

## ESTRUCTURA DE LA MATERIA 4

### PRIMER CUATRIMESTRE DE 2018

#### PRÁCTICA 7A: TEORÍAS DE GAUGE (ABELIANO)

1. Considere la acción de un campo escalar cargado ante el campo electromagnético,

$$S = \int d^4x \left( D_\mu^* \phi^* D^\mu \phi - m^2 \phi^* \phi \right),$$

donde  $D_\mu = \partial_\mu + ieA_\mu$ . Se pide:

- Muestre que esta acción es invariante ante la transformación  $U(1)$  global definida según  $\phi(x) \rightarrow \phi'(x) = e^{i\alpha} \phi(x)$ , para cualquier constante  $\alpha$ .
- Suponiendo, ahora, una transformación local (*i.e.* permitiendo que  $\alpha$  sea, ahora, una función arbitraria de las cuatro coordenadas), deduzca cómo tendría que transformar el campo electromagnético  $A_\mu(x) \rightarrow A'_\mu(x)$  a efectos de que la acción permaneciese invariante ante  $\phi(x) \rightarrow \phi'(x) = e^{i\alpha(x)} \phi(x)$ .
- Muestre que la transformación del campo  $A_\mu(x)$  deja también invariante al lagrangiano de Maxwell.
- Dibuje los diagramas de Feynman correspondientes a los vértices de interacción.
- Ahora agregue al Lagrangiano un término  $\frac{1}{4}|\phi|^4$  y vuelva a dibujar los nuevos diagramas de Feynman posibles. Con este nuevo lagrangiano, dibuje los diagramas intervinientes en el scattering partícula-antipartícula,  $\phi^* \phi \rightarrow \phi^* \phi$ . Por simplicidad, considere sólo los órdenes que no incluyan lazos en los diagramas.

2. Considere el campo de Dirac acoplado al campo electromagnético,

$$\mathcal{L}_{QED} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}.$$

- Muestre que esta acción es invariante ante la transformación de gauge conjunta  $\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = e^{i\alpha(x)} \psi(x)$ ,  $A_\mu(x) \rightarrow A'_\mu(x)$ , donde la transformación del campo electromagnético es aquella que se dedujo en el problema anterior.
- Verifique que esta acción es invariante ante la transformación global  $\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = e^{i\alpha\gamma^5} \psi(x)$ ,  $A_\mu(x) \rightarrow A_\mu(x)$ , si y sólo si el campo de spin 1/2 es no-masivo.
- Dibuje los diagramas de Feynman correspondientes a los vértices de interacción.

3. Considere las dos teorías de campos descritas en los problemas 1 y 2.

- (a) Muestre que un término de masa para el fotón, por más pequeño que sea, rompe la invarianza de gauge  $U(1)_{local}$ .
- (b) Estudie a qué orden (en potencias de  $e$ ) aparece el primer término no-nulo en la amplitud de scattering para el proceso que corresponde a crear un par de fotones a partir de una colisión de partícula-antipartícula.
- (c) Presente el diagrama (el que corresponde al menor orden no trivial) del proceso de interacción entre cuatro fotones de distinto momento. Vea que es indispensable la consideración de un lazo para tal proceso.

### PRÁCTICA 7B: TEORÍAS DE GAUGE (NO ABELIANO)

1. Considere la teoría de Yang-Mills descrita por la densidad lagrangiana

$$\mathcal{L} = Tr(G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}),$$

donde  $G_{\mu\nu} = \partial_\mu W_\nu - \partial_\nu W_\mu - ig[W_\mu, W_\nu]$ .  $W_\nu$  son las componentes de un cuadvivector de matrices de  $d \times d$  pertenecientes a una representación de un dado grupo de Lie. El álgebra de este grupo tiene  $D$  generadores y sus constantes de estructura son  $f^{abc}$ , es decir que  $W_\nu = W_\nu^a(x)T^a$ , con  $W_\mu^a(x)$  funciones reales que conmutan ( $a = \{1, 2, 3, \dots, d\}$ ) y  $[T^a, T^b] = if^{abc}T^c$ . Note que la traza  $Tr$  se toma sobre los índices  $a, b$ , justamente. Se pide que:

a) Muestre que si se transforma el campo de gauge según

$$W_\mu(x) \rightarrow W'_\mu(x) = U(x)W_\mu(x)U^{-1}(x) - \frac{i}{g}(\partial_\mu U(x))U^{-1}(x),$$

dada una transformación arbitraria del grupo  $\psi \rightarrow U(x)\psi$  con  $U(x) = \exp(i\xi_a(x)T^a)$ , entonces el lagrangiano de Yang-Mills permanece invariante.

b) Esto generalizaría la invarianza de gauge de la teoría electromagnética, discuta por qué.

c) Muestre cómo un término de masa para el campo  $W_\mu^a(x)$  rompería dicha invarianza de gauge.

d) Muestre que, a diferencia de la teoría de Maxwell, esta teoría permite la auto-interacción del campo de gauge. Dibuje los diagramas que contribuirían a orden  $g$  y  $g^2$  para los scattering de tres y cuatro campos de gauge. Al hacer esto, discuta la dependencia del momento del campo de gauge que aparece en algunos vértices de interacción.

