

Aceleradores e detetores de partículas: um guia para iniciantes.

Estágio de Verão Ciência Viva — Laboratório de Instrumentação e física experimental de partículas.



TÉCNICO
LISBOA



Matteo Pisano — 11 Julho 2023

A minha carreira em 60 segundos.

(Talvez 90...)

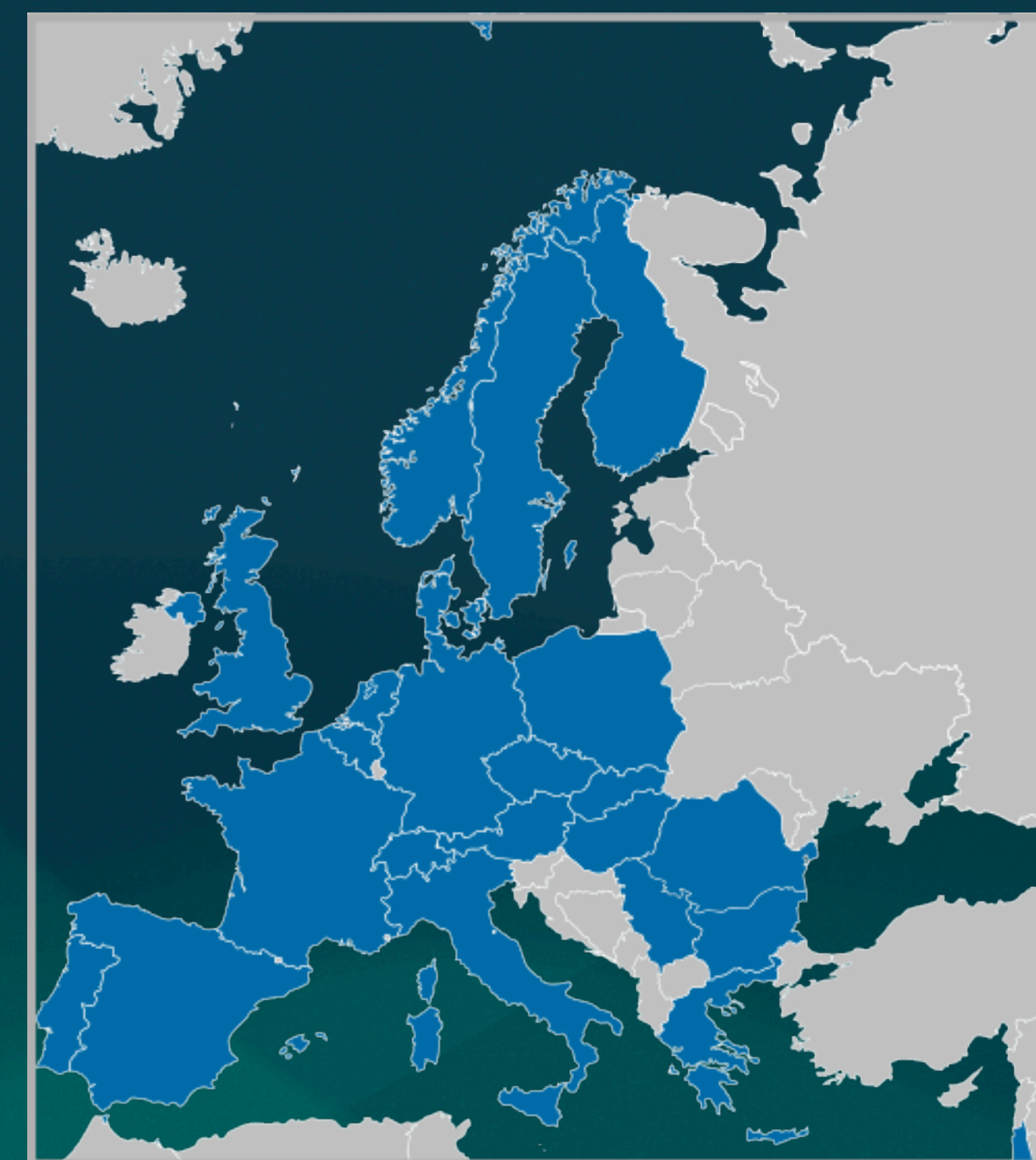
- Matteo Pisano (27 anos) — Formação:
 - Licenciatura em Física (20/20, UniGE);
 - Mestrado em Física Teórica (20/20, UniGE);
- **Ocupação atual:**
 - Doutoramento no grupo LIP-CMS (2020 — 2023);
 - Atividade de docência no IST (2021 — 2023);
- **Últimos prémios e reconhecimentos:**
 - Docente excelente do IST (Ano letivo 2021/2022);
 - 3º classificado no concurso de divulgação científica 3MT.



O CERN e o LHC

A organização e o Large Hadron Collider

- O CERN (Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear) é o **maior laboratório** de física de partículas **do mundo**.
- Foi fundado em 1954 e à data de hoje conta com **23 Estados-Membros**, incluindo **Portugal**.
- O laboratório fica na fronteira **Franco-Suíça**;
- A organização tem quatro objetivos principais:
 - Estudar a **física fundamental**;
 - **Desenvolver as tecnologias** adequadas para este efeito;
 - **Unir os cientistas de todo o mundo** para alcançar resultados de interesse comum;
 - **Formar jovem físicos** através de eventos de divulgação e de formação avançada.

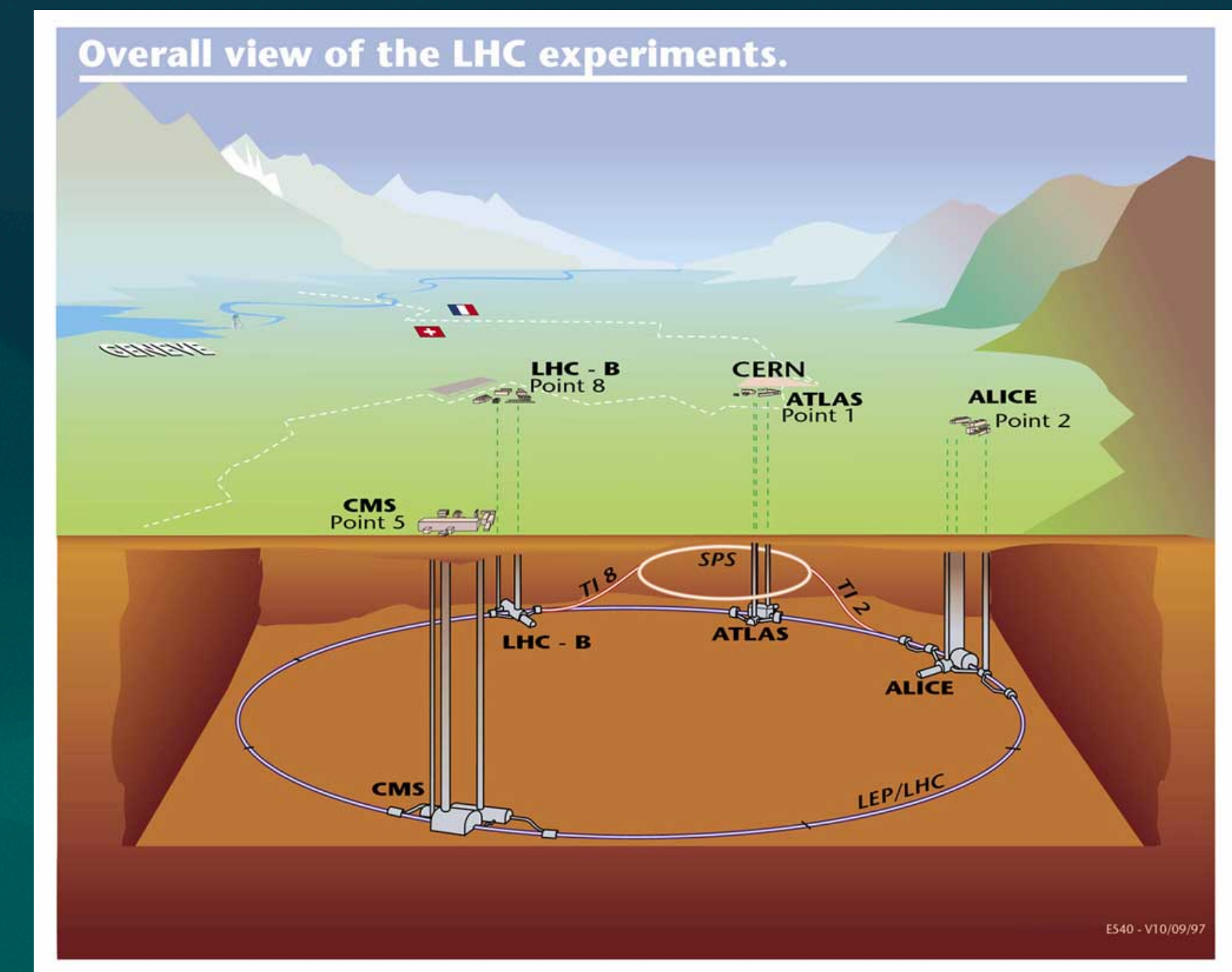


Estados membros

O CERN e o LHC

A organização e o Large Hadron Collider

- Ao longo das últimas décadas, a organização **construiu vários aceleradores** para cumprir os seus ambiciosos objetivos;
- Em particular, **em 1998**, o **LHC** (Large Hadron Collider) **começou a ser construído**;
- A **primeira colisão** entre partículas carregadas ocorreu a 30 de Março de **2010**.
- À data de hoje, o **LHC** é o **maior acelerador circular de partículas do mundo**, com uma circunferência de 27 Km;
- No LHC, os prótons são acelerados até alcançarem uma velocidade próxima à velocidade da luz ($3.0 \cdot 10^8$ m/s)

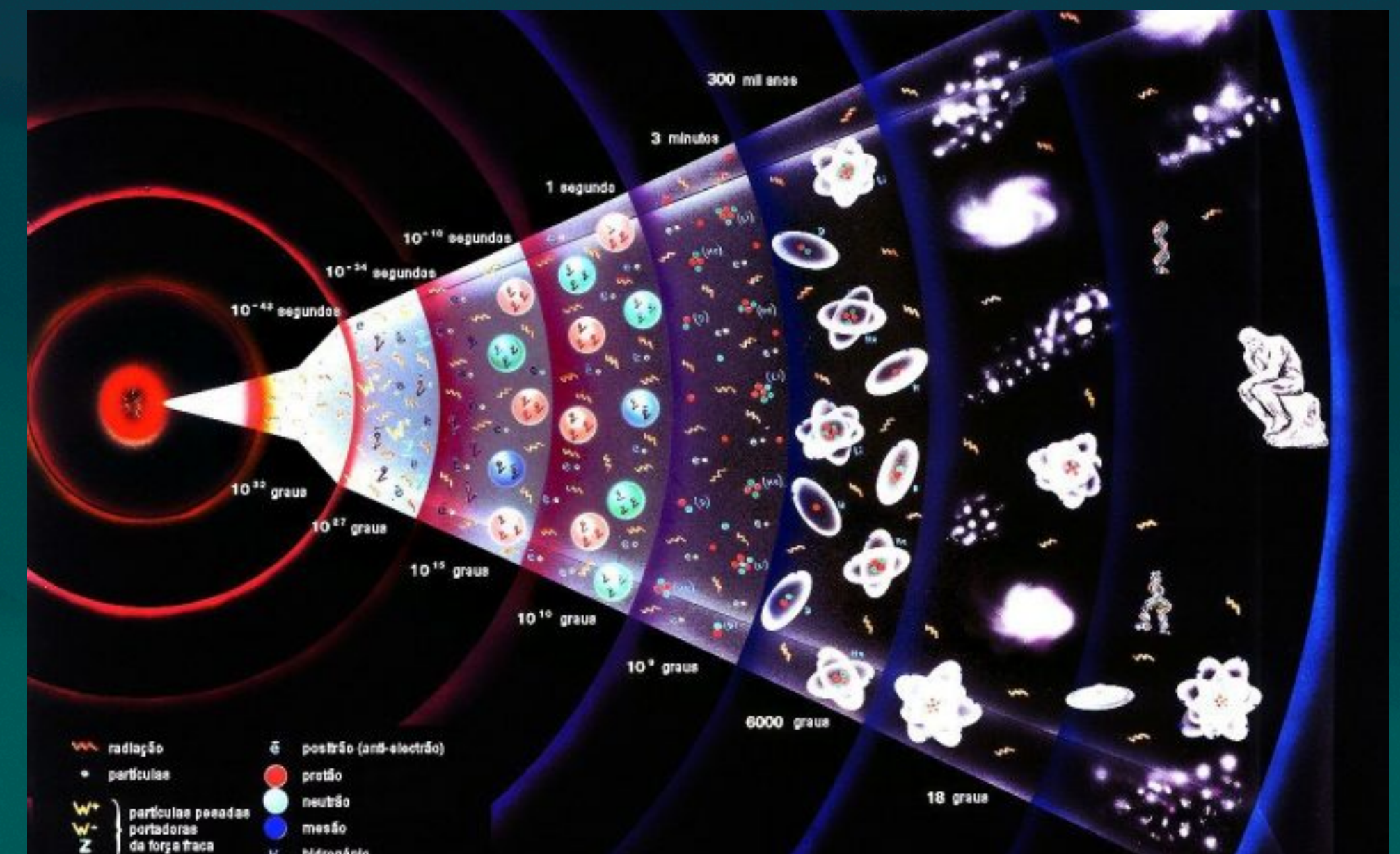
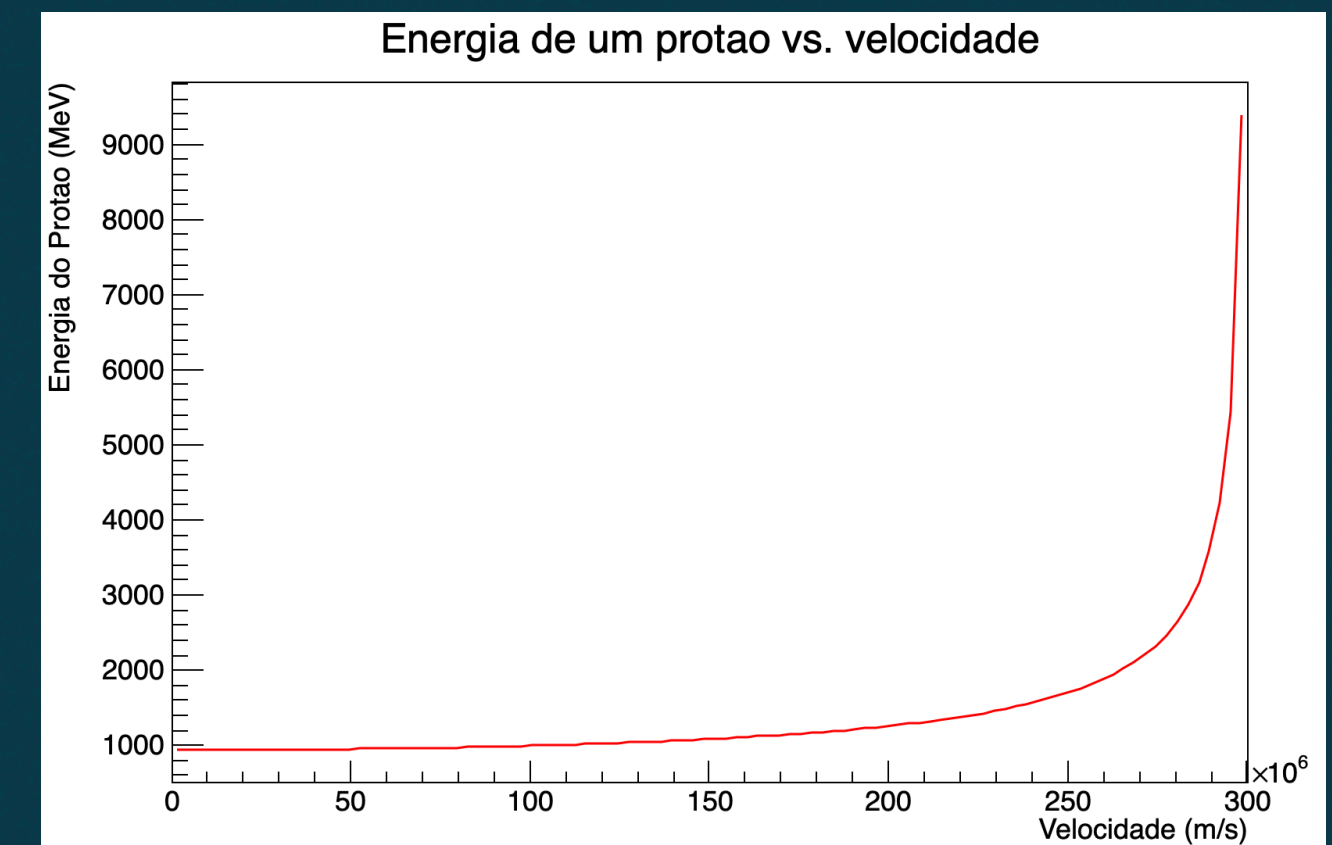


Os aceleradores de partículas.

Faz sentido gastar **7.5 bilhões de euros** para acelerar as partículas?

- **Acelerar** as partículas significa **umentar** a sua **energia**.
- As partículas atingem uma velocidade $\gg 99\%$ da luz:
 - Nestas condições, o aumento da velocidade das partículas é desprezável;
 - No entanto, o aumento de energia é significativo.
- Por quê é de interesse científico o estudo de partículas muito energéticas?
 - **Razão cosmológica**: atualmente a temperatura (T) do universo é $\approx 3\text{ K}$. Contudo, quando se formou, $T > 10^{32}\text{ K}$. Portanto, o seu conteúdo energético era muito elevado.
 - **Razão relacionada com a “física nuclear”**: energias elevadas permitem de estudar a estrutura da matéria.

