

Uma introdução à física do LHC

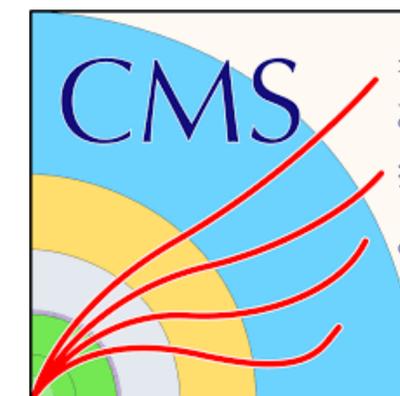
Estágios de verão do LIP



TÉCNICO
LISBOA



FCT
Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia



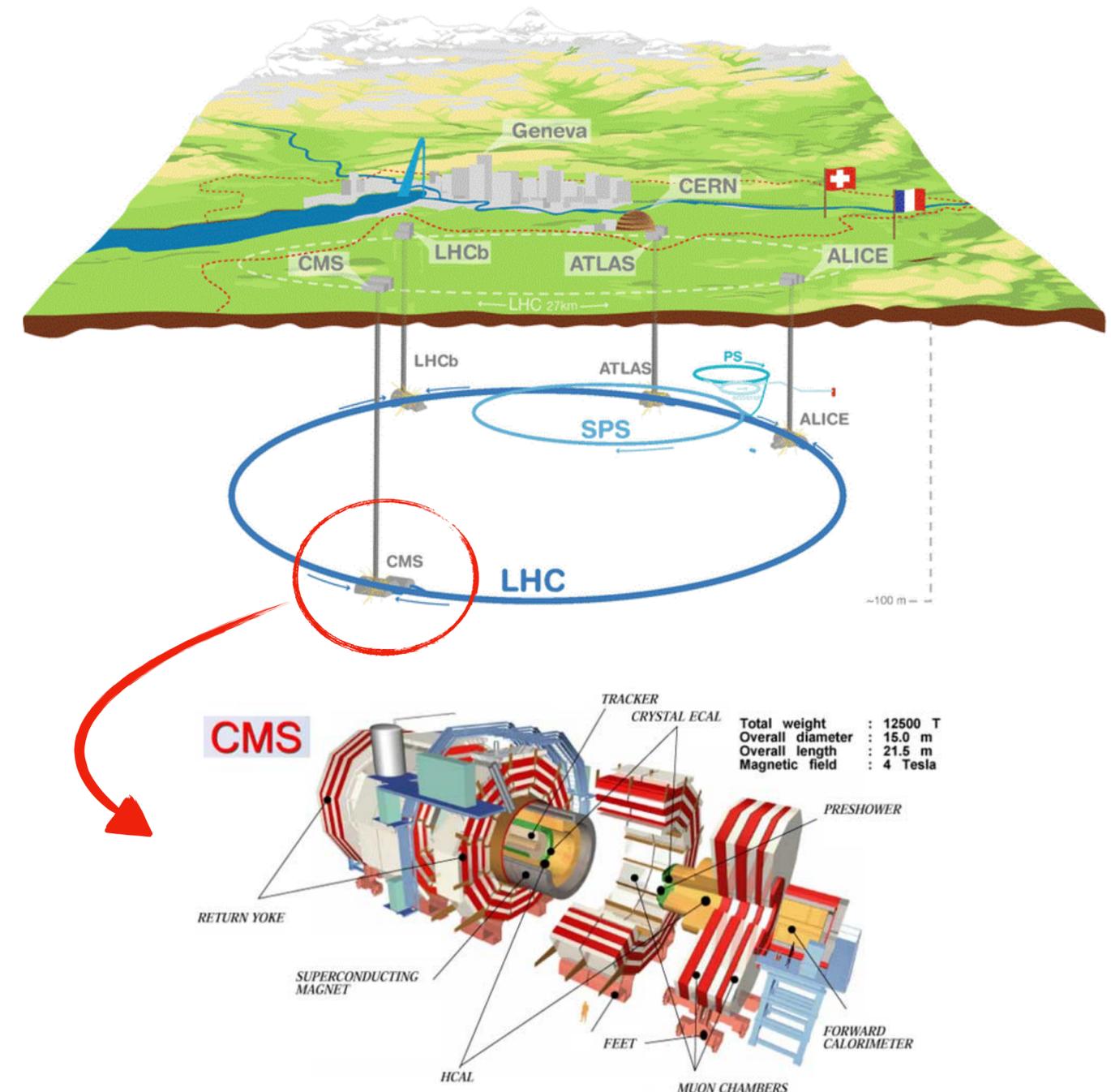
Matteo Pisano – Dia 26 de Julho 2022

Observação: os erros gramaticais foram adicionados para o vosso prazer e entretenimento.

O Large Hadron Collider

Introdução

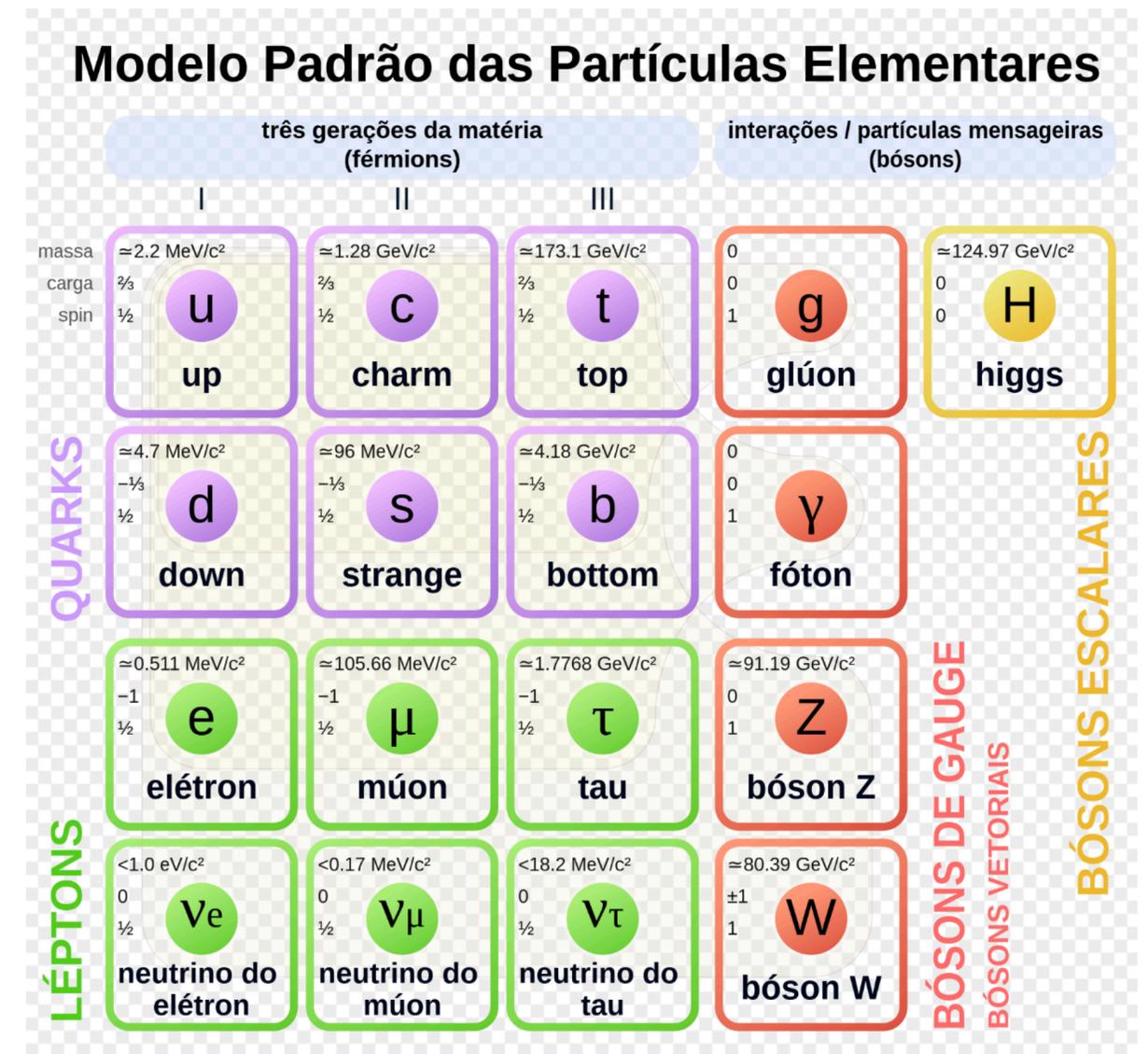
- O Large Hadron Collider (LHC) é um acelerador de partículas que fica na Suíça.
- O LHC acelera os prótons até terem uma energia de 6.5 TeV e uma velocidade próxima à velocidade da luz;
- A energia alcançada pelo prótons é parecida à energia dum mosquito!
- Depois, os prótons interagem em correspondência de detetores de partículas.
- A interação produz uma grande quantidade de partículas no estado final, que podem ser detectadas.
- Em particular, é possível medir o momento e a energia de cada partícula.



