

DETECTORES DE PARTÍCULAS

HELIO NOGIMA



“New directions in science are launched by new tools much more often than by new concepts. The effect of a concept-driven revolution is to explain old things in new ways. The effect of a tool-driven revolution is to discover new things that have to be explained.”

- Freeman Dyson, in *Imagined Worlds*

Novas direções na ciência são lançadas por novas ferramentas com muito mais frequência do que por novos conceitos. O efeito de uma revolução baseada em conceitos é explicar coisas antigas de novas maneiras. O efeito de uma revolução orientada por ferramentas é descobrir coisas novas que precisam ser explicadas.

Detectores de partículas



- 1. Experimentos de Física de Altas Energias.**
- 2. Processos básicos da interação da radiação com a matéria.**
- 3. Dispositivos detectores.**

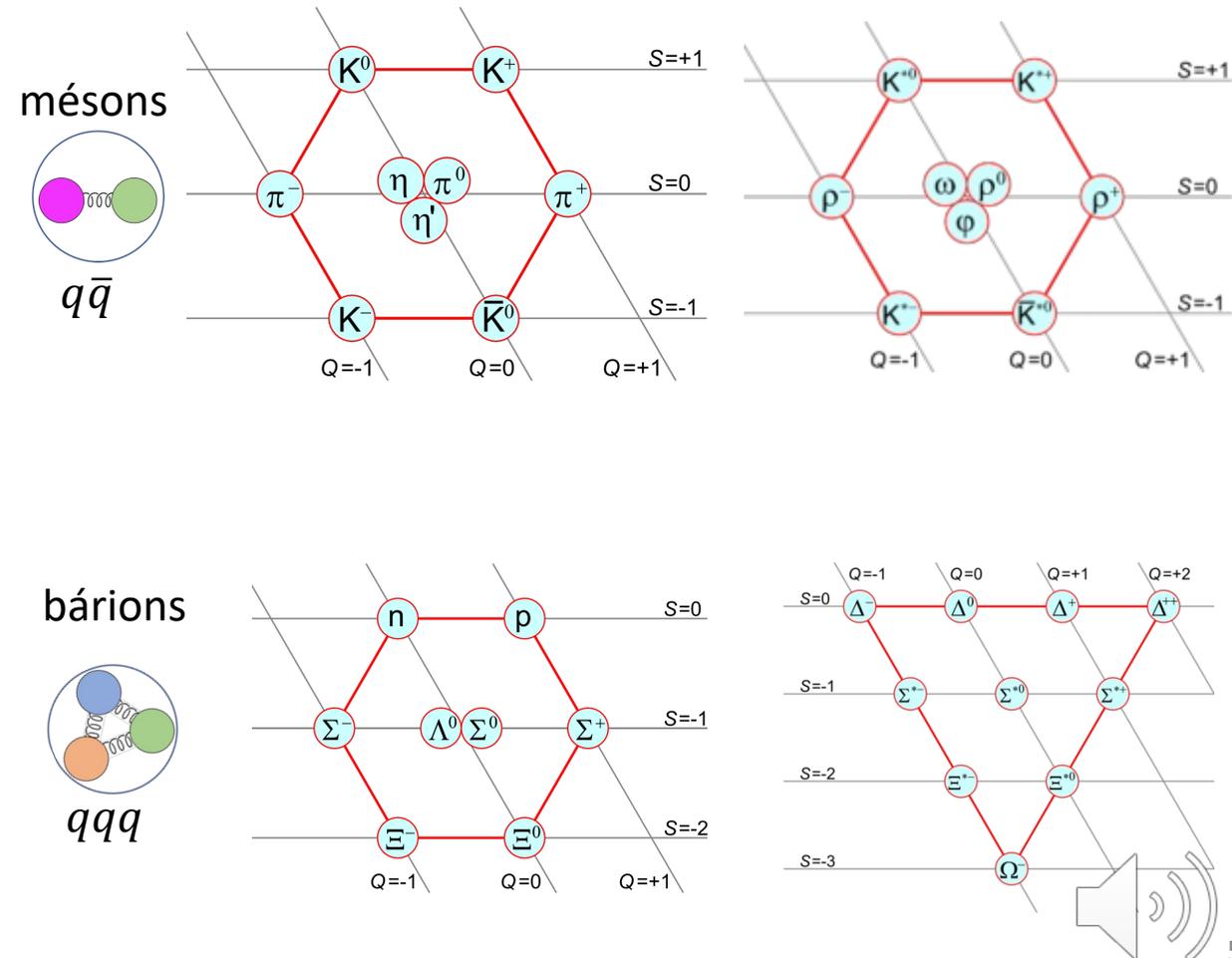
- R.L. Workman *et al.* (Particle Data Group, PDG), Prog. Theor. Exp. Phys. **2022**, 083C01 (2022).
 - Review of passage of particles through matter.
 - Review of particle detectors at accelerators.
- W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments Springer-Verlag, 2nd edition, (1994).
- C. Grupen and B. Schwartz, Particle Detectors, Cambridge University Press, 2nd edition, (2009).
- K. Kleinknecht, Detectors for Particle Radiation, Cambridge University Press, 2nd edition, (1998).
- G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, Wiley, 4th edition, (2010).

Quais partículas são detectadas?



- Para efeito da detecção, são todas aquelas que deixam rastros possíveis de serem identificados.

| | | | | | | |
|--------|---|--|--|--|---|--|
| | <p>mass → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>charge → $2/3$</p> <p>spin → $1/2$</p> <p>u</p> <p>up</p> | <p>mass → $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>charge → $2/3$</p> <p>spin → $1/2$</p> <p>c</p> <p>charm</p> | <p>mass → $\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>charge → $2/3$</p> <p>spin → $1/2$</p> <p>t</p> <p>top</p> | <p>mass → 0</p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 1</p> <p>g</p> <p>gluon</p> | <p>mass → $\approx 126 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 0</p> <p>H</p> <p>Higgs boson</p> | |
| QUARKS | <p>mass → $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>charge → $-1/3$</p> <p>spin → $1/2$</p> <p>d</p> <p>down</p> | <p>mass → $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>charge → $-1/3$</p> <p>spin → $1/2$</p> <p>s</p> <p>strange</p> | <p>mass → $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>charge → $-1/3$</p> <p>spin → $1/2$</p> <p>b</p> <p>bottom</p> | <p>mass → 0</p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 1</p> <p>γ</p> <p>photon</p> | | |
| | <p>mass → $0.511 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>charge → -1</p> <p>spin → $1/2$</p> <p>e</p> <p>electron</p> | <p>mass → $105.7 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>charge → -1</p> <p>spin → $1/2$</p> <p>μ</p> <p>muon</p> | <p>mass → $1.777 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>charge → -1</p> <p>spin → $1/2$</p> <p>τ</p> <p>tau</p> | <p>mass → $91.2 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 1</p> <p>Z</p> <p>Z boson</p> | GAUGE BOSONS | |
| | LEPTONS | <p>mass → $< 2.2 \text{ eV}/c^2$</p> <p>charge → 0</p> <p>spin → $1/2$</p> <p>ν_e</p> <p>electron neutrino</p> | <p>mass → $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>charge → 0</p> <p>spin → $1/2$</p> <p>ν_μ</p> <p>muon neutrino</p> | <p>mass → $< 15.5 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>charge → 0</p> <p>spin → $1/2$</p> <p>ν_τ</p> <p>tau neutrino</p> | | <p>mass → $80.4 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>charge → ± 1</p> <p>spin → 1</p> <p>W</p> <p>W boson</p> |



