

Física de Partículas

Daniel Vázquez Lago



Índice general

1	Introducción al modelo Estándar	3
2	Simetrías	5
3	cálculo de Feynman	7
3.1	Reglas de Feynman	7
3.2	Decaimientos	7
3.3	Sección eficaz	7
4	Electrodinámica Cuántica	9
4.1	Mecánica Cuántica Relativista	9
4.1.1	Ecuación de Dirac	9
4.1.2	Solución para las partículas libres	9
4.2	Electrodinámica Cuántica	9
5	La Estructura de los Hadrones	11
6	Cromodinámica cuántica	13
7	Interacción electrodébil	15
7.1	La violación de Paridad	15
	<i>Exámenes</i>	16

Capítulo 1

Introducción al modelo Estándar

La física de partículas estudia los constituyentes universales del universo, esto es, las *partículas elementales*, así como las interacciones entre estas. En la actualidad el modelo estándar es la teoría que mejor describe el comportamiento de estas partículas. Las partículas elementales descritas en el modelo se recogen en la siguiente imagen:

Tres generaciones de la materia (fermiones)					
	I	II	III		
masa →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0	
carga →	2/3	2/3	2/3	0	
espín →	1/2	1/2	1/2	1	
nombre →	u up	c charm	t top	γ Foton	G Graviton
Quark	d down	s strange	b bottom	g Gluon	H Boson Higgs
Lepton	e Neutrino electrónico	μ Neutrino muónico	τ Neutrino tauónico	Z ⁰ Boson Z	
	e Electrón	μ Muón	τ Tau	W ⁺ Boson W	Bosones de gauge

Figura 1.1: Partículas fundamentales según el modelo estándar

La dinámica de los doce fermiones está descrita por la Ecuación de Dirac, que se encuentra dentro de la Mecánica Cuántica Relativista

Hola

Capítulo 2

Simetrías

Capítulo 3

cálculo de Feynman

3.1. Reglas de Feynman

3.2. Decaimientos

3.3. Sección eficaz

Capítulo 4

Electrodinámica Cuántica

4.1. Mecánica Cuántica Relativista

4.1.1. Ecuación de Dirac

4.1.2. Solución para las partículas libres

4.2. Electrodinámica Cuántica

Capítulo 5

La Estructura de los Hadrones

Capítulo 6

Cromodinámica cuántica

Capítulo 7

Interacción electrodébil

7.1. La violación de Paridad

La ecuación de Dirac como ya hemos visto:

$$(\not{p} - m)\psi = 0 \quad (7.1.1)$$

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Exámenes

Examen 2024

Pregunta 1

¿Se conserva la paridad en la Electrodinámica Cuántica? ¿Y en la interacción fuerte descrita por la Cromodinámica Cuántica? ¿Y en la gravitación cuántica?

La paridad en la electrodinámica cuántica se conserva. En la interacción fuerte y en la gravitación cuántica también, solo se viola por la fuerza electrodébil. Esto se ve claramente en el carácter de las corrientes J^μ de todas las fuerzas, siendo la débil la única con un término $\frac{1}{\sqrt{2}}(1 + \gamma^5)$.

Pregunta 2

¿Coinciden los valores de G_F medidos en la desintegración β con los medidos en la desintegración del muón? ¿Qué factor origina la diferencia? ¿Juega algún papel que los quarks tengan masa? Indica sólo la idea.

No coinciden, ya que $G_F^\beta = 1.136 \times 10^{-5}$ GeV y $G_F^\mu = 1.166\,378\,8 \times 10^{-5}$ GeV. La diferencia fundamental está en el ángulo de cabbibo relacionado con las propiedades de los quarks, en particular con su masa (si no tuvieran masa el ángulo de cabbibo sería cero y coincidirían).

Pregunta 3

¿Cuál es la orientación preferente del espín del electrón emitido en la desintegración del ^{60}Co (en reposo) respecto a su momento? ¿Y la del positrón en la emisión del ^{14}O ? Explica por qué.

La orientación del espín del electrón será preferentemente hacia el sentido contrario que su momento, y la del positrón a favor de su momento. La interacción débil viola paridad totalmente, de tal modo que solo deja electrones con quiralidad a izquierdas y positrones con quiralidad a derechas. La consecuencia es que en el caso ultrarrelativista el electrón tendrá helicidad -1 y el positrón helicidad +1 (i.e., el espín y el momento serán antiparalelos y espín y el momento serán paralelos). Sin embargo al no ser una partícula sin masa, la helicidad y la quiralidad no se igualarán, por lo que en realidad es posible encontrar un electrón con helicidad +1 y un positrón con helicidad -1, aunque será mucho menos probable.

Pregunta 4

¿Era necesaria una teoría relativista para comprender la desintegración β , siendo como son muy bajas las velocidades del protón y del neutrón? ¿Es relativista la teoría de Fermi? ¿Es cierta la teoría de Fermi? Explica lo esencial.

