

Análise do espectro de massa invariante da produção de dois múons com os dados abertos de íons pesados do experimento CMS no LHC

Defesa de Monografia

Aluno: Thiago de Andrade Rangel Monteiro

Orientador: Patrícia Rebello Teles
Coorientadora: Eliza Melo da Costa

10 de janeiro de 2025



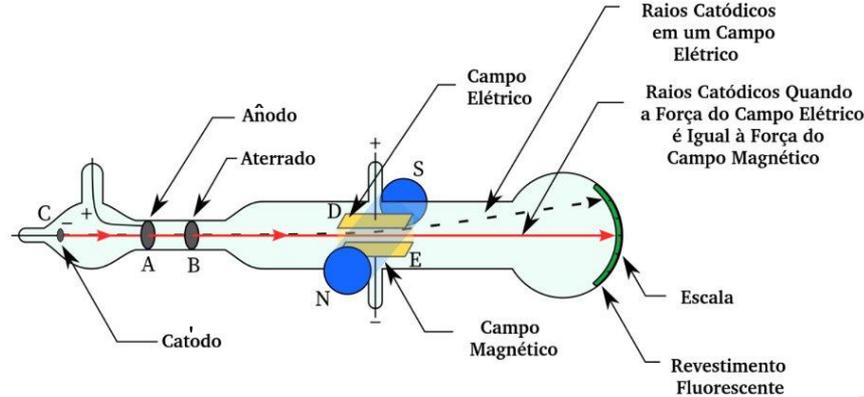
Sumário

- Introdução
 - Contexto histórico até a formulação do Modelo Padrão
 - Modelo Padrão da Física de Partículas
 - As *Standard Candles* do Modelo Padrão
 - O Méson J/ψ
- LHC e o experimento CMS
 - Complexo de aceleradores do CERN
 - Detector CMS e seus subdetectores
 - Trabalho com as RPCs durante o período como Summer Student
- Colisões de Íons pesados
 - Geometria da colisão dos íons
 - Evolução Temporal do QGP
 - Assinatura experimental do QGP
- Dados Abertos do CMS
- Resultados Obtidos
- Conclusão

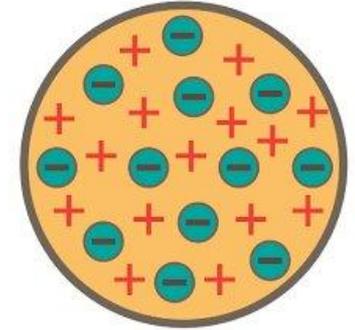
Contexto Histórico até a Formulação do Modelo Padrão



J.J Thomson (1856 - 1940) [1]



Experimento de Thomson de raios catódicos [2]



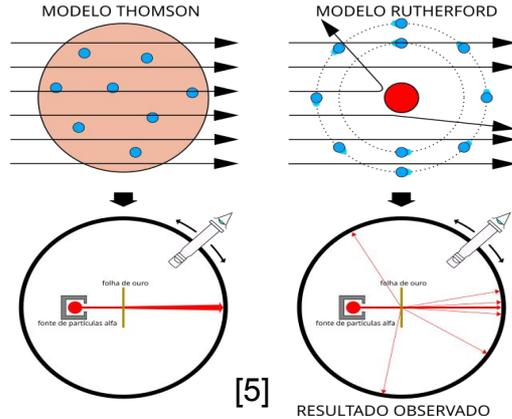
Modelo atômico de Thomson [3]

- Início do estudo da Física de Partículas com a descoberta da primeira partícula elementar, o elétron, realizada por J.J. Thomson em 1897, por meio de experimentos com tubos de raios catódicos (ampolas de Crookes).
- Thomson propôs o modelo atômico conhecido como "pudim de passas", no qual o átomo seria uma esfera de carga positiva com os elétrons incrustados em seu interior. Este modelo substituiu o modelo atômico indivisível de Dalton.
- Thomson também mediu a razão entre a carga e a massa do elétron em seus experimentos. Posteriormente, em 1909, Robert Millikan determinou o valor da carga do elétron através do experimento da gota de óleo, o que possibilitou o cálculo preciso da massa do elétron.

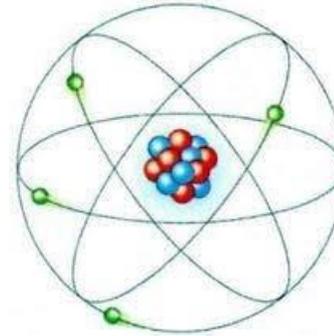
Contexto Histórico até a Formulação do Modelo Padrão



Ernest Rutherford (1867 - 1942) [4]



[5]



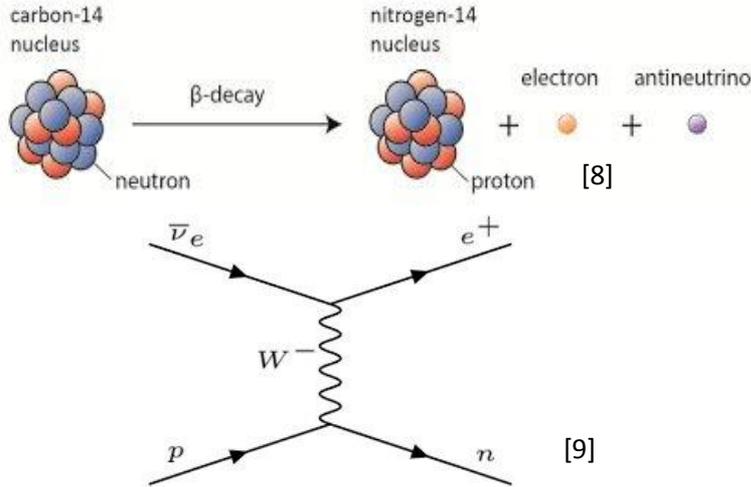
Modelo atômico de Rutherford [6]



James Chadwick (1891 - 1974) [7]

- Rutherford continuou os estudos de Thomson e, em 1909, realizou o famoso experimento de espalhamento de partículas alfa, conduzido por seus assistentes Hans Geiger e Ernest Marsden.
- Os resultados do experimento mostrou que o átomo possui um núcleo pequeno, denso e positivamente carregado, que concentra quase toda a massa do átomo sendo composto por partículas chamadas **prótons**.
- Em 1932, James Chadwick descobriu o **nêutron**, uma partícula subatômica sem carga elétrica, presente no núcleo atômico ao lado dos prótons.
- Além disso, a descoberta do nêutron revelou a existência de uma nova força fundamental da natureza, a **força nuclear forte**, responsável por manter prótons e nêutrons ligados no núcleo, superando a repulsão elétrica entre os prótons.

Contexto Histórico até a Formulação do Modelo Padrão



Clyde Cowan (1919 - 1974) e Frederick Reines (1918 - 1988) [10]



Wolfgang Pauli (1900 - 1958) [11]

- Em 1930, observou-se o decaimento beta, um dos processos fundamentais que descrevem a transformação de partículas subatômicas.
- Pauli fez uma proposta revolucionária em 1930 para explicar o que parecia ser uma violação da lei da conservação de energia no decaimento beta. Ele sugeriu que uma partícula não observada até então, o **neutrino**, nome esse dado por Enrico Fermi.
- A hipótese de Pauli foi confirmada experimentalmente em 1956 por **Clyde Cowan** e **Frederick Reines**, que detectaram neutrinos emitidos em reações de decaimento beta inverso. Com isso, o neutrino foi finalmente identificado como uma partícula fundamental da física de partículas.

Contexto Histórico até a Formulação do Modelo Padrão

Efeito fotoelétrico

Ondas eletromagnéticas

Elétron

Quantum "pacote" de energia

Placa metálica

Painel de energia solar para conversão em energia elétrica [12]

Heinrich Hertz

Max Planck

Prêmio Nobel

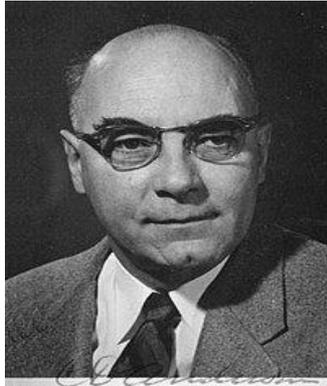
Albert Einstein



Conferência de Solvay, realizada em Bruxelas, 1927 [13]

- Na mesma época, os trabalhos de Planck sobre a quantização da energia desempenharam um papel fundamental no desenvolvimento da Física Moderna. Introduziu o conceito de que a energia é emitida ou absorvida em quantidades discretas, chamadas **quanta**, ao estudar a radiação de corpo negro.
- Em 1905, Albert Einstein expandiu essa ideia ao explicar o **efeito fotoelétrico**, demonstrando que a luz pode ser tratada como partículas discretas de energia, chamadas **fótons**. E por isso ganhou o Prêmio Nobel em 1921.
- Início da Mecânica quântica com cientistas como **Werner Heisenberg, Niels Bohr, Erwin Schrödinger e Paul Dirac** desenvolveram a teoria da mecânica quântica, que descreve o comportamento das partículas subatômicas.

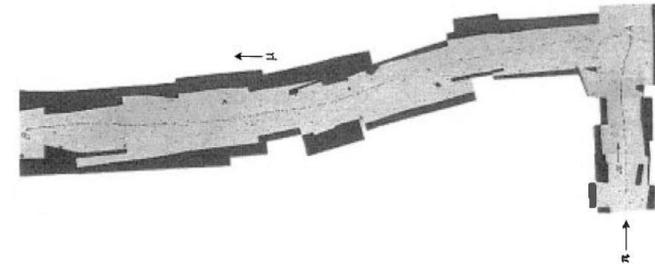
Contexto Histórico até a Formulação do Modelo Padrão



Carl D. Anderson (1905-1991) [14]



Hideki Yukawa, César Lattes, José Leite Lopes e outros [15]

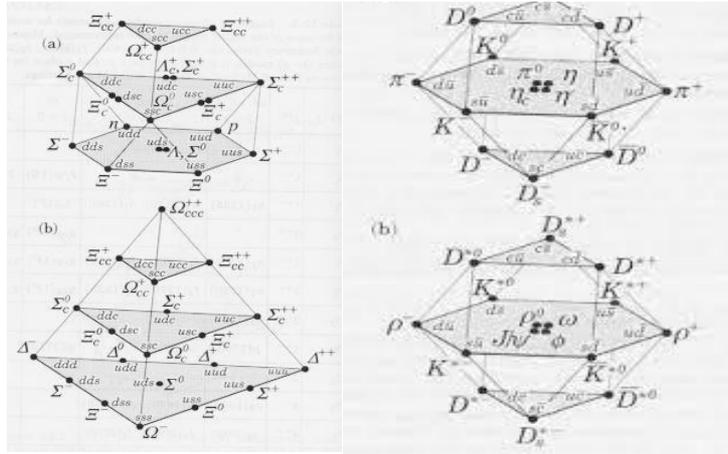


Primeira evidência experimental do méson de Yukawa

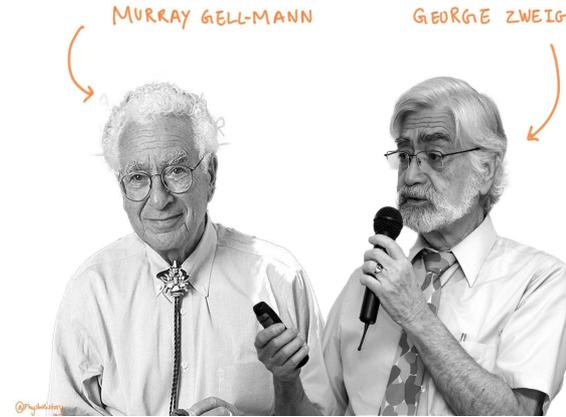
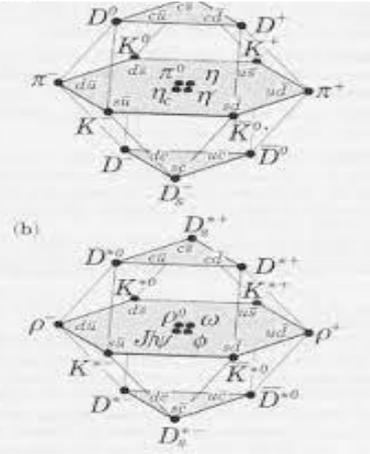
[16]

- **Hideki Yukawa**, em 1935, propôs que a interação nuclear forte, responsável por manter os prótons e nêutrons unidos no núcleo atômico, era mediada por uma partícula subatômica chamada **méson**.
- Em 1936, os físicos **Carl D. Anderson** e **Seth Neddermeyer** descobriram o **múon**, uma partícula carregada que se comportava de maneira semelhante ao elétron, mas com uma massa muito maior. O múon foi inicialmente confundido com o méson de Yukawa.
- Em 1947, os físicos **César Lattes**, **George Rochester** e **Clifford Butler** realizaram experimentos com câmeras de nuvem e descobriram uma partícula que correspondia exatamente à descrição de Yukawa. Essa partícula, conhecida como **píon**, foi a primeira evidência direta da existência dos mésons.

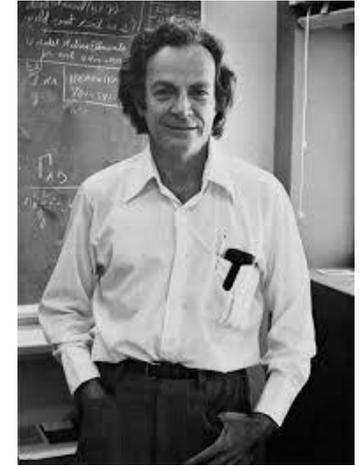
Contexto Histórico até a Formulação do Modelo Padrão



Tentativas de classificar as partículas, EightFold way [17]



[18]



Richard P. Feynman (1918-1988)

[19]

- Com a crescente quantidade de partículas sendo descobertas, físicos como Gell-Mann, Zweig e Feynman buscaram organizar e entender a complexidade do mundo subatômico.
- A proposta era unificar e simplificar a enorme variedade de partículas subatômicas descobertas, utilizando conceitos fundamentais que pudessem explicar suas propriedades e interações de forma mais eficiente e coerente.
- Com isso tivemos o nascimento do Modelo Padrão da Física de Partículas.

