

Automatización de cálculos en física de partículas

Marco Antonio Arroyo Ureña¹, Tomás Valencia Pérez².

Centro Interdisciplinario de Investigación y Enseñanza de la Ciencia (CIIEC)¹,
Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán UNAM¹, Instituto de física UNAM² .

June 2, 2022

Motivación

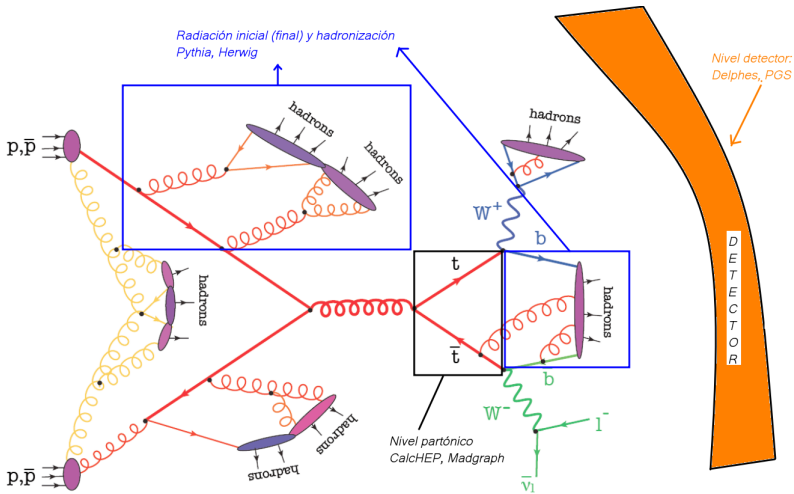
1. Una vez que se ha aprendido a calcular “a mano”, el uso de software especializado es un inmejorable complemento para realizar cálculos extensos.
 - 1.1 Cross-sections a más de dos o tres cuerpos
 - 1.2 Calcular contribuciones de N diagramas de Feynman
 - 1.3 Procesos que surgen a nivel de un loop no siempre tienen solución analítica
 - 1.4 Si uno desea emprender el desarrollo de una paquetería especializada puede tomar años
2. Las herramientas computacionales dan completas a la investigación, puesto que se pueden hacer simulaciones que eventualmente servirían como motivación para llevar una predicción al experimento.
3. Se tiene el control de su propio laboratorio virtual.

Panorama general

- ▶ El taller es dirigido al estudio de colisionadores, particularmente al Large Hadron Collider (LHC):
 1. Partiendo de algún Lagrangiano (del modelo estándar o de alguna extensión de éste) extraeremos las reglas de Feynman mediante las paqueterías: $\left\{ \begin{array}{l} \text{LanHEP} \\ \text{FeynRules} \\ \text{Sarah} \end{array} \right.$
 2. Exportaremos las salidas de [LanHEP](#) a un generador de eventos, el cual nos ayudará a evaluar [cross-sections \(\$\sigma\$ \)](#), [Branching Ratios \(BR\)](#), densidad reliquia Ω , etc. $\left\{ \begin{array}{l} \text{CalcHEP} \rightarrow \text{.mdl} \\ \text{Madgraph} \rightarrow \text{.py} \\ \text{Whizard} \\ \text{Sherpa} \end{array} \right.$
 3. Para dar una evaluación realista de σ o [BR's](#) es necesario que los parámetros que surgen de modelos que extienden a modelo estándar sean restringidos mediante datos experimentales o restricciones teóricas: $\left\{ \begin{array}{l} \text{SpaceMath} \rightarrow \text{Mathematica} \\ \text{Scanners} \\ \text{Gambit} \\ \text{CheckMATE} \end{array} \right.$
 4. Finalmente, para analizar la cinemática de algún proceso de interés usaremos la paquetería [Madanalysis5](#).

Panorama general

Figure: Esquema de la colisión



- ▶ LanHEP: es un programa (lenguaje C) que genera las reglas de Feynman, las cuales son exportadas en diferentes formatos para su implementación en otros programas generadores de eventos de procesos de física de partículas:
 - ▶ CalcHEP
 - ▶ MadGraph
 - ▶ MicrOmegas
 - ▶ FeynArts
 - ▶ etc.

