

Detecção da radiação

Alberto Reis

Em geral, uma partícula é detectada pela carga *Q* liberada ou pela detecção de fótons emitidos durante sua passagem pelo detector.

Algumas características básicas dos detectores:

- resolução
- tempo morto
- eficiência
- linearidade

Resolução

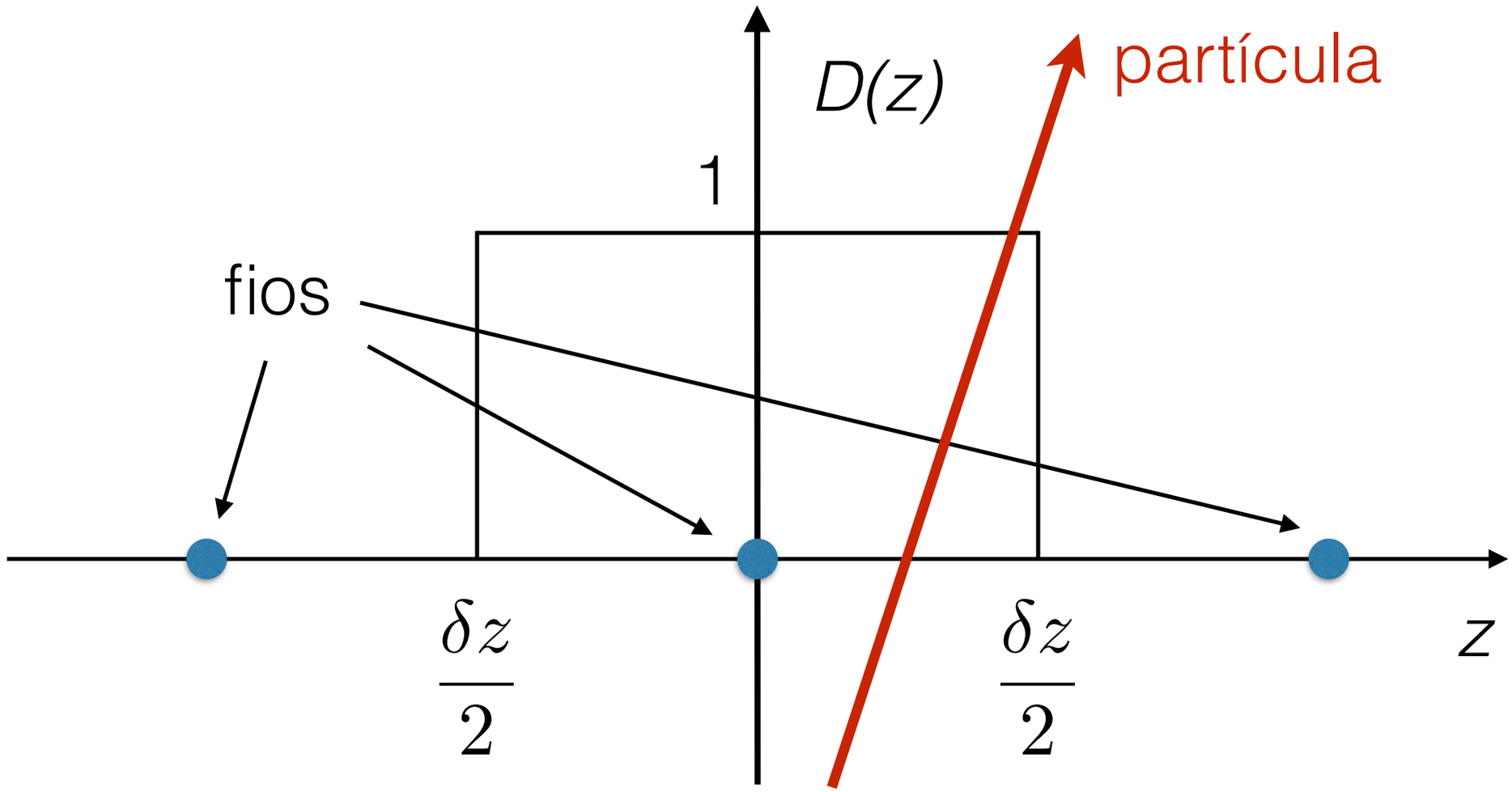
A resposta do detector é uma distribuição, ***D(z), z = Z_{obs} - Z_0.***
O valor esperado para essa quantidade é

$$\langle z \rangle = \frac{\int z \; D(z) \; dz}{\int D(z) \; dz}$$

A variância da quantidade medida é

$$\sigma_z^2 = \frac{\int (z - \langle z \rangle)^2 \; D(z) \; dz}{\int D(z) \; dz}$$

Como exemplo, considere uma câmara multi-filar com espaçamento entre os fios sendo δz.



O valor esperado da posição (coordenada do fio com sinal) é

$$\langle z \rangle = \frac{\int_{-\delta z/2}^{+\delta z/2} z \cdot 1 dz}{\int_{-\delta z/2}^{+\delta z/2} 1 dz} = 0$$

A variância é

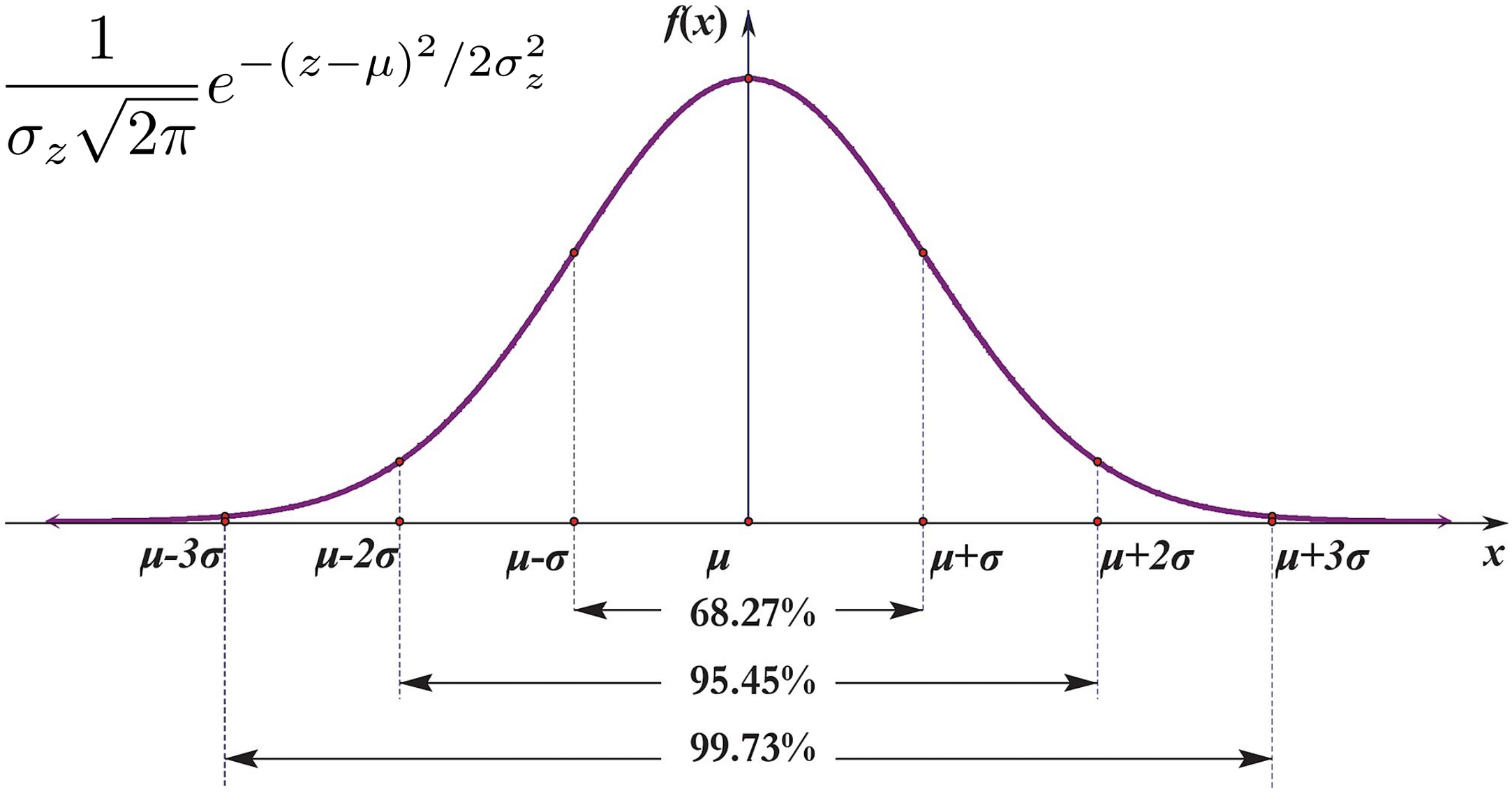
$$\langle z \rangle = \frac{\int_{-\delta z/2}^{+\delta z/2} (z-0)^2 \cdot 1 dz}{\delta z} = \frac{(\delta z)^2}{12}$$

A resolução é

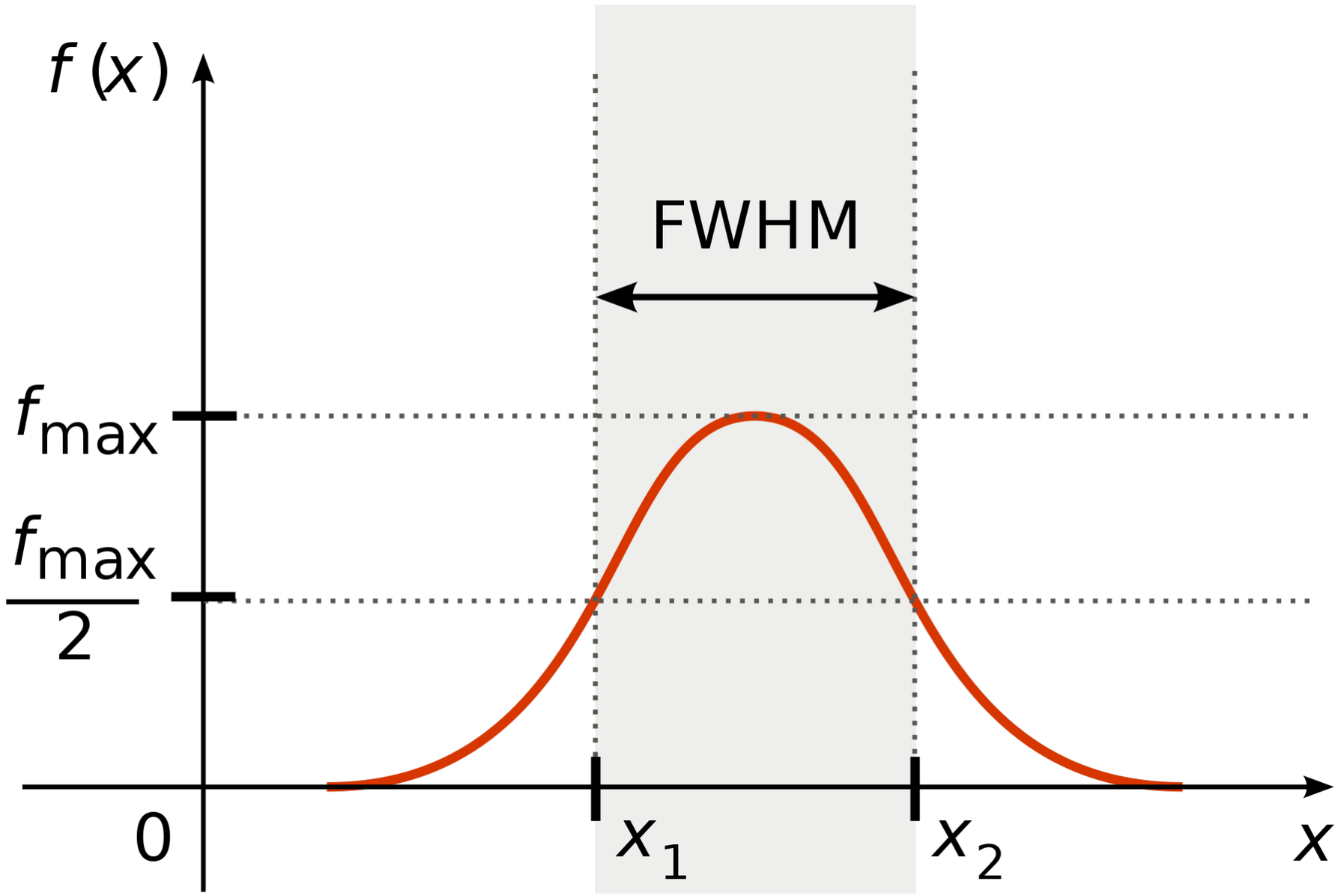
$$\sigma_z = \frac{\delta z}{\sqrt{12}}$$

Frequentemente a distribuição de valores medidos é uma Gaussiana (distribuição normal). Nesses casos a resolução é usualmente definida como o desvio padrão.

$$D(z) = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} e^{-(z-\mu)^2/2\sigma_z^2}$$



De forma mais geral, a resolução é definida como a metade da largura à metade da altura (FWHM).



Eficiência

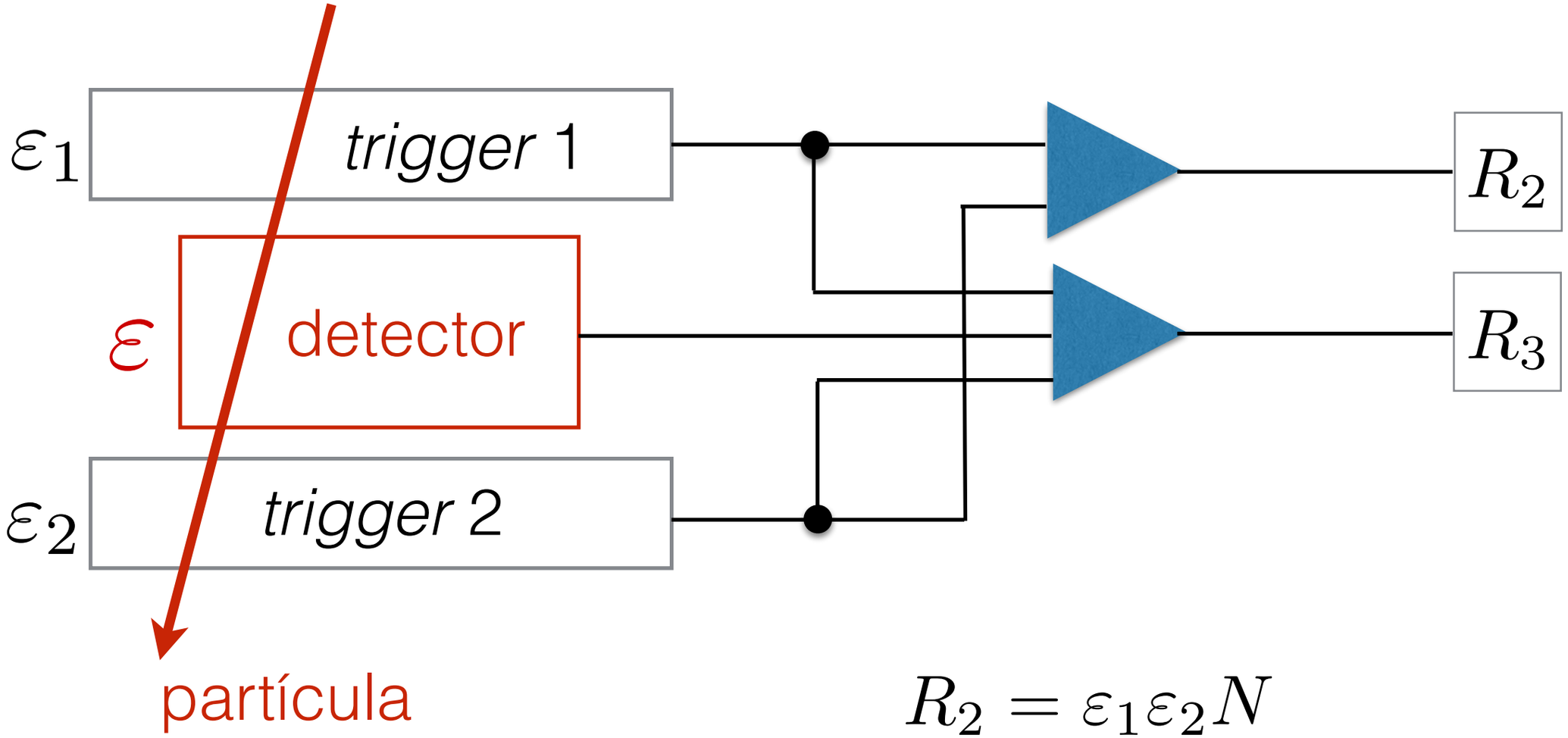
Eficiência é a probabilidade de que uma partícula, passando pelo detector, produza um sinal observável.

A eficiência depende da probabilidade de a partícula interagir com o meio, da capacidade de coletar cargas ou fótons emitidos e dos limiares da eletrônica de leitura.

Eficiência e resolução são, em geral, bastante correlacionadas.

A eficiência de um detector pode ser determinada em um experimento simples, em que o detector é colocado entre dois contadores com eficiência conhecida.

N partículas incidem sobre o conjunto



$\varepsilon_{1,2} \longrightarrow$ eficiências do trigger 1 e 2

$$R_2 = \varepsilon_1 \varepsilon_2 N$$

$$R_3 = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon N$$

$$\varepsilon = \frac{R_3}{R_2}$$

A eficiência é limitada pelo "tempo morto", durante o qual o detector está impossibilitado de registrar um evento por ainda estar processando o evento anterior.

A relação entre o valor medido $\langle z \rangle$ e o valor original Z deve ser estabelecida através da calibração, onde o detector é exposto a um feixe monocromático.

Se a relação é do tipo $\langle z \rangle = cZ$, onde c é uma constante, o detector é dito *linear*.

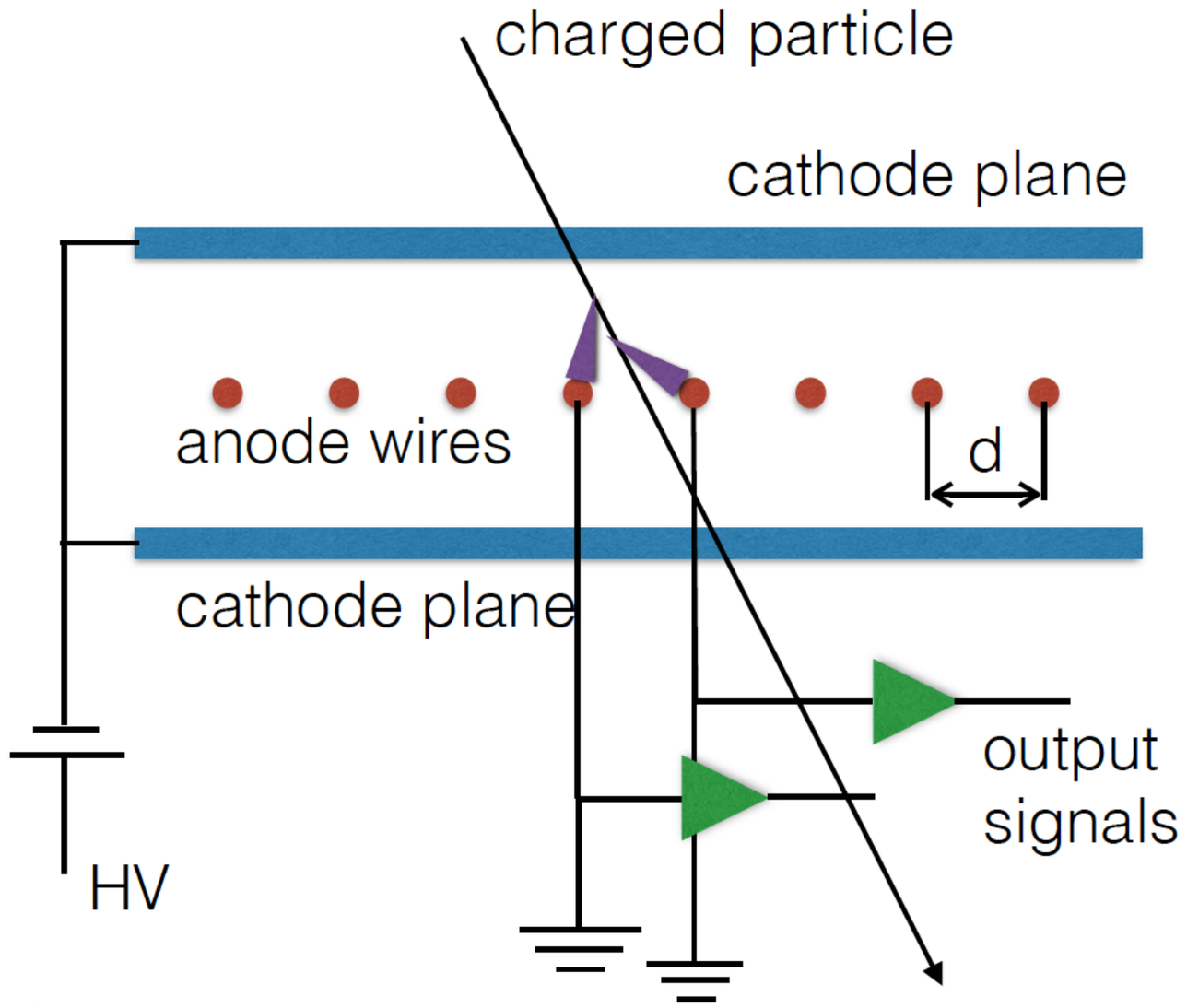
Medidas de posição

Câmaras multi-filares a gás

As câmaras multi-filares a gás foram desenvolvidas para medir a posição com base na ionização.

