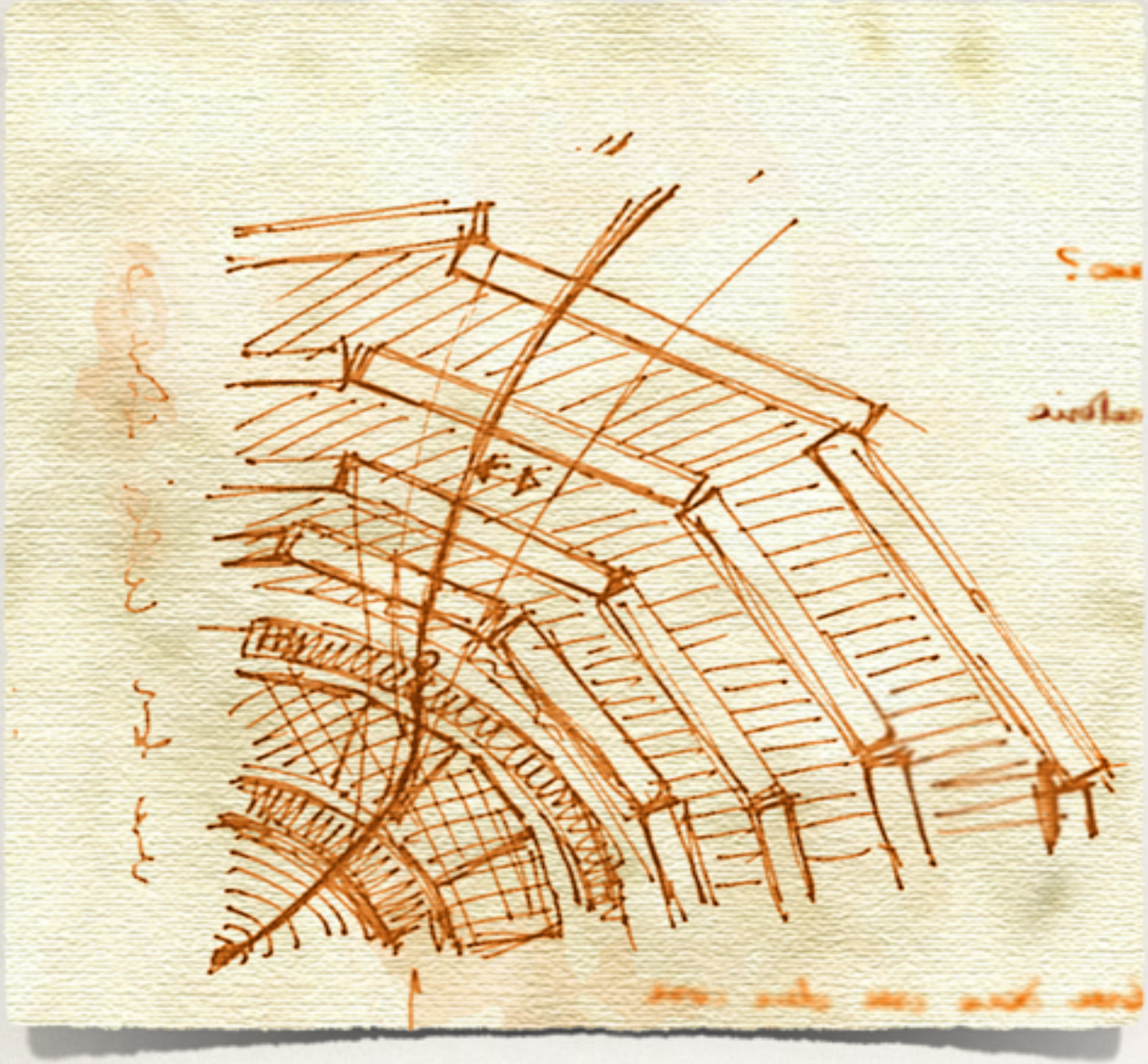


XI Escola do CBPF

Curso de Pós-Graduação

Notas de Aula

A Física dos Detectores de Partículas

Dr Arthur M. Moraes - CBPF

(web-page: http://cern.ch/amoraes)

18 de Julho de 2017

CBPF
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Notas de Aula: onde encontra-las?

https://amoraes.web.cern.ch/amoraes/escola-cbpf-2017/

http://cern.ch/amoraes

Introdução

Programa do Curso:

Aula 1: De Rutherford ao LHC: Desenvolvimento dos detectores ao longo da história da física das partículas elementares. (2ªf. 17/07)