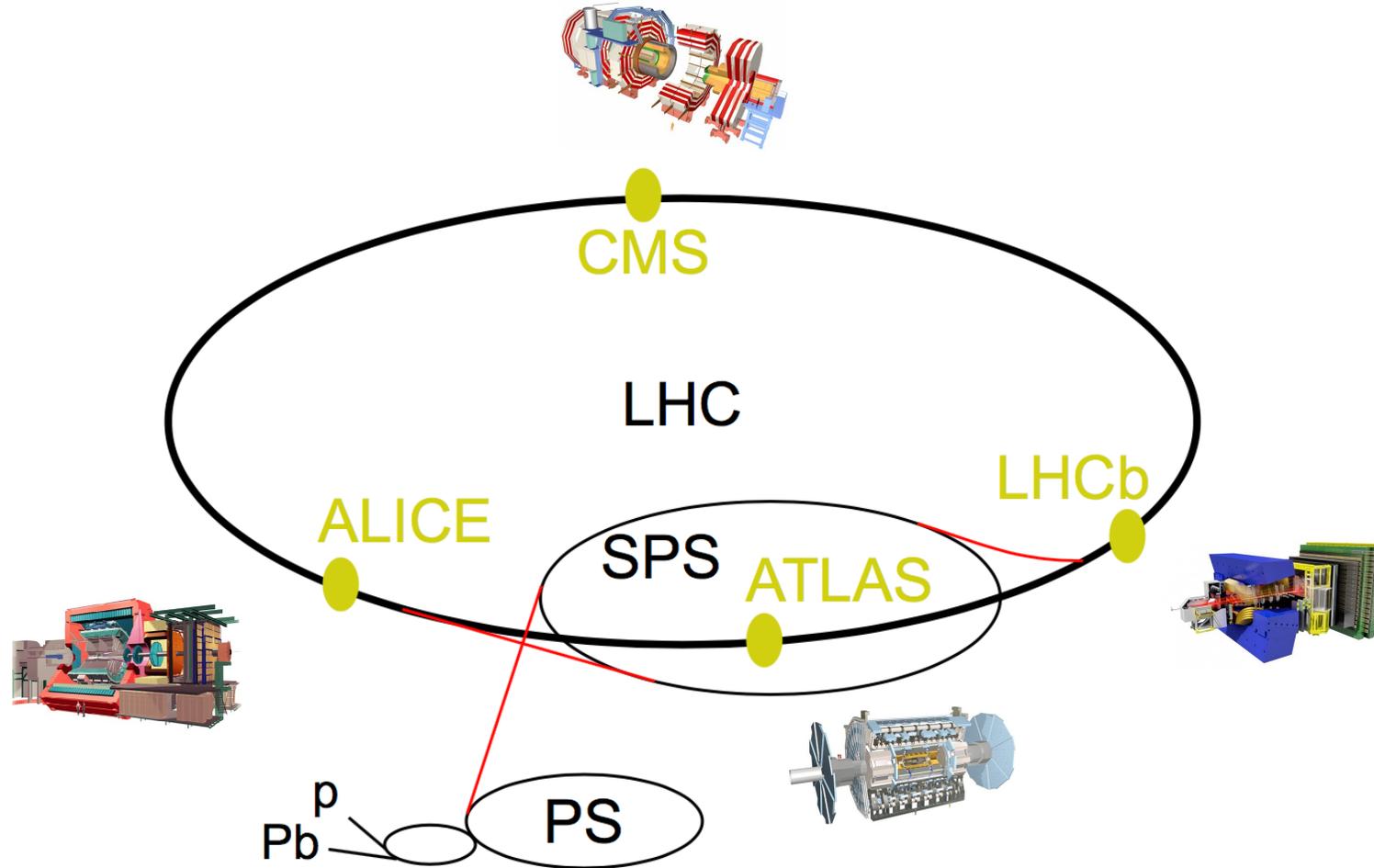
Função dos detectores

- Das centenas de partículas conhecidas, apenas ~ 27 possuem vida média suficiente para percorrer comprimentos $> 1 \mu\text{m}$.
- Dessas, 13 percorrem $< 500 \mu\text{m}$.
- Das restantes, as mais frequentes são:

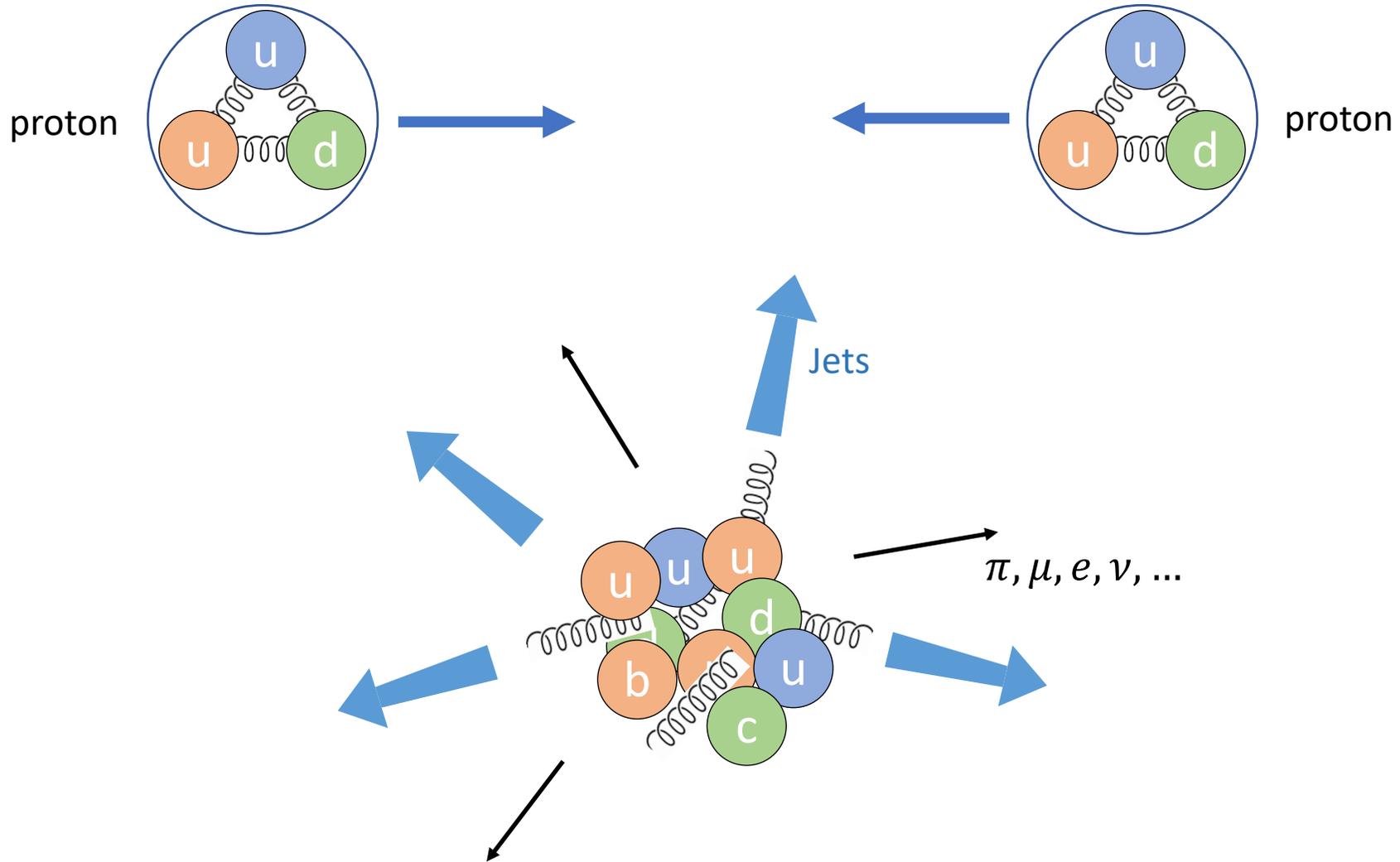
$$e^{\pm}, \mu^{\pm}, \gamma, \pi^{\pm}, K^{\pm}, K^0, p, n$$

Os elementos detectores básicos devem ser capazes de identificar e medir a energia e o momento dessas partículas

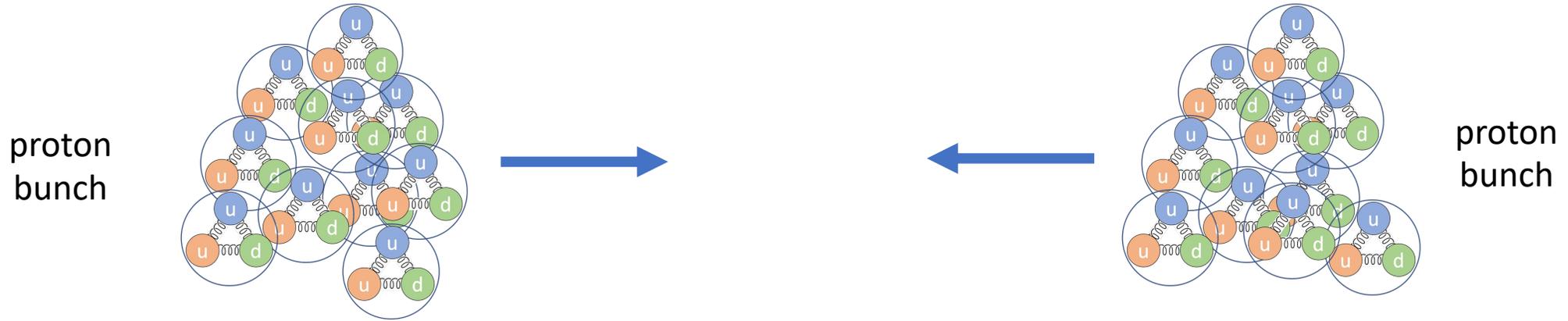
Experimentos de Aceleradores



O que ocorre na colisão de prótons?