O Large Hadron Collider

Os objetivos da experiência

- O principal objetivo da experiência é estudar a estrutura elementar da matéria (ou seja verificar o modelo padrão):
 - Demonstrar a existência das partículas do modelo padrão e estudar as suas características;
 - Verificar que os processos físicos aconteçam com a “probabilidade” (seção eficaz) esperada;
 - Ir a caça de partículas exóticas, que não encontramos no nosso dia a dia (previstas pelo modelo padrão ou não)
 - Muito mais!



O Large Hadron Collider

6.5 TeV... Por quê precisamos de partículas muito energéticas?

- Acelerar os prótons até uma energia de 6.5 TeV é um desafio científico e tecnológico muito avançado.
- Por quê precisamos de partículas com velocidade próxima a velocidade da luz e muito energéticas?
 - Pelo princípio da conservação da massa energia (ver slides 13-14), é possível trocar a energia dos prótons em massa. Isso permite de gerar mais partículas no estado final/ gerar partículas mais pesadas.
 - Para além disso, nos primeiros momentos de formação do nosso universo, as partículas eram muito energéticas → estudar partículas de alta energia significa estudar as condições primordiais do nosso universo.

Detectar as partículas

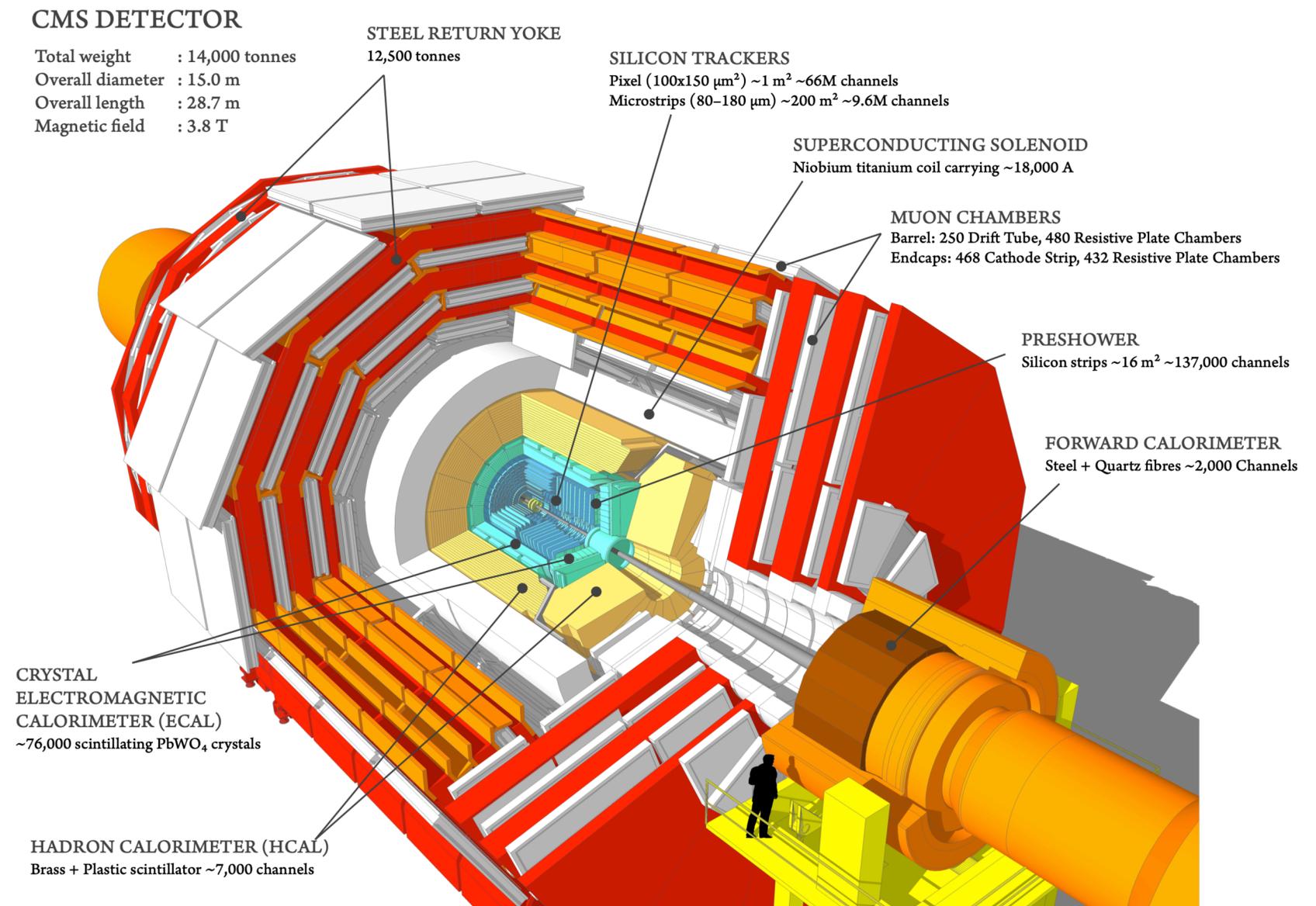
Um desafio pelos cientistas

- As partículas elementares têm dimensões inferiores aos núcleos atômicos.
- Por isso, não é possível observar diretamente as partículas do modelo padrão.
- Por tanto, é preciso observar como as partículas interagem com o detetor e, a partir das características da interação, é possível identificá-las.
- No LHC os prótons podem interagir em quatro pontos distintos:
 - À volta de cada ponto de interação foi construído um detetor de partículas;
 - Cada detetor é diferente, mas o princípio de funcionamento é o mesmo: as partículas produzidas pela interação passam através do detetor, que mede as quantidades cinemáticas das partículas;
 - Hoje vamos focar a nossa atenção sobre o detetor CMS, mas os outros são análogos.

O CMS (Compact Muon Solenoid)

Um exemplo de detetor “multi-purpose”