Aula 2: Interações das partículas com a matéria. (3ªf. 18/07)

Aula 3: Detectando partículas carregadas & neutras. (5ªf. 20/07)

Aula 4: Cintiladores: detectando partículas via luminescência. (6ªf. 21/07)

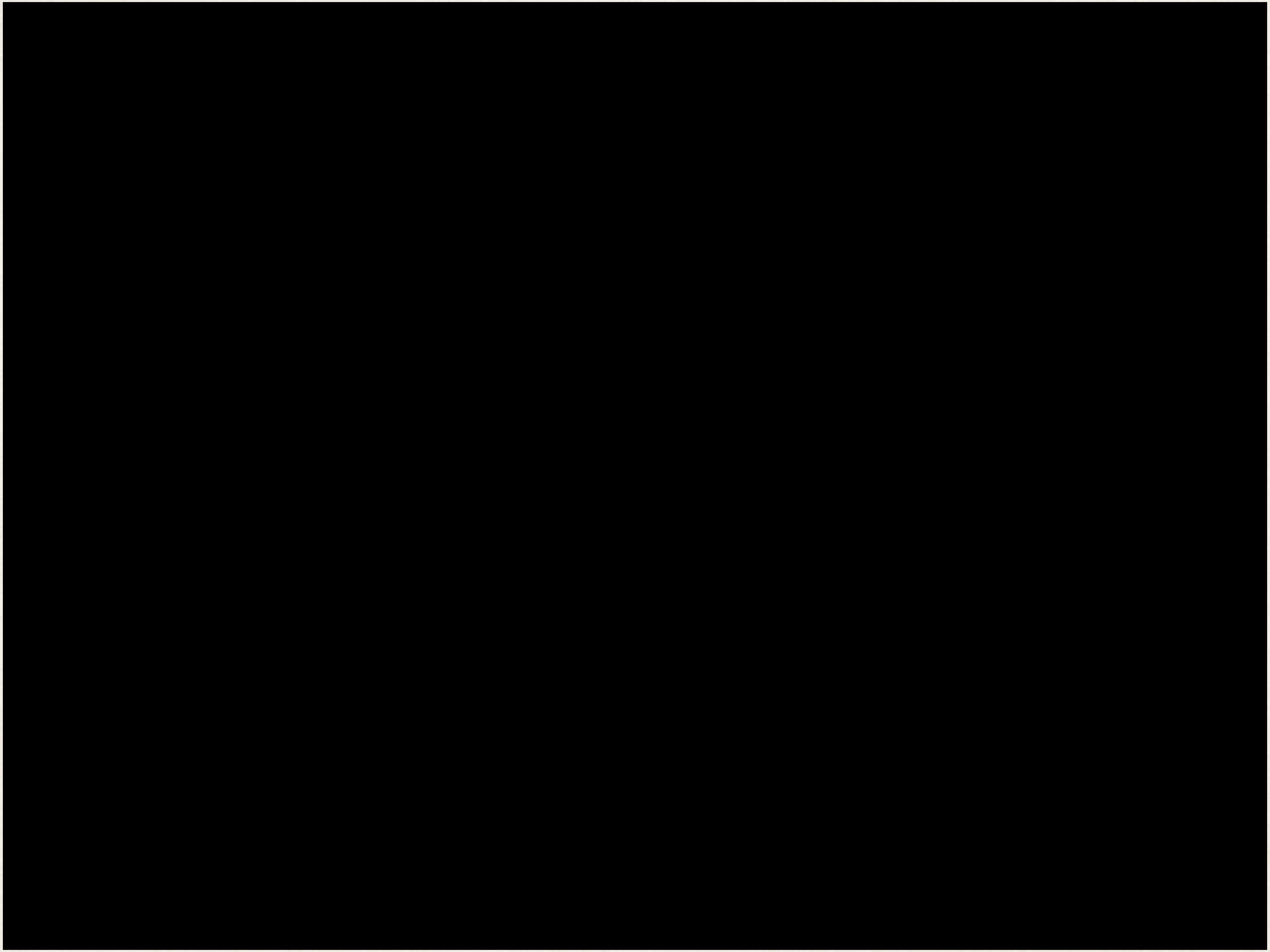
Aula 5: Detectores de semicondutores: medidas de alta precisão. (2ªf. 24/07)

Aula 6: Detectores de gás: medindo partículas em grandes volumes. (3ªf. 25/07)

