International Particle Physics Outreach Group

International Masterclasses
22th edition – 2026

Brazilian Teacher Programme
CERN BR

CERN

SPRACE

Special International Masterclass – 1st BTP

HANDS ON PARTICLE PHYSICS

2026 Edition

Programa regular

A Estrutura Elementar da Matéria

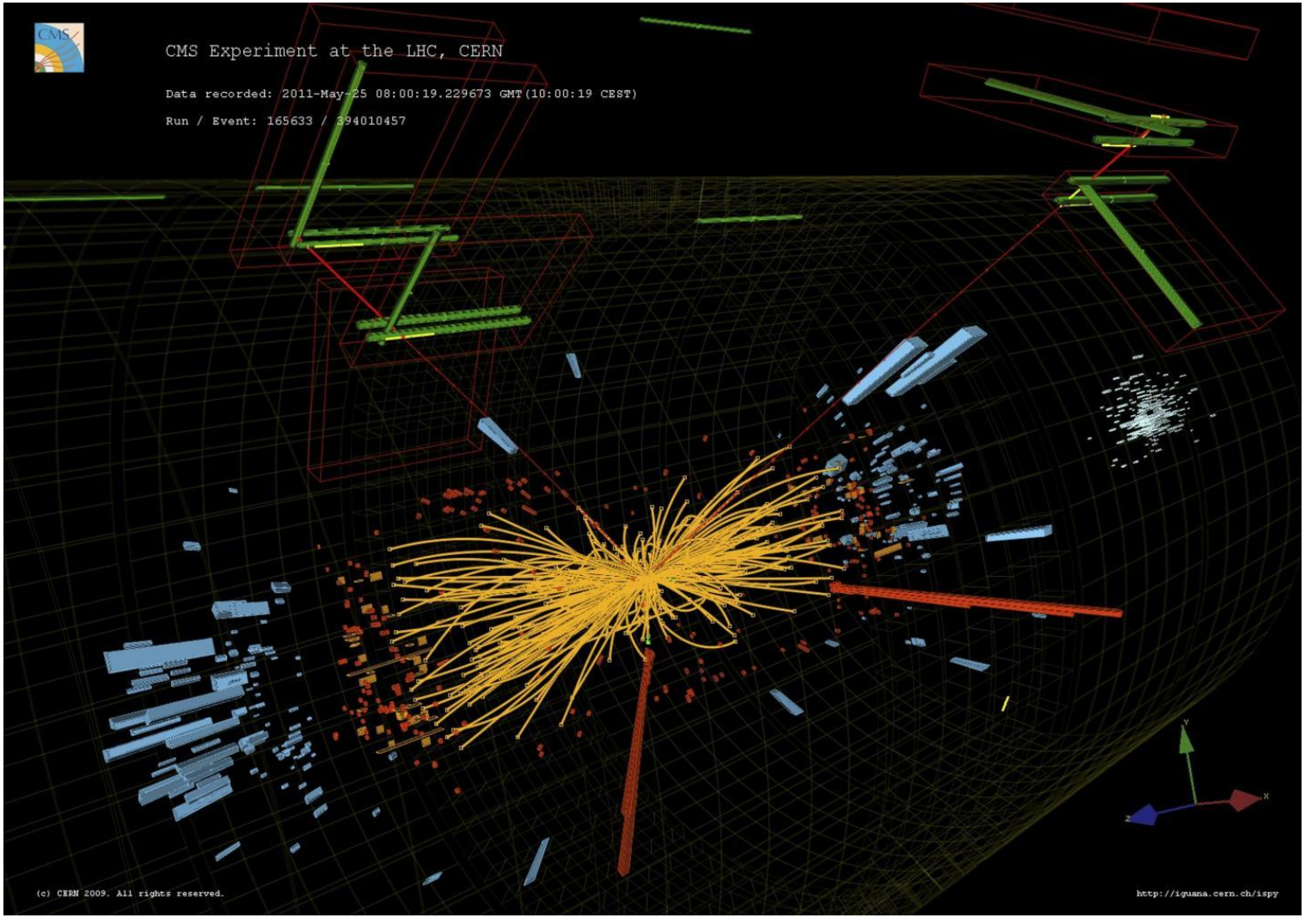
- Do que o mundo é feito:
  - As partículas e suas interações
- Um pouco de história:
  - Descobertas do último século

Os Aceleradores e as Experiências do CERN

- **Explorando o mundo subatômico:**
  - **Aceleradores e detectores**
- **O Large Hadron Collider – LHC**

Introdução à Análise de Dados

- **Exercício MasterClass:**
  - **Identificação e propriedades dos W, Z e Higgs**

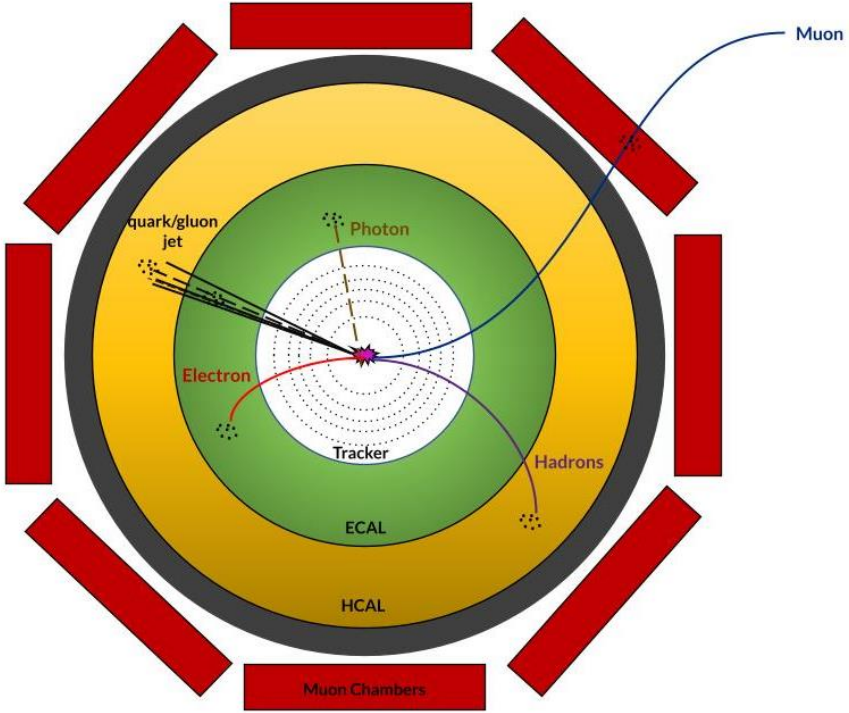

CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2011-May-25 08:00:19.229673 GMT(10:00:19 CEST)
Run / Event: 165633 / 394010457
(c) CERN 2009. All rights reserved.
http://iguana.cern.ch/ispy

Identificação e medida das propriedades dos bósons W, Z e Higgs

INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE DADOS

Detectores modernos

- **Identificar** e **medir** as propriedades das partículas com precisão
- Detectores cilíndricos e em várias camadas
- Detecção de traços (*tracking*): deve conter a menor quantidade possível de material interno



Lembrando…

- Quais são as Partículas Elementares?
- Quais partículas são detectadas no CMS?

Partículas Elementares e Modelo Padrão

Léptons

Cada família é composta por um lépton carregado e por um neutrino, o qual interage apenas fracamente. Os **elétrons (e)** são estáveis e compõem a eletrosfera dos átomos, sendo os responsáveis pelas ligações químicas. O **múon (μ)** e o **tau (τ)** possuem características similares às do elétron, mas são instáveis e muito mais pesados, decaindo em partículas mais leves. Os **neutrinos (ν)** são extremamente leves, sendo produzidos em decaimentos nucleares e na fusão nuclear que ocorre no Sol.

O Modelo Padrão das interações forte, fraca e eletromagnética é a teoria que melhor descreve como as partículas se comportam sob as forças fundamentais da natureza. Esse modelo é a conquista de mais de um século de testes de diferentes propostas teóricas e vários experimentos na área de Física de Altas Energias. O Modelo Padrão tem apresentado excelentes resultados na descrição das partículas subatômicas e suas interações.

ν_e neutrino do elétron	ν_μ neutrino do múon	ν_τ neutrino do tau
e elétron	μ múon	τ tau

Bóson de Higgs

H bóson H

A existência do bóson de Higgs foi sugerida em meados da década de 1960 como uma proposta teórica para explicar o surgimento da massa das partículas elementares. Essa proposta só pôde ser confirmada quase 50 anos depois quando, em 2012, os experimentos CMS e Atlas do CERN obtiveram evidências claras de sua existência, completando o Modelo Padrão.

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom

Bósons de Gauge

W bóson W	Z bóson Z
γ fóton	g glúon

São responsáveis pela intermediação das interações fundamentais da Natureza. As partículas sentem cada uma das interações forte, eletromagnética e fraca através da troca constante dessas partículas. A interação gravitacional não é relevante no mundo subatômico: ela é uma centena de milhão de milhão de milhão de milhão de milhão de milhão (10^{-38}) de vezes mais fraca que as demais interações fundamentais.

Quarks

Quarks são partículas que interagem por meio das interações eletromagnética, fraca e forte. Possuem carga elétrica fracionária, além das "cargas de cor" associadas à interação forte. Eles formam os hádrons (três quarks ou um par quark-antiquark) e permanecem confinados, não sendo observados em estado livre. Os quarks da primeira família, **up (u)** e **down (d)**, formam os **prótons (uud)** e **nêutrons (udd)**.

Interações Fortes (g)

O **glúon (g)** é a partícula que faz a intermediação da interação forte e é trocado entre os quarks. A interação forte é 100 vezes mais intensa que a interação eletromagnética e seu alcance não vai além do tamanho do próton. É responsável por manter os quarks ligados, formando os hádrons, e seu efeito residual de longa distância mantém prótons e nêutrons unidos no núcleo atômico.

Interações Eletromagnéticas (γ)

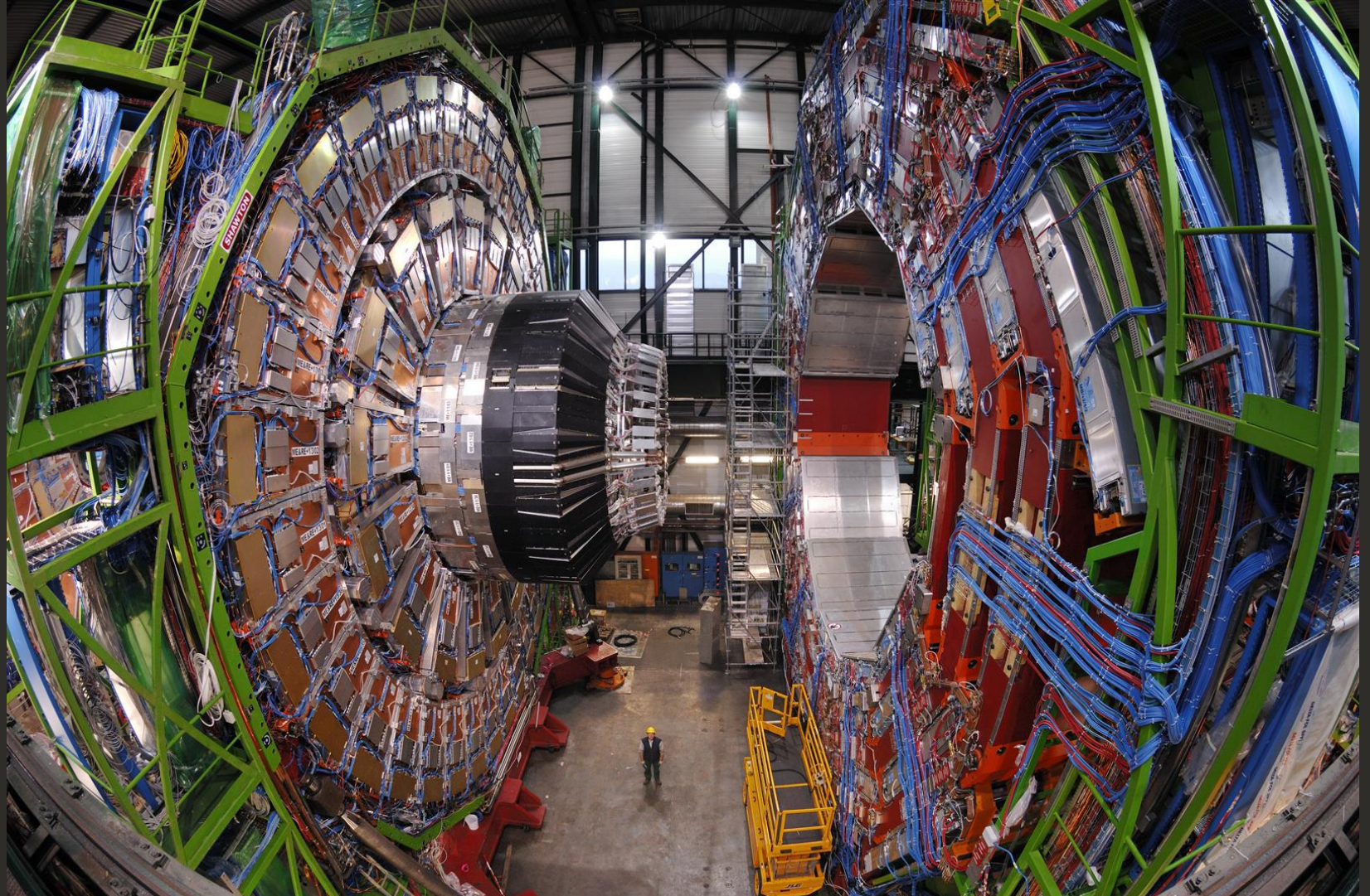
O **fóton (γ)** é o quantum do campo eletromagnético. Partícula sem massa e sem carga, é responsável pela interação entre as partículas eletricamente carregadas. Todo radiação eletromagnética, desde as ondas de rádio, passando pela luz visível, até os raios ultravioleta e gama, é constituída por fótons de diferentes energias.