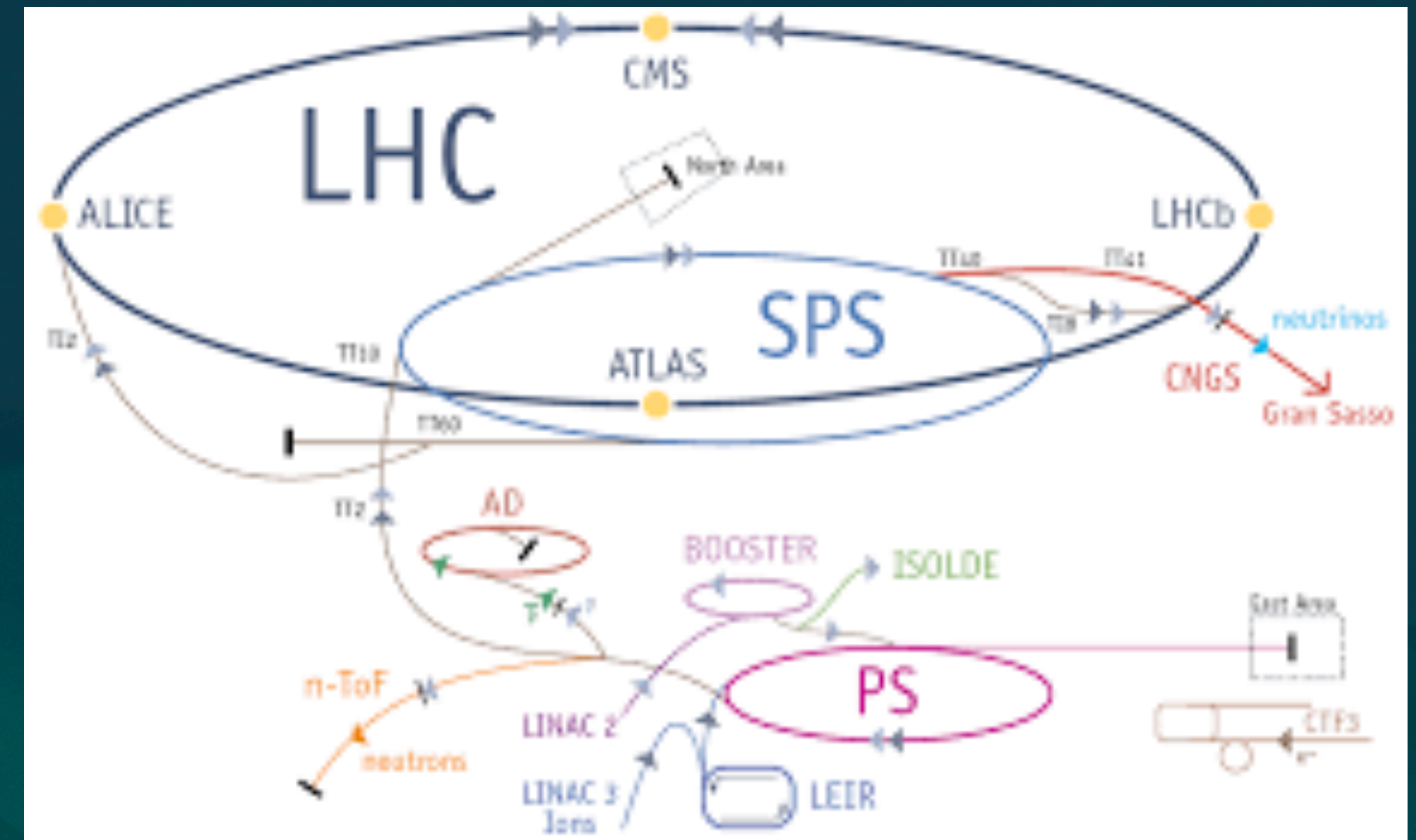
$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}} mc^2$$



Os aceleradores de partículas.

Acelerar as partículas **não é canja**.

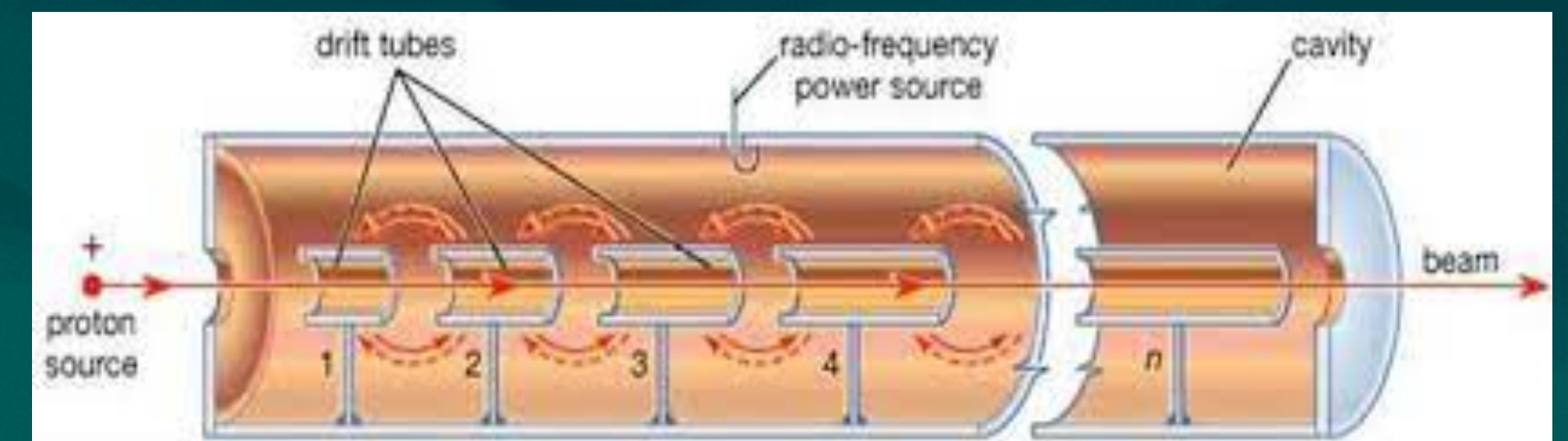
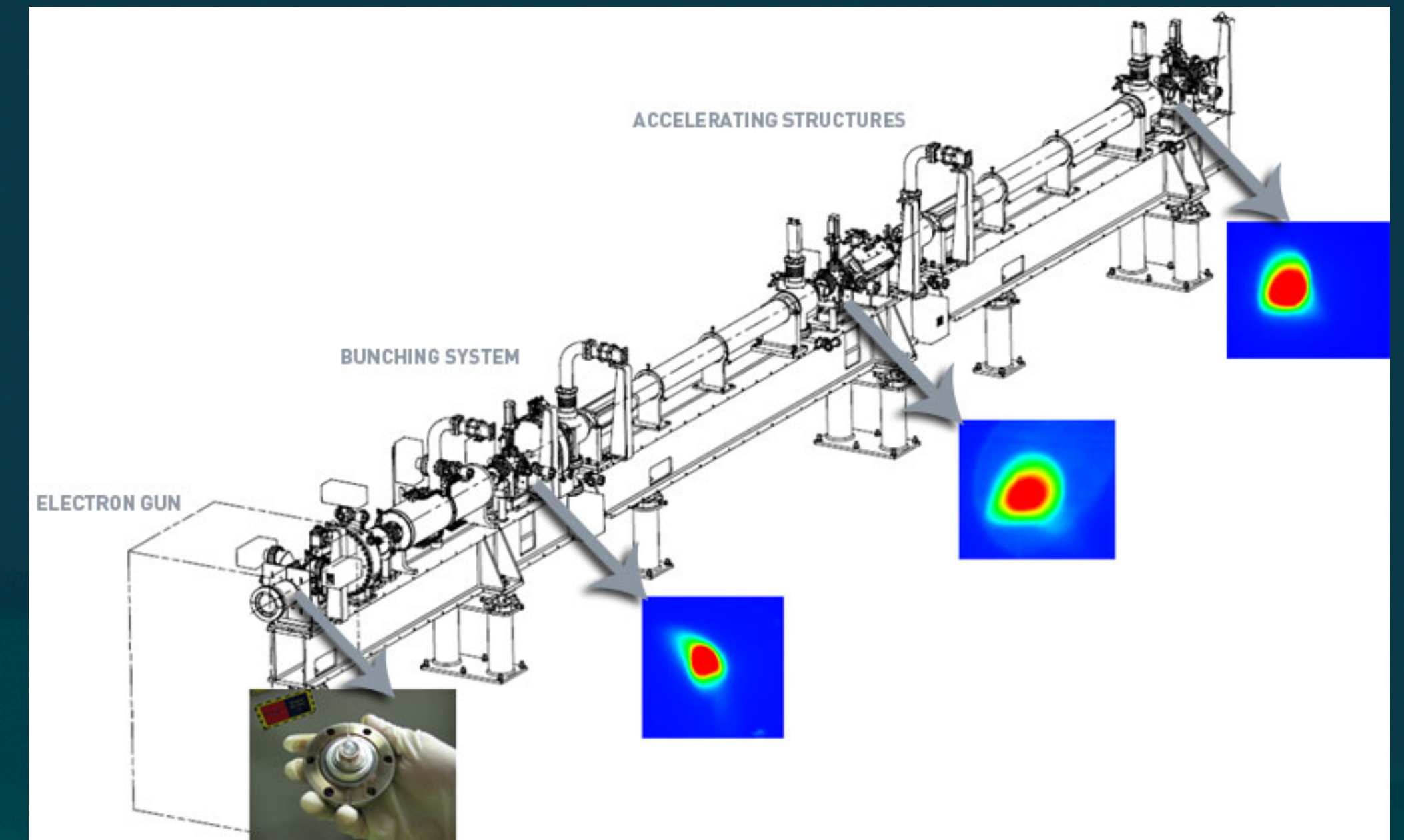
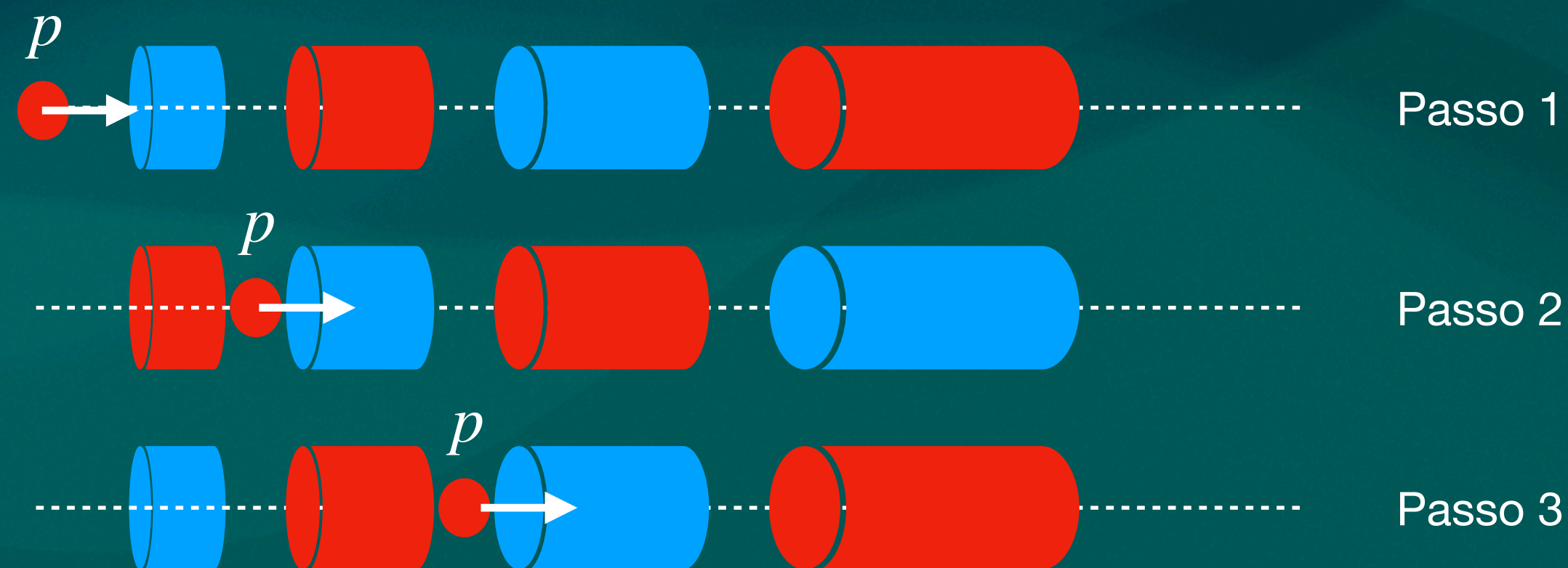
- No CERN costumamos **acelerar** **protões**.
- Os protões ficam dentro duma **garrafa de hidrogénio**, e são acelerados através dum conjunto de aceleradores;
- Portanto, o **LHC** é responsável apenas da parte final do processo de aceleração.
- Resumidamente, existem **dois tipos** de aceleradores de partículas: os **lineares** e os **circulares**.



Os aceleradores de partículas.

LINAC: o acelerador linear do CERN.

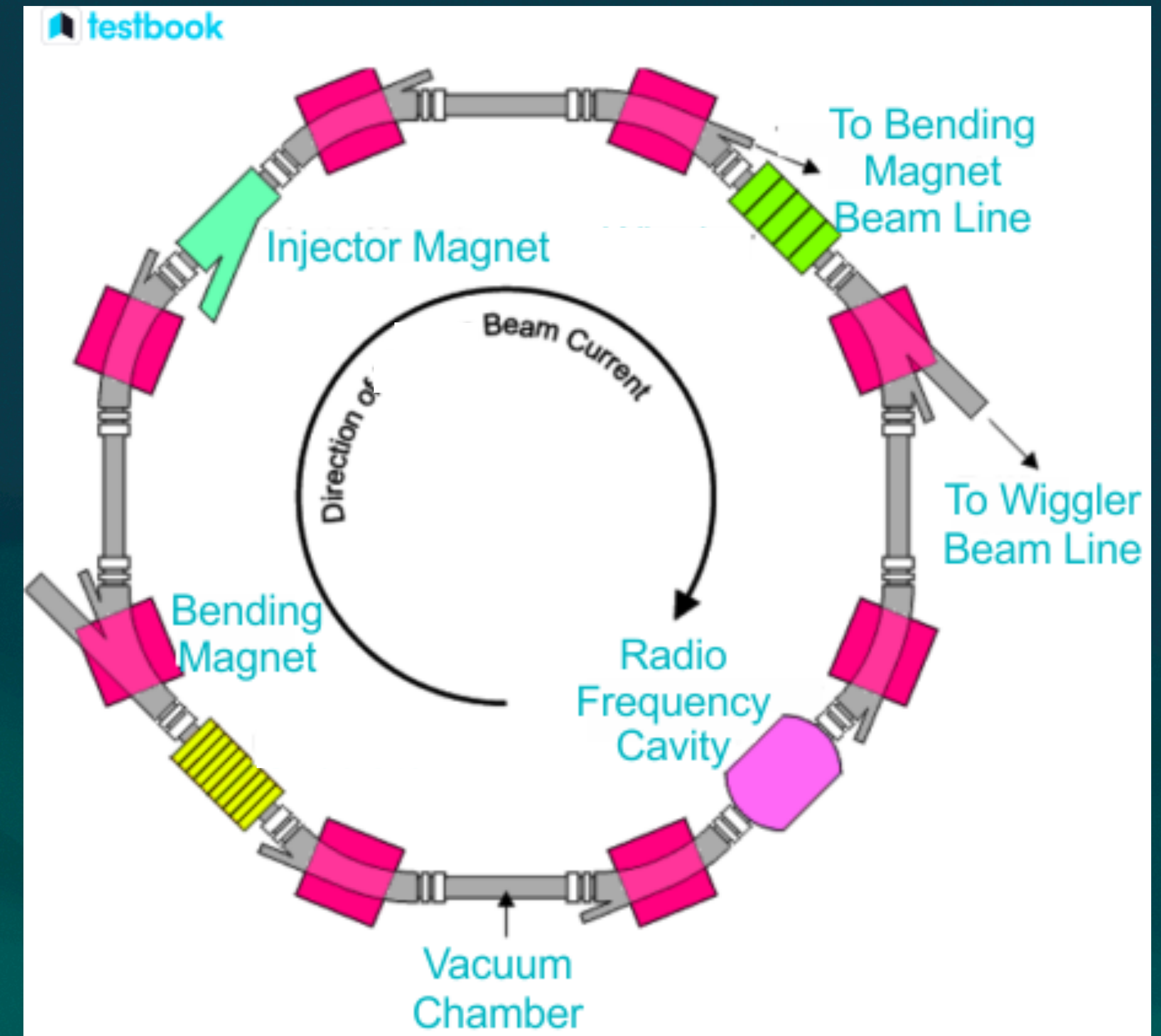
- LINAC é um **acelerador linear**, que tem o papel fundamental de acelerar os prótons de baixa energia:
 - Os prótons são **organizados em pacotes**;
 - O processo de aceleração é mediado pelo **campo Eléctrico**.
 - Os prótons alcançam a energia de 50 MeV.