Aula 7: Calorímetros: eletromagnéticos & hadrônicos. (5ªf. 27/07)

Aula 8: Exemplos de aplicações dos detectores em várias áreas. (6ªf. 28/07)

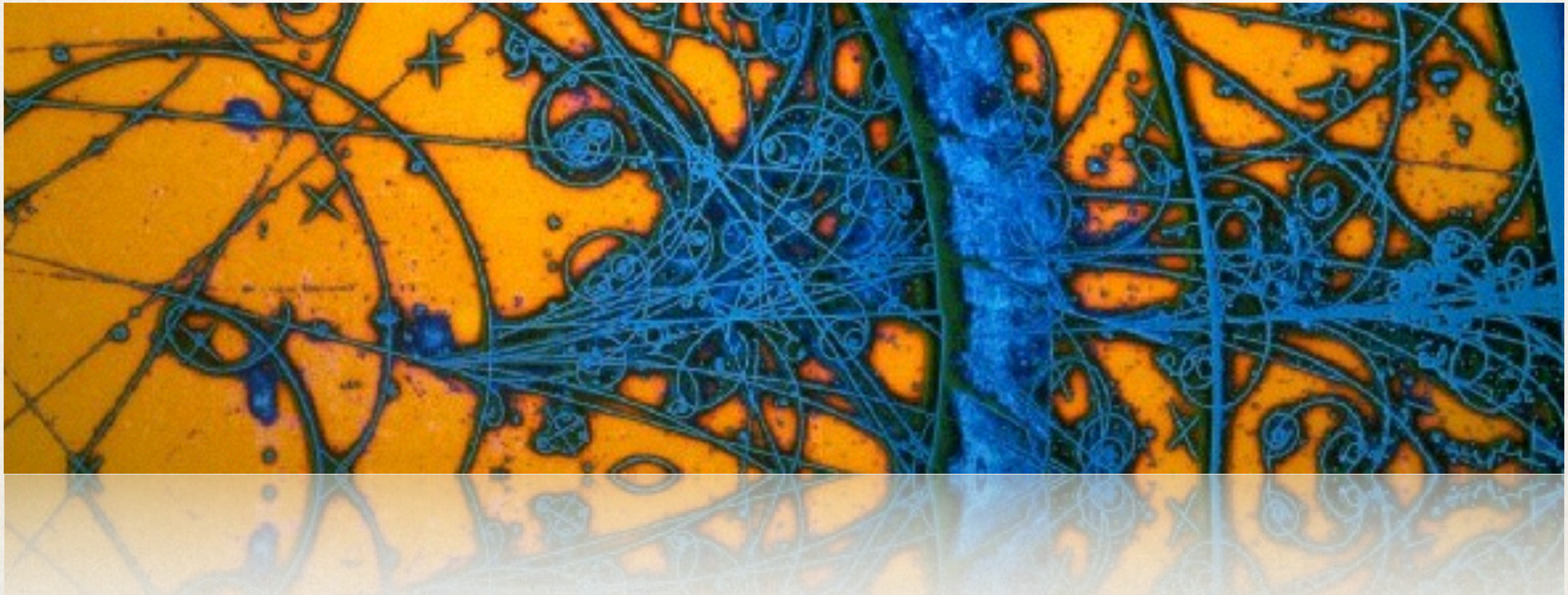
http://cern.ch/amoraes



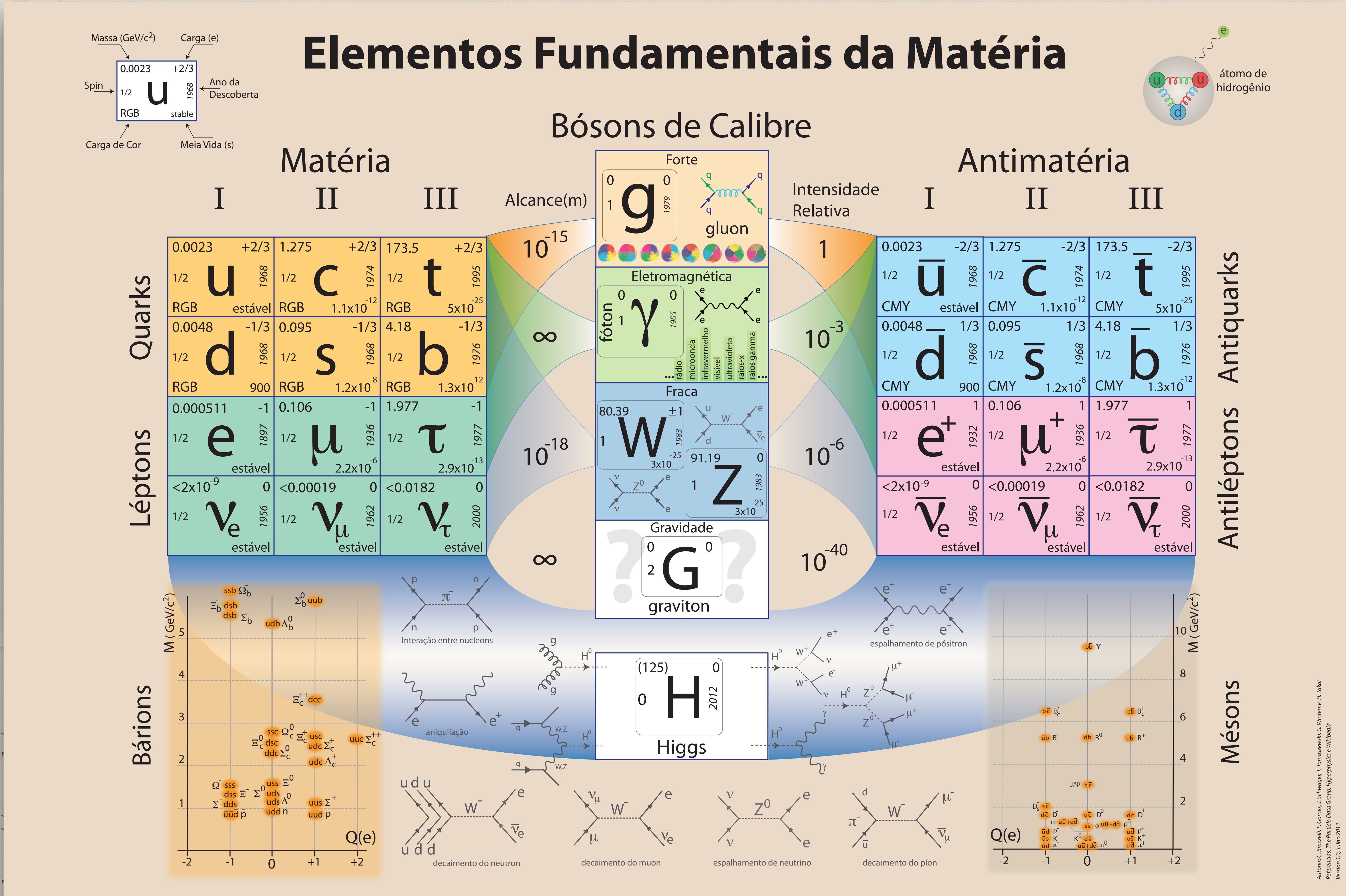
http://cern.ch/amoraes

Aula 2

Interações das partículas com a matéria



http://cern.ch/amoraes



Elementos Fundamentais da Matéria
Massa (GeV/c2)
Carga (e)
Spin
Ano da Descoberta
Carga de Cor
Meia Vida (s)
átomo de hidrogênio
Bósons de Calibre
Matéria
Antimatéria
I
II
III
Alcance(m)
Intensidade Relativa
Forte
gluon
Eletromagnética
fóton
rádio
microonda
infravermelho
visível
ultravioleta
raios-x
raios gamma
Fraca
Gravidade
graviton
Higgs
Quarks
Léptons
Antiquarks
Antiléptons
Bárions
Mésons
0.0023 +2/3 1/2 u 1968 RGB estável
1.275 +2/3 1/2 c 1974 RGB 1.1x10-12