Interações Fracas (W e Z)

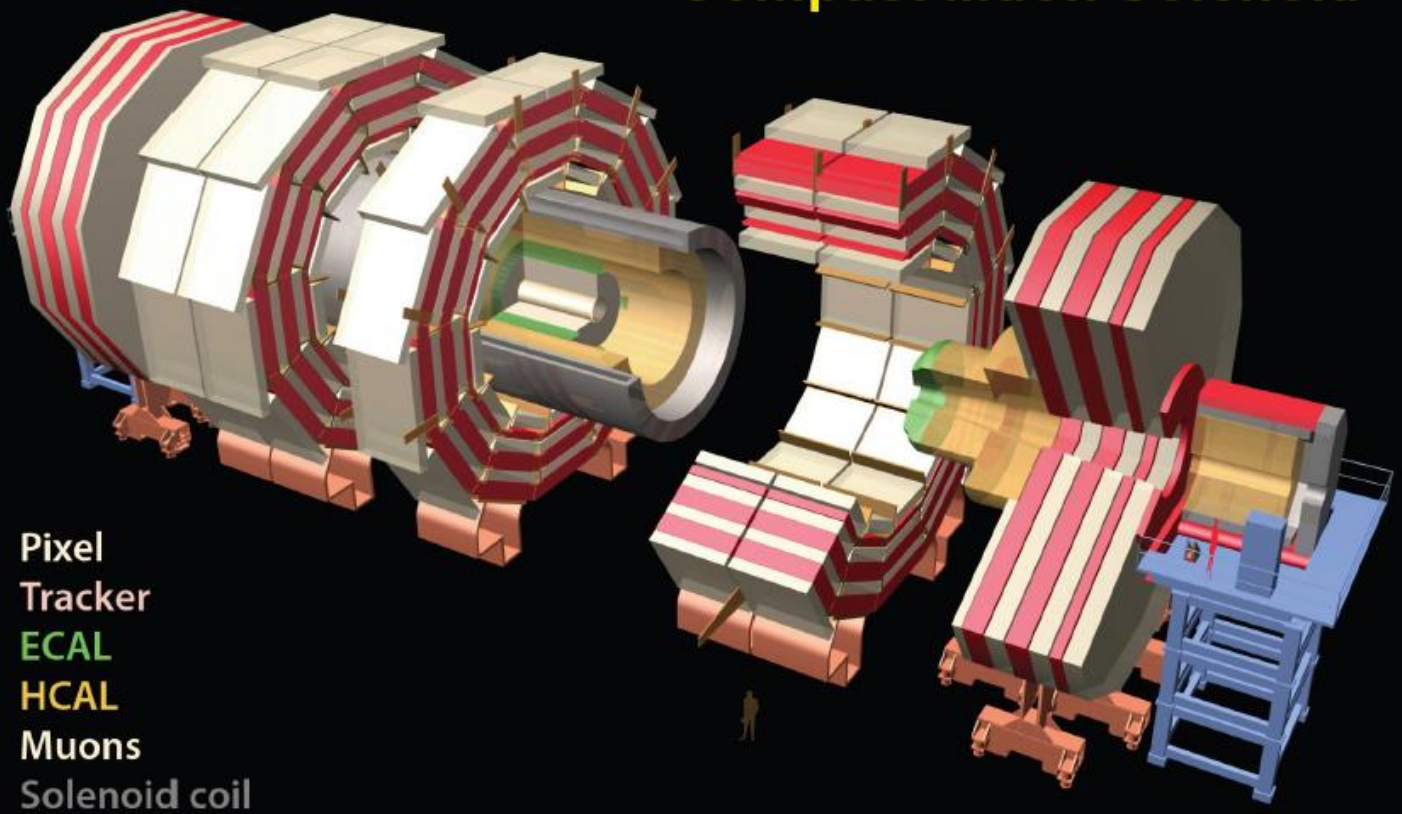
A interação fraca é intermediada pelos bósons W^+, W^- e Z^0. Ela alcança distâncias mil vezes menores que o núcleo atômico, sendo 10.000 vezes mais fraca que a interação eletromagnética. A interação fraca é responsável pelo decaimento beta no qual um nêutron se transforma em um próton, emitindo um elétron e seu antineutrino. Desempenha importante papel na geração da energia das estrelas.

Para obter mais informações sobre os conceitos apresentados neste cartaz, acesse:
www.sprace.org.br

