

Sesión 1:

Introducción a la física de

colisionadores



Walter Rodríguez
Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)
walter.rodriguez@pucp.edu.pe

Based on the following work:

Matthew D. Schwartz: 1709.04533

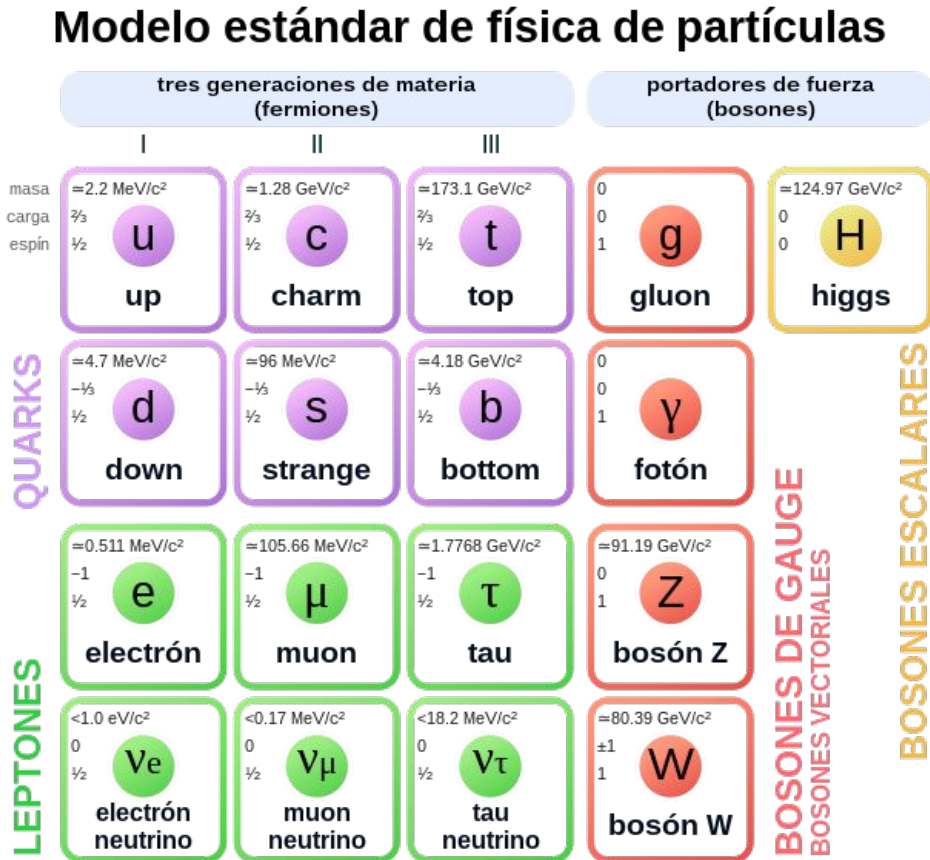
Walter Rodríguez: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/24287>

¿Qué se abordará?

- Breve descripción del Modelo Estándar
 - Motivación y detalles del LHC
- Cantidades importantes para entender los datos de los experimentos

Modelo Estándar de Física de Partículas

El modelo Estándar describe las interacciones y fuerzas fundamentales en el mundo subatómico.