173.5 +2/3 1/2 t 1995 RGB 5x10-25
0.0048 -1/3 1/2 d 1968 RGB 900
0.095 -1/3 1/2 s 1968 RGB 1.2x10-8
4.18 -1/3 1/2 b 1976 RGB 1.3x10-12
0.000511 -1 1/2 e 1897 estável
0.106 -1 1/2 μ 1936 2.2x10-6
1.977 -1 1/2 τ 1977 2.9x10-13
<2x10-9 0 1/2 νe 1956 estável
<0.00019 0 1/2 νμ 1962 estável
<0.0182 0 1/2 ντ 2000 estável
10-15
∞
10-18
∞
1
10-3
10-6
10-40
0 0 1 g 1979
0 0 1 γ 1905
80.39 ±1 1 W 1983 3x10-25
91.19 0 1 Z 1983 3x10-25
0 0 2 G
(125) 0 0 H 2012
Interação entre nucleons
aniquilação
espalhamento de pósitron
decaimento do neutron
decaimento do muon
espalhamento de neutrino
decaimento do pion
M (GeV/c2)
Q(e)
Autores: C. Brazzelli, F. Gomes, J. Schwager, T. Tomaszewski, G. Winters e H. Takai
Referências: The Particle Data Group, Hyperphysics e Wikipedia
Version 1.0, Julho 2013