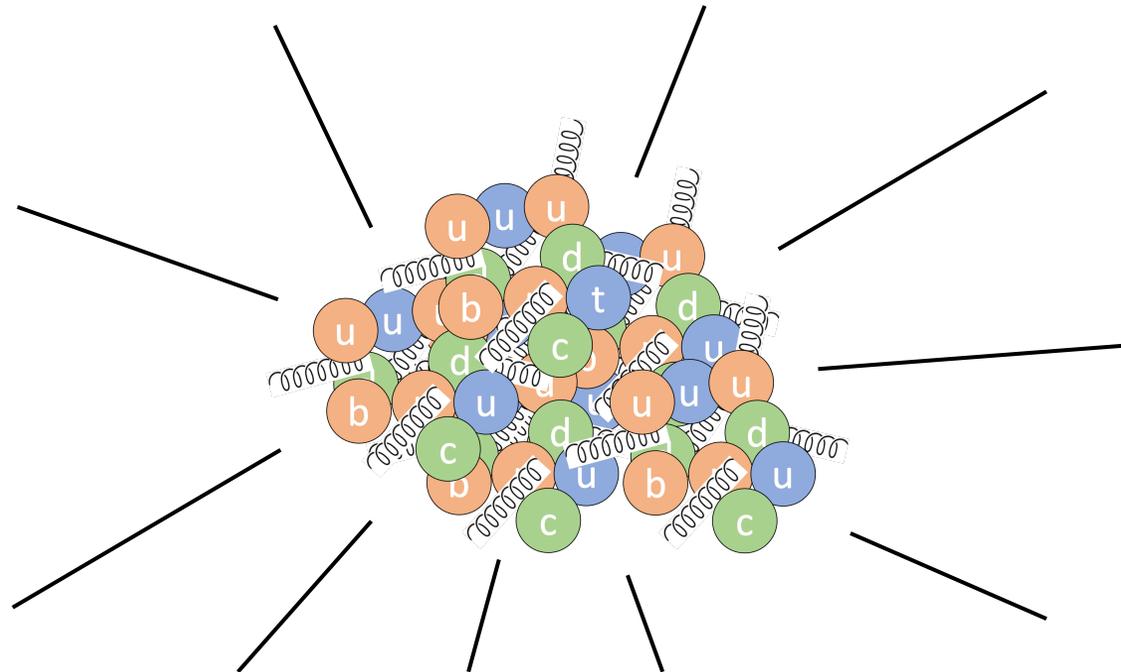


Cenário no LHC – a cada 25 ns

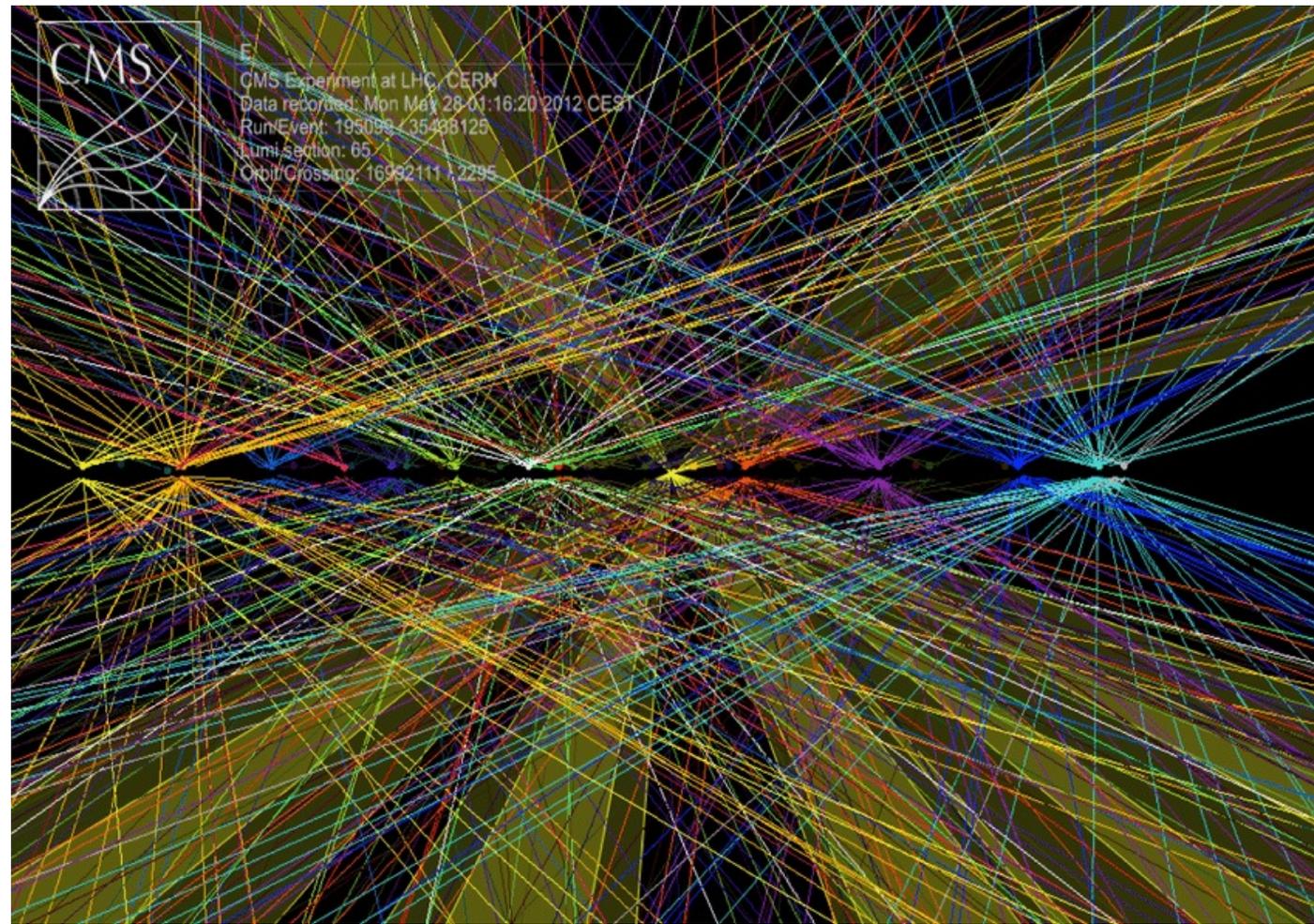
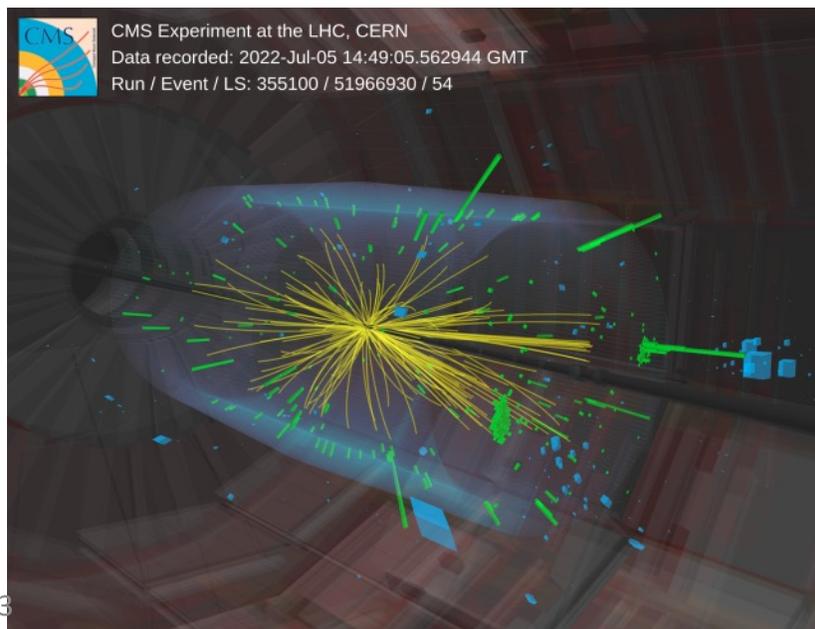
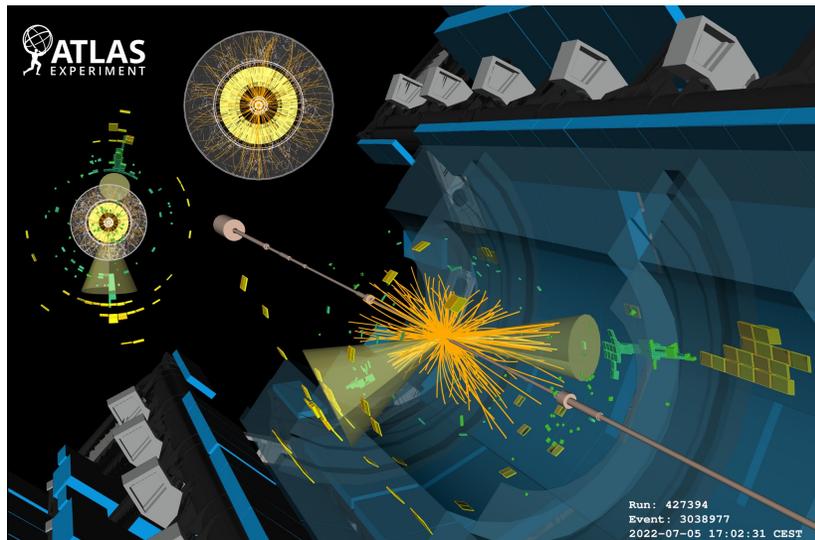


$\sim 10^{11}$ protons

Empilhamento
(pileup)



Como é na realidade



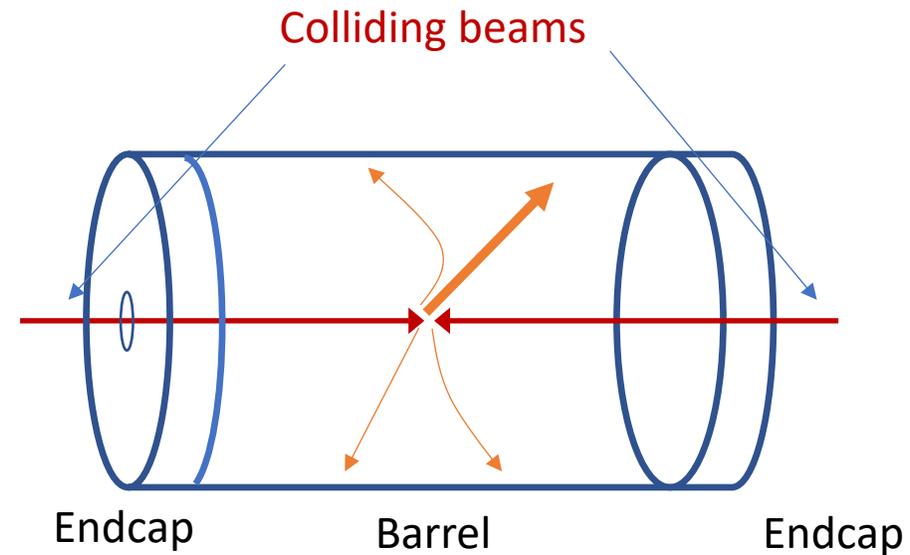
Evento com empilhamento (pile-up)