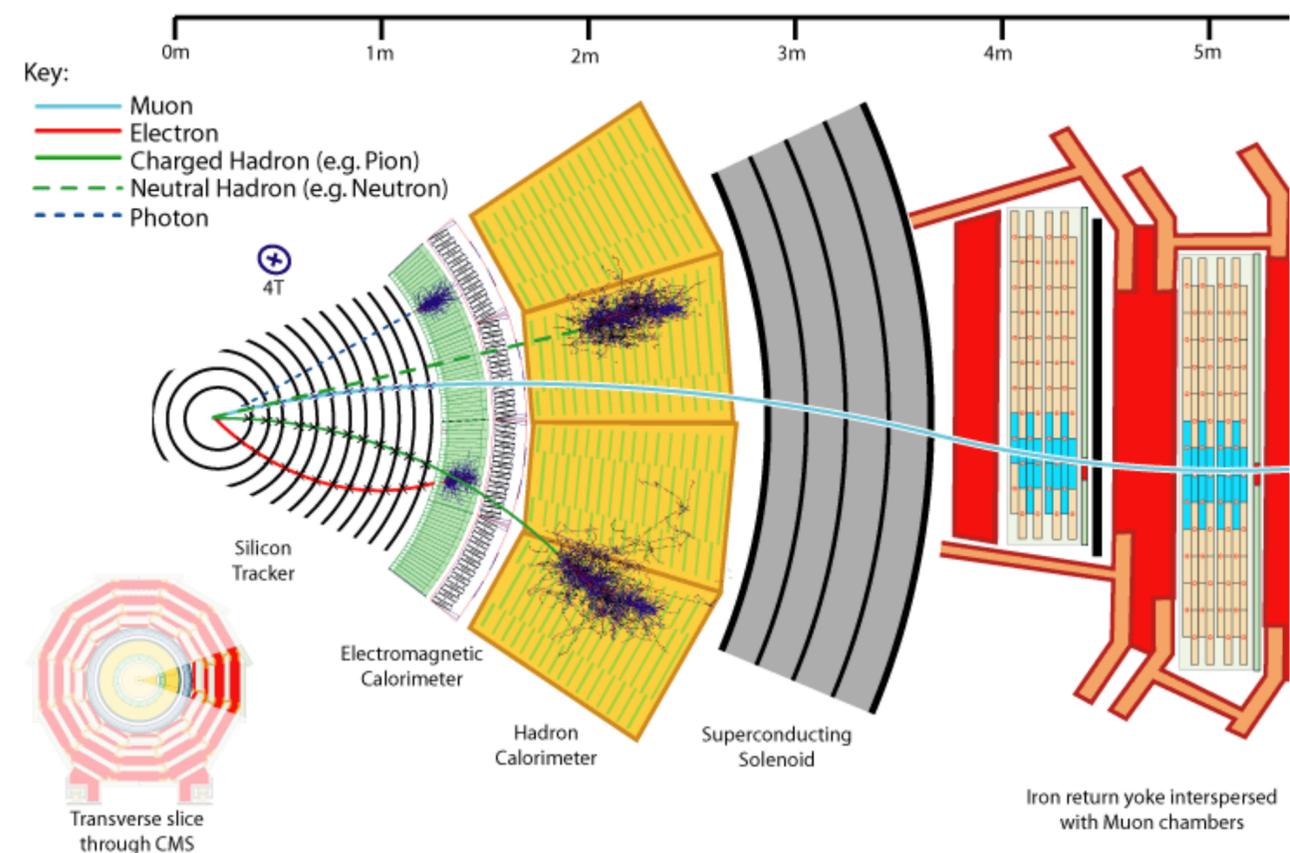
- O CMS é o detetor de partículas localizado à volta do ponto de interação 5 (IP5);
- Trata-se dum detetor “multi purpose”, ou seja construído para estudar vários processos físicos diferentes.
- É constituído por vários detetores diferentes.
- Cada detetor tem uma função específica e permite de identificar/ medir partículas diferentes.



O CMS (Compact Muon Solenoid)

Um exemplo de detetor “multi-purpose”

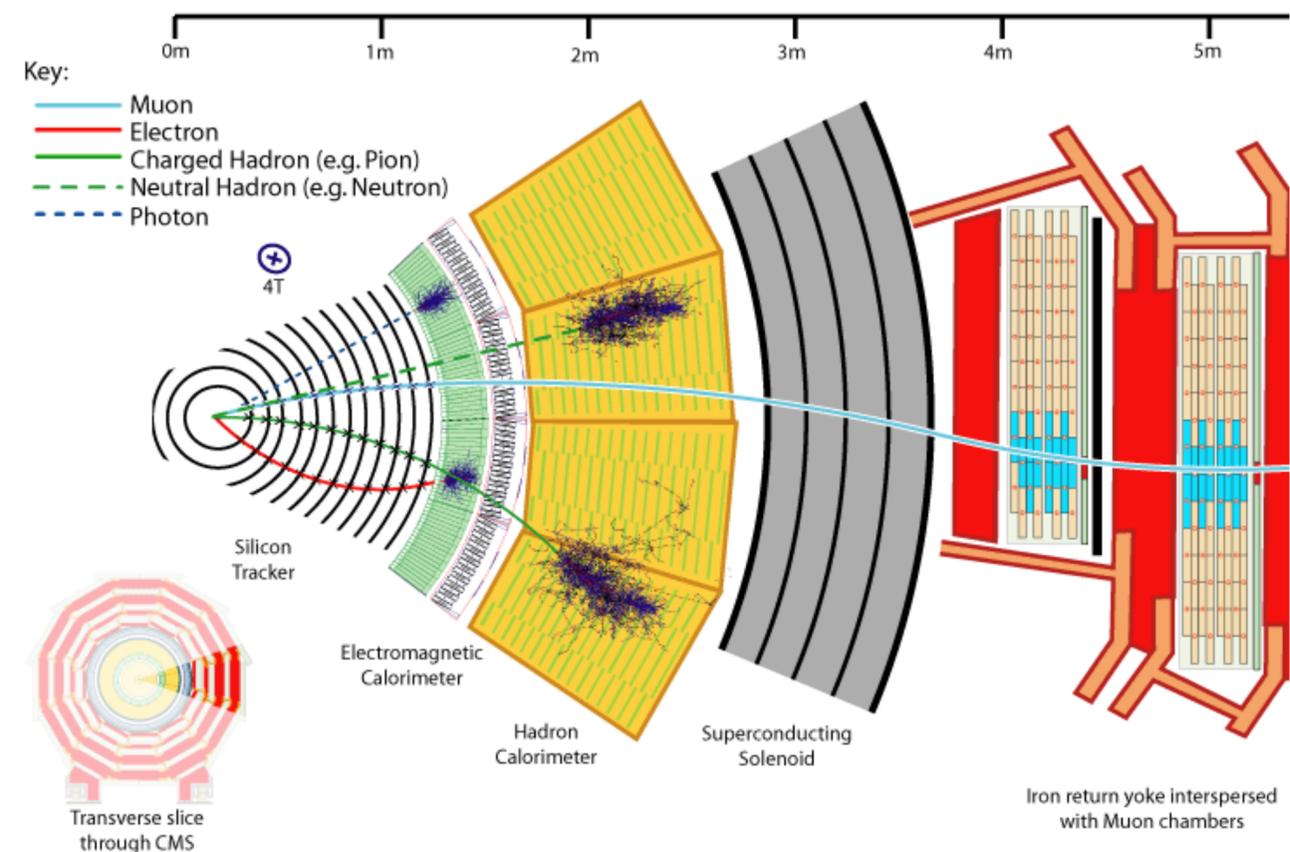
- Tracker:
 - É o detetor mais perto do IP5.
 - É realizado com silício e permite de detectar as partículas carregadas;
 - Devido à presença dum campo magnético dentro do detetor, as partículas carregadas cumprem trajetórias curvas;
 - A partir do raio da curva é possível calcular o momento da partícula.



O CMS (Compact Muon Solenoid)

Um exemplo de detetor “multi-purpose”