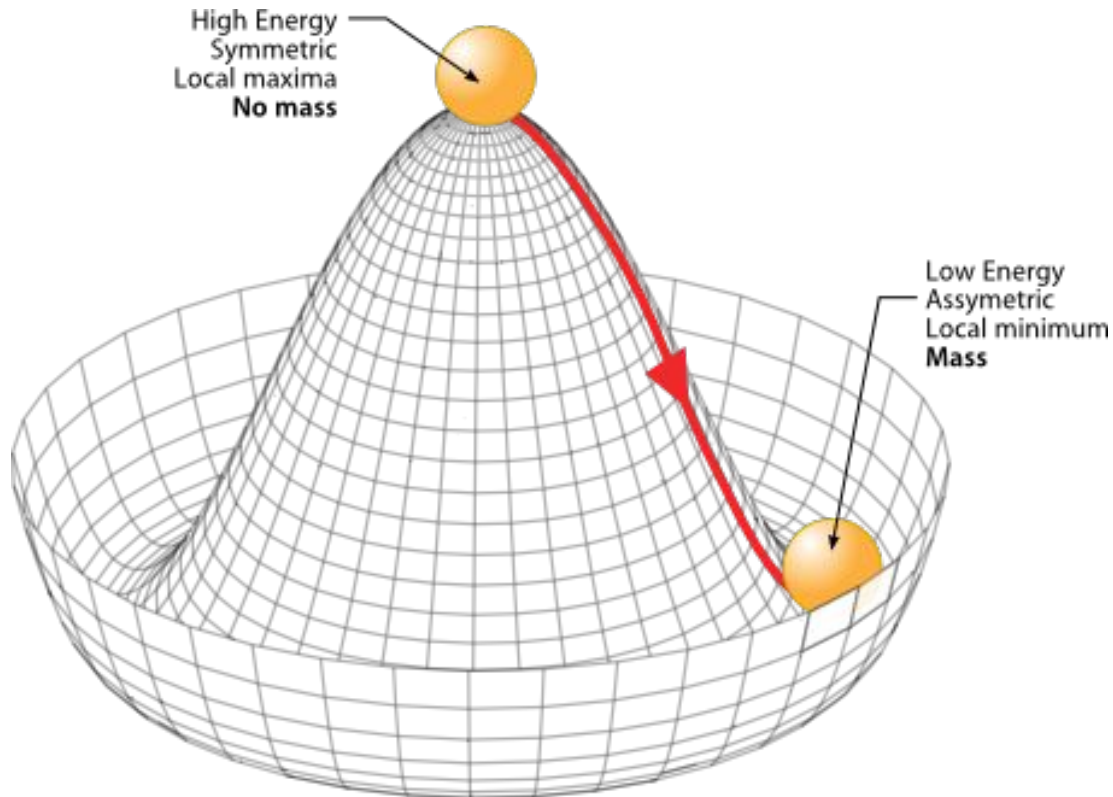


Modelo Estándar de Física de Partículas

\mathcal{L}_{SM}

- Cálculo del momento anómalo del electrón con diez cifras significativas
- Descubrimiento del quark top
- Predicción y cálculo de las masas de los bosones mediadores W, Z
- Descubrimiento de los gluones e interacciones de fuerza fuerte

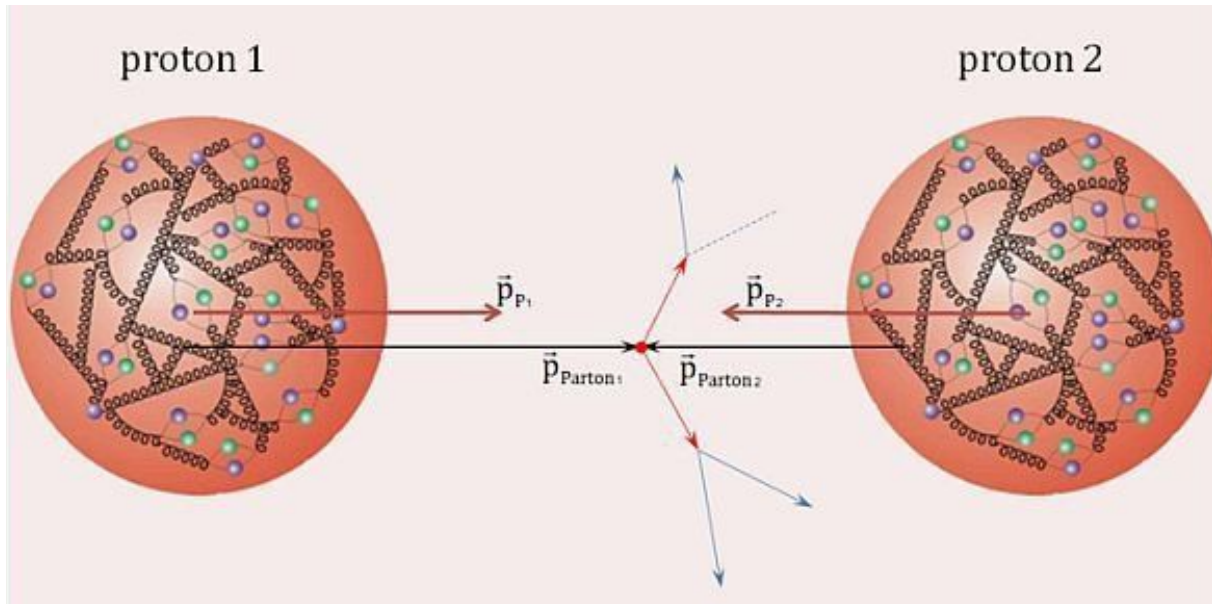
Modelo Estándar de Física de Partículas



El bosón de Higgs la manifestación de la excitación del campo de Higgs.

El campo de Higgs es el encargado de darle masa a las partículas.

¿Cómo producimos el Bosón de Higgs?



El SM predice una posibilidad de formar un Higgs a partir de la colisión de dos protones.

¿Cómo producimos el Bosón de Higgs?

- ¿Cómo se estudia la probabilidad de que dos partículas interactúen en física de colisionadores?
- Específicamente, ¿Cuál es el proceso que da origen al Higgs? y ¿Cuál es la probabilidad que suceda este proceso?
- Con estas probabilidades, ¿Cuáles deben ser las características de un colisionador para que brinde resultados significativos?

Probabilidades en física de colisionadores

Cross Section:

- Barn: Unidad de área
- $1\text{b} = 10^{-28} \text{ m}^2$
- Cross section scattering n- $\text{U}^{235} \sim 1 \text{ b}$
- Depende de las partículas que interactúan, la velocidad de interacción y el resultado que esperamos de cierta interacción.