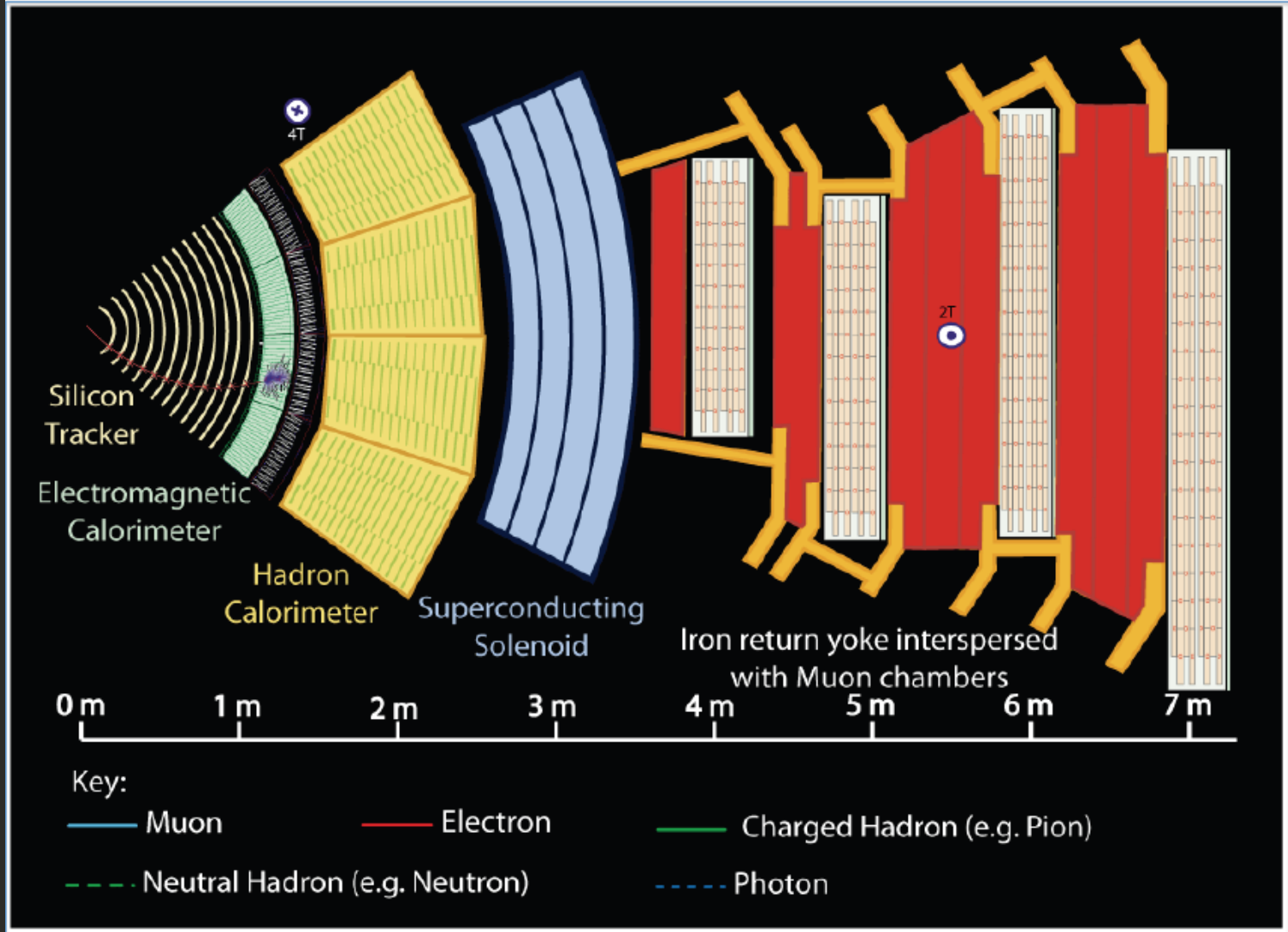
Realização: SPRACE
Apoio: FAPESP

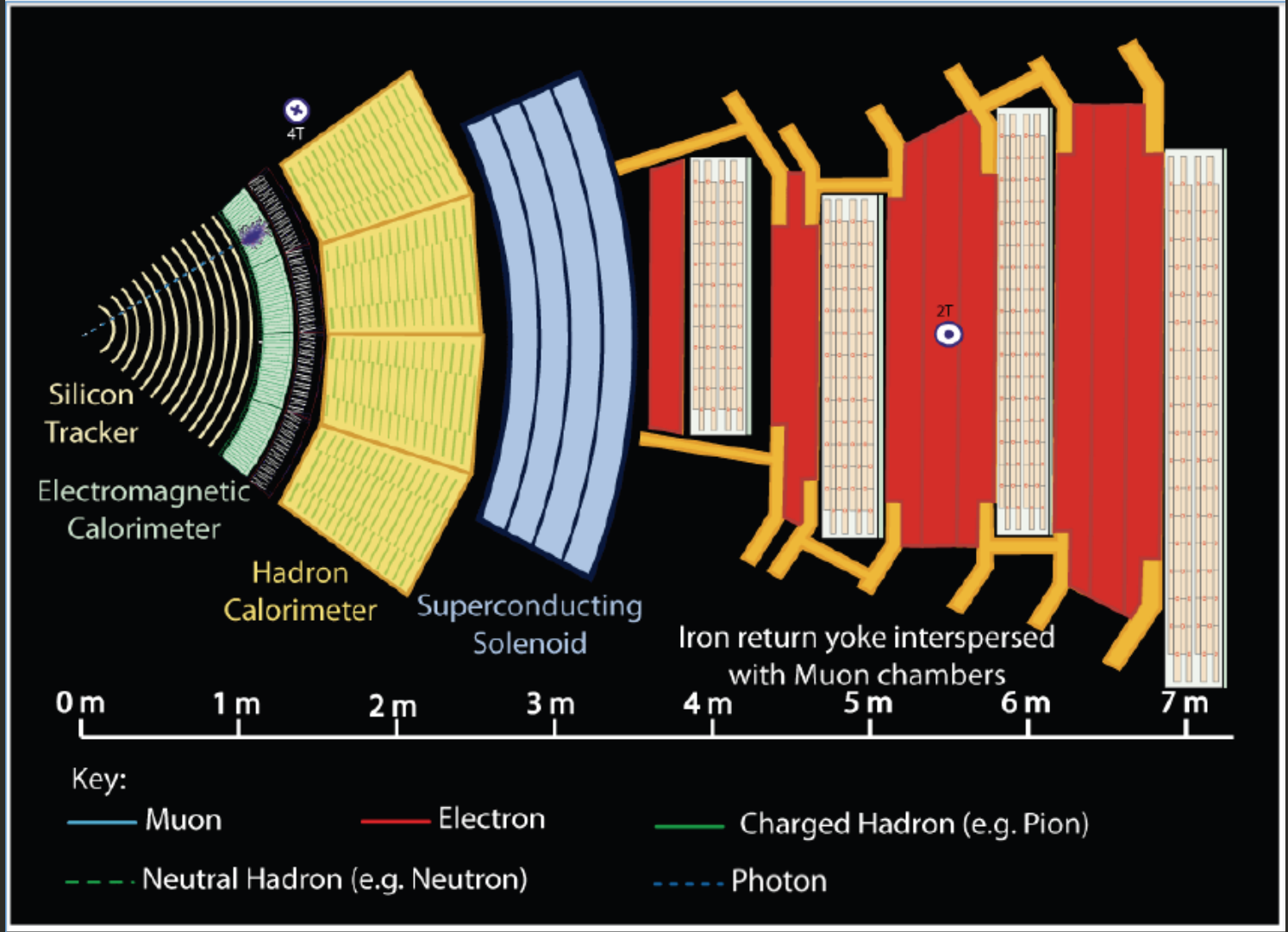

GRANITOR

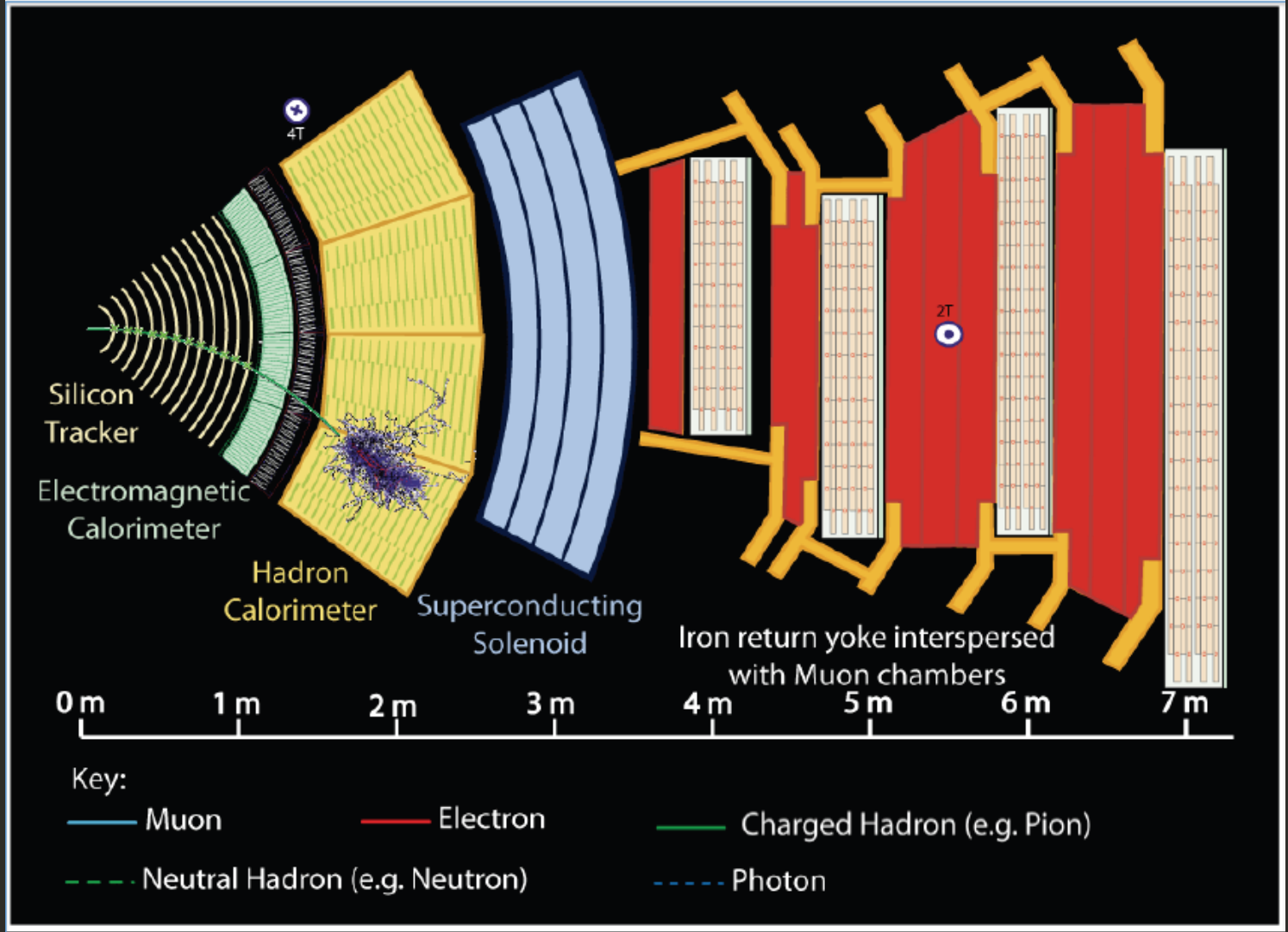
Compact Muon Solenoid

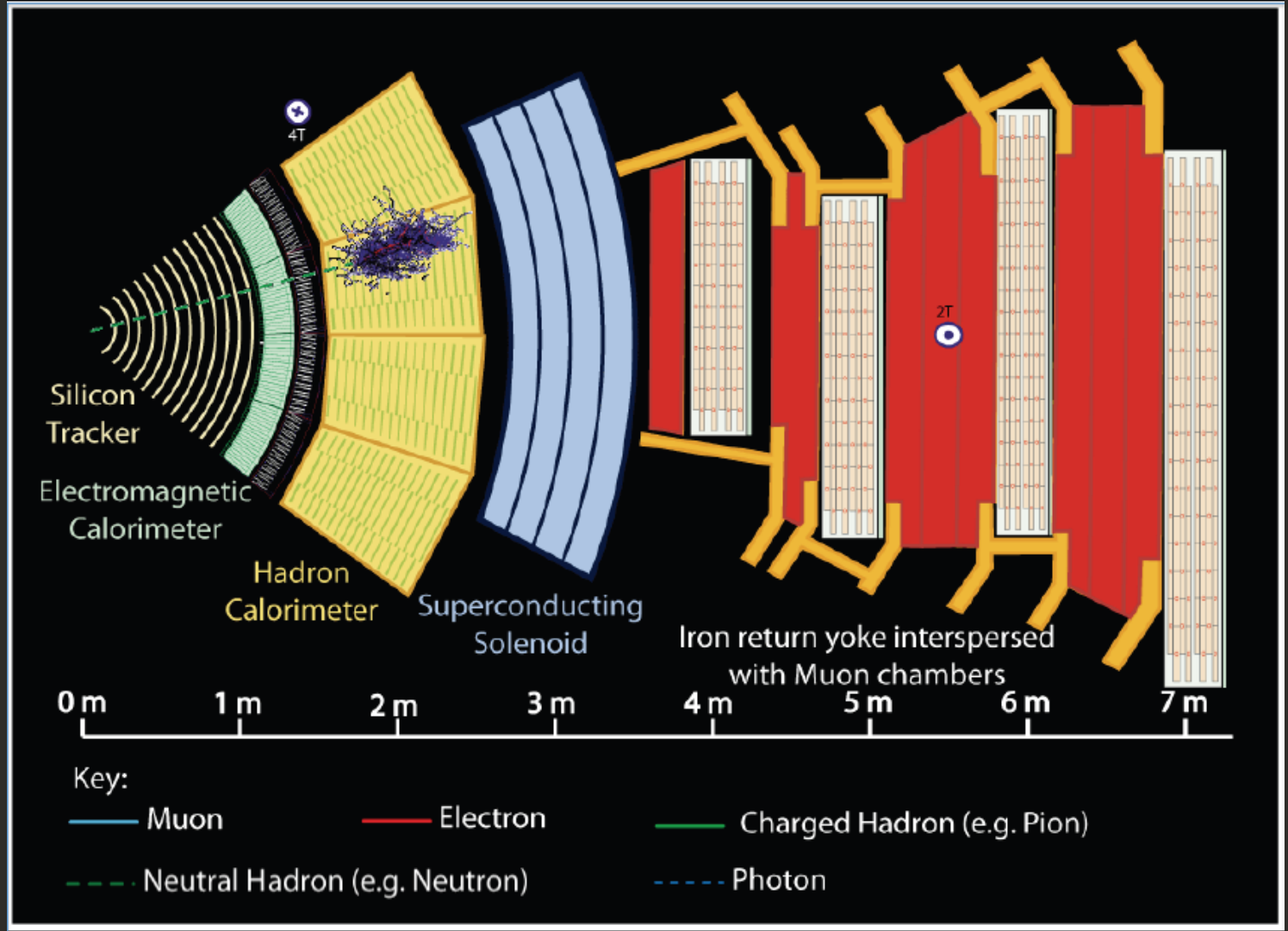


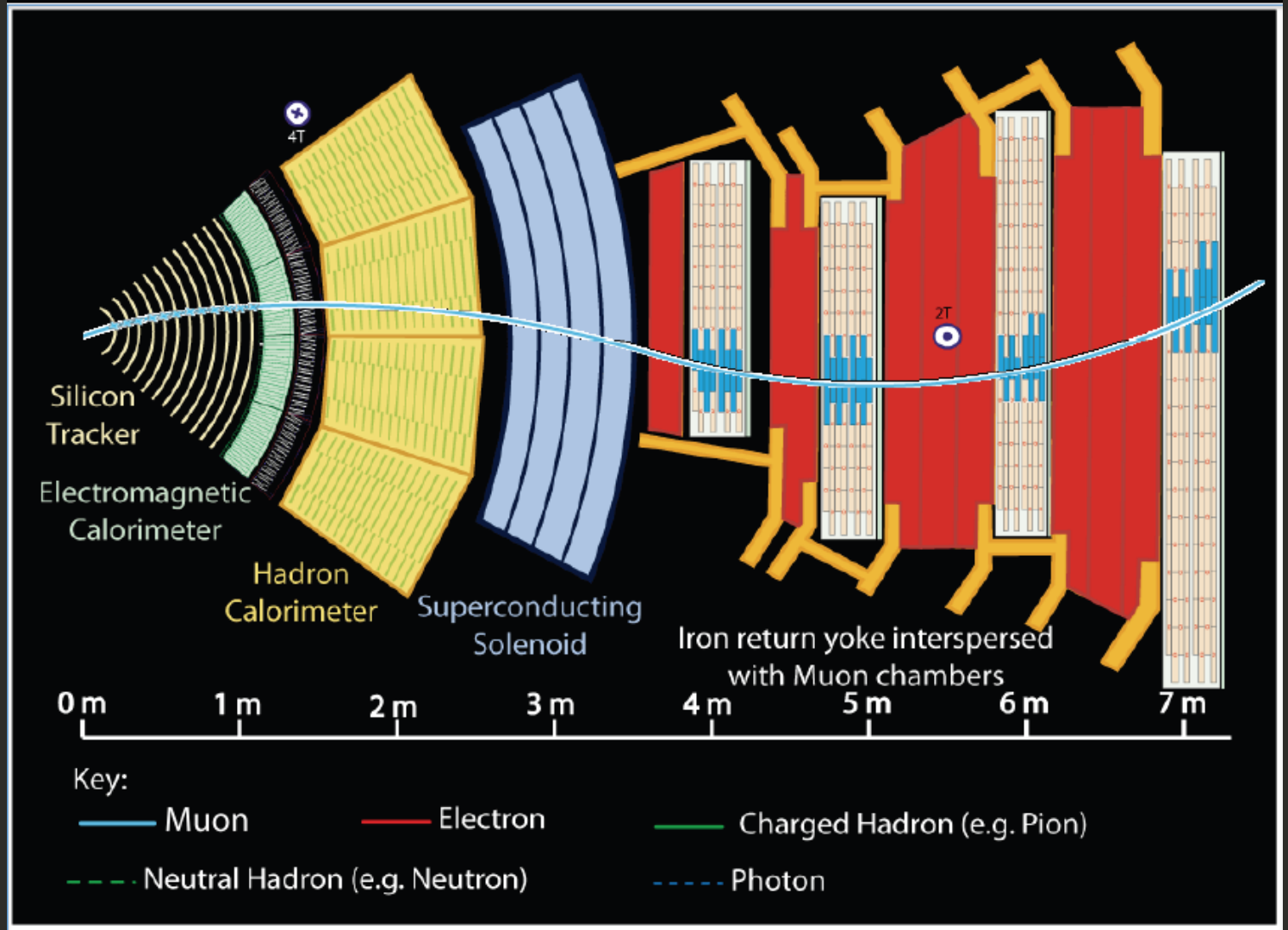
| Peso: 16.000 ton. | Diâmetro: 15 m | Comprimento: 21,6 m | Campo Magnético: 4 Tesla |