Figure: Implementación del Lagrangiano de QED en LanHEP.

```
model QED/1.
parameter ee=0.31333:'elementary electric charge'.
spinor e1/E1:(electron, mass me=0.000511).
vector A/A:(photon).
let F^mu^nu=deriv^mu*A^nu-deriv^nu*A^mu.
lterm -1/4*(F^mu^nu)**2.
lterm E1*(i*gamma*deriv+me)*e1.
lterm ee*E1*gamma*A*e1.
```

Figure 1: LanHEP input file for the generation of QED Feynman rules

The QED Lagrangian is

$$\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{e}\gamma^\mu(i\partial_\mu + g_e A_\mu)e - m\bar{e}e$$

- ▶ Primera línea: **model** → Nombre del modelo etiquetado con el número 1.
- ▶ Segunda línea: **parameter** → declaración de parámetros del modelo.
- ▶ Tercera y cuarta línea: **spinor, vector, scalar** → espín de la partícula y en paréntesis se dan sus propiedades.
- ▶ Quinta línea: **let** → declara una sustitución en líneas posteriores.
- ▶ Resto: **lterm** → describe términos en el Lagrangiano.

Compilación

1. Vaya al directorio donde se ha guardado LanHEP. En esta máquina virtual:
`/home/alumno/Software/LanHEP/lanhep400`
2. Cree un directorio llamado `QED-taller` y en una terminal escriba: `./lhpep -OutDir QED-taller mdl/qed.mdl -X`, donde X representa el formato de salida para los diferentes generadores de eventos [X=-ca (-ufo, -fa) para CalcHEP (MadGraph, FeynArts)]. Para este ejemplo crearemos los archivos para CalcHEP : `-X=-ca`.
3. Ingrese al directorio `QED-taller`. Deberá encontrar los archivos:

3.1 `func1.mdl`

3.2 `lgrng1.mdl`

3.3 `prtcls1.mdl`

3.4 `vars1.mdl`

Modelo Estándar

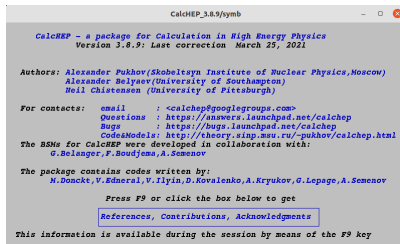
► Proceda del mismo modo pero ahora:

1. Cree un directorio llamado `ModeloEstandar-Taller`
2. Note que el ejecutable para generar las reglas de Feynman será `./lhcp -OutDir ModeloEstandar-Taller mdl/stand.mdl -ca`, donde `stand.mdl` es el archivo fuente que generará las reglas de Feynman del modelo estándar en formato interpretado por CalcHEP (`-ca`).

CalcHEP

- ▶ CalcHEP es generador de eventos Monte Carlo que evalúa secciones eficaces, y anchos de decaimiento de automática (nivel árbol).
- ▶ Importación de salidas .mdl generadas por LanHEP.
 - ▶ Copie el directorio **ModeloEstandar-Taller** a
`/home/alumno/Software/CalcHEP/calchep_3.8.10/work/models`
 - ▶ Dentro de
`/home/alumno/Software/CalcHEP/calchep_3.8.10/work` ejecute
vía terminal `./calchep`

