

Particle Physics

Adrián Israel Arancibia González

Universidad de Santiago de Chile

adrian.arancibiag@usach.cl

February 26, 2022

Resumen

En el siguiente informe se presentan los resultados de aprendizaje del curso de Física de Partículas, se estudian los Lagrangianos de diversos campos y sus ecuaciones de movimiento, se estudian algunos tipos de colisiones de partículas y los diagramas de Feynman y Cross-section de algunos de los procesos generados a partir de estos.

Palabras Clave: Particle Physics, MAD-Graph, Cross Section, Feynman Diagram, Standar Model, Higgs and Effective Field Theory.

1 Lagrangianos

En física de partículas se utiliza el approach de campos cuantizados, para esto se parte de algunas teorías de campos clásicos que permiten describir simetrías de algunas de las partículas observadas en procesos de altas energías. Por ejemplo el campo de Proca que permite definir campos con simetría de gauge rota por la existencia de masa en principio describe un bosón masivo (spin 1) corresponde a un modelo para un “fotón masivo”.

$$\mathcal{L} = \frac{-1}{16\pi} (\partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu) (\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu) + \frac{1}{8\pi} \left(\frac{mc}{\hbar}\right)^2 A^\nu A_\nu, \quad (1)$$

usando que $\partial^\alpha A^\beta = \eta^{\alpha\sigma} \eta^{\beta\lambda} \partial_\sigma A_\lambda$, η para subir y bajar índices y que $\frac{\partial A_\alpha}{\partial A_\sigma}$ tenemos que sus ecuaciones de Euler-Lagrange o ecuaciones de movimiento toman la forma:

$$\frac{-1}{4\pi} \partial_\sigma (\partial^\sigma A^\lambda - \partial^\lambda A^\sigma) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{mc}{\hbar}\right)^2 A^\lambda \quad (2)$$

Otras partículas de gran importancia son los fermiones, el modelo más simple para de fermiones corresponde a la ecuación de Dirac con masa.

$$\mathcal{L} = \frac{i\hbar c}{2} [\bar{\psi} \gamma^\mu (\partial_\mu \psi) - (\partial_\mu \bar{\psi}) \gamma^\mu \psi] - mc^2 \bar{\psi} \psi \quad (3)$$

cuyas ecuación de movimiento, variando sobre $\bar{\psi} = \psi^{T*} \gamma^0$, toma la forma

$$i\hbar c \gamma^\mu \partial_\mu \psi - mc^2 \psi = 0 \quad (4)$$

y variando sobre ψ , toma la forma

$$-i\hbar c \partial_\mu \bar{\psi} \gamma^\mu - mc^2 \bar{\psi} = 0 \quad (5)$$

Otra ecuación de relevancia es la ecuación de Klein-Gordon que permite describir bosones y en su caso complejo sirve como modelo sencillo para piones cargados

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} ((\partial_\mu \phi)^* (\partial^\mu \phi) - \frac{mc^2}{\hbar} \phi^* \phi) \quad (6)$$

cuyas ecuaciones de movimiento variando sobre ϕ^* toman la forma

$$\frac{1}{2} \partial_\mu \partial^\mu \phi = -\frac{mc}{\hbar} \phi \quad (7)$$

y variando sobre ϕ tenemos

$$\frac{1}{2} \partial_\mu \partial^\mu \phi^* = -\frac{mc}{\hbar} \phi^* \quad (8)$$

cada una la conjugada de la otra.

También se puede introducir la carga a los fermiones con un término de interacción a campos de Yang-Mills en la forma

$$\mathcal{L} = \frac{i\hbar c}{2} [\bar{\psi} \gamma^\mu (\partial_\mu \psi) - (\partial_\mu \bar{\psi}) \gamma^\mu \psi] - mc^2 \bar{\psi} \psi - q \bar{\psi} \gamma^\mu \psi A_\mu \quad (9)$$

construyendo una simetría bajo transformaciones de fase locales para los fermiones $\psi \rightarrow e^{i\frac{q}{\hbar c} \lambda(x)} \psi$ si se añade una transformación del campo de gauge A_μ en la forma $A_\mu \rightarrow A_\mu +$

$\partial_\mu \lambda(x)$ cuyas ecuaciones de movimiento toman la forma

$$i\hbar c \gamma^\mu \left(\partial_\mu + i \frac{q}{\hbar c} A_\mu \right) \psi - mc^2 \psi = 0 \quad (10)$$

Los propagadores asociados a estas ecuaciones de movimiento están en la base de la construcción de Diagramas de Feynman conectándose en cada vértice distintos propagadores la integral de estos diagramas en el espacio de fase nos da información de la amplitud de los procesos la cual puede ser interpretada experimentalmente a partir de la cross-section.