4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon

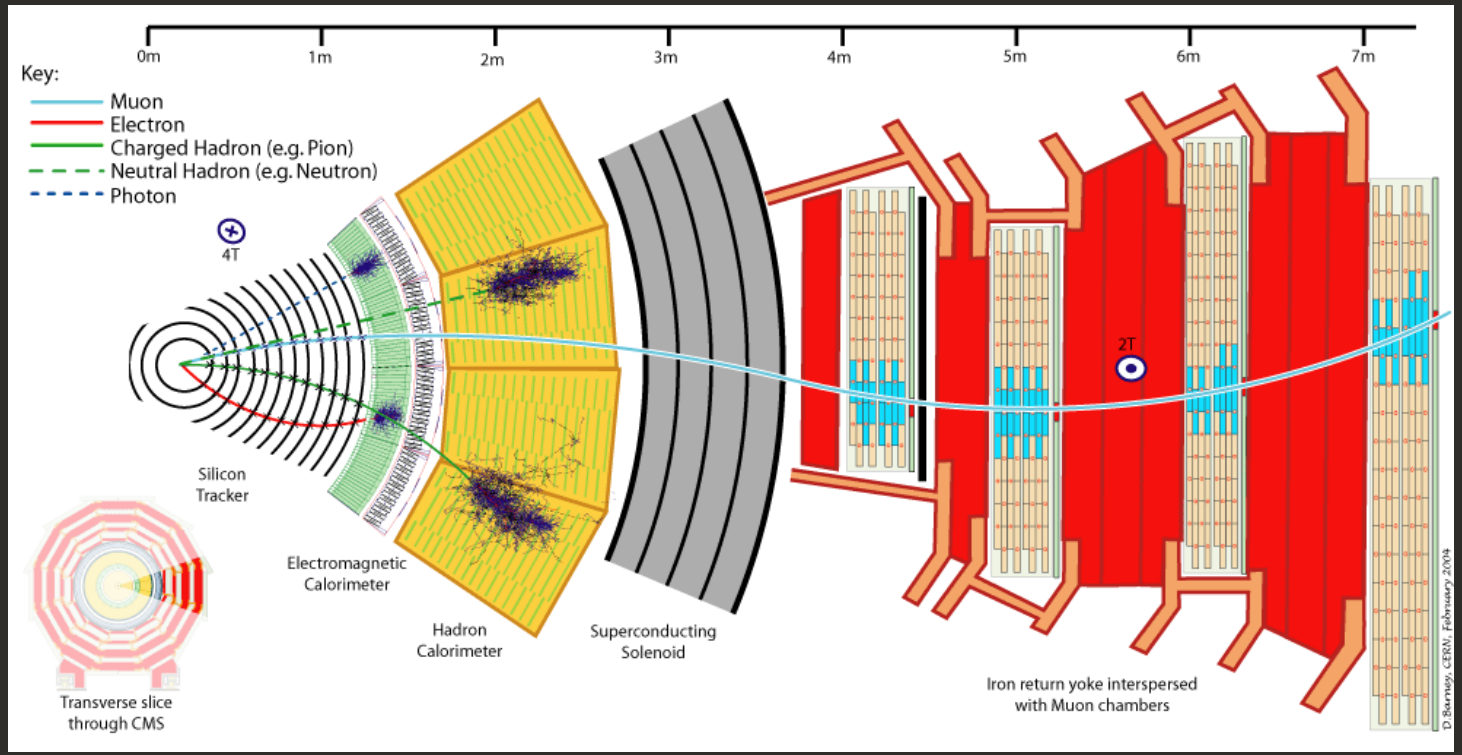

4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon


4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon


4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon

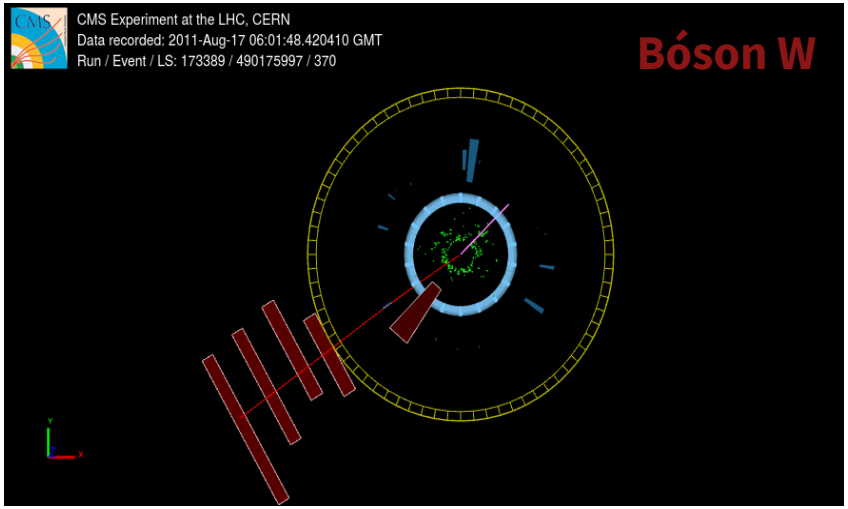

4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon

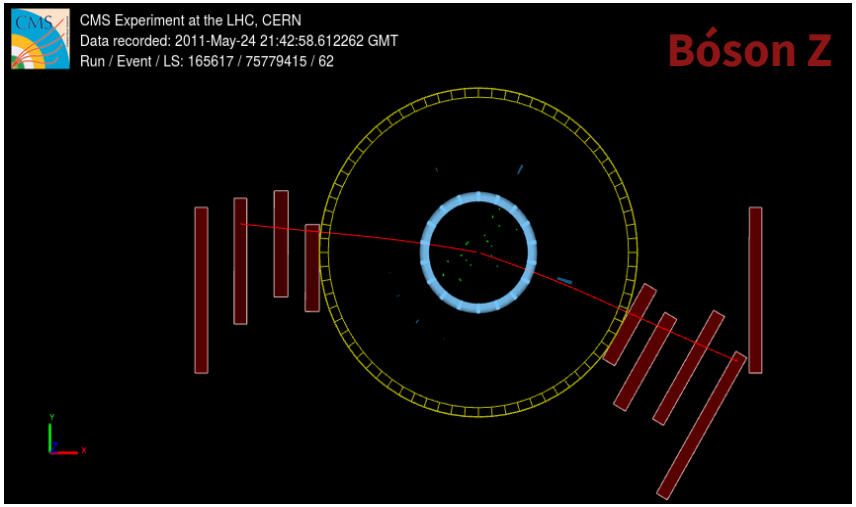
Detecção no CMS



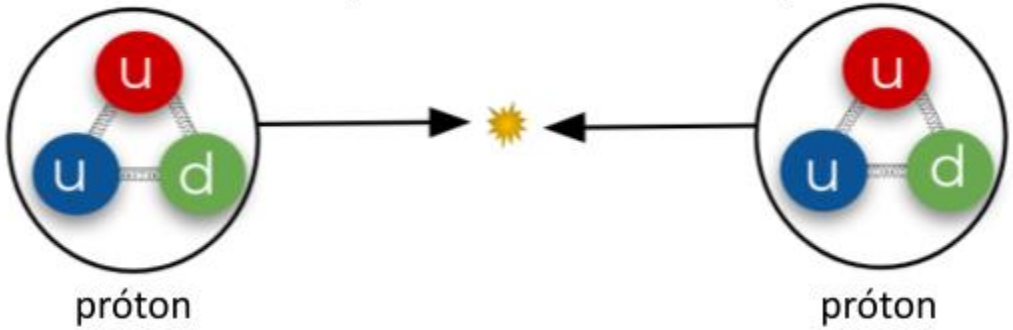
Identificando os bósons **W** e **Z**

- Mediadores da Força Fraca
- Decaem imediatamente

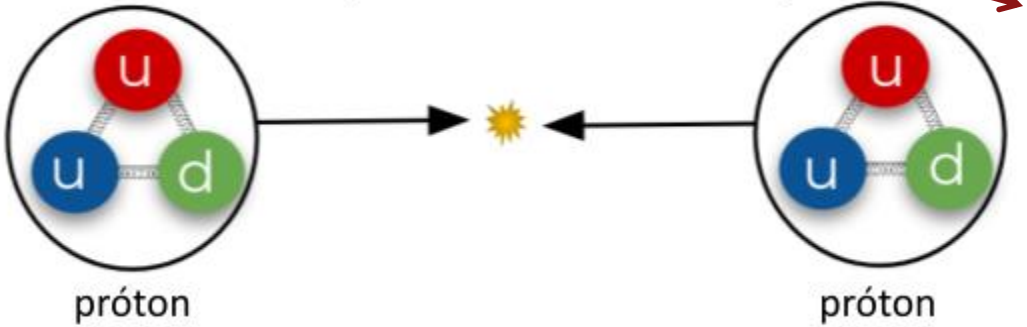




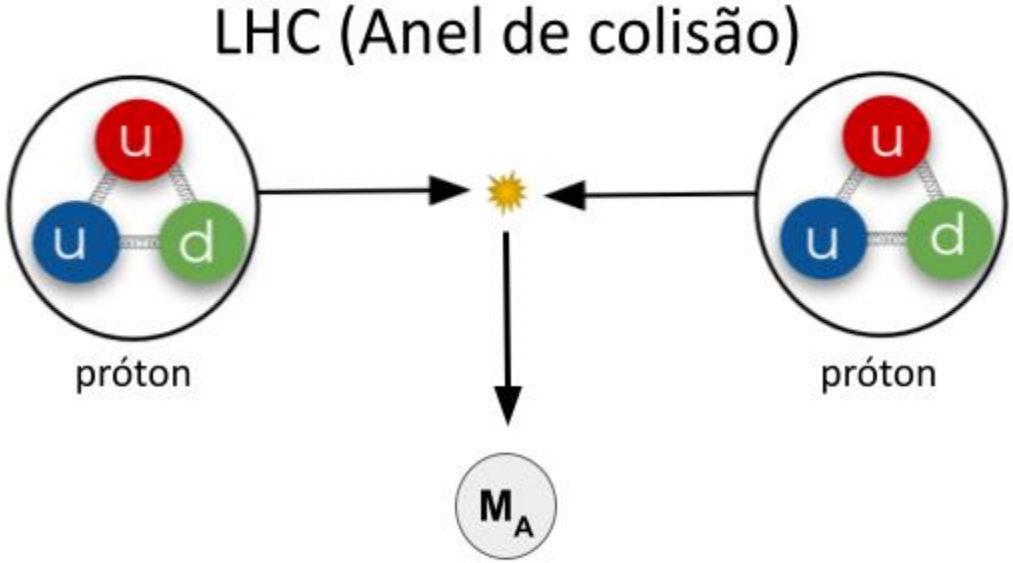
LHC (Anel de colisão)