Figure: Inicio de CalcHEP.



```
CalcHEP_3.8.9/ymb

CalcHEP - a package for Calculation in High Energy Physics
Version 3.8.9: Last correction March 25, 2021

Authors: Alexander Pukhov(Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,Moscow)
Alexander Belyaev(University of Southampton)
Neil Chistensen (University of Pittsburgh)

For contacts:  email      : <calchep@googlegroups.com>
               Questions : https://answers.launchpad.net/calchep
               Bugs       : https://bugs.launchpad.net/calchep
               Code&Models: http://theory.sinp.msu.ru/~pukhov/calchep.html
The BSNs for CalcHEP were developed in collaboration with:
G.Belanger,F.Boudjema,A.Semenov

The package contains codes written by:
N.Donckct,V.Edneral,V.Ilyin,D.Kovalenko,A.Kryukov,G.Lepage,A.Semenov

Press F9 or click the box below to get
References, Contributions, Acknowledgments

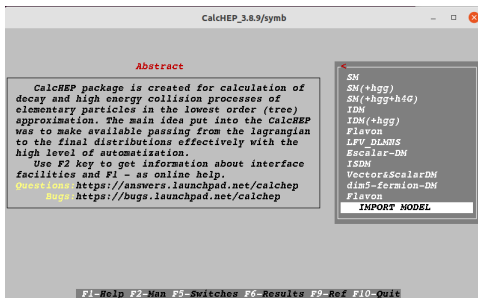
This information is available during the session by means of the F9 key
```

Importando un modelo a CalcHEP

1. Dé enter a la primera pantalla.
2. Enter IMPORT MODEL
3. Escriba:

/home/alumno/Software/CalcHEP/calchep_3.8.10/work/models/ModeloEstandar-Taller

Figure: Imporatar modelo a CalcHEP.



Decaimientos a dos cuerpos del bosón de Higgs

- ▶ Selección:
 - ▶ **Modelo Estandar**
 - ▶ **Enter process:** $H \rightarrow 2 \times x$
 - ▶ **ViewDiagrams** (Esto desplegará todos los decaimientos a dos cuerpos del bosón de Higgs)
 - ▶ **Square diagrams** (Calculará la amplitud al cuadrado)
 - ▶ **Make&Launch n_alchep** (Compilará y lanzará una nueva ventana)
 - ▶ **Total width** (Daré la opción para calcular el total width y canales individuales de decaimiento)
 - ▶ **Parameter dependence** (Desplegará la lista de los decaimientos del bosón de Higgs)
 - ▶ Escanee sobre la masa del Higgs, M_H , los diferentes canales de decaimiento.
- ▶ ¿Sus resultados están de acuerdo con <https://arxiv.org/pdf/hep-ph/0503172v2.pdf> (primera figura de la izquierda)?

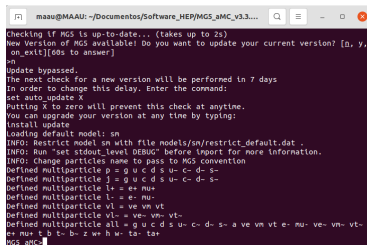
Producción del bosón de Higgs

- ▶ CalcHEP también ofrece la posibilidad de ejecutar scripts para evaluar cross-sections o decay widths
 - ▶ Dentro de
`/home/alumno/Software/CalcHEP/calchep_3.8.10/work`
ejecute vía terminal los scripts `gg-H` y `pp-WH` de la siguiente forma:
 1. `./calchep_batch gg-H`
 2. `./calchep_batch pp-WH`
- ▶ ¿Sus resultados están de acuerdo con <https://arxiv.org/pdf/hep-ph/0503172v2.pdf> (primera figura del centro)?
- ▶ **ACTIVIDAD:**
 - ▶ Estudie la producción del bosón de Higgs en un colisionador $e^+e^- (\rightarrow h\nu_e\bar{\nu}_e)$ mediante el scripts `ee-h_nu_nu`.

MadGraph

- ▶ MadGraph es un generador de eventos Monte Carlo para estudios de colisionadores, al igual que CalcHEP, MadGraph5 evalúa de forma automática secciones eficaces y anchos de decaimiento (a nivel árbol y at NLO in QCD).
- ▶ Primeros pasos:
 - ▶ Abra una terminal en la carpeta `/home/alumno/Software/MG5aMC_LTS_2.9.9/MG5_aMC_v2_9_9` y ejecute `./bin/mg5_aMC`. **Esto cargará el área de trabajo para generar procesos de interés.** Por default, Madgraph tiene precargado al modelo estándar.

