

Unificación de interacciones

Hernando González Sierra*



Los ambiciosos intentos para obtener una descripción unificada de todas las interacciones de la naturaleza han sido cada vez más notables por su ingeniosidad, belleza y colorido. En este artículo deseo describir las ideas acerca de la unificación de tres de las cuatro interacciones: Electromagnética, débil y fuerte.

Las interacciones débil y fuerte son las menos entendidas por la persona común y corriente. La interacción fuerte es la responsable de mantener unidos a los quarks en los llamados hadrones (protón, neutrón, pión, etc.) y la interacción débil es la responsable de procesos que ocurren a pequeñas distancias como por ejemplo el decaimiento beta. En este último proceso un neutrón se transforma en protón + electrón + neutrino y el núcleo atómico que sufre este cambio se transmuta en otro nuevo.

El contexto teórico dentro del cual se describen estas tres interacciones es el llamado Modelo Estándar de las interacciones electro - débiles y fuertes. Matemáticamente el modelo corresponde a un grupo compuesto del producto directo de tres grupos: $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. El grupo $SU(3)$ corresponde a las interacciones fuertes, el grupo $SU(2)$ a las interacciones débiles y el grupo $U(1)$ a la interacción electromagnética.

Como el grupo de norma es producto directo de tres grupos diferentes se tendrán tres constantes de acoplamiento.

El Modelo Estándar describe con gran precisión los resultados experimentales en el dominio de las tres antes mencionadas interacciones.

* Universidad Surcolombiana. Programa Matemáticas y Física. Profesor Asociado - Doctor en Ciencias con Especialidad en Física.

y es consistente desde el punto de vista matemático. Sin embargo, contiene muchos parámetros arbitrarios y no está libre de dificultades.

El Modelo Estándar ha sido confirmado una vez más cuando en marzo de 1996 los físicos experimentales del Fermilab descubrieron el quark top con un valor de su masa en el rango que habían predicho los físicos teóricos.

Se están haciendo esfuerzos para unificar las tres interacciones antes mencionadas dentro de un esquema que incluya una sola constante de acoplamiento. Estas son las llamadas Teorías de Granunificación y son extensiones del Modelo Estándar. El Modelo Estándar es uno de los llamados modelos de norma y contiene tres constantes de acoplamiento una para cada interacción.

Teorías de norma

Ha sido tradicional identificar cuatro interacciones fundamentales: fuerte, débil, electromagnética y gravitacional.

En 1960 y 1970 se hicieron grandes progresos para identificar los principios que contenían las primeras tres de estas interacciones. La descripción de la gravedad cuántica está comparativamente en una etapa primitiva. Mi discusión se confinara a las tres primeras interacciones, el dominio tradicional de la física de altas energías.

Para hacer una síntesis de esta larga historia, se encontró que un mecanismo común estaba contenido en todas las tres interacciones: cada una de ellas está mediada por el intercambio de partículas de spin 1: los bosones de norma. Los bosones de norma tienen nombres distintos en cada uno de los tres casos. Son llamados gluones de color en la interacción fuerte, fotones en la interacción electromagnética, y bosones W y Z en la interacción débil. Pero a pesar de las diferencias de los nombres y de algunas otras diferencias superficiales, todos los bosones de norma comparten una descripción matemática común y comportamientos físicos profundamente similares. Los bosones de norma interactúan con los quarks y leptones (electrón y neutrino) de varias maneras mediante fuerzas entre ellos, y son emitidos por radiación cuando los quarks o leptones son acelerados, y aún cambiando o intercambiando un tipo de quark o leptón dentro de otro.

La teoría de norma original y más familiar es también la más básica. La electrodinámica cuántica está apropiadamente entendida, en términos

modernos, es ni más ni menos que la teoría de un bosón de norma (llamado, el fotón) acoplado a una carga simple, o "color" (llamada, la carga eléctrica) En lenguaje matemático, esta es la teoría del grupo de norma $U(1)$.

La terminología cromática para las cargas es útil y aclarativa, pero no debe tomarse tan literalmente. Las cargas de color son cantidades numéricas, que pueden ser enteros positivos o negativos (o cero). Las cargas asociadas con diferentes colores son cantidades independientes. Así una partícula puede llevar carga azul + 1 carga amarilla + 1, pero llevar carga verde 0.