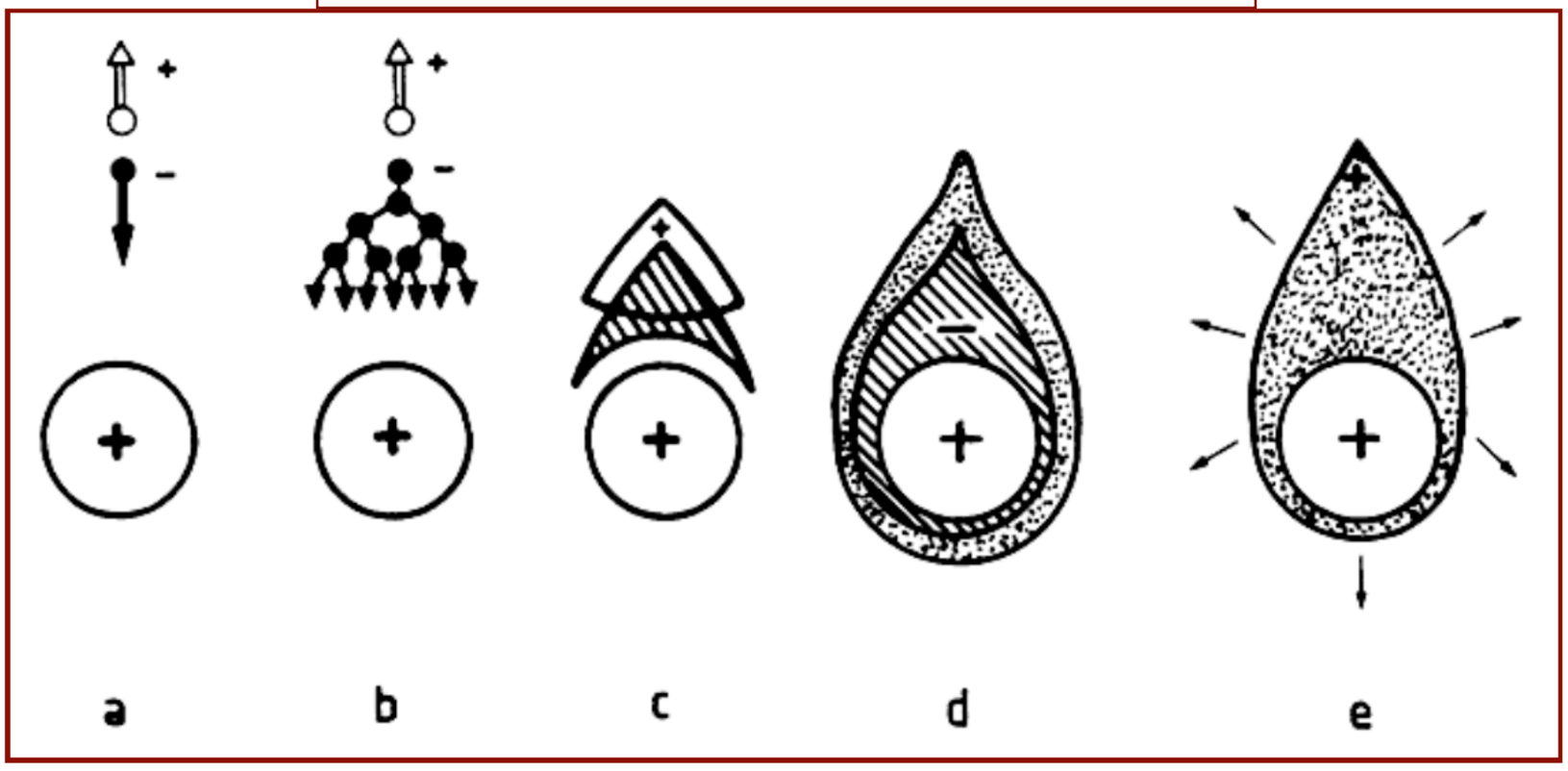
Elétrons livres e íons positivos resultantes da ionização se difundem pelo gás.

O movimento dos elétrons é direcionado pelo campo elétrico ao anodo mais próximo. Esse movimento induz uma corrente elétrica no anodo.



Frequentemente os elétrons liberados pela passagem de partículas ionizantes tem energia suficiente para ionizações adicionais (raios δ). Há, em média, 2 e 3 vezes mais ionizações secundárias do que primárias.

avalanche de Townsend



O campo elétrico é muito mais intenso na proximidade do anodo, acelerando os elétrons e provocando uma avalanche de ionizações secundárias.

A probabilidade de ionização secundária por unidade de percurso é $\alpha = 1/\lambda$, onde λ é o livre caminho médio de elétrons para uma segunda ionização.

Partindo de n_0 elétrons, $dn = n_0\ \alpha\ dx$ novos elétrons serão criados em um percurso dx.

O número total de elétrons após um percurso ***x*** é

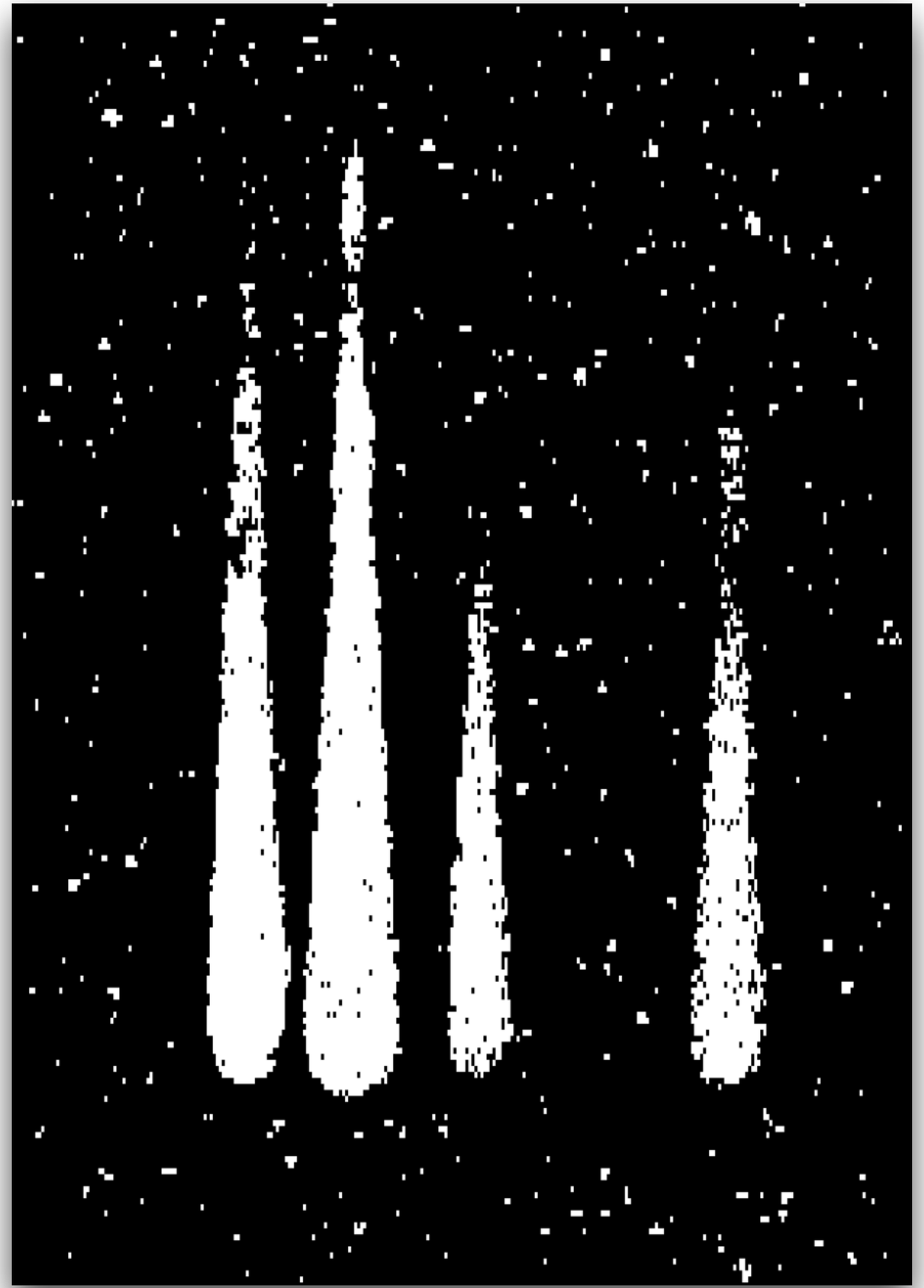
$$n = n_0 e^{\alpha x}$$

Um parâmetro fundamental no design do detector é o fator multiplicativo do gás, ou ganho, que depende da alta voltagem aplicada aos anodos.

$$M = \frac{n}{n_0}$$

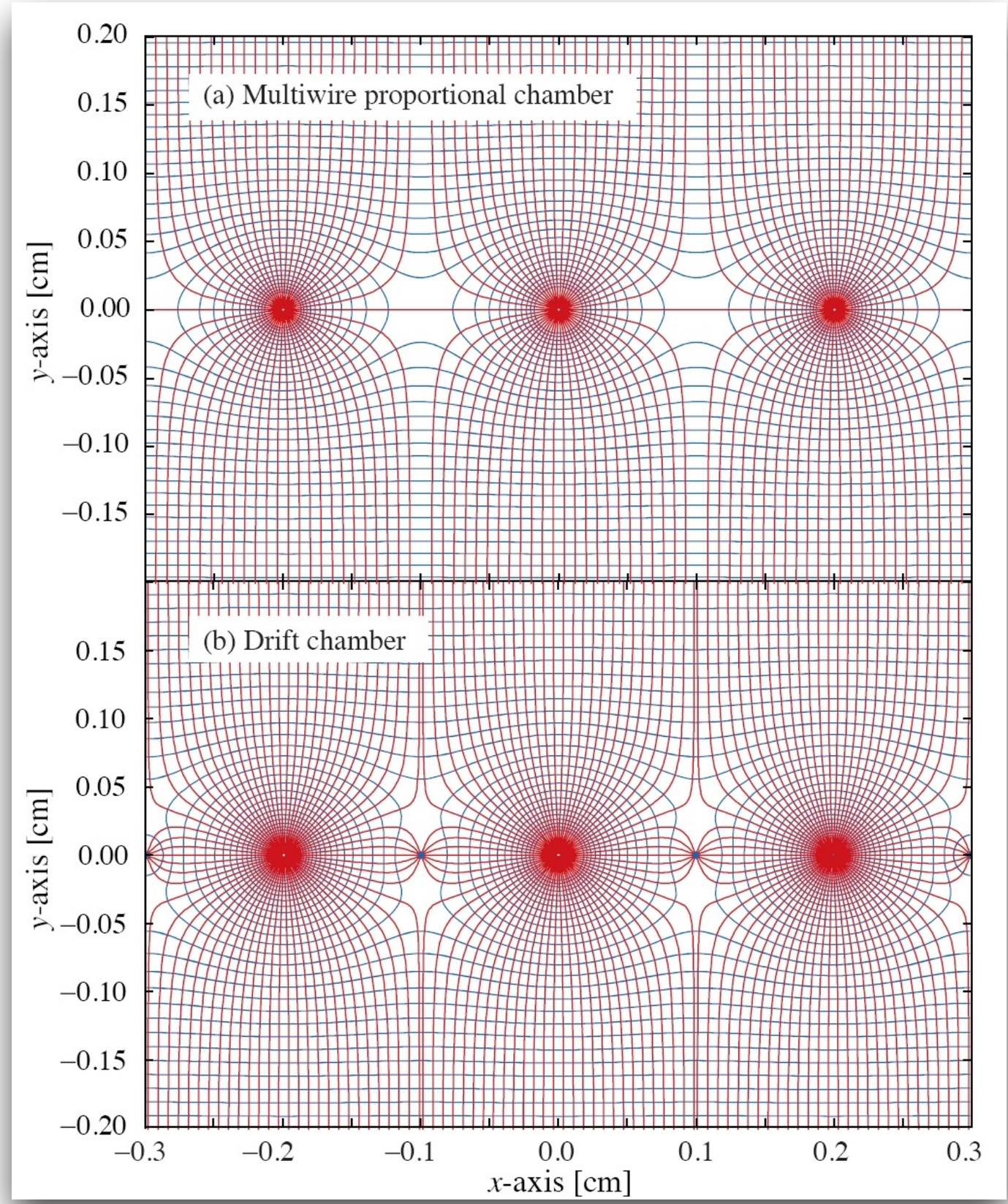
Fotografia, feita em câmaras de bolhas, de avalanches entre duas placas paralelas com alta voltagem aplicada.

Elétrons e íons se deslocam em direções opostas. Devido à sua pequena massa, elétrons se deslocam com velocidade muito maior que a dos íons.

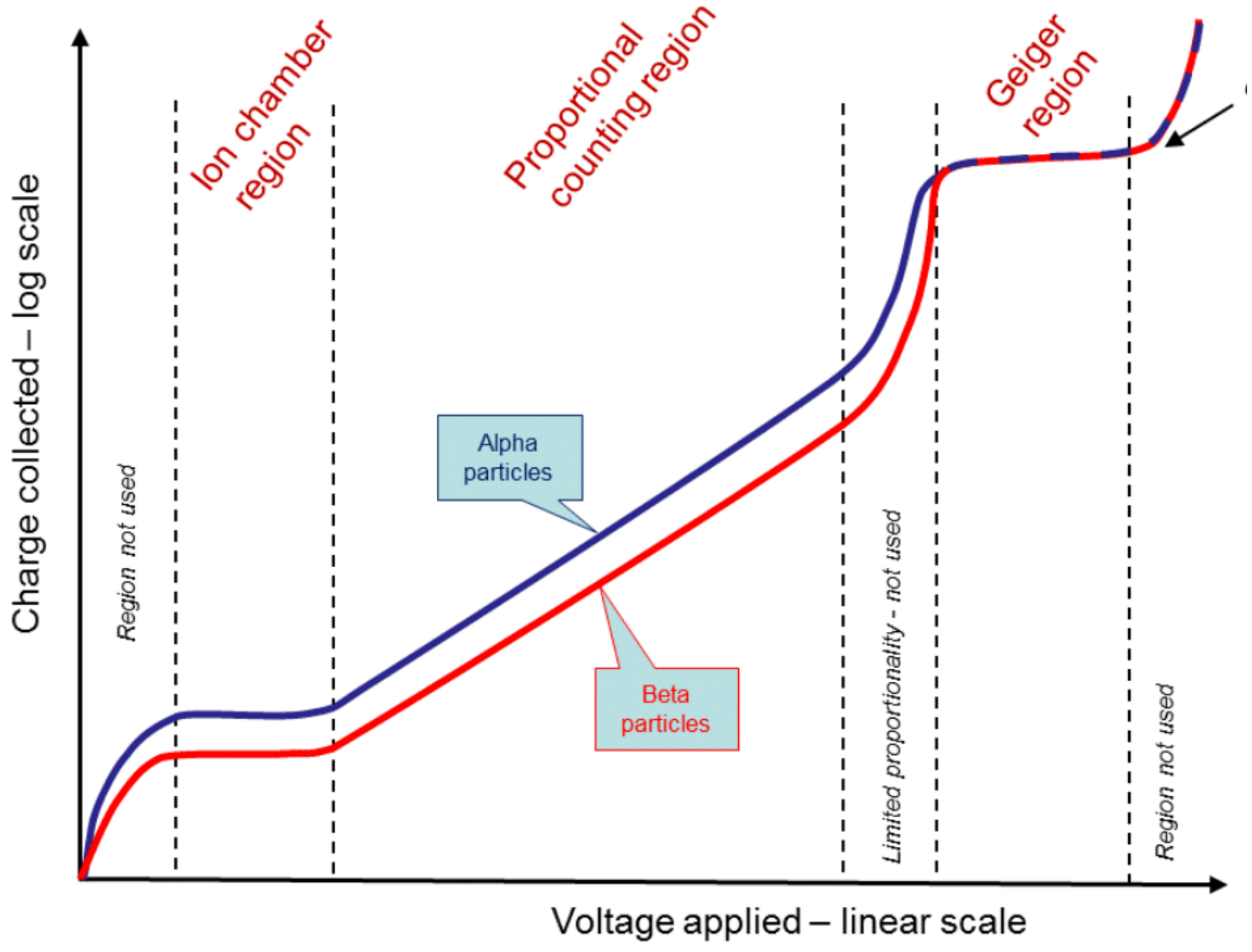


Uma câmara multifilar é composta por vários anodos paralelos formando planos, todos à mesma voltagem. Cada fio atua como um detector independente.

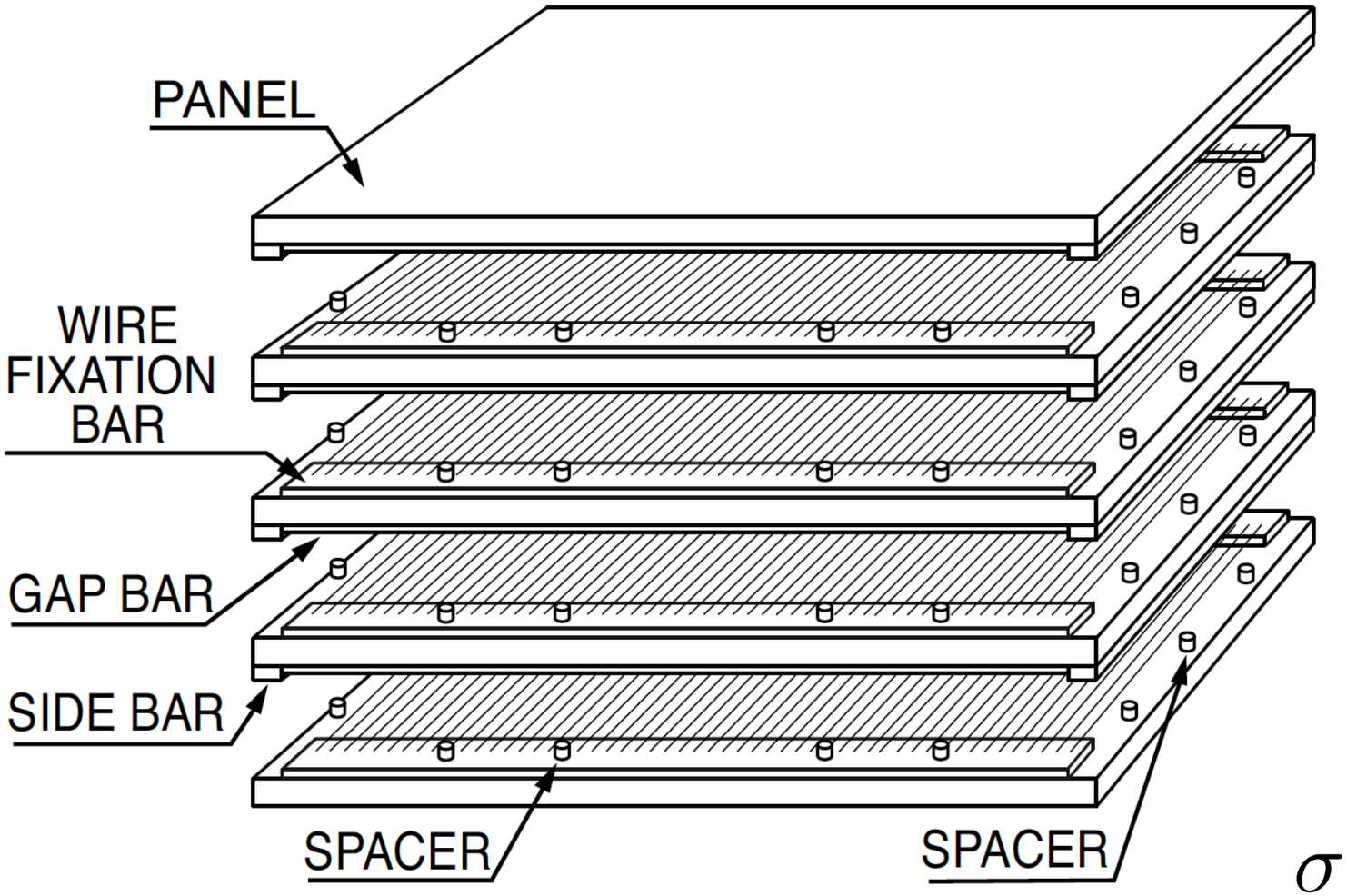
As *drift chambers* são um caso special. O campo elétrico é desenhado de tal forma que o tempo de deriva dos elétrons possa ser medido.

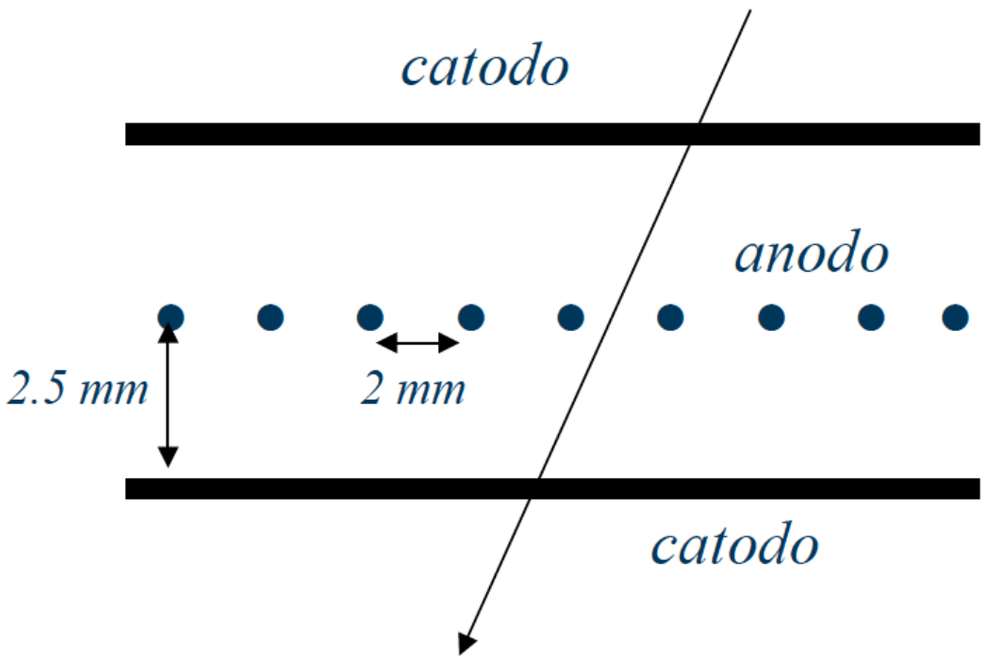


No regime proporcional, o sinal observado é proporcional à energia perdida pela partícula.