Princípio para detecção de partículas

Para se detectar uma partícula:

- ela deve **interagir** com a matéria
- ela deve **transferir energia** de modo que seja reconhecível

ou seja

a detecção de partículas ocorre através da perda de energia das partículas ao atravessarem o material

Possibilidades:

Partículas carregadas	Ionização, Bremsstrahlung, Cherenkov …
Hádrons	Interações nucleares
Fótons	Efeito Compton, produção de pares
Neutrinos	Interações fracas

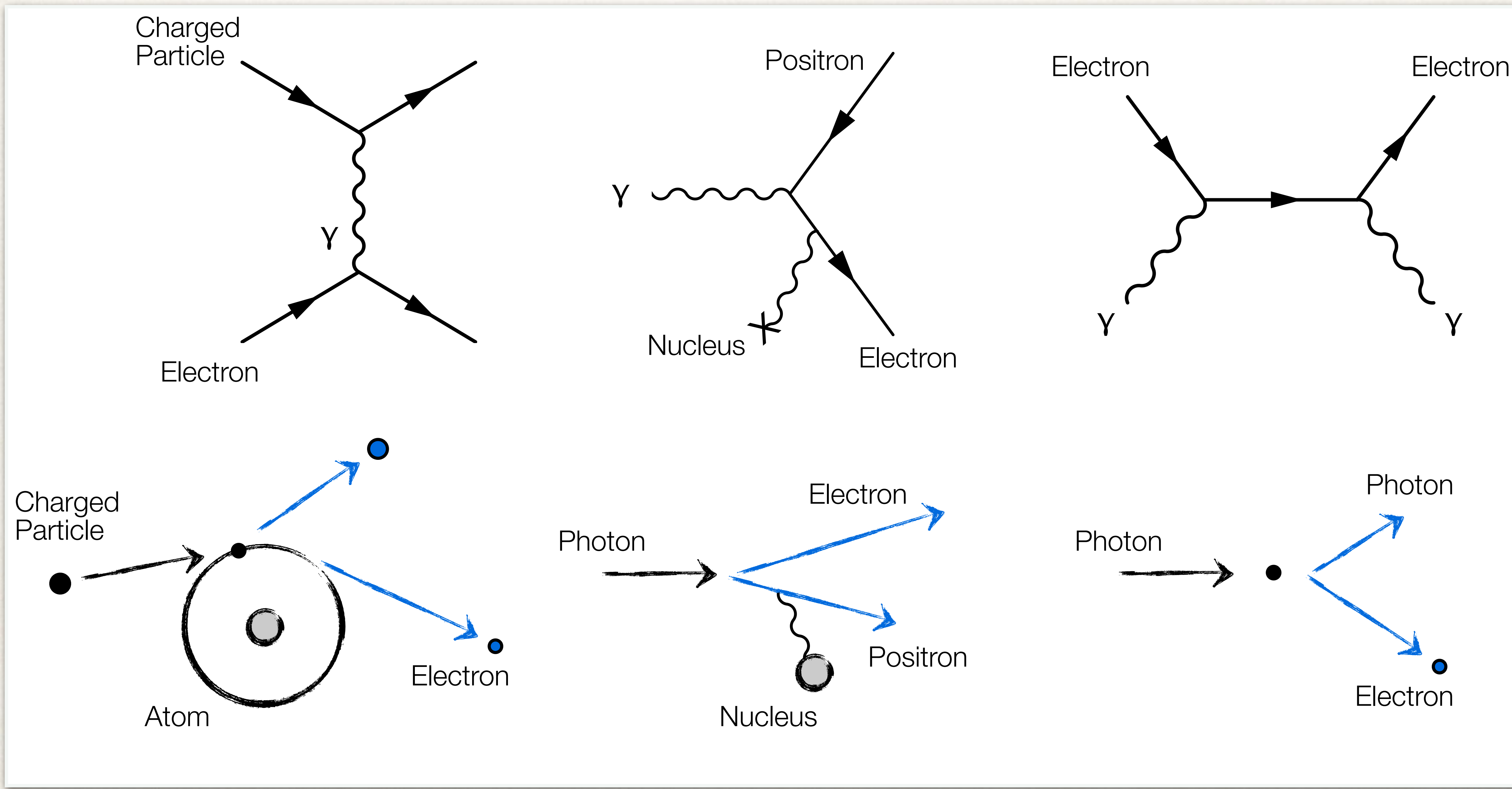
http://cern.ch/amoraes

Interações de partículas - exemplos

Ionização

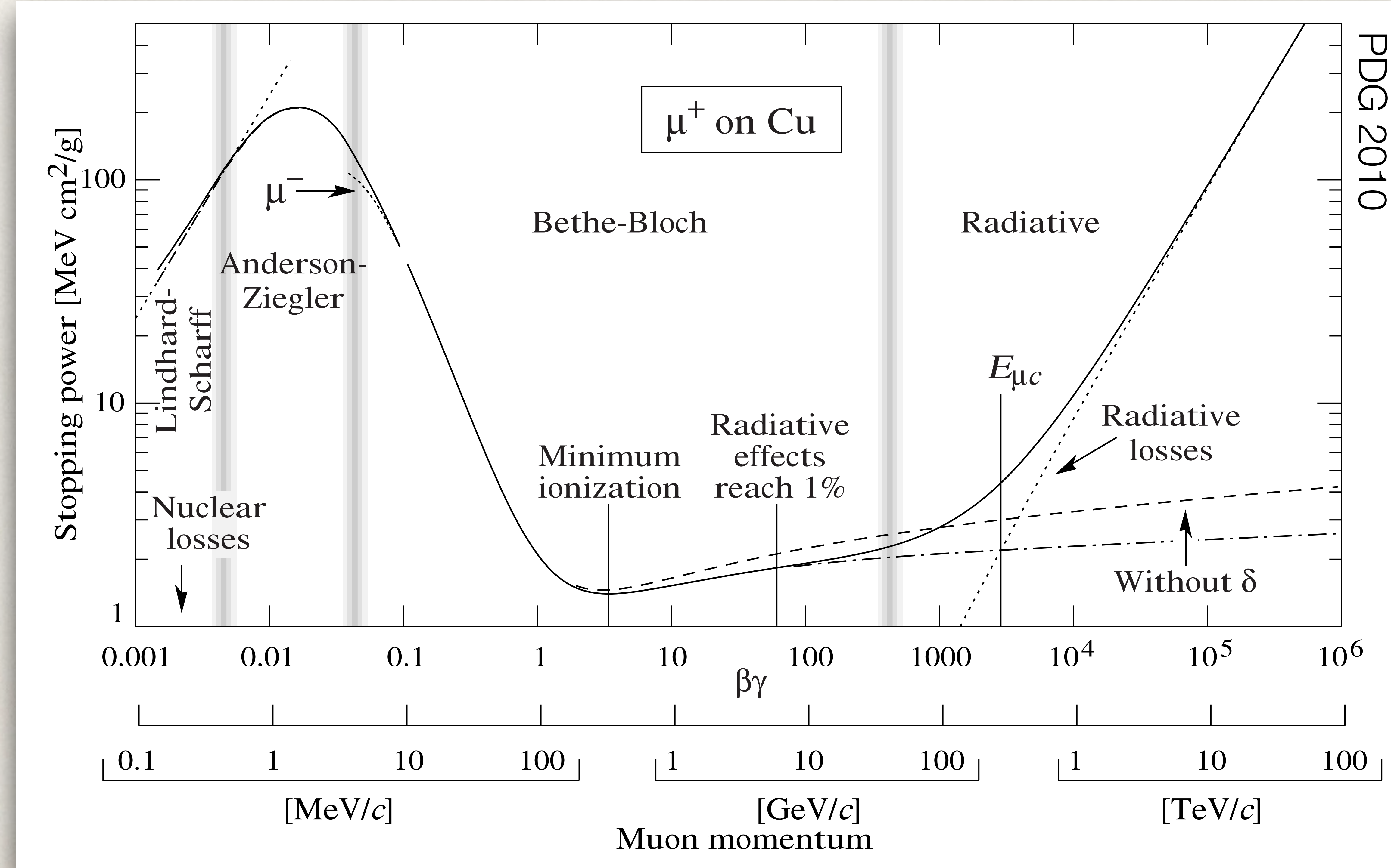
Produção de pares

Espalhamento Compton



http://cern.ch/amoraes