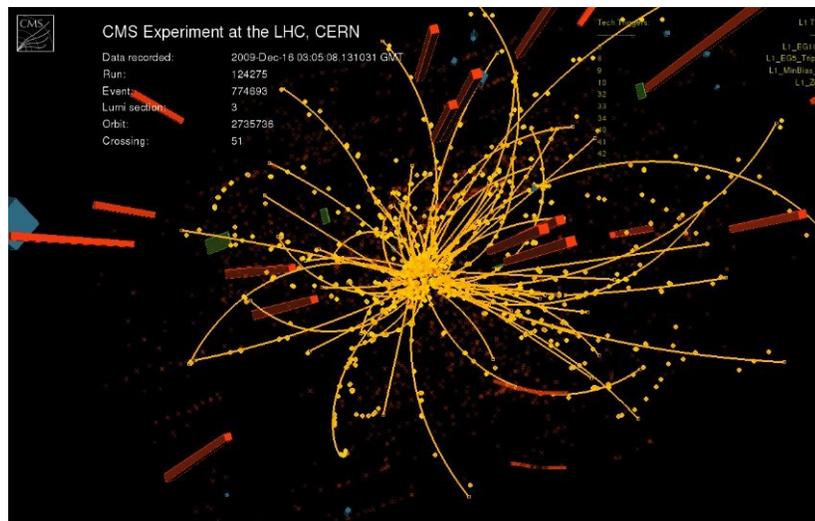


Detector básico de colisor



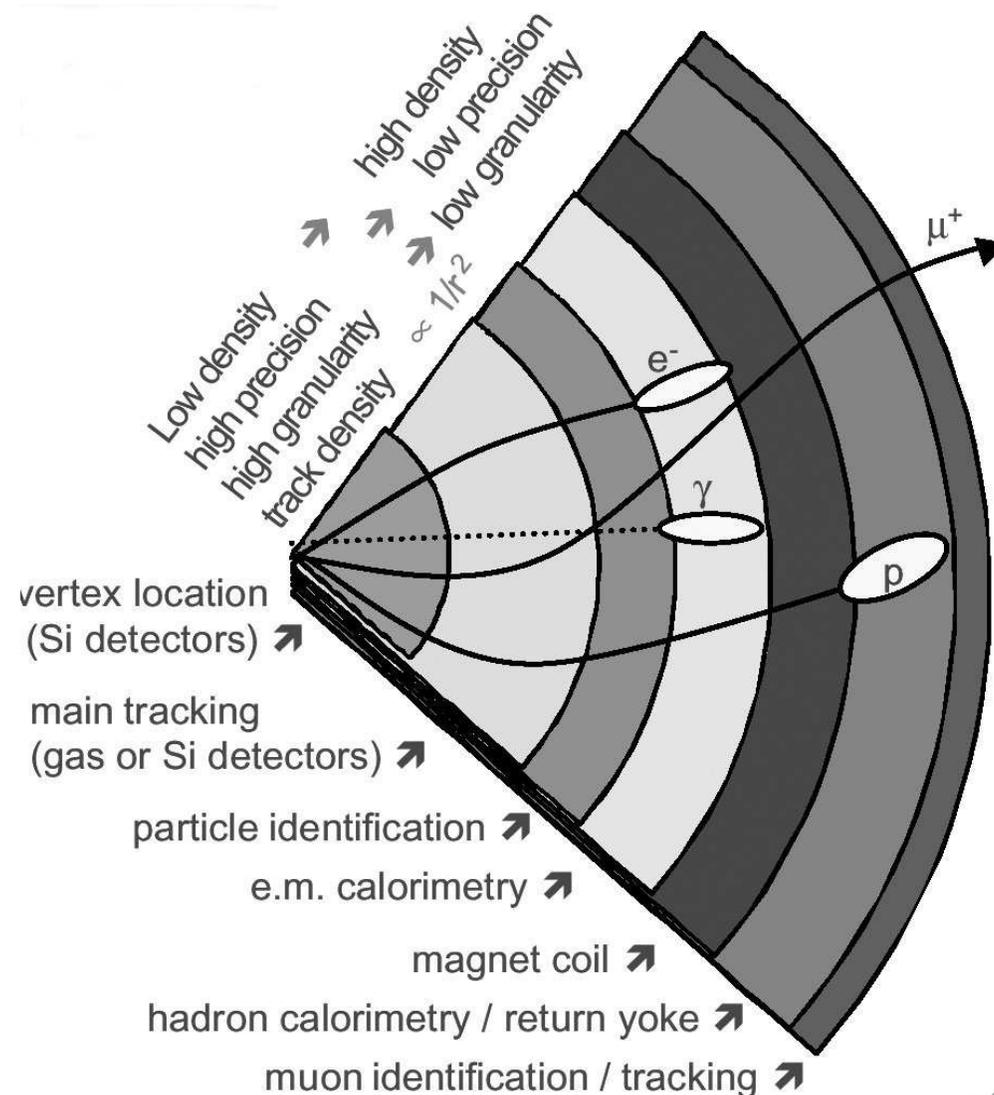
- Camadas de detectores divididos em **barril** e **tampas**.
- Hermeticidade, cobertura de 4π em torno do ponto de colisão.
- Solenóide/toróide para gerar intenso campo magnético.



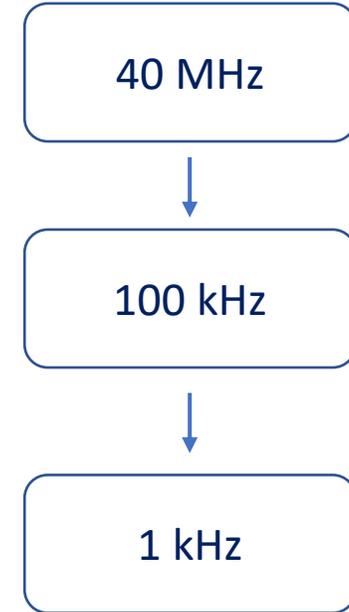
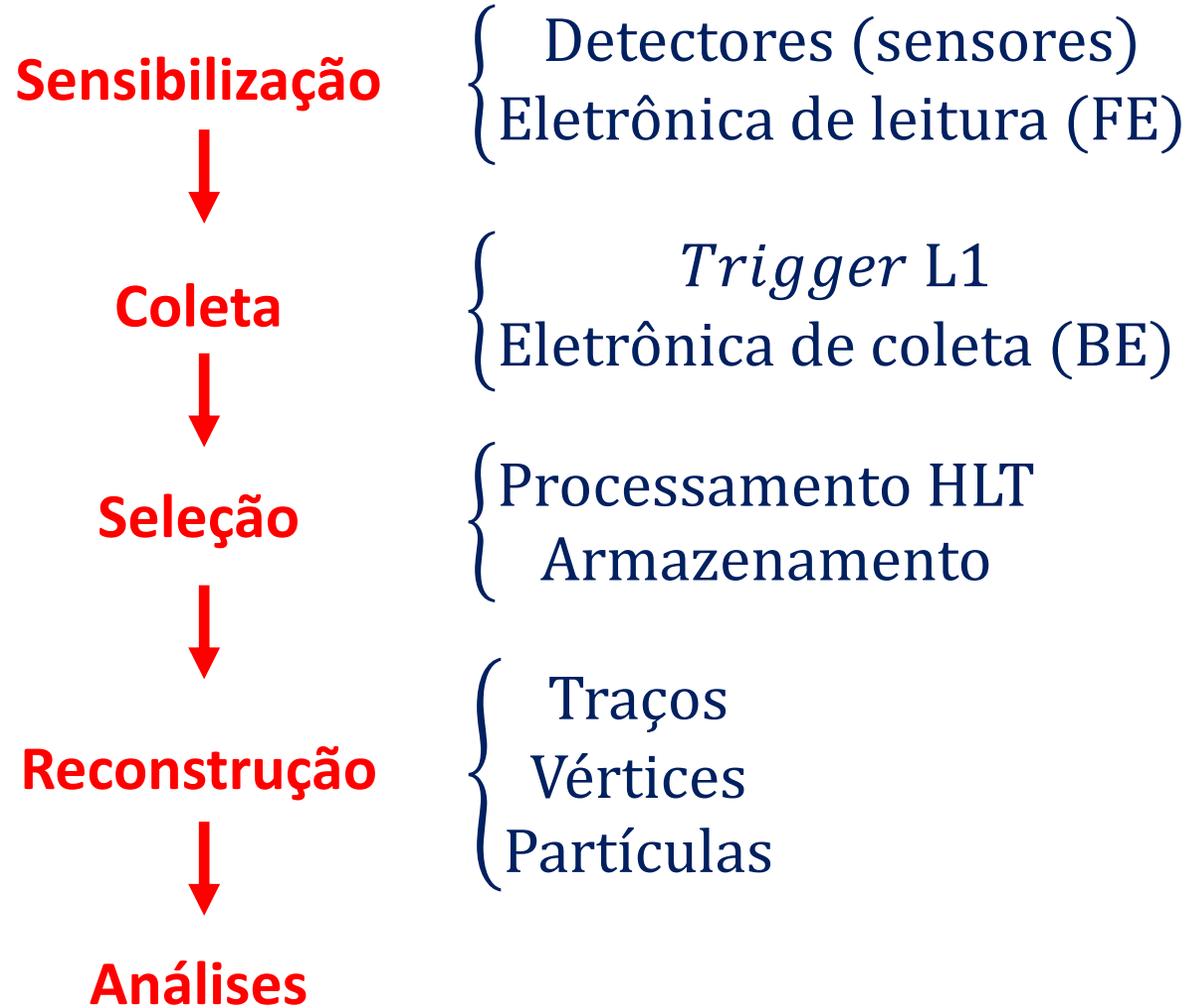


Um experimento é constituído de um detector com vários subsistemas:

- Detector de vértice de interação;
- Detector de trajetografia (tracking);
- Calorímetro eletromagnético;
- Calorímetro hadrônico;
- Magneto;
- Detector de partículas penetrantes (múons).