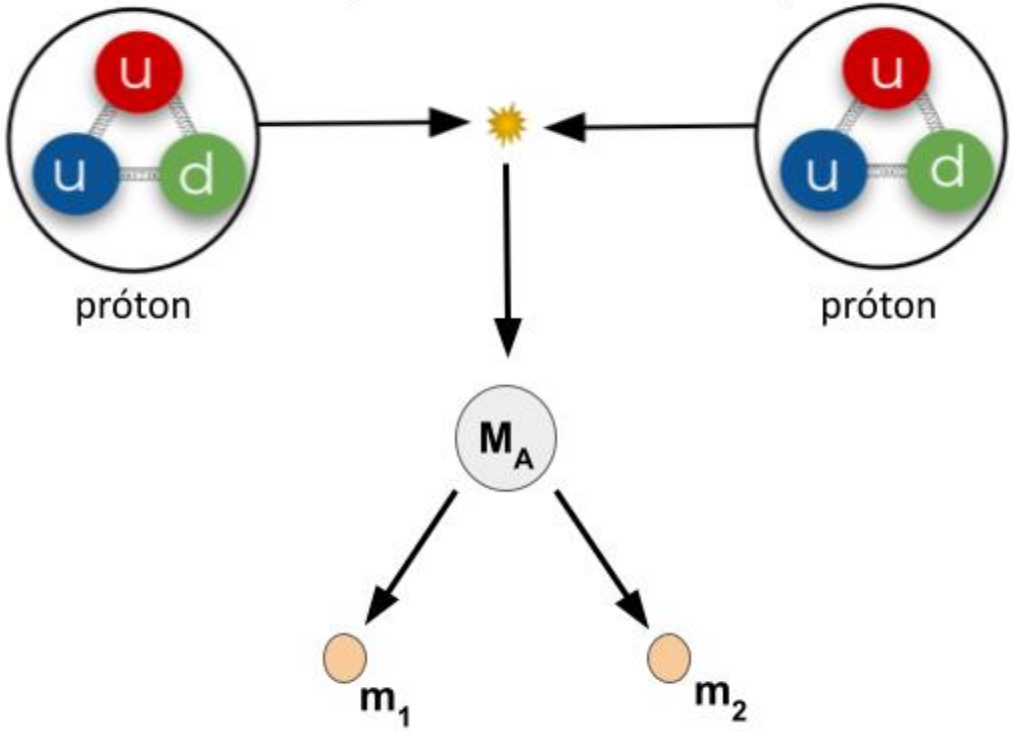
LHC (Anel de colisão)

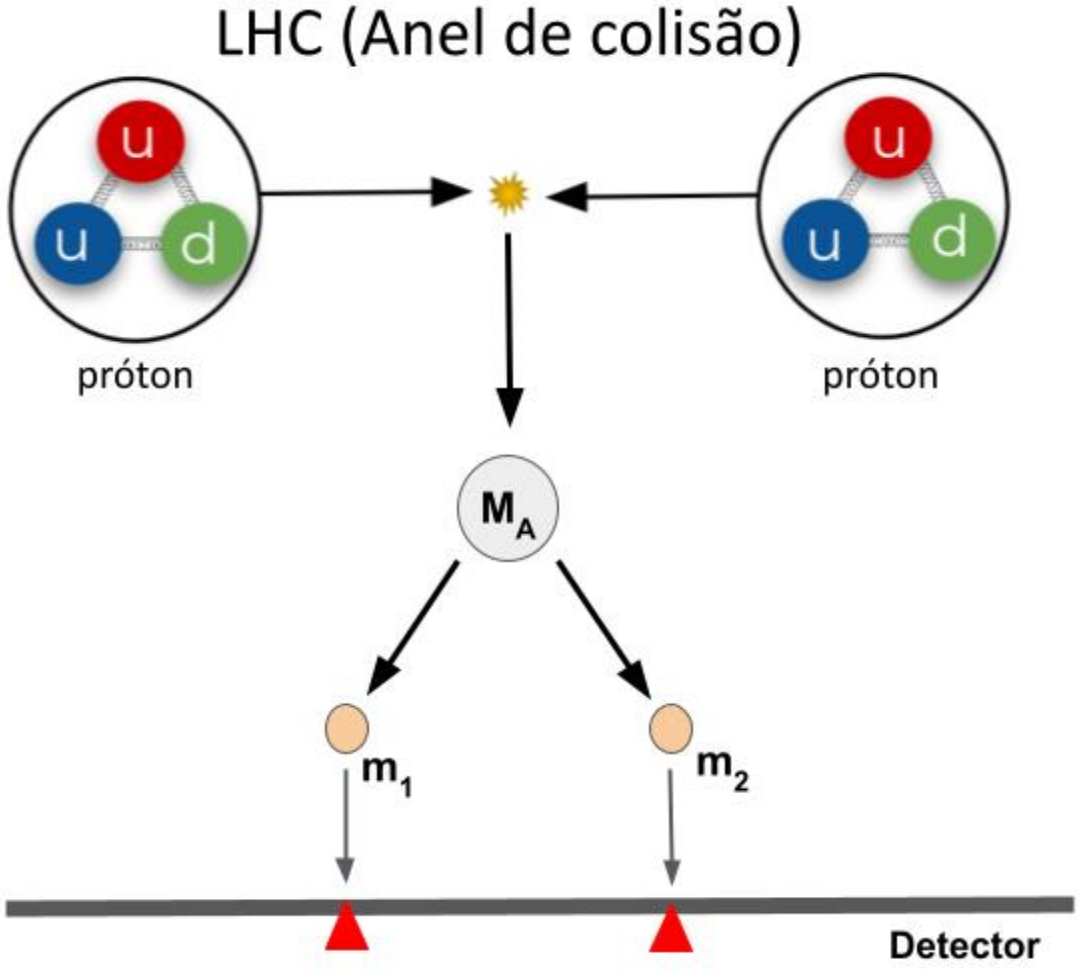


próton próton

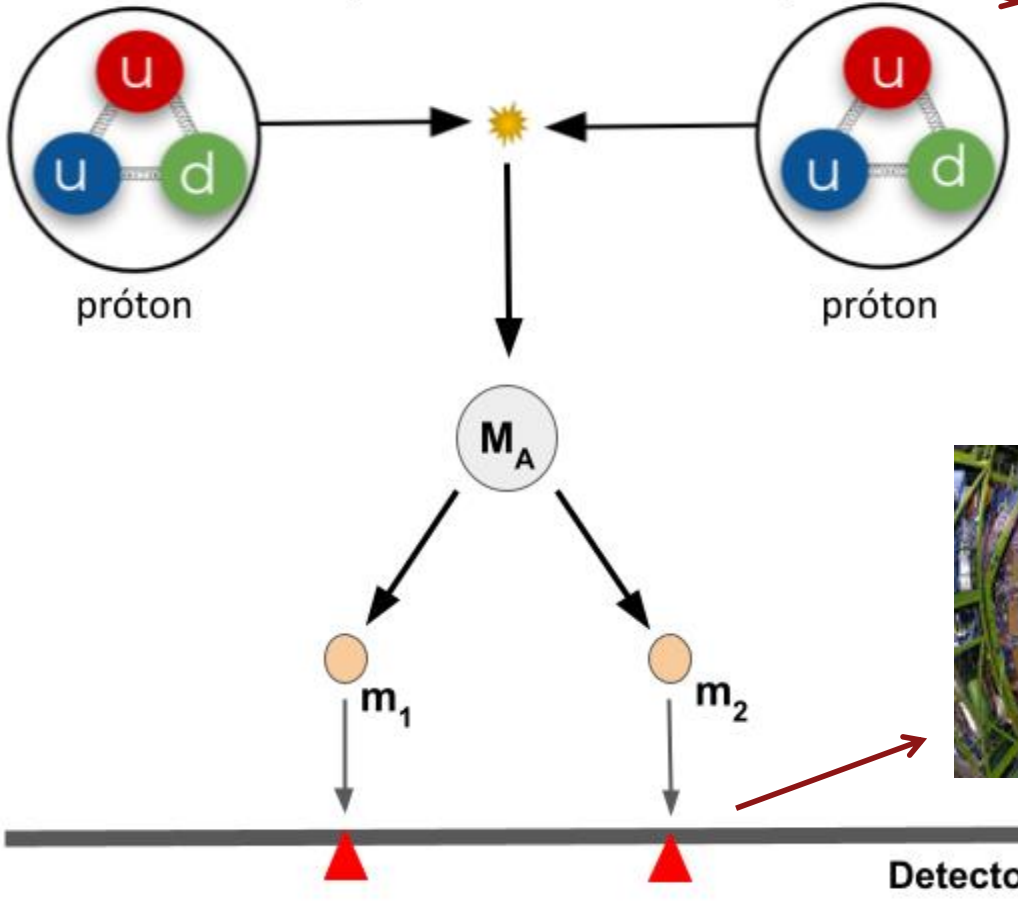

LHC (Anel de colisão)
u
u
d
próton
u
u
d
próton
M_A

LHC (Anel de colisão)



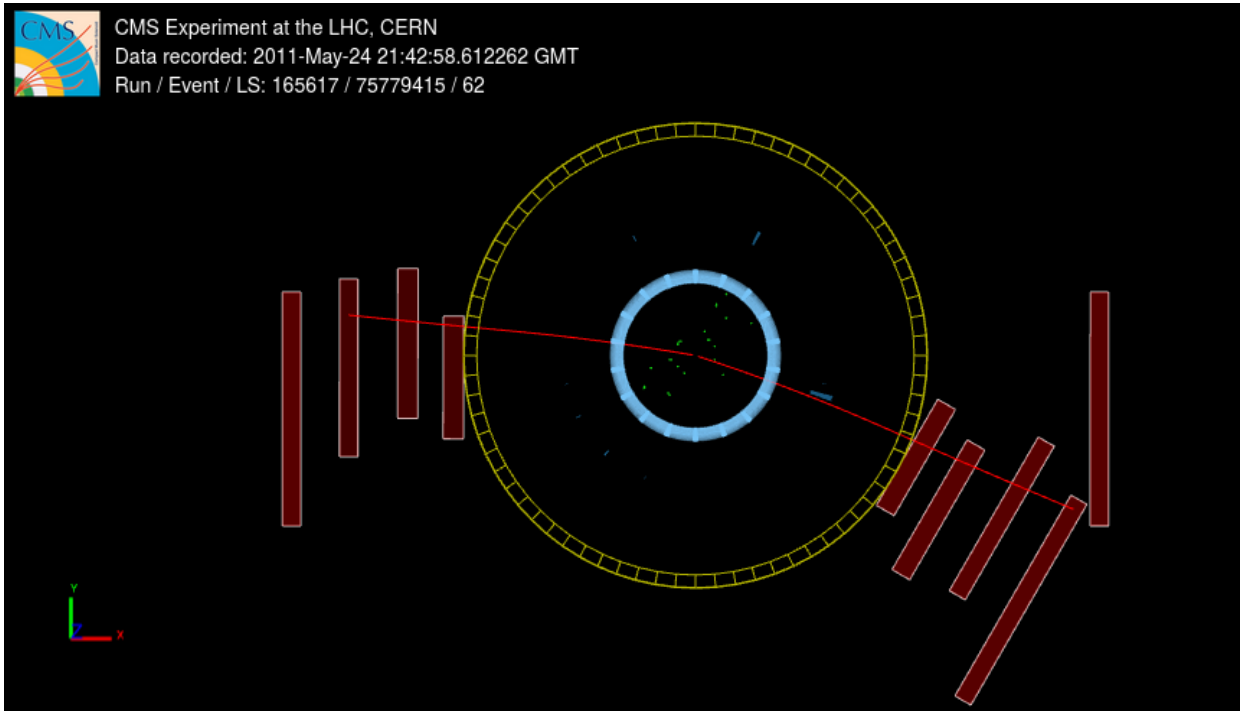

LHC (Anel de colisão)
u
u
d
próton
u
u
d
próton
M_A
m_1
m_2
Detector

LHC (Anel de colisão)