2. Considere el siguiente lagrangiano

$$\mathcal{L}_G = (\partial_\mu \Phi)^\dagger (\partial^\mu \Phi) - \mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2$$

donde  $\Phi$  es un doblete de SU(2) de campos escalares complejos

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi_\alpha \\ \phi_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{1}{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix}$$

a) Muestre que  $\mathcal{L}_G$  is invariante ante transformaciones de fase globales del grupo SU(2)

$$\Phi(x) \longrightarrow e^{i\vec{\alpha} \cdot \frac{\vec{\sigma}}{2}} \Phi(x)$$

b) Muestre que el lagrangiano  $\mathcal{L}_L$

$$\mathcal{L}_L = \left( \partial_\mu \Phi + ig \frac{\vec{\sigma}}{2} \cdot \vec{W}_\mu \Phi \right)^\dagger \left( \partial^\mu \Phi + ig \frac{\vec{\sigma}}{2} \cdot \vec{W}_\mu \Phi \right) - \mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2 - \frac{1}{4} \vec{G}_{\mu\nu} \cdot \vec{G}^{\mu\nu}$$

que resulta de la sustitución de  $\partial_\mu$  por la derivada covariante  $D_\mu$  en  $\mathcal{L}_G$  con

$$D_\mu = \partial_\mu + ig \frac{\vec{\sigma}}{2} \cdot \vec{W}_\mu$$

donde  $\vec{W}_\mu(x)$  es un campo de gauge de tres componentes, y del agregado de un término de gauge puro en función del tensor

$$\vec{G}_{\mu\nu} = \partial_\mu \vec{W}_\nu - \partial_\nu \vec{W}_\mu - g \vec{W}_\mu \times \vec{W}_\nu \quad (1)$$

es invariante ante transformaciones infinitesimales

$$\begin{cases} \Phi(x) \rightarrow (1 + i\vec{\alpha} \cdot \frac{\vec{\sigma}}{2}) \Phi(x) & (2) \\ \vec{W}_\mu \rightarrow \vec{W}_\mu - \frac{1}{g} \partial_\mu \vec{\alpha} - \vec{\alpha} \times \vec{W}_\mu & (3) \end{cases}$$

c) Explique porqué los últimos términos de las ecuaciones (1) y (3) están vinculados al carácter no abeliano de SU(2).

3. La simetría SU(3) de sabor es un ejemplo de simetría *global* y puede ser incorporada en el lagrangiano de quarks multiplicando al campo de quarks  $\psi(x)$  por un espinor de tres componentes  $\chi_i$ , tal que se identifican los sabores *u*, *d*, y *s* con los versores de la base canónica en dicho espacio interno:

$$\chi_u \equiv \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \chi_d \equiv \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \chi_s \equiv \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

De esta forma, para un quark de sabor  $u$  el lagrangiano se escribe de la siguiente manera:

$$(\bar{\Psi}(x), 0, 0) [i\partial I - M] \begin{pmatrix} \Psi(x) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \equiv \bar{\Psi}(x) [i\partial I - M] \Psi(x)$$

donde  $I$  es la matriz identidad y  $M$  es la matriz de masas. Notar que  $M$  sería proporcional a la identidad si las masas de los quarks fuesen iguales (simetría exacta).

Recuerde además que una transformación unitaria arbitraria en el espacio SU(3) se puede escribir como:

$$\Psi'(x) = U(\varepsilon^a) \Psi(x) = e^{i\varepsilon^a \frac{\lambda_a}{2}} \Psi(x) \quad a = 1, \dots, 8$$

donde  $\varepsilon^a$  son ocho parámetros reales que caracterizan la transformación y  $\lambda_a$  son el análogo de las matrices de Pauli pero para SU(3) (ver práctica 3).

a) Muestre que el lagrangiano resulta invariante ante una transformación global arbitraria de SU(3) si la simetría de sabor fuese exacta.

b) ¿Qué puede decir respecto del caso en que  $\varepsilon_a$  son funciones de las coordenadas?

4. Considere el lagrangiano de QCD

$$\mathcal{L} = \bar{\Psi}(x)(i\partial I - M)\Psi(x) - g\bar{\Psi}(x)\gamma^\mu T_a \Psi(x) G_\mu^a - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu}$$

donde  $T^a \equiv \frac{\lambda^a}{2}$  y  $G_{\mu\nu}^a \equiv \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - g f_{abc} G_\mu^b G_\nu^c$ .

a) Muestre que es invariante ante transformaciones del grupo SU(3) local de color

$$\begin{cases} \Psi(x) \rightarrow e^{ig\xi^a(x)T^a} \Psi(x) \\ G_\mu^a \rightarrow G_\mu^a - \partial_\mu \xi^a(x) - g f_{abc} \xi^b(x) G_\mu^c \end{cases}$$

b) Expanda el término de gluones  $-\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu}$  en el lagrangiano e indentifique los términos del lagrangiano que corresponden a los acoplamientos quark-gluon, y a los de tres y cuatro gluones.

c) Dibuje los cuatro diagramas que, a orden más bajo en la probabilidad contribuyen al proceso de scattering gluón-gluón,  $gg \rightarrow gg$ .