La teoría moderna de la interacción débil es esencialmente la extensión simple no trivial de este conjunto, que incluye dos colores. Una nueva posibilidad importante para la física de los bosones de norma nos muestra primeramente dos colores en adición a los bosones de norma que, al igual que el fotón, responden a las cargas de color, hay también bosones que cambian una unidad de una carga en una unidad de otra carga. En este proceso fundamental, una clase de partícula se cambia en otra llevando carga de color diferente. La carga de color es conservada en conjunto debido a que la diferencia de carga entre las partículas alteradas es llevada por el bosón de norma. Los bosones W son de este tipo de identidad alternativa, y su intercambio es el mecanismo que reposa en las transmutaciones radioactivas del núcleo atómico de un elemento en otro (por ej. el decaimiento beta). Los Bosones Z , actuando en una forma más parecida al fotón, responden de manera que no alteren la carga de color débil. En lenguaje matemático la teoría moderna de la interacción débil es la teoría del grupo de norma $SU(2)$ -el 2 aquí significa o identifica dos colores-.

Finalmente la cromodinámica cuántica, la moderna teoría de la interacción fuerte, es -como usted puede adivinarlo- la teoría de tres colores, basados en el grupo de normas $SU(3)$. Este involucra 8 bosones de norma (gluones de color), 6 que alteran los colores y los otros 2 que solamente responden a ellos.

Las cargas de color involucradas en las interacciones débiles y fuertes son completamente distintas. Ha venido siendo costumbre, al menos en los Estados Unidos, llamar a los colores fuertes rojo, blanco y azul. La interacción débil nos da una oportunidad para suavizar el chauvinismo de esta terminología a alguna extensión, añadiendo dos nuevos colores: podemos llamarlos amarillo y verde. Esto parece mostrar que para completar

la estructura necesitaremos un sexto color, la carga electromagnética. Pero más concretamente, identificados los cinco colores fuertes y débiles, no necesitaremos agregar un sexto color, que sería un color separado para el electromagnetismo. La carga eléctrica no es independiente de las otras cargas. Si nosotros asignamos los colores entonces la carga eléctrica Q de una partícula está dada en términos de sus diferentes cargas de colores (R, W, B, Y, y G) de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$Q = -1/3 (R + W + B + Y) + G$$

Unificación: Triunfos y perspectivas

El hecho de que las tres importantes interacciones de la física de partículas puedan ser descritas usando el concepto de bosones de norma acoplados a cargas de color nos conduce a alguna forma de unidad más profunda entre ellas. Así que, con más sutileza y potencia se utiliza la ecuación 1. El color más fuerte de los gluones medianiza todos los cambios posibles y respuestas entre el rojo, blanco y azul, mientras que los bosones de norma débiles hacen lo mismo entre los colores verde y amarillo. ¿Qué podría ser más natural que postular la existencia de bosones de norma correspondientes a todos los posibles cambios y respuestas entre todos los cinco colores? Tales bosones incluirían los gluones de color, los bosones débiles y el foton, y también algunos bosones de norma adicionales que podrían cambiar (por ejemplo) la carga roja en carga amarilla. Estos doce nuevos bosones de norma podran ser añadidos a los doce conocidos. La teoría de norma para los cinco colores es una teoría de Granunificación (con una sola constante de acoplamiento) y es conocida como SU(5). Esto incluye las teorías de norma SU(3) x SU(2) x U(1) de las interacciones electromagnética, fuerte y débil (el modelo estandar)

Esta idea, en terreno exploratorio sugiere dos sucesos cualitativos creativos y dos sucesos cuantitativos desastrosos