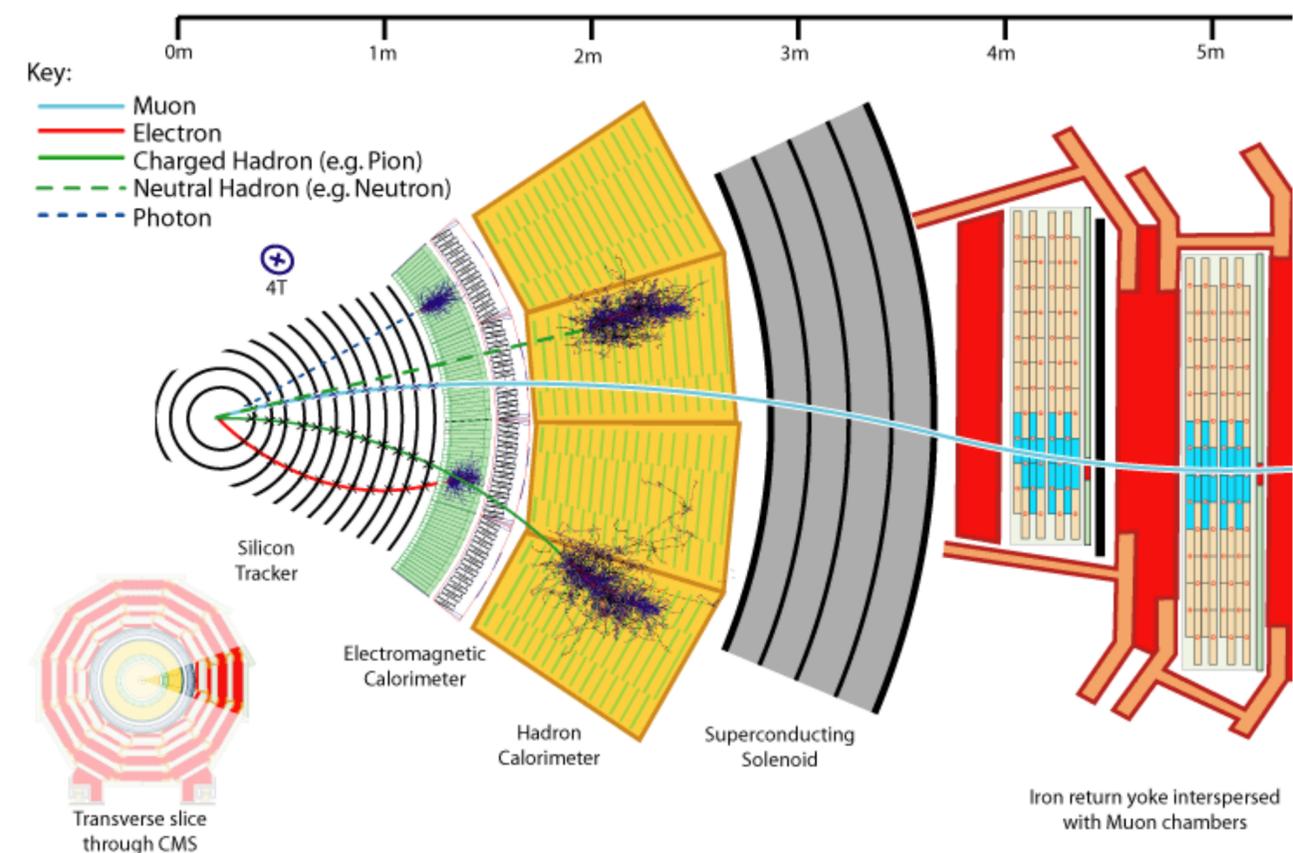
- Calorímetro eletromagnético:
 - Fica à volta do tracker.
 - Trata-se dum detetor que consegue parar os eletrões e os fótons;
 - O detetor é feito de muitos grânulos.
 - Cada grânulo consegue “absorber” parte da energia do eletrão/fotão que interagiu;
 - A partir dessa informação é possível reconstruir a energia da partícula.



O CMS (Compact Muon Solenoid)

Um exemplo de detetor “multi-purpose”

- Calorímetro hadrônico:
 - Este detetor tem o papel de parar os hadrões (partículas formadas por quarks)
 - Analogamente ao calorímetro eletromagnético, consegue medir a energia dos hadrões;
- Câmaras muônicas:
 - Conseguem detectar os muões;
 - O CMS é a experiência do LHC que permite detectar os muões com maior precisão.



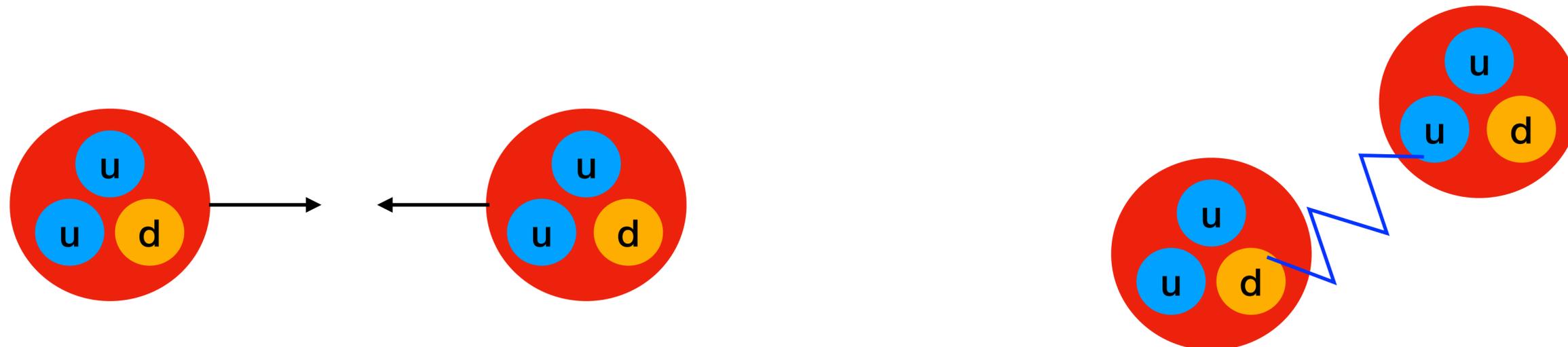
Fazemos o ponto da situação

- Até agora expliquei como são detectadas várias partículas pelo CMS.
- Contudo, ainda temos de responder a varias perguntas:
 - O que acontece quando dois prótons interagem? Como são geradas as partículas do estado final?
 - Nas slides 5-7 expliquei como detectar os eletrões, muões, fótons e hádrões... E as outras partículas?

As interações entre prótons

Uma interação mais complicada do que parece...

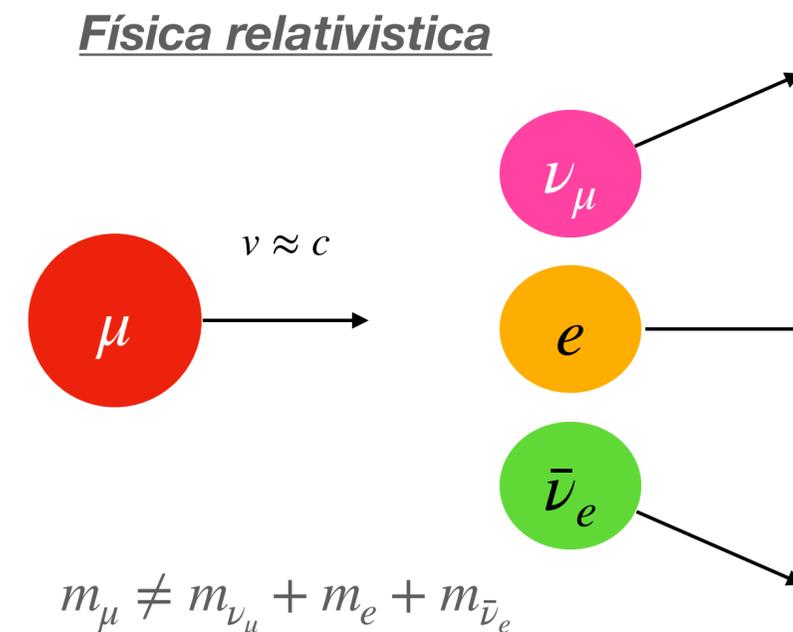
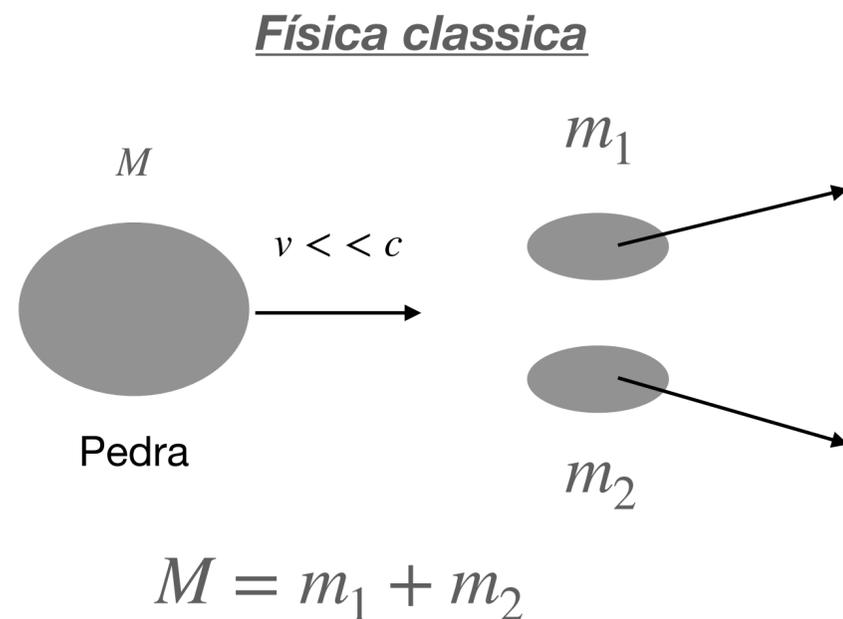
- Os prótons não são partículas fundamentais: eles são formados por três quarks (up, up, down).
- A gente sabe que, durante a interação, a energia de cada próton é 6.5 TeV, mas a energia de cada quark é desconhecida.
- A interação tem lugar entre um quark de um próton e um quark do outro próton (ou entre glúons).
- Por isso, a quantidade de energia em jogo na interação é desconhecida.