Modelo Padrão da Física de Partículas

Modelo Padrão das Partículas Elementares

	três gerações da matéria (férmions)			interações / partículas mensageiras (bósons)	
	I	II	III		
massa	≈2.2 MeV/c ²	≈1.28 GeV/c ²	≈173.1 GeV/c ²	0	≈124.97 GeV/c ²
carga	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g glúon	H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ fóton	
	e elétron	μ múon	τ tau	Z bóson Z	
	ν_e neutrino do elétron	ν_μ neutrino do múon	ν_τ neutrino do tau	W bóson W	

QUARKS

LÉPTONS

BÓSONS DE GAUGE

BÓSONS VETORIAIS

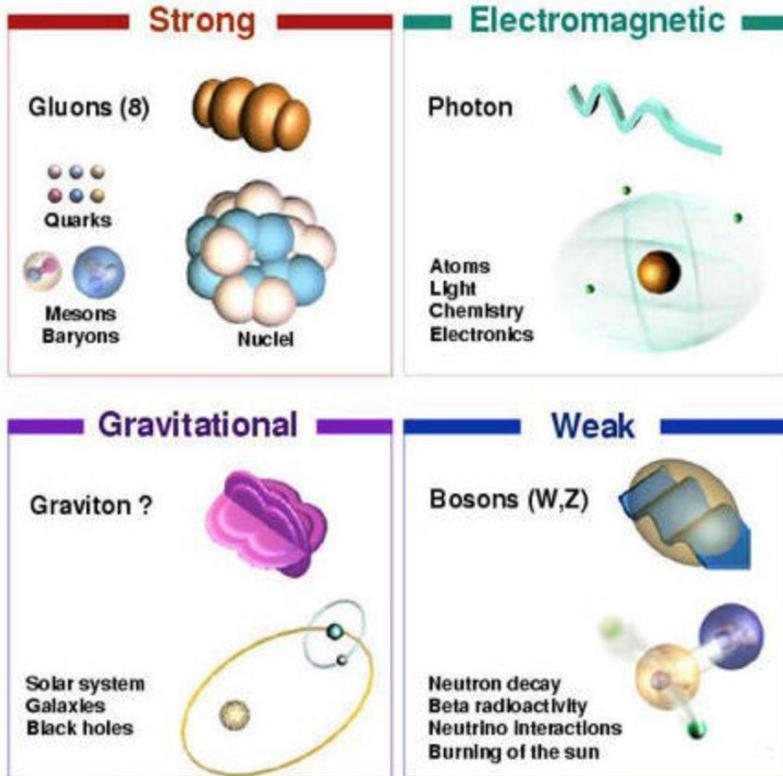
BÓSONS ESCALARES

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}W^{\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} + \bar{\Psi}_j \gamma^\mu (i\partial_\mu - g\tau_j \cdot W_\mu - g'Y_j B_\mu - g_s \mathbb{T}_j \cdot \mathbb{G}_\mu) \Psi_j + |D_\mu \phi|^2 + \mu^2 |\phi|^2 - \lambda |\phi|^4 - (y_j \bar{\Psi}_{jL} \phi \Psi_{jR} + y'_j \bar{\Psi}_{jL} \phi_c \Psi_{jR} + \text{conjugado})$$

- Descreve as partículas elementares e três das 4 interações fundamentais da natureza
- Possui duas grandes "famílias" de partículas que são classificadas como bósons e férmions
- Grande triunfo do Modelo Padrão foi a descoberta do bóson de Higgs em 2012.

Modelo Padrão da Física de Partículas

Forces

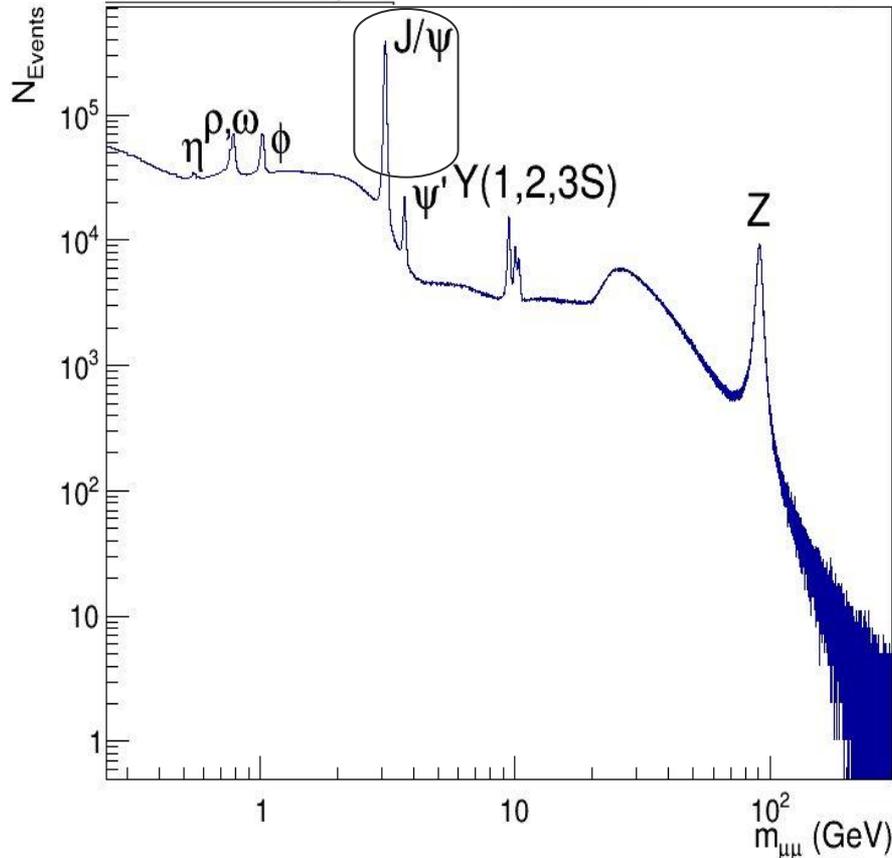


- O Modelo Padrão descreve atualmente as interações eletromagnética, forte e fraca.
- Cada uma das interações possui um mediador, ou seja, um Bóson de Gauge vetorial, mostrado ao lado.
- No caso da força forte, temos 8 glúons pelo fato da teoria da interação forte, a cromodinâmica quântica, é uma teoria do tipo $SU(3)$.
- Até o momento a gravidade é a única força que não foi incorporada pelo Modelo Padrão, mas sendo descrita pela relatividade geral.

The particle drawings are simple artistic representations [21]

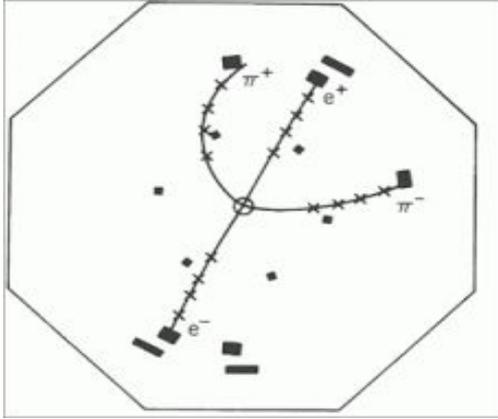
Standard Candles do Modelo Padrão

2012 Run B + Run C with muon events ≥ 2 and pT-cut
 $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$, $\mathcal{L}_{\text{int}} = 11.6 \text{ fb}^{-1}$

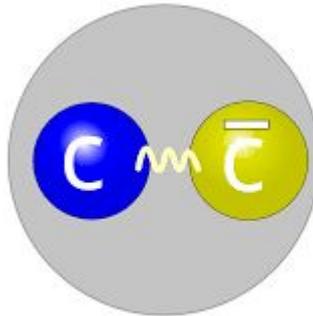


- Alguns padrões se destacam no modelo padrão como as chamadas *standard candles*. Esses padrões são muito importantes na física de partículas, pois:
 - Desempenham um papel crucial na calibração e verificação de modelos teóricos.
 - Fornecem uma referência confiável para medições de grande precisão, permitindo a validação das simulações experimentais.
 - Desvios neste canal podem indicar a presença de novas partículas ou interações não previstas pelo modelo padrão, como novos bósons ou partículas exóticas.
 - Servem como referência no estudo de colisões de íons pesados que buscam estudar efeitos do plasma de quarks e glúons (QGP).

O Méson J/ψ



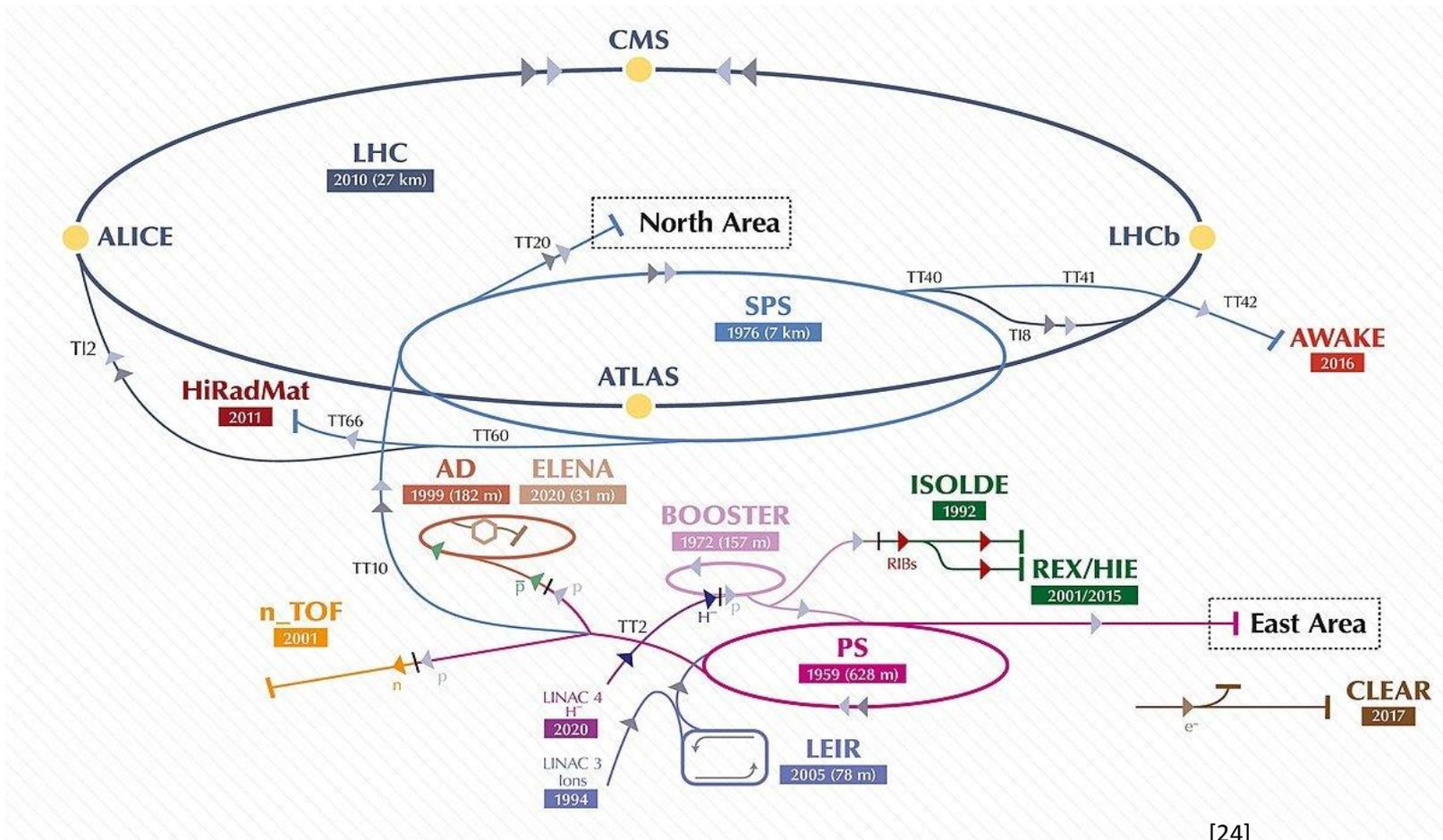
[22]



[23]

- O méson J/ψ é uma das partículas mais importantes quando levamos em conta sua história e o impacto que sua descoberta teve na física de partículas.
- Descoberto simultaneamente por dois grupos independentes em 1974, liderados por Burton Richter no SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) e por Samuel Ting no acelerador de partículas do Brookhaven National Laboratory.
- o J/ψ foi fundamental para a confirmação da existência do quark charm e consolidar o modelo dos quarks descrito por GellMan e Zweig.

LHC e o Experimento CMS

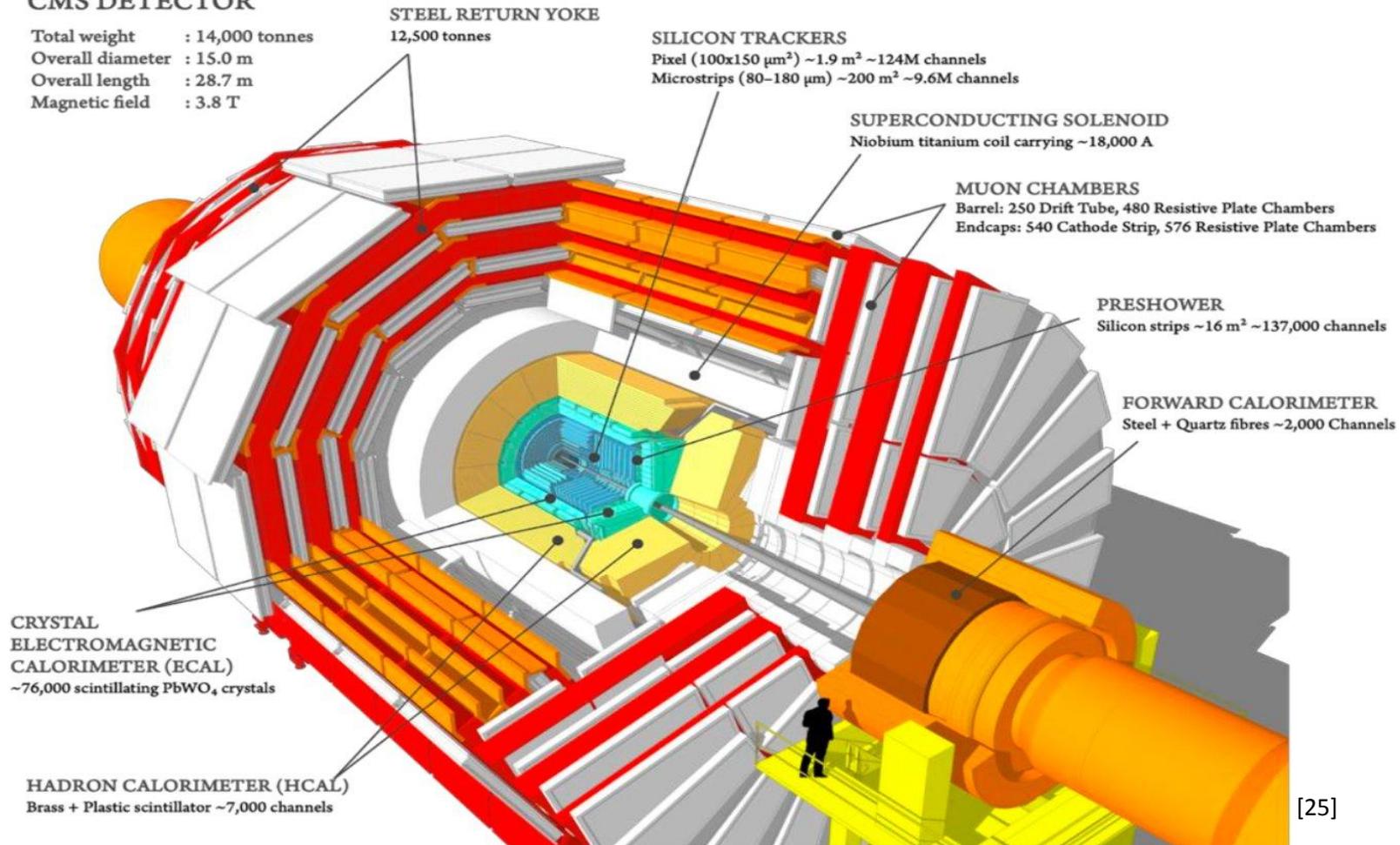


[24]