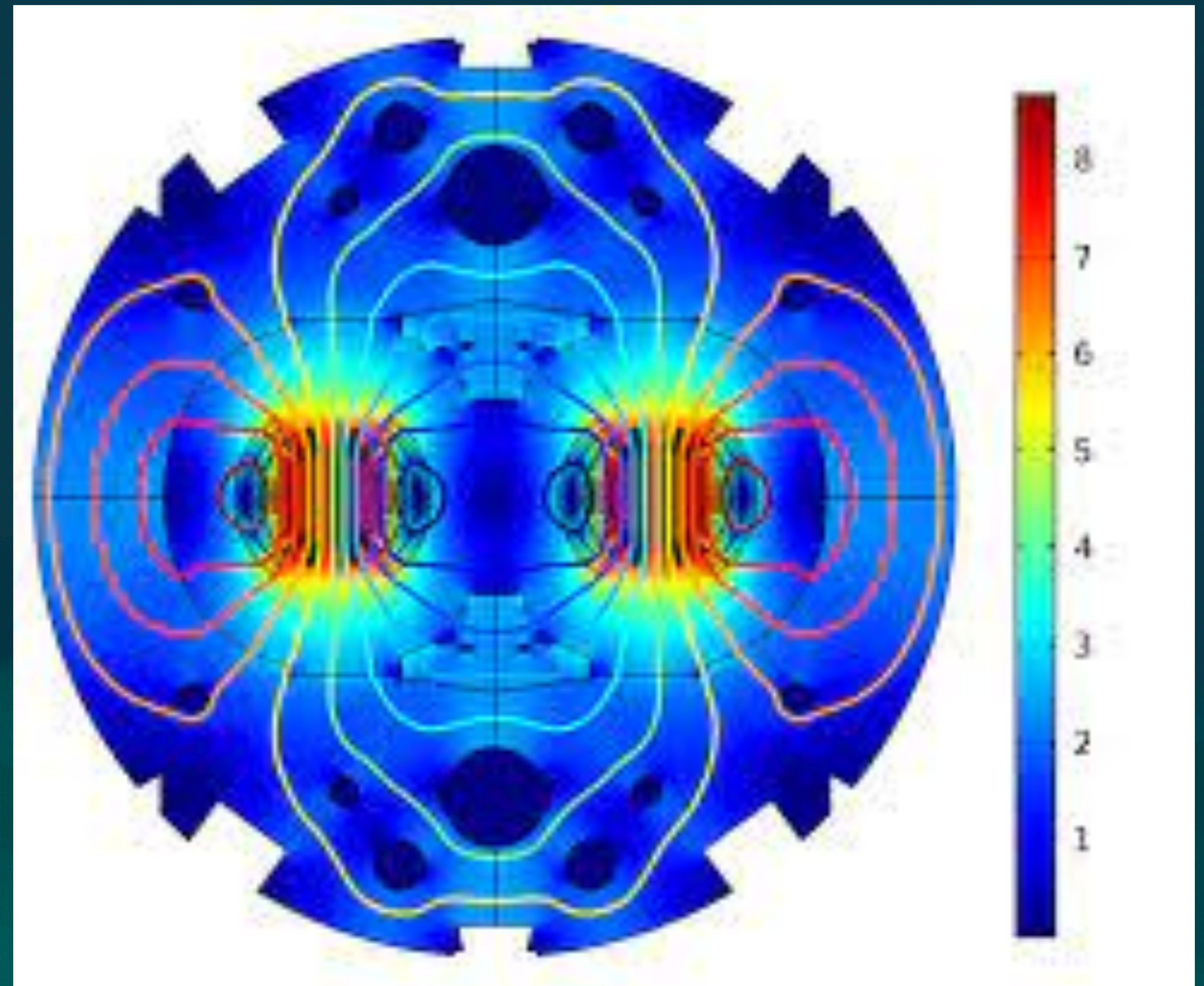
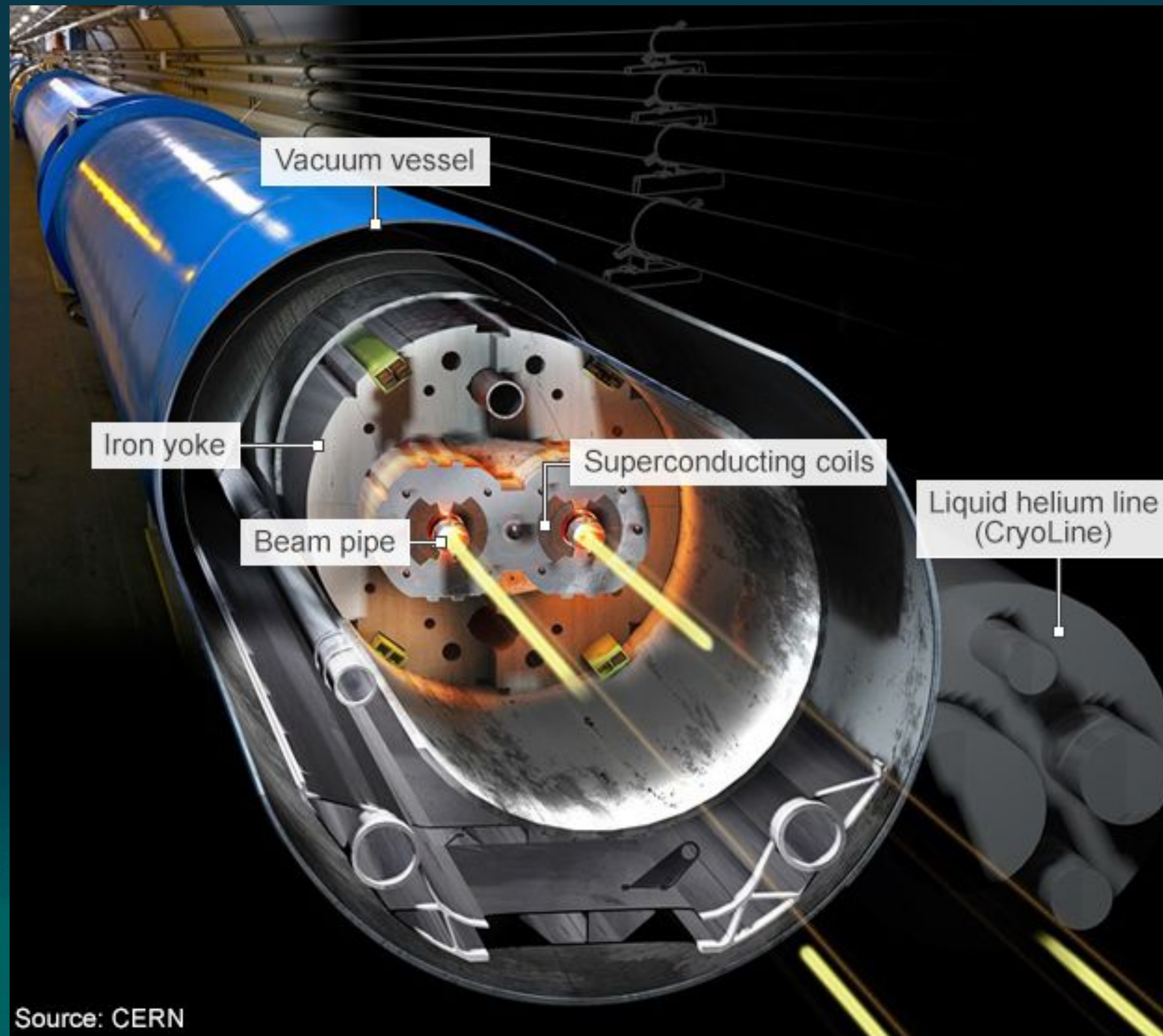
Os aceleradores de partículas.

PSB, PS, SPS, LHC: os aceleradores circulares do CERN.

- Existem vários tipos de aceleradores circulares. PSB, PS, SPS e LHC são sincrotrões.
- Cada acelerador tem um princípio de funcionamento ligeiramente diferente;
- Aspeitos em comum:
 - As partículas são **aceleradas** através de **campos elétricos** (paralelo à direção do feixe);
 - As partículas são **desviadas** por **campos magnéticos** (ortogonais à direção do feixe)

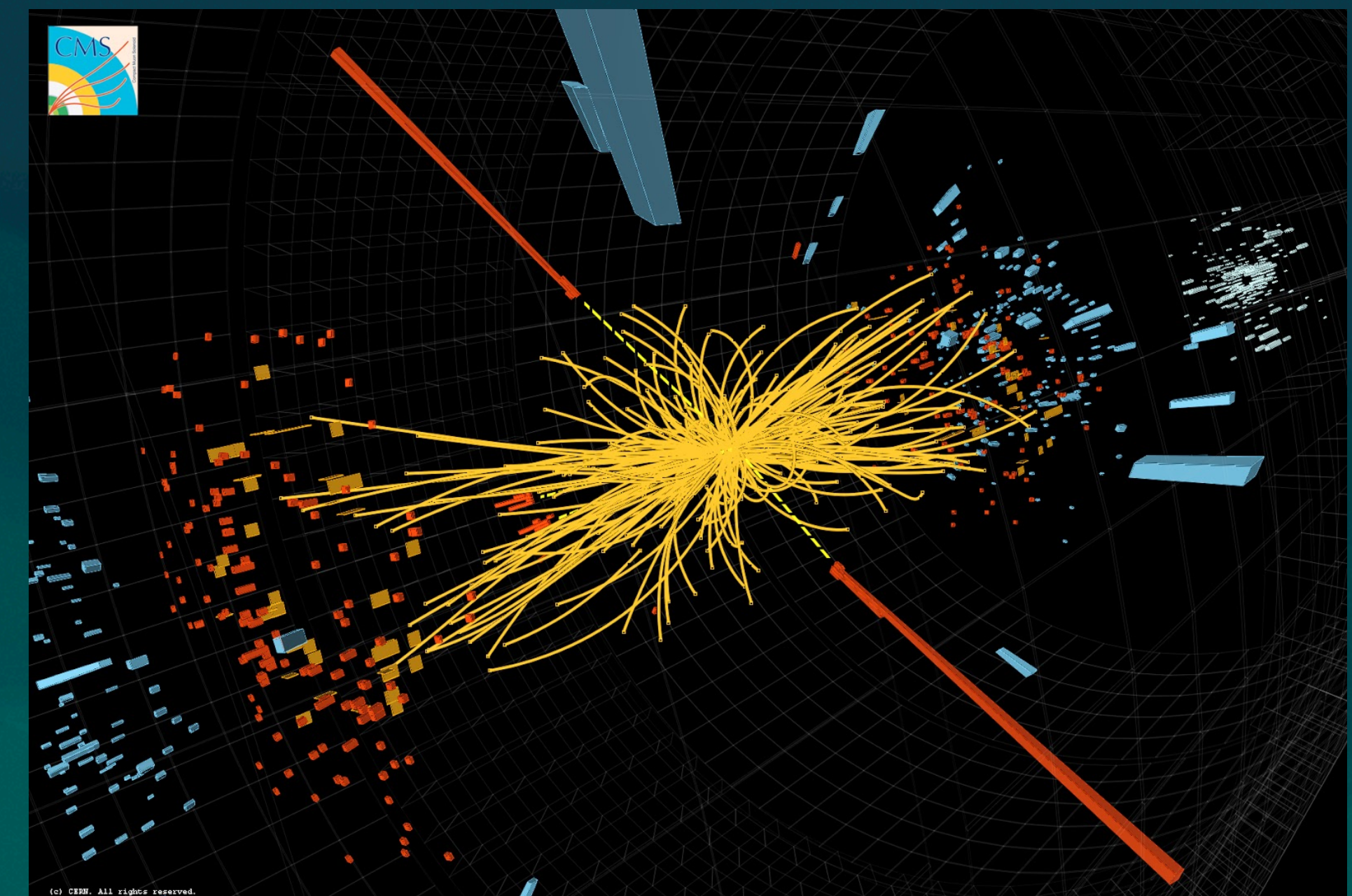
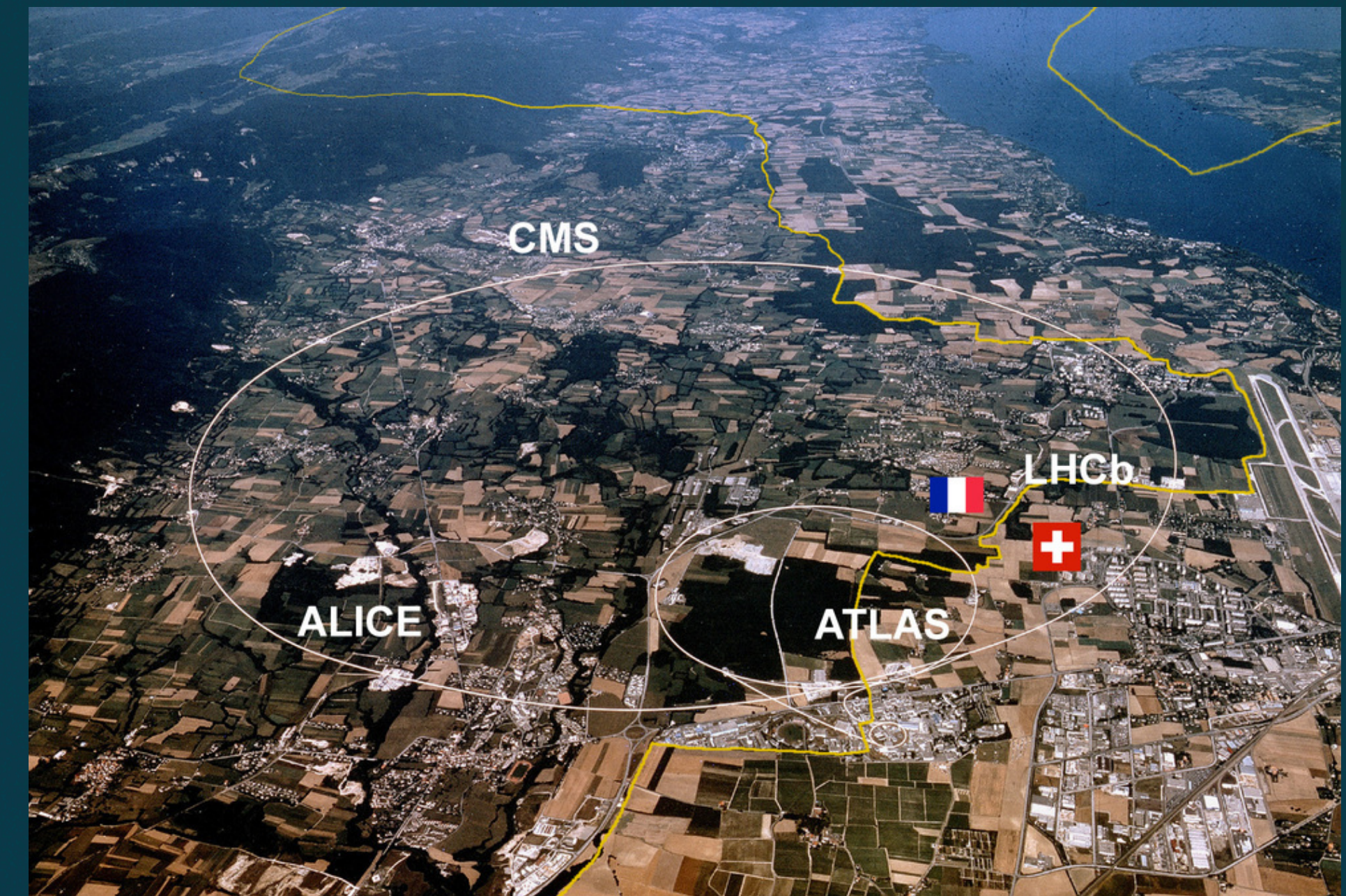


Os aceleradores de partículas.



Colisões entre partículas

- Quando os prótons alcançarem a energia desejada, **colidem** em pontos bem definidos (pontos de interação — PI);
- Durante a interação, os prótons partem-se e geram uma quantidade notável de partículas: **a energia inicial dos prótons é trocada por massa** (= novas partículas)
- À volta de cada PI, foram colocados vários **detetores**: ATLAS, CMS, LHC-b, ALICE.
- As partículas criadas durante a colisão **interagem com o detetor**, deixando energia.



Colisões entre partículas

Um novo mundo à nossa espera!

- A colisão entre os prótons pode criar **qualquer partícula do modelo padrão**;
- Será preciso **desenvolver detetores específicos** para observar cada uma das partículas do modelo padrão?
- **Não!**
 - **Muitas partículas são instáveis** → decaem rapidamente em outras partículas (ex. $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$)
 - Os **neutrinos** (quase) **não interagem** com a matéria!

massa →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
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 bóson de Higgs
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ fóton	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e elétron	μ múon	τ tau	Z bóson Z	
LÉPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e neutrino do elétron	ν_μ neutrino do múon	ν_τ neutrino do tau	W bóson W	
					BÓSONS DE CALIBRE

Colisões entre partículas

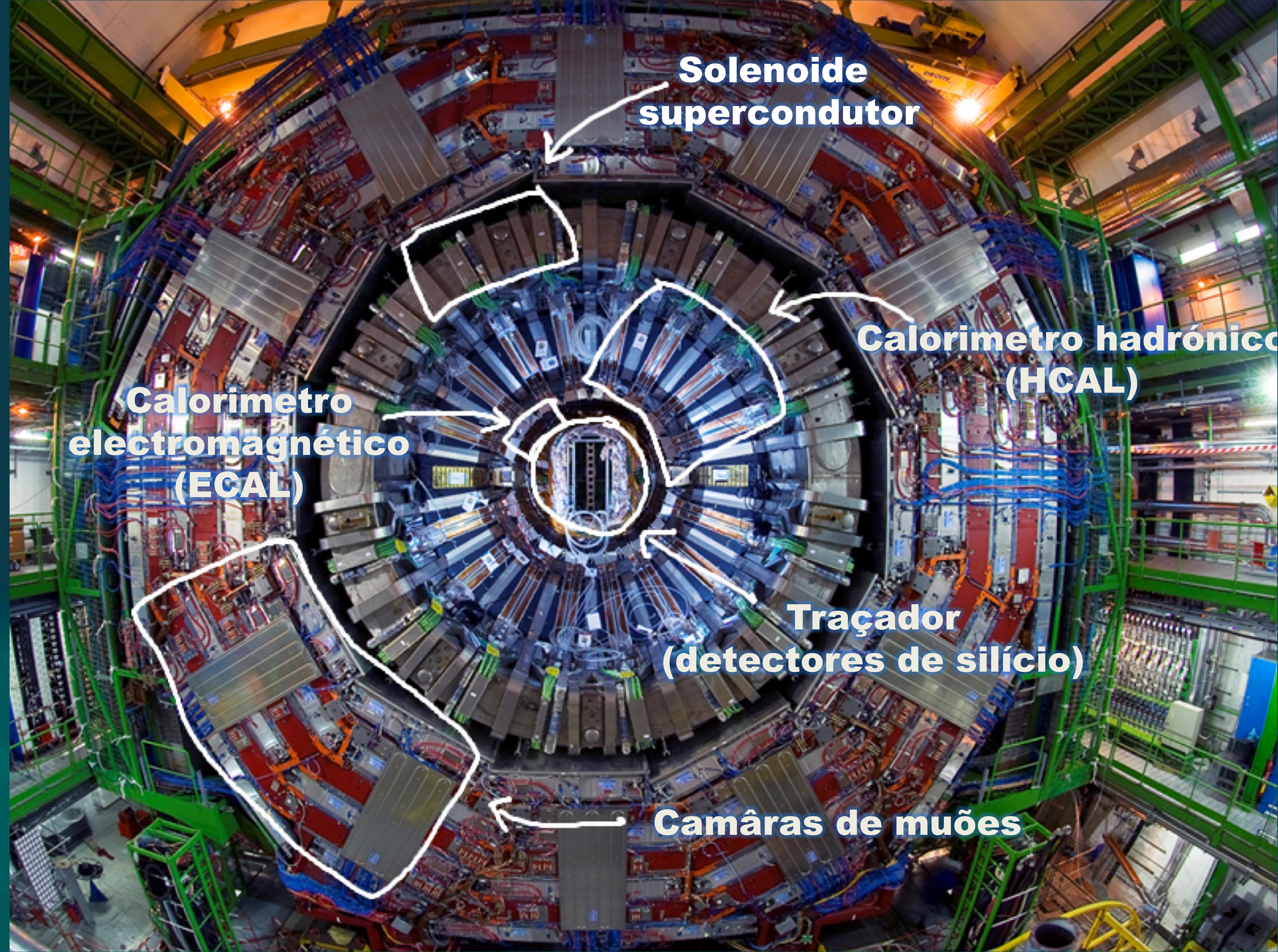
Um novo mundo à nossa espera!

