

TEMA 36. FUERZAS FUNDAMENTALES DE LA NATURALEZA:
GRAVITATORIA, ELECTROMAGNÉTICA, FUERTE Y DÉBIL. PARTÍCULAS
IMPLICADAS. ESTADO ACTUAL DE LAS TEORÍAS DE UNIFICACIÓN.

- Fuerzas fundamentales de la naturaleza: gravitatoria, electromagnética, fuerte y débil.
 - Concepto clásico y actual.
 - Tipos y características.
- Partículas implicadas.
 - Partículas de materia.
 - Partículas mensajeras.
- Estado actual de las teorías de unificación.
 - El por qué y el cómo de la unificación.
 - Electromagnetismo, relatividad y mecánica cuántica.
 - Teoría de campos y gravitación.
 - Teorías de Gauge y el Modelo Estándar.
 - Teorías de Gran Unificación y Supergravedad.
 - Supercuerdas.

FUERZAS FUNDAMENTALES DE LA NATURALEZA: GRAVITATORIA, ELECTROMAGNÉTICA, FUERTE Y DÉBIL.

- Concepto clásico y actual.

La mecánica clásica newtoniana define fuerza a aquella que hace evolucionar o cambiar un sistema, ya sea porque cambie de posición, velocidad, se desintegre...

Las fuerzas actúan entre partículas, que se dice que están interaccionando. Las partículas interaccionan en virtud de alguna característica que posean. Así, por ejemplo, el hecho de que tengan masa las hace interaccionar gravitacionalmente, la carga eléctricamente...

Lo que media en esta interacción es la fuerza o, visto de otra forma, el campo de interacción, que en las teorías actuales se contempla también como partícula.

- Tipos y características

Hasta el S.XIX había resultado suficiente trabajar con el campo gravitatorio, el campo eléctrico y el campo magnético. La existencia de los núcleos atómicos y su desintegración lleva a incorporar dos nuevos tipos de interacciones, las fuertes y las débiles.

Clasificación por orden creciente de intensidad:

Interacción gravitatoria → es la menos intensa de todos. Es 10^{30} veces menor que las fuertes. Afecta a partículas con masa y es de alcance infinito. Tiene un efecto acumulativo → a mayor masa mayor atracción.

Interacciones débiles → responsables de la desintegración β , se manifiestan sobre todo en la transmisión de partículas. Su intensidad es del orden de la cienmilésima parte de las interacciones fuertes. Su alcance es inferior al tamaño de un núcleo atómico ligero.

Interacciones electromagnéticas → son cien veces menos intensas que las fuertes. Afectan a las partículas o cuerpos con carga y su alcance es infinito. Como hay cargas positivas y negativas, la fuerza no es acumulativa, sino que se neutraliza.

Esta interacción liga los e^- al núcleo para formar átomos y los átomos entre sí para formar moléculas.

Interacción fuerte \rightarrow es la más intensa. Explica la estructura de los núcleos atómicos. Su alcance es del orden del tamaño del núcleo atómico y ello explica por qué, a pesar de su intensidad, estas interacciones no desempeñan un papel importante.

PARTÍCULAS IMPLICADAS

- Partículas de materia

El concepto de partícula está asociado a la búsqueda de la elementariedad de la materia.

Las partículas tienen ciertas características como carga, masa... que las hace susceptibles de experimentar los \neq tipos de fuerzas.

Podemos clasificar las partículas según experimenten o no la fuerza fuerte:

Hadrones:

- Partículas que son capaces de interactuar fuertemente.
- Protón, neutrón.
- Están constituidos por los llamados quarks \rightarrow no están detectados experimentalmente, pero los grupos de quarks (hadrones) sí.

Leptones:

- No experimentan interacción fuerte.

Tanto los hadrones como los leptones pueden experimentar interacción débil.

Los hadrones y leptones que posean carga experimentarán interacción electromagnética, y como poseen masa y también experimentarán interacción gravitatoria.

- Partículas mensajeras.

Las teorías modernas contemplan los campos de interacción como partículas, de modo que podemos pensar que la interacción entre dos partículas está mediada por una partícula mensajera.

El espín es el que distingue las partículas que sienten la interacción de las que median.

El espín es una característica asociada al giro intrínseco de la partícula.