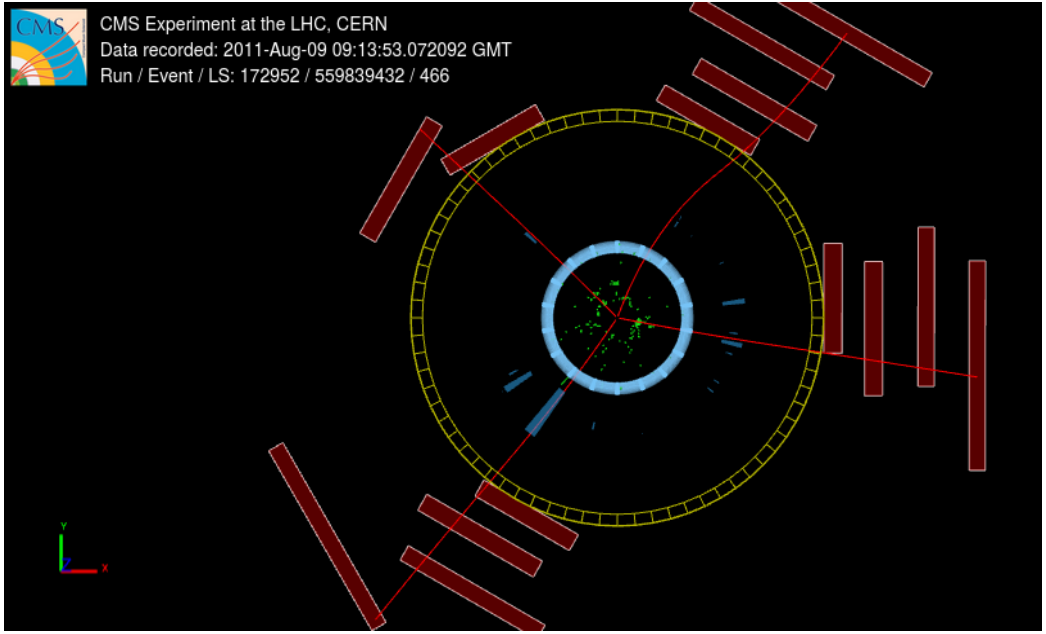
Identificando as partículas

$\chi^0 \longrightarrow \mu^+ \mu^-$



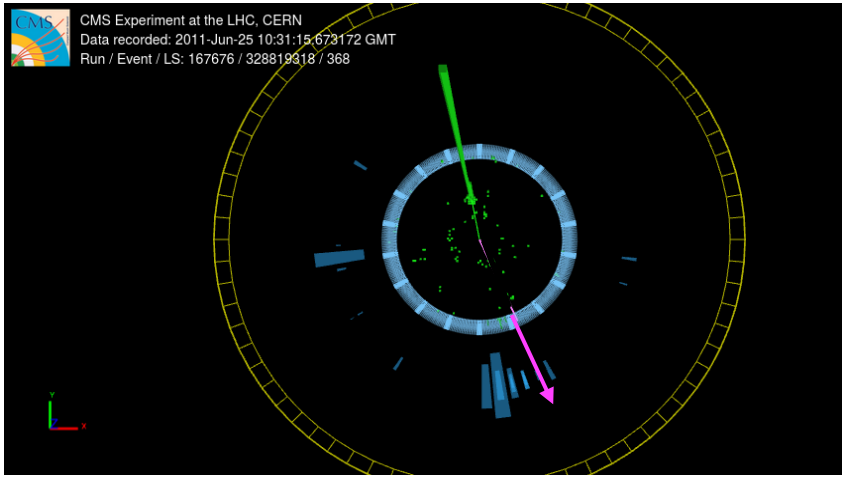
Identificando o Bóson de Higgs (**H**)

- Responsável por gerar massa a outras partículas

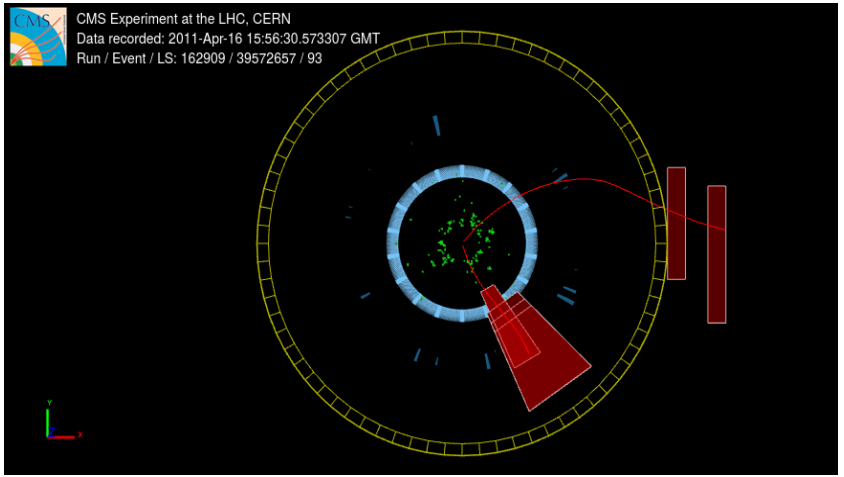


É possível diferenciar elétrons de múons?

- Elétrons depositam toda a energia no calorímetro eletromagnético



- Múons atravessam o sistema de calorímetros e deixam traços no sistema de múons:

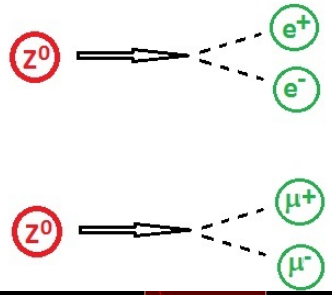


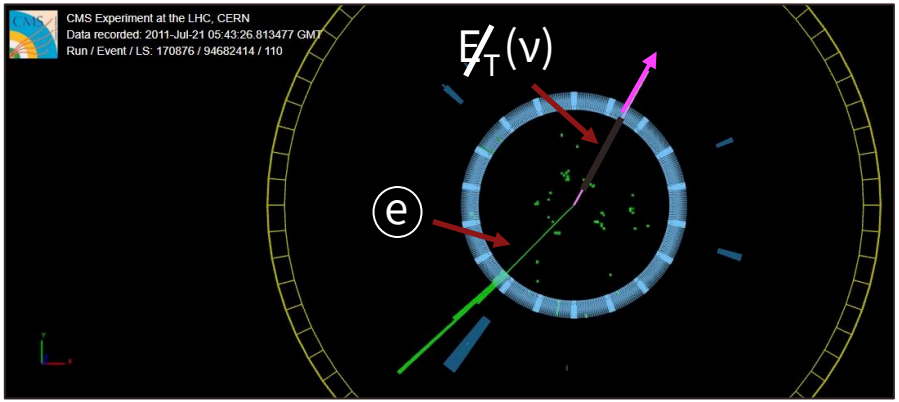
Ao final dos exercícios vamos calcular a **razão** de **números de múons** e **números de elétrons**. O que será que vamos encontrar?

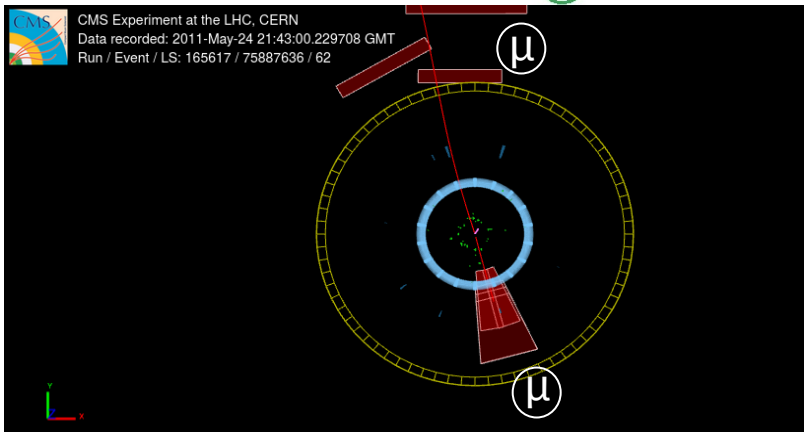
É possível separar W's de Z's?

- Decaimento leptônico do W:

- Decaimento leptônico do Z:

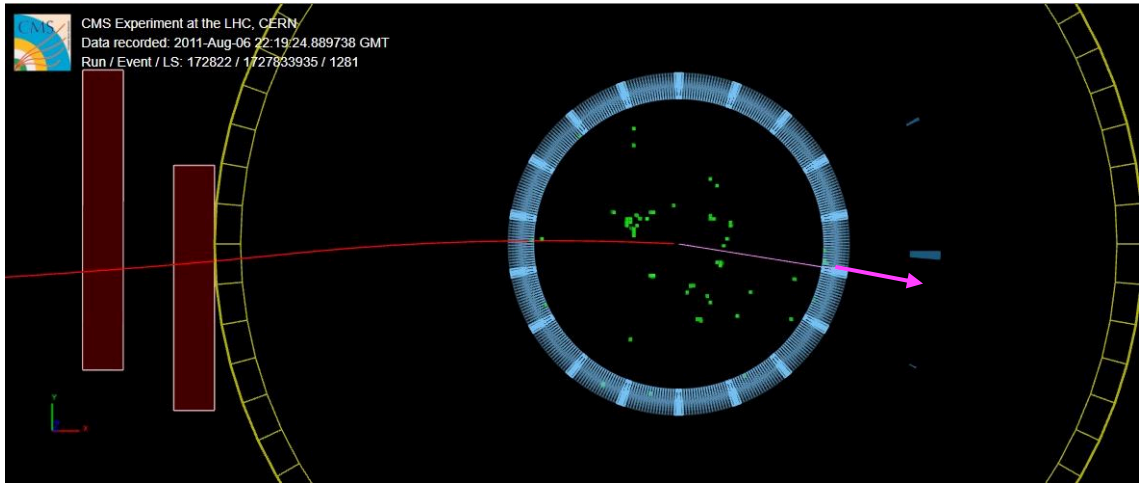






É possível diferenciar a carga do bóson W?

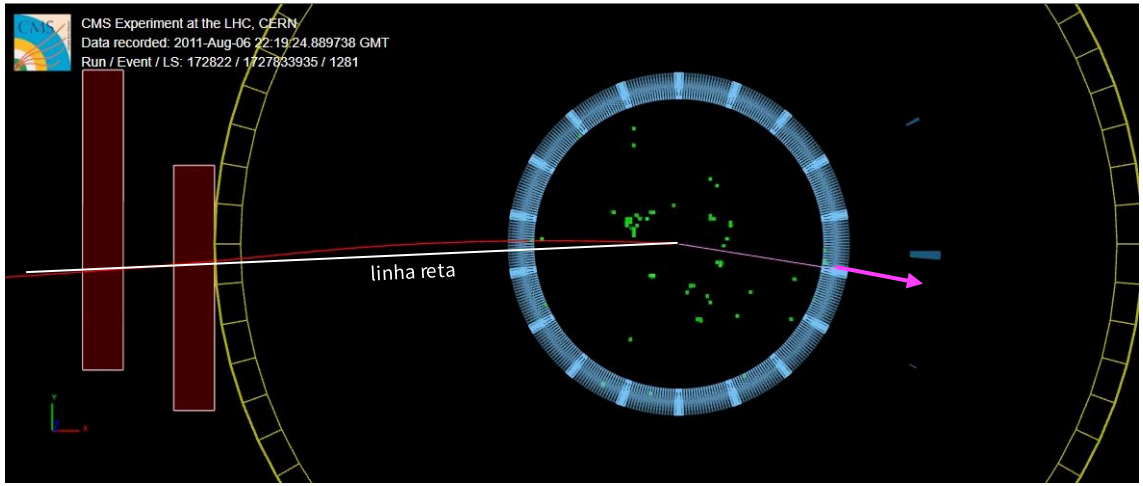
- Campo magnético na direção do eixo z
- Partículas **positivas** curvam no **sentido horário**
- Partículas **negativas** curvam no **sentido anti-horário**



→ Após os exercícios, vamos calcular a **razão** de **números de W^+** e **números de W^-**. O que será que vamos encontrar?