- De facto, os detetores do CERN conseguem observar apenas: e^+/e^- , μ^+/μ^- e **fótons**;
- Podemos detetar os bósons **W**, **Z** e **H** e o τ através dos seus **produtos de decaimento**;
- Não conseguimos observar os neutrinos;
- Podemos observar os **quarks**, mas formam estruturas muito complicadas (**jets**) → será explicado mais à frente.

massa →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
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 bóson de Higgs
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
QUARKS	d down	s strange	b bottom	γ fóton	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e elétron	μ múon	τ tau	Z bóson Z	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
LÉPTONS	ν_e neutrino do elétron	ν_μ neutrino do múon	ν_τ neutrino do tau	W bóson W	
					BÓSONS DE CALIBRE

Milhares de milhões de colisões (por segundo)

25 ns bunch crossing
25 ns entre les paquets



**Solenóide
supercondutor**

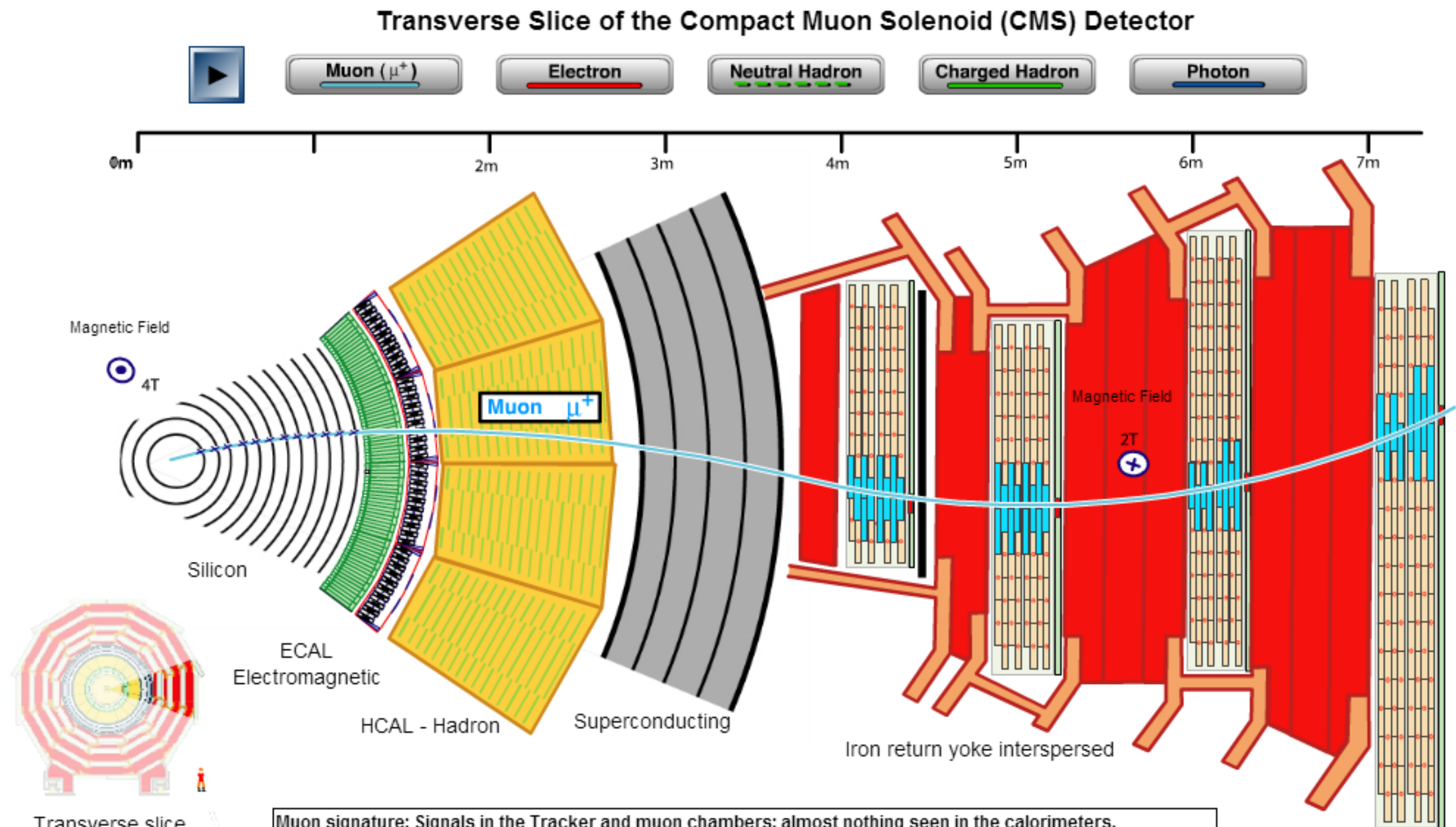
**Calorímetro hadrónico
(HCAL)**

**Calorímetro
electromagnético
(ECAL)**

**Traçador
(detectores de silício)**

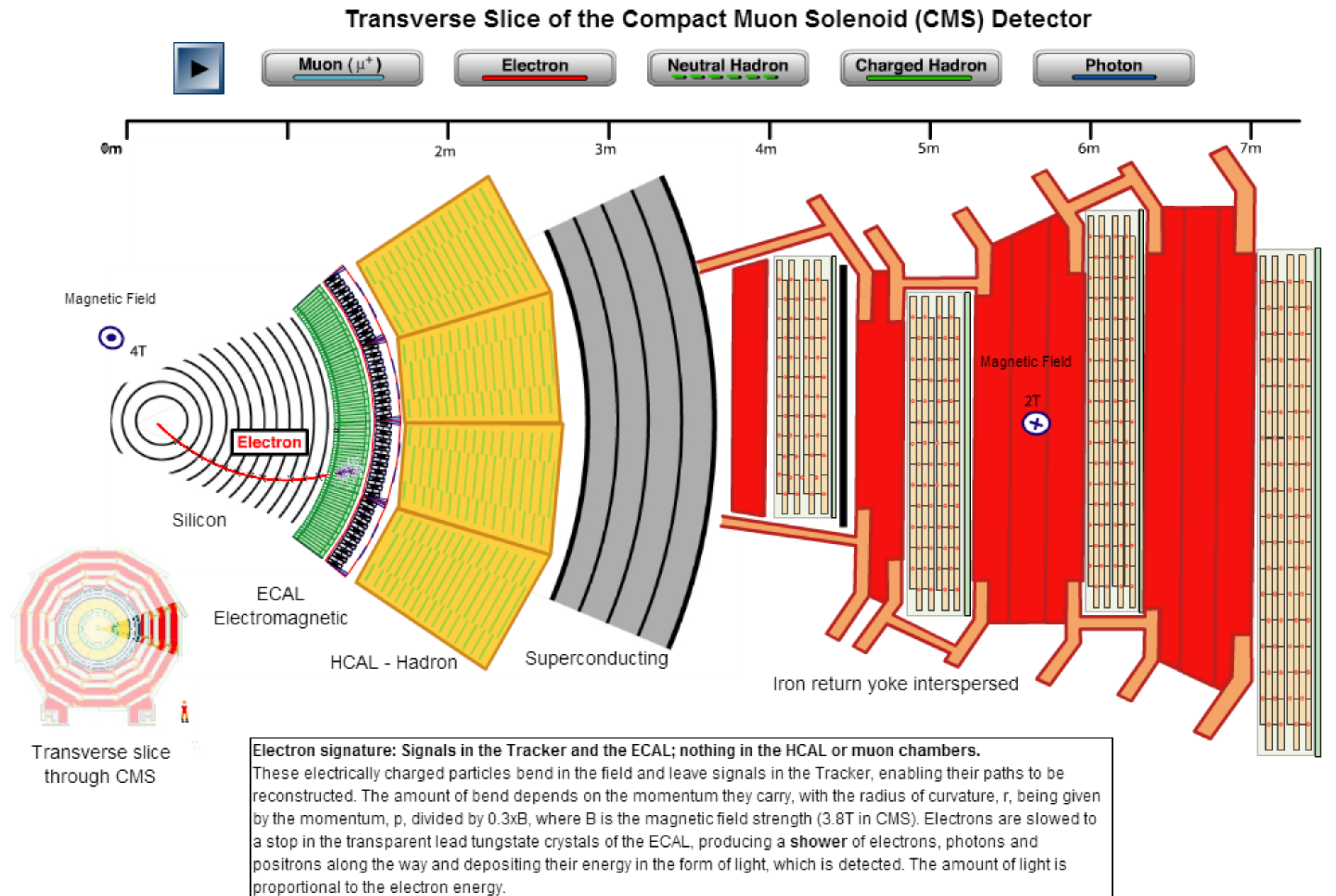
Camêras de muões

Identificando as partículas estáveis



Muon signature: Signals in the Tracker and muon chambers; almost nothing seen in the calorimeters. Muons are perhaps the easiest particles to identify in CMS: no other charged particle traverses the whole detector. Being charged, they are bent by the field in one direction inside the solenoid and in the opposite direction outside. As muons can only arise from the decay of something heavier their presence signifies that something potentially interesting has happened.