Aquisição dos dados



CMS

Desafios para a instrumentação



Alta resolução espacial

- Empilhamento
- Vértices secundários

Da ordem de dezenas de μm
(parâmetro de impacto)

Alta resolução temporal

- Empilhamento

Entre 0,1 – 2,0 ns

Alta largura de banda na coleta de dados

- Resultado da alta luminosidade
- Detectores de baixo tempo morto

Eletrônica para processar e transmitir em alta largura de banda.

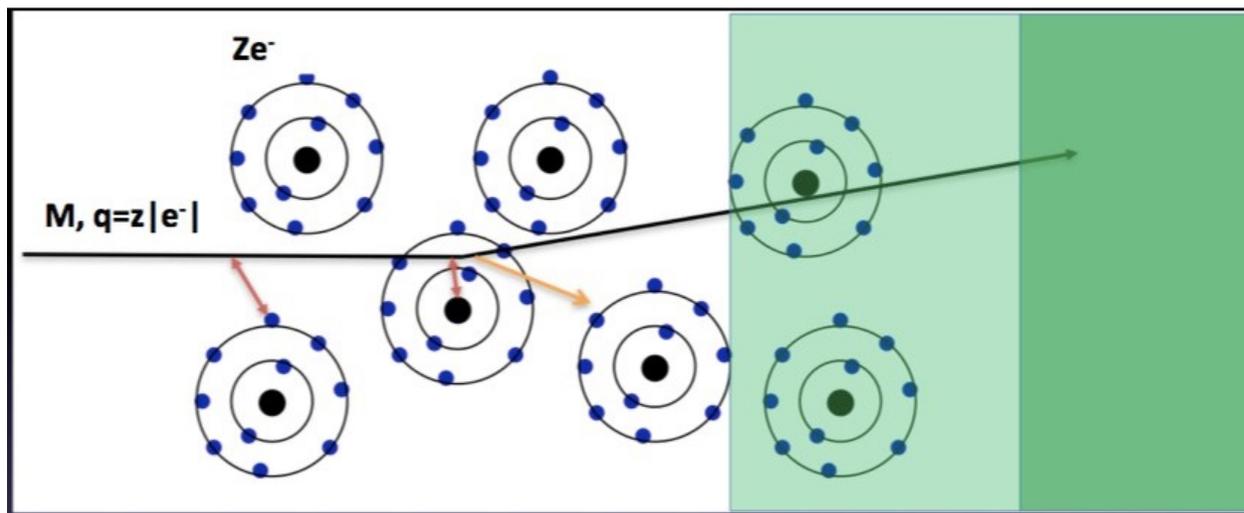
Grande aceitação

- Cobertura geométrica
- Cobertura de largo espectro de energias e de tipos de partículas

Diversidade de sistemas detectores



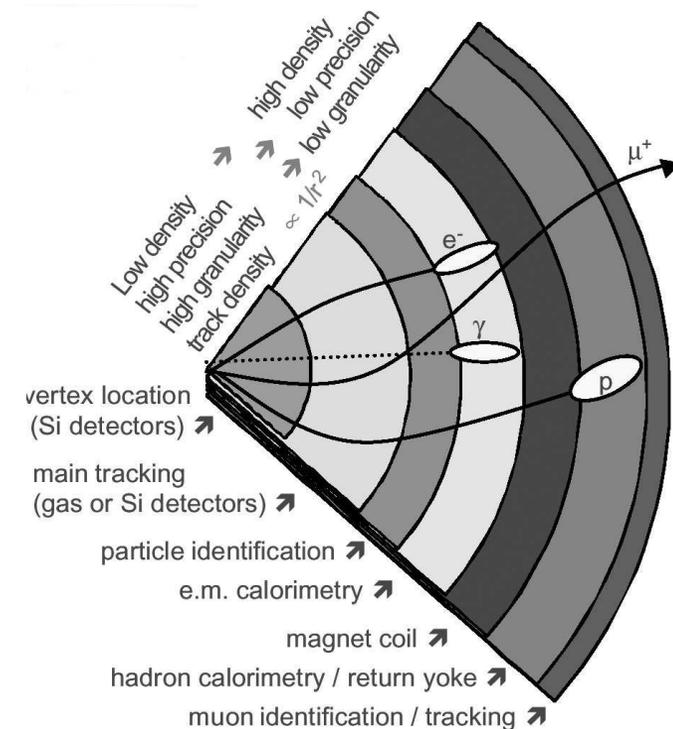
- A **interação eletromagnética** é a mais importante para os dispositivos detectores, pois é o efeito principal da perda de energia na matéria.



Interação com os elétrons atômicos (excitação e ionização)

Interação com os núcleos atômicos (deflexão e emissão de fótons de bremsstrahlung)

Emissão de radiação Cherenkov e de radiação de transição.

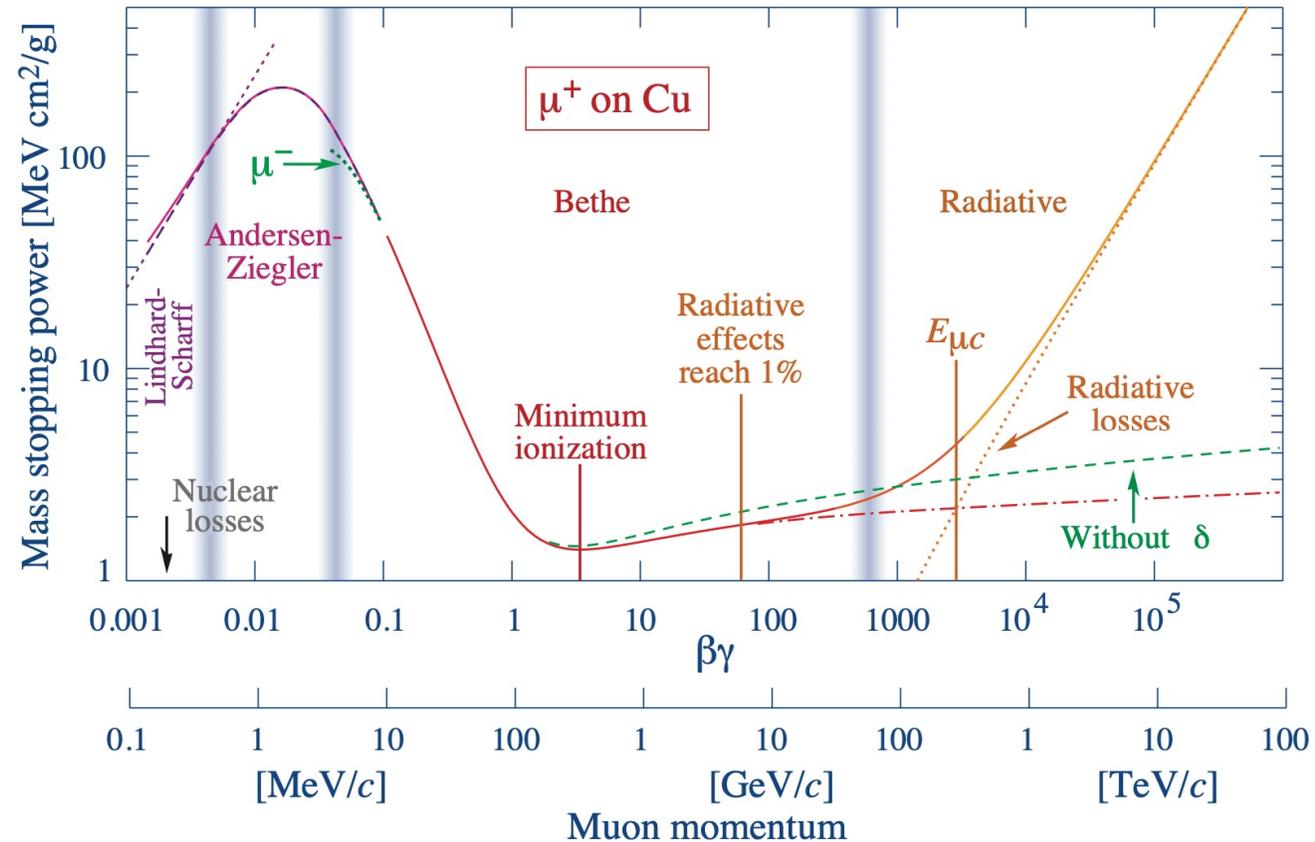


Perda de energia de partículas pesadas



- Espalhamento elástico com núcleos do material. (mudança de direção)
- Colisões inelásticas com elétrons dos átomos do material detector. (perda de energia).
- A energia média perdida por uma partícula carregada pesada é dada pela equação de Bethe.