Primero lo exitoso. Si nosotros consideramos solamente los bosones de norma la expansión de la teoría aparece como un fantasma pero de poca posibilidad expeculativa. Mientras que ésta sugiere la existencia de nuevos bosones de norma, esto no nos da mucha luz con respecto a las propiedades de los que ya conocíamos su existencia. Sin embargo, si ampliamos nuestras consideraciones para incluir los quarks y los leptones, se nos presenta una ventaja maravillosa de la gran teoría que tenemos. Los 15 quarks y leptones

dentro de una familia pueden agruparse en dos clases. Una clase consistente de 5 partículas, cada una con una unidad de las 5 cargas de colores. La otra clase consiste de 10 partículas, cada una transportando una unidad de cada una de las dos cargas de colores distintos. Dentro de cualesquiera de estas dos clases, las transformaciones conducen a cualquier partícula dada dentro de cualquier otra que uno puede medir por bosones de norma apropiados. En otras palabras, las partículas dentro de cualesquiera de las clases están todas relacionadas una con otra por medio de la interacción de norma. Ellas presentan caras diferentes de un dado sencillo inseparable, son piezas simétricas de un rompecabezas completo.

En términos matemáticos, las partículas caen dentro de dos representaciones irreducibles de $SU(5)$ una representación vectorial 5 - dimensional y una representación antisimétrica tensorial 10 - dimensional. En contraste, cuando nosotros mismos restringimos a las transformaciones de $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, las partículas en una familia caen todas dentro de no menos de 5 clases diferentes. Esta rápida ganancia en economía de la descripción es uno de los sucesos cualitativos más grandes del esquema de unificación simple $SU(5)$.

La otra ocurrencia se refiere a la ecuación 1. Esta maravillosa ecuación, en la cual la carga electromagnética, carga fuerte y cargas débiles se combinan todas en el juego, fué un logro estimulativo hacia la unificación. Dentro de $SU(5)$, su potencial está brillantemente completo aunque es un poco más complicado para nosotros hacer la derivación, no es una dificultad terrible mostrar que la ecuación 1 es una consecuencia automática de unificación en $SU(5)$. El fotón solamente se ajusta dentro de su grupo de simetría si este responde precisamente a la combinación de cargas de color que ocurren en la ecuación 1. Así que la unificación ofrece un marco en el cual el espectro caótico aparente de las cargas eléctricas de los quarks y leptones pueden ser racionalmente entendibles.

En un tratamiento más preciso, podemos preocuparnos con respecto al espectro de hipercargas débiles, lo cual es siempre peor. Wilczek consideró el actual estándar $SU(2) \times U(1)$ como un modelo de interacción electrodébil "obviamente errado" debido a que justamente esto requiere tales asignaciones desagradables de la hipercarga. Esto fue aún más lejos, pero todavía parece que este modelo puede llamarse, por esta razón "obviamente incompleto".

Ahora podemos describir dos dificultades intimidatorias que atentan contra

la unificación. El primer desastre es que los diferentes bosones de norma, aunque ellos hacen cosas similares, no lo hacen por sí mismos con el mismo vigor. En otras palabras, ellos se acoplan a sus respectivas cargas de color con diferentes intensidades. La interacción fuerte tal como lo muestra su nombre realmente es mucho más fuerte que la interacción débil, la cual a su vez es menos débil que la electromagnética. Así que la simetría perfecta entre colores requiere una teoría de norma unificada verdaderamente que no tenga que ver con el azar. Volveremos a este problema más adelante.

El segundo se refiere a los procesos que se presentan por los bosones de norma extras, particularmente aquellos que cambian sus cargas de color de fuertes a débiles. Por ahora al menos hay una pequeña preocupación para postular la existencia de partículas inobservables pues estas cosas están objetadas, debido a que sus intercambios median procesos capaces de desestabilizar los protones. Sin embargo, los protones son poco dados a no reportar decaimiento. Aún en 1974, cuando las teorías unificadas del tipo que estamos discutiendo fueron propuestas por primera vez, la vida media del protón era conocida como un poco más de 10^{21} años. De ahí en adelante, se han llevado a cabo experimentos sistemáticos para aumentar este límite mínimo y sobrepasar los 10^{31} años (para la mayoría de los modos de decaimiento satisfactorios).

Aun así obtenidos estos logros cualitativos de la teoría de unificación de norma y de su belleza inocultable, no puede uno darse por vencido sin presentar pelea. Y aún más ambas dificultades deben sobrentenderse en un estilo triunfal.