Probabilidades en física de colisionadores

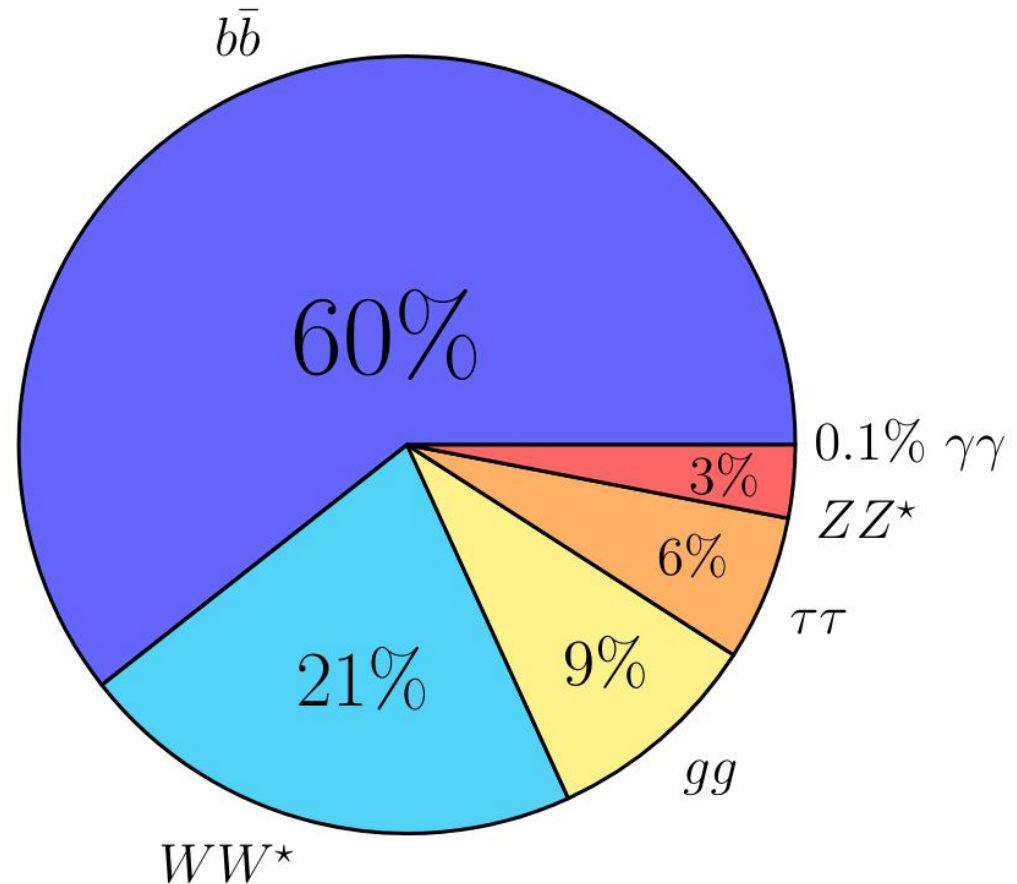
- Cross Section para un la producción de un bosón W a 7 TeV: $\sigma(p p \rightarrow W) \sim 1\text{nb} = 10^{-9} \text{ b}$
- Se espera un 1 W en 1 000 000 de colisiones protón protón.
- Para realizar este cálculo para el bosón de Higgs debemos conocer el proceso por el cual queremos originarlo.
- El Higgs no será medido directamente en el detector

Higgs Branching Ratios

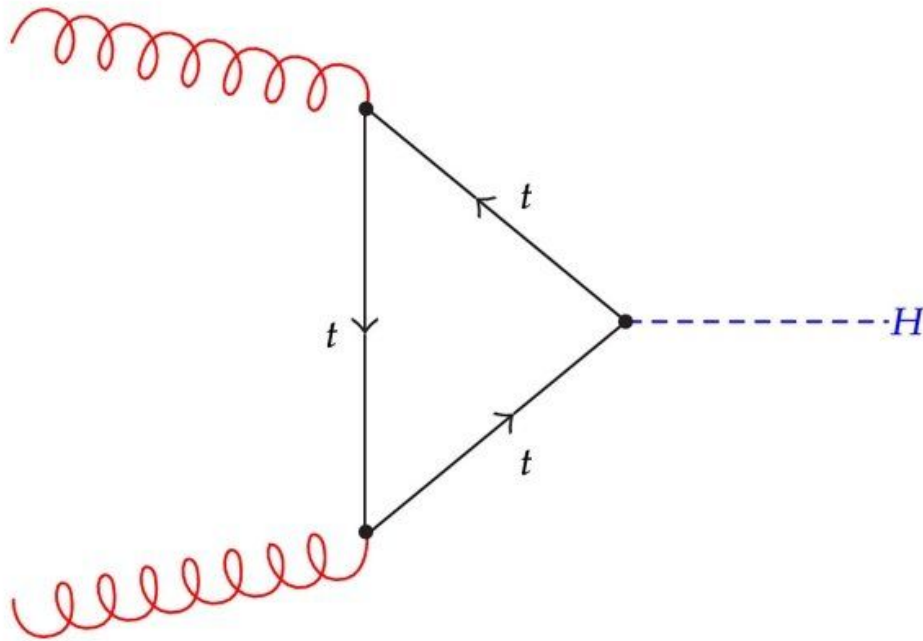
Branching Ratio:

Probabilidad de que una partícula decaiga en cierto canal en base a todas las posibilidades que tiene

- Específicamente, ¿Cuál es proceso que origina el Higgs? y ¿Cuál es la probabilidad que suceda este proceso?