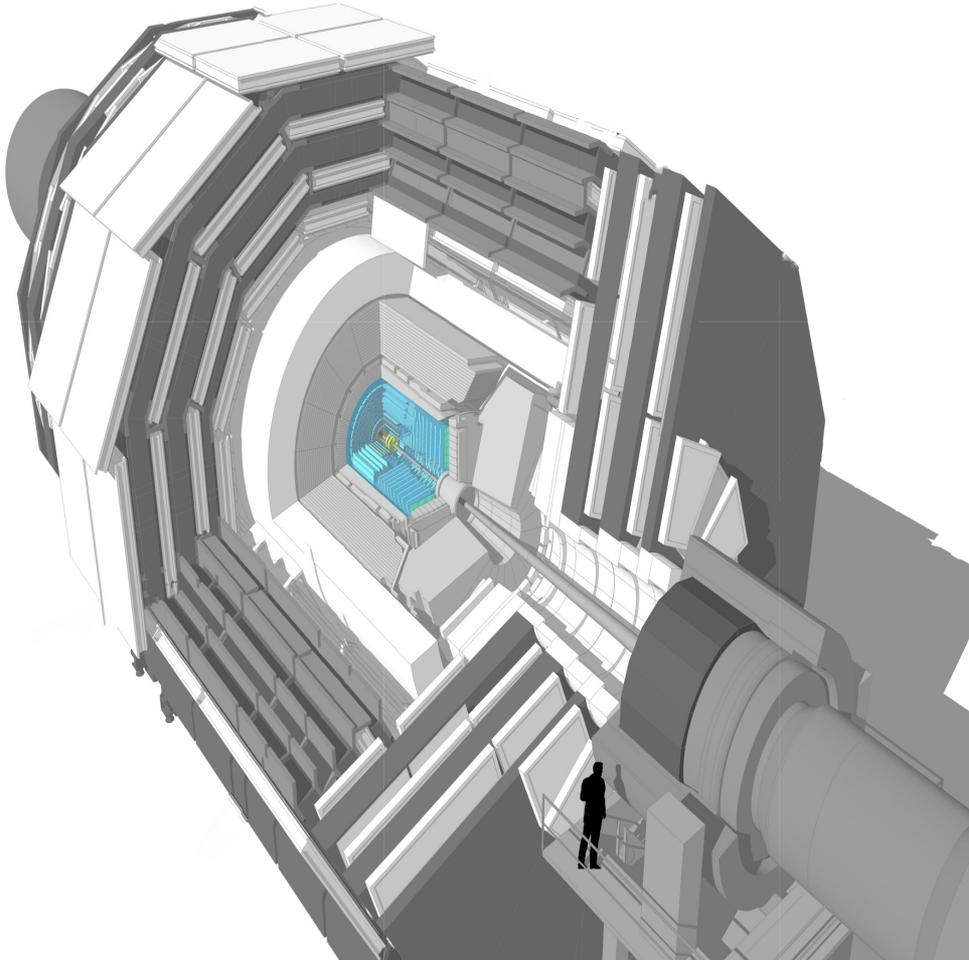
LHC e o Experimento CMS

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
 Overall diameter : 15.0 m
 Overall length : 28.7 m
 Magnetic field : 3.8 T



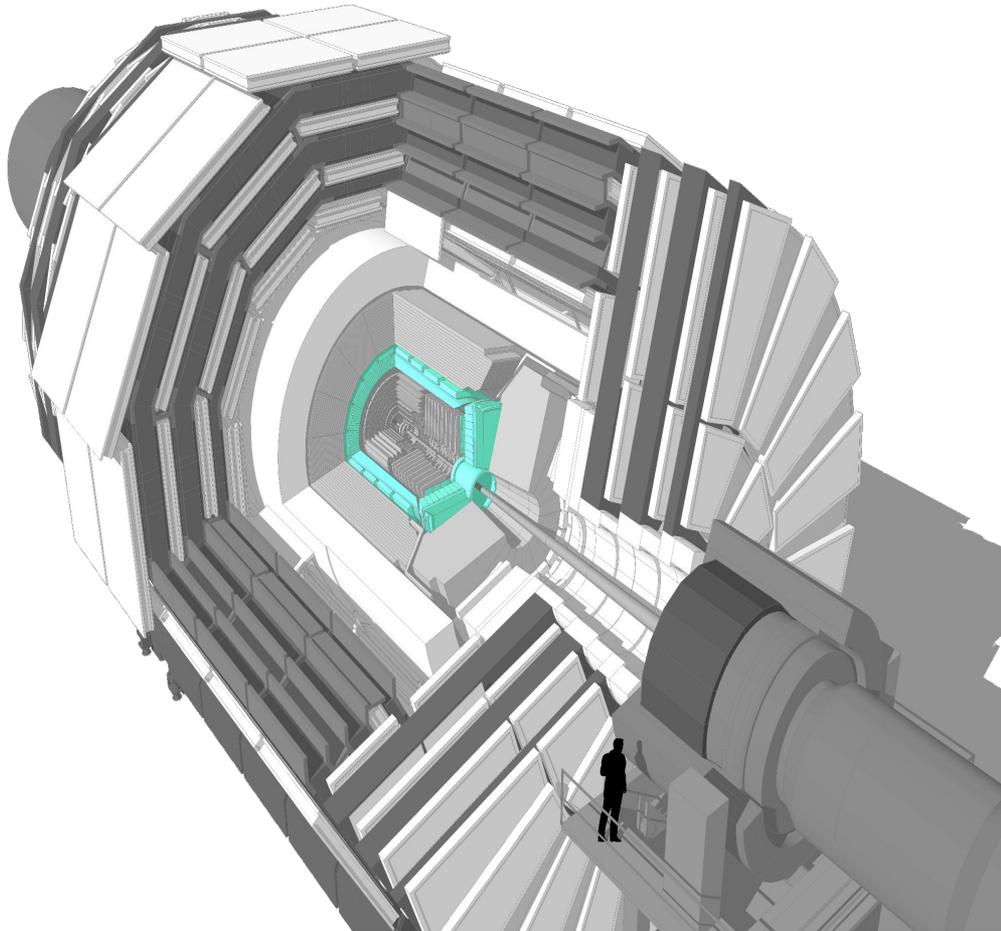
LHC e o Experimento CMS



- O primeiro detector mais interno do CMS é o sistema de trajetografia, sendo responsável por medir a trajetória das partículas carregadas.
- Esse sistema aliado ao campo magnético do CMS é o que possibilita a diferenciação entre partículas carregadas positivamente e negativamente.

[26]

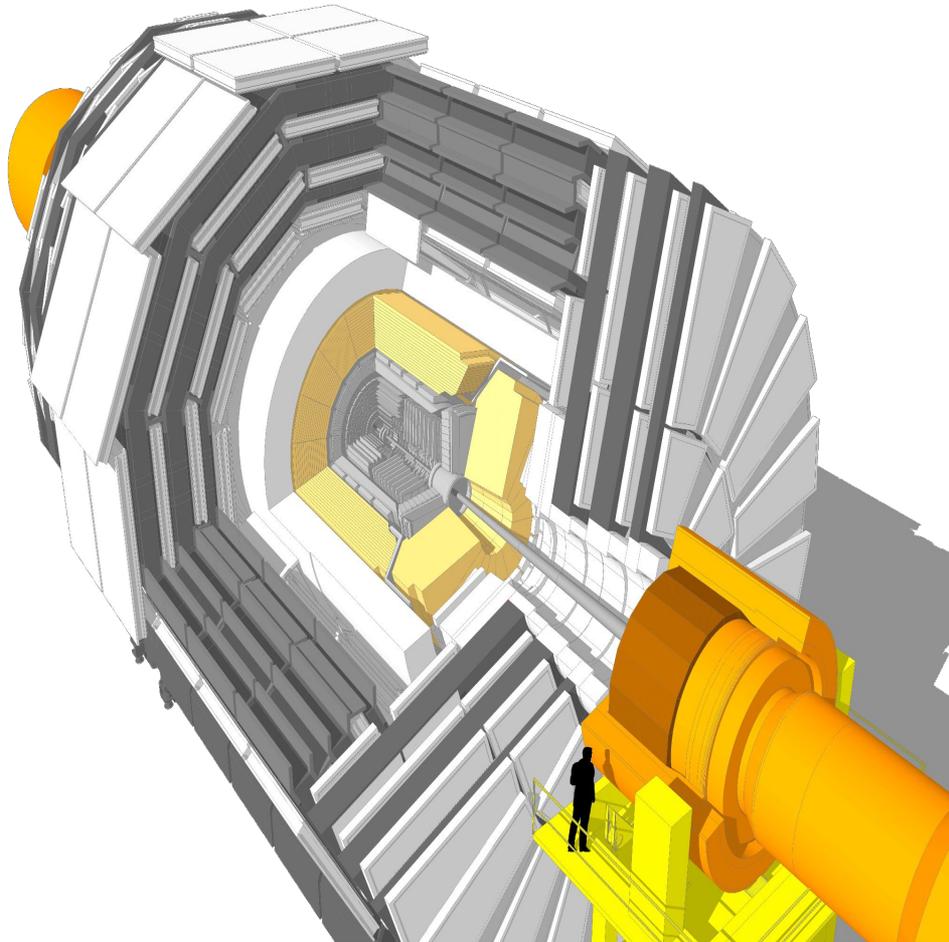
LHC e o Experimento CMS



- O segundo detector mais interno do CMS é o calorímetro eletromagnético (ECAL) sendo responsável por medir elétrons e fótons.
- O ECAL é composto por cristais de tungstato de chumbo (PbWO_4) que cintilam quando elétrons, pósitrons e fótons passa por eles.

[27]

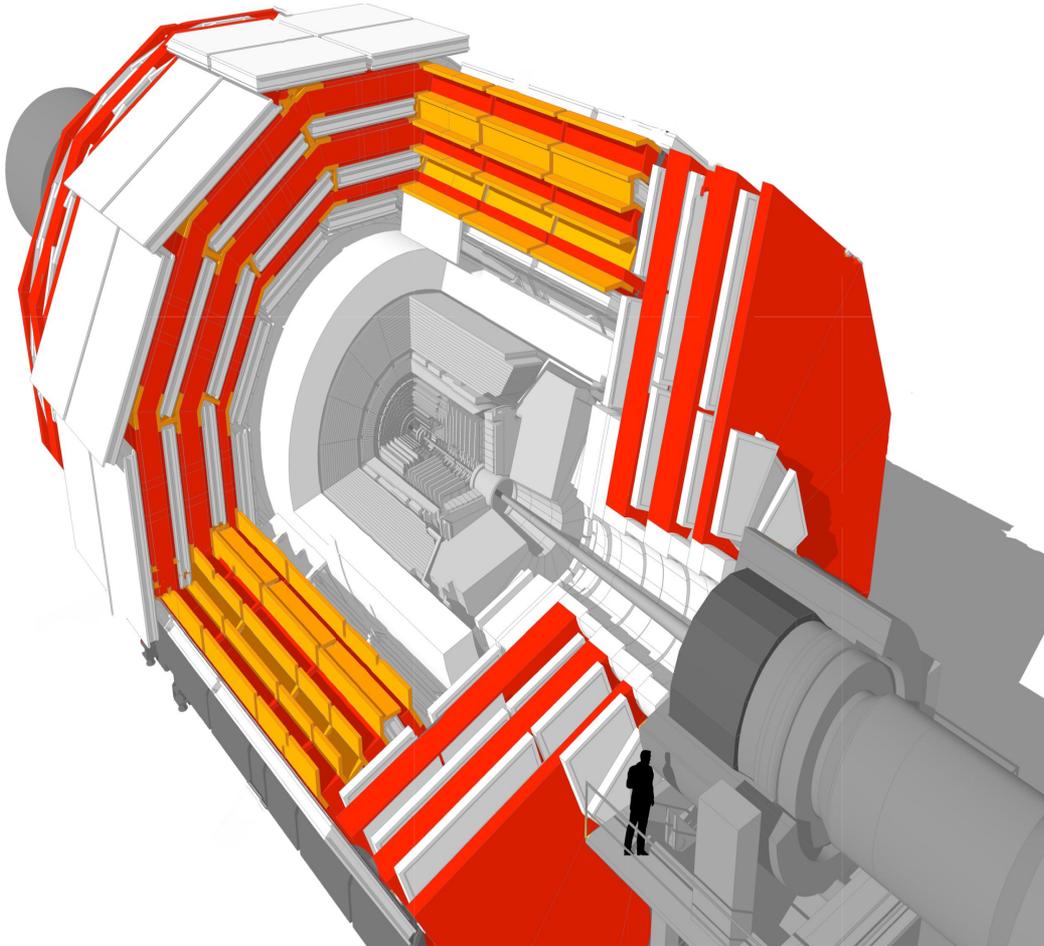
LHC e o Experimento CMS



- O terceiro detector é o calorímetro hadrônico (HCAL), sendo responsável pela detecção de hádrons.
- O HCAL é composto por uma combinação de materiais que permite a interação dos hádrons e a produção das partículas secundárias.