Perda de energia - Gráfico para Múons

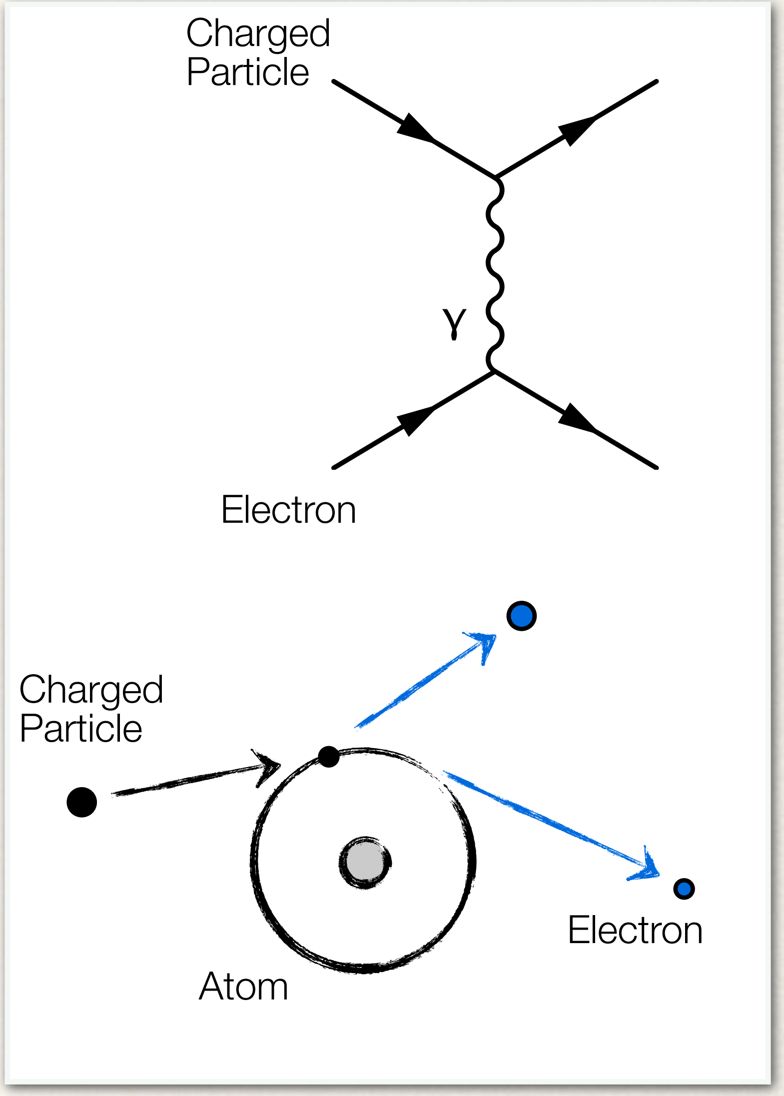


http://cern.ch/amoraes

Perda de energia por Ionização - dE/dx

Vamos assumir: $Mc^2 \gg m_ec^2$

i.e. perda de energia por partículas "pesadas"
(dE/dx para elétrons é mais "complicado"…)



Interação dominada por colisões elásticas com elétrons

Equação Bethe-Bloch

$$\boxed{-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_ec^2\beta^2\gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]}$$

$\propto 1/\beta^2 \cdot \ln(\mathrm{const} \cdot \beta^2\gamma^2)$

http://cern.ch/amoraes

Equação Bethe-Bloch

[see e.g. PDG 2010]

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

density

$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.307$ MeV g^{-1} cm^2

$T_{max} = 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 / (1 + 2\gamma\, m_e/M + (m_e/M)^2)$

[Max. energy transfer in single collision]

z : Charge of incident particle

M : Mass of incident particle

Z : Charge number of medium

A : Atomic mass of medium

I : Mean excitation energy of medium

δ : Density correction [transv. extension of electric field]

$N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$

[Avogardo's number]

$r_e = e^2/4\pi\varepsilon_0 m_e c^2 = 2.8$ fm

[Classical electron radius]

$m_e = 511$ keV

[Electron mass]

$\beta = v/c$

[Velocity]

$\gamma = (1-\beta^2)^{-2}$

[Lorentz factor]