As MWPC são utilizadas quando é necessário cobrir uma grande área, em situações de alta intensidade ou quando uma resposta rápida é necessária. O detector consiste em planos de fios finos (~30 μm de diâmetro), espaçados, tipicamente, por 2 mm, entre dois planos de catodo, cuja distância é da ordem de 5 mm.





resolução espacial:

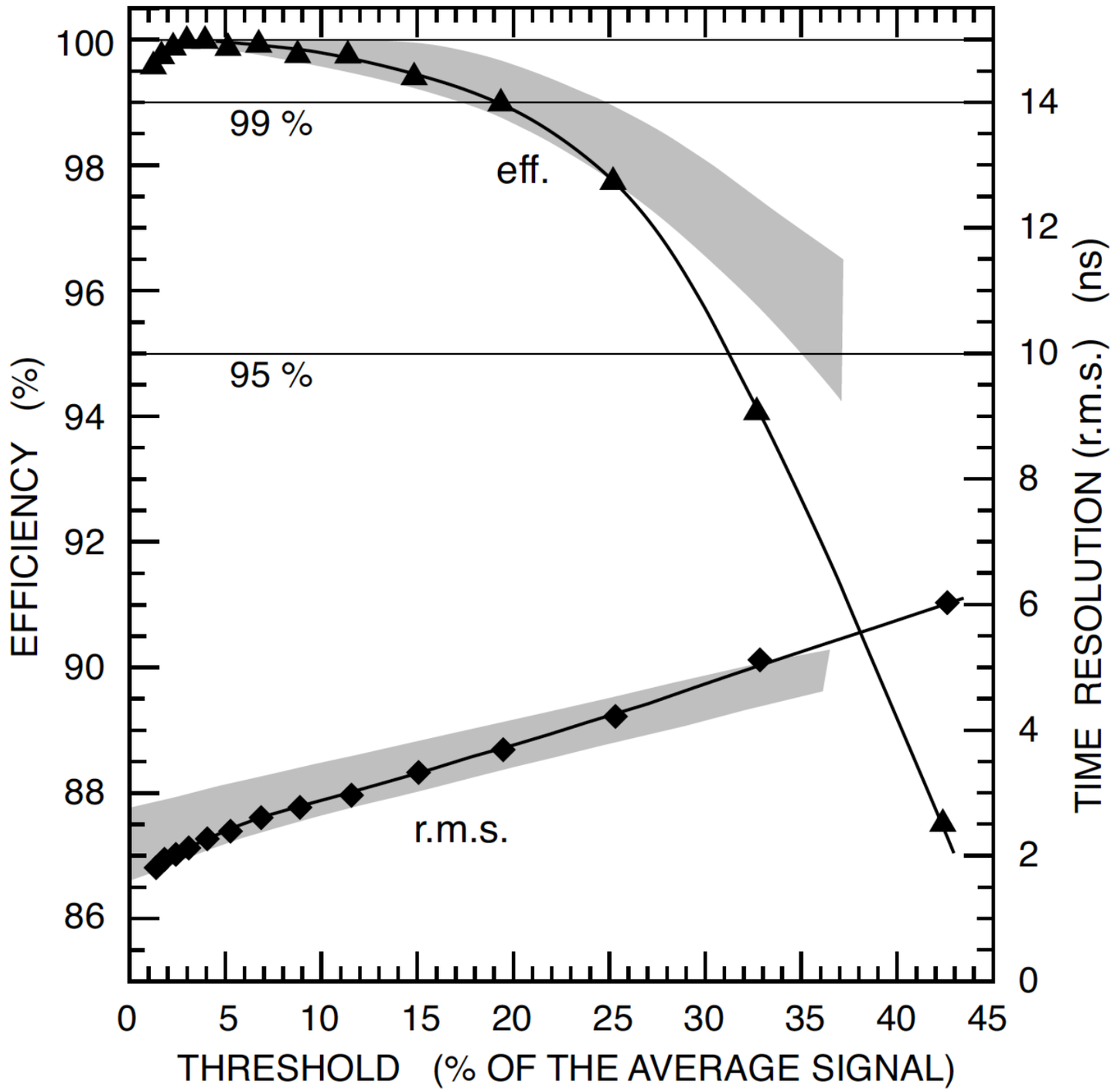
$$\sigma = 2 \text{ mm}/\sqrt{12} = 577 \ \mu\text{m}$$

MWPC do experimento LHCb

As MWPCs são muito eficientes e têm boa resolução temporal, permitindo seu uso para o *trigger*.

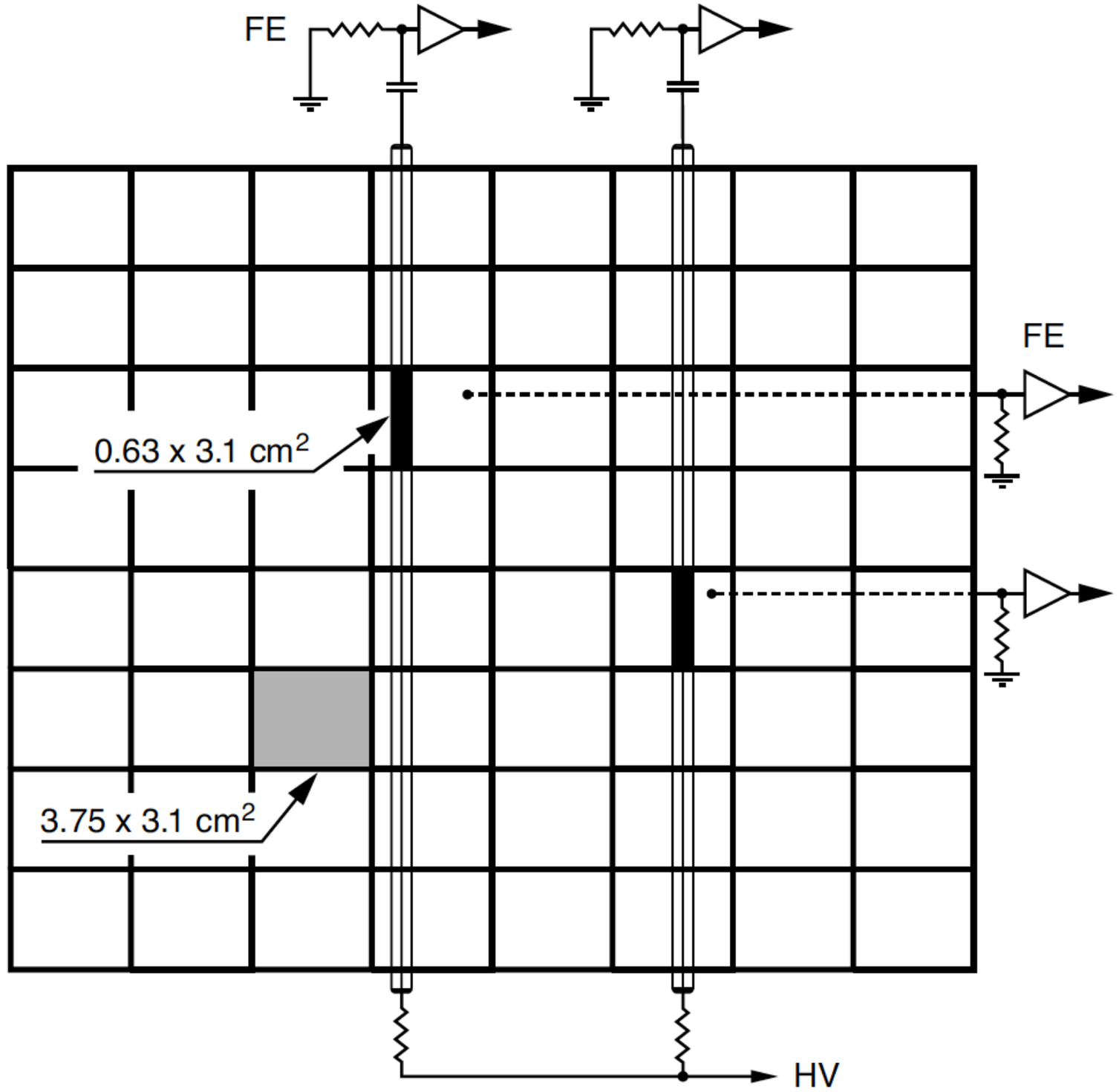
Os ruídos da eletrônica de leitura são controlados através do limiar de baixa tensão.

Quanto maior o limiar, menor o nível de ruído. Mas o aumento do limiar implica perda de eficiência. Em geral busca-se um compromisso entre nível de ruído e eficiência.



Vista de topo de uma MWPC, mostrando o esquema de leitura de uma MWPC do LHCb. Tanto o sinal dos anodos como os dos catodos são lidos.

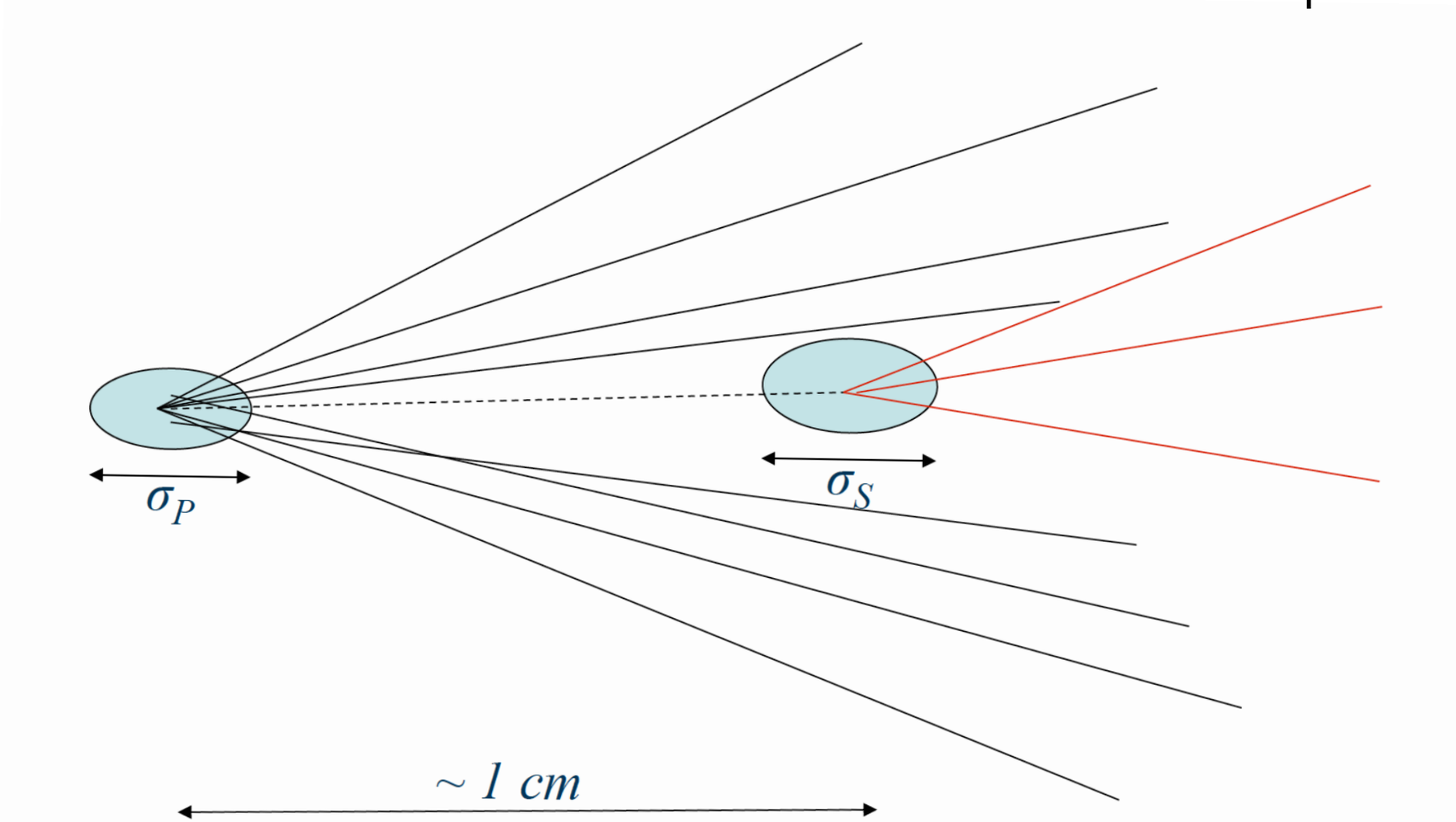
A área em preto é a superposição dos canais do anodo e catodo com sinal.



Detectores de estado sólido

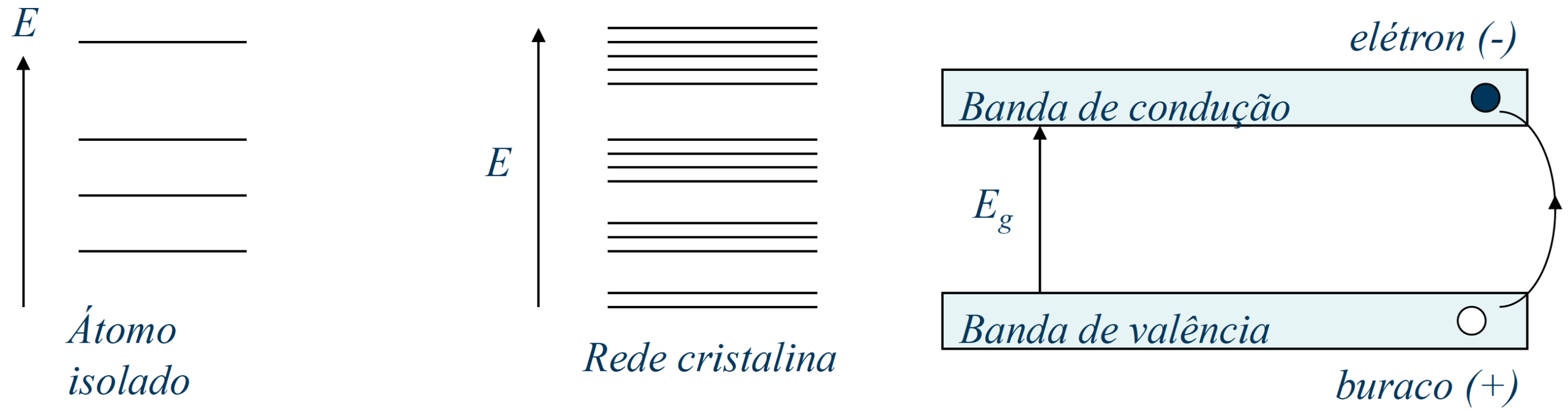
Detectores de micro-tiras ou pixels, a base de silício, permitem a determinação da posição com ótima resolução.

A precisão na reconstituição das trajetórias é fundamental para selecionar decaimentos fracos de hadrons pesados.



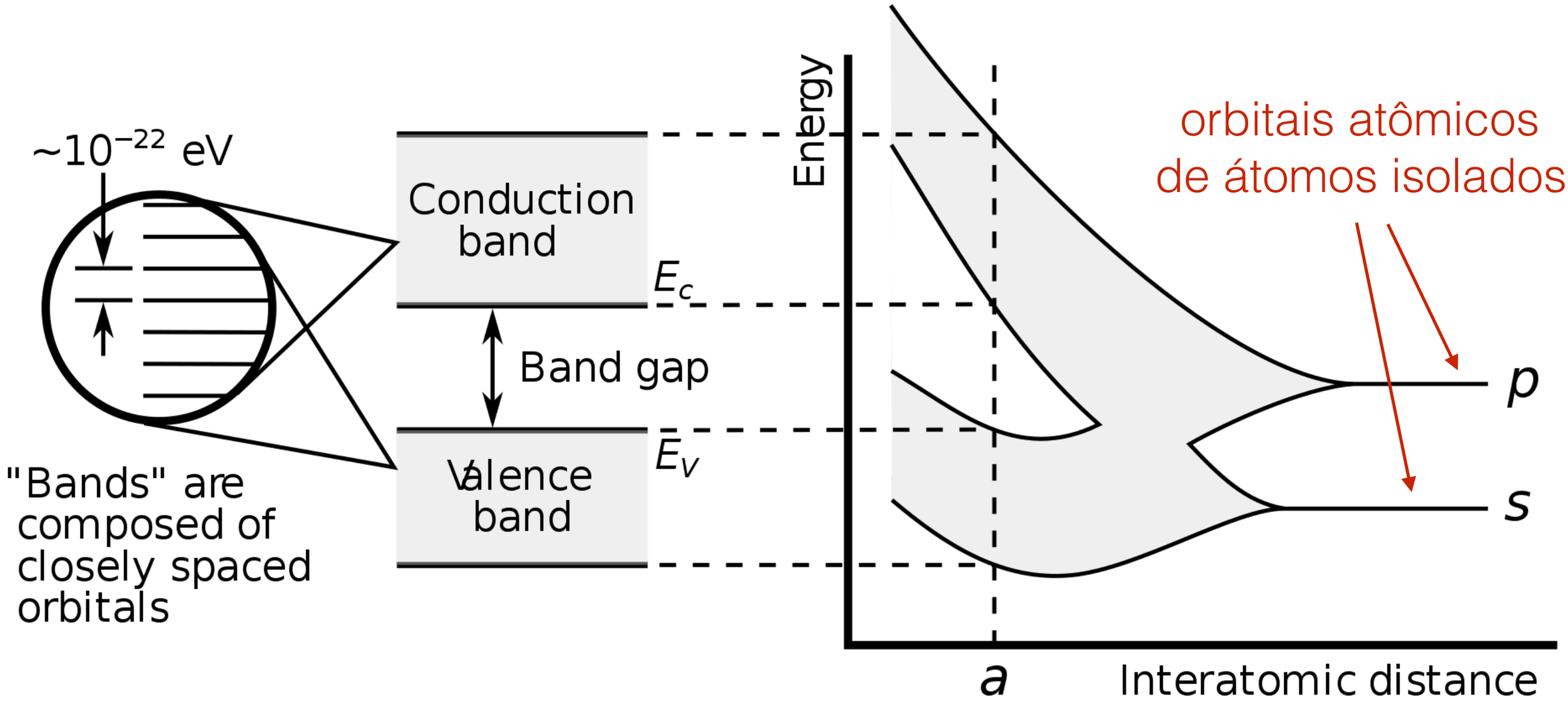
Detectores de estado sólido têm o mesmo princípio de funcionamento dos detectores a gás. Com uma densidade maior, podem ser feitos em camadas muito finas.

O modelo de bandas dos sólidos:



Níveis discretos de energia dos elétrons em átomos isolados se fundem em bandas num cristal. Bandas de energia mais baixa são totalmente preenchidas com elétrons, enquanto bandas de energia mais alta são vazias.

O modelo de bandas dos sólidos:



Chetvorno - https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=56983339

Das bandas de energia, a mais baixa que é vazia ou parcialmente preenchida é a *banda de condução*.

A banda com energia mais alta que tem todos os níveis preenchidos é a *banda de valência*.

Condutores são sólidos com a banda de condução parcialmente preenchida, podendo os elétrons se mover livremente sob a ação de um campo elétrico.

Os sólidos com banda de condução vazia são divididos em:

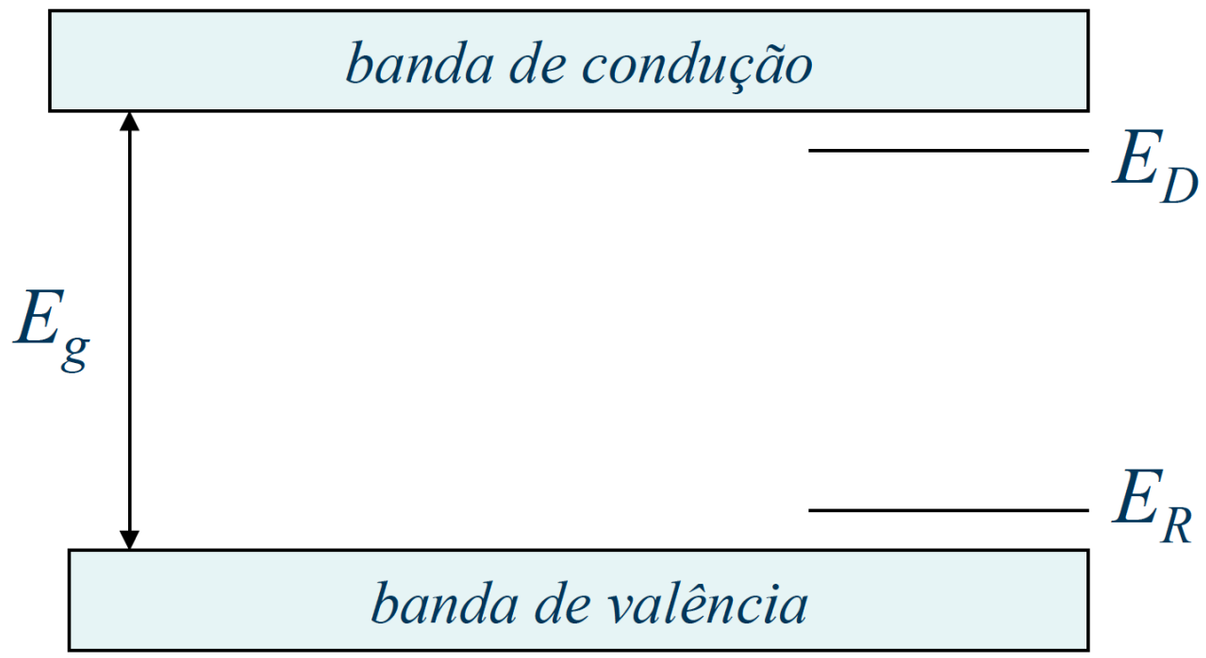
- isolantes (resistividade $\rho \sim 10^{22} - 10^{14}\ \Omega/\mathrm{cm}$)
- semicondutores ($\rho \sim 10^{9} - 10^{-2}\ \Omega/\mathrm{cm}$)

Em isolantes a energia de separação E_g é alta (~9 eV). Em um semicondutor puro o valor de E_g é pequeno (~1 eV).

A adição de impurezas, mesmo em pequenas quantidades, aumenta sua condutividade em ordens de grandeza.

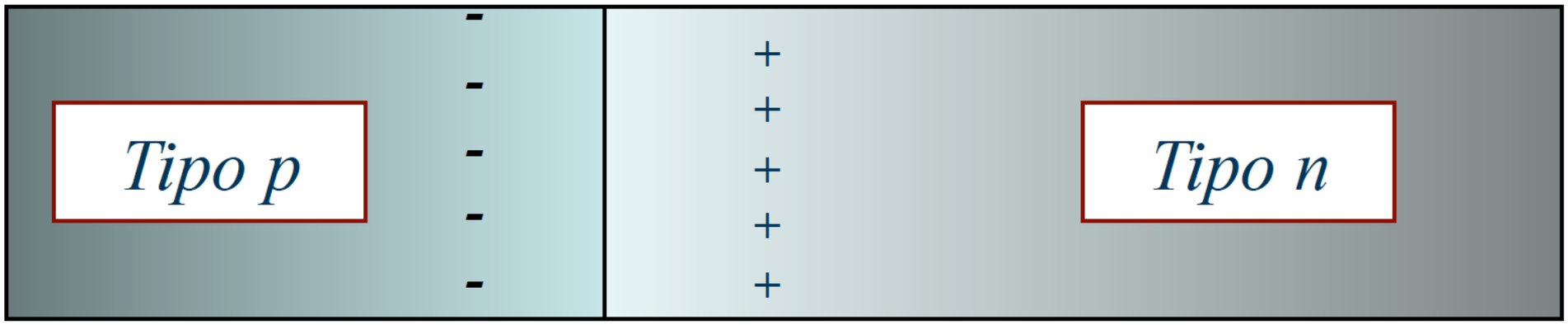
O silício possui 4 elétrons na última camada. Se impurezas com apenas 3 elétrons na última camada são adicionadas (receptores) fica faltando um elétron na ligação covalente.

Os níveis de energia dos receptores são um pouco maiores que os da banda de valência (E_R). Os "buracos" são os responsáveis pela condução elétrica e o material é dito do *tipo p.*



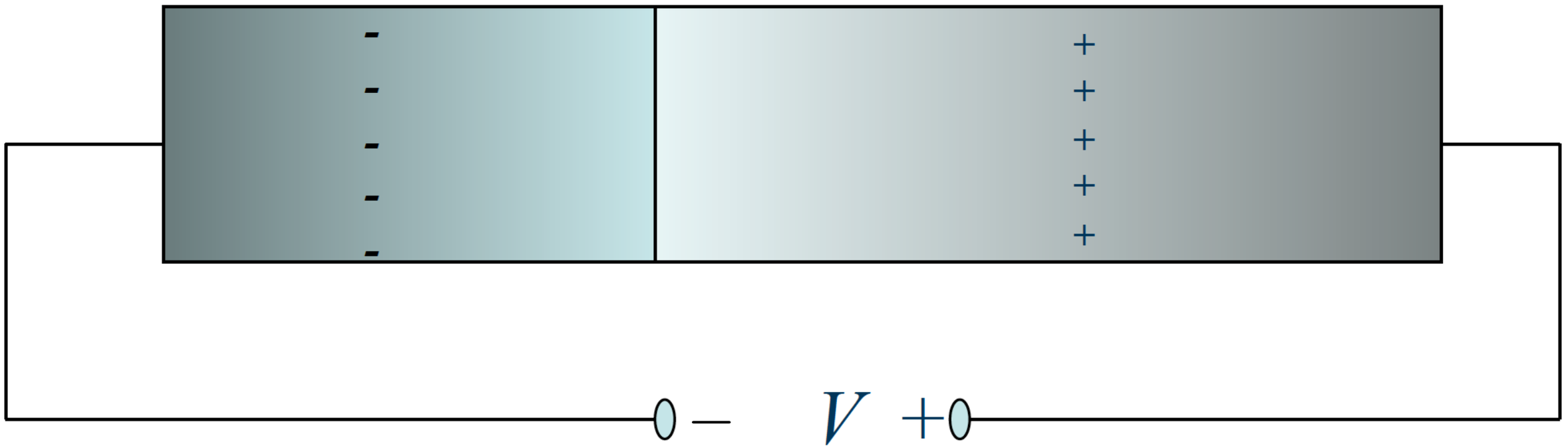
Se a impureza tem 5 elétrons na última camada (doador), o elétron extra pode facilmente passar para a banda de condução e o material é o *tipo n*.