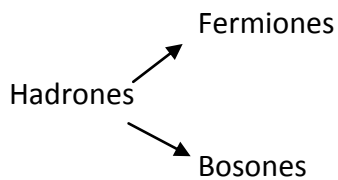
Así según es espín tenemos:

Fermiones → espín semientero

Bosones → espín entero

Leptones → fermiones

Campos → bosones



Quarks → fermiones

- Diferencia esencial entre partículas:
 - Las que experimentan la fuerza, las partículas de materia son → fermiones.
 - Las que median en la interacción, las partículas mensajeras son → bosones.

Tipos de bosones:

- En el campo electromagnético → fotón (espín = 1)
- En el campo gravitatorio → gravitrón (espín = 2)
- En la fuerza fuerte → gluones.

- En la fuerza débil → tres partículas mensajeras: W^- , W^+ y Z → espín = 1 y masa muy grande (W^\pm 80 veces la masa del protón y Z 90 veces). Este hecho es el responsable del muy corto alcance de la fuerza débil. El bosón Z es en todos los aspectos como un fotón pero con masa. W^\pm tienen una unidad de carga eléctrica; W^- es la antipartícula de W^+ .

De todas las partículas de interacción sólo han sido detectadas el fotón, W^\pm y Z .

Fuerza	Rango	Partículas sobre las que actúa	Bosones	Masa de los bosones	Espín de los bosones	Naturaleza de la fuerza entre bosones idénticos
Fuerte	Corto	Quarks	Gluones	?	1	Repulsiva
Electromagnética	Largo	Partículas con carga eléctrica	Fotones	0	1	Repulsiva
Débil	Corto	Quarks y Leptones	W^+ , W^- , Z	$W^\pm \approx 80$ masa protón	1	Repulsiva
Gravitatoria	Largo	Todas las partículas	Gravitrones	0	2	Atractiva

El carácter de las cuatro fuerzas viene determinado en gran parte por las características de los bosones mensajeros. La masa de éstos determina el rango de la fuerza. Así, sólo las fuerzas transmitidas por partículas sin masa tienen largo alcance.

El espín también influye: la fuerza transmitida por partículas cuyo espín es un entero par es atractiva y si es impar es repulsiva, entre partículas semejantes.

ESTADO ACTUAL DE LAS TEORÍAS DE UNIFICACIÓN

- El por qué y el cómo de la unificación

Cuanto más simples y generales sean las leyes físicas mejor. Por eso se busca unificar todas las fuerzas en una sola y para eso es necesario encontrar un marco matemático común que describa todas las fuerzas simultáneamente.

La teoría unifique todas las fuerzas ha de poder explicar la existencia de todas las partículas observadas hasta ahora, las interacciones entre ellas, las características de los procesos asociados... y debe explicar también la geometría y topología del espacio-tiempo, así como el número de dimensiones observadas.

- Electromagnetismo, relatividad y mecánica cuántica

- Electromagnetismo

Maxwell, en el S.XIX, logró dar una descripción conjunta de los campos eléctricos y magnéticos. Así Maxwell explicó que las fuerzas eléctricas y magnéticas eran manifestaciones de un todo indisoluble, el campo electromagnético, que viene regido por las leyes de Maxwell.

Una de las soluciones de las ecuaciones de Maxwell lleva a la conclusión de que la luz es una onda electromagnética.

- Relatividad

Entre la Mecánica Newtoniana y las leyes de Maxwell existen contradicciones. Mientras la Mecánica Newtoniana trabaja con sistemas de referencia a los que referir la velocidad de los cuerpos, las ecuaciones de Maxwell predicen una velocidad constante para la luz en el vacío independientemente del sistema de referencia.

Einstein, basándose en los resultados del experimento de Michelson-Morley, según el cual la velocidad de la luz es independiente del movimiento de la tierra, construyó su teoría de la Relatividad especial.

Es esta teoría el espacio y el tiempo quedan unificados en un continuo espacio-temporal de cuatro dimensiones, en el que la masa y la energía son magnitudes equivalentes.

El aporte fundamental de esta teoría es que el espacio y el tiempo son parte de la física, y no el escenario en el que la física tiene lugar.

- Mecánica cuántica

Según Rayleigh-Jeans la cantidad de energía emitida por un cuerpo caliente aumentaba de manera indefinida con la radiación, de modo que la energía total emitida es infinita. Esto es obviamente erróneo.

Este problema fue solucionado por Planck en 1900 cuando sugiere que la energía sólo puede ser absorbida o emitida por los átomos en múltiplos de cuanto de energía, proporcional a la frecuencia de radiación.

En 1905, Einstein va más allá y postula que la radiación no sólo se absorbe y emite por cuantos, sino que es un conjunto de cuantos de naturaleza corpuscular que denomino fotones.