Gluon Fusion



Modelo estándar de física de partículas

	tres generaciones de materia (fermiones)			portadores de fuerza (bosones)	
	I	II	III		
masa	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$		$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
carga	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
espín	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ fotón	
	e electrón	μ muon	τ tau	Z bosón Z	
	ν_e electrón neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W bosón W	
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 0 1	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1	
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$		

QUARKS

LEPTONES

BOSONES DE GAUGE
BOSONES VECTORIALES

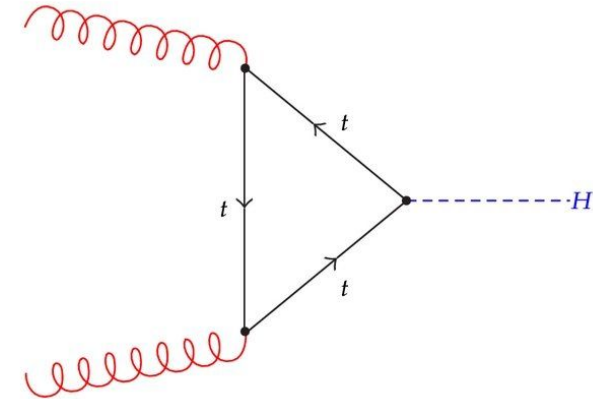
BOSONES ESCALARES

Gluon Fusion

- Cross Section para la producción de un bosón de Higgs a 7 TeV:

- $\sigma(p p \rightarrow H) \sim 10^{-3} * \sigma(p p \rightarrow W) = 10^{-12}$
- $\sigma(p p \rightarrow H) = 1 \text{ pb}$

- A 7 TeV, tenemos 1 Higgs cada billón de colisiones protón protón
- A 13 TeV, el cross section es de 40 pb.

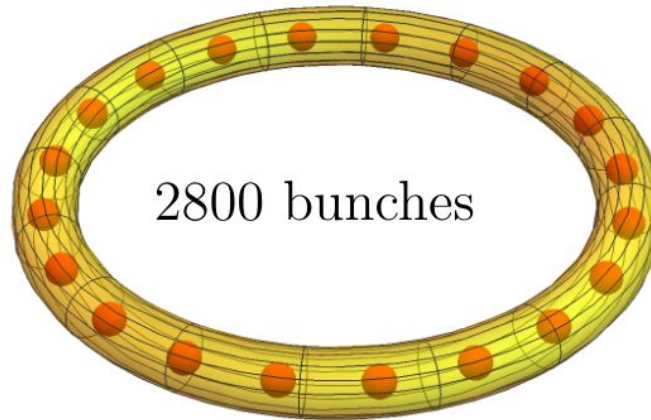


Si consideramos que queremos ver 100 Higgs en un año y con una eficiencia experimental de 10^{-2} , tenemos lo siguiente:

$$\frac{10^9 \text{ collisions}}{1 \text{ Higgs}} \times \frac{10^3 \text{ Higgs}}{h \rightarrow \gamma\gamma} \times \frac{1}{10^{-2} \text{ eff.}} \times \frac{100 \text{ } h \rightarrow \gamma\gamma}{\text{year}} \times \frac{\text{year}}{10^7 \text{ s}} = 10^9 \frac{\text{collisions}}{\text{s}} = 1 \text{ GHz}$$