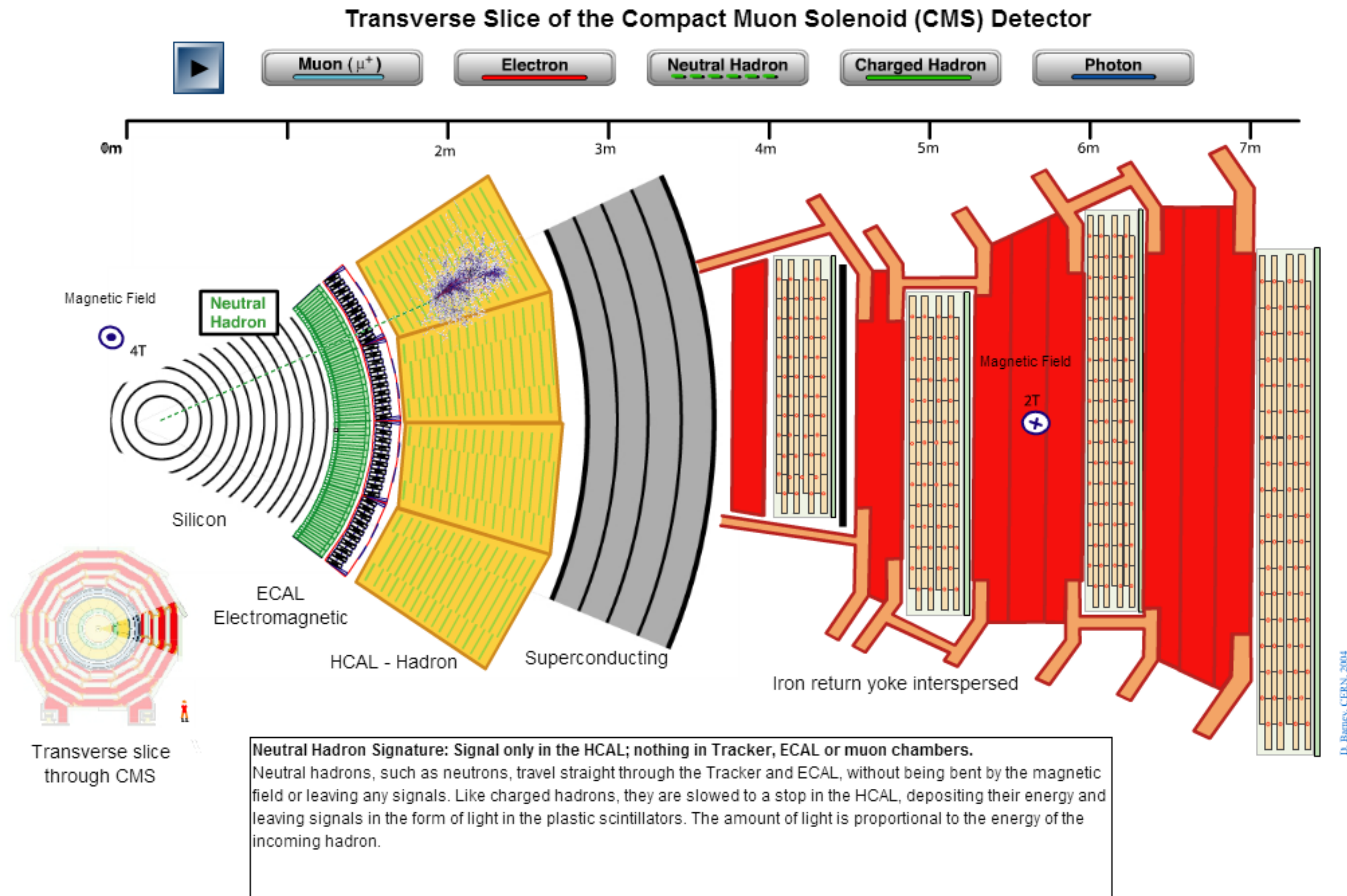
Identificando as partículas estáveis



Derived from CMS Detector Slice from CERN

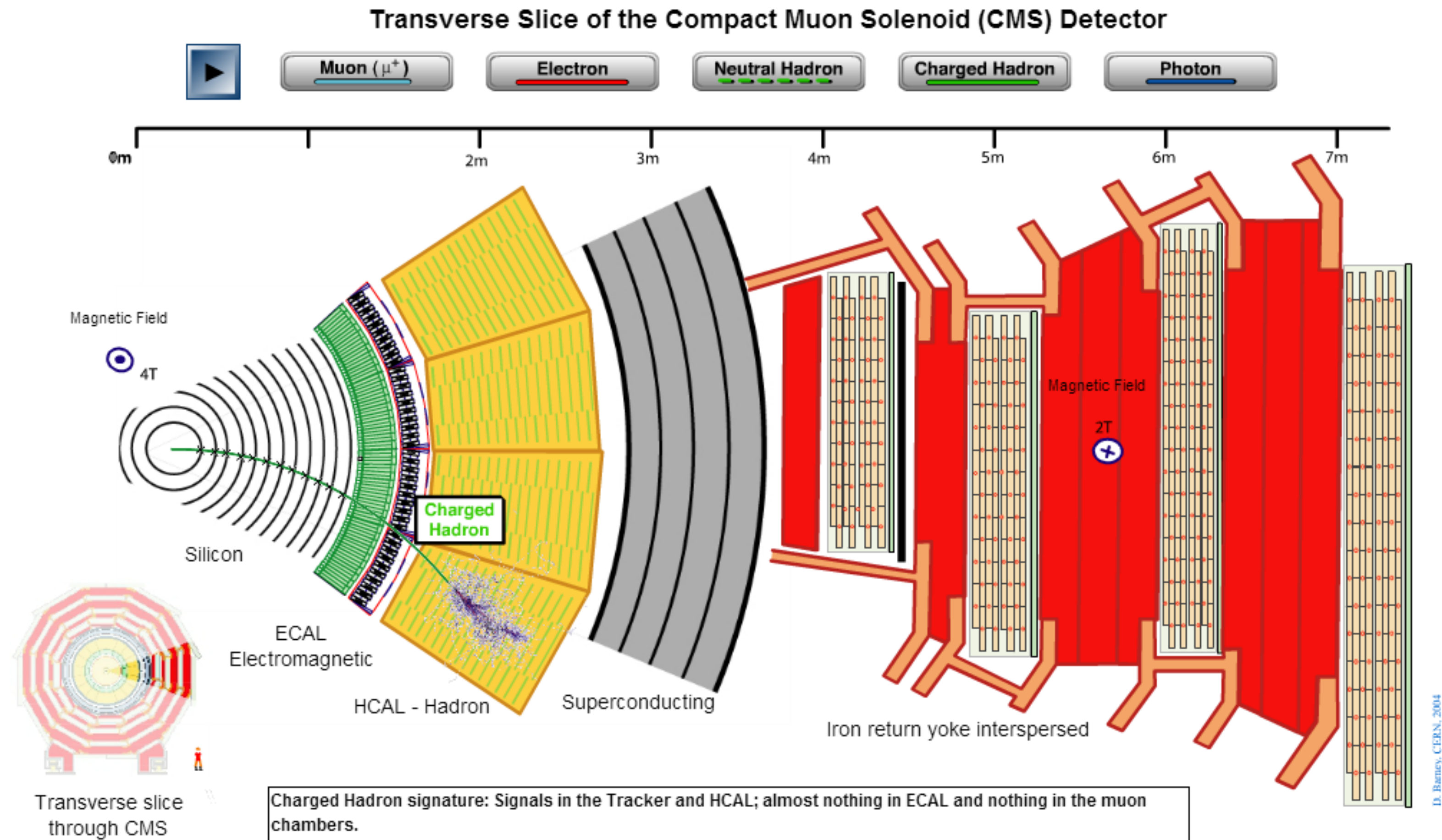
D. Barney, CERN, 2004

Identificando as partículas estáveis

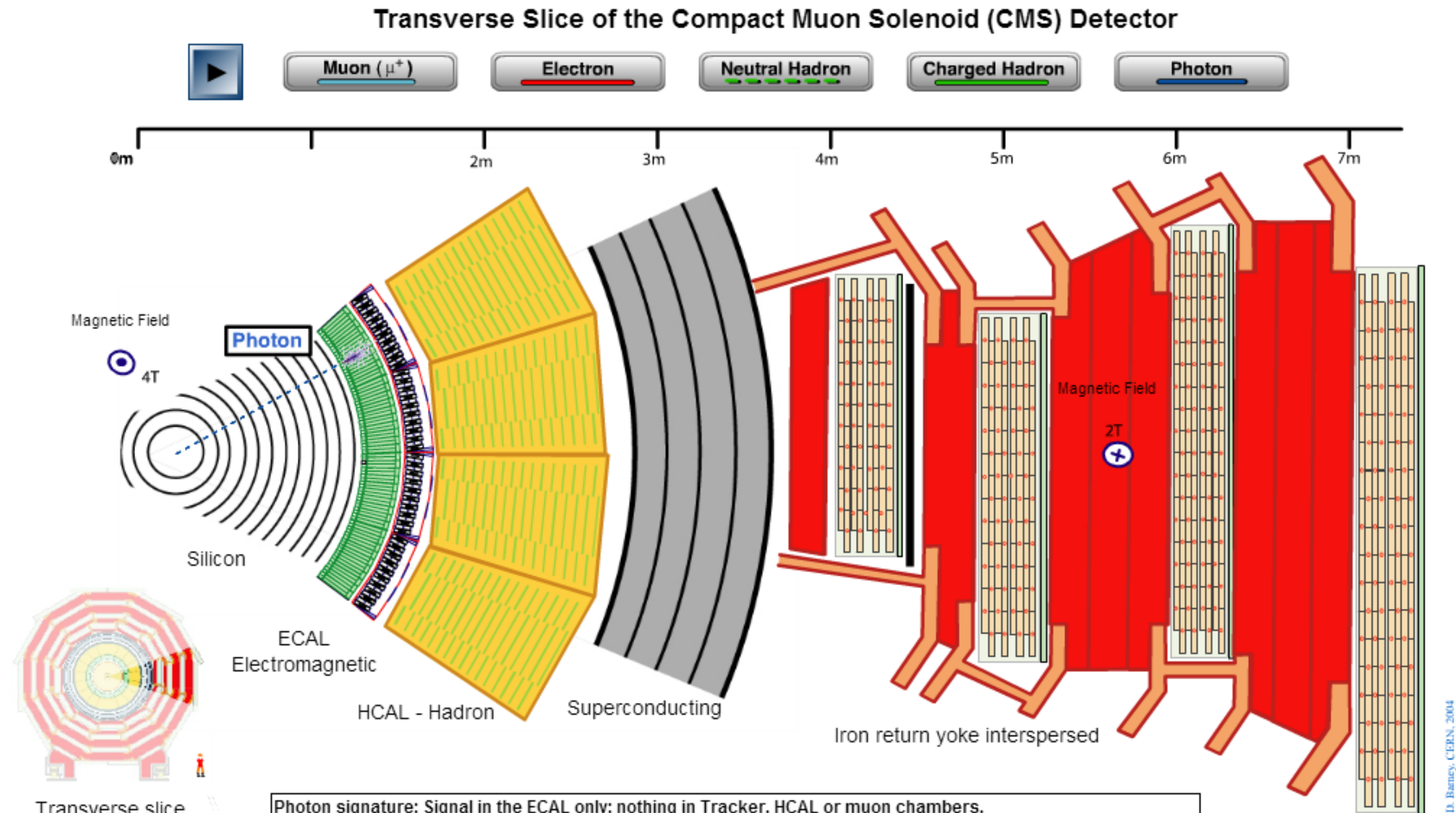


Derived from CMS Detector Slice from CERN

Identificando as partículas estáveis



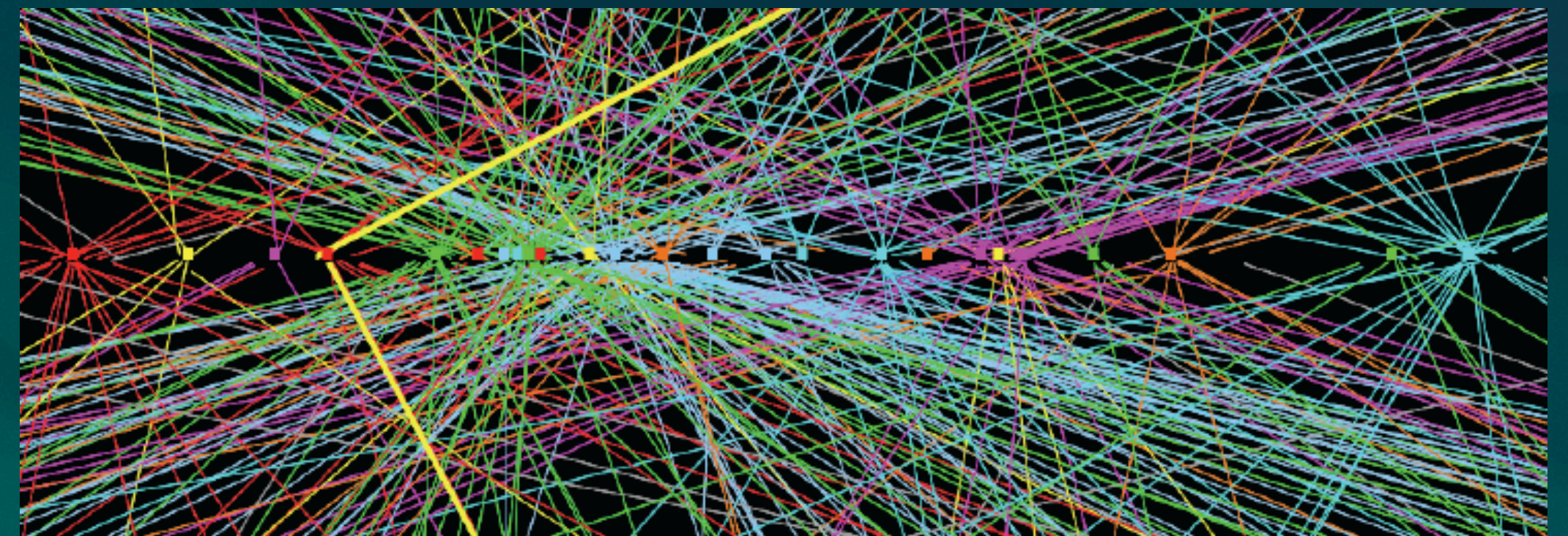
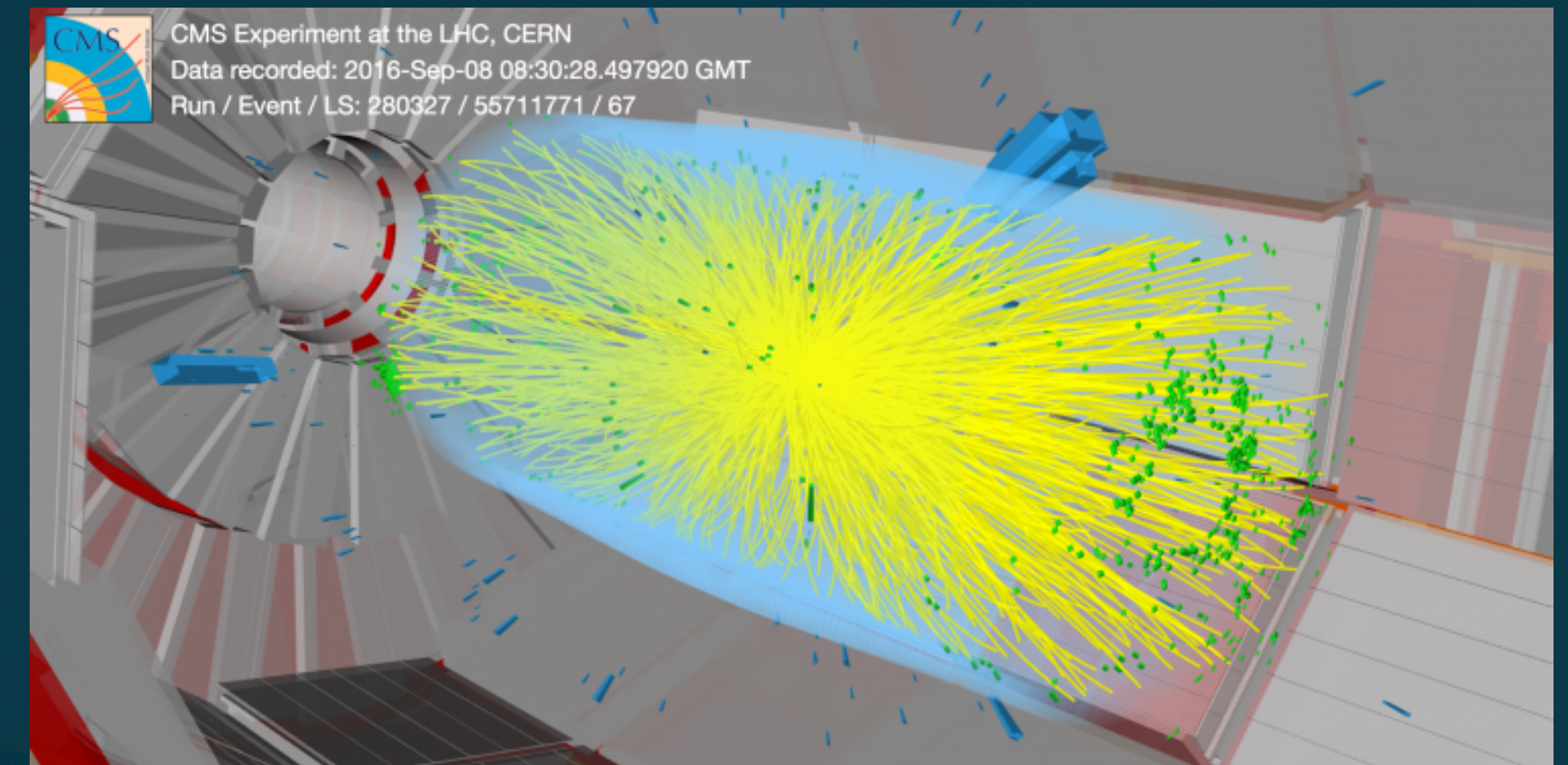
Identificando as partículas estáveis



Os principais desafios.

Uma agulha no palheiro

- Hoje em dia, os eventos que queremos estudar são **extremamente raros**;
- Portanto, a frequência de colisão dos prótons nos pontos de interação tem de ser muito elevada:
 - No LHC, **interage um par de pacotes de prótons cada 25 ns**;
 - Durante cada interação (bunch crossing) acontecem 30-40 eventos 'simultâneos';
 - O resultado é uma selva de partículas!
 - O nosso papel é identificar as partículas de interesse e descartar as outras.

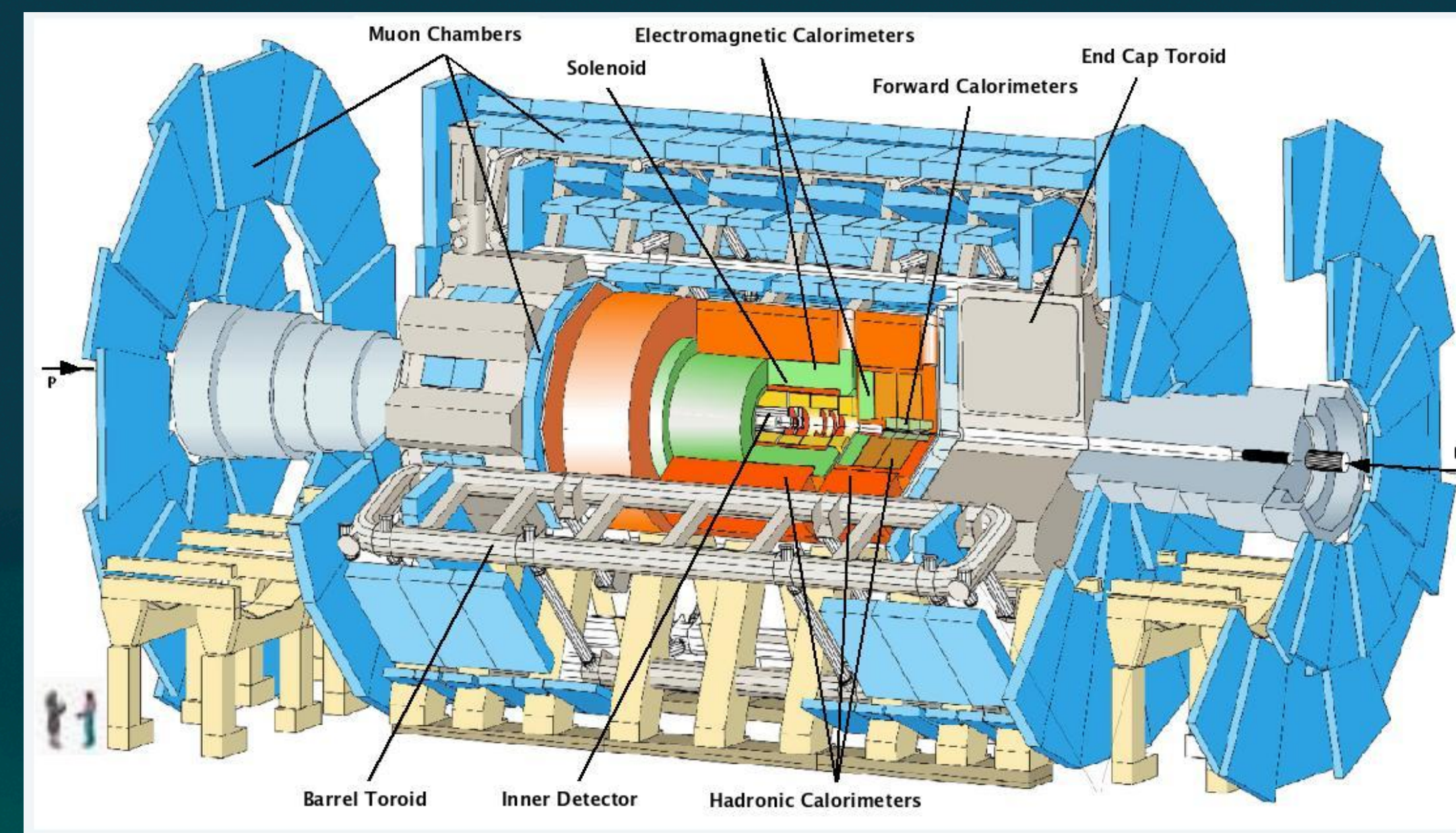


Obrigado pela atenção
dispensada!

O detetor ATLAS

O que é um detetor de partículas?

- Um detetor é composto por um conjunto de materiais cujo papel é:
 - identificar as partículas geradas durante a interação;
 - medir as suas quantidades cinemáticas;
- Conceito fundamental:
 - Não é possível observar diretamente as partículas;
 - As partículas, interagindo com um material, perdem energia:
 - A partir dos traços deixados nos detetores, é possível reconstruir as quantidades cinemáticas das partículas.