En 1923, De Broglie postuló la existencia de ondas asociadas a las partículas materiales, hipótesis que es confirmada en 1924 por Davison y Germer.

Para poder explicar estos fenómenos, tanto la radiación como la materia debían tener naturaleza de onda y de corpúsculo.

Este problema es solucionado por la Mecánica Cuántica creada por Schrödinger, Bohr, Heisenberg, Born y otros en los años 20.

El pilar de la Mecánica Cuántica es el principio de incertidumbre de Heisenberg según el cual no es posible conocer simultáneamente y con toda exactitud la posición y la velocidad de una partícula.

La probabilidad de encontrar a la partícula en una cierta región del espacio se describe mediante una onda asociada a dicha partícula, quedando entonces unificados ambos conceptos.

- Teoría Cuántica de Campos y Gravitación

- Teoría cuántica de campos

¿Qué pasa cuando las partículas se mueven a velocidades próximas a la de la luz? Era necesario desarrollar una teoría que reuniera la Mecánica Cuántica y la Relatividad. Este tipo de unificación se denomina Teoría Cuántica de Campos (TCC).

Una TCC es una teoría que describe las interacciones entre partículas elementales.

La primera ecuación Mecánica-Cuántica Relativista fue propuesta por Dirac en 1928 y llevó a la predicción del positrón, que fue descubierto en 1932 por Anderson. Además en Mecánica Cuántica Relativista aparece un nuevo fenómeno: la creación y destrucción de partículas, ej \rightarrow un fotón puede materializarse en un par electrón-positrón.

La primera TCC fue la Electrodinámica Cuántica (EDC); construida en los años 50 por Feynman, Schwinger y Tomonaga, describe interacciones de fotones, electrones y positrones.

La EDC introduce un nuevo concepto, el de “teoría renormalizable”. Una teoría renormalizable es aquella en la que los infinitos pueden ser compensados por la corrección de parámetros básicos de la teoría, como son la masa y la carga del e^- .

No todas las TCC son renormalizables. La EDC sí es renormalizable y es de hecho la teoría física que predice los resultados experimentales con mayor precisión.

Con la EDC se tienen unificadas el electromagnetismo de Maxwell, la Relatividad de Einstein y la Mecánica Cuántica.

- Gravitación

La gravedad se explica como una teoría geométrica en la Relatividad General de Einstein. La principal aportación de esta teoría geométrica es que el espacio-tiempo tiene una geometría creada por los cuerpos que están en él. Diversos experimentos confirmaron esta teoría.

Más tarde Einstein trató de hacer una síntesis geométrica de la gravedad y el electromagnetismo, en lo que denominó Teoría del Campo Unificado, pero no tuvo éxito.

En 1921, Kaluza hizo un segundo intento para unificar gravitación y electromagnetismo. Para ello escribió las ecuaciones de Einstein del campo gravitatorio en cinco dimensiones, en vez de cuatro, añadiendo una dimensión imaginaria. Pero esta teoría tenía un fallo ya que sólo percibimos cuatro dimensiones en el mundo real.

En 1926, Klein propuso que no vemos la quinta dimensión porque es circular y su radio es muy pequeño.

- Teorías de Gauge y el Modelo Estándar

En los años 30 se descubren las fuerzas fuerte y débil, así como un gran número de partículas que se clasificaron en hadrones y leptones, según sintieran o no la interacción fuerte.

Los leptones conocidos son pocos, pero los hadrones son muchos.

La clasificación de los hadrones se apoya en el concepto de simetría.

El concepto de simetría implica la existencia de un conjunto de transformaciones que actúan sobre las partes de un todo que permanece invariante bajo los efectos de dichas transformaciones.

En el estudio y clasificación de los hadrones se llega a la conclusión de que estos están constituidos por unos constituyentes básicos denominados quarks. La introducción de los quarks facilita la comprensión de las reacciones entre hadrones, pero no se llegaba a comprender bien qué fuerza les mantenía unidos dentro de los hadrones.

Es entonces cuando se retoma la simetría Gauge. Esta simetría se define mediante un grupo de transformaciones de simetría que dependen del punto del espacio-tiempo en el que se encuentra el objeto sobre el que actúan y por ello son simetrías locales.

La existencia de una simetría Gauge comporta la existencia de fuerzas y éstas, a su vez, la de partículas portadoras de dichas fuerzas. En el caso de una simetría Gauge, las partículas portadoras se llaman bosones de Gauge y las TCC de bosones de Gauge se llaman teorías de Gauge. Se trata de teorías renormalizables.