Tomemos primeramente la segunda dificultad, por ahora no hay problema para explicar el desarrollo de este asunto. Para hacerlo mencionaremos ahora un aspecto muy importante de las teorías de norma que por simplicidad la hemos dejado a un lado: estas teorías pueden existir en fases diferentes y exhibir propiedades a bajas energías que difieren de alguna manera de sus comportamientos simétricos de alta energía. Para nuestros propósitos, el punto más importante es que los bosones de norma vienen a ser masivos, a través del mecanismo conocido como Higgs, y los procesos mediados por estos bosones pesados son los más raros.

Esto por supuesto es debido a que las interacciones débiles son mucho menos prominentes que el electromagnetismo, aunque las intensidades intrínsecas de los acoplamientos débiles vector - bosón son de alguna manera mayores que aquellos de los fotones. Los bosones vectoriales débiles son

masivos, lo cual no solamente los hace más difíciles para producir inestabilidad en su aislamiento, sino también hace que el proceso que ellos producen sea menos vigoroso. Claramente entonces, para evitar el espectro de bosones de normas extra peligrosos solamente necesitaremos suponer que ellos son extremadamente pesados.

Y qué con respecto a la primera dificultad? Aunque, sin embargo menos dramático, esto es más profundo. Su resolución involucra otro orden de ideas, y es muy rico en sus consecuencias. Para hacer esto vamos a regresarnos.

La carrera de las constantes de acoplamiento

El hecho crucial es la carrera de las constantes de acoplamiento: intensidad de los acoplamientos que varía con la energía o la distancia. Esto es muy similar a la más familiar e intuitiva noción de película dieléctrica. En una película dieléctrica, una partícula cargada positivamente tiende a separar o alejar la carga negativa, por ejemplo, por distorsión (polarización) de moléculas neutras.

Este acercamiento de las cargas negativas entre sí origina el apantallamiento de carga central positiva, de esta forma el campo eléctrico a grandes distancias es menor que el producido bajo otras circunstancias por la misma distribución de carga.

En la moderna teoría cuántica de campos, un efecto similar se tiene en el espacio vacío. Esto es debido a que, aunque, "el espacio vacío" no está lleno de partículas reales es un medio dinámico lleno de pares virtuales partícula - antipartícula que se reaniquilan entre sí antes de que se alejen. Esta configuración del espacio vacío puede sufrir una polarización no menos que las moléculas en un sólido. Como consecuencia las distribuciones de carga y de campo eléctrico para una partícula elemental nominal "partícula elemental" están de hecho estructuradas: la carga está parcialmente apantallada. El vacío es un dieléctrico.

Ordinariamente el apantallamiento dieléctrico tiende a hacer que la carga efectiva sea menor a grandes distancias. Inversamente, de hecho, si trabajamos desde la parte externa, vemos que la carga efectiva se incrementa gradualmente cuando nos alejamos. Los quarks virtuales y los leptones también tienden a apantallar algunas cargas de color que ellos llevan. Este

efecto mencionado es muy general. Las partículas de espín $1/2$ y espín 0 son algún tipo hipotético de cargas apantalladas.

El descubrimiento en 1973 de que los bosones de norma de espín 1 tienen el efecto opuesto fue una sorpresa maravillosa. Ello significaba que una carga que veíamos grande y formidable a grandes distancias puede ser tratada como una débil fuente (y matemáticamente más manejable) a cortas distancias. El descubrimiento de este efecto dinámico - conocido como libertad asintótica - da directamente a $SU(3)$ la identificación de teoría de norma del color, o Cromodinámica Cuántica, como la teoría de la interacción fuerte. Los experimentos de electroproducción del acelerador lineal de Stanford (SLAC) demostraron este fenómeno de escala, indicando que la interacción fuerte entre quarks es más débil a cortas distancias que la que se podría inferir a distancias lejanas. Más precisamente, estos experimentos indicaron que los quarks son acelerados rápidamente emitiendo gluones. En otras palabras ellos cuando se disparan fuertemente se comportan como partículas punto carentes de estructura. Ellos rebotan elásticamente. Este comportamiento entra en contraste con su apariencia cuando son disparados suavemente. Cuando el más potente, aspecto de largo rango de la interacción fuerte produce quarks que no se comportan como partículas puntuales sino como rafagas de gluones virtuales, quarks y antiquarks.

