ESTRUCTURA DE LA MATERIA 4

SEGUNDO CUATRIMESTRE 2021

PRÁCTICA 9: MODELO ESTÁNDAR Y MECANISMO DE HIGGS

I never expected this to happen in my lifetime and shall be asking my family to put some champagne in the fridge.

Peter Higgs

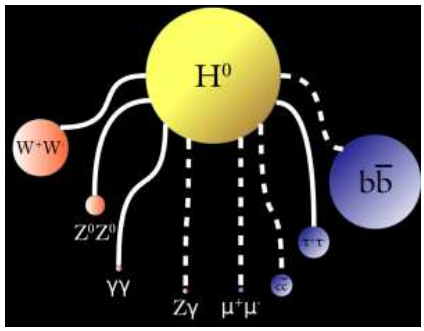

Figure 1: Un diagrama cefalópodo del decaimiento del Higgs, con bosones vectoriales como estados finales en rojo y estados finales fermiónicos en azul. Lineas sólidas corresponden con estados finales que se han observado, y lineas punteadas estados finales aún no vistos. El area de un círculo representa su taza relativa a aquella del quark bottom, que se espera represente el 60 porciento de los decaimientos del Higgs (imagen y copete obtenidos de http://steve.cooleysekula.net/blog/2017/07/06/4864/)

I. Preliminares: ejemplos simples para entender el mecanismo de Higgs

1. Considere un escalar complejo ϕ y el Lagrangiano

$$\mathscr{L}^{U(1)} = \left(\mathscr{D}_\mu \phi\right)^* \left(\mathscr{D}^\mu \phi\right) - \lambda\left(\phi\phi^* - \frac{v}{2}\right)^2 - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

($\mathscr{D}_\mu = \partial_\mu + igA_\mu$) que es invariante ante transformaciones locales del grupo U(1).

$$\begin{cases} \phi(x) \to e^{-ig\chi(x)}\phi(x) \\ A_\mu \to A_\mu + \partial_\mu \chi(x) \end{cases}$$

Desarrollando el campo $\phi(x)$ según

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(v + h(x)\right)$$

donde $h(x)$ es real, muestre que en el lagrangiano resultante tanto A_μ como h cuentan ahora con términos de masa.

2. Sea el lagrangiano

$$\mathscr{L} = \left(\partial_\mu \Phi\right)^\dagger (\partial^\mu \Phi) - \lambda (\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})^2$$

donde Φ es un doblete de campos escalares complejos $\begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix}$ y λ positivo. Suponga que Φ adquiere un valor de expectación en el vacío en algun valor arbitrario, Muestre que si sólo localiza (gaugea) el grupo de simetría $SU(2)$ del lagrangiano entonces los tres bosones de gauge W adquieren masa, y esta es la misma para los tres.

II. Masa para los campos Z y A

3. Considere ahora el mismo doblete pero donde gaugeo el grupo $U(1) \times SU(2)$ introduciendo la derivada covariante: $\partial_\mu + i(g' B_\mu \frac{Y}{2} + g W_\mu^a \frac{\sigma_a}{2})$; Y es una matriz diagonal proporcional a la identidad (la hipercarga para el Higgs). Considere que elige el minimo del potencial de Higgs en $\begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$.

   El campo fuera del minimo tendra la forma: $\begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v+h(x)}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$ con h real.

   (a) Halle cuales son las combinaciones de campos de gauge que adquieren masa. Recuerde reescribir los W^1 y W^2 en términos de W^+ y W^- definidos en la guia anterior.

   (b) Halle el valor del coeficiente en la matriz de hypercarga Y para que uno de los campos masivos sea el campo Z de la guia anterior.

4. Muestre a partir el ejercicio anterior que las masas de los bosones $W^\pm$ y Z estan relacionadas entre sí por $\frac{M_W^2}{M_Z^2} = cos^2(\theta_W)$.

III: Masa para los fermiones

5. A fin de generar masa a los fermiones, se introducen términos da acoplamientos entre cada doblete de fermiones left y el doblete de campos escalares, de forma tal que sean invariantes ante $U(1)xSU(2)$. Para el caso del doblete de electrones y neutrinos, para ejemplificar, los términos añadidos son proporcionales a:

$$(\overline{\nu}_e, \overline{e})_L \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} e_R + \overline{e}_R (\phi_1{}^*, \phi_2{}^*) \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$$

.