É possível diferenciar a carga do bóson W?

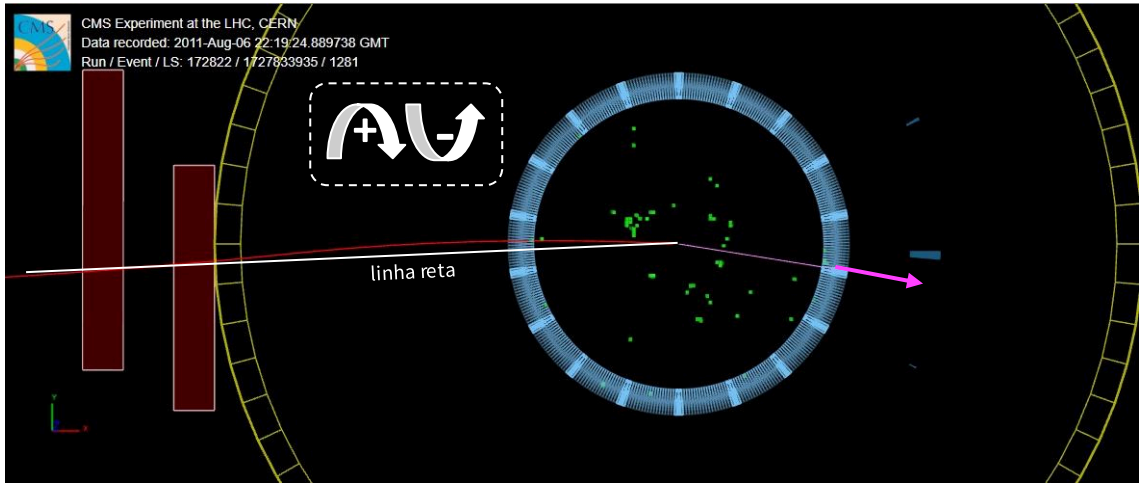
- Campo magnético na direção do eixo z
- Partículas **positivas** curvam no **sentido horário**
- Partículas **negativas** curvam no **sentido anti-horário**



→ Após os exercícios, vamos calcular a **razão** de **números de W^+** e **números de W^-**. O que será que vamos encontrar?

É possível diferenciar a carga do bóson W?

- Campo magnético na direção do eixo z
- Partículas **positivas** curvam no **sentido horário**
- Partículas **negativas** curvam no **sentido anti-horário**



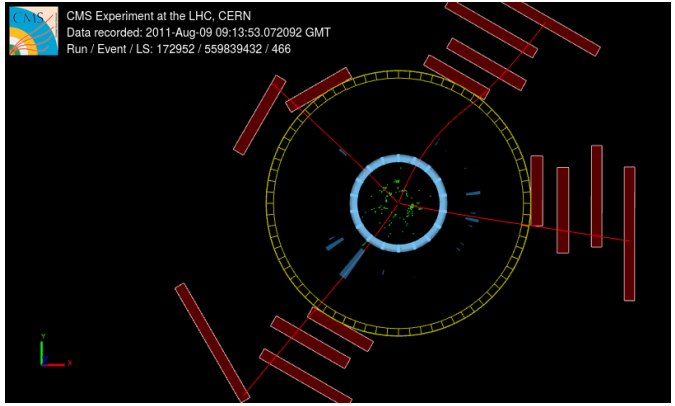
→ Após os exercícios, vamos calcular a **razão** de **números de W^+** e **números de W^-**. O que será que vamos encontrar?

É possível identificar o Bóson de Higgs?

- Modos de deicamento:
  - bb
  - 2 Z's → 4 léptons
  - 2 fótons

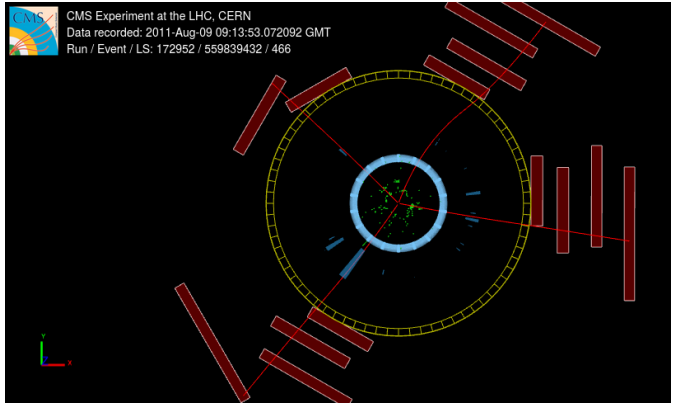
- 4 léptons:
  - 2 múons e 2 elétrons
  - 4 múons ou 4 elétrons

- Fótons:
  - São barrados no calorímetro eletromagnético
  - Não deixam traço



É possível identificar o Bóson de Higgs?

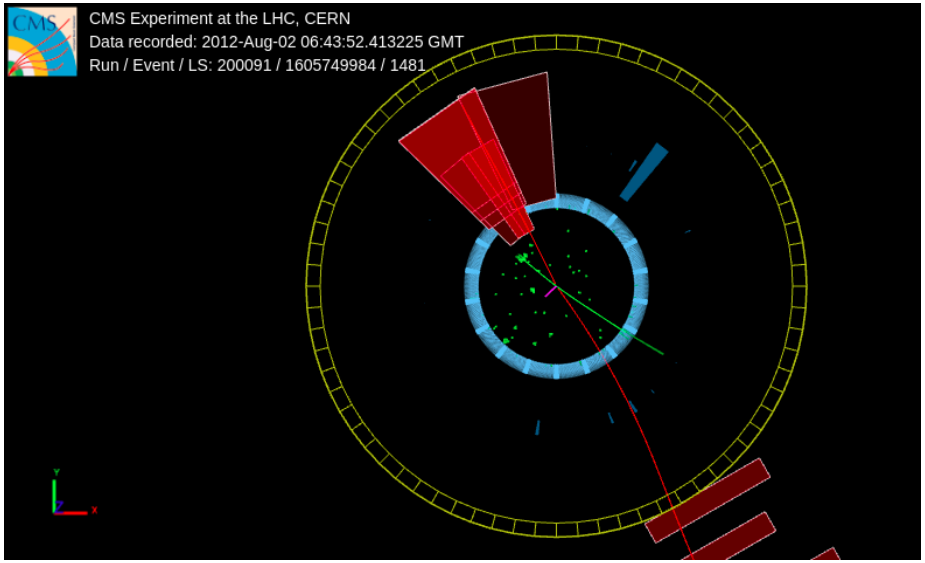
$H^0 \longrightarrow \mu^+\mu^- \quad \mu^+\mu^-$



$H^0 \longrightarrow e^+e^- \quad e^+e^-$

É possível identificar o Bóson de Higgs?

$H^0 \longrightarrow \mu^+\mu^- \; e^+e^-$



Pergunta:

Como sabemos que um par de muons veio de uma partícula que decaiu?

Massa invariante do bóson Z

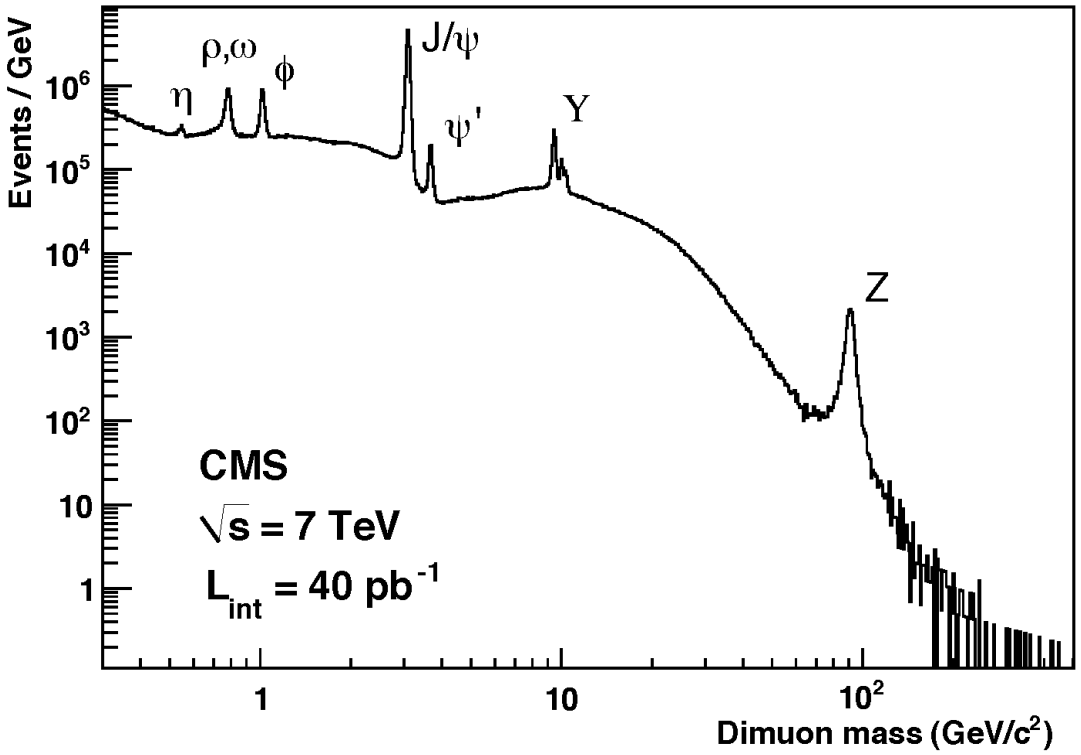
Massa Invariante:

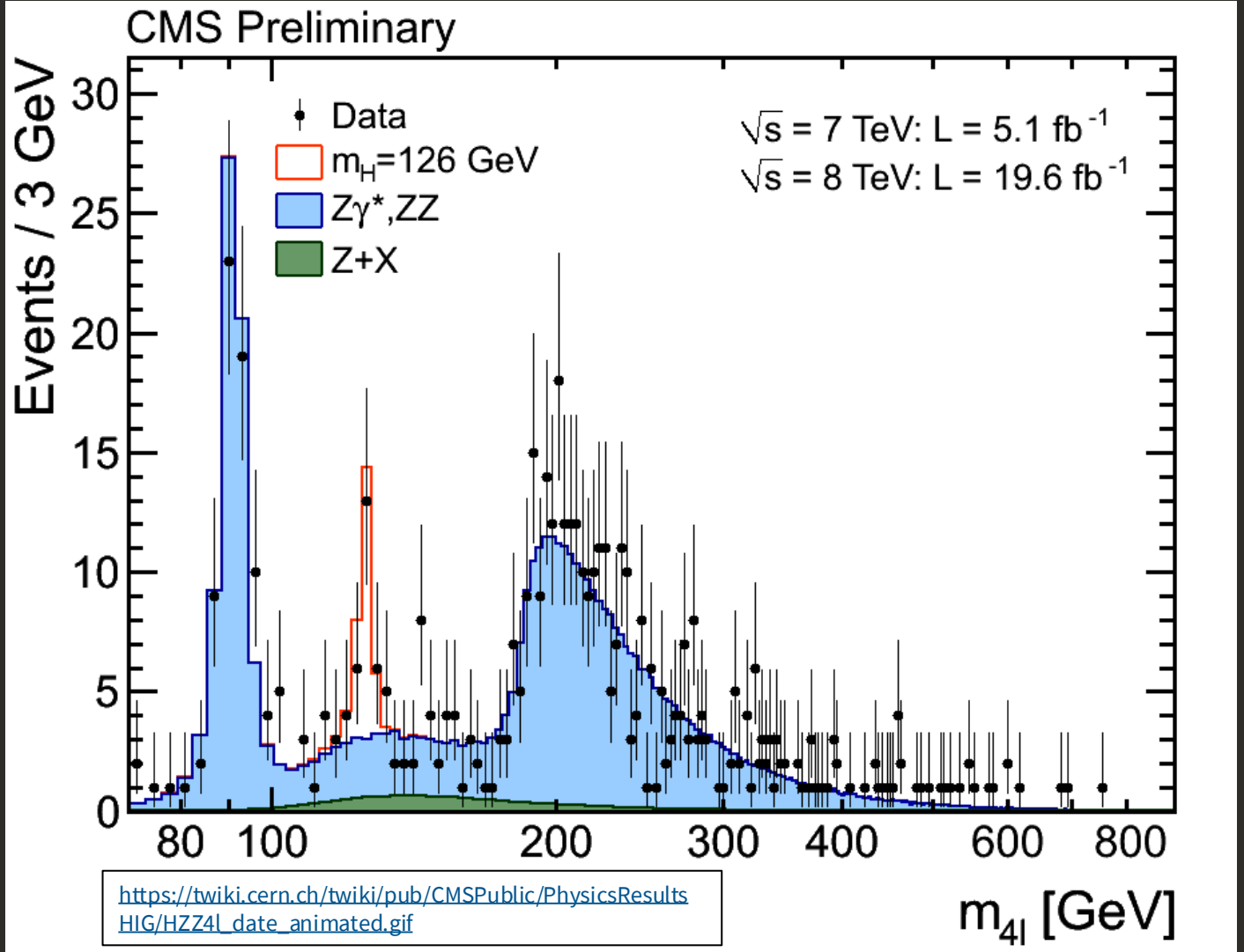
- Relação massa-energia

$$E_i = E_f$$
$$E = mc^2$$

- Partícula decai: energia final é a massa da partícula que decaiu

- Medindo a energia do par resultante, determinamos a **massa da partícula que decaiu**





https://twiki.cern.ch/twiki/pub/CMSPublic/PhysicsResultsHIG/HZZ4l_date_animated.gif

Mecânica do Exercício

Abrir evento de sua lista (conferir o número!)

Para cada evento, identifique o estado final e selecione um candidato (μμ, ee, 2μ2e, 4μ, 4e, μ, e)

- Para Higgs ou candidato Zoo, nenhum estado final é escolhido

Determine a partícula produzida (W ou Z)

- Para o W determine a carga (W^+ ou W^-). Se não conseguir, escolha W
- Para uma partícula neutra (*) (como um Z), selecione NP (Neutral Particle)
  - Encontre sua massa no Display de Eventos e insira-a.
  - Preencha o histograma.

Complete os dados que descobriu na Planilha (spreadsheet) Google

ATENÇÃO: não preencha a planilha a partir da coluna "O"!!

Vá para o próximo evento!

(*) (decai em duas partículas carregadas com cargas opostas)

Resumindo:

Estado final (Final state):

- Eletron: **e**
- Muon: μ
- Neutrino: ν
  - e ν, μ ν
  - e e, μ μ
  - 4e, 4μ, 2e2μ

$W \rightarrow e\,\nu,\ W \rightarrow \mu\,\nu$

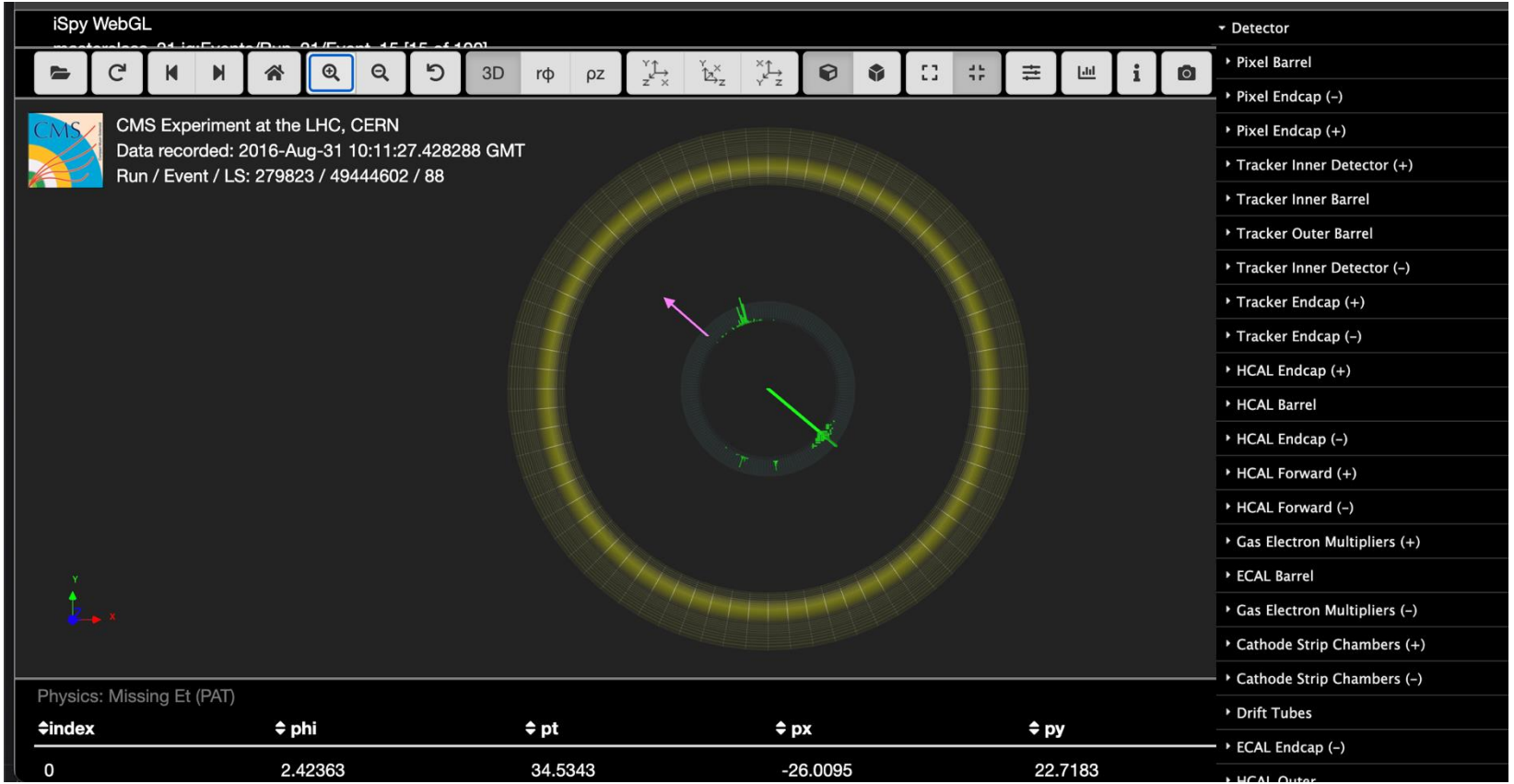
$Z \rightarrow ee,\ Z \rightarrow \mu\mu$

$H \rightarrow 4e,\ H \rightarrow 4\mu,$
$H \rightarrow 2e + 2\mu$

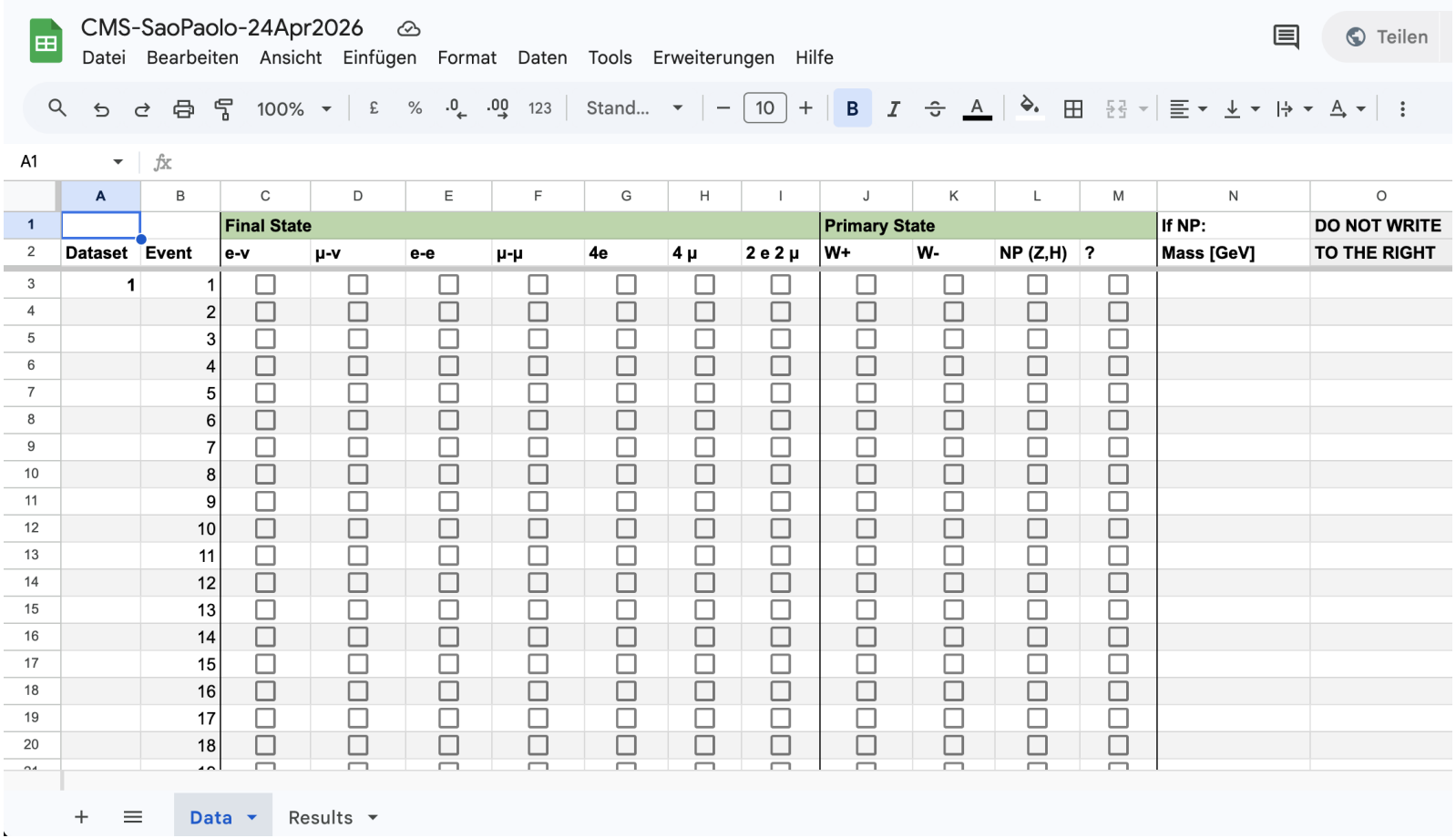
Estado primário (Primary state):

- Bóson W: W+, W-, W+-
- Partícula neutra (neutral particle):
  - Bóson Z (m ≈ 90 GeV)
  - Bóson de Higgs (m ≈ 125 GeV)
  - Alguma partícula nova (uhul!!!)

iSpy: Display de eventos (https://ispy-masterclass.web.cern.ch)



Planilha: preencher com os dados do evento



CMS-SaoPaolo-24Apr2026

Datei Bearbeiten Ansicht Einfügen Format Daten Tools Erweiterungen Hilfe

Teilen

100% £ % .0 .00 123 Stand... 10 B I

A1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1			Final State							Primary State				If NP:	DO NOT WRITE
2	Dataset	Event	e-v	μ-v	e-e	μ-μ	4e	4 μ	2 e 2 μ	W+	W-	NP (Z,H)	?	Mass [GeV]	TO THE RIGHT
3	1	1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
4		2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
5		3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
6		4	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
7		5	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
8		6	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
9		7	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
10		8	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
11		9	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
12		10	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
13		11	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
14		12	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
15		13	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
16		14	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
17		15	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
18		16	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
19		17	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
20		18	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		

Data Results

Backup