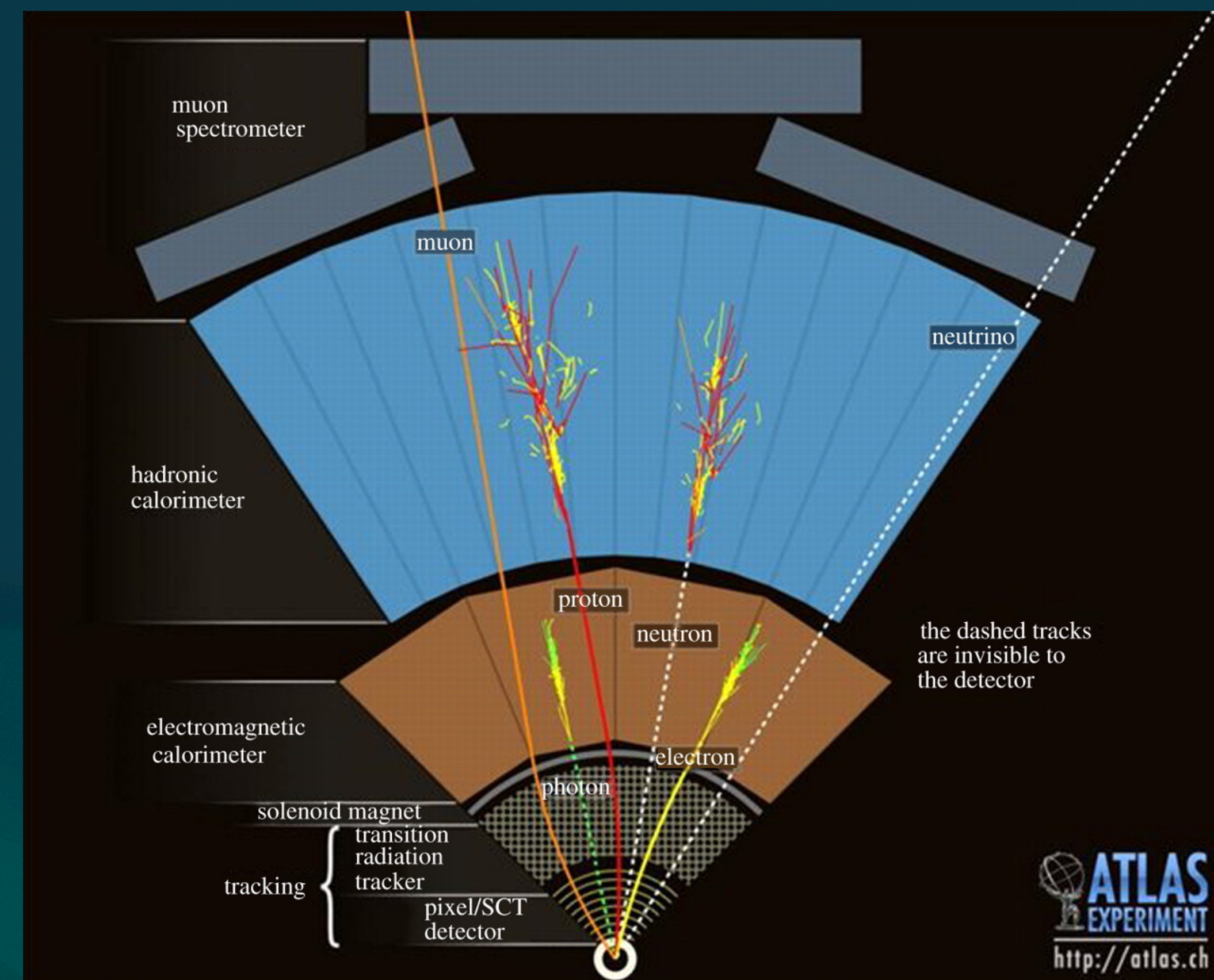


ATLAS: comprimento 46 m, diâmetro 25 m

O detetor ATLAS

Uma olhada mais de perto

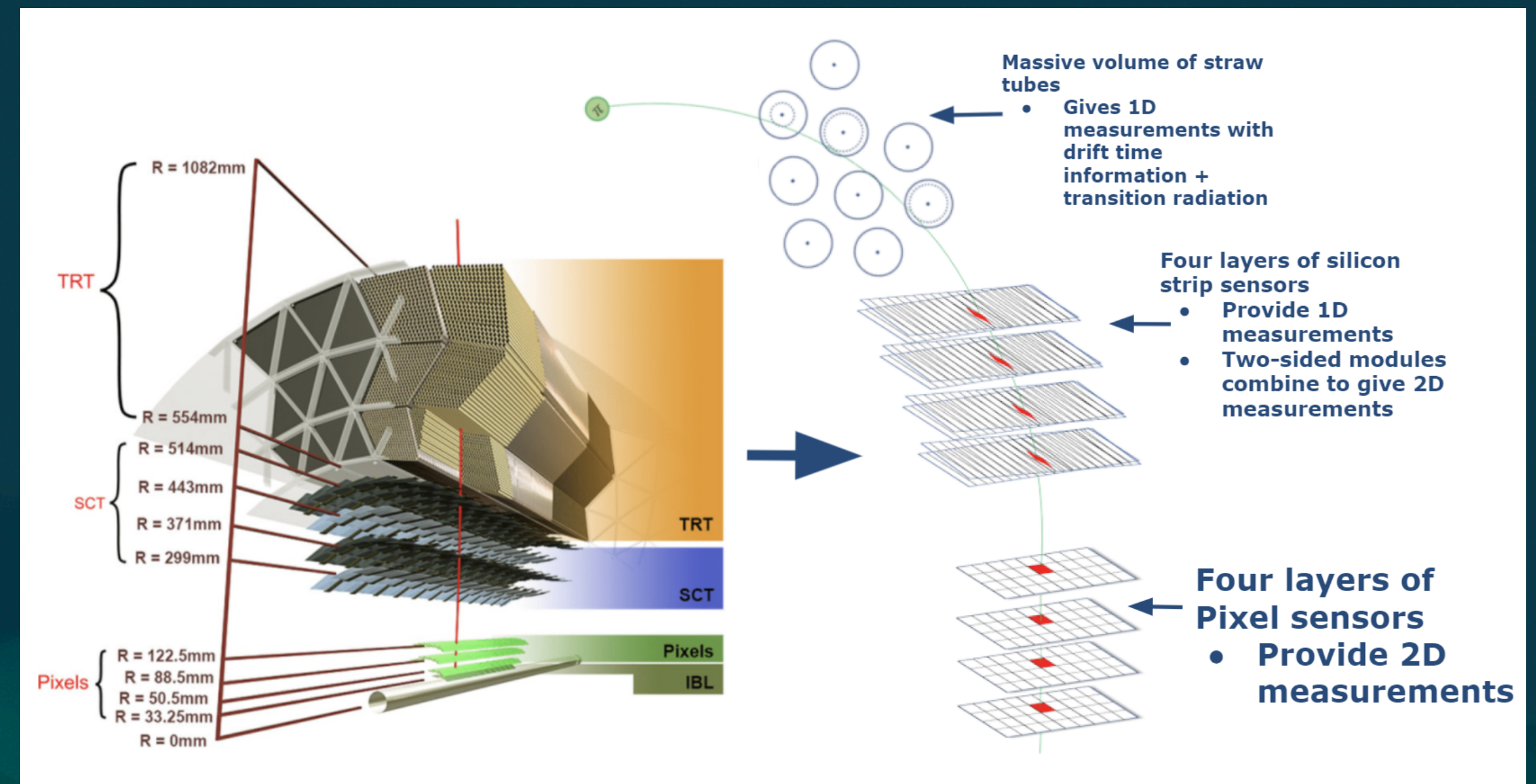
- O ATLAS é composto por um **conjunto de detetores** e cada um desempenha uma função diferente.
- O **tracker** fica na parte central do ATLAS e tem o papel de **detetar as partículas carregadas**;
- Mais, consegue **medir o momento linear das partículas** (p) devido à presença do campo magnético.
- Enfim, consegue **estabelecer a carga** (+/-) das partículas.



O detetor ATLAS

O tracker

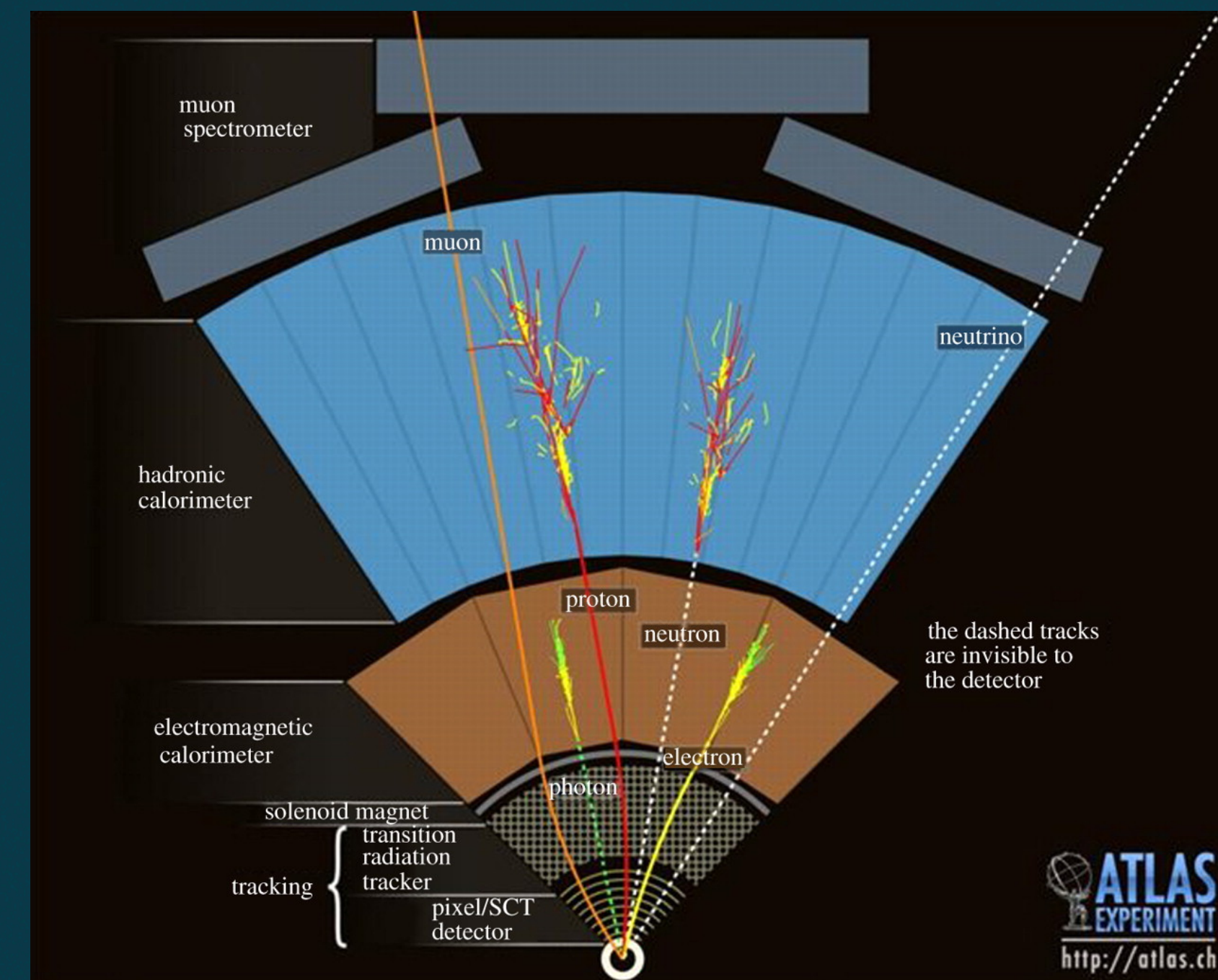
- O tracker do ATLAS é composto por **três sub-detetores**:
- Todos os sub-detetores têm o papel **reconstruir a trajetória** das partículas carregadas;
- **Conceito fundamental**: o tracker não desvia as partículas da sua trajetória inicial e tenta preservar a sua energia.
- Os detetores conseguem reconstruir a trajetória com **notável precisão**.



O detetor ATLAS

O calorímetro electromagnético

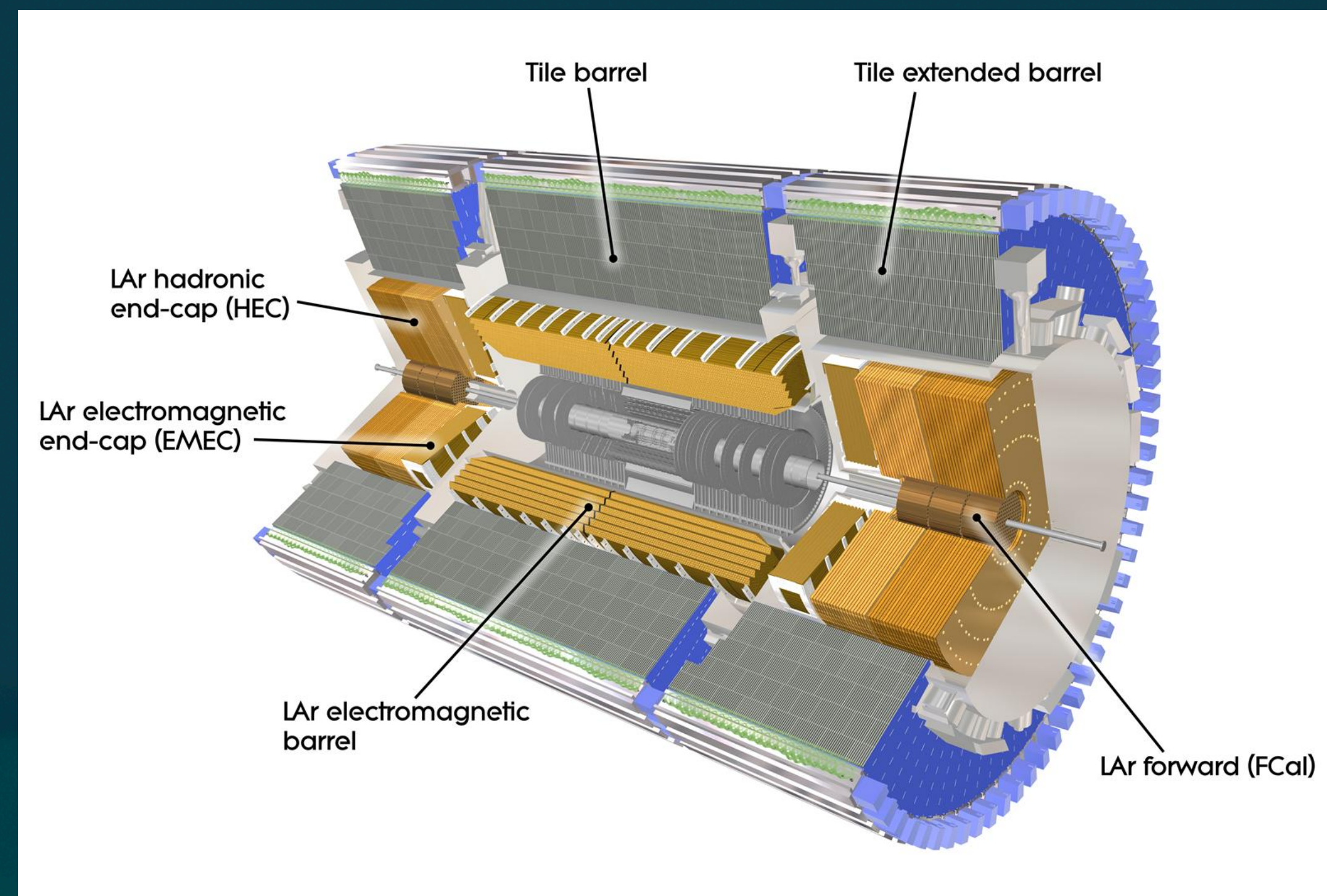
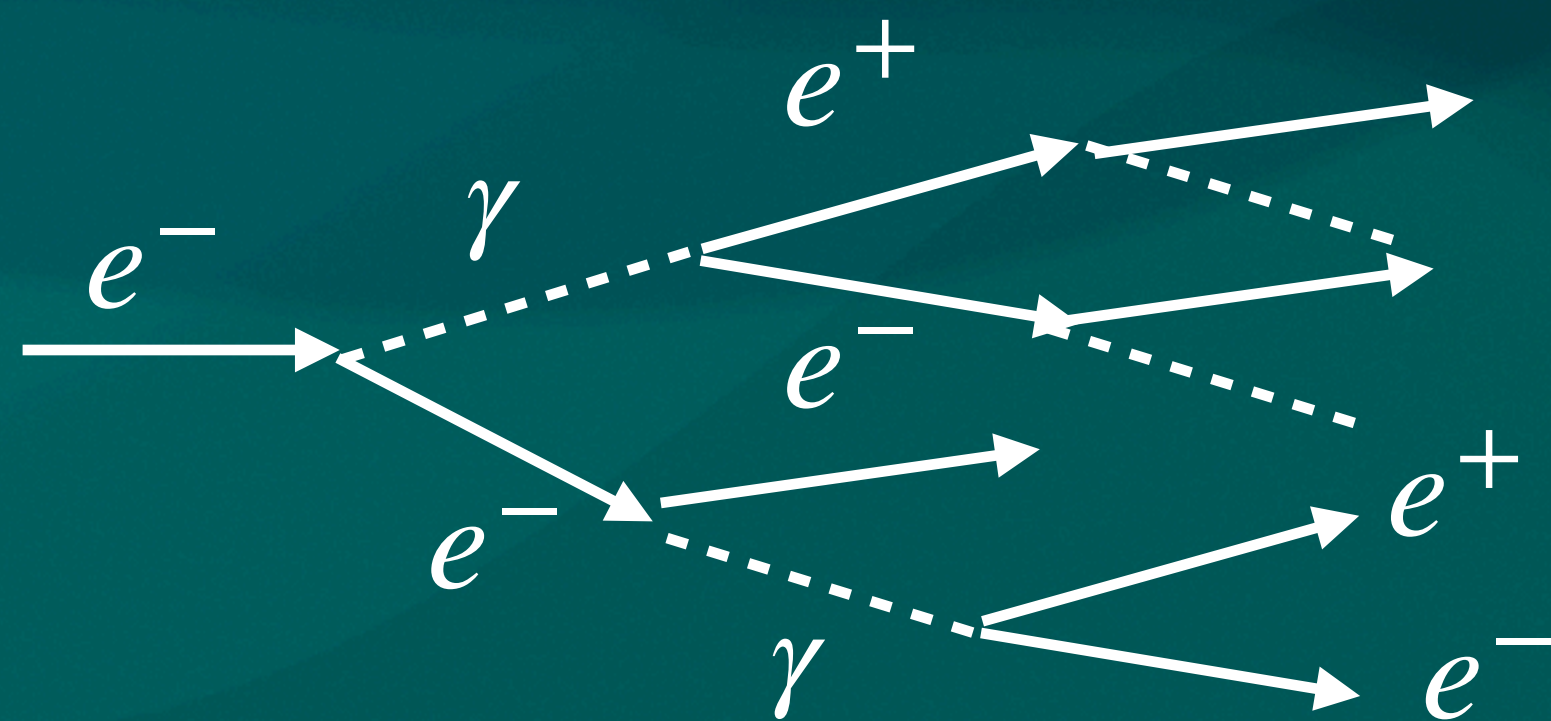
- O calorímetro electromagnético tem o papel de medir a energia dos fótons e dos eletrões.
- O calorímetro absorve toda a energia dos γ e dos eletrões.
- A partir da informação guardada neste detetor e no tracker posso:
 - Identificar eletrões, positrões e fótons;
 - Medir a energia e o momento das partículas identificadas.



O detetor ATLAS

O calorímetro electromagnético

- O calorímetro é dividido em **três partes**:
 - **Pre-sampler**: em Argon Líquido, tem o papel de **medir a energia** das partículas e de **arrefecer** as outras partes do calorímetro.
 - **Barrel e Endcap**: os eletrões e os fótons formam **cascatas eletromagnéticas**. Estes sub-detetores **medem a energia das cascatas**.