PDG



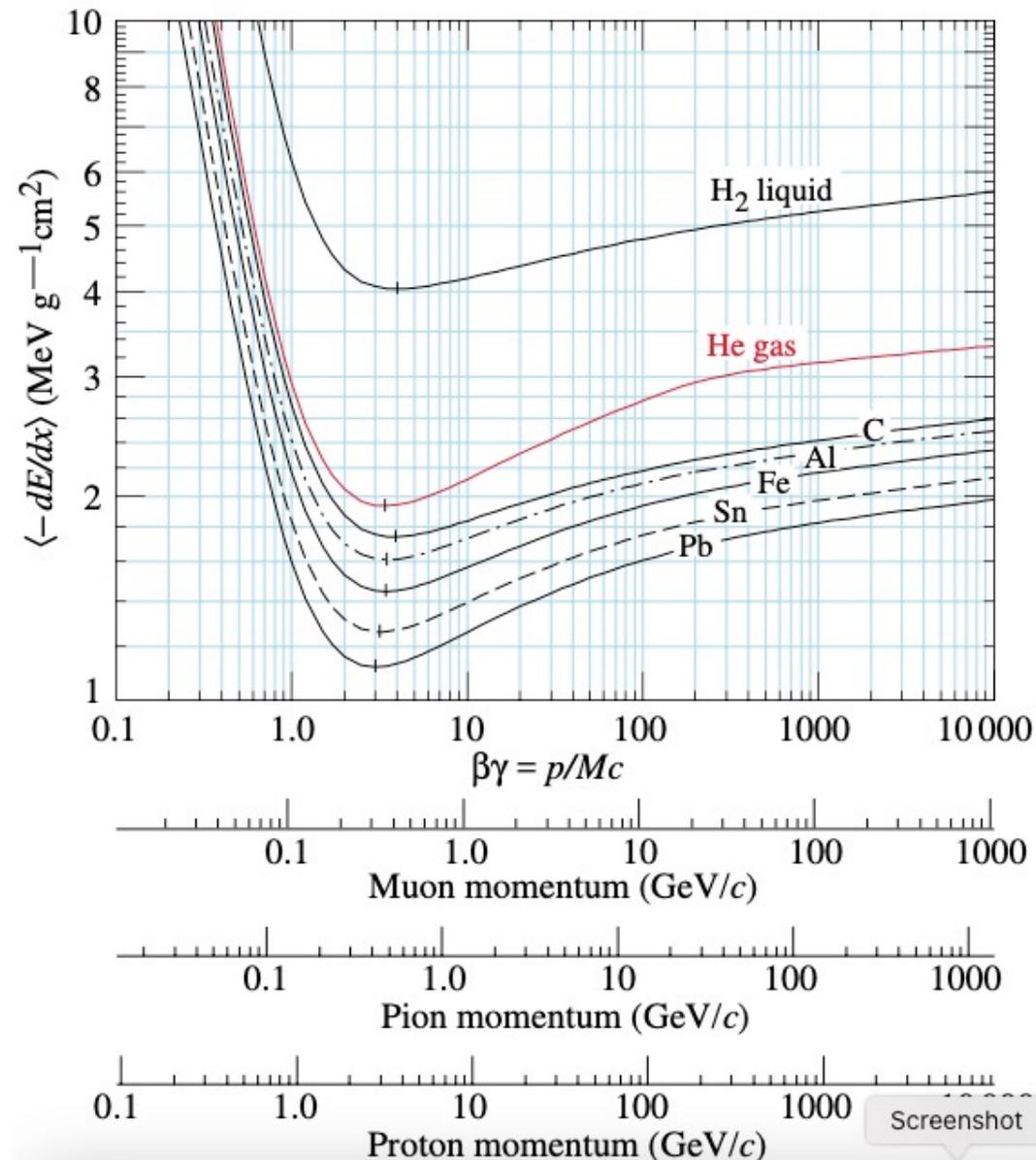
$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

Perda de energia de partículas pesadas



$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

- Crescimento rápido com a redução da energia ($1/\beta^2$).
- Mínimo na faixa $3 < \beta\gamma < 4$.
- Crescimento lento para altos valores de $\beta\gamma$.
- Chama-se partícula minimamente ionizante (mip) aquela próxima do mínimo de dE/dx .