Figure: Área de trabajo.



```
maau@MAAU: ~/Documentos/Software_HEP/MG5_aMC_v3.3...
Checking if MG5 is up-to-date... (takes up to 2s)
New Version of MG5 available! Do you want to update your current version? [n, y,
on_exit][60s to answer]
no
Update bypassed.
The next check for a new version will be performed in 7 days
In order to change this delay, Enter the command:
set auto_update X
Putting X to zero will prevent this check at anytime.
You can upgrade your version at any time by typing:
Install update
Loading default model: sm
INFO: Restrict model sm with file models/sm/restrict.default.dat
INFO: Run "set stdout_level DEBUG" before import for more information.
INFO: Change particles name to pass to MG5 convention
Defined multiparticle p = g u c d s u- c- d- s-
Defined multiparticle j = g u c d s u- c- d- s-
Defined multiparticle lv = e- nu-
Defined multiparticle l- = e- nu-
Defined multiparticle vl = ve vn vt
Defined multiparticle vl- = ve- vn- vt-
Defined multiparticle all = g u c d s u- c- d- s- a ve vn vt e- mu- ve- vn- vt-
e- mu- b- b- z- w- h- w- ta- ta-
MG5_aMC>
```

MadGraph

- Vamos a generar la producción del bosón de Higgs vía fusión de gluones con su posterior decaimiento a un par de fotones:

$$gg \rightarrow h \rightarrow \gamma\gamma.$$

Note que Madgraph genera procesos a nivel árbol. Sin embargo, Madgraph (así como CalcHEP) tiene implementado los vértices efectivos g_{ggh} y $g_{h\gamma\gamma}$. Para generar dicho proceso, introduzca lo siguiente en el área de trabajo de Madgraph.

- `import model heft` (generará el decaimiento del Higgs a un par de fotones).
- `add model hgg_plugin` (agregará la instrucción que generará la producción del Higgs mediante fusión de gluones).
- `generate g g > h, h > a a` ($gg \rightarrow h(h \rightarrow \gamma\gamma)$). Aquí la letra "a" representa a un fotón en la nomenclatura de Madgraph.
- `output gg-h-gamma_gamma_SM` Esto creará una carpeta llamada `gg-h-gamma_gamma_SM`, donde podrá definir cantidades importantes del procesos: *energía en centro de masa de la colisión, funciones de distribución partónicas, parámetros, número de eventos a generar etc.*

MadGraph

- ▶ Diríjase a la carpeta `gg-h-gamma_gamma_SM` ubicada en `/home/alumno/Software/MG5aMC_LTS_2.9.9/MG5_aMC_v2_9_9`.
 - ▶ Ingrese a `cards/run_card.dat`. Aquí podrá encontrar información sobre el proceso.
 - ▶ En la línea 26 cambie `10000 = nevents` por `5000 = nevents`
- ▶ Una vez modificado lo anterior, regrese al área de trabajo y tecleé:
 - ▶ `launch gg-h-gamma_gamma_SM` Esto lanzará el procesos que hemos generado.
 - ▶ Tecleé 1 para activar Pithia8 (Hadronización, radiación inicial y final etc.)
 - ▶ Tecleé 2 para activar Delphes (Respuesta del detector)
 - ▶ Tecleé dos veces ENTER para lanzar.
- ▶ Haga los mismos pasos pero ahora para el proceso $p p \rightarrow a a$ /h, la instrucción /h omitirá la contribución del bosón de Higgs. Llame al directorio que guardará éste proceso `output pp-gamma_gamma_SM`

MadGraph

1. Una vez que ha terminado de generar ambos procesos, vaya al directorio Delphes:



`/home/alumno/Software/MG5aMC_LTS_2.9.9/MG5_aMC_v2_9_9/Delphes`

2. Abra una terminal dentro del directorio anterior y tecleé:

2.1 `./DelphesHepMC cards/delphes_card_ATLAS.tcl SIGNAL.root`
`/home/alumno/Software/MG5aMC_LTS_2.9.9/MG5_aMC_v2_9_9/gg-h-`
`gamma_gamma_SM/Events/run_01/tag_1_pythia8_events.hepmc`