[28]

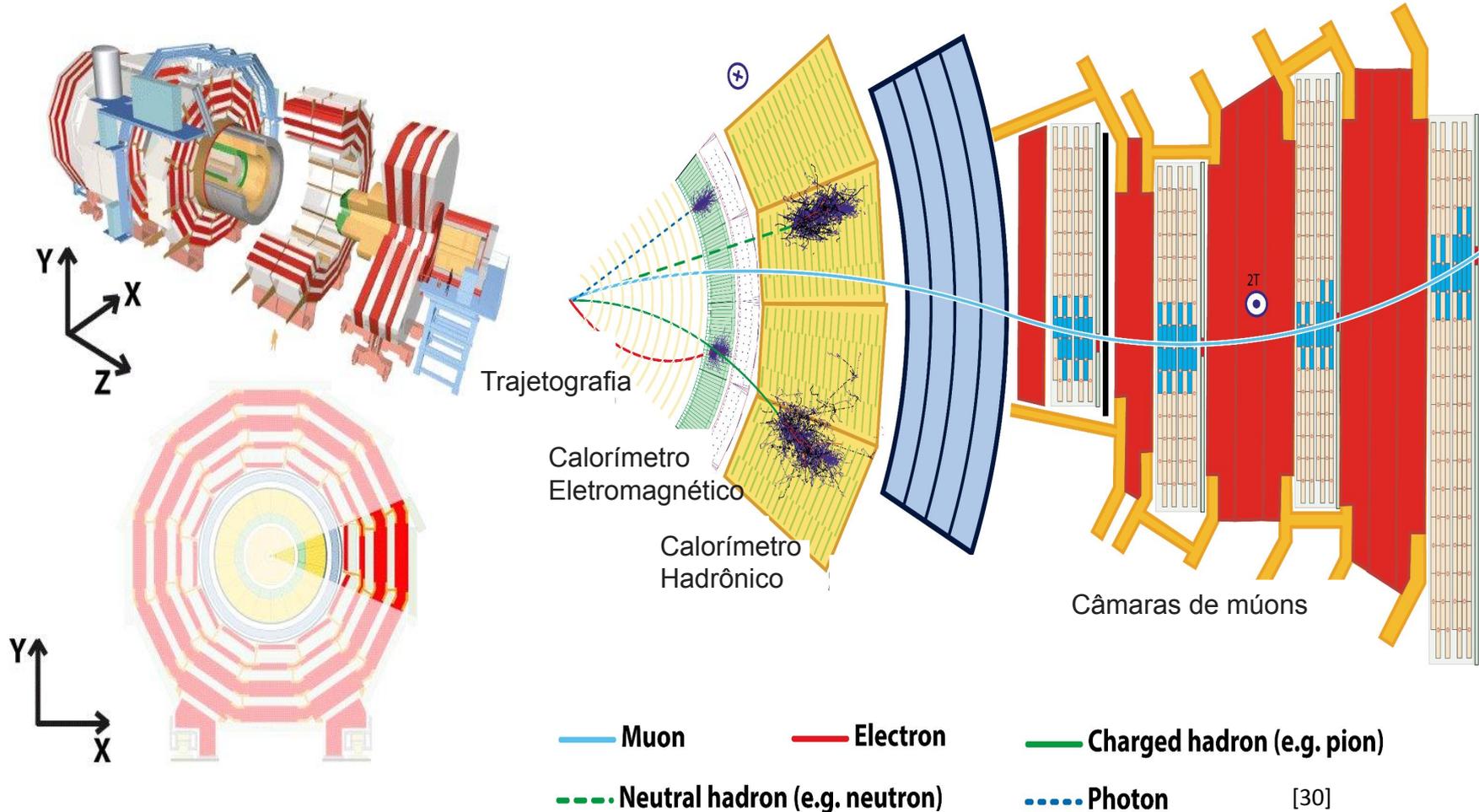
LHC e o Experimento CMS



- O último detector do CMS é a câmara de múons, esse sistema como próprio nome diz é focado na detecção de múons produzidos pelas colisões e decaimentos.
- Esse sistema é composto por três diferentes tipos de detectores: DT, CSC e RPCs e mais recentemente foi introduzido uma nova tecnologia chamada de GEM. Todos esses detectores são detectores à gás.

[29]

LHC e o Experimento CMS



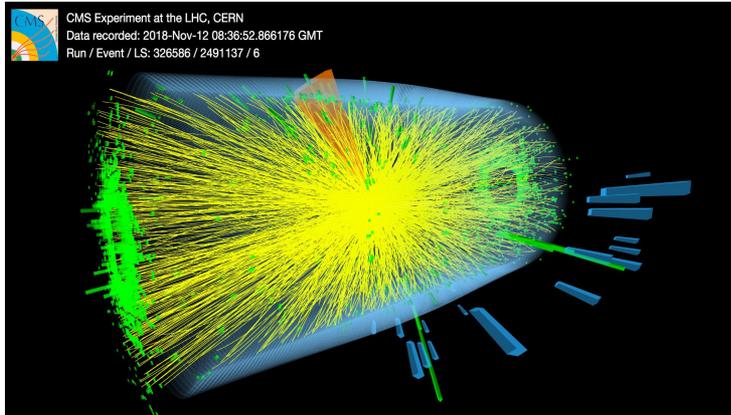
Trabalho com as RPCs durante Summer Student

- Durante meu período como **summer student** no CERN, estive envolvido na produção das novas câmaras de placas resistivas, conhecidas como **improved RPCs (iRPC)**, além de realizar estudos sobre gases com menor impacto ambiental, visando substituir aqueles com alto potencial de aquecimento global (GWP).

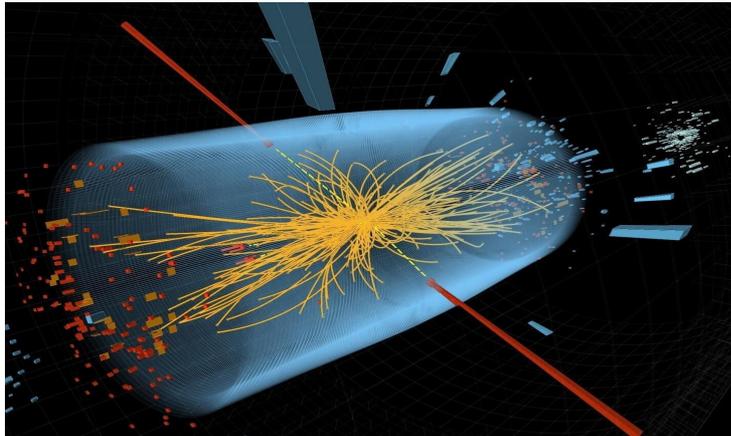


[31]

Colisões de íons Pesados



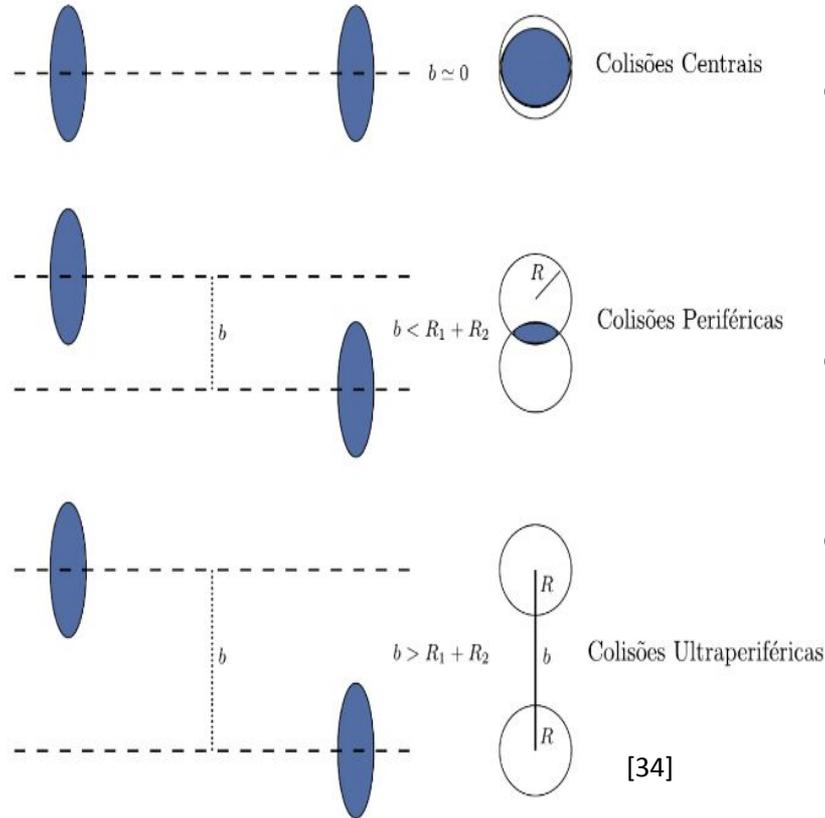
[32]



[33]

- O estudo de colisões de íons pesados, como aquelas realizadas no LHC com o sistema de detector CMS, tem como um de seus principais objetivos entender o comportamento do **plasma de quarks e glúons (QGP)**.
- O QGP é uma fase de matéria que existiu no universo primordial, logo após o Big Bang, e é caracterizada por uma **desconfinamento de quarks e glúons**, os constituintes fundamentais da matéria.
- A análise dos dados coletados de colisões de íons pesados é particularmente desafiadora, pois envolve a **reconstrução de eventos** que se espalham por uma grande área do detector e a grande quantidade de partículas geradas torna esse processo complexo e sujeito a incertezas.

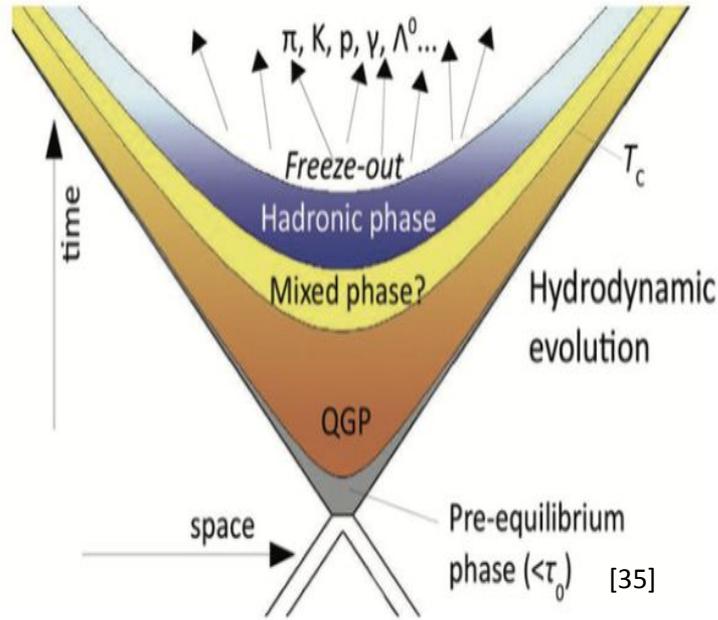
Colisões de íons Pesados



[34]

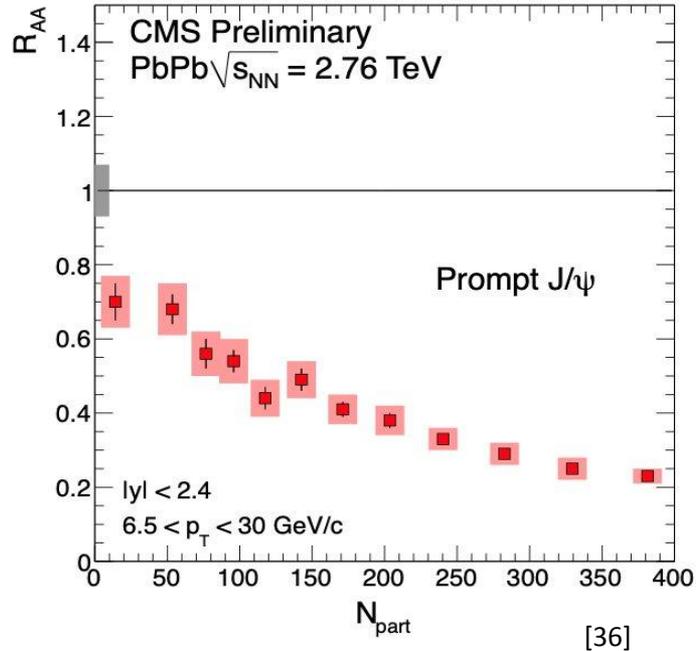
- Nos dois primeiros casos, as interações são dominadas pela força forte, mediada por glúons, o que pode levar à dissociação dos hádrons e à formação de sistemas altamente energéticos, como o QGP.
- colisões ultraperiféricas são dominadas pelas interações eletromagnéticas, mediadas pela troca de fótons.
- A geometria da colisão dos íons pesados é extremamente importante porque influencia diretamente os fenômenos físicos observados nos experimentos.

Colisões de íons Pesados



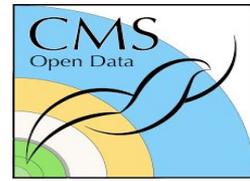
- Processo começa com a colisão dos íons de chumbo em energias ultra-relativísticas Este estágio inicial pode ser descrito pela teoria do *Color Glass Condensate* (CGC), que caracteriza o estado denso e saturado dos glúons presentes nos íons colidentes e criando assim o plasma de quarks e glúons.
- Esse estado do **QGP** tem uma duração extremamente curta, da ordem de 10^{-23} segundos, e o sistema evolui então para uma **fase de transição** conhecida como **hadronização**. Durante essa fase, o QGP se esfria e se expande, passando de um estado de quarks e glúons livres para um estado mais estável.
- Nesse estado temos o chamado congelamento químico onde os constituintes se combinam para formar **hádrons** finais que serão detectados mais tarde pelos experimentos.

Colisões de íons Pesados



- A supressão do méson J/ψ no QGP é um dos indicadores chave, já que esse fenômeno não ocorre de forma significativa em colisões de prótons e em condições normais de interação nuclear.
- Quando os núcleos colidem em energias ultra-relativísticas, o QGP gerado pode interagir com os quarks presentes no méson J/ψ, afetando sua produção e levando à sua supressão.
- Uma das formas de avaliar essa supressão é a partir do **fator de modificação nuclear (R_{AA})**, que quantifica a redução da produção de partículas em colisões de íons pesados em comparação com as colisões de prótons, levando em consideração o número de colisões efetivas nucleares.
- Porém, nesta monografia, não temos o número médio de interações (N_{coll}), o que impossibilitou o cálculo do fator de modificação nuclear R_{AA} . Esse fator é essencial para quantificar a supressão do méson J/ψ de forma correta.

$$R_{AA} = \frac{dN_{J/\psi}^{AA}}{N_{coll} \cdot d\sigma_{J/\psi}^{pp}}$$



- O **CMS Open Data** é uma iniciativa pioneira do experimento CMS, que disponibiliza publicamente os dados coletados durante as colisões no LHC. Esses dados são usados para fins educacionais, treinamento de novos físicos e também para pesquisa científica por grupos externos. O programa começou em 2014 e inclui não apenas os dados brutos e processados das colisões, mas também os códigos, tutoriais e ferramentas necessárias para a análise.
- Em 2021 a colaboração CMS disponibilizou a primeira leva de dados de colisões de íons pesados e em 2023 foi disponibilizado todo o RUN1 que compreende o período de (2009 a 2013) incluindo colisões do tipo próton-chumbo e simulações.
- Os dados são disponibilizados em três diferentes formatos de dados: Brutos, RECO, AOD, MiniAOD e NanoAOD os dados de íons pesados utilizados nesta monografia são do tipo RECO, mas foram processados usando ferramentas como CMSSW para o formato NanoAOD.
- Durante o período de iniciação científica, trabalhei com esses dados de colisões de íons de chumbo e adquiri conhecimento sobre o funcionamento do CMSSW, Docker, Máquinas Virtuais e linguagens de programação como Python, C++ e ROOT.

Dados de Íons Pesados

- Os dados selecionados para essa análise estão disponibilizados na Tabela abaixo, com informações do tipo de colisão, nome dos Datasets, formato e energia de centro de massa do feixe.

Ano	Tipo de Colisão	Nome do Dataset	Formato	Energia do Feixe
2010	PbPb	/HIAllPhysics/HIRun2010-ZS-v2/RECO	RECO	2.76 TeV
2011	PbPb	/HIDiMuon/HIRun2011-04Mar2013-v1/RECO	RECO	2.76 TeV
2011	pp	/AllPhysics2760/Run2011A-16Jul2011-v1/RECO	RECO	2.76 TeV

- Esses dados foram processados usando o CMSSW disponibilizados através dos containers do Docker de forma a produzir um arquivo final no formato nanoAOD, que possui somente as informações básicas dos múons, como momento transversal, pseudorapidez e *Triggers*.

- Após a produção dos arquivos nanoAOD, podemos fazer uma seleção de *Triggers* e estudar como esses Triggers interferem na seleção de eventos e na visualização das Standard Candles.