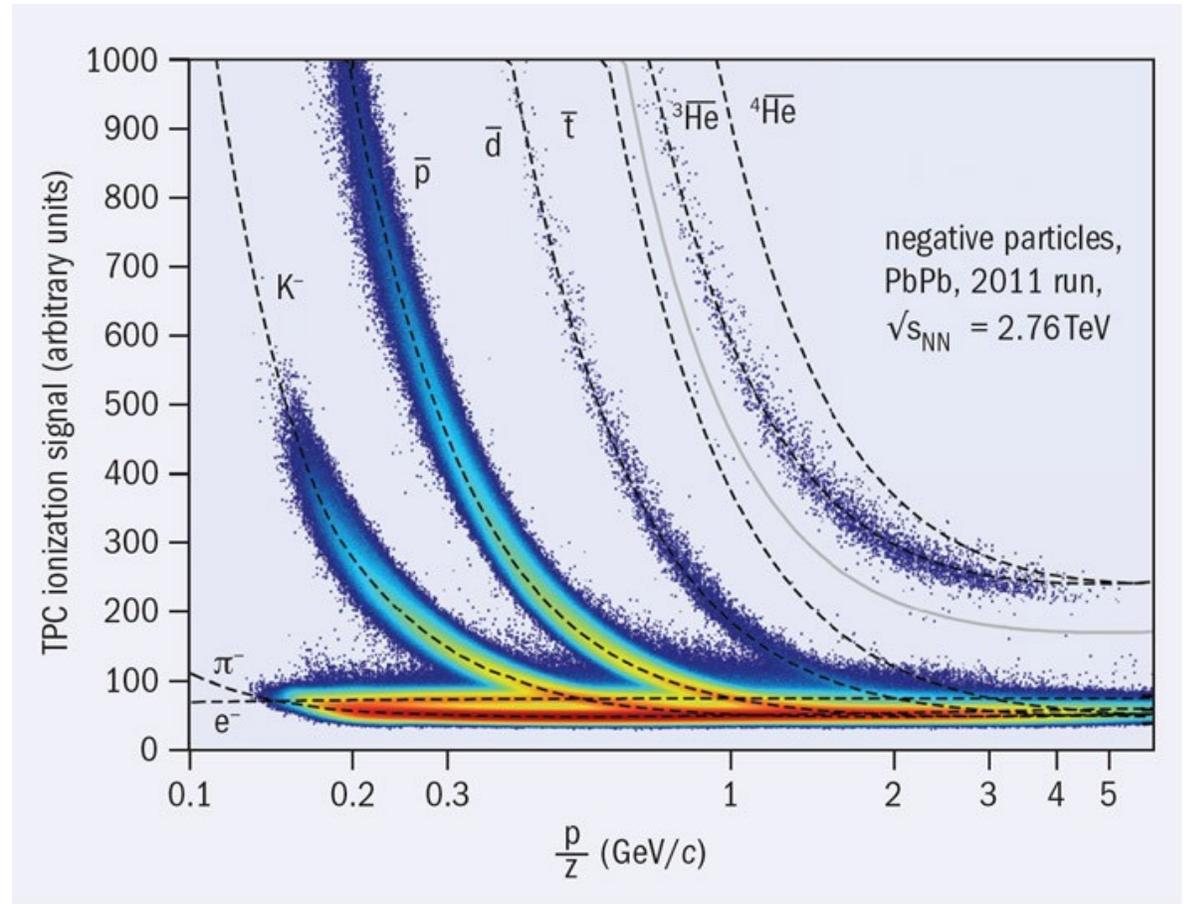


Perda de energia de partículas pesadas



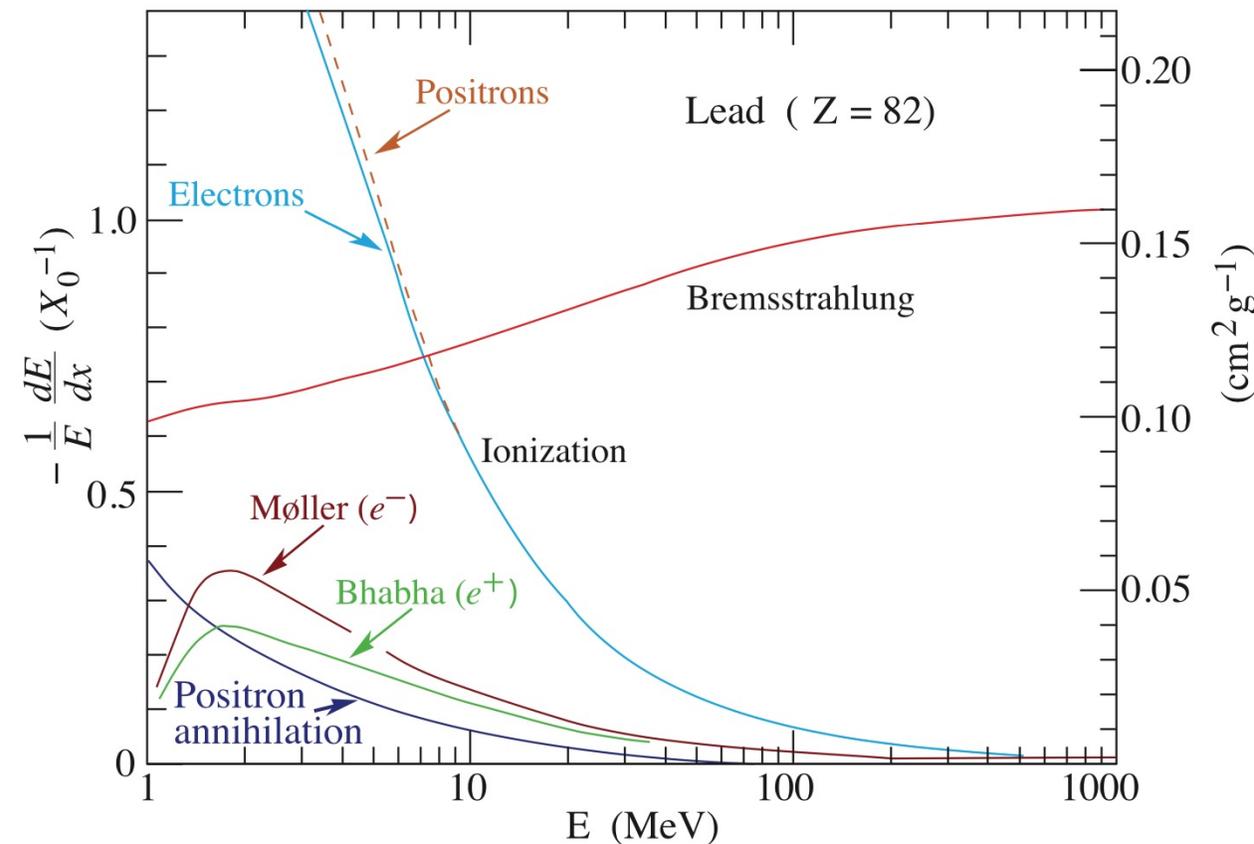
$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

A dependência da massa possibilita a identificação da partícula através da sua curva de perda de energia.





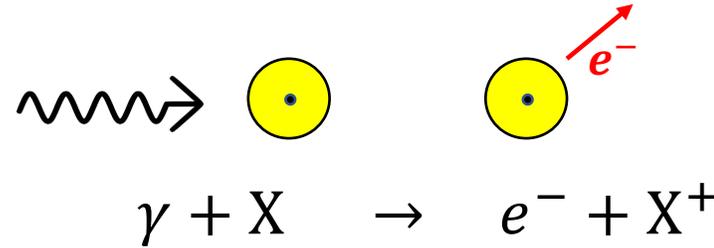
- Diferem da perda de partículas pesadas devido à diferença da cinemática, spin, carga e identidade com os elétrons atômicos com os quais interage.
- A baixas energias a perda primária ocorre pela ionização e excitação atômica.
- A perda por radiação (Bremsstrahlung) é proporcional à energia da partícula e domina acima da *energia crítica*.



Perda de energia de fótons

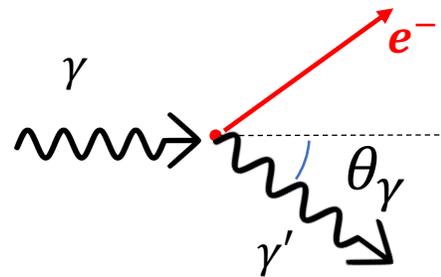
Efeito Fotoelétrico

- Absorção por um átomo e emissão de um elétron



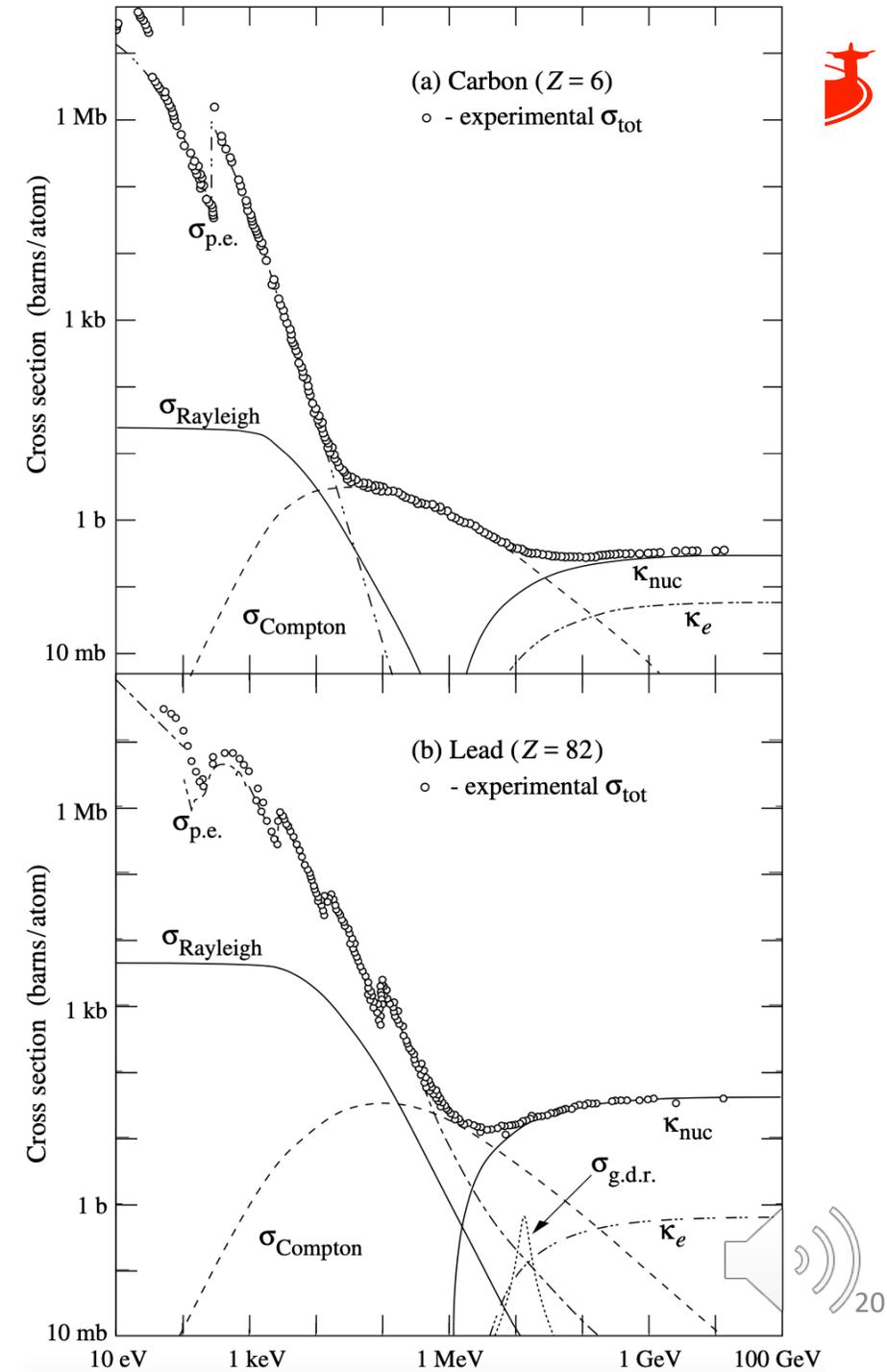
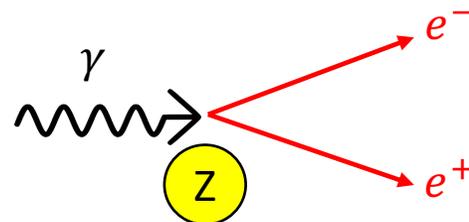
Efeito Compton

- Espalhamento do fóton contra um elétron.