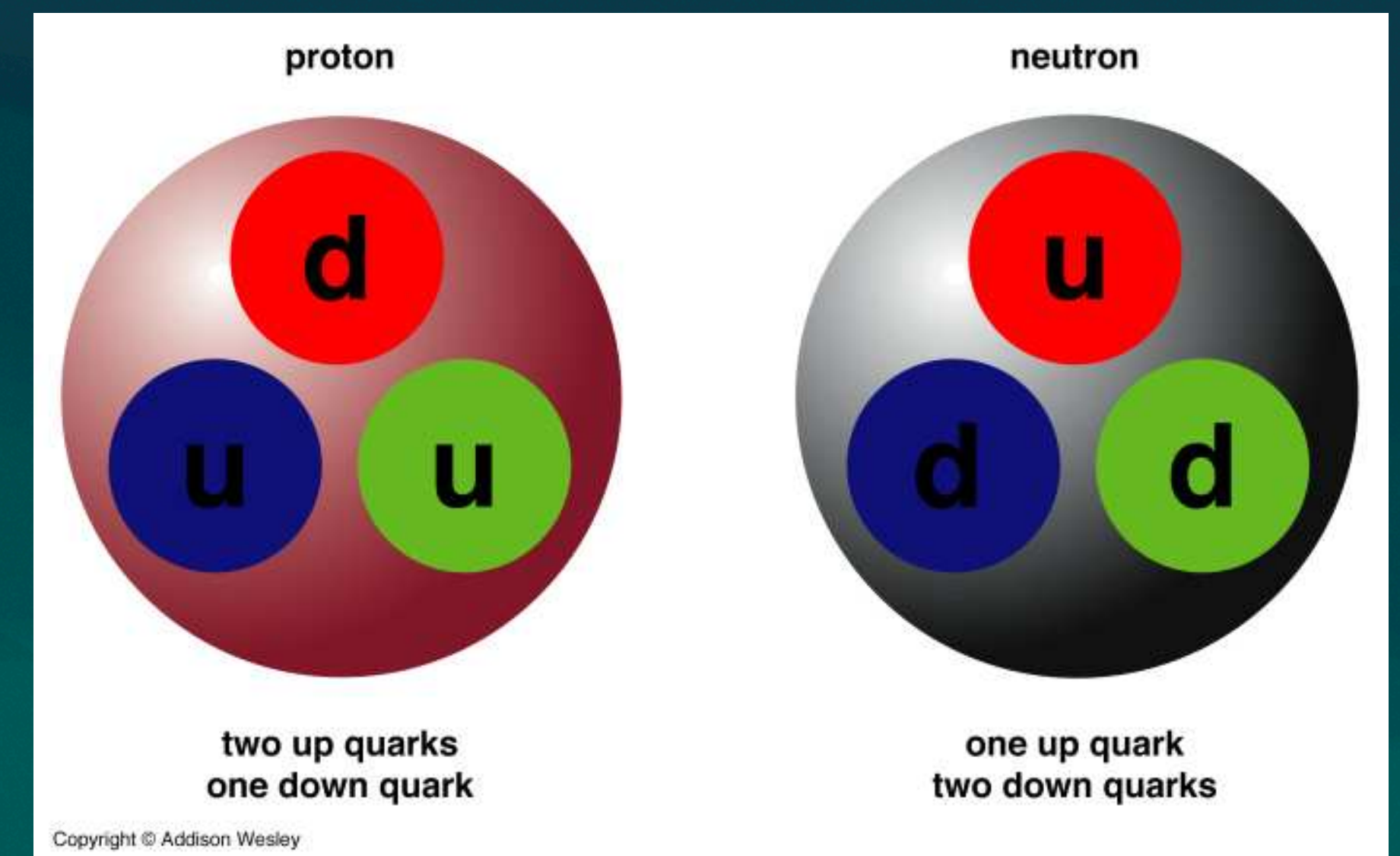
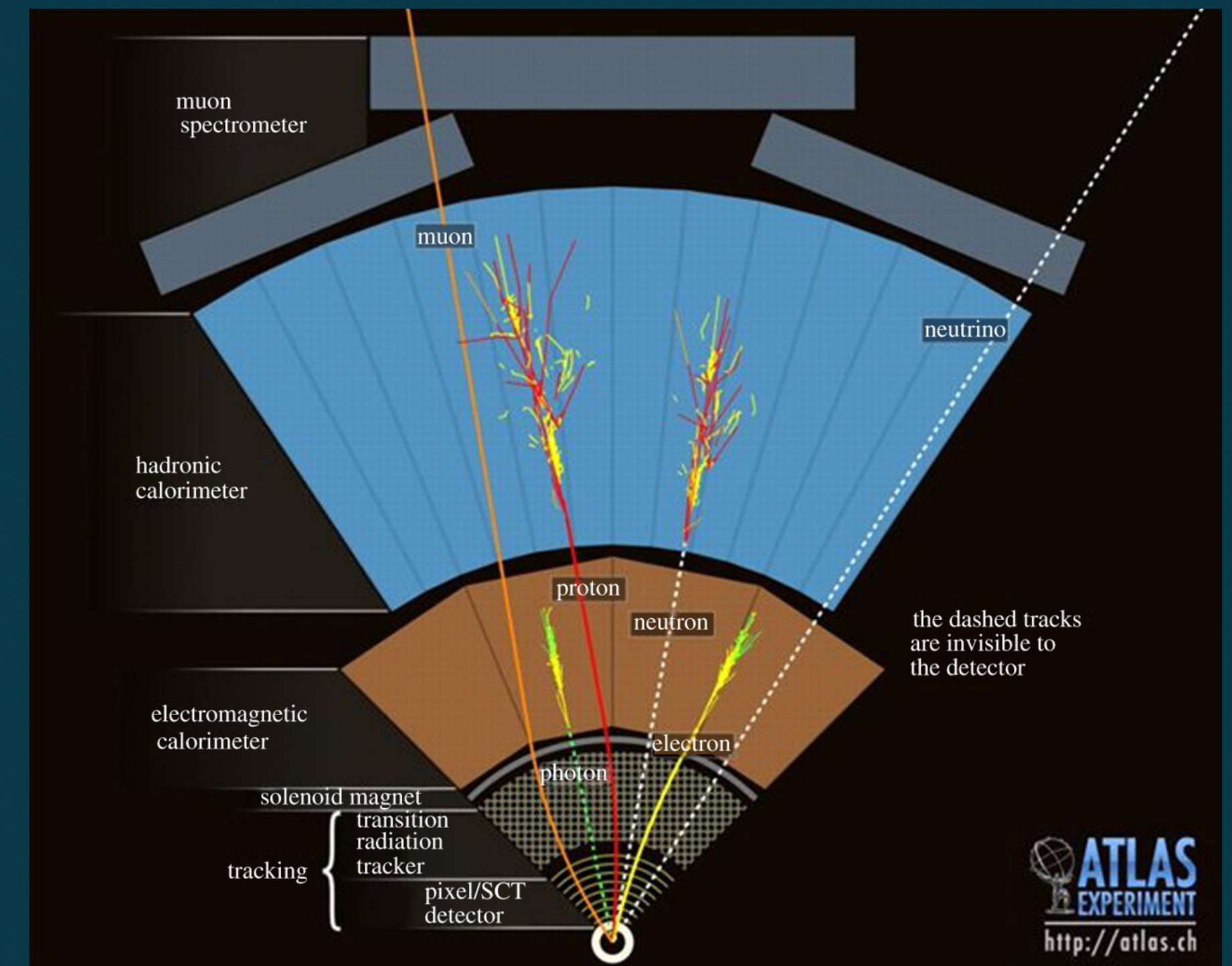
$$e^- \rightarrow e^- + \gamma \quad \text{Perda de energia por radiação e.m.}$$

$$\gamma \rightarrow e^+ e^- \quad \text{Produção de pares}$$

O detetor ATLAS

O calorímetro hadrônico

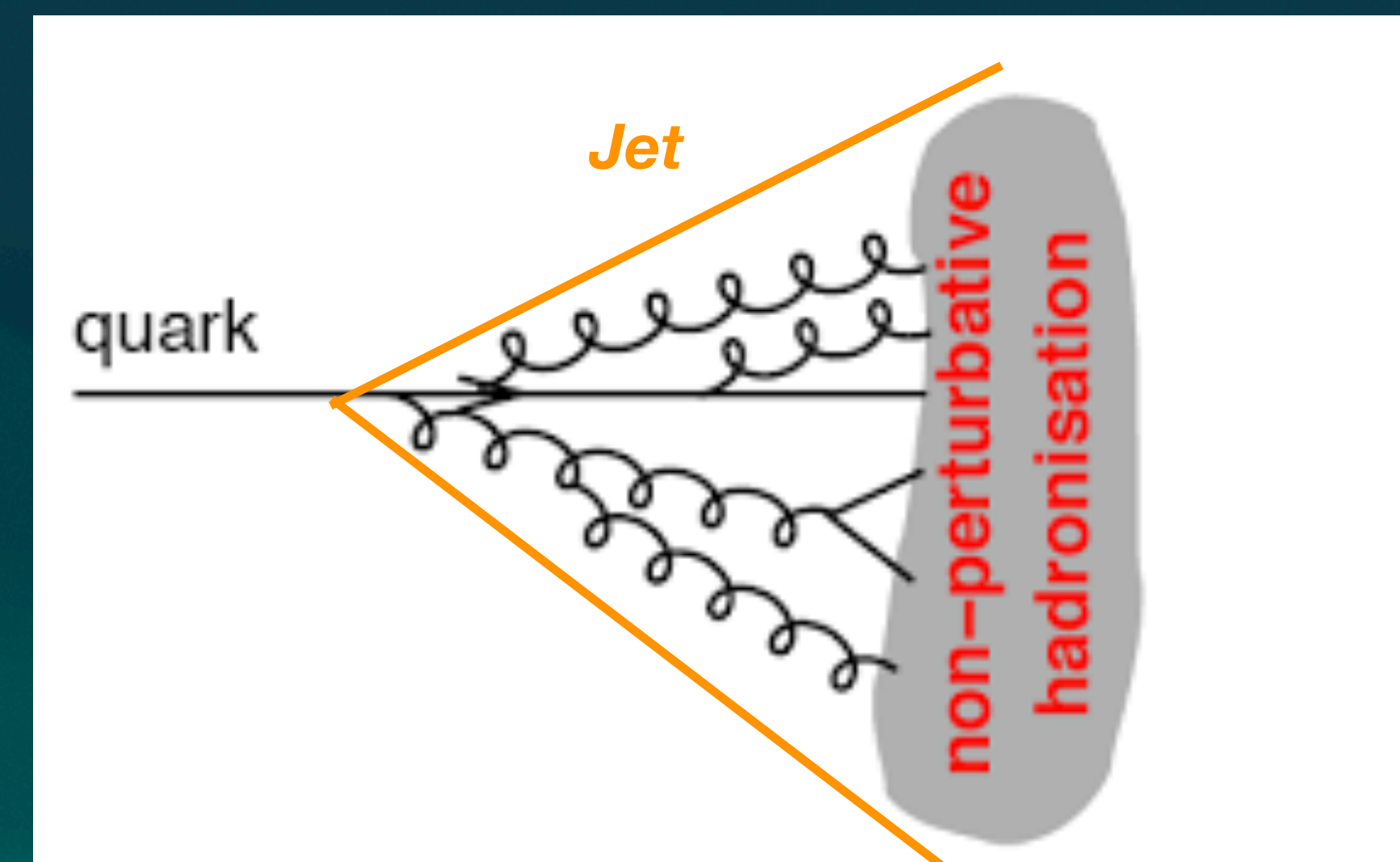
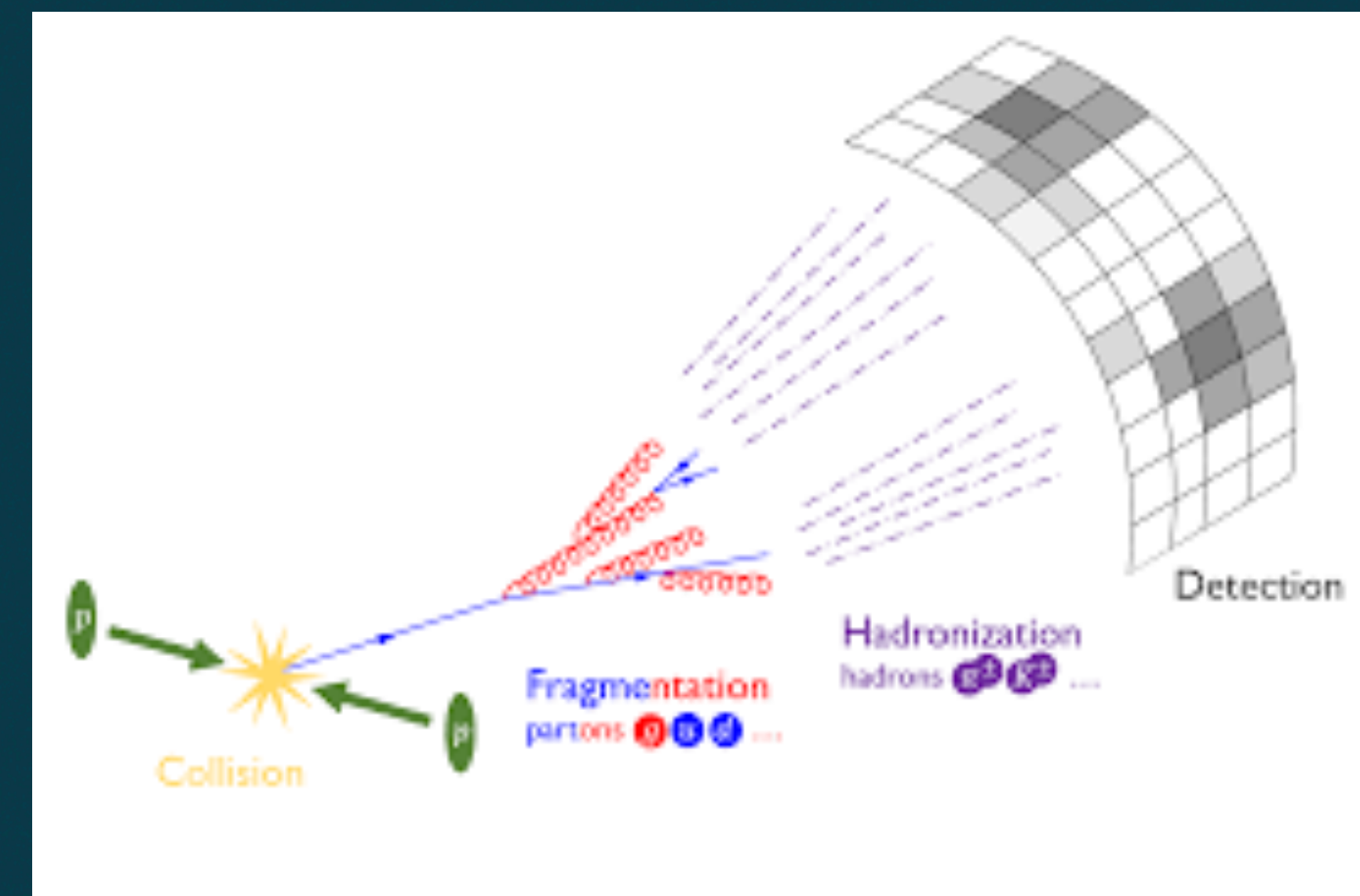
- O calorímetro hadrônico tem o papel de medir a energia dos hadrões.
- Os hadrões são partículas formadas por um conjunto de quarks;
- Protões e neutrões, por exemplo, são hadrões!
- O calorímetro hadrônico absorve toda energia dos hadrões, permitindo de medir esta quantidade.