Ano	Tipo de Colisão	Nome do Trigger	Eficiência (%)
2010	PbPb	HLT_HIL1DoubleMuOpen	80.0
2011	PbPb	HLT_HIL1DoubleMu0_HighQ_v2	54.1
2011	pp	HLT_L2DoubleMu0_v2	84.5

- Podemos observar que a distribuição mais "afetada" pelo uso do trigger são os dados de colisões de PbPb de 2011 tendo uma redução de 45,9% na quantidade de eventos. Essa eficiência foi calculada simplesmente como a razão entre a quantidade de eventos após o uso dos triggers e antes do uso dos triggers.

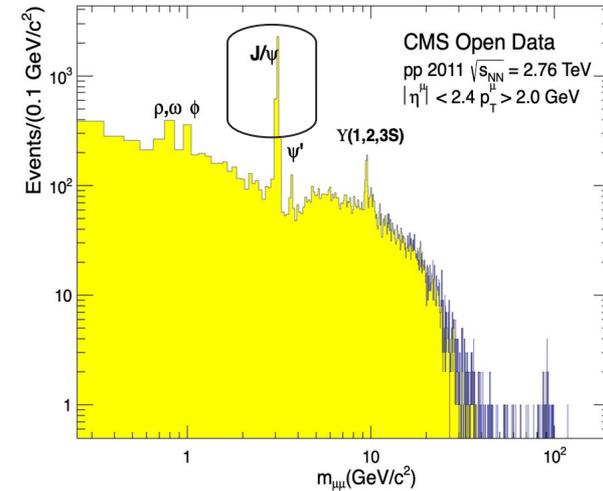
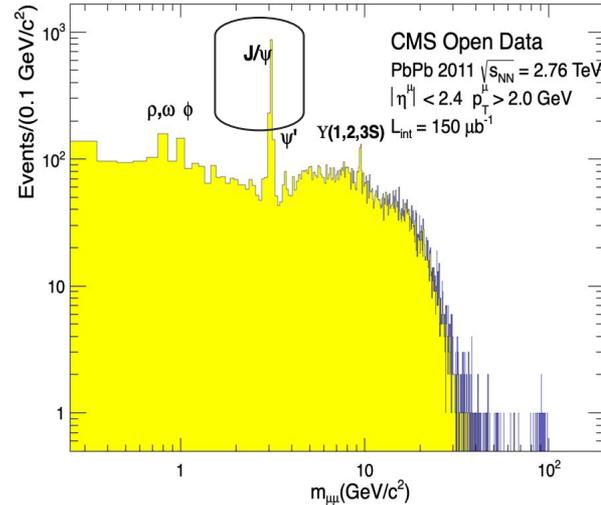
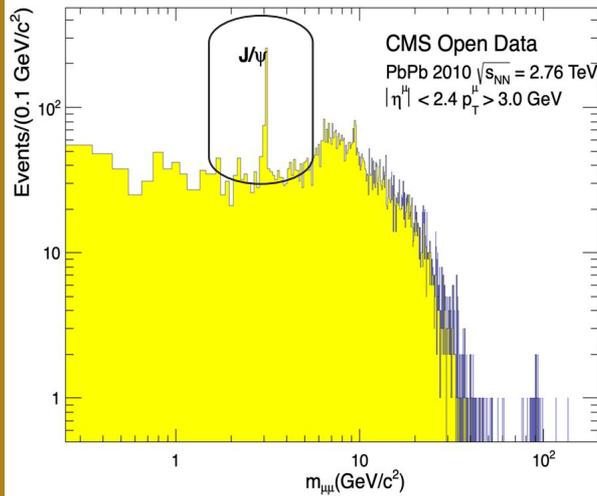
Dados de Íons Pesados

- Além da aplicação dos *Triggers*, foram feitos também cortes cinemáticos como no momento transverso e pseudorapidez. Todos os cortes podem ser visualizados na Tabela abaixo:

Variável	Corte	Descrição
MuHitsV	> 12	Número mínimo de hits válidos no detector
MuHitsP	> 2	Número mínimo de hits no pixel detector
MuTrackChi	< 4.0	Qualidade do ajuste da trilha (chi-squared normalizado)
MuDistPVz	$< 0,05$	Distância máxima do vértice primário ao longo do eixo z (cm)
Múon p_T	> 3.0	Momento transverso mínimo (GeV/c)
Múon η	< 2.4	Restrição na pseudorapidez

- Com esses cortes e seleções, podemos então plotar nossas distribuições de massa invariante:

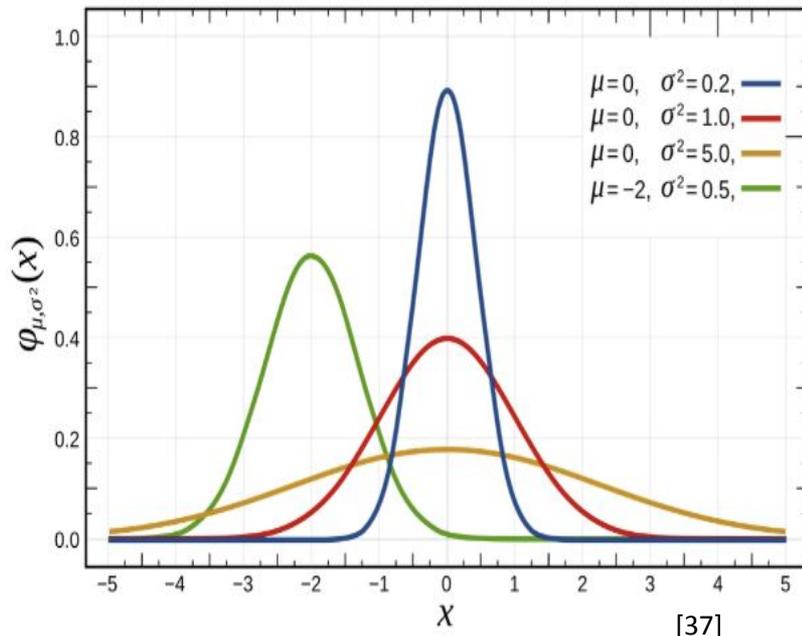
Resultados Obtidos



- Como esse conjunto de dados das colisões pp possui uma estatística significativamente maior, é possível observar uma melhor na definição dos picos. A baixa estatística apresentada nos histogramas acima é o que afeta diretamente a definição dos picos associados aos estados ressonantes
- Apesar dessas limitações, os padrões observados, como o pico da partícula J/ψ , ainda seguem as características gerais esperadas das distribuições de massas reconstruídas, podendo estudar esse pico de forma mais detalhada.
- Para os casos de 2010 PbPb e 2011 pp não conseguimos a informação sobre a luminosidade.

Funções Densidade de Probabilidade (PDFs)

$$f(x) = A \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$



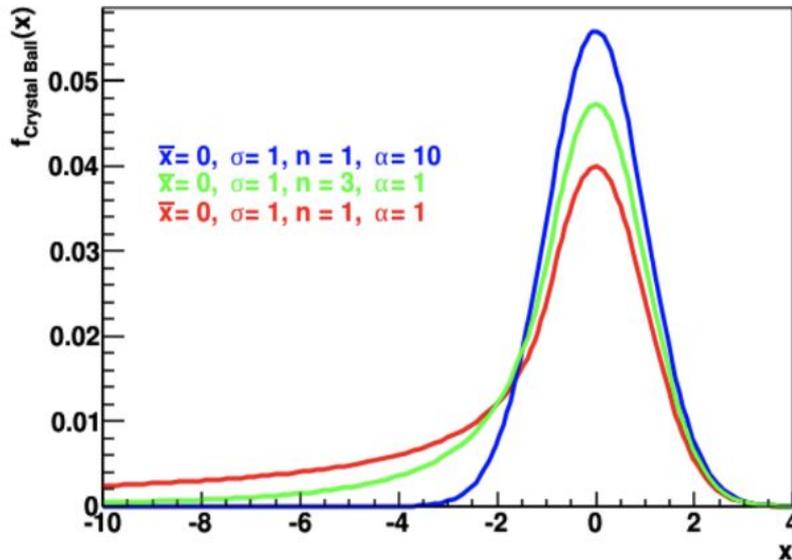
[37]

- Para estudar os picos de ressonância do méson J/ψ , precisamos usar as funções de Densidade de Probabilidade para modelar esses picos e extrair algumas propriedades como massa da partícula.
- De forma geral, vamos usar dois tipos de funções para modelar o sinal, as funções gaussianas e Crystal Ball que serão apresentadas.
- A função gaussiana é dada matematicamente pela fórmula ao lado, sendo x a variável que pode corresponder a massa invariante das partículas e μ a média dos valores

Funções Densidade de Probabilidade (PDFs)

$$f(x) = A \left[\exp \left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) \right] \quad \text{para } \frac{|x - \mu|}{\sigma} \leq \alpha$$

$$f(x) = A \left[\frac{n}{\alpha^n} \left(\frac{\alpha}{|x - \mu|} \right)^n \right] \quad \text{para } \frac{|x - \mu|}{\sigma} > \alpha$$

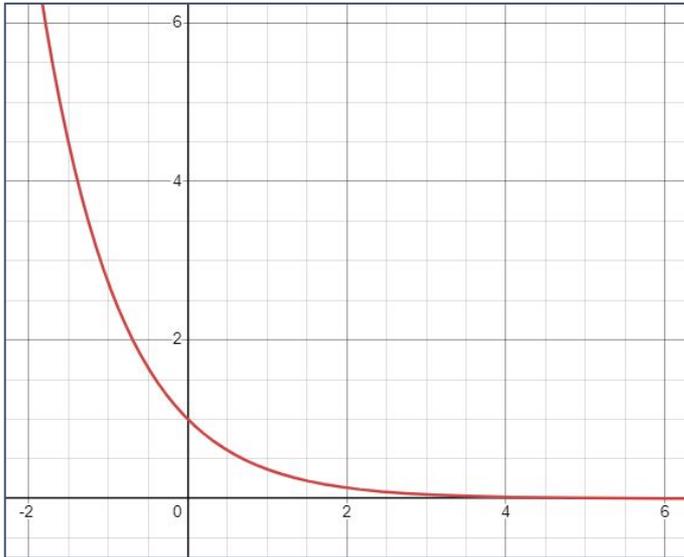


[38]

- Já a função Crystal Ball, uma combinação de uma gaussiana com uma cauda assimétrica, será usada para lidar com assimetrias no pico, especialmente aquelas causadas por efeitos do detector ou de energia perdida. A fórmula para a Crystal Ball é um pouco mais complexa e é dado ao lado.
- Na figura podemos observar como a variação dos parâmetros impacta na forma desta função, sendo que "n" controla o comportamento da cauda assimétrica e alfa a transição da CB para a gaussiana.

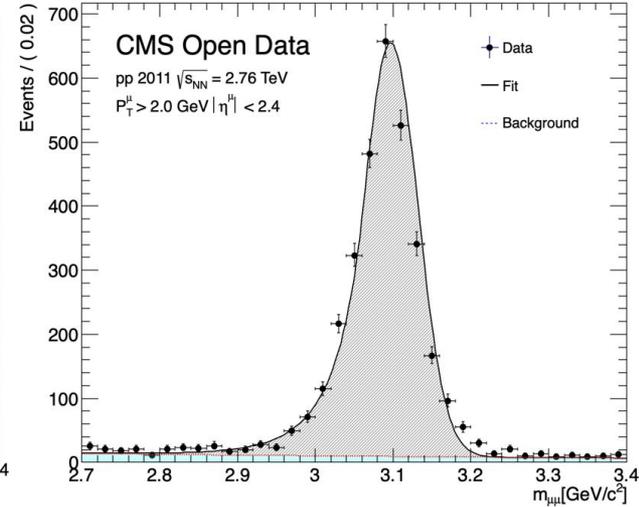
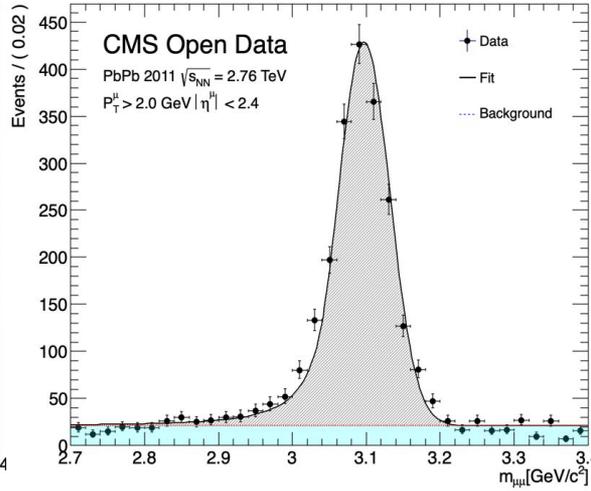
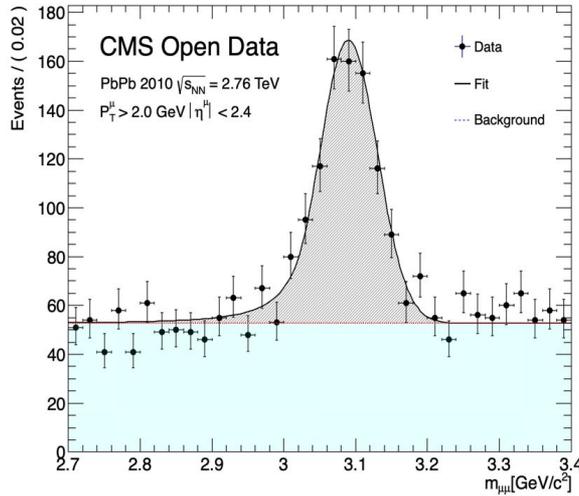
Funções Densidade de Probabilidade (PDFs)

$$f(x) = Ae^{-\lambda x}$$



- Usamos para modelar o fundo uma função do tipo exponencial como mostra a equação ao lado. onde A e λ são parâmetros livres ajustados pelos dados experimentais.
- Após a modelagem do fundo, podemos então proceder à análise do sinal, aplicando técnicas como ajuste de picos.