Aunque las velocidades sean bajas, la teoría relativista es fundamental ya que si no no se entendería el origen de γ^μ (que proceden de una teoría cuántica relativista). La teoría de Fermi es relativista, aunque no es cierta, pues no es capaz de predecir el carácter quiral a izquierdas de las desintegraciones beta (aunque si el tiempo de vida).

Pregunta 5

Di si es más probable la desintegración del π^- en electrón que en muón, y explica por qué con un dibujo. ¿Sabes el factor aproximado?

La desintegración del π^- en el muón mucho más probable (en un orden de 1.3×10^{-4}), debido a que la masa del muón $m_\mu \approx 105.7$ MeV y la del electrón $m_e \approx 511$ keV. El π^- al ser una partícula con espín 0 y emitir un neutrino a derechas $\bar{\nu}_R$, hace que la conservación del momento-momento angular obligue al lepon a tener una helicidad positiva. La helicidad se iguala a la quiralidad en el caso ultrarrelativista, caso que se da de manera mucho más intensa en el electrón, y como un electrón no puede tener quiralidad a derechas en una interacción débil, prácticamente no se observan.

Pregunta 6

¿Qué masa tienen, y cuánto viven aproximadamente en su sistema en reposo, los piones cargados?

Los piones (cargados) tienen una masa aproximada de $m_{\pi^\pm} = 139.6$ MeV/c² y viven entorno a $\tau_{\pi^\pm} = 26.0$ ns.

Pregunta 7

Con $r_p = 0.84$ fm, deduce del principio de indeterminación qué sabores de antiquarks deben estar presentes en el protón. ¿Cuánto midieron los experimentos de neutrinos para $\bar{q}/(q + \bar{q})$, y con qué energía aproximada del neutrino?

El principio de indeterminación:

$$\Delta p \Delta x \sim \hbar \quad (7.1.2)$$

nos dice que:

$$\Delta p \approx \frac{\hbar}{r_p} \approx 235 \text{ MeV/c} \quad (7.1.3)$$

que es suficiente para generar pares de quark-antiquark de tipo u, d, s , ya que $m_u = 1.5$ MeV/c², $m_u = 4$ MeV/c², $m_s = 95$ MeV/c² (recordamos que la energía necesaria para generar un par

quark-antiquark es, como mínimo, $2m_q$ siendo $q = u, d, s, c, b, t$.

Pregunta 8

¿En qué consiste la variable y de Bjorken en un experimento de neutrinos sobre materia hadrónica, y cómo se determina en el laboratorio? Explícalo por separado para corrientes cargadas y para corrientes neutras.

La variable y de Bjorken se define como

$$y = \frac{pq}{pk} \quad (7.1.4)$$

donde p es el momento inicial del protón/neutrón, k sería el momento del neutrino inicial, k' sería el momento del lepton creado $q = k - k'$ sería la diferencia de los momentos. Podemos reescribir la variable y como

$$y = 1 - \frac{1}{2}(1 + \cos(\theta)) \quad (7.1.5)$$

siendo θ el ángulo entre el haz incidente y el lepton (muón) saliente.

Para medirlo en el laboratorio lo calcularemos en función del bosón que interactue:

- En el caso de *corriente cargada* basta con caracterizar bien el haz incidente (energía y dirección) y el muón (ángulo saliente respecto la dirección, energía) y el punto de colisión.
- En el caso de *corriente neutra* también será importante conocer la masa/energía intercambiada con los hadrones X , además de las variables mencionadas para las corrientes cargadas.

Pregunta 9

¿Por qué el ν_μ penetra más que el μ^- , ambos con $E = 1 \text{ GeV}$? El punto clave.

El punto clave y fundamental es básicamente que la sección eficaz del neutrino es mucho más pequeña que la del muón, además de que no interacciona por bremsstrahlung. Las interacciones con la materia nos hablan de secciones eficaces:

$$\sigma_\mu = 1 \text{ nb} \quad \sigma_{\nu_\mu} = E_\nu(\text{GeV}) \times 10^{-2} \text{ factorb} \quad (7.1.6)$$

Pregunta 10

Las corrientes neutras se descubrieron en el CERN en 4 reacciones clave, en el experimento Gargamelle. ¿Cuántas de ellas puedes escribir? Denota el núcleo de Freón como N . ¿En qué año se publicaron los resultados?

Las reacciones clave fueron las dispersiones de neutrinos sobre quarks:



y luego

Pregunta 11

Escribe una colisión elástica concreta entre un neutrino y un quark con un sabor único. ¿Tiene necesariamente el acople una parte $V + A$? Razona la respuesta.

Solución

Pregunta 12

Escribe los dobletes de isospín débil que forman los leptones conocidos, indicando su quiralidad y el valor de T_3 en cada caso.

Solución

Pregunta 13

Nombra los 4 bosones físicos de espín 1 de la teoría de unificación electrodébil, utilizando sus símbolos estándar. También los símbolos que corresponden a los 4 bosones gauge de la teoría $SU(2)_L \times U(1)_Y$.