1. La primera teoría de Gauge fue la teoría electrodébil de Glashow-Weinberg-Salam (GWS), propuesta en 1968.

Unifica las interacciones electromagnéticas y las débiles.

Predice la existencia de tres bosones Gauge: W^+ , W^- , y Z .

Una característica de esta teoría, y por tanto de las interacciones débiles es que la fuerza que actúa sobre las partículas con orientación a derechas o izquierdas es diferente.

2. Cromodinámica cuántica (CDC) → teoría Gauge que explica la fuerza que empuja los quarks dentro de los hadrones.

La reunión de estas dos teorías Gauge (GWS + CDC) da lugar al: Modelo Estándar que explica conjuntamente las fuerzas electrodébiles con las fuertes. Este es el modelo aceptado actualmente.

- Teorías de Gran unificación y Supergravedad

El modelo estándar no es una verdadera teoría unificada, porque sólo reúne, no funde, la GWS y la CDC. Además no considera la gravedad.

Las Teorías de Gran Unificación (TGU) unifican la GWS y la CDC en una única teoría Gauge. Su predicción más notable es la desintegración del protón, con una vida muy larga (10^{30} años), pero esto todavía no se ha podido demostrar.

Las TGU poseen dificultades teóricas intrínsecas, cuya solución requiere la introducción de la supersimetría, que es una simetría que transforma fermiones en bosones y viceversa → TGU supersimétricas.

Pero la supersimetría no es exacta; hay que hacer que la supersimetría sea una simetría Gauge. Esto conduce a la teoría de la Supergravedad (1976), que es una generalización de la Relatividad General de Einstein.

La Supergravedad resuelve los problemas de consistencia interna que tenían las TGV y además permite relacionar satisfactoriamente la física ultramicroscópica a escala de longitudes del orden del fermi. Pero, hereda una dificultad fundamental de la teoría de la gravedad de Einstein: no es una teoría renormalizable.

La teoría de supergravedad más defendida ha sido la de 8 gravitinos, porque según ella la radiación y la gravedad están relacionadas entre sí por transformaciones de simetría.

Simultáneamente, hubo otras teorías que trataron de incorporar la idea de Kaluza-Klein en una teoría de supergravedad. Pero estas teorías tenían puntos insatisfactorios:

- No predicen todas las simetrías del modelo estándar.
- No violan la paridad, no rompen la simetría izquierda-derecha.
- No son renormalizables.

- Supercuerdas.

En 1984 Green y Schwarz rescatan del olvido la teoría de las Supercuerdas destacando que es una teoría sin anomalías ni divergencias ultravioletas en primera aproximación para dos grupos específicos de simetrías Gauge.

Esta teoría es de los años 60 y se desarrolló gracias a una serie de modelos que trataban de describir las interacciones fuertes. El modelo de más éxito fue el de Veneziano en 1968. En 1969 Nambu muestra que la dinámica de este modelo es la de un objeto extenso unidimensional que recibe el nombre de cuerda.

Debido al éxito de la QCD, la teoría de las Supercuerdas no se consideró como una teoría de las interacciones fuertes, sino más bien como una teoría que describe el comportamiento de la QCD a longitudes mayores que un fermi.

A la cuerda de Veneziano y Nambu, que sólo contenía grados de libertad bosónicos, Green y Schwarz incorporaron grados de libertad fermiónicos de manera supersimétrica. Posteriormente Scherck y Schwarz interpretan esta teoría como una teoría unificada de las fuerzas y partículas elementales.

Las partículas elementales aparecen como modos de vibración de los objetos verdaderamente elementales que son las supercuerdas. Las supercuerdas nos cambian el concepto de lo elemental. Lo elemental es ahora un ente extenso y divisible donde el todo es igual a cada una de sus partes.

Los ingredientes de la teoría de las supercuerdas son: relatividad, mecánica cuántica, supersimetría y objetos extensos unidimensionales.

La teoría de Supercuerdas ofrece la posibilidad de aproximar al instante que siguió a la gran explosión que dio origen al Universo actual. En este instante la teoría era tan alta que todas las fuerzas debían estar realmente unificadas.

Actualmente, la teoría de Supercuerdas está empezando a ser abandonada. Las constantes de acoplo de las distintas fuerzas a energías altas, es decir, a distancias pequeñas debían ser las mismas y experimentalmente parece ser que no es así.

-