Para se construir um detector, é necessário combinar semicondutores dos dois tipos, formando uma *junção pn*.



Os elétrons do lado n migram para o lado p, e os buracos do lado p migram para o lado n. O equilíbrio é atingido quando o campo elétrico gerado pela distribuição espacial de carga é suficiente para impedir a migração, criando em torno da junção uma zona livre de portadores de carga (depletion area).

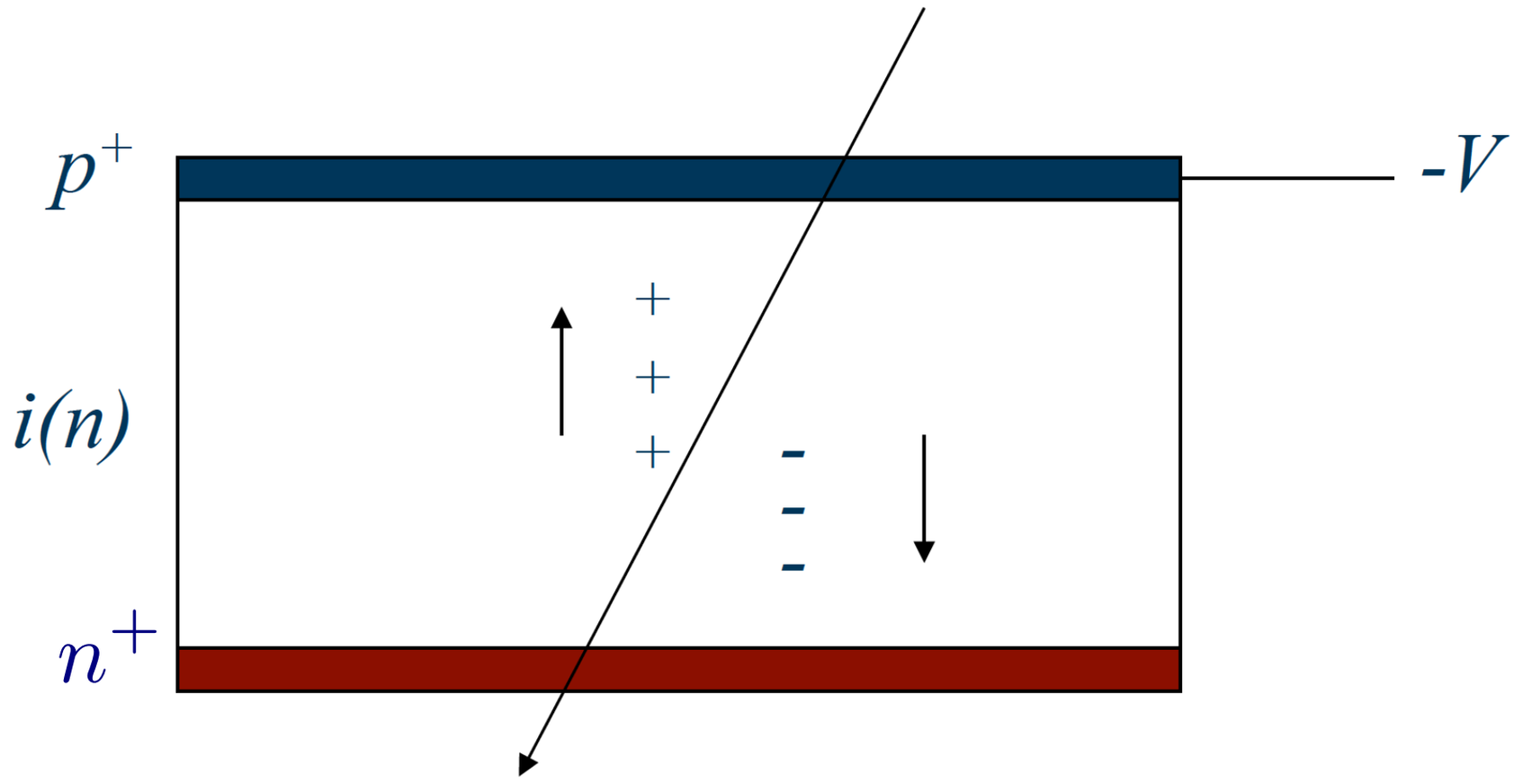
Se uma voltagem externa positiva é aplicada ao lado n da junção, a área livre de portadores de carga aumenta.



Se um dos lados tem uma concentração de impurezas muito maior que o outro, a zona de exaustão se estende por quase todo o volume do semicondutor. Dopagens altas são designadas pelos símbolos p+ e n- .

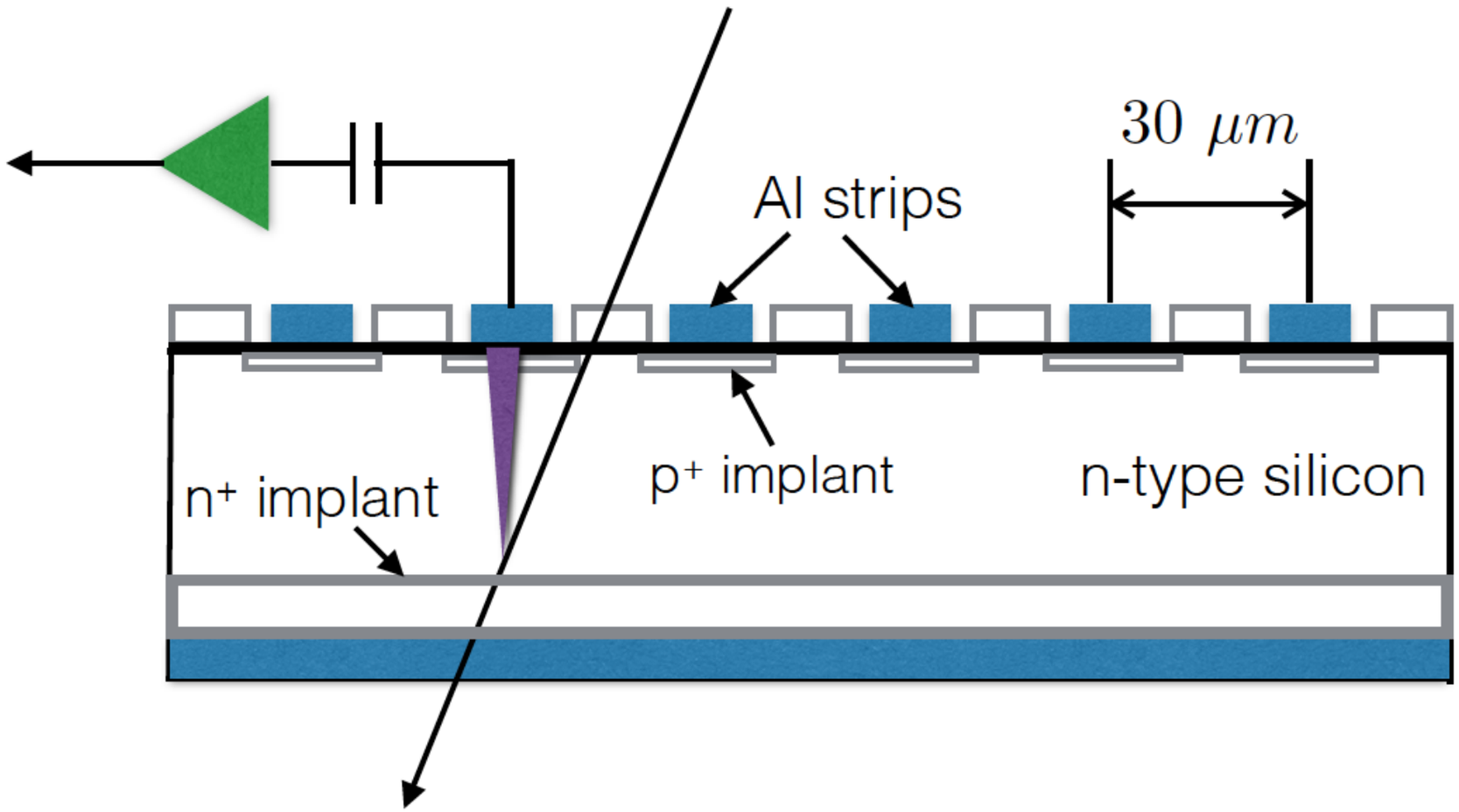
Estrutura típica de um detector semicondutor (PIN) :

- uma camada tipo *p* altamente dopada (p^+);
- uma camada i com alta resistividade;
- uma camada *n* altamente dopada (n^+).



Quando uma partícula cruza a zona de exaustão, elétrons e "buracos" migram para os eletrodos, induzindo uma corrente elétrica como numa MWPC.

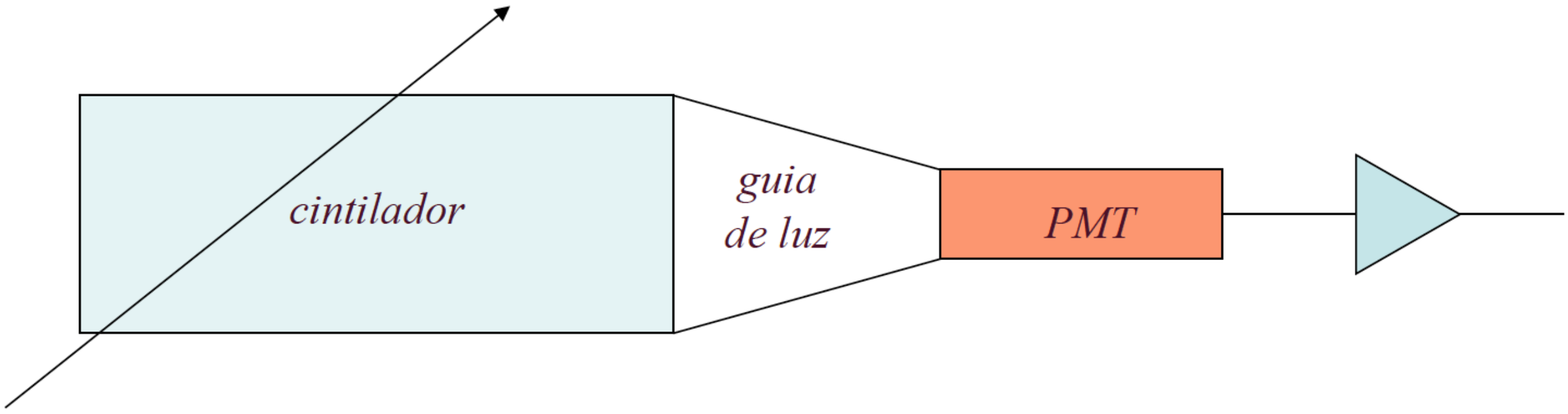
Eletrodos de alumínio fazem o papel dos fios numa MWPC. Podem ser segmentados em tiras ou pixels. Com tiras separadas $20 - 25\ \mu\mathrm{m}$ por é possível obter uma resolução inferior a $10\ \mu\mathrm{m}$



Cerca de 90 pares elétron-buraco são produzidos a cada μm percorrido por uma partícula de ionização mínima. Com espessura típica de 300 μm, a corrente induzida é bem superior ao ruído da eletrônica

Medidas de tempo

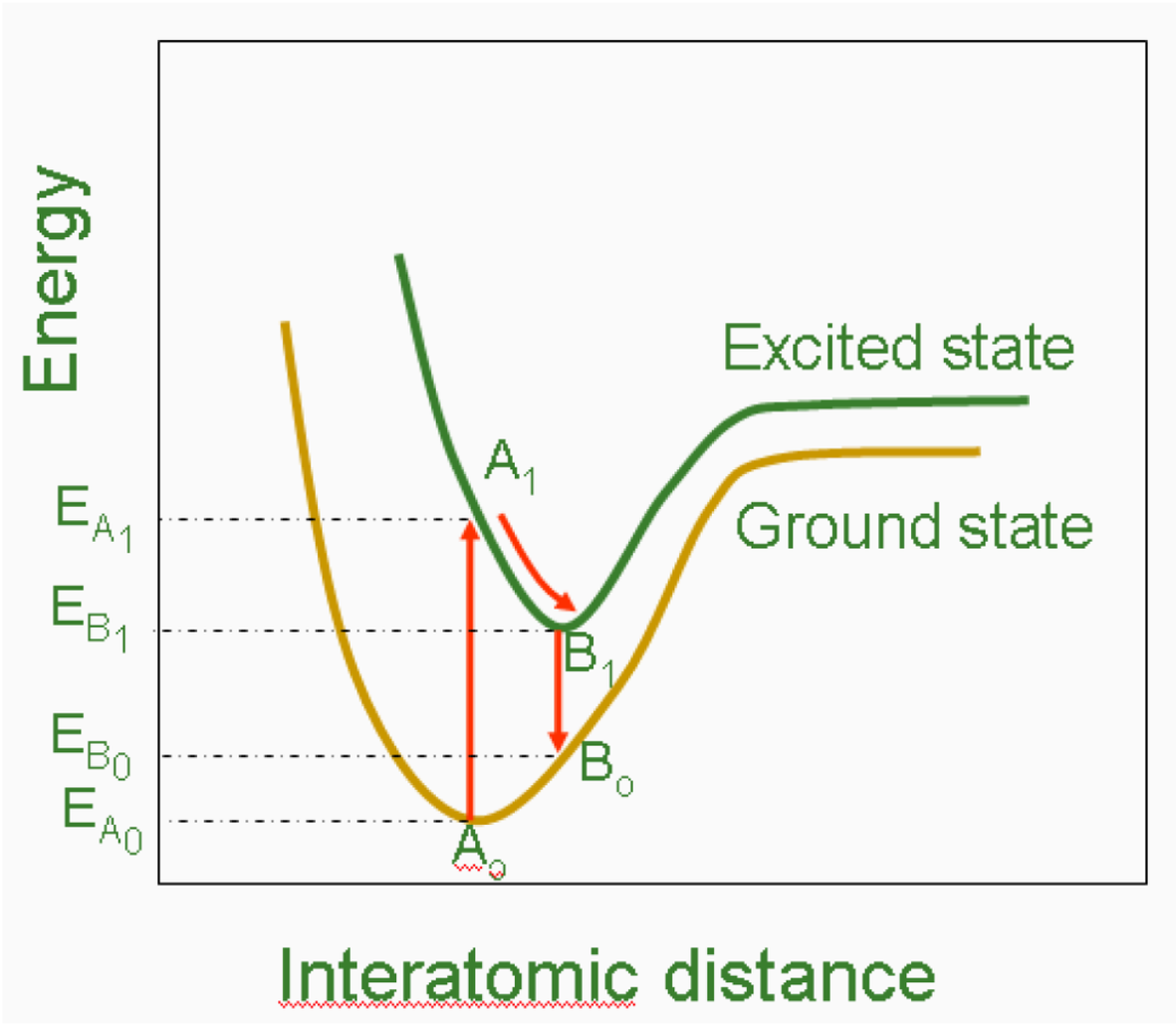
Medidas de tempo são fundamentais para qualquer tipo de trigger. O arranjo básico combina uma placa de material cintilador, um guia de luz e uma foto-multiplicadora:



Para entender o princípio de funcionamento dessa combinação, começamos discutindo o o que é cintilação.

O fenômeno da luminescência:

- Uma partícula carregada ou um fóton deposita energia no meio.
- Uma pequena fração é absorvida excitando elétrons atômicos.
- As moléculas se desexcitam rapidamente sem emitir radiação, passando a um nível de energia mais baixo.



- As moléculas voltam ao seu estado fundamental emitindo radiação, com energia menor que a absorvida.
- Na fluorescência a luz é emitida num curto intervalo de tempo.
  Na fosforescência, a luz é emitida mesmo após o fim da exposição à radiação.

As principais características de um cintilador são:

- eficiência: razão entre a energia emitida e a reabsorvida pelo cintilador;

- *output* de luz: número de fótons por 1 MeV de energia reabsorvida pelo cintilador;

- tempo de decaimento: a componente rápida é a responsável pelo sinal do cintilador

- espectro de emissão: o espectro tem um máximo em um comprimento de onda característico do material. Para a coleta da luz, o índice de refração e o comprimento de atenuação são importantes.

Foto-multiplicadoras

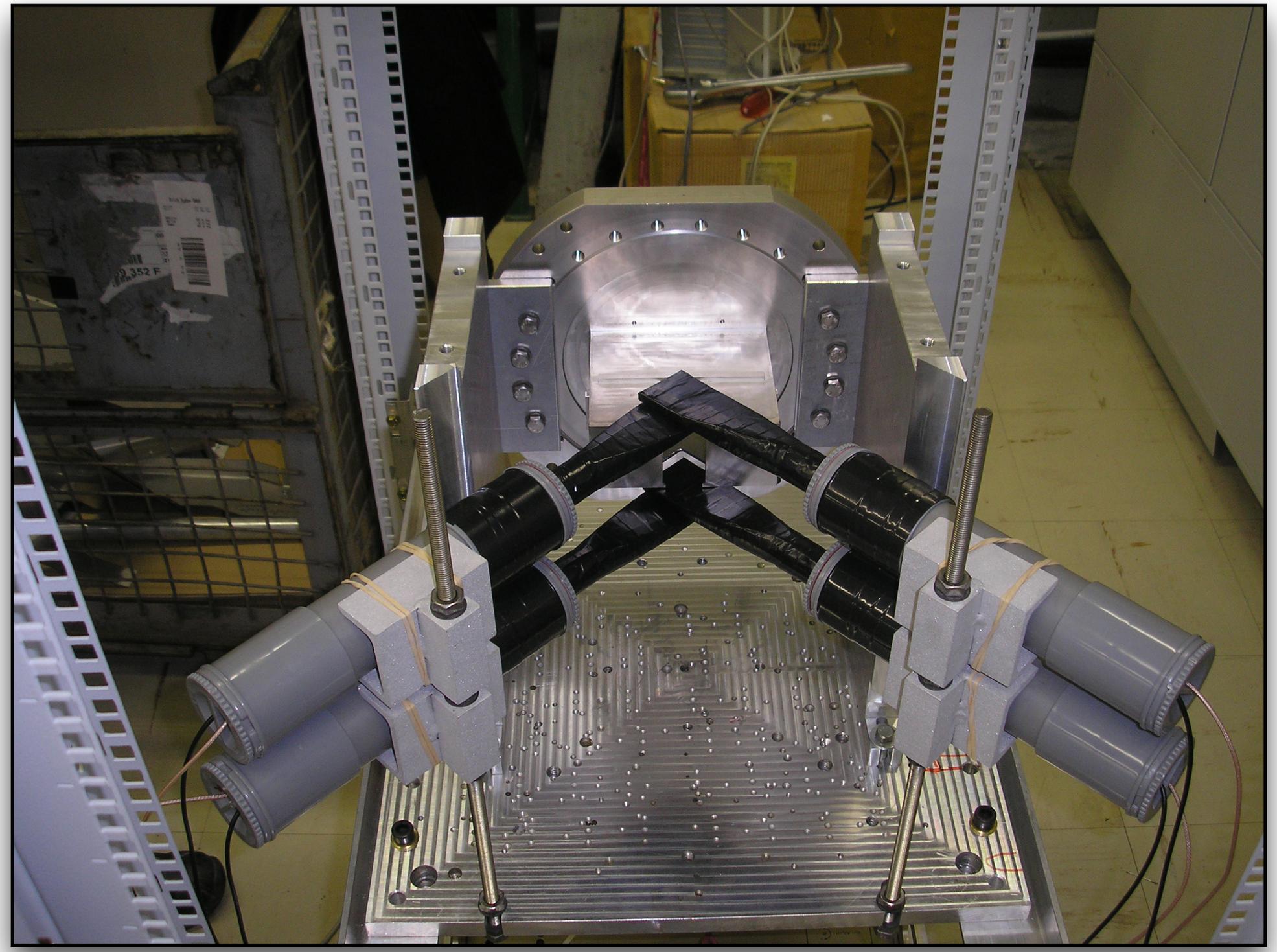
Muitos detectores dependem da capacidade de detectar fótons na frequência da luz visível ($100 \lesssim \lambda \lesssim 1000$ nm). O mecanismo de detecção de fótons consiste na geração de um pulso proporcional ao número de fótons incidentes.

Há três etapas básicas:

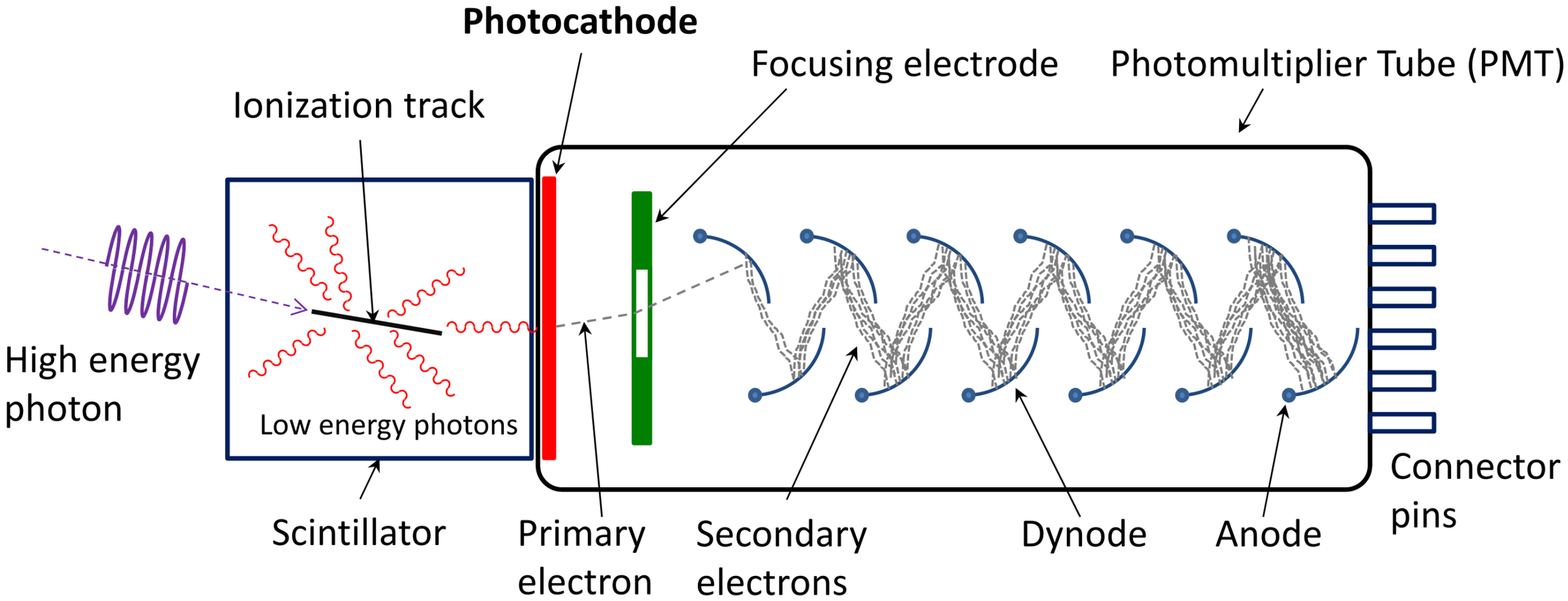
- geração de um foto-elétron primário (efeito fotoelétrico);
- multiplicação do sinal (elétrons secundários);
- coleta do sinal.