Solución

Pregunta 14

¿Permanece la corriente $J_Y^\mu \equiv 2(J_{\text{em}}^\mu - J_3^\mu)$ invariante bajo rotaciones del grupo $SU(2)_L \times U(1)_Y$, en la teoría de unificación electrodébil? ¿Puedes explicitar cada término, en función de los espinores quirales e_R , e_L y $\nu_{e,L}$?

Solución

Pregunta 15

¿Es válida la teoría $SU(2)_L \times U(1)_Y$ sólo para leptones, o también para los quarks? Escribe los 6 fermiones (3 leptones y 3 quarks) de la segunda generación que se acoplan en ella, indicando su multiplicidad y quiralidad.

Solución

Pregunta 16

¿En qué máquina se midieron por primera vez M_{Z^0} y $\sin^2 \theta_W$ con precisión 10^{-4} ? Indica las partículas colisionantes, su energía, y el año en que se hizo.

Solución

Pregunta 17

¿Sabes cuánto vale en GeV el valor esperado en el vacío v del campo de Higgs? ¿Hay algún observable que permita determinarlo únicamente, en la teoría de unificación electrodébil? ¿Conoces la relación entre ambos?

Solución

Pregunta 18

¿Es capaz de entender el Modelo Estándar las leyes físicas (no matemáticas) que subyacen en el potencial de autoacoplo del campo de Higgs? ¿Se parece a algún fenómeno que hayas estudiado en otras materias?

Solución

Pregunta 19

¿Conoces las masas en GeV/c^2 de los bosones W^\pm y Z^0 ? Indica la relación que tienen en la teoría de Weinberg con el valor esperado en el vacío del campo de Higgs v y con las constantes de acople de la simetría gauge.

Solución

Pregunta 20

¿De qué único parámetro depende el cociente M_{Z^0}/M_{W^\pm} ? ¿Qué simetría gauge hace posible su independencia de v y cuáles son sus constantes de acople?

Solución

Pregunta 21

Indica el tipo de relación que existe entre la constante de Fermi G_F , la constante de acople g^2 del grupo $SU(2)_L$ y la masa del W^\pm .

Solución

Pregunta 22

¿Se pudo predecir históricamente la masa del bosón W^\pm a partir de la constante de Fermi G_F y la carga del electrón e ? ¿Qué otro parámetro estuvo involucrado en la predicción? ¿Era conocido cuando se descubrió?

Solución

Pregunta 23

¿Es suficiente la teoría $SU(2)_L \times U(1)_Y$ para predecir M_{Z^0} , aun conociendo de forma empírica las constantes G_F (relacionada con M_{W^\pm}), e , y $\sin^2 \theta_W$? Explica el contenido físico de la predicción sobre el parámetro ρ .

Solución

Pregunta 24

¿Siguen los módulos de la matriz CKM algún patrón aproximado en potencias del seno λ del ángulo de Cabibbo? Indica el nombre del físico que postuló dicho patrón, y cuál fue el descubrimiento que le motivó a hacerlo.

Solución

Pregunta 25

¿Es posible en el Modelo Estándar la desintegración $Z^0 \rightarrow \nu_\tau \bar{\nu}_\tau$? Dibuja el diagrama de Feynman. ¿Predice la teoría los valores de C_V y C_A para el ν_τ y de $\Gamma(Z^0 \rightarrow \nu_\tau \bar{\nu}_\tau)$? ¿En qué acelerador se midió esta última, y en qué año?

Solución

Pregunta 26

¿Puede formarse un bosón W^- en el choque entre un quark d y un antiquark \bar{u} ? Indica qué partículas harías colisionar para formarlo, y a qué energía mínima (supón $x \approx \frac{1}{3}$ y que los quarks arrastran $\approx \frac{1}{2}$ del momento del protón). Indica quién lo hizo y el año.

Solución

Pregunta 27

¿Cuántos parámetros reales, medibles e independientes tiene la matriz V_{CKM} (módulos y fases)?

Solución

Pregunta 28

Realiza el conteo del número total de parámetros reales que tiene el Modelo Estándar, de forma no redundante. Esto incluye las masas de quarks y leptones, así como los parámetros medibles e independientes de la matriz CKM, y otros. Ten en cuenta que el modelo predice masa nula de los neutrinos. Para QCD, toma sólo $\alpha_s(M_{Z^0})$.

Solución

Pregunta 29

¿Qué fracción (%) de los parámetros anteriores corresponde a constantes de acople adimensionales de los grupos de simetría gauge, y qué fracción a física desconocida?

Solución

Pregunta 30

Sabiendo que $g \approx 0.629$ y $g' \approx 0.345$, ¿predice la teoría el valor de la carga del electrón sólo a partir de estos dos parámetros? Si es cierto, calcula e (en unidades $\hbar = c = \epsilon_0 = 1$), así como la constante adimensional $\alpha = \frac{e^2}{4\pi}$, y compara con su valor real.

Solución