El descubrimiento de partículas carentes de estructura -los partones de Richard Feynmann ahora identificados como quarks y gluones- dentro de un protón en los experimentos del SLAC es muy similar a los experimentos clásicos de Ernest Marsden y Johannes Geiger. La observación de que las partículas alfa eran deflectadas bajo ángulos grandes es un indicativo de la existencia de un núcleo puntual en el centro del átomo. Reemplazando las partículas alfa por electrones, y los núcleos por partones, nosotros esencialmente transformamos el experimento de Geiger - Marsden en el experimento del SLAC.

Posteriormente experimentos, han confirmado y revalidado las tempranas indicaciones del SLAC. Cuando los quarks son rápidamente acelerados ellos se propagan exactamente como partículas puntuales carentes de estructura, pero ocasionalmente radian uno o más gluones de color. La Cromodinámica Cuántica da cuenta de detalles cuantitativos en estos asuntos, y ha sido muy próspera en predecir los resultados de los experimentos (tanto, que experimentalmente ahora se confía en calcular sus predicciones).

El mecanismo del apantallamiento es claro, así que lo contrario no parece plausible. Sin embargo, el apantallamiento se apaga, originándose el dipolo-dipolo magnético entre gluones cargados y la repulsión produce las separaciones de la carga eléctrica (antiapantallamiento).

En nuestro contexto presente, es conveniente considerar apantallamiento y libertad asintótica como funciones de la energía además de la distancia. En un sentido que puede ser hecho preciso, en mecánica cuántica una alta energía o momentum corresponde a pequeñas distancias. Groseramente hablando, el apantallamiento es el incremento de los acoplamientos con la energía, mientras que la libertad asintótica corresponde a su decrecimiento.

El acoplamiento de $SU(3)$ es más afectado por la libertad asintótica que los otros acoplamientos, simplemente porque hay más bosones de norma de color fuerte. Para el acoplamiento débil $SU(2)$ la competencia es más igual, mientras que para el electromagnetismo $U(1)$ no hay contribución de los bosones de norma, y el apantallamiento ordinario gana. Como resultado el acoplamiento fuerte decrece a grandes energías. Mientras el débil permanece cercamente constante y el electromagnético decrece. Pero estas son justamente las direcciones de cambio que causan la combinación de los acoplamientos.

La escala de energía para la carrera de los acoplamientos es logaritmica, así ello toma un gran cambio en la energía para ver algún cambio en los acoplamientos. Además la escala a la cual la unificación tiene lugar debe ser mucho mayor que la que nosotros estamos acostumbrados a tener en los aceleradores de partículas.

Resumen

En este artículo se da una descripción de las interacciones electromagnéticas, débil y fuerte con especial énfasis en el estado actual de su unificación en el contexto de las extensiones del llamado Modelo Estándar.

Dentro de las extensiones del Modelo Estándar están las teorías de Granunificación que tratan de unificar tres de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza (la electromagnética, la débil y la fuerte). Una de estas teorías se toma como modelo para presentar el contenido físico de las teorías de Granunificación y mostrar su estado actual.

Bibliografía

1. J.C. Pati and A. Salam, Phys Rev. D10, 275 (1974).
2. H. Georgi and S L. Glashow, Phys Rev Lett 32, 438 (1974).
3. P. Langacker, Phys. Rep. 72, 185 (1981).
4. S. Weinberg and E. Witten, Phys Lett 96B, 59 (1980).
5. P. Fayet and S. Ferrara. Physics Report 32C, 249 (1977).
6. P. Fayet, Unification of the fundamental particle interactions, eds S Ferrara, J Ellis an P Van Nieuwenhuizen (Plenum press, New York, 1980), p 587
7. R. N. Mohapatra, Unification and supersymmetry, editorial board (Springer-Verlag, New York, 1992) p 92

Resumen

El presente artículo se refiere a la unificación de las interacciones fundamentales de la física de partículas elementales. Se discute el papel de la supersimetría en la unificación de las constantes de acoplamiento y en la estabilización de la escala de energía de Planck.

En este artículo se discute la unificación de las interacciones fundamentales de la física de partículas elementales. Se trata de la unificación de las constantes de acoplamiento y de la estabilización de la escala de energía de Planck.