Tubos foto-multiplicadores (PMTs) são usados, em combinação com cintiladores, para medidas de tempo de vôo ou como *trigger*.

Um arranjo clássico (*4-fold coincidence*) usado como *trigger*.
Os cintiladores são sempre envolvidos em
plástico preto para bloquear a luz externa.



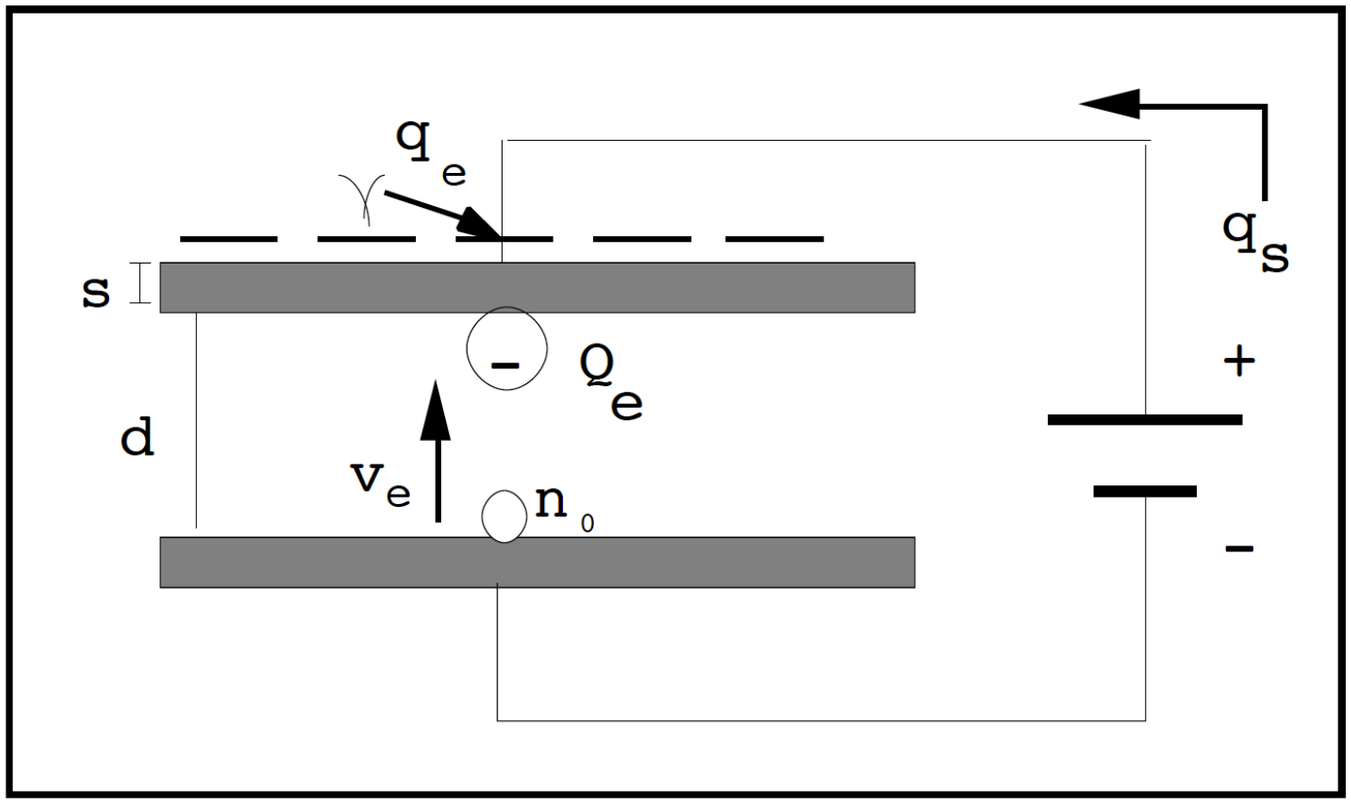
Esquema típico de uma PMT. Cada dinodo tem voltagem de 100-150 V relativa ao dinodo anterior. O número de elétrons secundários depende do material do dinode e da energia cinética do elétron incidente.



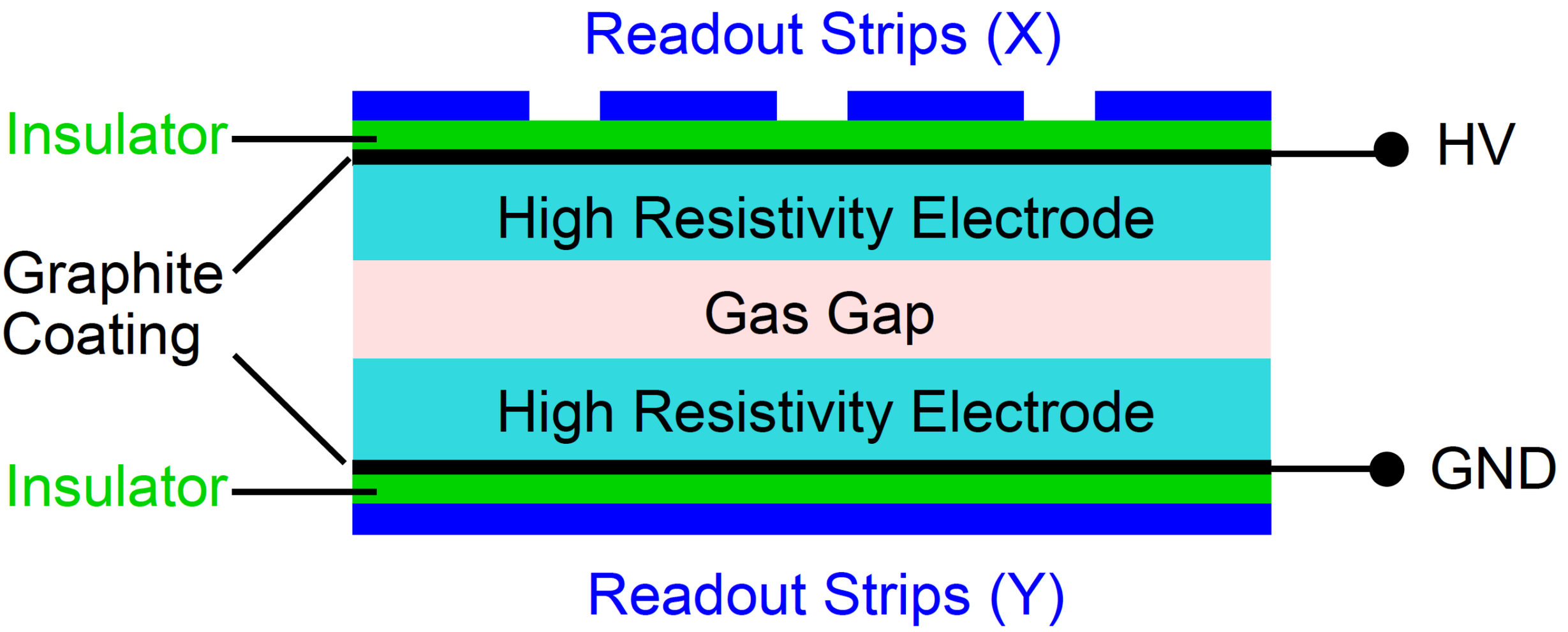
Uma voltagem de100-150 V entre dois dinodos produz de 3 a 5 elétrons secundários: uma amplificação de 10^8 elétrons

Resistive-plate counters -RPC

RPCs são detectores a gás com ótima eficiência e resolução temporal. Um campo elétrico uniforme é criado entre dois eletrodos planos e paralelos, separados por alguns milímetros. O intervalo é preenchido com gás. Os pares elétron-íon formados pela passagem de partículas carregadas migram para os eletrodos, induzindo uma corrente elétrica.



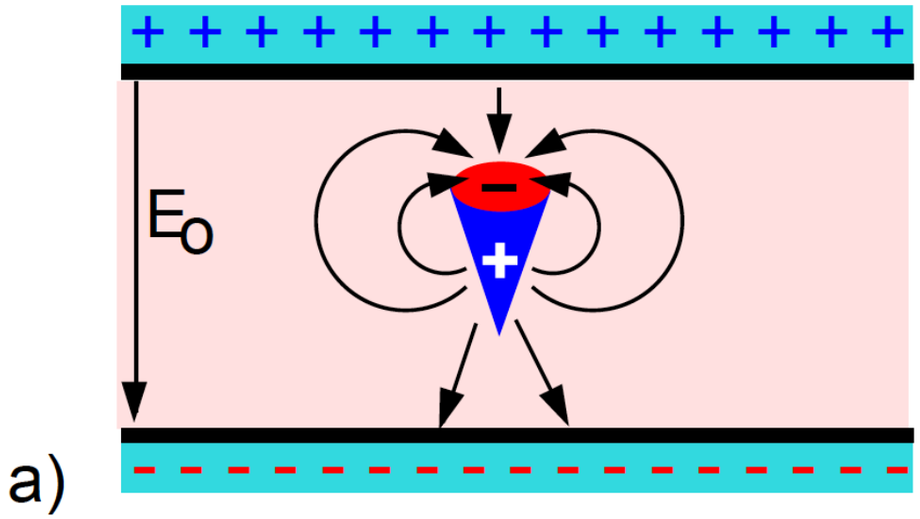
Esquema típico de uma RPC.



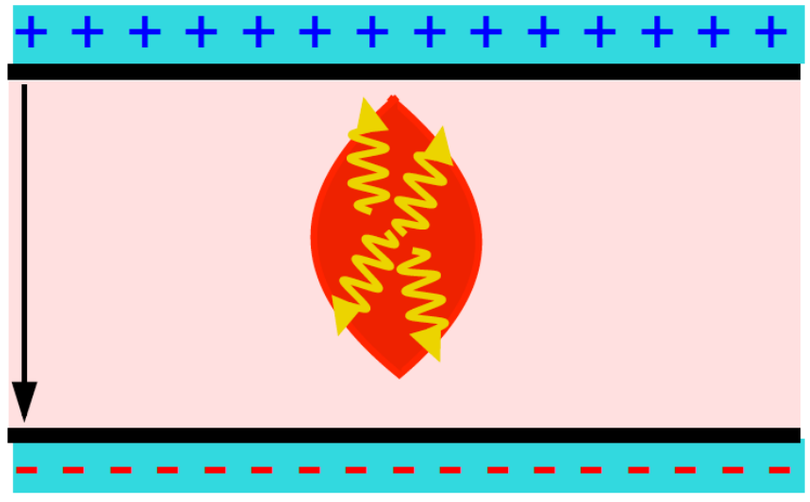
A leitura do sinal pode ser feita nos dois lados do detector, possibilitando a determinação da posição da partícula.

RPCs pode funcionar em dois regimes. No modo *streamer*, a avalanche se torna uma descarga. A distribuição espacial de cargas anula o campo elétrico no seu entorno. Um filamento de plasma conecta os eletrodos, que são descarregados.

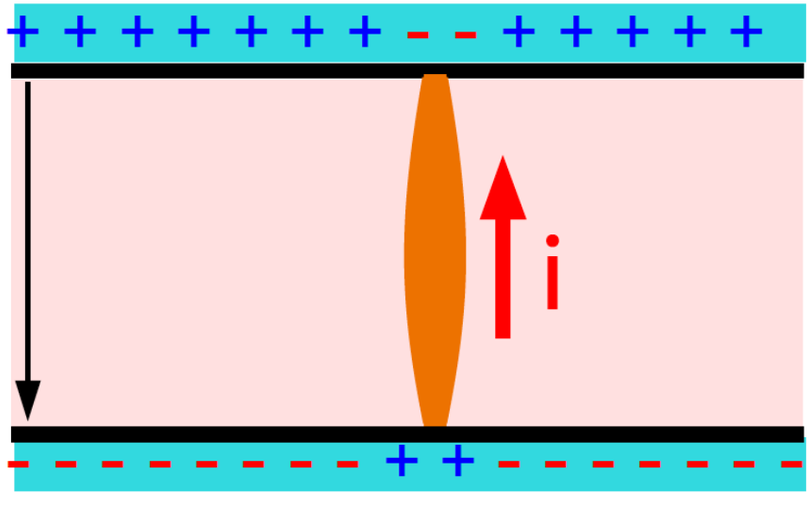
No modo streamer os sinais são grandes, mas só podem operar eficientemente se o fluxo de partículas for pequeno.



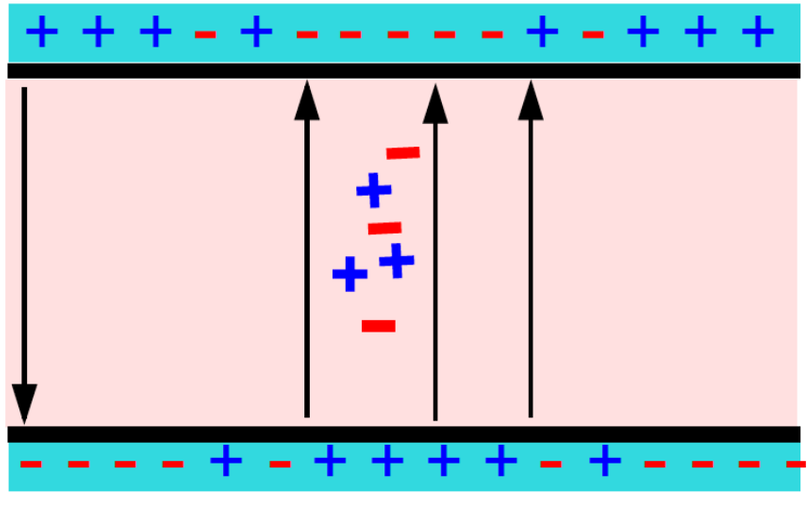
a)



b)



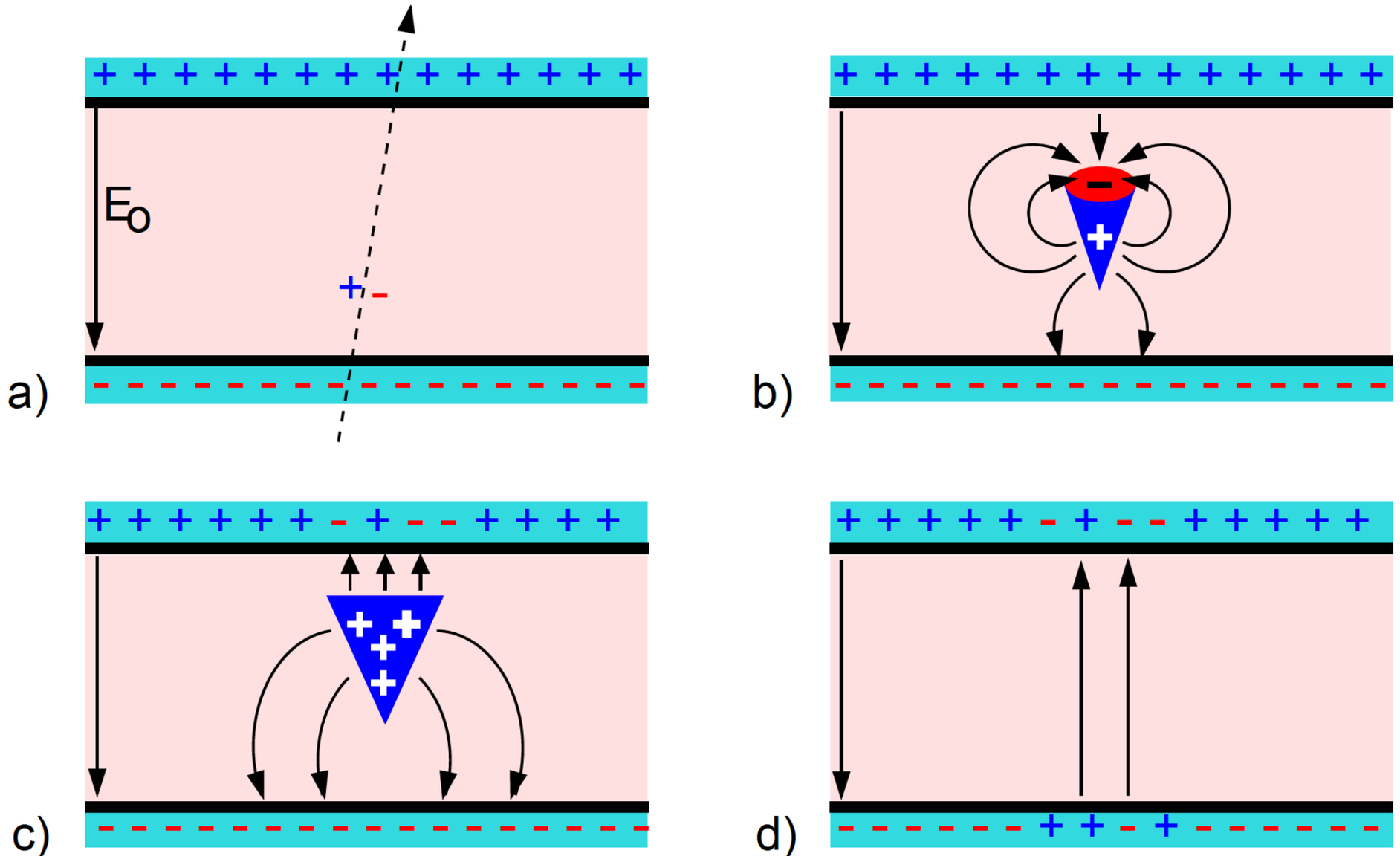
c)



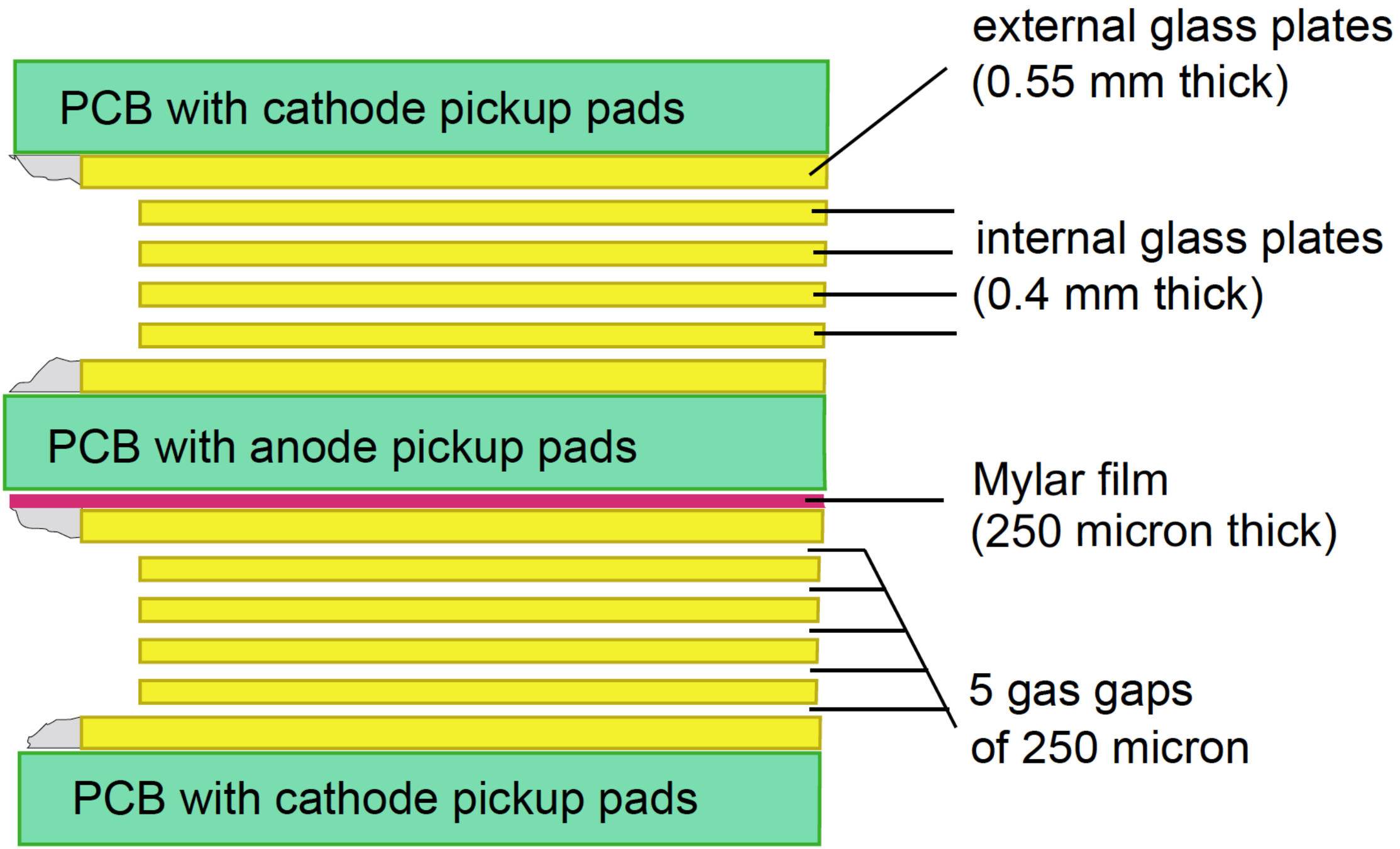
d)

No modo avalanche, o sinal vem da corrente induzida pelo movimento dos elétrons livres.

O sinal é 10 vezes mais fraco, mas o detector pode operar em condições de alto fluxo. No modo avalanche a RPC é utilizada no *trigger* de muons do CMS e ATLAS.



Esquema de uma RPC *multigap*. O detector tem eficiência de 99% e resolução temporal de ~50 ps.