As interações entre prótons

Uma interação mais complicada do que parece...

- Para além disso, os prótons têm uma velocidade próxima à velocidade da luz;
- Por isso, não podemos aplicar as regras da mecânica newtoniana, mas temos de apostar na mecânica relativística.
- Segundo a teoria da relatividade a energia total de uma partícula é a “suma” entre o momento da partícula (contributo cinético) e a massa da partícula: $E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$
- Pelo princípio de conservação da energia, o valor de E tem de permanecer igual durante um processo físico. Contudo, parte da massa pode ser trocada em momento!



Os princípios de conservação na física da relatividade

Uma introdução não politicamente correta...

- Se tivéssemos de falar da teoria da relatividade a serio, seria preciso falar do principio de invariância da velocidade da luz.
- A partir desse principio é possível mostrar que as leis da física tem de ser modificadas para conservar a velocidade da luz.
- De facto, os cientistas observaram que quantidades cinemáticas como o momento e a energia das partículas não se conservam se mantemos a definição clássica ($p = mv$, $E = \frac{1}{2}mv^2$).
- Por isso, eles escolheram de mudar a definição destas duas quantidades assim que fiquem conservadas também na física da relatividade: $p = \gamma mv$, $E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$.

A massa invariante

Uma nova quantidade para definir um sistema de partículas.

- Considerem um sistema formado por N partículas.

- Cada partícula tem um momento \vec{p}_i e uma energia E_i .

- O momento total do sistema será: $\vec{p}_{tot} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_N = \sum_{i=1}^N \vec{p}_i$

- Analogamente, a energia total do sistema será $E_{tot} = \sum_{i=1}^N E_i$

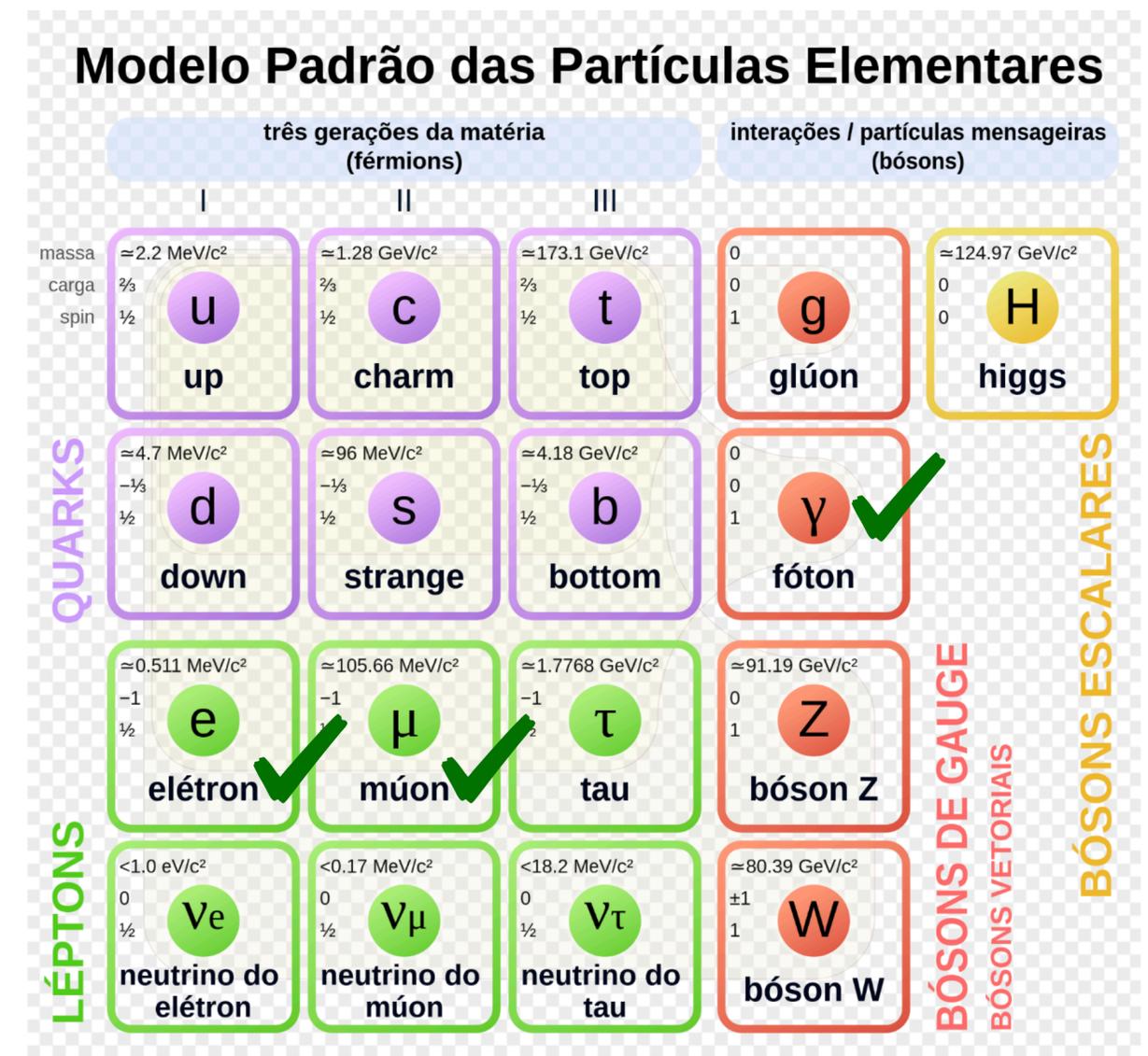
- Como $E_{tot} = \sqrt{p_{tot}^2 c^2 + m_{tot}^2 c^4}$, então posso inverter a formula e escrever: $m_{tot} = \sqrt{\frac{E_{tot}^2 - p_{tot}^2 c^2}{c^4}}$

- m_{tot} chama-se “massa invariante”. A massa invariante é conservada nos processos físicos.

O modelo padrão: um zoo de partículas!

Quais partículas podem ser criadas durante a interação entre os prótons?