2 MadGraph5

En lo que sigue analizaremos los resultados del programa MadGraph5 el cual produce de forma automática los diagramas de Feynman de un modelo cuántico de campos y permite consultar por los cross-section de procesos de colisiones de partículas [1, 2]. Después de iniciar el programa con el comando `.mg5_aMC` dentro de la carpeta que aloja a MadGraph construimos un proceso con la función: `generate proceso`, donde el comando `proceso` corresponde a choque o decaimiento de partículas, por ejemplo: `p p > e+ e-` o otros como veremos en las tablas de la próxima sección, para mayor detalle de la sintaxis ver [3]. Para añadir un proceso se usa el comando `add process proceso`. Para guardar el proceso se utiliza el comando `output name`, donde `name` es el nombre con el que se decida guardar el conjunto de procesos a estudiar. Se pueden observar los diagramas de Feynman con `display diagrams` y se usa el comando `launch name` para cargar los procesos y empezar los cálculos de las integrales asociadas a los diagramas de Feynman usando el método de Monte-Carlo y así obtener la cross-section. En este punto se pueden elegir los parámetros de las colisiones.

3 Análisis de resultados

El primer proceso estudiado es la generación de pares electrón positrón a partir de la colisión protón-protón. los diagramas que rigen estos procesos en el Standard Model son

MadGraph nos permite estudiar todos estos casos (`p p > e+ e-`) o poner condiciones sobre estos para estudiar los diagramas y canales por separado, se pueden estudiar solo los casos en los que no aparece un boson `z` (`p p > e+ e- / z`) y solo los casos en los que no aparece un fotón (`p p > e+ e- / a`), es posible notar que la suma de estos dos procesos corresponde con (`p p > e+ e- / z`), tambien podemos borrar onshell alguna variable, en este caso el proceso mediado con

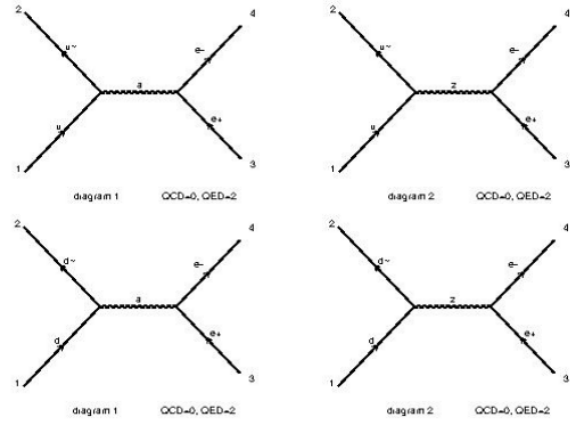


Figura 1: `p p > e+ e-`

un bosón `z` (`p p > e+ e- $ z`), así el fotones virtuales pueden mostrar m_z y también condicionar decaimientos (`p p > z`, `z > e+ e-`) (hay que revisar el proceso de cálculo ya que en este caso la cross-section resulto mayor que la del proceso total `p p > e+ e-`)

| Proceso | Cross-Section (pb) |
|---------------------------------------|---------------------|
| <code>p p > e+ e-</code> | 843.00 ± 2.13 |
| <code>p p > e+ e- / z</code> | 207.760 ± 0.489 |
| <code>p p > e+ e- / a</code> | 634.81 ± 6.29 |
| <code>p p > e+ e- \$ z</code> | 212.20 ± 2.44 |
| <code>p p > z, z > e+ e-</code> | 1420.3 ± 4.5 |

Cuadro 1: Cross-Section detallada del proceso `p p > e+ e-`

Tambien podemos comparar el efecto de cambiar el numero de eventos en este caso en un proceso protón-protón a Higgs y 2 jets

| Proceso | Eventos | Cross-Section (pb) |
|-----------------------------|---------|-----------------------|
| <code>p p > h j j</code> | 1000 | 3.3522 ± 0.0216 |
| <code>p p > h j j</code> | 10000 | 3.23700 ± 0.07932 |
| <code>p p > h j j</code> | 25000 | 3.37100 ± 0.07387 |

Cuadro 2: variación en el número de eventos en proceso `p p > h j j`

siendo no tan importante a nivel exploratorio la diferencia en los valores obtenidos entre 1000, 10000 y 25000 eventos.