O LHC e seus experimentos

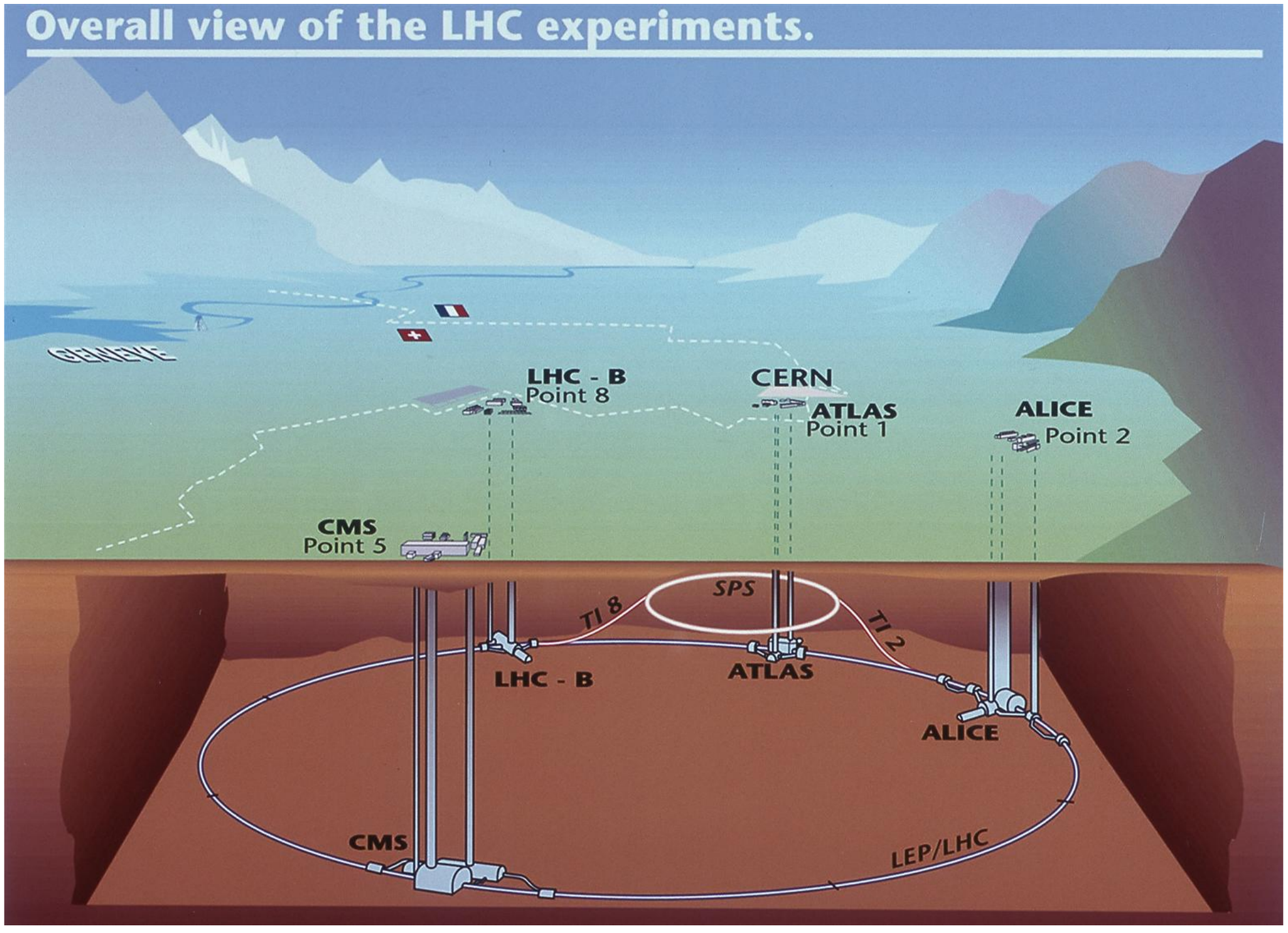
Vista aérea da área on se localiza o CERN



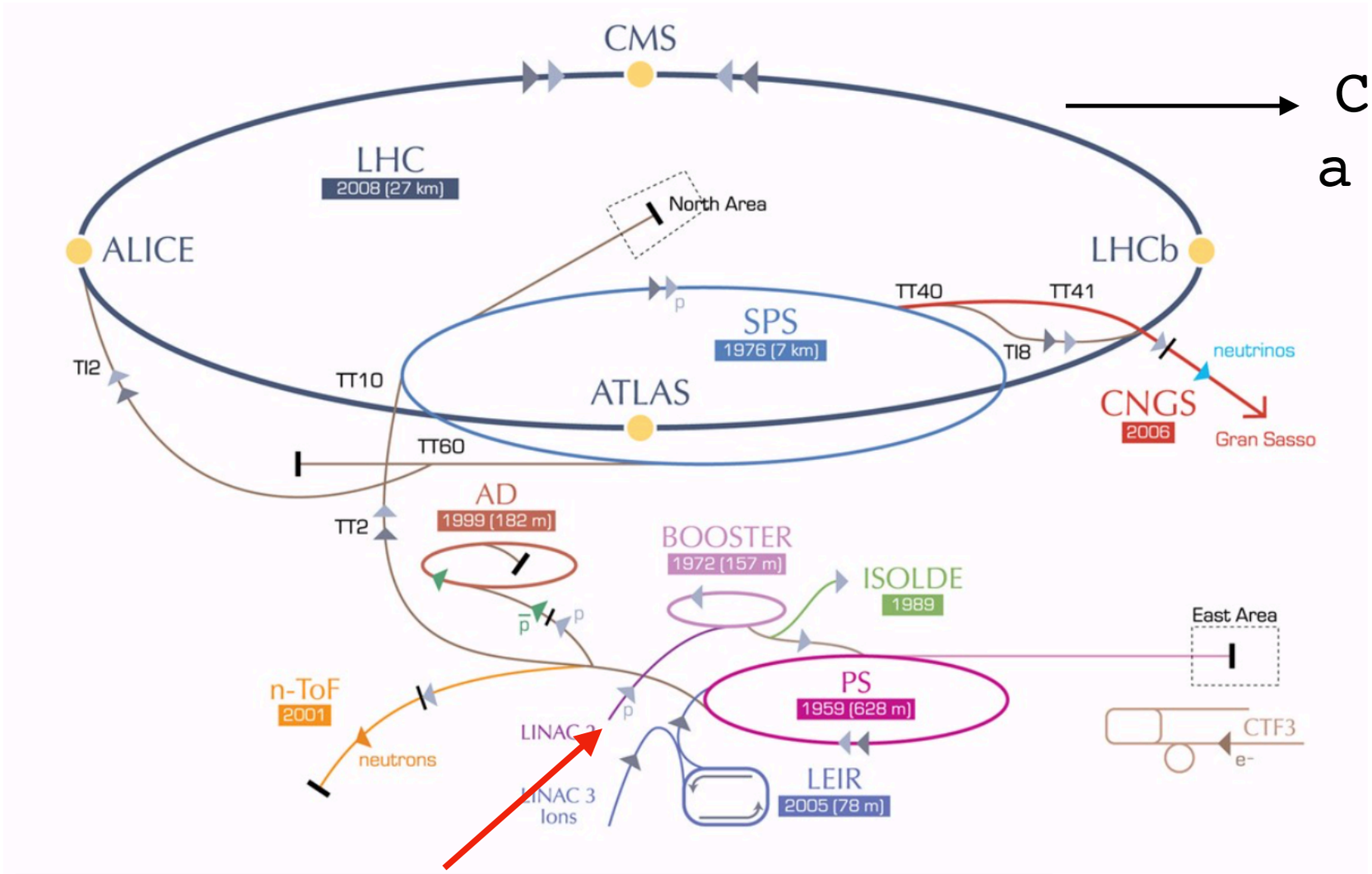
França

Suíça

O LHC tme 27 km de circunferência e está localizado a 100 m de profundidade.

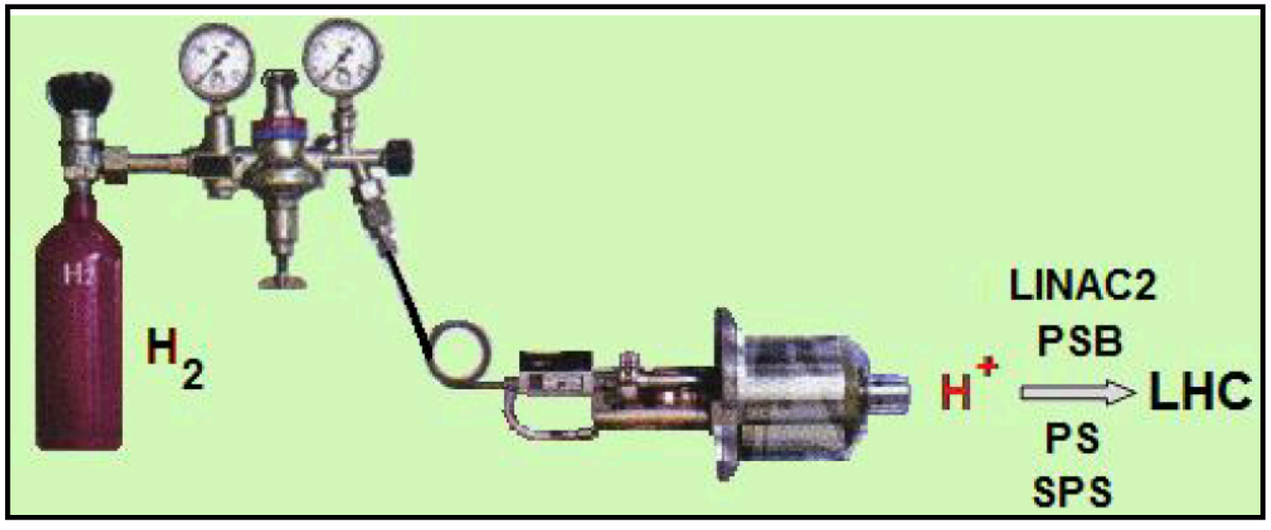


O complexo de aceleradores do CERN



Cada proton atinge a energia de 7 TeV.

$$v = 0.999999991\ c$$



Os feixes do LHC começam em uma garrafa com gás hidrogênio, do tamanho de um extintor de incêndio pequeno.

- Cada feixe é injetado no LHC em "pacotes" com 1.15x10^{11} prótons cada. Ao todo são 2808 pacotes:

$$2 \times \ 2808 \times 1.15 \times 10^{11} = 6.4 \times 10^{14} \text{ protons}$$

- Cada próton tem energia de 7 TeV (1 TeV = 10^{12} eV):

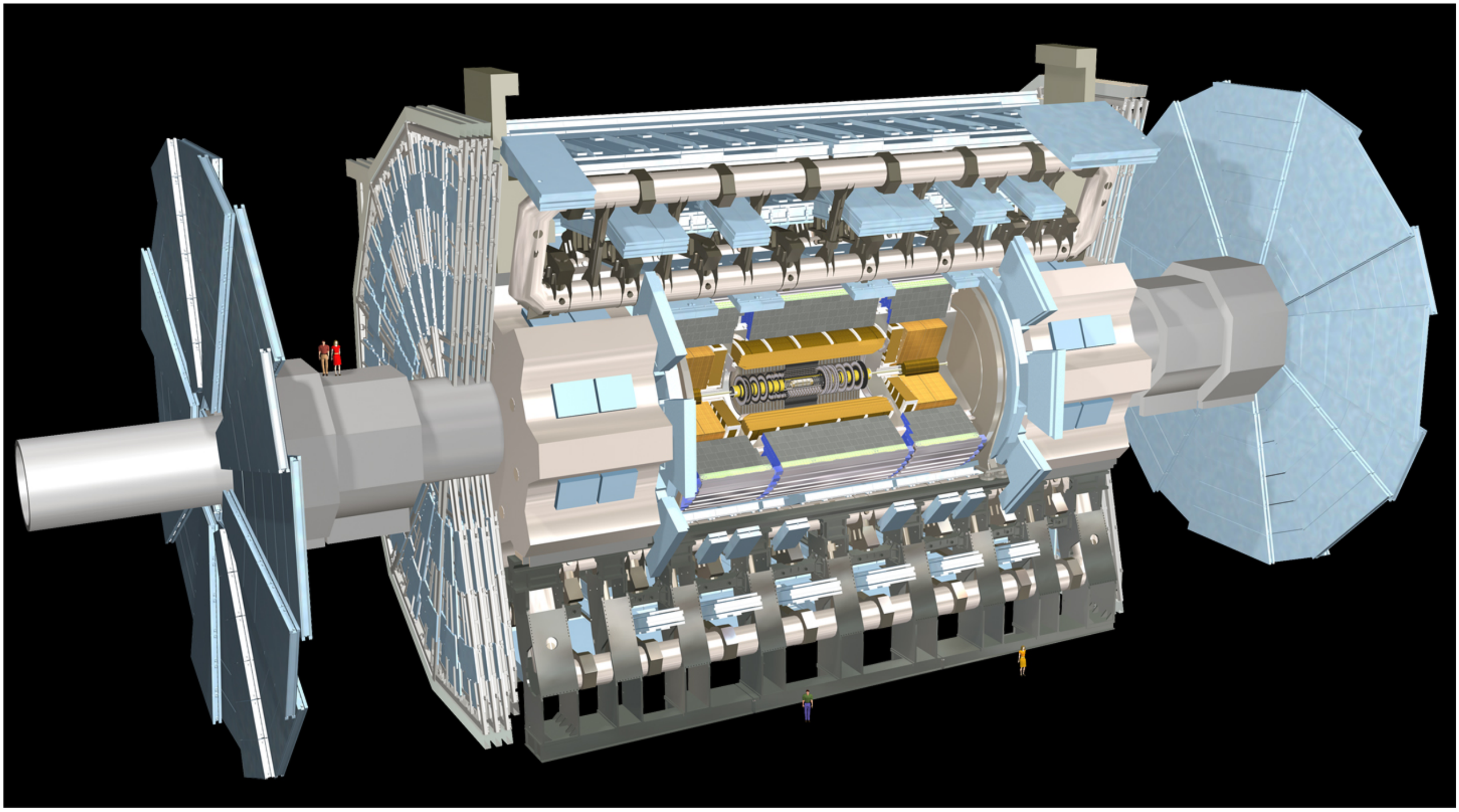
$$6.4 \times 10^{14} \times 7 \times 10^{12} \text{ eV} = 4.5 \times 10^{27} \text{ eV} = 2.8 \times 10^{8} \text{ J}$$

- Os feixes têm a mesma energia cinética de um TGV a 300 km/h!

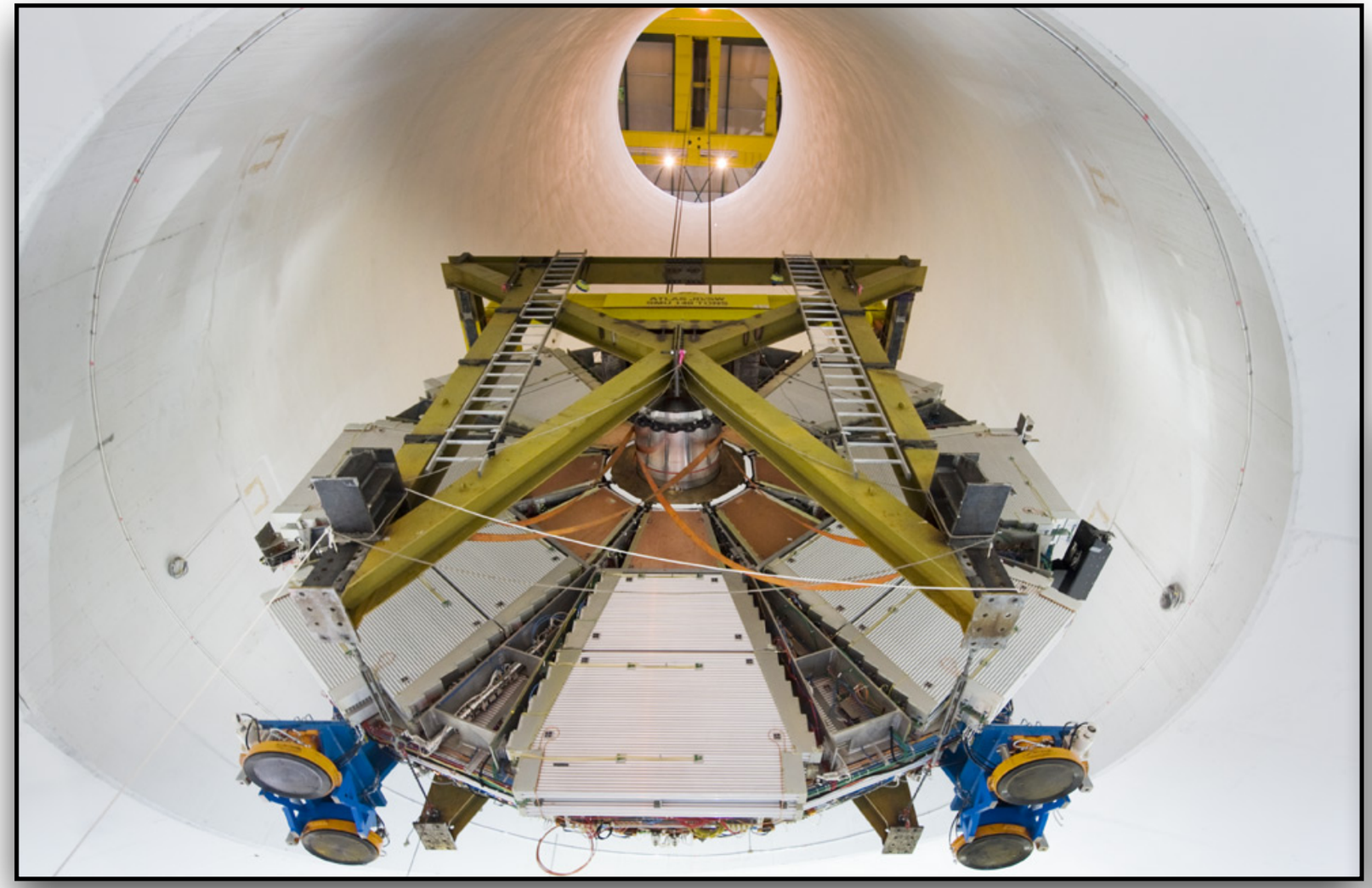
- Dentro do tubo dos feixes é mais frio e há um vácuo mais perfeito que no espaço sideral.

- Nos pontos de colisão os feixes têm a espessura de apenas $16 \ \mu\text{m}$, três vezes mais fino do que um fio de cabelo.