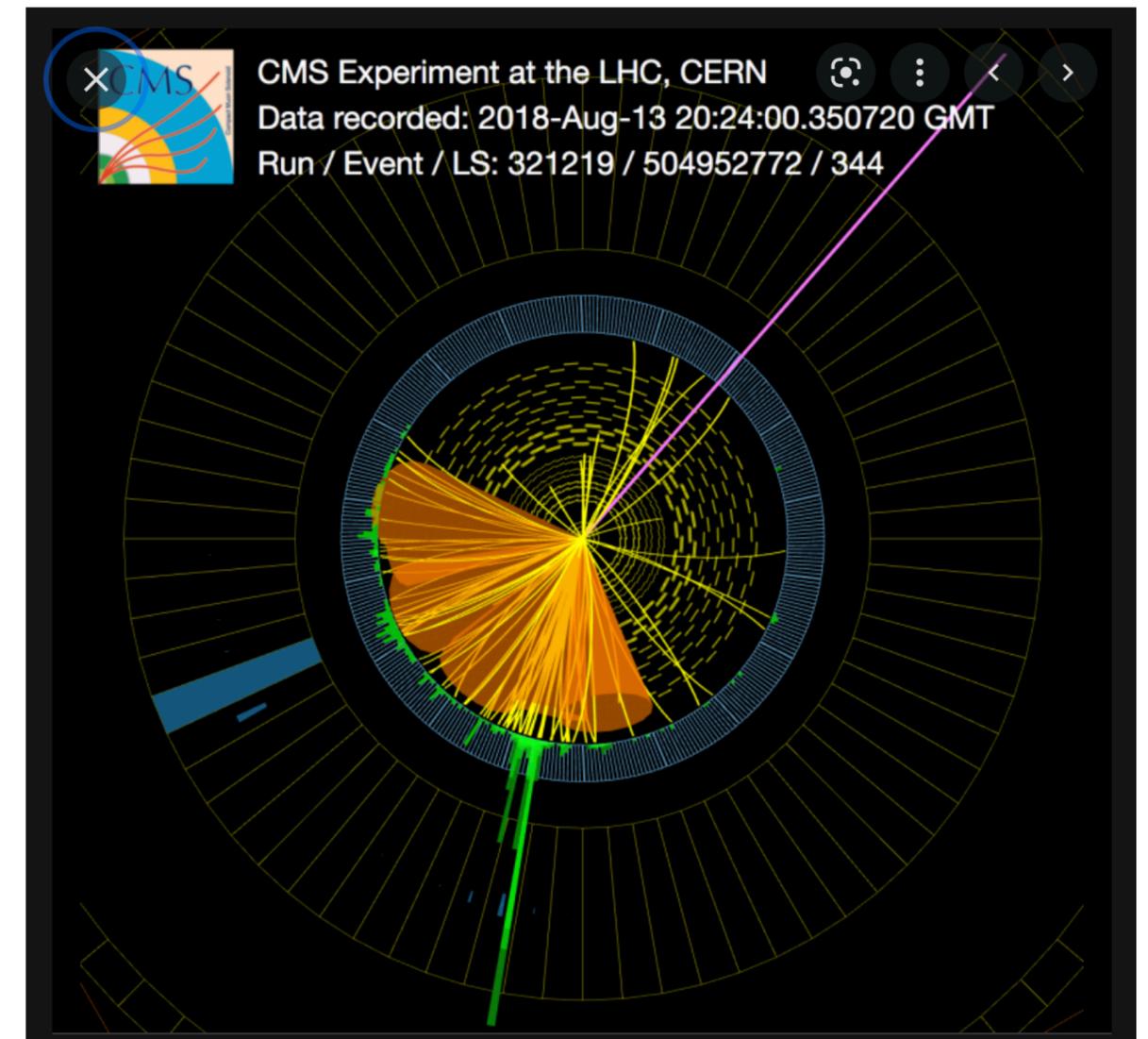
- Durante a interação, parte da energia dos prótons é utilizada para criar novas partículas.
- Em princípio, no estado final posso encontrar uma qualquer partícula do modelo padrão.
- De facto, é possível detectar apenas as partículas que interagem com o detetor, ou seja:
 - As partículas estáveis;
 - As partículas com uma vida media suficiente para interagir com o detetor.



Os neutrinos.

Energia em falta.

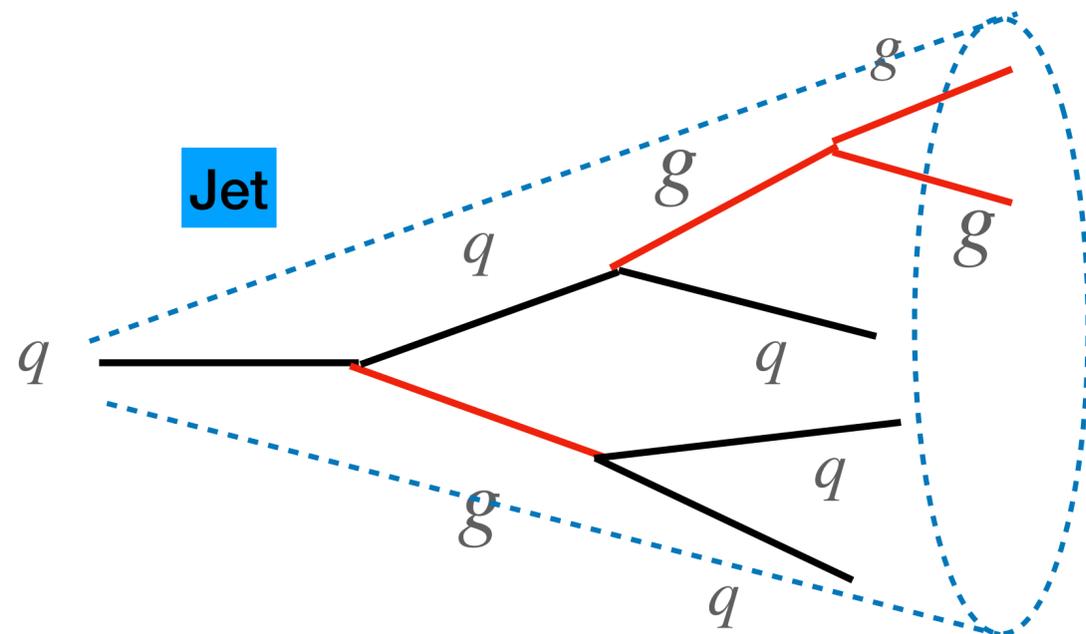
- Supostamente os neutrinos teriam de ser detetados pelo CMS: são partículas estáveis que passam através do detetor.
- Infelizmente, a “probabilidade” de interação entre um neutrino e a matéria é muito baixa, por isso os neutrinos nunca interagem com o detetor.
- Por tanto, **não podem ser detectados diretamente.**
- Contudo, como, em física, a energia tem de ser conservada, é possível interpretar a falta de energia como a presença de um ou mais neutrinos.



Os quarks.

Um conjunto de partículas que não querem ficar sozinhas.

- Resulta muito complicado detectar os “quarks” no LHC.
- De facto, os quarks irradiam energia através da emissão de glúons: $q \rightarrow q + g$;
- Para além disso, os glúons podem decair num par de quarks ou podem gerar um par de glúons: $g \rightarrow q\bar{q}$, $g \rightarrow gg$.
- Por isso, um quark sozinho pode gerar uma quantidade considerável de partículas no estado final.
- Todas as partículas resultam confinadas num cono chamado “jet”.