Produção de pares

- A energia do fóton deve ser $> 2 m_e$

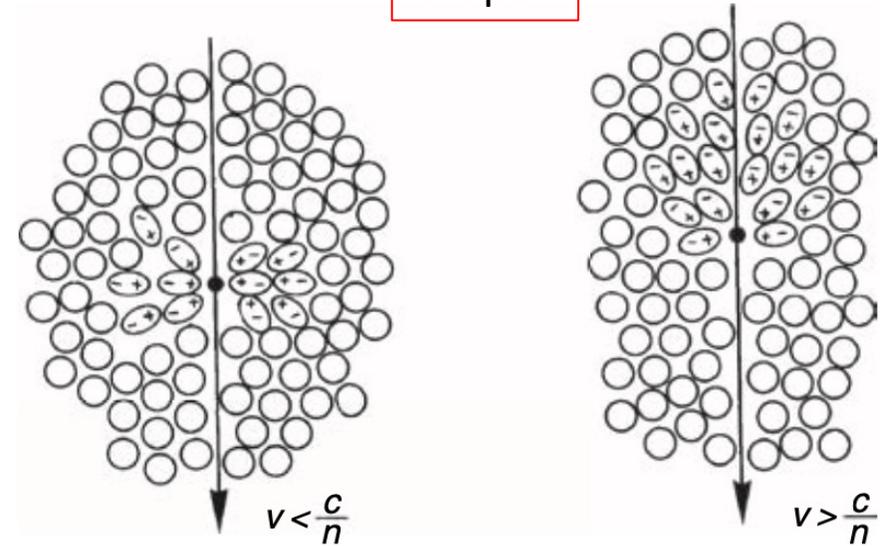


Efeito Cherenkov



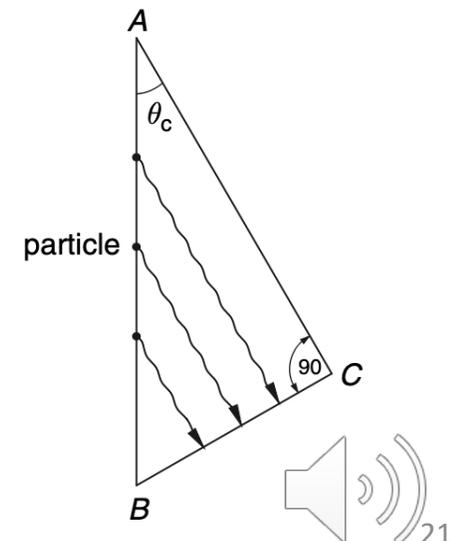
- É a emissão de radiação EM quando uma partícula carregada atravessa o meio com velocidade maior que a velocidade de fase da luz. $\beta > 1/n$
- A variação do momento de dipolo do meio geram as ondas EM.
- Não é significativa para a perda de energia da partícula, mas a radiação EM produzida pode ser utilizada para a sua detecção.

Gruppen



$$\cos \theta_c = \frac{c}{n\beta c} = \frac{1}{n\beta}$$

$$\theta_c^{\max} = \arccos \frac{1}{n}$$



Efeito Cherenkov

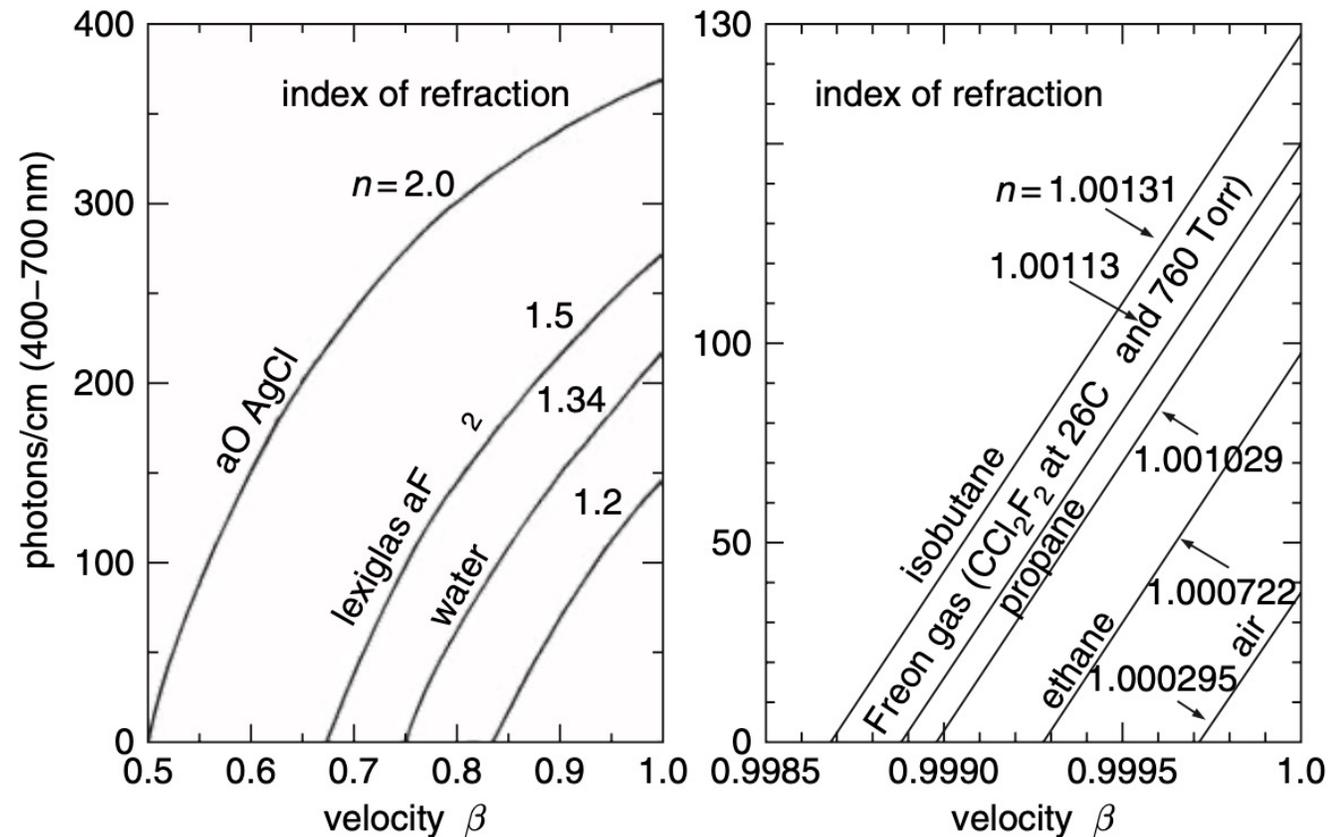


O número de fótons emitidos por unidade de comprimento é dado por

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha z^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{1}{(n(\lambda))^2\beta^2}\right) \frac{d\lambda}{\lambda^2}$$

A energia fixa, o limiar para emissão da radiação Cherenkov depende da massa da partícula, o que o torna adequado para a **identificação de partículas**.

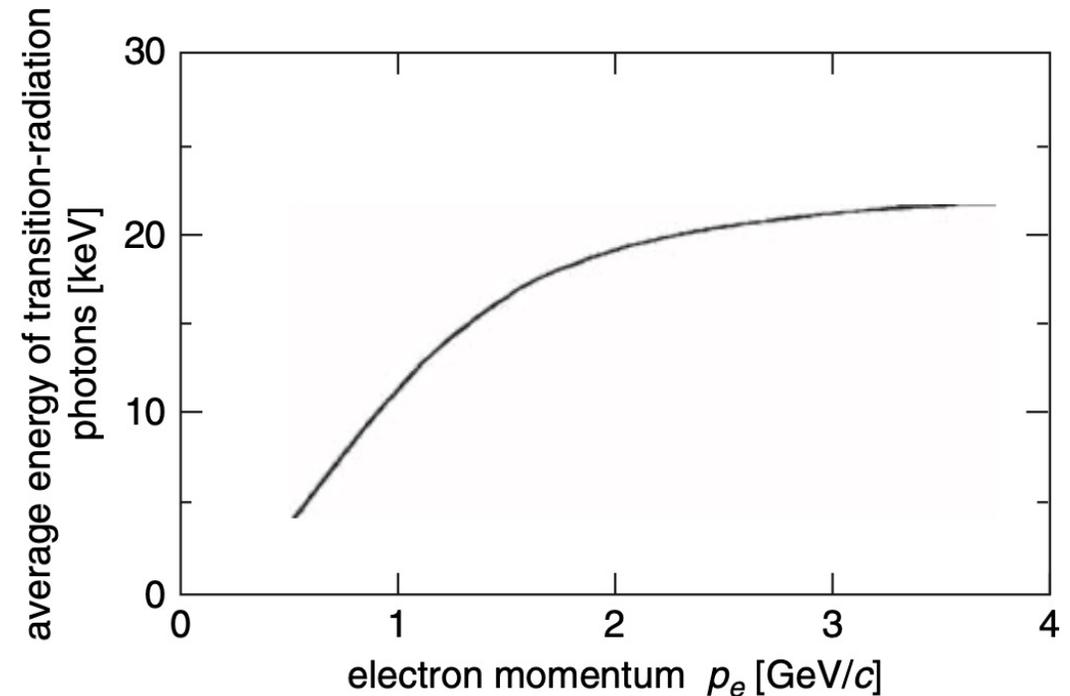
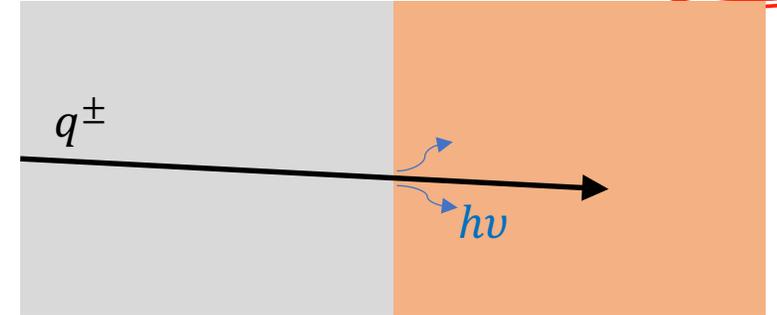
Gruppen



Radiação de transição



- Ocorre quando uma partícula carregada atravessa a interface entre dois meios dielétricos com diferentes propriedades.
- A perda de energia da partícula é desprezível neste processo.
- A quantidade de fótons produzida depende do fator de Lorentz γ , e por isso também é atraente para a identificação de partículas de altas energias.



$$N_\gamma(\hbar\omega > \hbar\omega_0) = \frac{\alpha z^2}{\pi} \left[\left(\ln \frac{\gamma \hbar\omega_p}{\hbar\omega_0} - 1 \right)^2 + \frac{\pi^2}{12} \right]$$