Resultados Obtidos para o méson J/ψ



Parâmetro	Valor Ajustado	Incerteza Estatística
Média (massa J/ψ)	3,0968 GeV/c^2	$\pm 0,0017 \text{ GeV}/c^2$
Largura (Sigma J/ψ)	0,0360 GeV/c^2	$\pm 0,0010 \text{ GeV}/c^2$
Inclinação do Fundo	0,0000	$\pm 0,0002$
Fração do Sinal	0,7200	$\pm 0,0050$
Parâmetro n (<i>Crystal Ball</i>)	2,5000	$\pm 0,0300$
Parâmetro α (<i>Crystal Ball</i>)	1,5000	$\pm 0,0100$

Parâmetro	Valor Ajustado	Incerteza Estatística
Média (massa J/ψ)	3,0968 GeV/c^2	$\pm 0,0017 \text{ GeV}/c^2$
Largura (Sigma J/ψ)	0,0360 GeV/c^2	$\pm 0,0010 \text{ GeV}/c^2$
Inclinação do Fundo	0,0000	$\pm 0,0002$
Fração do Sinal	0,7200	$\pm 0,0050$
Parâmetro n (<i>Crystal Ball</i>)	2,5000	$\pm 0,0300$
Parâmetro α (<i>Crystal Ball</i>)	1,5000	$\pm 0,0100$

Parâmetro	Valor Ajustado	Incerteza Estatística
Média (massa J/ψ)	3,0968 GeV/c^2	$\pm 0,0029 \text{ GeV}/c^2$
Largura (Sigma J/ψ)	0,0380 GeV/c^2	$\pm 0,0010 \text{ GeV}/c^2$
Inclinação do Fundo	-1,0000	$\pm 0,0010$
Fração do Sinal	0,9000	$\pm 0,0010$
Parâmetro n (<i>Crystal Ball</i>)	8,0000	$\pm 0,0500$
Parâmetro α (<i>Crystal Ball</i>)	1,0000	$\pm 0,0200$

Resultados Obtidos para o méson J/ψ

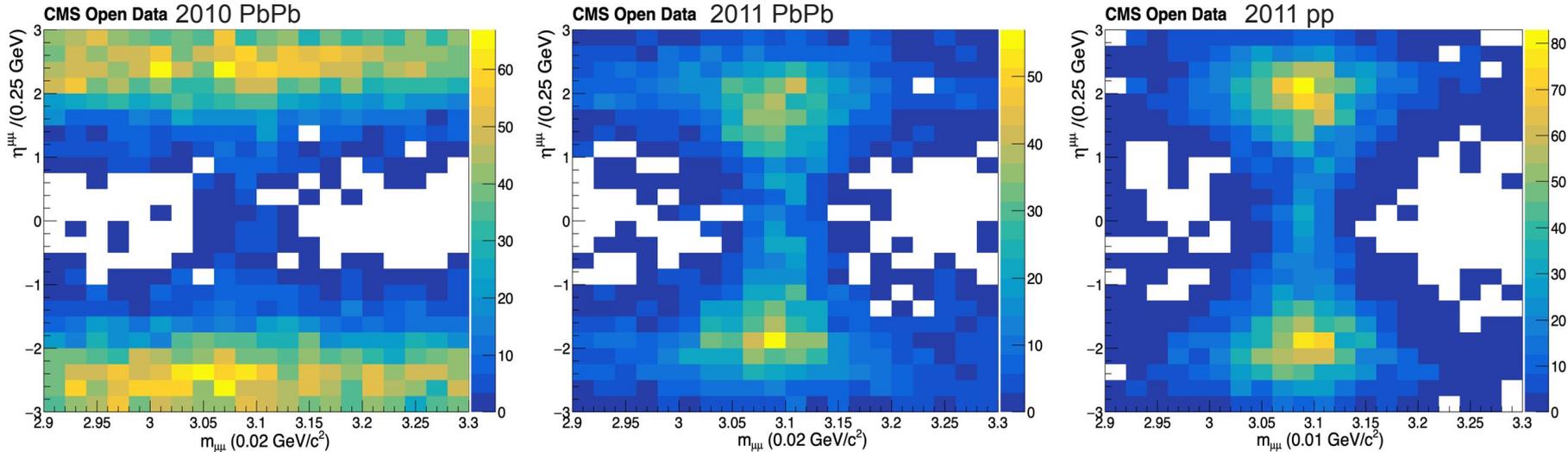
- Com os resultados do Fit, podemos então comparar com os valores fornecidos pelo Particle Data Group (PDG) que é de $M_{J/\psi} = (3,096900 \pm 0,000006) \text{ GeV}/c^2$

Amostra	Diferença entre as Massas (GeV/c^2)	Incerteza Estatística (GeV/c^2)	Resultado em σ
PbPb 2010	0,0001	0,0033	0.0303
PbPb 2011	0,0001	0,0017	0.0588
pp 2011	0,0001	0,0029	0.0344

- Como podemos ver, o erro estatístico dado pelo PDG é extremamente pequeno, de forma que o erro associado é aproximadamente o erro obtido pelo Fit. Usando a compatibilidade como sendo a diferença entre os valores da massa dividido pelo erro associado e esse resultado sendo menor que 2 temos um valor compatível.
- Na Tabela acima, podemos ver os valores obtidos e todos são menores que 2, portanto compatível com os valores dado pelo PDG.

Resultados Obtidos para o méson J/ψ

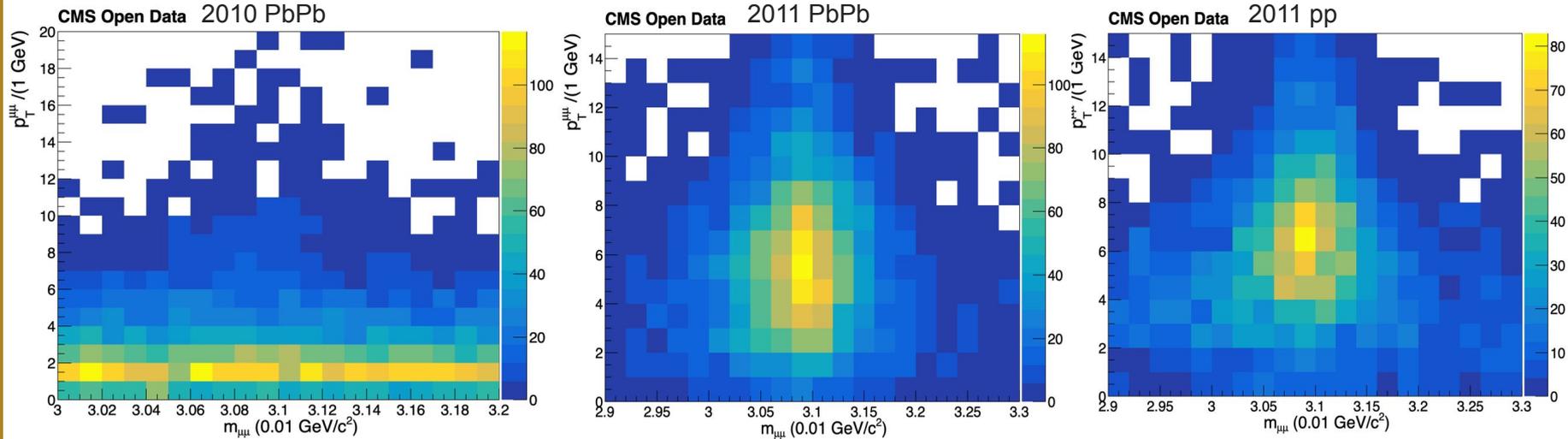
- Além da compatibilidade podemos estudar também como é dada a distribuição de pseudorapidez e momento transverso por massa invariante no range de massa do



- Podemos observar nessas distribuições 2D em que posição a partícula J/ψ é mais produzida, o que pode indicar uma "preferência" na produção dessa partícula em determinadas regiões do detector. Essa "preferência" pode estar associada a diferentes fatores físicos e experimentais.

Resultados Obtidos para o méson J/ψ

- Além da compatibilidade podemos estudar também como é dada a distribuição de pseudorapidez e momento transversal por massa invariante no range de massa do J/ψ .



- Além disso, esse tipo de distribuição pode ser extremamente útil para a limpeza das distribuições de massa invariante, permitindo a identificação e eliminação de ruídos ou eventos não relacionados
- Podemos ver também a ausência de uma tendência central no caso das colisões do tipo PbPb tomados nos anos de 2010, o que pode explicar a ausência de alguns picos na distribuição de massa invariante.

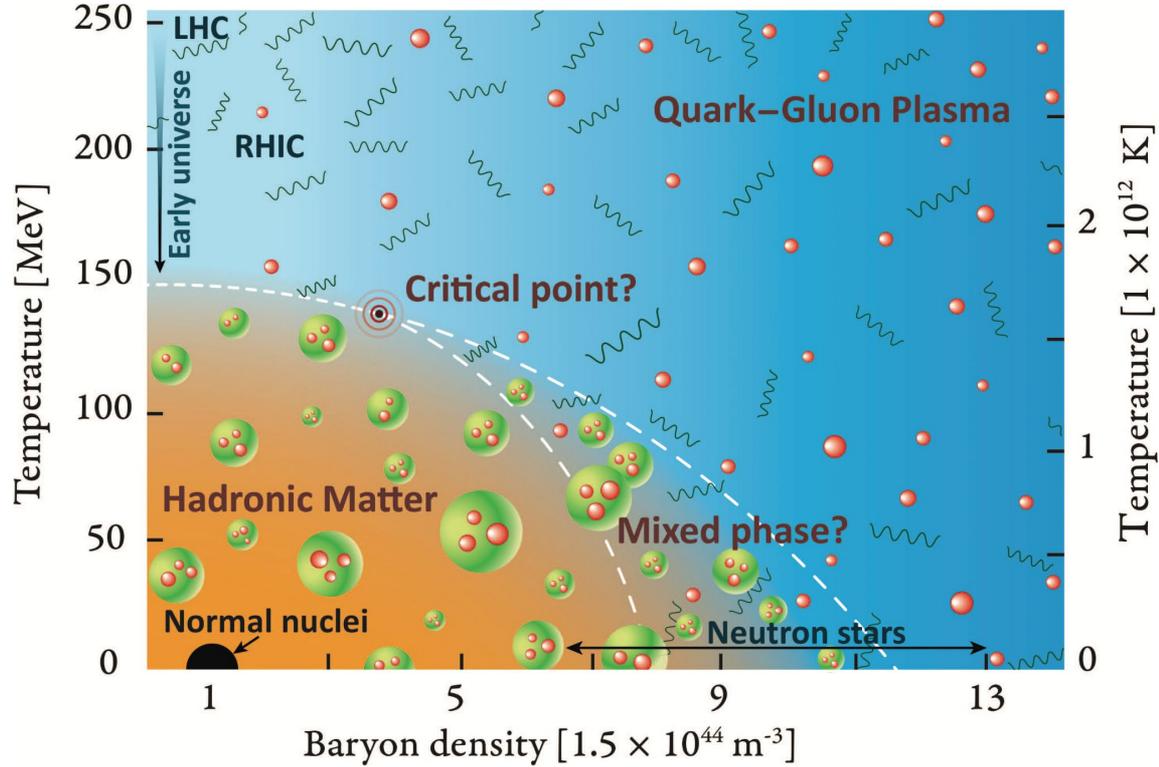
Conclusão

- **Histórico da Física de Partículas:** Apresentamos o contexto histórico que levou à formulação do Modelo Padrão, com destaque para as descobertas de partículas fundamentais e o papel dos *standard candles* na validação de teorias e calibração experimental.
- **Física de Íons Pesados:** Discutimos o plasma de quarks e glúons (QGP), um estado extremo da matéria produzido em colisões de íons pesados. Esse estudo é essencial para entender as propriedades fundamentais da interação forte em condições extremas.
- **Espectro de Massa Invariante:** Investigamos o canal de dois múons como ferramenta para reconstruir partículas como o méson J/ψ .
 - Análises 2D (massa invariante vs η e p_T) revelando regiões de maior produção, destacando padrões associados a processos físicos e permitindo o refinamento de seleções experimentais.
 - Realizamos Fits para extrair informações relevantes de distribuições experimentais como a massa invariante do J/ψ e comparação dos resultados com os valores dados pelo PDG.
- **Contribuição do Trabalho:** Este estudo contribui para a compreensão de padrões em dados experimentais e estabelece fundamentos para futuras análises voltadas ao estudo do QGP e servir como um guia prático para estudantes que estão iniciando nessa área.

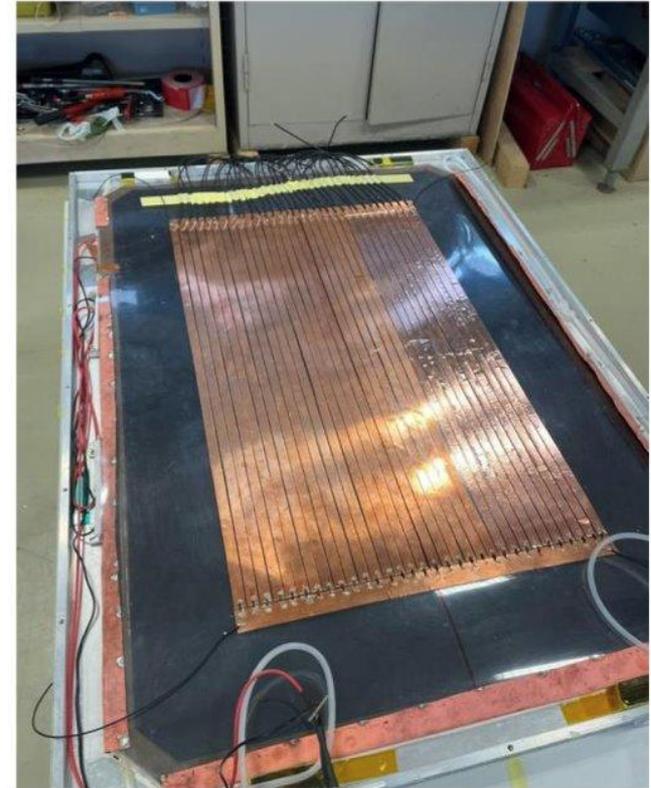
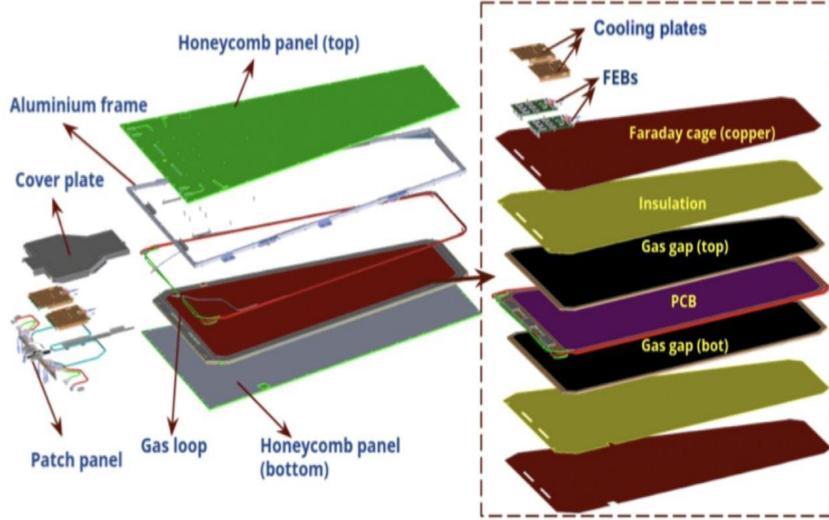