Aquí hemos denotado por e y ν a los campos de dirac asociados a los electrones y neutrinos. La constante de proporcionalidad de este término puede ser elegida libremente y se denomina acoplamiento de Yukawa.

(a) Muestre que el término añadido al lagrangiano es invariante ante $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$, eligiendo la matriz de hypercarga Y de ejercicios anteriores.

(b) Muestre que el mecanismo de Higgs genera un término masa para los electrones y otro de interacción entre los electrones y el campo escalar h proporcionales a

$$\bar{e}_R(h+v)e_L + \bar{e}_L(h+v)e_R = v\bar{e}e + h\bar{e}e$$

.

Obs: esta construcción se extiende a todos los fermiones inferiores de cada doblete de manera identica. Para los superiores la propuesta anterior debe modificarse ligeramente, pero el resultado final es el mismo: el término resultante es $\bar{\psi}_R(h+v)\psi_L + \bar{\psi}_L(h+v)\psi_R$.

6. Además de dar masa a otros, el campo de Higgs también tiene masa y autointeractúa. Halle la masa y el coupling de autointeracción en términos de los parámetros λ y v.

7. Dibuje todos los vértices de interacción que involucren al menos una linea asociada al campo de Higgs. Muestre que la constante de cada fermion al campo de higss es proporcional a la masa del fermión.

   En vista de esto, mire la tabla de partículas del modelo estandard y diga cual de todos los fermiones, en un proceso del tipo fermion + antifermion, tiene mas probabilidad de generar un higgs.

IV: Un paseo por todo el modelo standard

8. Ahora que todos los fermiones cuentan con masa, muestre que el electrón es estable, es decir, que no puede decaer en nada.

9. Observe el esquema siguiente, donde las lineas indican interacción, y asocie a cada linea el o los términos del Lagrangiano del modelo estandard.

10. Analice porque el afirmar lo siguiente lo llevaría a desaprobar el parcial:

    (a) El neutrino se acopla al campo de Higgs.

    (b) El campo A_μ se acopla al campo de Higss

    (c) Los gluones adquieren masa por el mecanismo de Higgs.

    (d) El Higgs tiene su antiparticula, de carga opuesta, la cual aún no se observó.

    (e) El Higgs no tiene masa; para darle masa al higgs, se necesitaria otro campo de tipo higgs.

    (f) El proceso foton + foton$\rightarrow$ higgs, no es posible dado que no hay terminos de interacción entre el campo de Higgs y el campo A_μ.

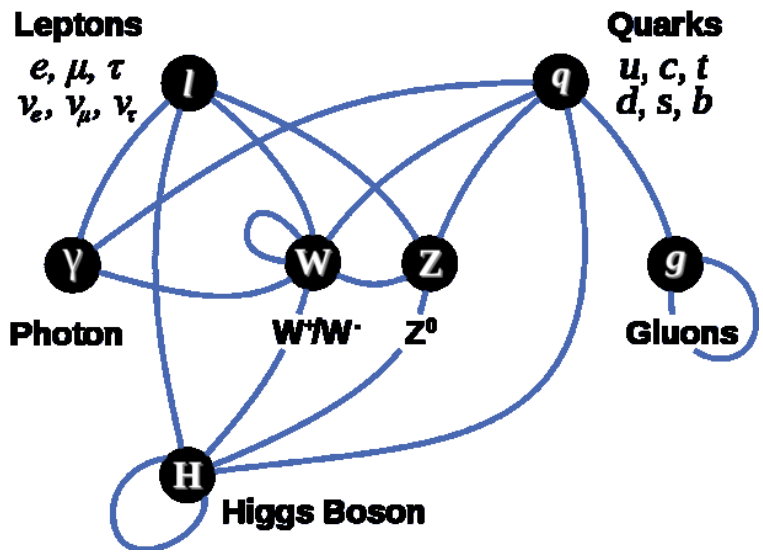

Figure 2: Esquema de las interacciones del modelo estandard