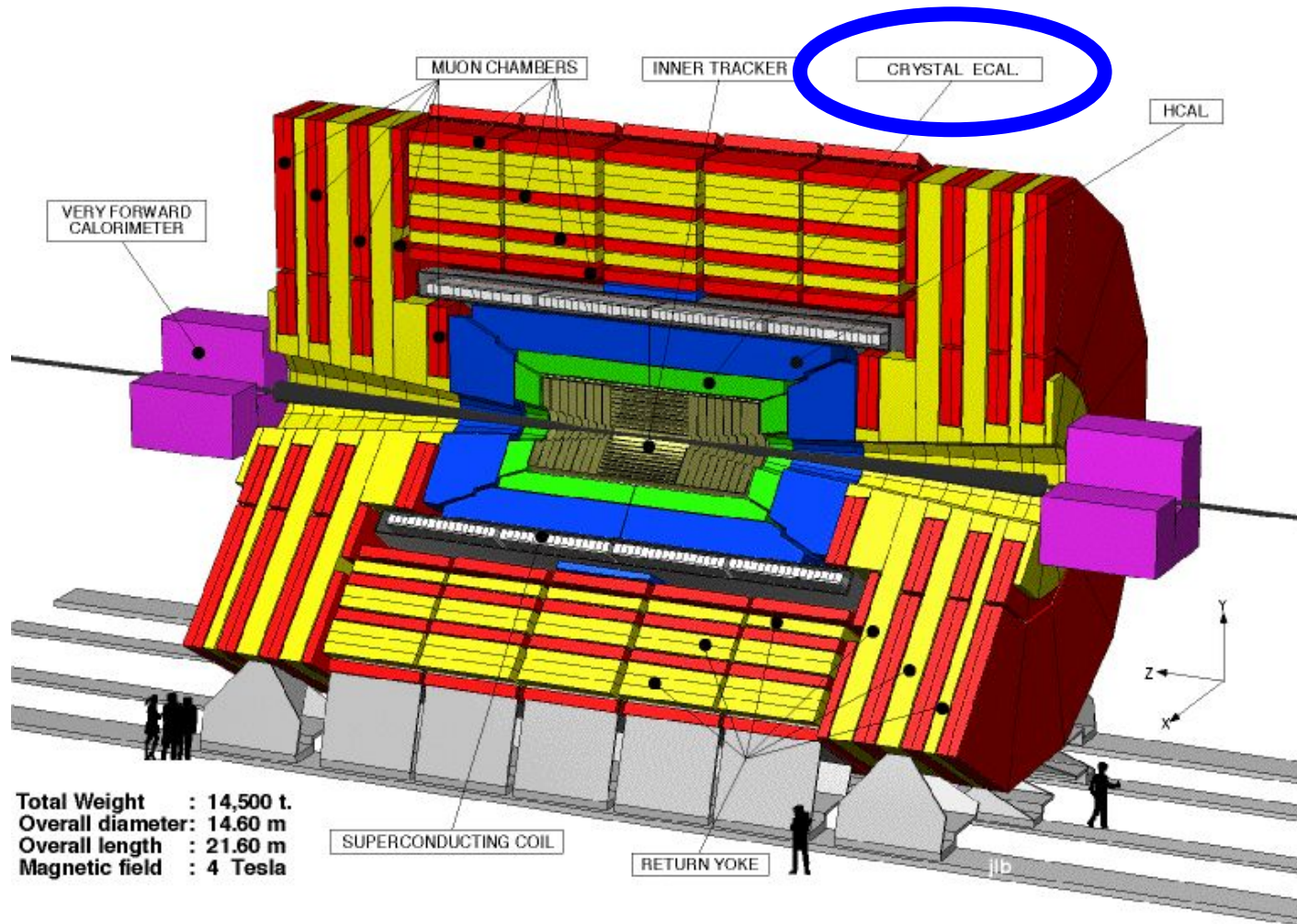
Gluon Fusion

Necesitamos colisionar 10^9 protones por segundo. ¿Cómo logramos esto?



Los bunches son conjuntos de protones y en el LHC tenemos 10^{11} protones por bunch.

Detectores del CMS



Señal de interés de los eventos

Señal en los eventos:

- Estados finales del proceso de interés

Background en los eventos

- Ruido. Datos correspondientes a eventos que no son de nuestro interés

Tenemos dos tipos de Background:

1. Reducible
2. Irreducible

Ejemplo de Background: Un evento con menos de dos fotones.

Cantidades de reconstruidas en el LHC

Resulta conveniente definir la dirección de movimiento del haz en la dirección z .

Queremos trabajar con cantidades invariantes bajo cambios en el sistema de referencia de laboratorio o partícula.

Momentum Transversal:

Está conformado por el momentum en los ejes transversales, es decir P_x y P_y

$$\vec{p}_T \equiv (p_x, p_y), \quad p_T \equiv |\vec{p}_T|$$

Cantidades de reconstruidas en el LHC

Masa Invariante:

La detección del Higgs no puede realizarse de forma directa debido a que decae muy rápido y es una partícula neutra. Ante esto, se elige medir sus decaimientos. La cantidad que permite asociar sus decaimientos a la partícula de origen es la masa invariante. Se mide de la siguiente forma:

$$m_{\text{objetos}} = \left| \sum_{\text{objeto } i} p_i^\mu \right|^2$$

Cantidades de reconstruidas en el LHC

Missing Transverse Energy:

Existen señales de partículas finales no medidas. La energía de todo objeto no medido se cataloga como Missing Transverse Energy (MET). Esta cantidad es especialmente útil para el estudio de señales de neutrinos.

Para su definición, usamos el concepto de Missing Transverse momentum:

$$\vec{p}_T \equiv - \sum_j \vec{p}_T$$

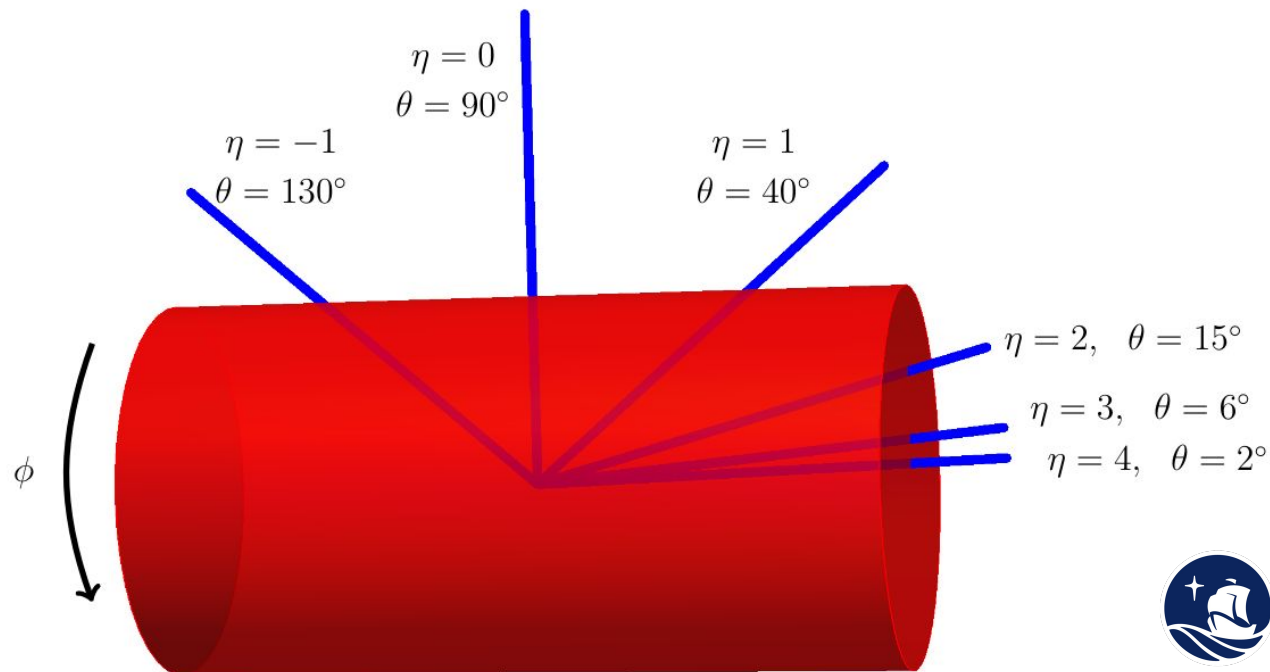
Hallando el módulo de esta cantidad, encontramos el MET:

$$E_T \equiv |\vec{p}_T|$$

Cantidades de reconstruidas en el LHC

Ángulo Azimutal:

Es importante tener una descripción geométrica que permita identificar las posiciones de detección dentro del detector. Para esto, se usa el concepto de ángulo azimutal.



Cantidades de reconstruidas en el LHC

Rapidity (y):

Queremos tener una cantidad que brinde información sobre la velocidad de la partícula en el beam pero que sea invariante bajo boost.

Lo definimos de la siguiente forma:

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z}$$

Cantidades de reconstruidas en el LHC

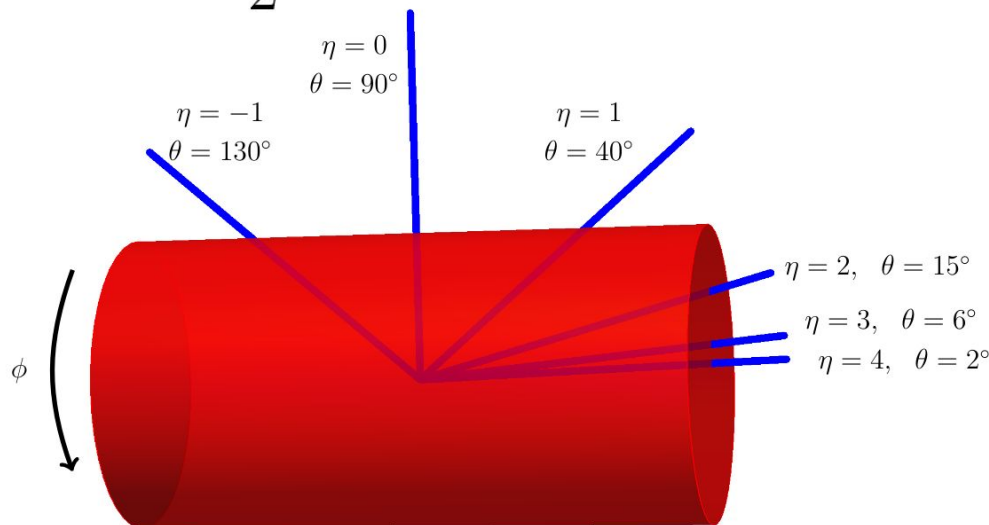
Pseudorapidity (η):

Es una función del ángulo polar θ que recorre de $-\infty$ a ∞ cuando θ varía de 0 a π . Se define de la siguiente forma:

$$\eta \equiv \ln \cot \frac{\theta}{2}$$

Haciendo una expansión de Taylor alrededor de $\theta = \pi/2$:

$$\eta \equiv \ln \cot \frac{\theta}{2}$$



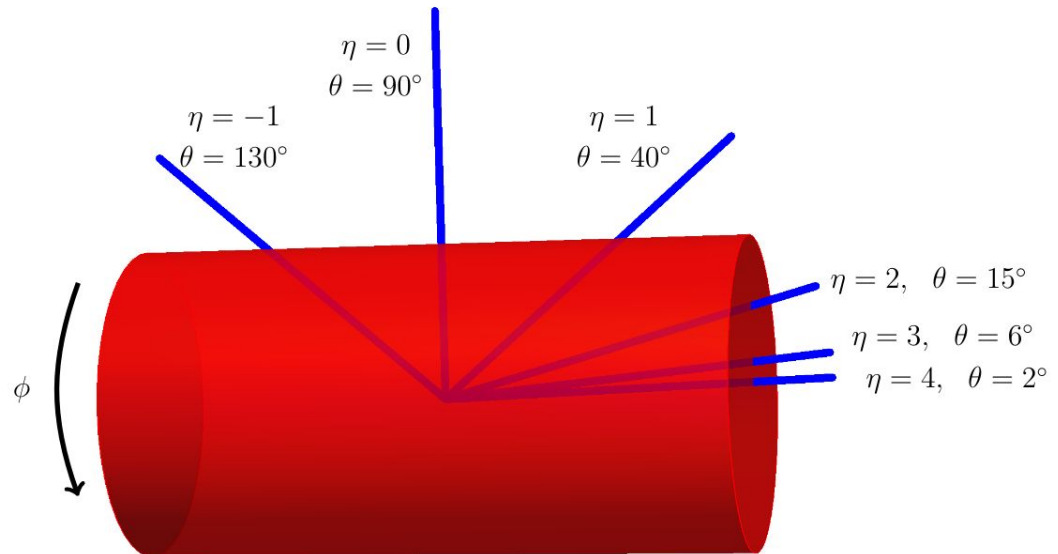
Cantidades de reconstruidas en el LHC

Ángulo Azimutal:

Esta cantidad gira en torno al eje z y tiene como dominio $[0, 2\pi]$.

Esta cantidad se define en términos de los componentes transversales.

$$\phi \equiv \tan^{-1} \frac{p_x}{p_y}$$

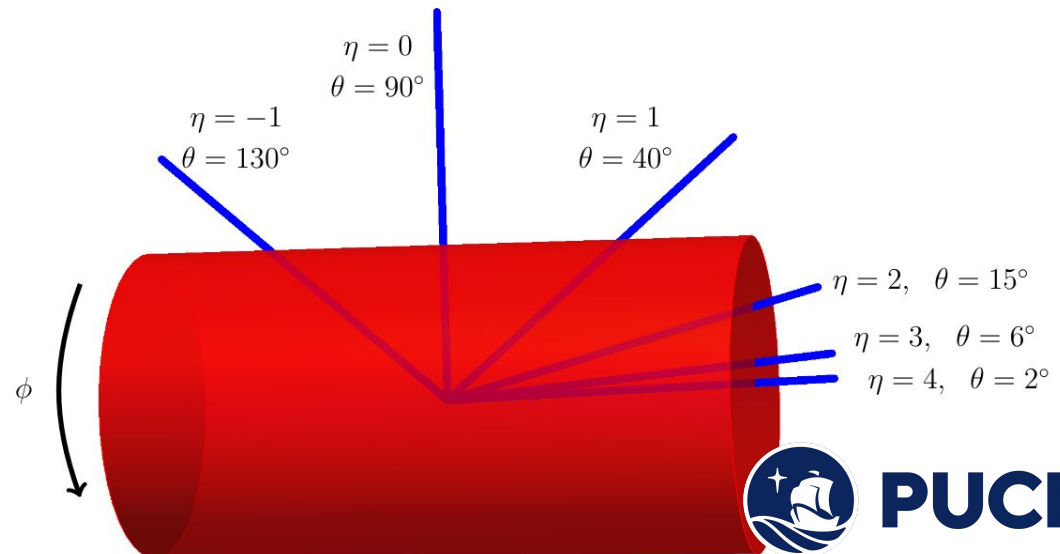


Cantidades de reconstruidas en el LHC

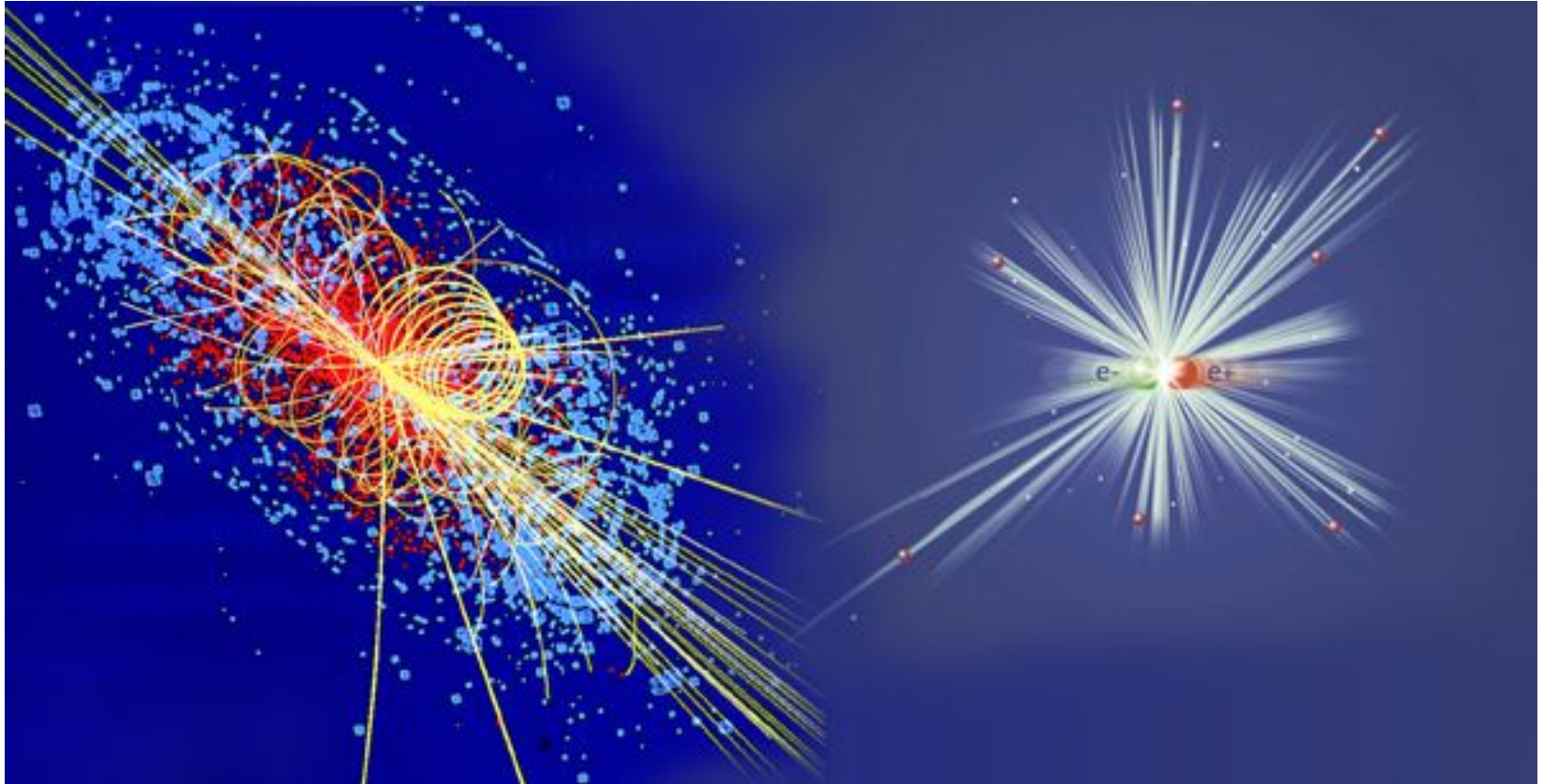
Separación Angular:

Las cantidades geométricas antes descritas brindan un cálculo dependiente del sistema de referencia. Una cantidad invariante bajo boost es la separación angular ΔR :

$$R = \sqrt{(\Delta\phi)^2 + (\Delta y)^2}$$



Simuladores Monte Carlo: MadGraph 5

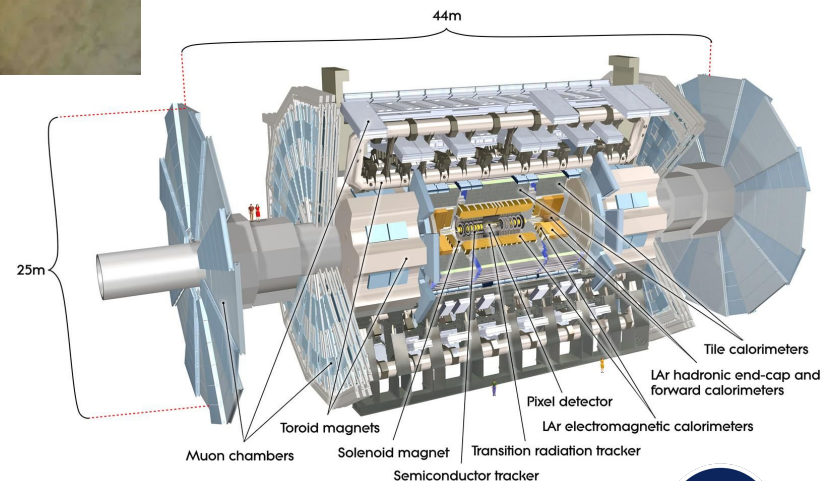


Simuladores Monte Carlo: MadGraph 5



- Simulación general de eventos (Real)

- Simulación de detectores (Reconstruido)



Simuladores Monte Carlo: MadGraph 5

2 opciones para verificar la validez de un experimento:

1. Datos teóricos
2. Datos generados por el Monte Carlo

Una correlación entre los datos verdaderos y los del experimento evidencia el suceso.

Simuladores Monte Carlo: MadGraph 5

```
*****
*
*                               *
*      W E L C O M E to      *
*      M A D G R A P H 5 _ a M C @ N L O  *
*
*                               *
*      *                       *
*      *      *      *      *      *      *
*      *      *      *      *      *      *
*      *      *      *      *      *      *
*      *      *      *      *      *      *
*      *      *      *      *      *      *
*
*      VERSION 3.4.1                2022-09-01
*
*      The MadGraph5_aMC@NLO Development Team - Find us at
*      https://server06.fynu.ucl.ac.be/projects/madgraph
*      and
*      http://amcatnlo.web.cern.ch/amcatnlo/
*
*      Type 'help' for in-line help.
*      Type 'tutorial' to learn how MG5 works
*      Type 'tutorial aMCatNLO' to learn how aMC@NLO works
*      Type 'tutorial MadLoop' to learn how MadLoop works
*
*****
```

Software de Análisis:

MadAnalysis 5



- Permite extraer información del evento (Real o Reconstruido)
- Permite graficar valores de interés
- **Podemos aplicar triggers y hacer cortes**
- Brinda valores de la efectividad del análisis