Es necesario mostrar que MadGraph funciona con diversos modelos para eso comparamos las cross-section obtenidas para el proceso `p p > h j j` tanto en el Standard Model (ver ejemplo de diagramas Fig. 2) como en Higgs Effective Field theory (ver ejemplo de diagramas Fig. 2) En el caso de Higgs Effective Field Theory existe

| Modelo | Proceso s | Cross-Section (pb) |
|--------|---------------------------|-----------------------|
| sm | $p p \rightarrow h j j$ | 3.23700 ± 0.07932 |
| HEFP | $p p \rightarrow h j j 0$ | 7.861 ± 0.024 |

Cuadro 3: Comparación del Standard Model con el Higgs Effective Field theory, para 10000 eventos

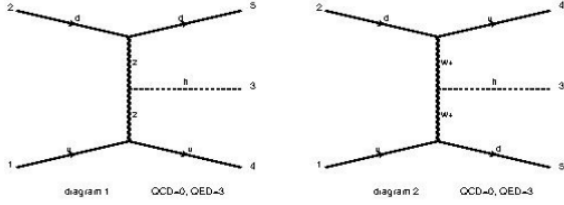


Figura 2: ejemplos de proceso $p p \rightarrow h j j$ en SM

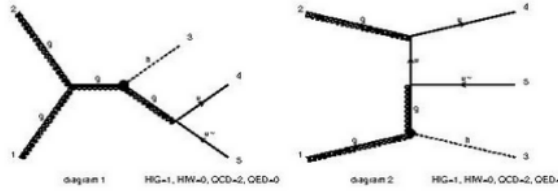


Figura 3: ejemplos de proceso $p p \rightarrow h j j$ en HEFT

un mayor número de canales de decaimiento, aumentando la cross-section del proceso.

Finalmente estudiaremos la generación de pares electrón-antineutrino electrónico a partir de la colisión protón-protón en presencia de jets

| Proceso | Cross-Section (pb) |
|---|--------------------|
| generate $p p \rightarrow e^+ \nu_e$ | 3763 ± 10 |
| generate $p p \rightarrow e^+ \nu_e$ add process $p p \rightarrow e^+ \nu_e j$ | 4534 ± 11 |
| generate $p p \rightarrow e^+ \nu_e$ add process $p p \rightarrow e^+ \nu_e j$ add process $p p \rightarrow e^+ \nu_e j j$ | 4791 ± 12 |
| generate $p p \rightarrow e^+ \nu_e$ add process $p p \rightarrow e^+ \nu_e j$ add process $p p \rightarrow e^+ \nu_e j j$ add process $p p \rightarrow e^+ \nu_e j j j$ | 4893 ± 12 |

Cuadro 4: Proceso $p p \rightarrow e^+ \nu_e$ para 10000 eventos y adición de procesos con jets

podemos ver como el proceso $p p \rightarrow e^+ \nu_e$ es el proceso principal existiendo correcciones debido a la producción de Jet.

Conclusiones

Con la ayuda de MadGraph se han podido calcular predicciones de modelos teóricos obteniendo una forma sencilla para el usuario de contrastar modelos teóricos con resultados experimentales de colisionadores de partículas como el LHC, también ha sido posible contrastar diversos modelos y obtener los diagramas de Feynman asociados a estos. Se han manipulado las condiciones de los choques y se han podido distinguir diversos procesos en una misma colisión. Queda como meta poder realizar gráficos de Invariant mass vs Cross-section utilizando MadGraph.

Agradecimientos

El autor agradece a la Asociación de Estudiantes de Pregrado de Ingeniería Física (AEPIF) de la Universidad Nacional de Ingeniería del Perú por la hospitalidad y la financiación del curso, al Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile por la financiación parcial de la asistencia al curso y el presente informe de resultados.

Referencias

- [1] Nhell Cerna, Curso de Particle Physics, 1st Summer School Physical Engineering UNI 2022-Lima, Perú.
- [2] <http://madgraph.phys.ucl.ac.be/>

[3] [https://www.niu.edu/spmartin/madgraph/
madsyntax.html](https://www.niu.edu/spmartin/madgraph/madsyntax.html)