O detector ATLAS, do CERN

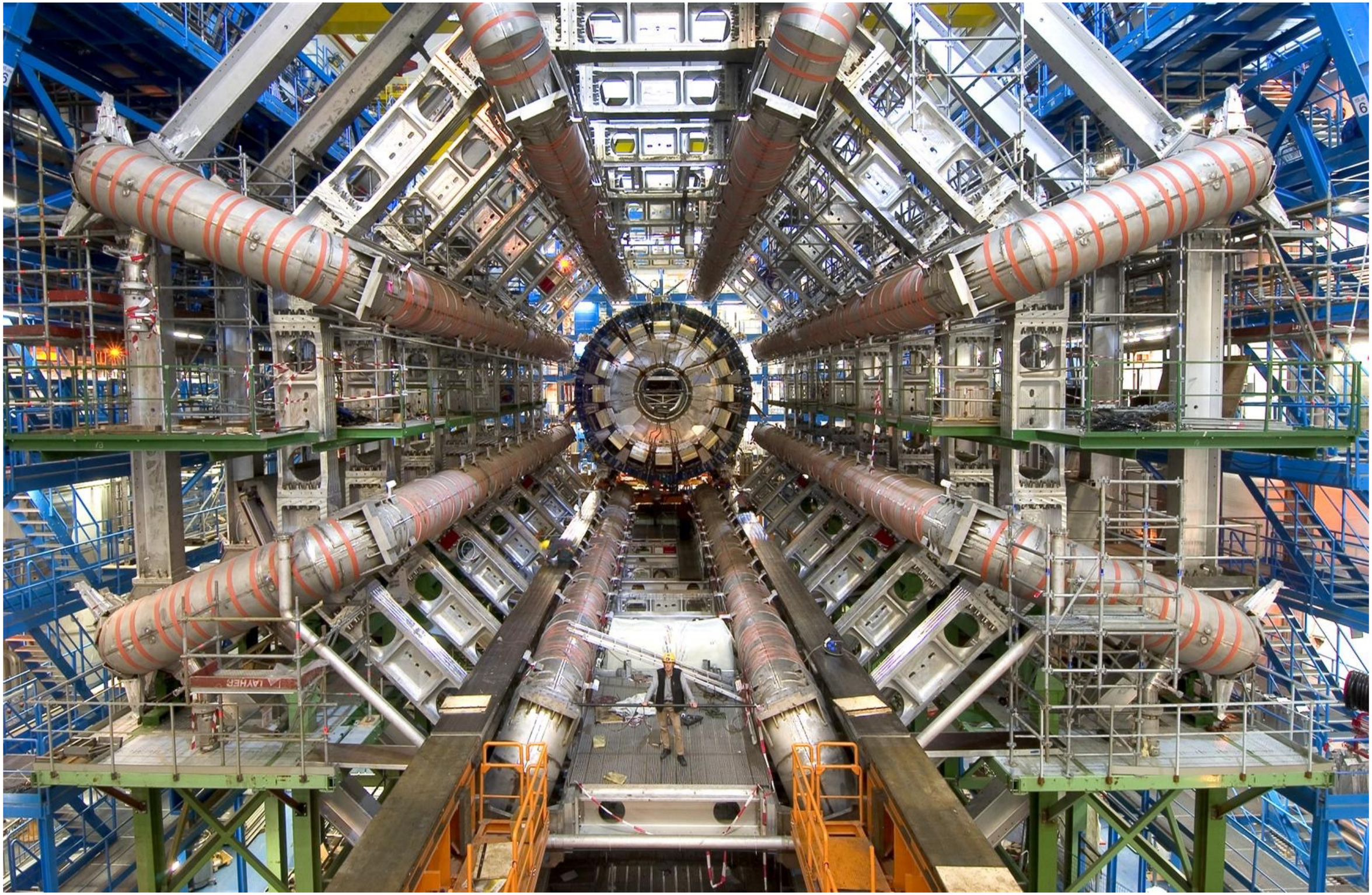


Montagem do detector ATLAS

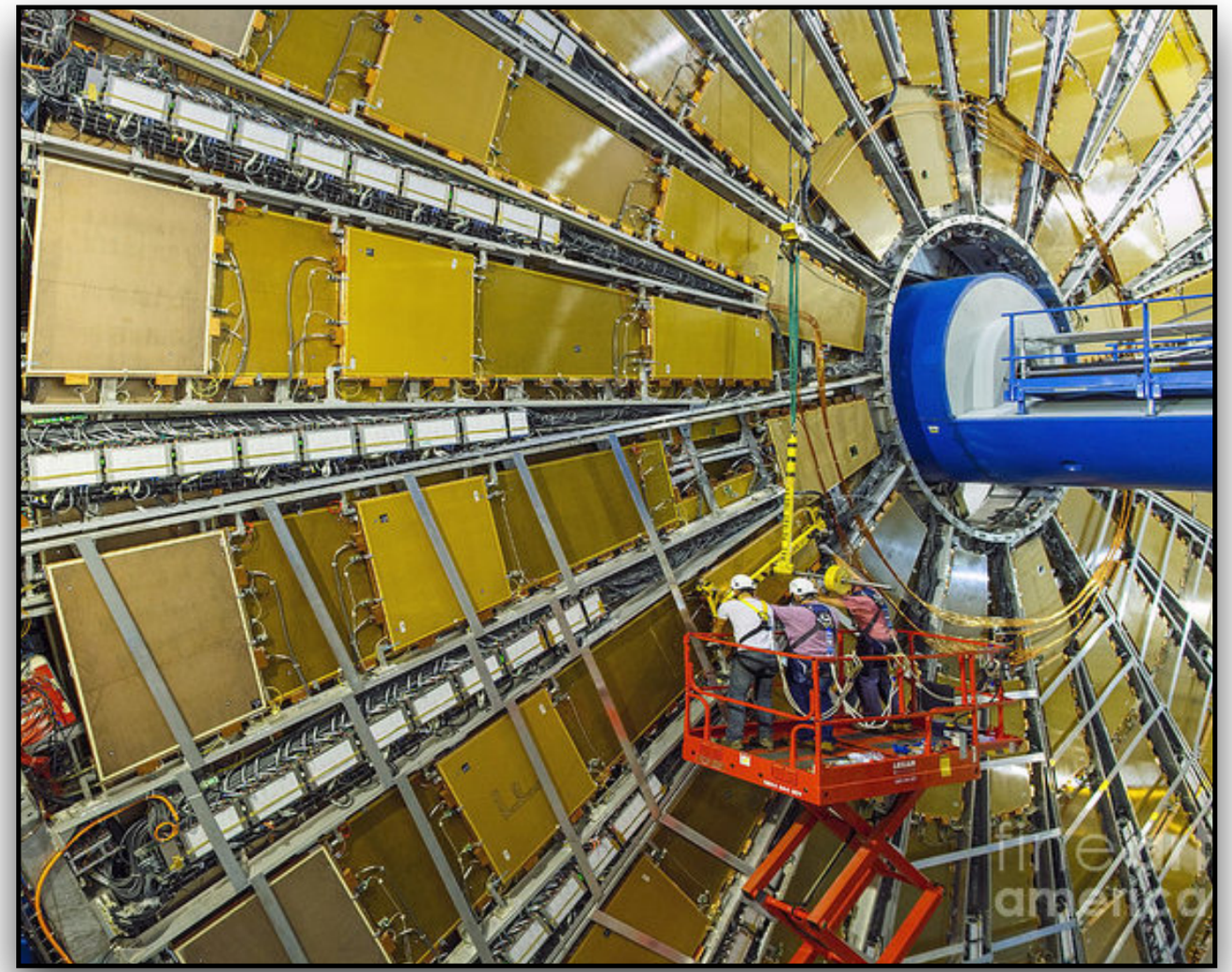




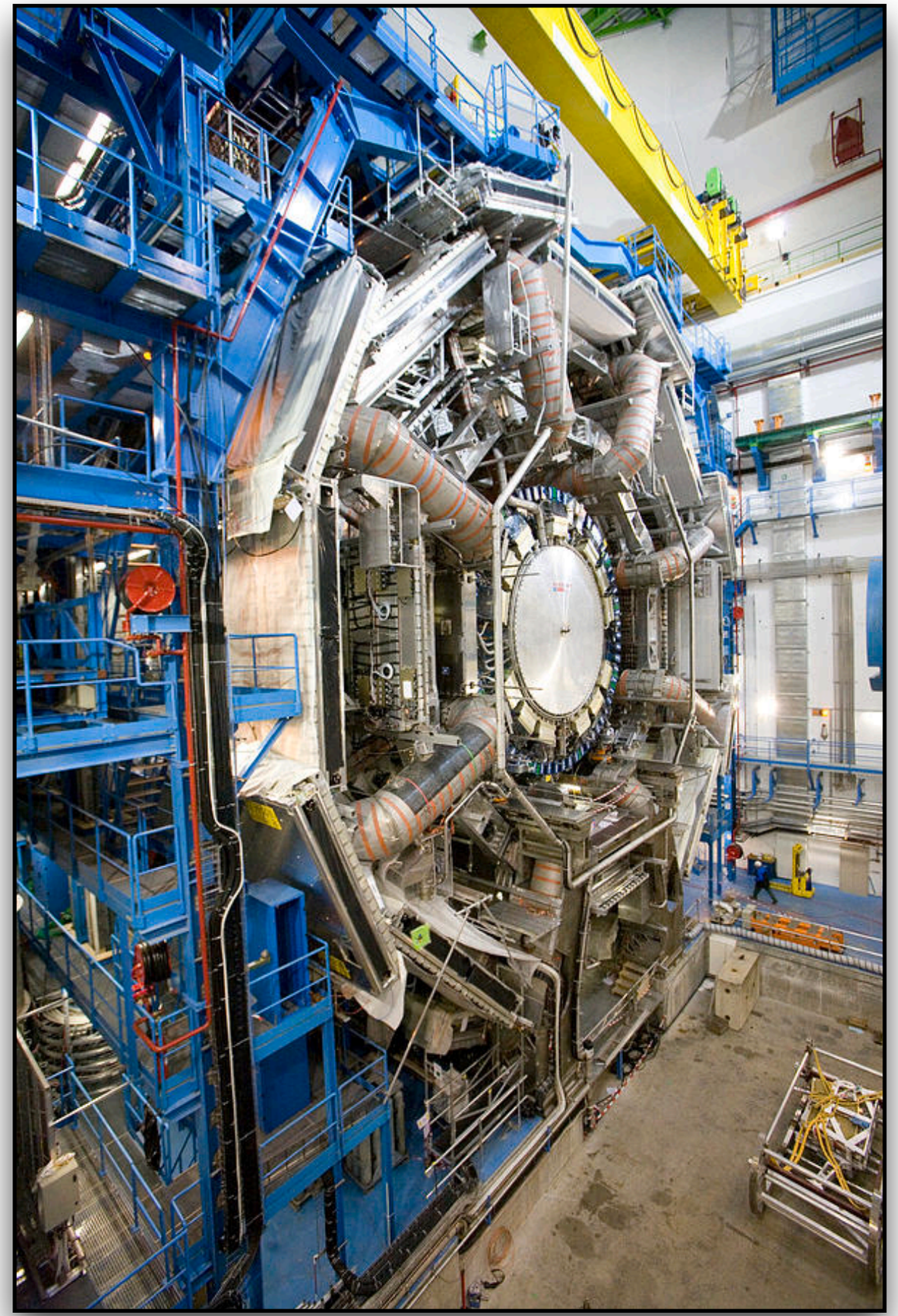
Os solenóides do detector ATLAS. As linhas de campo se têm a direção do feixe.



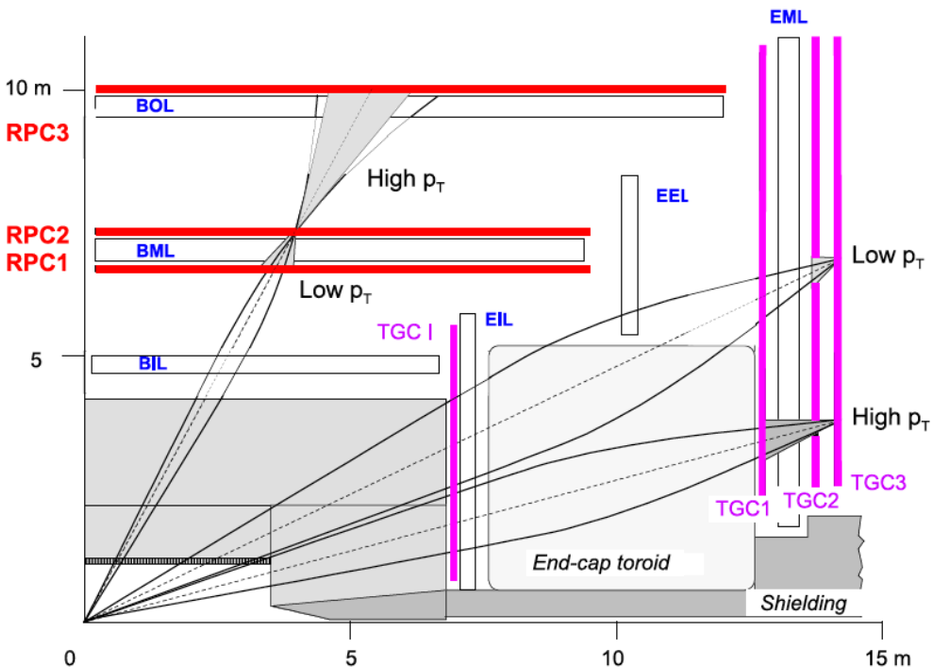
Montagem do sistema de detecção de muons do experimento ATLAS

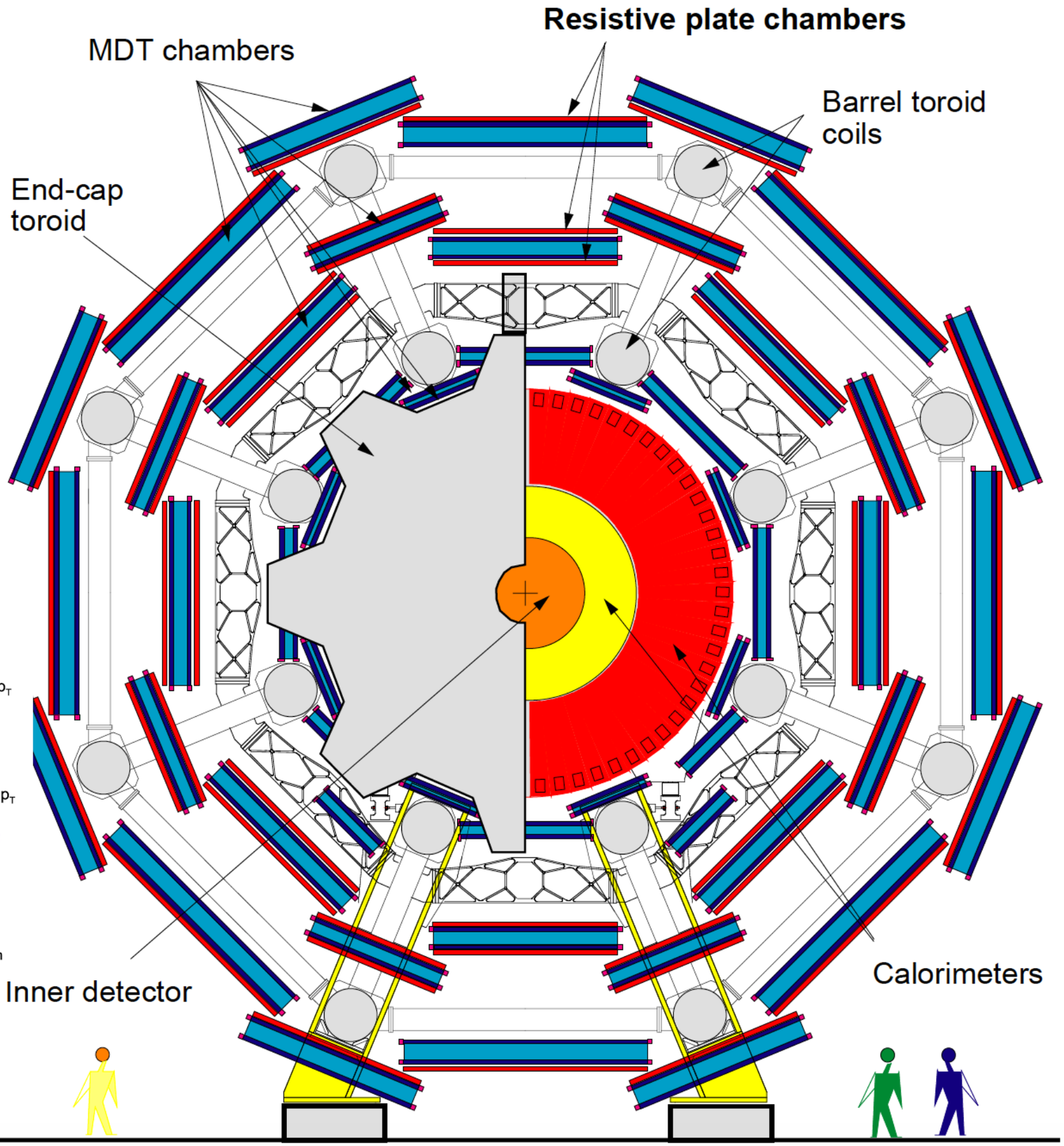


O sistema de detecção de muons é a "tampa do barril".



Vista frontal do detector ATLAS, do CERN, mostrando a localização das *trigger* RPCs usadas no sistema de detecção de muons.





O detector CMS

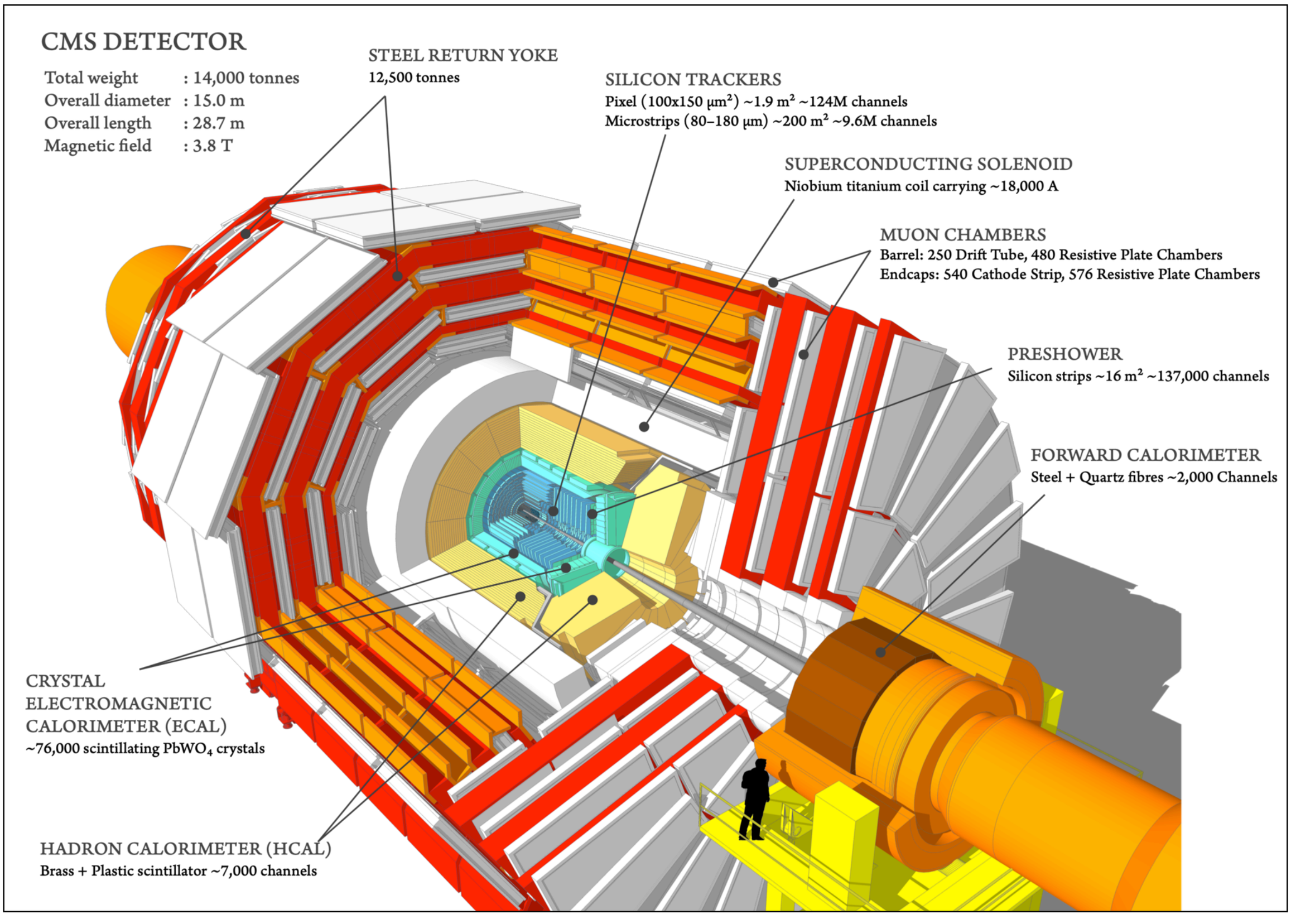
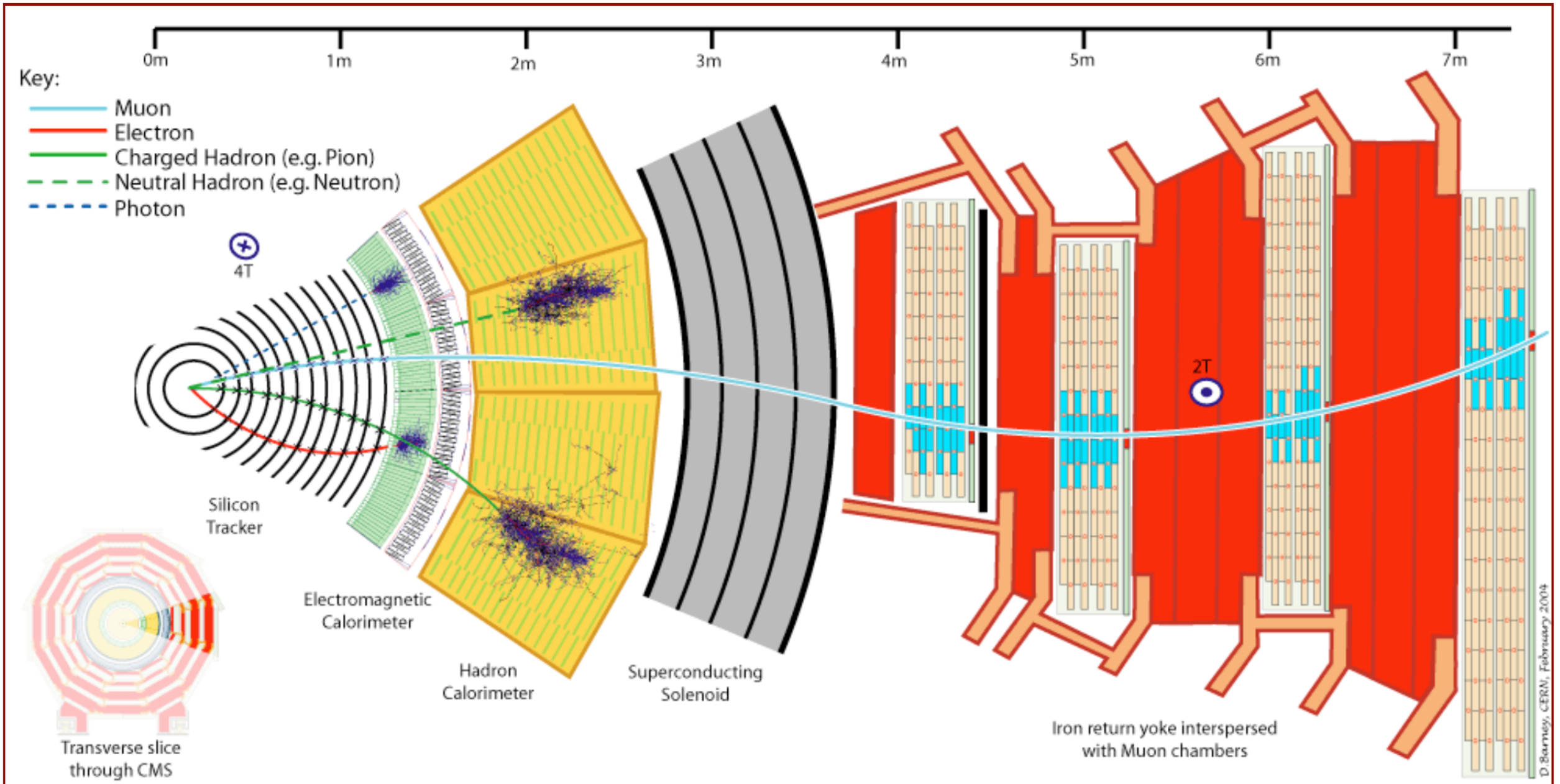
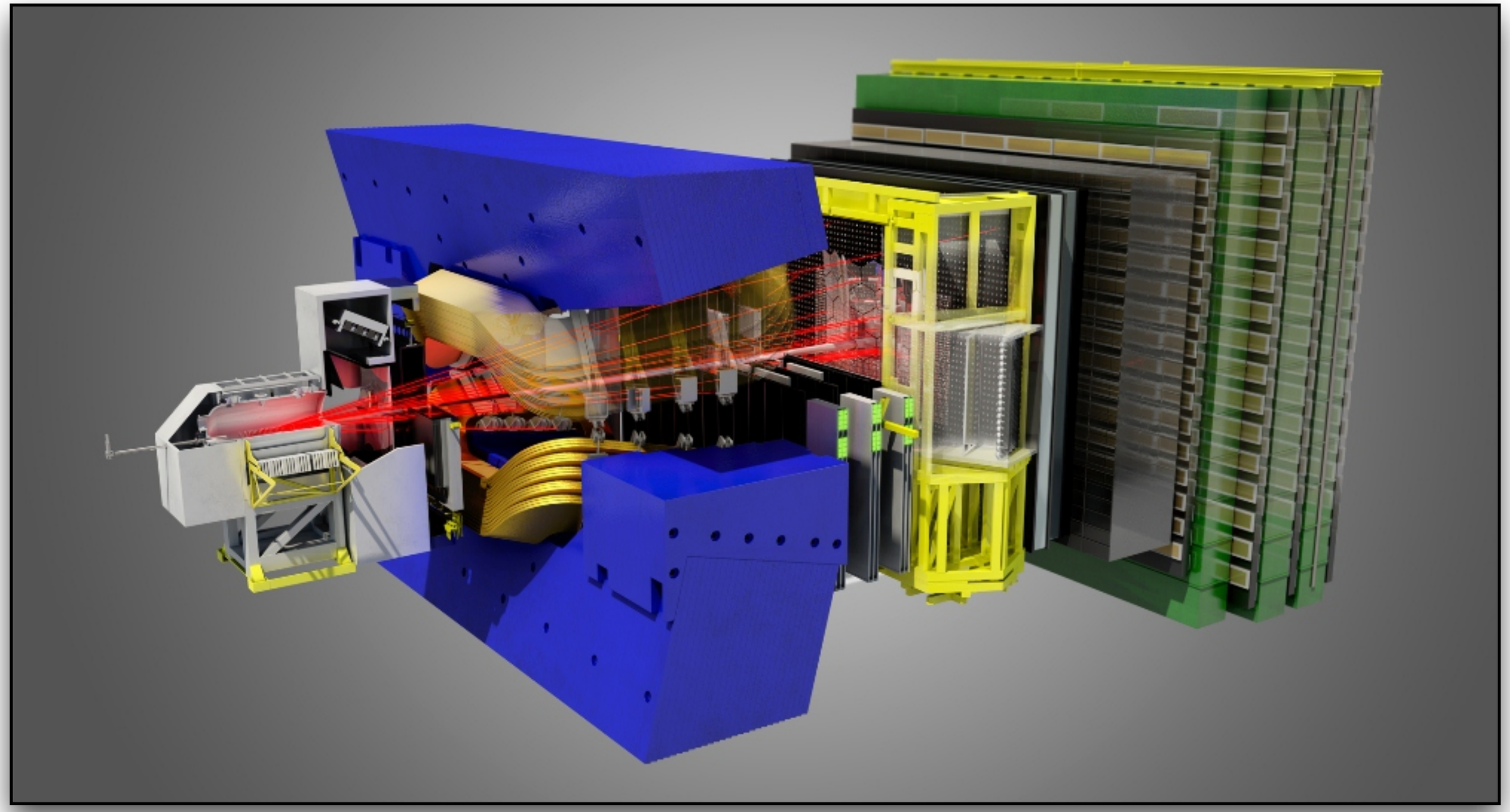