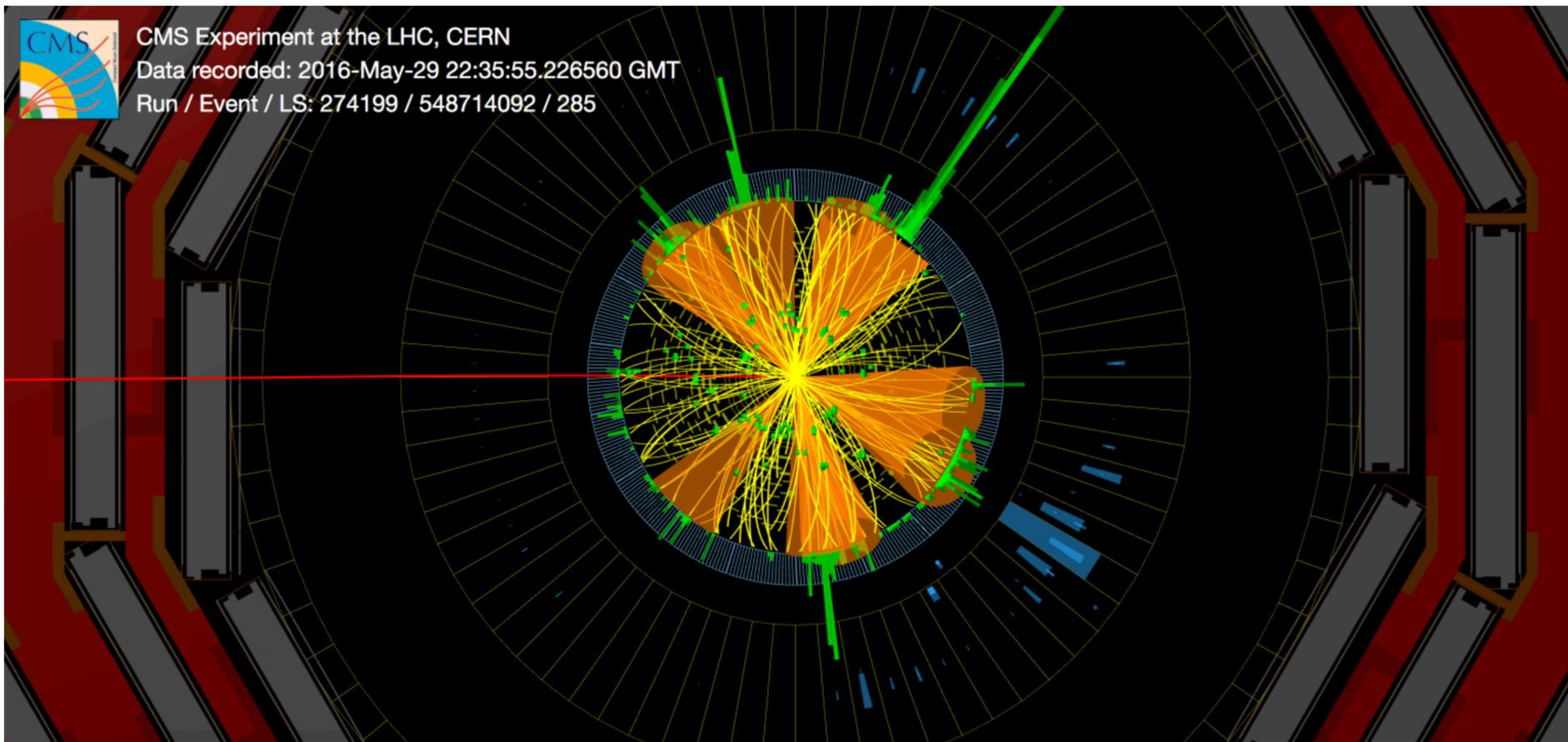


- Resulta complicado determinar a direção do quark que criou o jet;
- Resulta complicado medir as quantidades cinemáticas do quark inicial

Os quarks.

Um conjunto de partículas que não querem ficar sozinhas.

- Os acontecimentos podem ser caracterizados pela presença de vários jets sobrepostos.
- Neste caso, resulta particularmente complicado determinar a energia de cada jet.



- Para além disso, é de referir que até agora não existem (pelos quarks ligeiros) algoritmos que permitam reconhecer qual é o quark que gerou um jet:
 - Os quarks u,d,s,c são indistinguíveis;
 - Apenas o quark b pode ser reconhecido.

O quark top

A partícula mais pesada do modelo padrão.

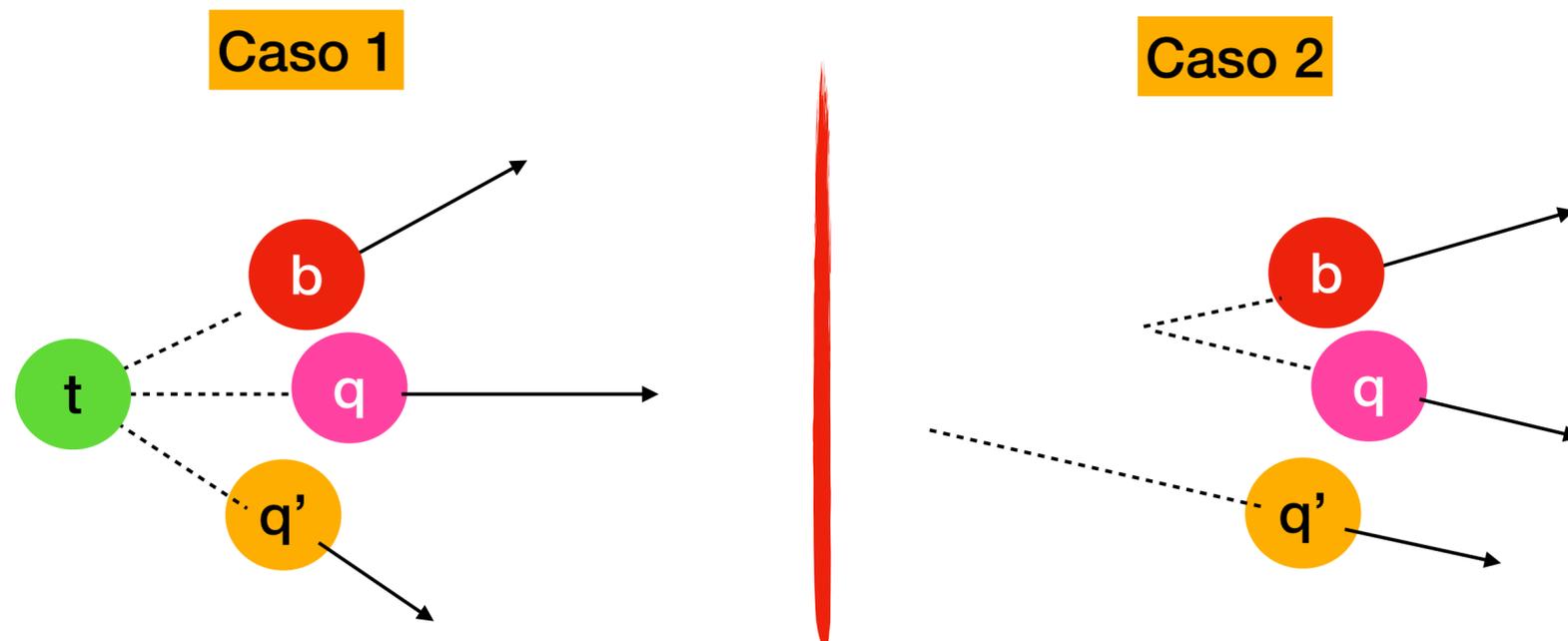
- O quark top é a partícula mais pesada do modelo padrão: tem uma massa igual a um átomo de ouro!
- O quark top decai num quark bottom e num bosão W: $t \rightarrow bW$.
- O bosão W pode decair em quarks ligeiros ou num par leptão+neutrino:
 - $W \rightarrow q\bar{q}'$ $W \rightarrow e + \bar{\nu}_e$ $W \rightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu$
- Como o decaimento acontece muito rapidamente, não é possível detectar o quark top.
- Contudo, **é possível detectar as partículas que resultam do decaimento!**
 - Em presença duma partícula altamente instável, temos de olhar aos produtos de decaimento e, a partir deles, reconstruir a partícula pai!

Como reconstruir as partículas

Um guia para principiantes.

- Imaginem ter no estado final três partículas: um quark b, e dois quarks ligeiros.
- As três partículas são o produto do decaimento dum quark top ou são três partículas produzidas independentemente?
- Pois, a resposta não é unívoca e existem várias técnicas para responder a pergunta.

Técnica 1



- As trajetórias das partículas apontam todas ao mesmo ponto?
 - Sim: boa! Se calhar o top decaiu nesse ponto!
 - Não: mmmh... as três partículas não podem ser geradas pelo mesmo decaimento...

Como reconstruir as partículas

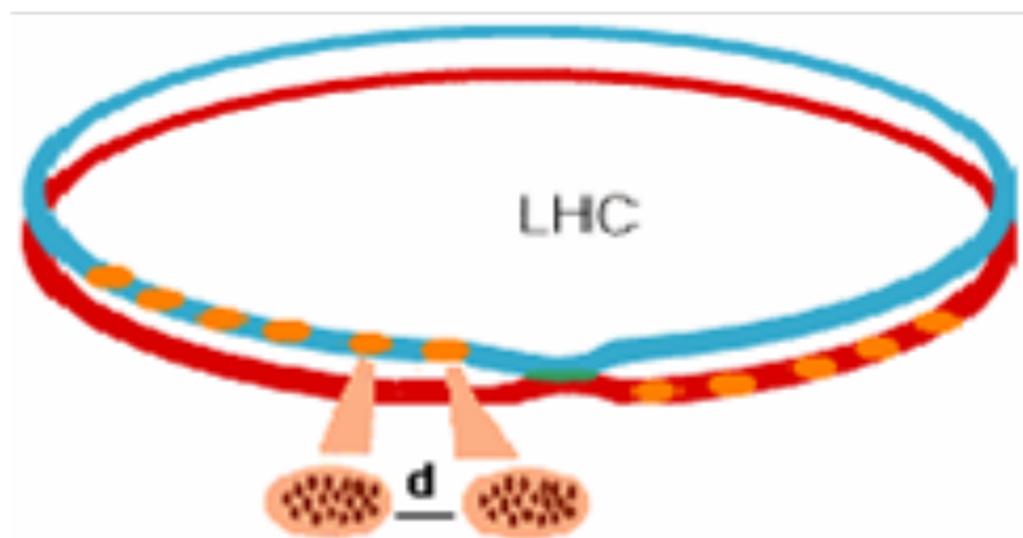
Um guia para principiantes.

