

## ESTRUCTURA DE LA MATERIA 4

### SEGUNDO CUATRIMESTRE 2023

#### PRÁCTICA 9: MODELO ESTÁNDAR Y MECANISMO DE HIGGS

En esta guía veremos el procedimiento para dar términos efectivos de masa a los campos de Dirac y bosones de gauge  $W^{+/-}$ ,  $Z$  vistos en la guía anterior usando un Lagrangiano que exhiba la invariancia de gauge  $U(1)_Y \times SU(2)$ . La razón por la cuál se dió este rodeo en vez de simplemente poner los términos de masa a mano (ruptura explicita) se puede entender analizando el problema de la renormalizabilidad del modelo (la posibilidad de absorber infinitos mediante un numero finito de parámetros), tema que va más allá de lo que veremos en esta guía.

*The way that the background fields generates mass is rather like the way in which when light passes through a transparent medium like glass or water, it gets slowed down. It no longer travels with the fundamental velocity of light  $c$ . And that's the way to think of the generation of mass.*

*Peter Higgs, 2004*

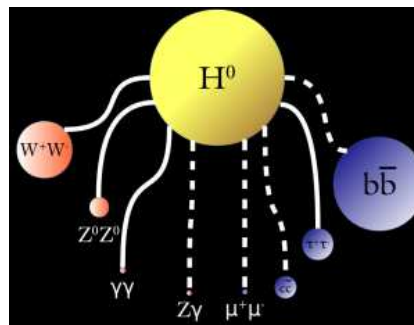


Figure 1: Un diagrama cefalópodo del decaimiento del Higgs, con bosones vectoriales como estados finales en rojo y estados finales fermiónicos en azul. Líneas sólidas corresponden con estados finales que se han observado, y líneas punteadas estados finales aún no vistos. El área de un círculo representa su tasa relativa a aquella del quark bottom, que se espera represente el 60 por ciento 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  $\phi$  y el Lagrangiano

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

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

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

Desarrollando el campo  $\phi(x)$  según

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

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

2. Sea el lagrangiano

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

donde  $\Phi$  es un doblete de campos escalares complejos  $\begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix}$  y  $\lambda$  positivo. Suponga que  $\Phi$  adquiere un valor de expectación en el vacío en algún 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:  $\partial_\mu + i(g'B_\mu \frac{Y}{2} + gW_\mu^a \frac{\sigma_a}{2})$ ;  $Y$  es una matriz diagonal proporcional a la identidad (la hipercarga para el Higgs). Considere que elige el mínimo del potencial de Higgs en  $\begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$ .

El campo tendrá 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 guía anterior.

(b) Halle el valor del coeficiente en la matriz de hipercarga  $Y$  para que uno de los campos masivos sea el campo  $Z$  de la guía 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 de acoplamientos entre cada doblete de fermiones left y el doblete de campos escalares, de forma tal que sean invariantes ante  $U(1) \times SU(2)$ . Para el caso del doblete de electrones y neutrinos, para ejemplificar, los términos añadidos son proporcionales a:

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

Aquí hemos denotado por  $e$  y  $\nu$  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 idéntica. 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 acoplamiento de autointeracción en términos de los parámetros  $\lambda$  y  $v$ .
7. 🐰 Dibuje todos los vértices de interacción que involucren al menos una línea asociada al campo de Higgs. Muestre que la constante de cada fermión al campo de Higgs es proporcional a la masa del fermión.

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

#### IV: Un paseo por todo el modelo estándar

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 líneas indican interacción, y asocie a cada línea el o los términos del Lagrangiano del modelo estándar
10. 🐰 Analice porque el afirmar lo siguiente lo llevaría a desaprobación parcial:

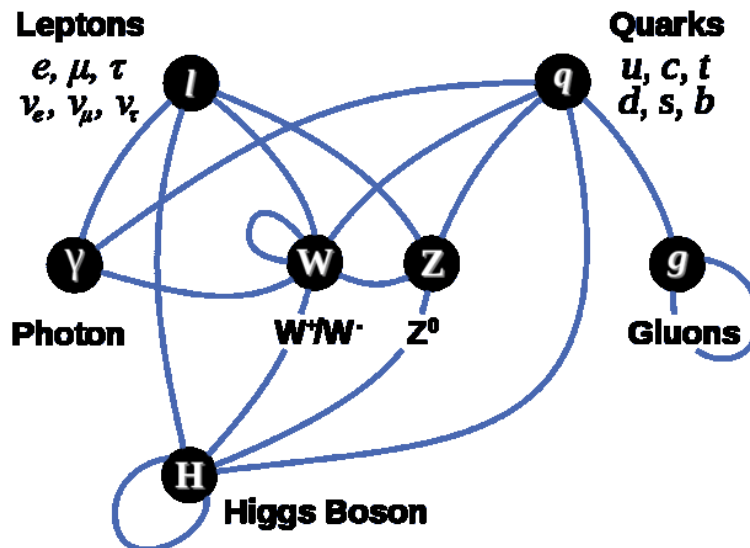


Figure 2: Esquema de las interacciones del modelo estándar

- El neutrino se acopla al campo de Higgs.
- El campo  $A_\mu$  se acopla al campo de Higgs
- Los gluones adquieren masa por el mecanismo de Higgs.
- El Higgs tiene su antipartícula, de carga opuesta, la cual aún no se observó.
- El Higgs no tiene masa; para darle masa al Higgs, se necesitaría otro campo de tipo Higgs.
- El proceso fotón + fotón  $\rightarrow$  Higgs, no es posible dado que no hay términos de interacción entre el campo de Higgs y el campo  $A_\mu$ .