2.2 `./DelphesHepMC cards/delphes_card_ATLAS.tcl BGD.root`
`/home/alumno/Software/MG5aMC_LTS_2.9.9/MG5_aMC_v2_9_9/pp-`
`gamma_gamma_SM/Events/run_01/tag_1_pythia8_events.hepmc`

- Las instrucciones anteriores crearán los archivos `SIGNAL.root` y `BGD.root`. Éstos nos servirán para hacer la simulación a nivel detector (`cards/delphes_card_ATLAS.tcl`) partiendo de los eventos generados en Madgraph(`/gg-h-gamma_gamma_SM/Events/run_01/tag_1_pythia8_events.hepmc` y `/pp-gamma_gamma_SM/Events/run_01/tag_1_pythia8_events.hepmc`).

MadGraph

- ▶ Finalmente copie los archivos **SIGNAL.root** y **BGD.root** al directorio de MadAnalysis :
- ▶ `/home/alumno/Software/MadAnalysis5/madanalysis5`

MadAnalysis

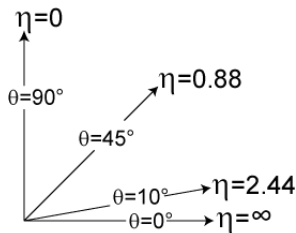
- ▶ MadAnalysis es una paquetería que permite analizar la cinemática de procesos (eventos) generados por simuladores Monte Carlo (CalcHEP, Madgraph, etc.). Genera distribuciones cinemáticas, evalúa significancias estadísticas, etc.
- ▶ Ubicación de MadAnalysis:
- ▶ `/home/alumno/Software/MadAnalysis5/madanalysis5`
- ▶ Para iniciar Madanalysis ejecute `./bin/ma5 -X`, donde -X representa el nivel del proceso -X=-R (reconstrucción), -X=-H (Hadronización), omitiendo el prefijo -X se asume nivel partónico.

MadAnalysis

- ▶ Para analizar la cinemática del proceso $gg \rightarrow h \rightarrow \gamma\gamma$, vaya al directorio donde se encuentra MadAnalysis y tecleé:
 - ▶ `./bin/ma5 -R script_MadAnalysis_h-diphoton.txt`,
donde el texto azul es el archivo que contiene la información para ejecutarse en MadAnalysis(adjunto en la página de registro, indico).
- ▶ El resultado del análisis será guardado en
 - ▶ `/home/alumno/Software/MadAnalysis5/madanalysis5/MiPrimerAnalisis`

- Pseudorapidity, η , es relacionada al ángulo θ relativo al eje del haz: $\eta = -\log(\tan \frac{\theta}{2})$.

Figure: Pseudorapidity η



- Momento transverso, p_T , es la componente ortogonal al eje del haz.
- Masa invariante, M_{inv} , se define como la raíz cuadrada de la suma del cuadri-momento de dos (o más) objetos:

$$M_{inv}^2(P_i, P_j) = (p_i^2 + p_j^2)^2$$

Implementación de $h\tau\mu$ en LanHEP

1. Cree un directorio llamado `SM_plus_h-tau_mu_THDM-III` en la carpeta de LanHEP :

► `/home/alumno/Software/LanHEP/lanhep400`

2. Para generar los archivos UFO para Madgraph (SM+ $h\tau\mu$ THDM-III) ejecute vía terminal (dentro de la dirección anterior):

2.1 `./lhep -OutDir SM_plus_h-tau_mu-THDM-III mdl
z_stand_Example-WorkShop-CIIEC.mdl -ufo`

3. Copie `SM_plus_h-tau_mu_THDM-III` a la siguiente dirección:

3.1 `/home/alumno/Softqare/MG5aMC_LTS_2.9.9/MG5_aMC_v2_9_9/models`

$gg \rightarrow h \rightarrow \tau\mu \rightarrow \ell\nu_\ell\nu_\tau\mu$ ($\ell = e, \mu$) en THDM-III

1. Proceda a generar el procesos analogamente como para $gg \rightarrow h \rightarrow \gamma\gamma$
2. Incluya un solo proceso de background: $pp \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu_\ell\mu\nu_\mu$.

Figure: ¡Eso es todo amigos!