- Técnica dois: calcular o valor da massa invariante das partículas.
- Se o resultado for igual à massa do quark top, então, pelo princípio de conservação da massa invariante, as três partículas vem do decaimento do top;
- Embora eu tenha introduzido estas duas técnicas para estudar o decaimento do quark top, podem ser aplicadas em outros processos!
- Por exemplo, o bóson Z pode decair num muão e num anti-muão... Podem aplicar o princípio da conservação da massa invariante para determinar se o par $\mu^+\mu^-$ vem do decaimento do Z!

O Pile-Up

Se todo isso pareceu complicado, ainda não viram nada.

- No CERN a gente quer estudar processos muito raros.
- Por isso, precisamos de guardar um numero elevado de acontecimentos para observar o fenómeno de interesse.
- Por tanto, é essencial maximizar o numero de interações entre protões por segundo.

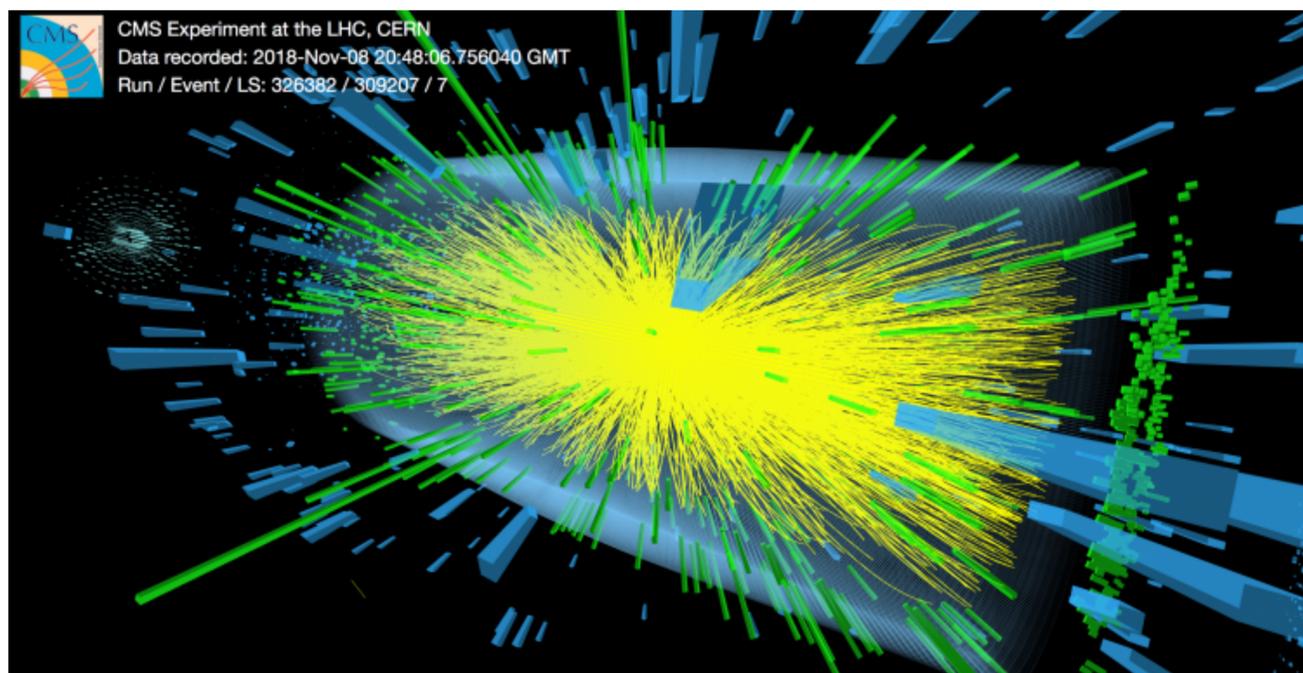


- No LHC os prótons são organizados em pacotes;
- O numero de pacotes enviados no LHC e o número de prótons em cada pacote é variável.
- Exemplo: no dia 28 de Junho 2017, no LHC circulavam 2556 pacotes e cada um continha $1.15 \cdot 10^{11}$ prótons.

O Pile-Up

Se todo isso pareceu complicado, ainda não viram nada.

- Quando dois pacotes interagem, acontecem, em media, 30 interações entre prótons.
- Por isso, no estado final observamos muitos acontecimentos diferentes sobrepostos!
- Este fenômeno chama-se pile-up.



- No estudo duma interação é fundamental excluir as traças que vem de interações secundarias (de baixa energia);
- Depois é preciso ir a caça das partículas que vem da interação que queremos estudar.

O sistema de trigger.

A memória do vosso móvel está cheia? Pois o CERN fica no mesmo patamar...

- O número de interações produzidas no LHC é enorme e não é possível guardar todos os acontecimentos.
- Por isso, existe um sistema chamado “trigger” que seleciona apenas os acontecimentos “relevantes”.
- Quais são os acontecimentos relevantes?
 - Depende da análise! Por isso existem vários triggers diferentes;
 - Normalmente, os triggers selecionam apenas acontecimento com um determinado número de eletrões/muões/...
 - Os triggers excluem partículas com energia muito baixa.
- Os triggers analisam o acontecimento em muito pouco tempo e baseando-se sobre informações básicas.

As unidades de medida da física de partículas

Uma porqueira.

- O segundo postulado da física da relatividade afirma que a velocidade da luz é constante em cada sistema de referência e o seu valor é $c = 3.0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.
- Para além disso, não existem partículas que podem viajar a velocidade superior de c .
- Por isso, os físicos decidiram de mudar o valor desta constante para uma quantidade mais fácil: $c = 1$. Sem unidade de medida!
- Com esta nova definição, todas as velocidades são adimensionadas:
 $v = 1.0 \cdot 10^8 \text{ m/s} \rightarrow 0.333$

As unidades de medida da física de partículas

Uma porqueira.

- Também as fórmulas vistas até agora podem ser simplificadas:

$$\bullet E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} \rightarrow E = \sqrt{p^2 + m^2}$$

- Isso tem uma consequência importante: $[E]=[m]=[p]$.
- Energia, momento e massa têm a mesma unidade de medida!
- Por convenção, a unidade escolhida é a unidade de medida da Energia.
- Na física de partículas, a unidade de medida utilizada para medir energia é o elettronvolt (eV):
 - $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

O Proton Precision Spectrometer (PPS)

Para além do sistema central.

- Em física existem processos de interação entre prótons chamados “processos de produção central e exclusiva”.
- Nestes processos, os prótons interagem sem “romper-se”.
- Cada próton emite um fóton. Os dois fótons interagem e criam um sistema X de partículas.
- Por outro lado, os prótons resultam desviados da trajetória inicial e têm uma energia inferior da inicial (parte da energia é utilizada para criar o sistema X).
- $pp \rightarrow p + X + p$: temos um par de prótons no estado inicial e no estado final!

O Proton Precision Spectrometer (PPS)

Para além do sistema central.

- Os prótons são desviados de um ângulo muito pequenino;
- Por isso, não podem interagir com o sistema central de CMS (eficiência geométrica do detetor limitada).
- Por tanto, foi construído o PPS, que é um sistema simétrico de detetores localizados a ± 200 m do ponto de interação.
- Eles conseguem medir o desvio dos prótons da trajetória original e, a partir disso, calcular o momento perdido pelos prótons durante a interação ($\xi = \frac{p_i - p_f}{p_i}$).
- Esta quantidade é relacionada com as quantidades cinemáticas do sistema X: $M_X = \sqrt{s\xi_1\xi_2}$, $Y_X = \frac{1}{2} \log \frac{\xi_1}{\xi_2}$.