O detetor ATLAS

A deteção dos quarks

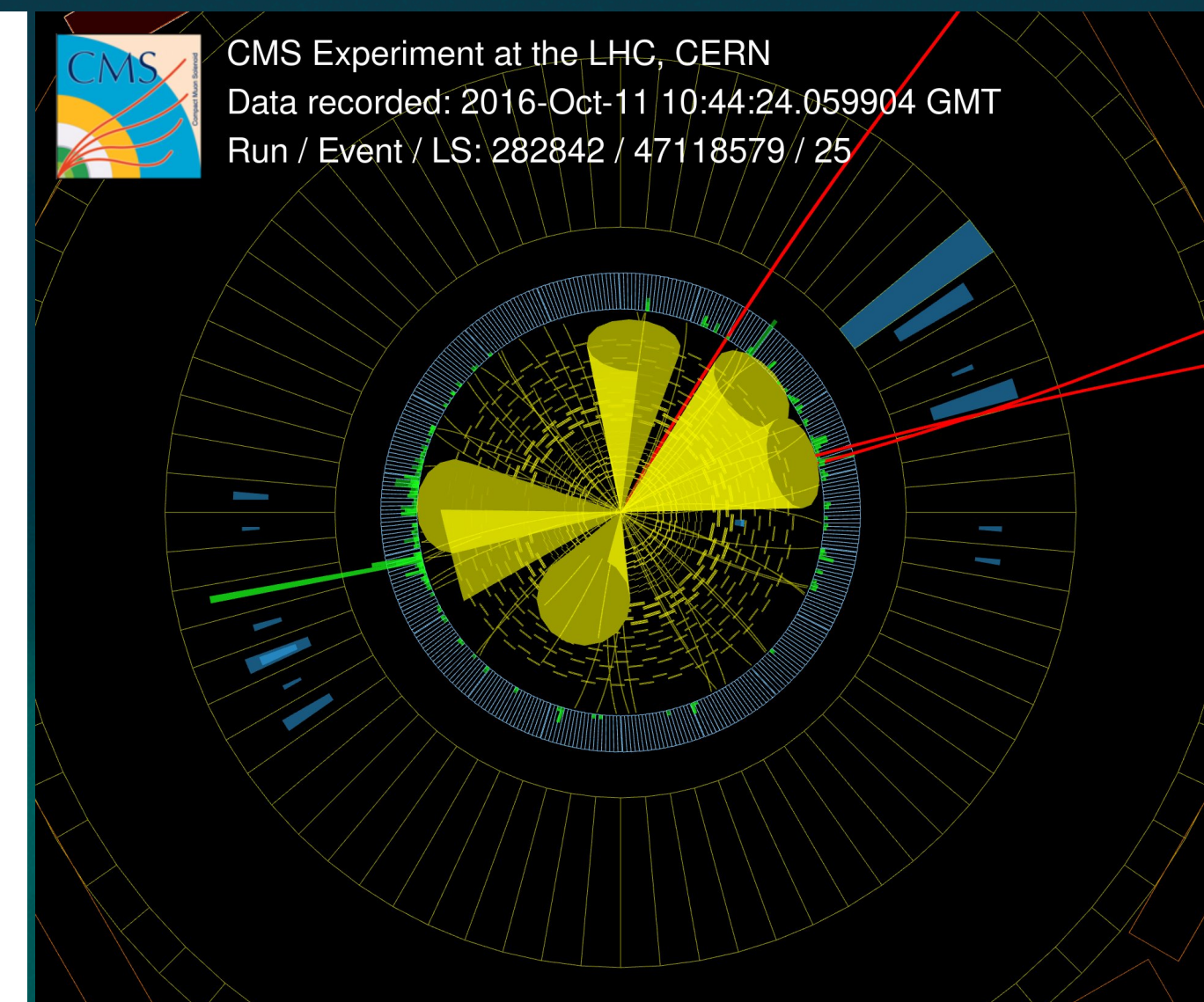
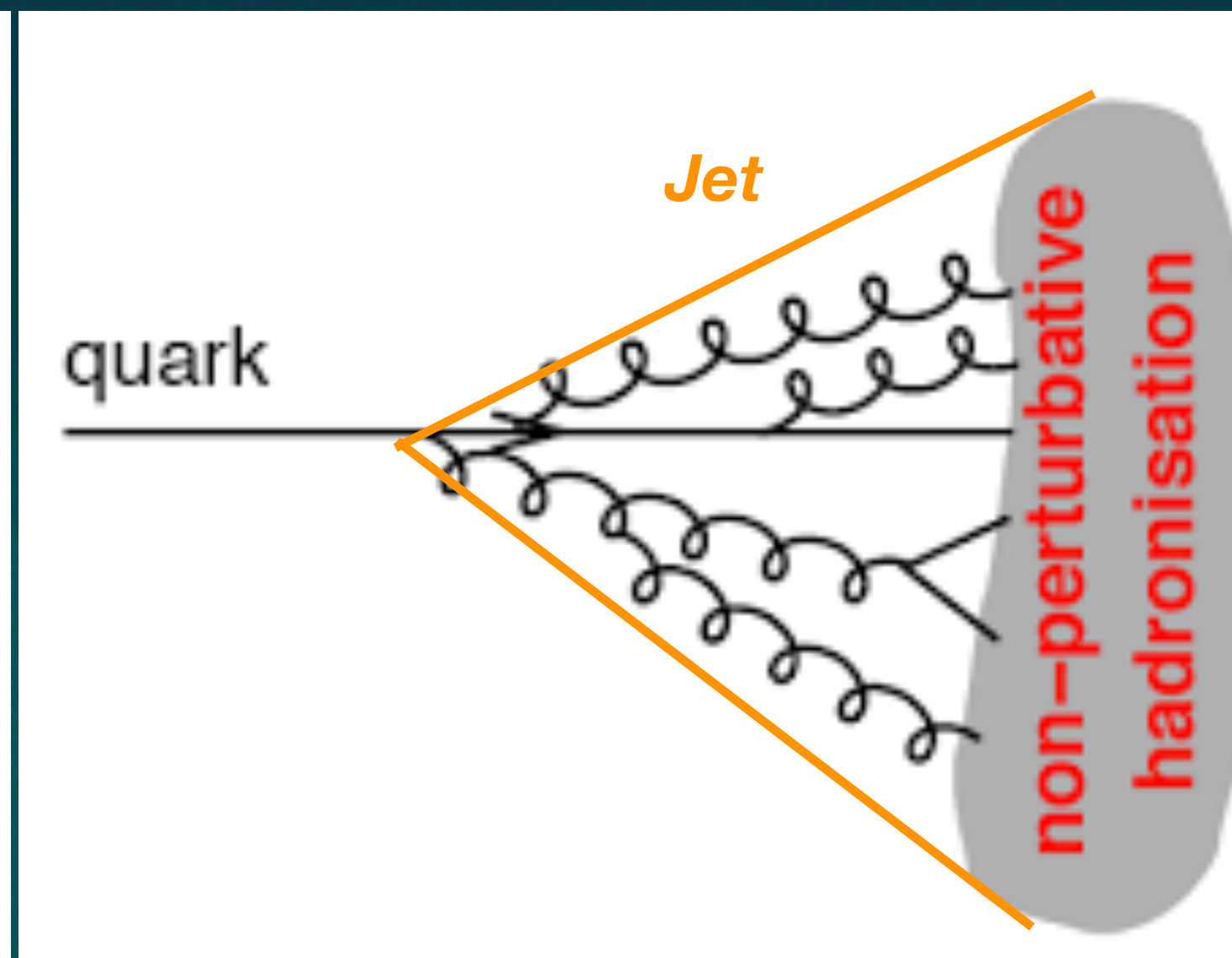
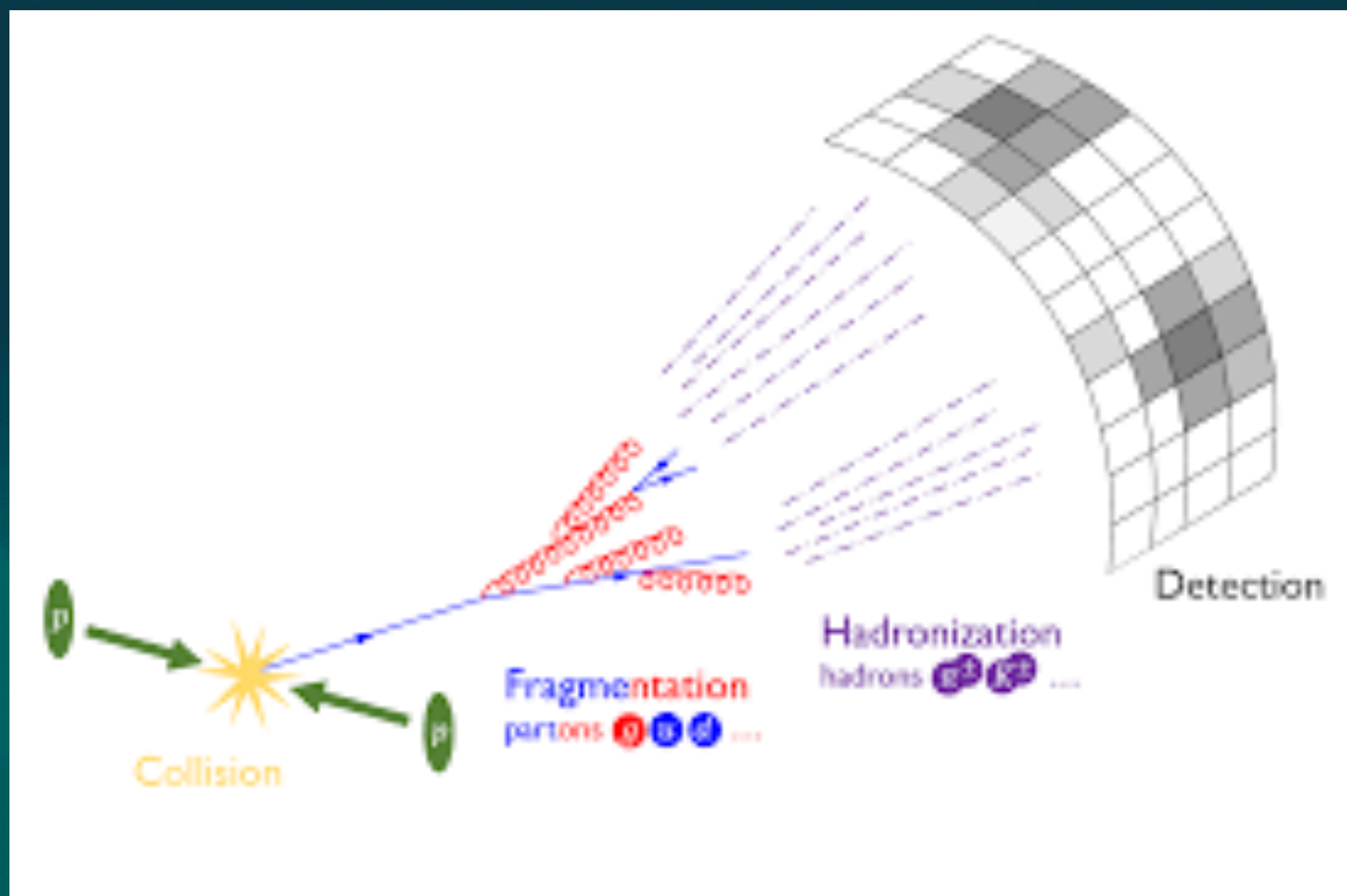
- Os quarks não gostam de ficar sozinhos!
- Portanto, estão sempre à procura de outros quarks para **ligar-se e formar hadrões**;
- A força que permite a agregação dos quarks é a **força forte**;
- A magnitude da força forte **depende da energia dos quarks**;
- Os quarks produzidos durante a interação **são muito energéticos**:
 - Perdem energia criando glúões;
 - Logo hadronizam (criam hadrões);
- As partículas criadas neste processo ficam confinadas dentro de estruturas designadas '**jets**'.



O detetor ATLAS

A detecção dos quarks

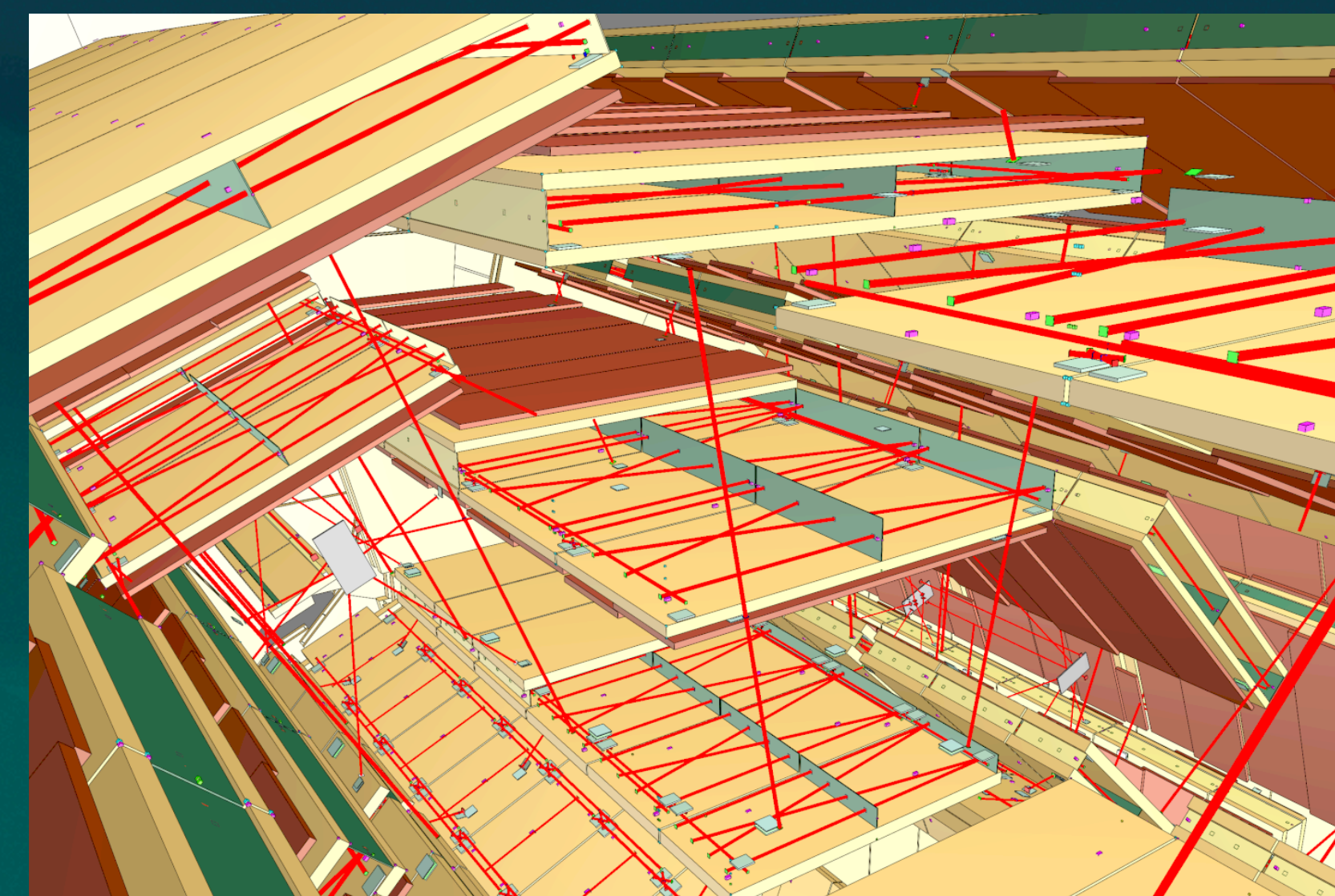
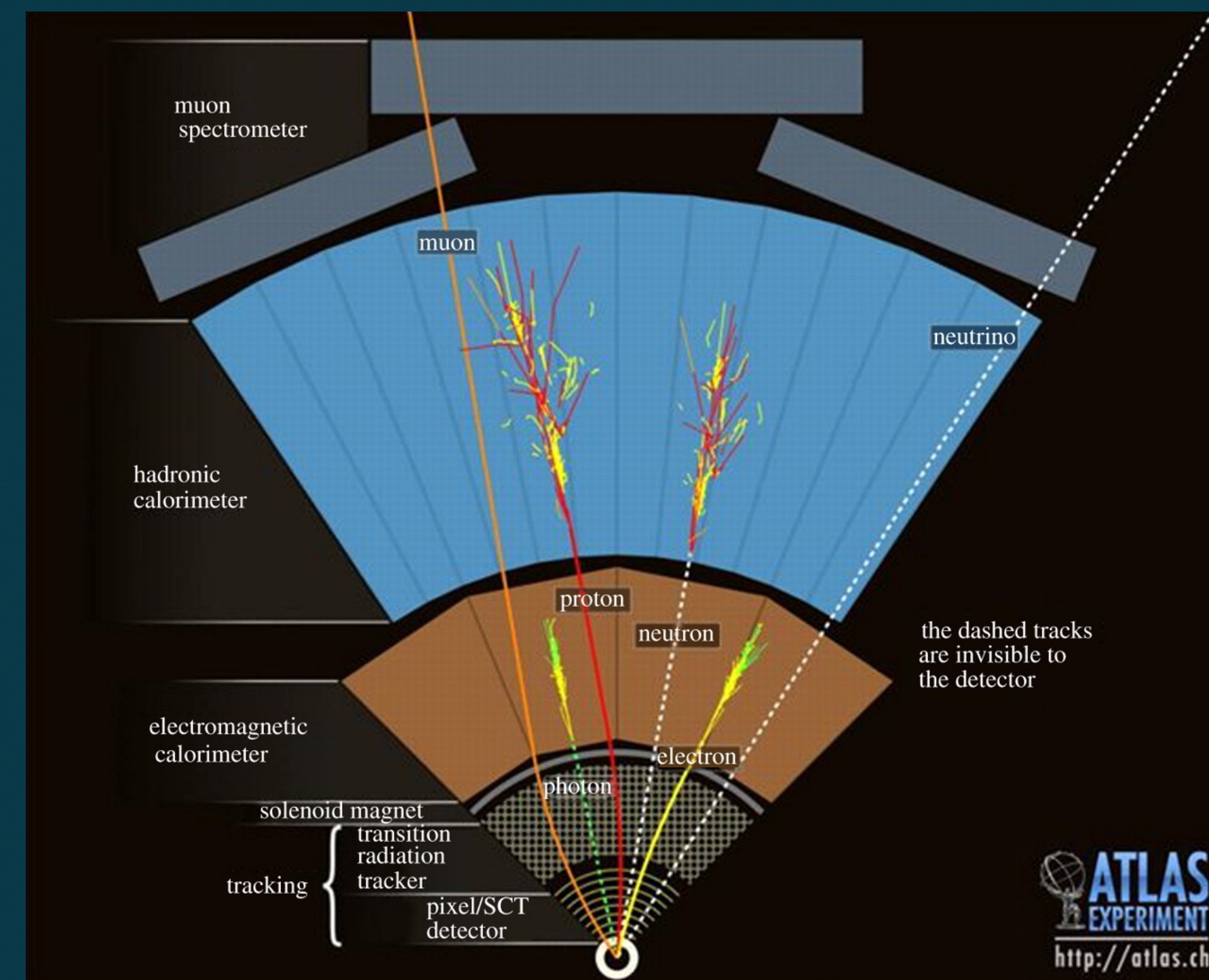
- Portanto, **não é possível detetar um quark, sozinho**;
- Podemos apenas **detetar os jets**:
 - É muito complicado determinar qual foi o quark que criou o jet;
 - A medida da energia dum jet é muito aproximativa (**sobreposição**).



O detetor ATLAS

As câmaras muônicas

- Permitem **identificar os muões** (traço no tracker + na câmara muônica);
- **Medem a energia** dos muões.
- Existem vários tipos de câmaras, mas o princípio de funcionamento é igual:
 - Os muões passam na câmara;
 - Ionizam o gas conteúdo na câmara;
 - A quantidade de átomos ionizados é proporcional à energia do muão.



Os principais desafios.

Os triggers

- Ainda por cima, a capacidade de armazenamento do CERN **não permite de guardar todos os acontecimentos!**
- De facto, estamos a falar de **~40M acontecimentos/s!**
- Temos de definir uns critérios de seleção:
 - Os cientistas **escolhem os processos a estudar**;
 - São definidos os **triggers**: um conjunto de requisitos que os acontecimentos têm de cumprir para ser guardados;
 - **Todos os eventos que não passam os triggers são apagados** (e não dá para voltar atrás...)



Os principais desafios.

O fluxo de informação

- Os triggers têm de tomar uma decisão **muito rapidamente!**
- Para este efeito, em princípio, os triggers têm de **dar uma olhada à informação que vem dos detetores;**
- Nesta apresentação descrevo o funcionamento dos triggers da experiência CMS;
- Existem **dois triggers**:
 - **LV1 trigger** (tempo de resposta $3.8 \mu s$): **apaga o 99.75% dos eventos** baseando-se sobre a informação que vem dos calorímetros e das câmaras muônicas;
 - **HLT trigger**: **descarta o 99%** dos eventos selecionados pelo LV1. A decisão tem em conta todas as variáveis.