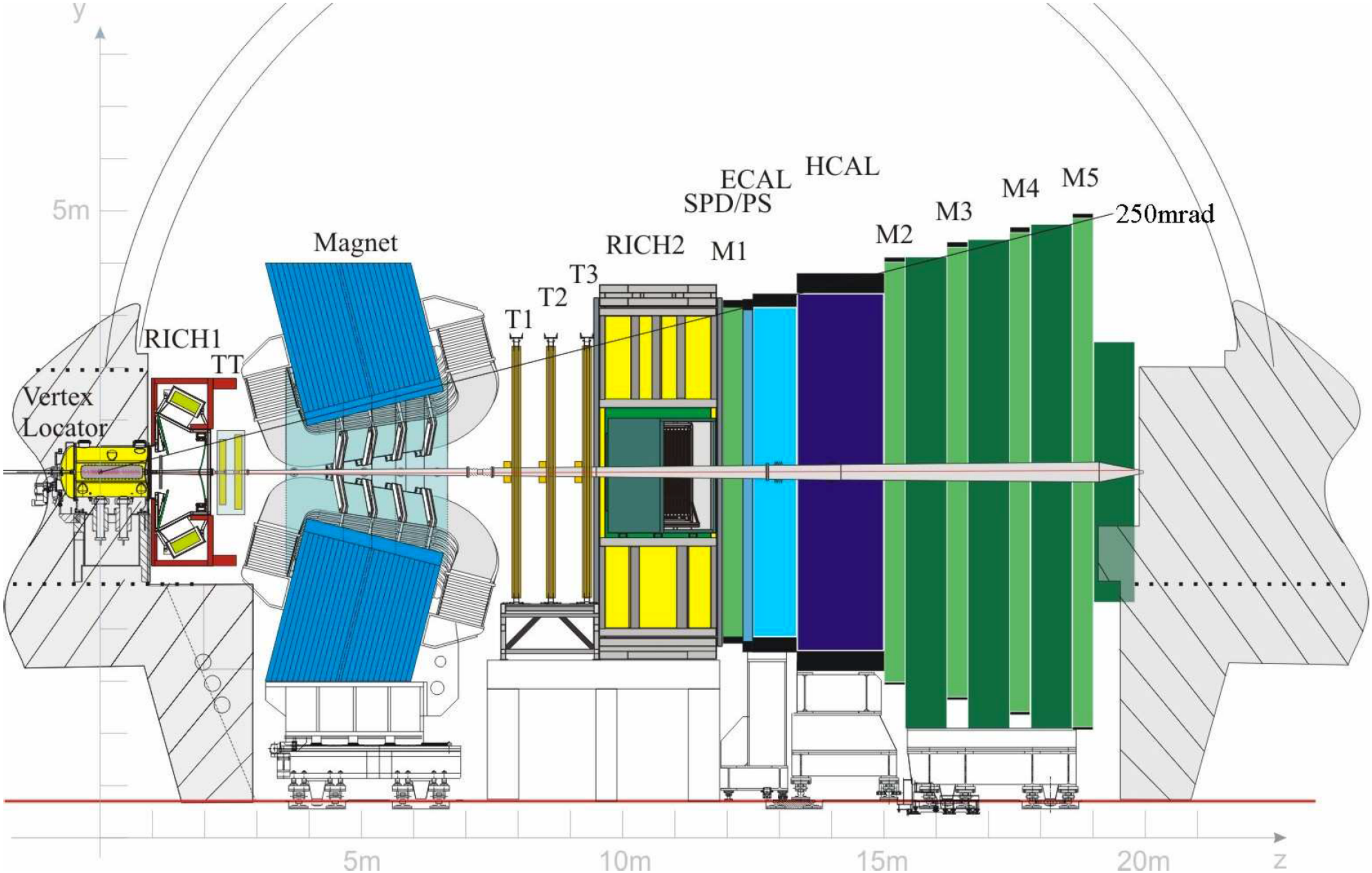
Ilustração da trajetória de um muon (vista frontal) ao longo do detector CMS, do CERN.



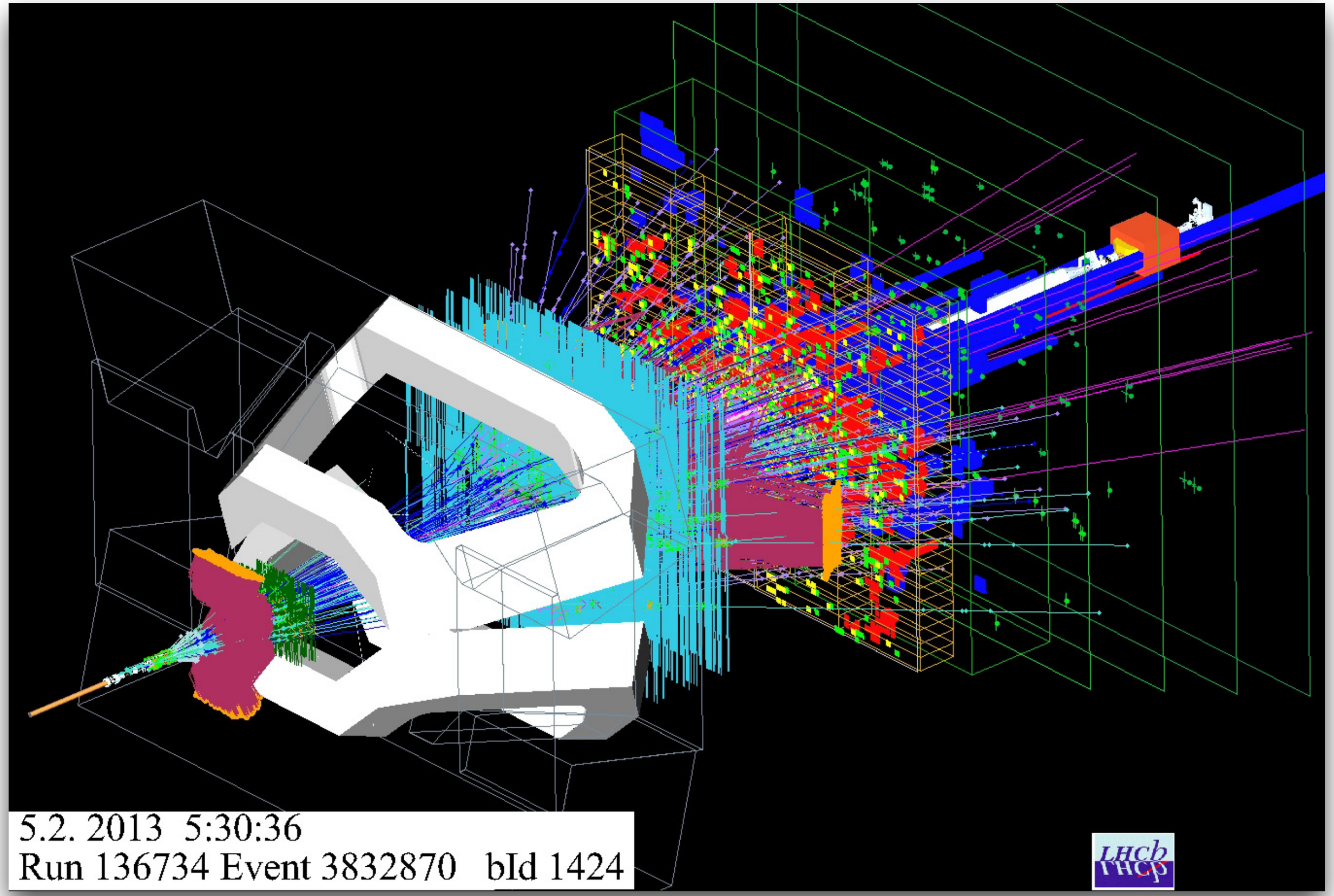
O detector LHCb



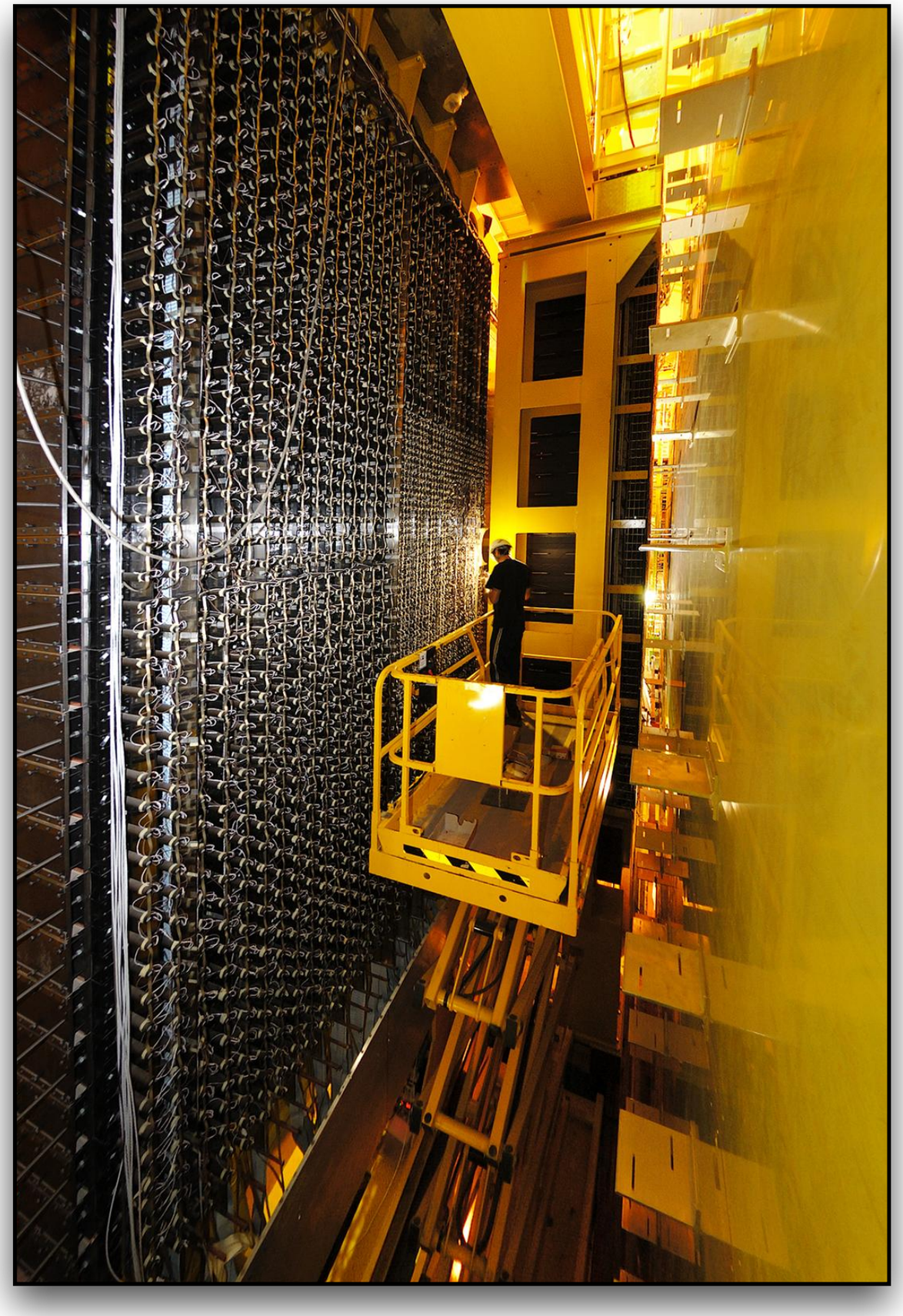
Vista lateral do espectrômetro do LHCb, do CERN.



Numa colisão típica são produzidas muitas dezenas de partículas, inclusive as formadas pelos quarks *c* e *b*



Calorímetro



Detectores de muons



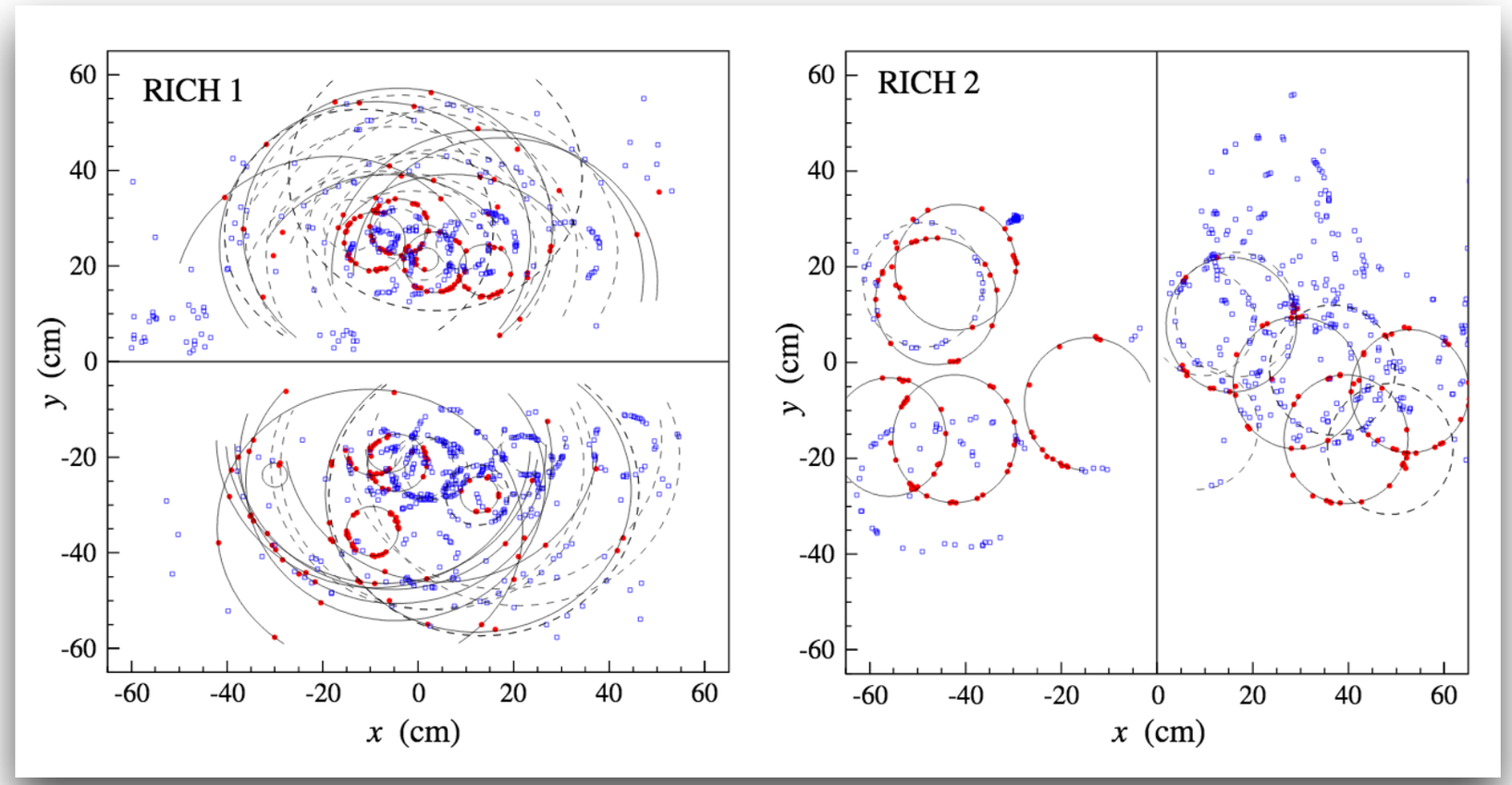


Um dos detectores de radiação Čerenkov, usados para a identificação de partículas carregadas. Cada espelho direciona a luz para uma fotomultiplicadora.

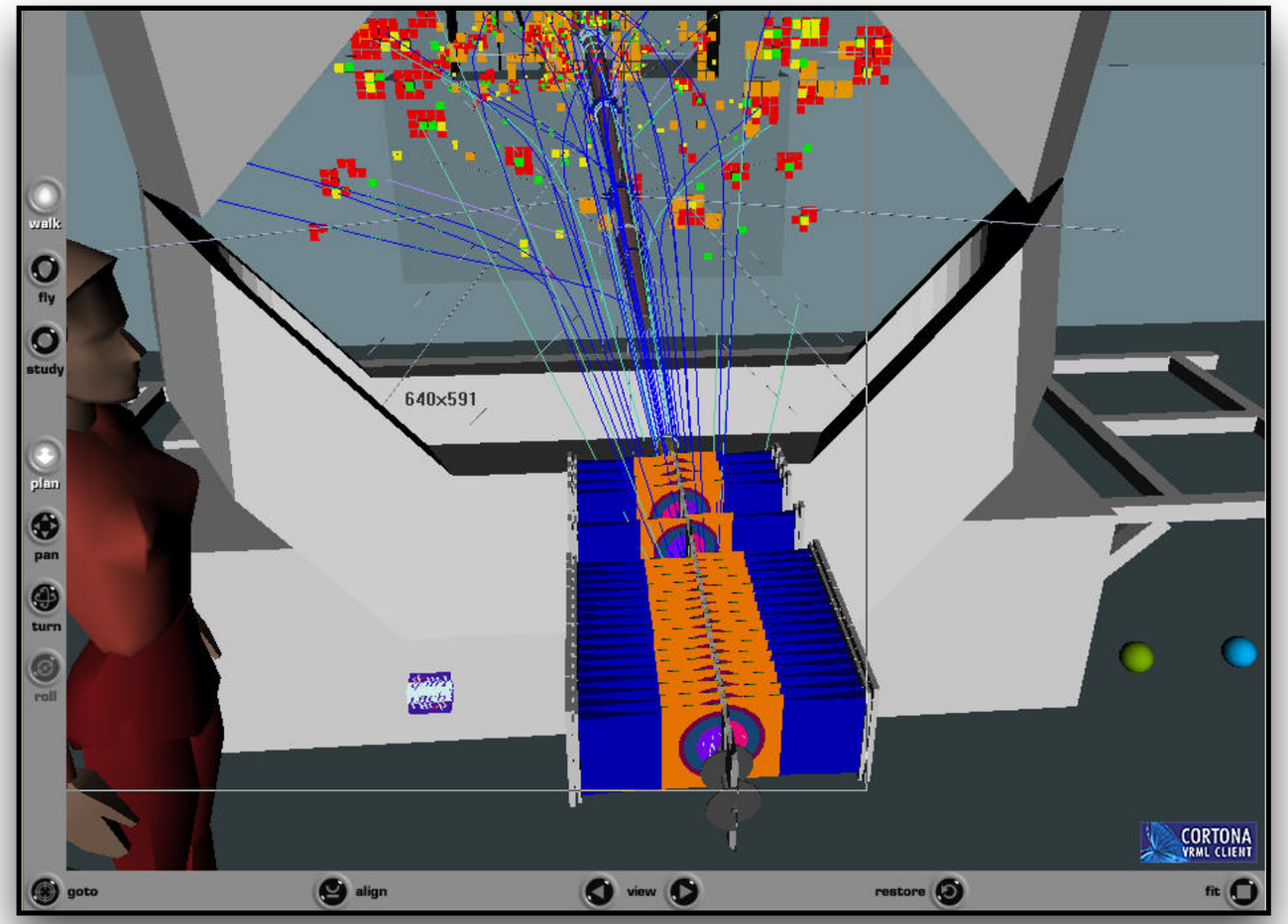


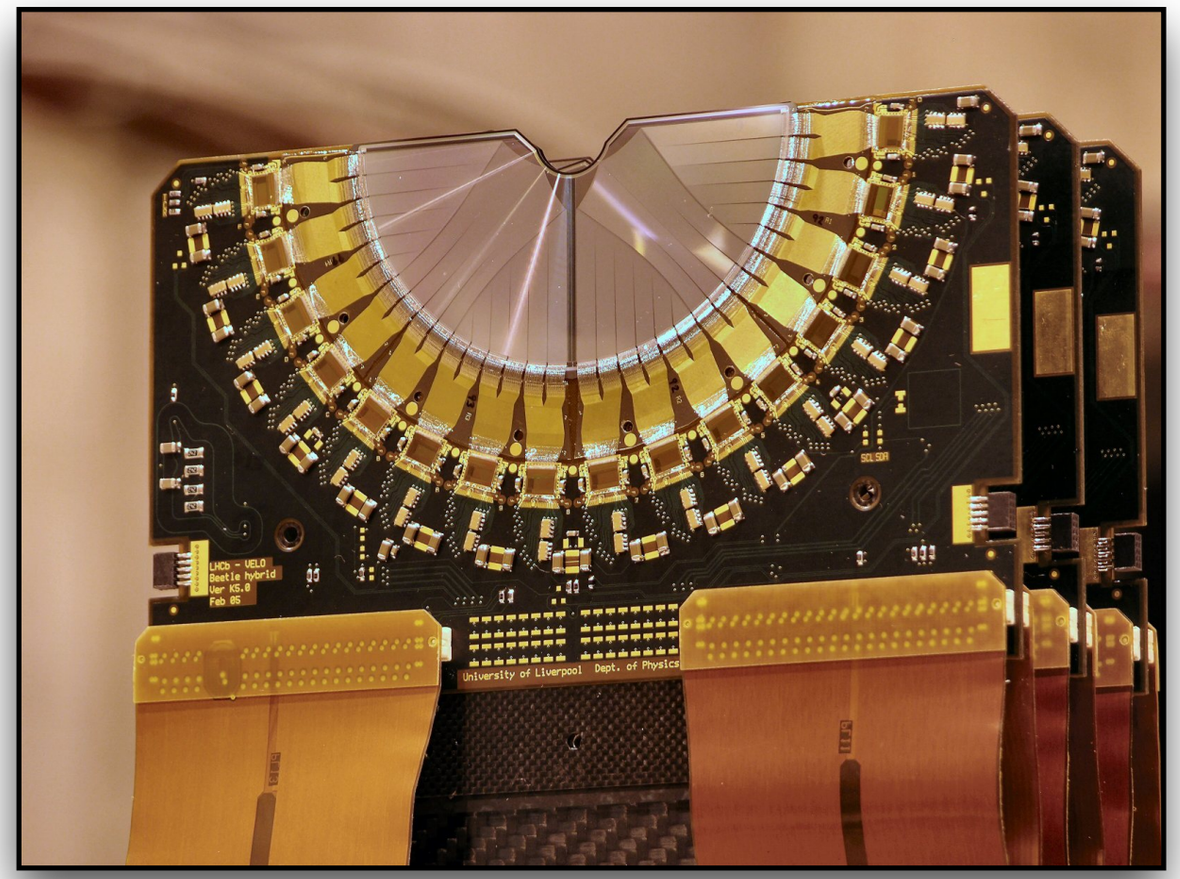


Os cones de luz Čerenkov formam círculos nos espelhos. A luz é direcionada a foto-multiplicadoras equipadas com detectores de silício, produzindo as imagens abaixo. Medindo o raio do círculo determinamos a velocidade da partícula.



O detector de vértices do LHCb é o "coração"do experimento. A observação de hadrons com quarks c e b depende da capacidade de discernir o ponto de produção do de decaimento.







Uma interação proton-proton com um possível decaimento $B_s^0 \to \mu^+\mu^-$