Backup

Diagrama de Fase do QGP



Trabalho durante período de summer student

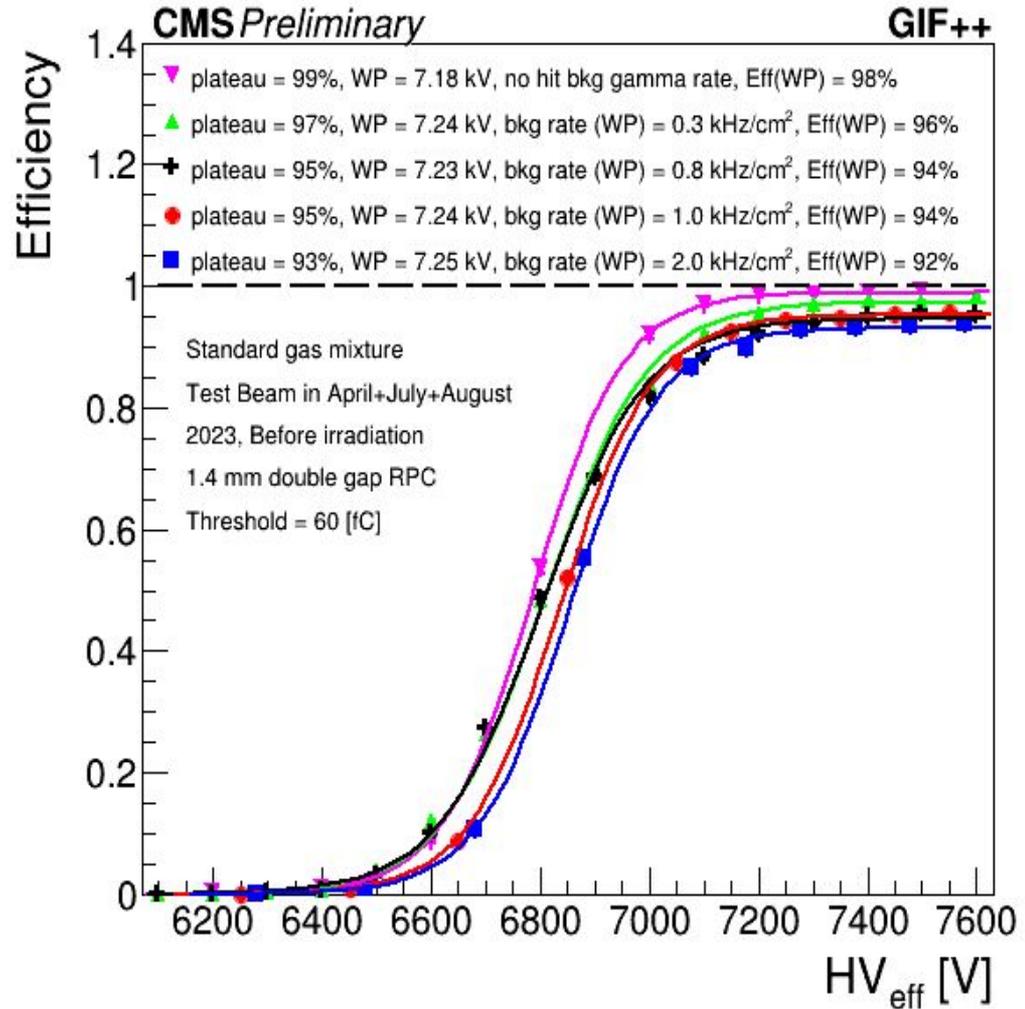


Gas components (%)	$C_2H_2F_4$	CO_2	$i-C_4H_{10}$	SF_6	GWP^*_{MIX}
GWP	1430	1	3	22800	
Density (g/L)	4.7	1.98	2.7	6.61	
STD	95.2	0	4.5	0.3	1486
30% CO_2 + 1.0% SF_6	64	30	5	1	1529
30% CO_2 + 0.5% SF_6	64.5	30	5	0.5	1337
40% CO_2 + 1.0% SF_6	54.5	40	5	1	1353

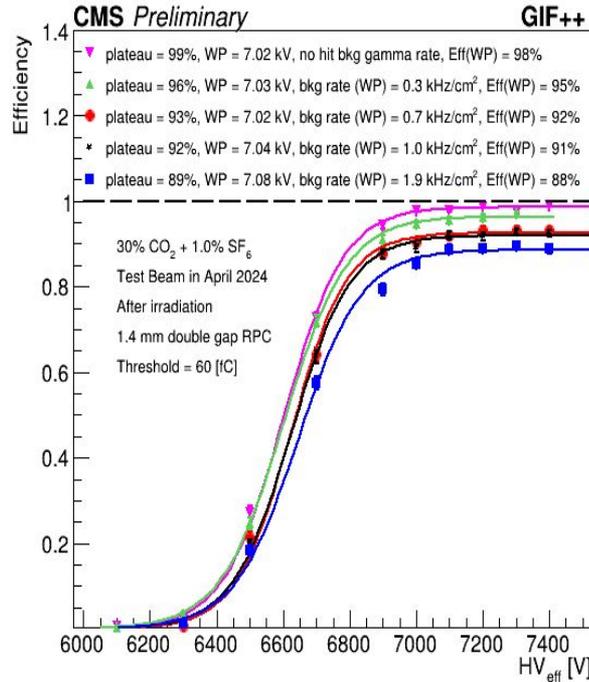
Análise das misturas de CO₂

Durante o período como *summer student* fiquei trabalhando na análise dos dados dos detectores utilizando outras misturas de gás e na construção desses detectores

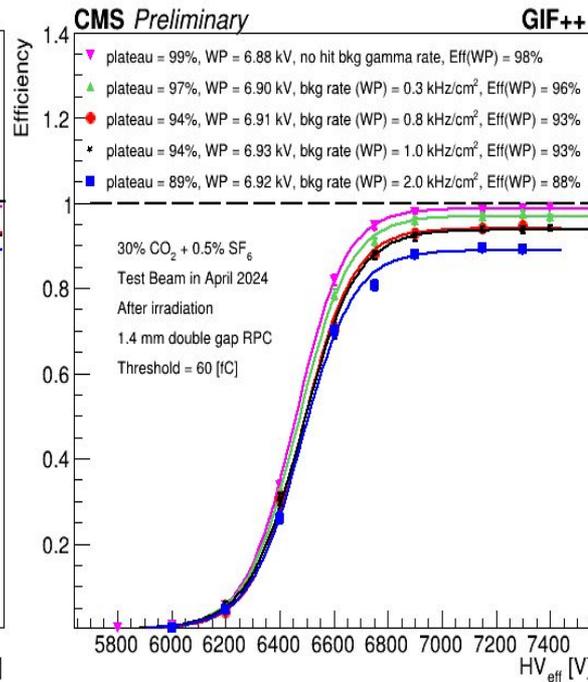
Validação com mistura padrão de gases: Ponto de operação (WP) consistente em torno de 7,2 kV e eficiência > 90% até 2 kHz/cm² (HL-LHC x 3).



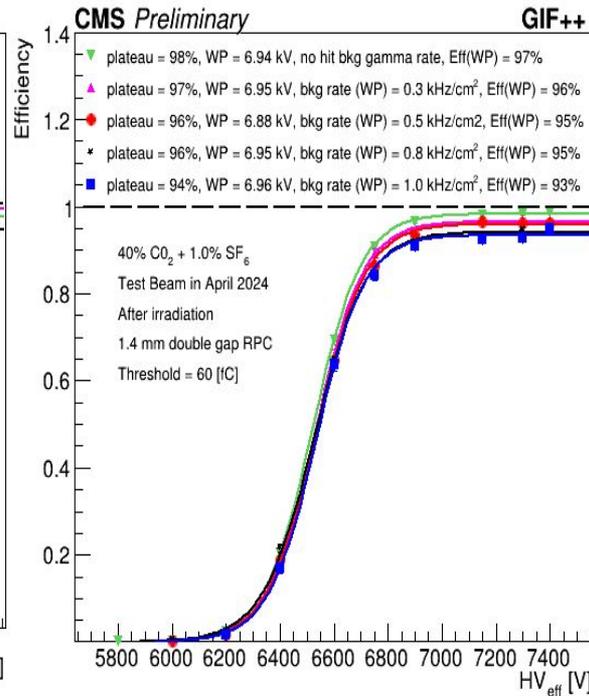
Resultados antes da irradiação



30% CO₂ + 1.0 % SF₆
 WP_{source OFF} ~ 7020 V



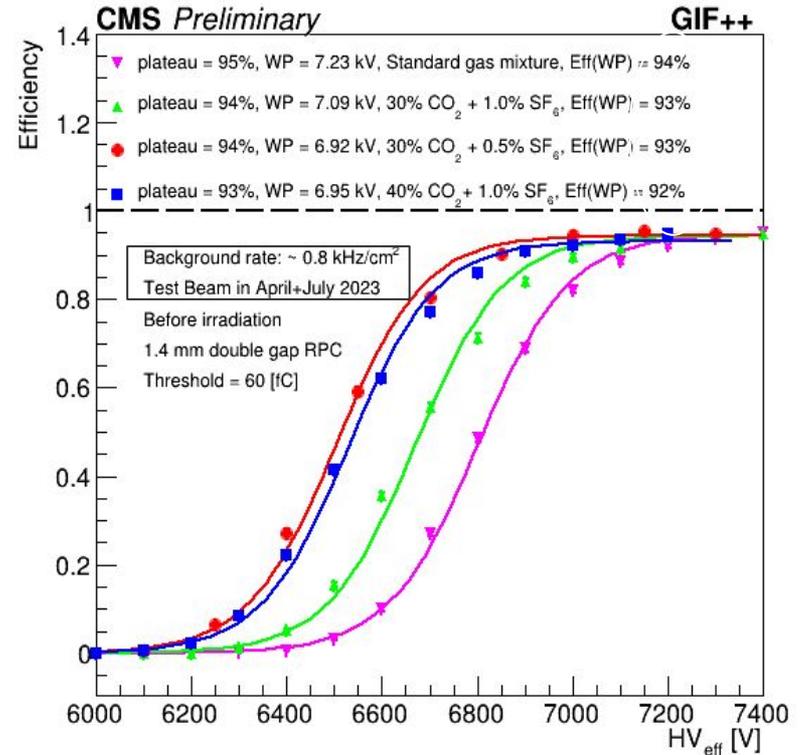
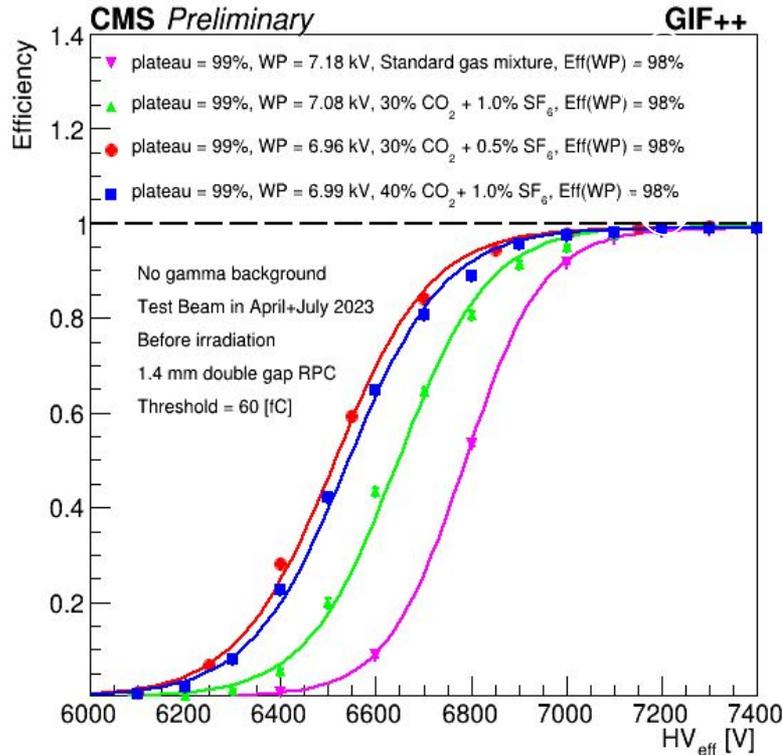
30% CO₂ + 0.5 % SF₆
 WP_{source OFF} ~ 6880 V



40% CO₂ + 1.0 % SF₆
 WP_{source OFF} ~ 6940

Eficiência consistente (mesma queda na taxa de fundo observada) e ponto de operação para diferentes misturas sob taxa de fundo gama de até 2 kHz/cm².

Resultados antes da irradiação



Pequena queda na eficiência dos múons com o aumento de CO2

Diferentes pontos de operação em diferentes misturas:

- A adição de CO2 reduz a densidade da mistura: ponto de operação mais baixo.
- O SF6 tem alta eletronegatividade: ponto de operação mais alto.

Todas as misturas alternativas apresentam um ponto de operação (WP) mais baixo em relação à mistura padrão!

Resultados após a irradiação

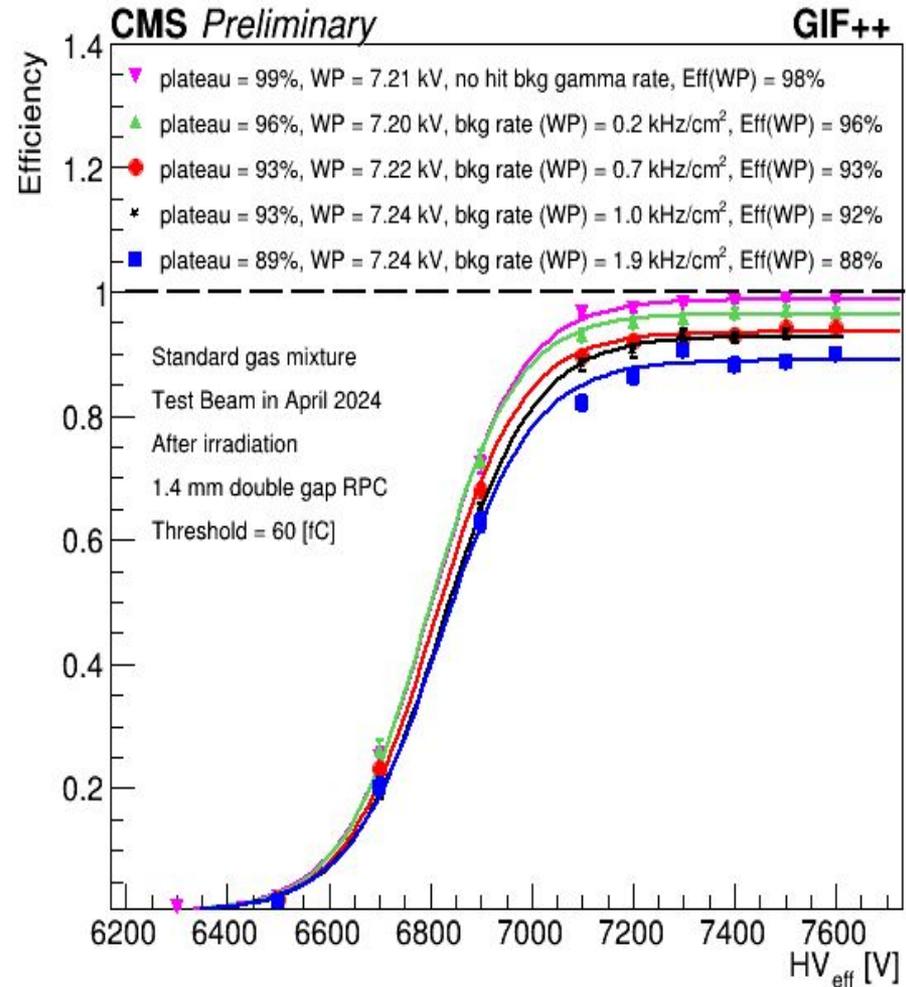
Durante o período sem feixe, uma campanha de irradiação dedicada foi realizada no GIF++

Foi coletado cerca de 40 mC/cm^2 , correspondendo a $\sim 4 \%$ do que é esperado durante o HL-LHC, dentro de um fator de segurança de 3.

