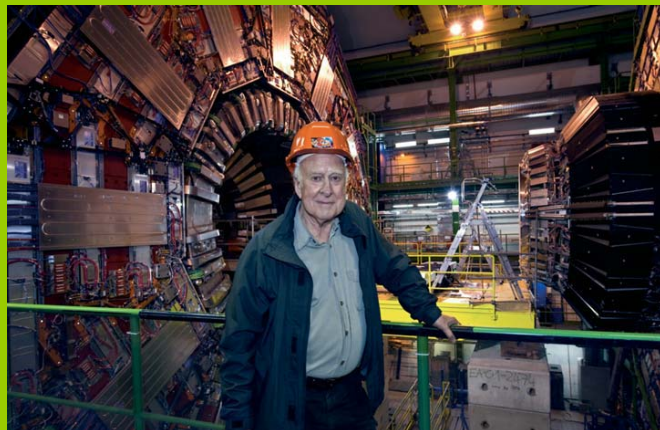


Diagrama de Feynman de un Higgs H yendo a cuatro muones.

Dentro del grupo de Gravitación y Cosmología, con la destacada colaboración de Manuel Calixto y Eduardo Sánchez, se ha desarrollado una alternativa al mecanismo de Higgs, en el marco del Modelo Estándar, en la que, en lugar de introducir el doblete escalar complejo ϕ , se atribuye carácter de campo real a los propios parámetros del grupo de gauge (como funciones del espacio-tiempo que son), aunque solo se da dinámica a aquellos que parametrizan una capa (concretamente, una "órbita coadjunta") del grupo. La idea de reemplazar el campo escalar complejo por parámetros del grupo de gauge había sido desarrollada previamente, aunque conducía a una teoría no finita y/o no unitaria. La diferencia ahora estriba en que con nuestra restricción es posible realizar la teoría cuántica como una representación unitaria e irreducible de un grupo, de manera no perturbativa. Como en el caso del mecanismo de Higgs, los grados de libertad de los campos dinámicos añadidos se transfieren a modos longitudinales de los bosones vectoriales que han de tomar masa, no sobreviviendo ningún campo físico extra que haya de ser detectado.

EL MODELO ESTÁNDAR DESDE EL IAA



Nuestra propuesta no requiere de la presencia de ninguna partícula adicional a las que ya se han detectado, pero esto no contradice que se vea el (Prof. P.) Higgs en el LHC.