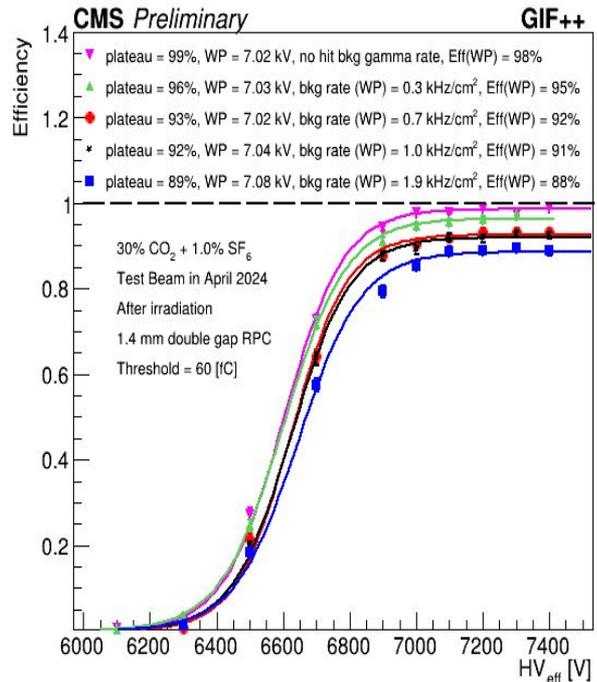
Revalidação com a mistura padrão de gases:

Eficiência consistente e estável e ponto de operação ($\sim 30 \text{ V}$ mais alto) para taxa moderada de fundo.

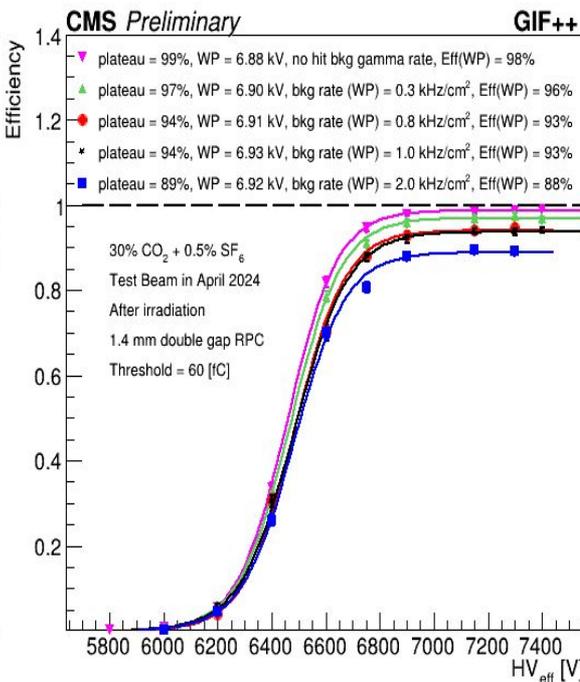
Queda na eficiência para alta taxa de fundo, principalmente devido aos aspectos da FEB, que não foi projetada para radiação tão alta.



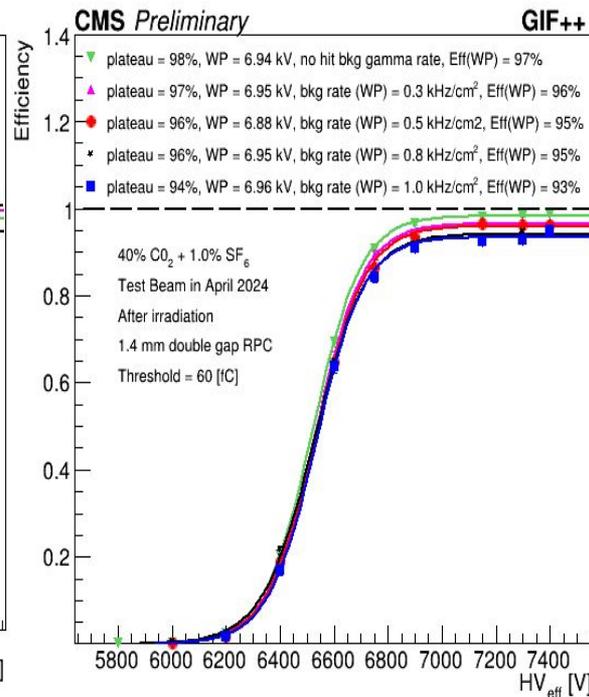
Resultados após a irradiação



30% CO₂ + 1.0 % SF₆
WP_{source OFF} ~ 7020 V



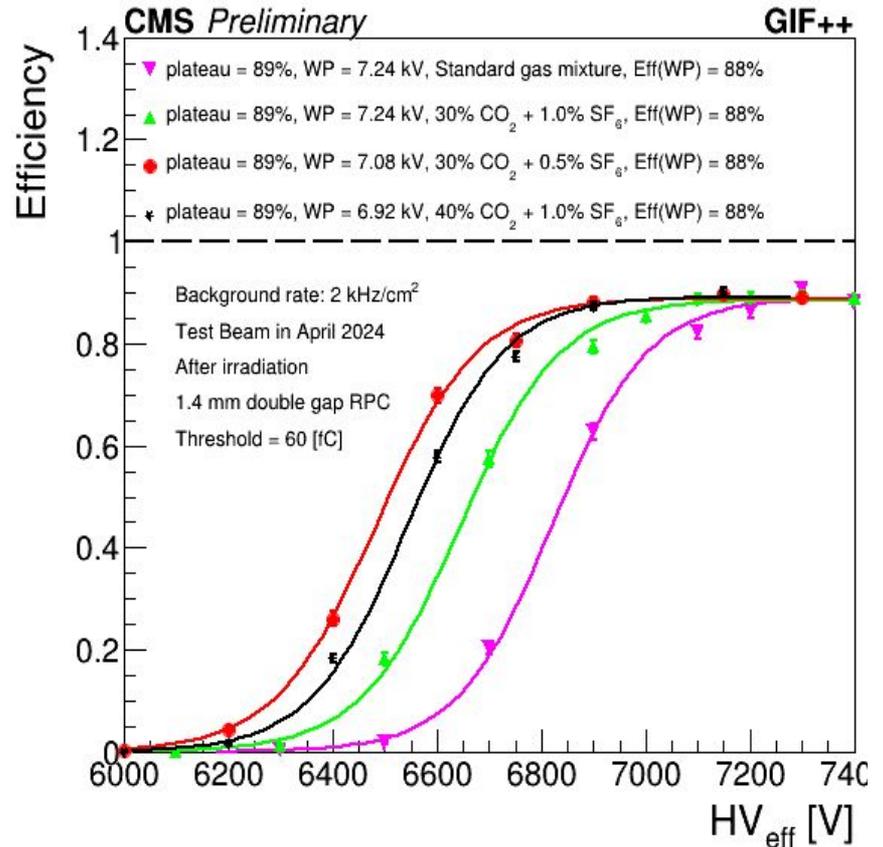
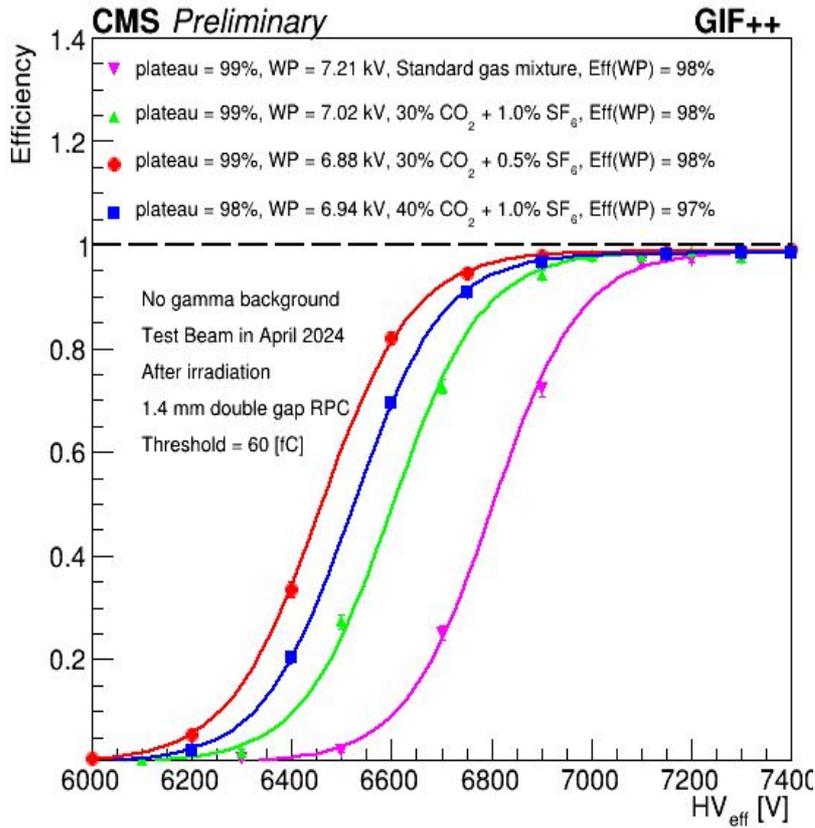
30% CO₂ + 0.5 % SF₆
WP_{source OFF} ~ 6880 V



40% CO₂ + 1.0 % SF₆
WP_{source OFF} ~ 6940 V

Eficiência consistente (mesma queda na taxa de fundo observada) e ponto de operação para diferentes misturas sob taxa de fundo gama de até 2 kHz/cm².

Resultados após a irradiação



Sem alteração na eficiência sem radiação.

Referências

- [1] "Joseph John Thomson". *Wikipédia, a enciclopédia livre*. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Joseph_John_Thomson. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [2] CHEMISTRYGOD. J. J. Thomson's cathode ray tube experiment. 2019. Acesso em: 18out. 2024. Disponível em: <https://chemistrygod.com/cathode-ray-tube-experiment>.
- [3] "O Átomo de Thomson". *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/o-atomo-thomson.html>
- [4] "Ernest Rutherford". *Wikipédia, a enciclopédia livre*. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ernest_Rutherford. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [5] "Experimento de Geiger-Marsden". *Wikipédia, a enciclopédia livre*. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Geiger-Marsden. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [6] "Modelo Atômico de Rutherford". *Colada Web*. Disponível em: <https://www.coladaweb.com/quimica/quimica-geral/modelo-atomico-rutherford>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [7]"James Chadwick – Biographical". *The Nobel Prize*. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1935/chadwick/biographical/>. Acesso em: 8 jan. 2025.

Referências

- [8] "O que é interação de radiação beta com matéria – definição". *Radiation Dosimetry*. Disponível em: <https://www.radiation-dosimetry.org/pt-br/o-que-e-interacao-de-radiacao-beta-com-materia-definicao/>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [9] FERNANDEZ, P. Neutrino Physics in Present and Future Kamioka Water-Cherenkov Detectors with Neutron Tagging. Tese (Doutorado), 02 2017
- [10] "Clyde Cowan". *Wikipédia, a enciclopédia livre*. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Clyde_Cowan. Acesso em: 8 jan. 2025.]
- [11] "Wolfgang Pauli – Facts". *The Nobel Prize*. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1945/pauli/facts/>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [12] Niaz, M., Klassen, S., McMillan, B., & Metz, D. (2010). Reconstruction of the history of the photoelectric effect and its implications for general physics textbooks. *Science Education*, 94(5), 903-931.
- [14] "Carl David Anderson". *Wikipédia, a enciclopédia livre*. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Carl_David_Anderson. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [15] "O adeus de um parceiro simples e leal". *Unicamp, Jornal da Unicamp*. Disponível em: https://unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/marco2005/ju281pag09.html. Acesso em: 8 jan. 2025.

Referências

- [16-17] GRIFFITHS, David J. *Introdução à física de partículas*. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. p. XX. (Imagem do méson π e o eightfold way).
- [18] PHYSICS IN HISTORY. "Texto do tweet." X (antigo Twitter), 21 mar. 2023. Disponível em: <https://x.com/PhysInHistory/status/1774640399774003594?lang=bg&mx=2>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [19] "Richard P. Feynman". *Gradiva*. Disponível em: <https://www.gradiva.pt/autores/9104/richard-p.-feynman>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [20] "Modelo Padrão". *Wikipédia, a enciclopédia livre*. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Modelo_Padrão. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [21] FIGUEIREDO, Luiz. "Six fundamental forces are predicted by EHT: Three of them are gravity-like." *ResearchGate*, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/fig2-Six-fundamental-forces-are-predicted-by-EHT-Three-of-them-are-gravity-like_fig2_270897994. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [22] "J/ ψ meson." *Quantum Diaries*, 6 ago. 2014. Disponível em: <https://www.quantumdiaries.org/2014/08/06/jpsi/>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [23] "J/ ψ meson". *Wikipédia, a enciclopédia livre*. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/J/psi_meson. Acesso em: 8 jan. 2025.

Referências

- [24] "Aceleradores". *Felipe9aes* – *Partículas*. Disponível em: <https://felipe9aes.wixsite.com/particulas/aceleradores>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [25-30] "Lesson: The CMS detector". *CMS Open Data Workshop 2023*. Disponível em: <https://cms-opendata-workshop.github.io/workshop2023-lesson-cms-detector/>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [31] *Summer Student Picture 2024*. *CERN Document Server*. Disponível em: <https://cds.cern.ch/record/2905174>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [32] *Colisões de íons pesados no LHC*. *CERN Document Server*. Disponível em: <https://cds.cern.ch/record/2648517>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [33] 10 anos da descoberta do bóson de Higgs e acelerador de partículas retoma colisões". *RFI – Radio France Internationale*, 4 jul. 2022. Disponível em: <https://www.rfi.fr/br/podcasts/reportagem/20220704-cern-celebra-10-anos-da-descoberta-do-boson-de-higgs-e-acelerador-de-particulas-retoma-colisoes>. Acesso em: 8 jan. 2025.

- [34] NETA, C. dos S. A. Produção de Diléptons em Colisões de Íons Pesados no Grande Colisor de Hádrons. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pelotas, Instituto de Física e Matemática, Programa de Pós-Graduação em Física, Pelotas, Brasil, 2019. Dissertação de Mestrado. Disponível em: https://wp.ufpel.edu.br/pgfisica/files/2024/11/Dissertacao_CELSINA_DOS_SANTOS_AZEVEDO_NETA.pdf
- [35] KISIEL, A. Proc. spie. 9662, 966232. In: Proceedings of SPIE. [S.l.]: SPIE, 2015. v. 9662, p. 966232.
- [36] *Factor of nuclear modification RAA* CERN Document Server. Disponível em: <https://cds.cern.ch/record/1472735>. Acesso em: 8 jan. 2025.
- [37] WIKIMEDIA. Normal Distribution PDF.svg. 2008. Acesso em: 17 nov. 2024. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Normal_Distribution_PDF.s
- [38] WIKIMEDIA. CrystalBallFunction.svg. 2010. Acesso em: 17 nov. 2024. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CrystalBallFunction.sv>