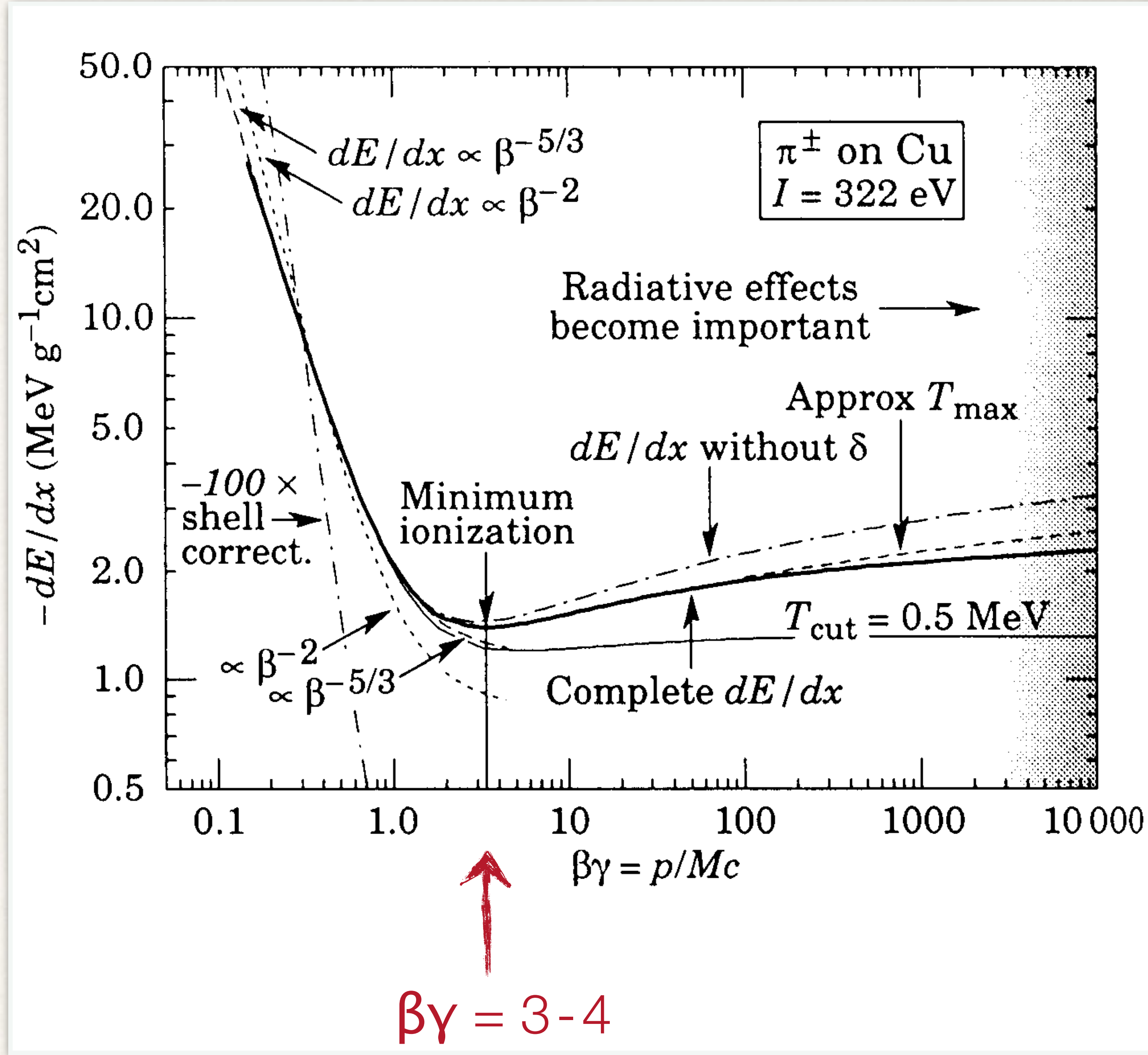
Validity:

$.05 < \beta\gamma < 500$

http://cern.ch/amoraes

Perda de energia de píons em Cu

- Partículas de ionização mínima (MIP): **$\beta\gamma$ = 3-4**
- dE/dx decresce ~β^{-2} - fator cinemático (dependência ~$\beta^{-5/3}$)
- dE/dx cresce ~$\ln(\beta\gamma)^2$ - fator relativístico (extensão da componente transversal do campo E)
- Saturação para altos valores de ($\beta\gamma$) - efeito da densidade (correção δ) (polarização do meio)



Unidades: MeV $g^{-1}cm^2$

Perda MIP ~13 MeV/cm

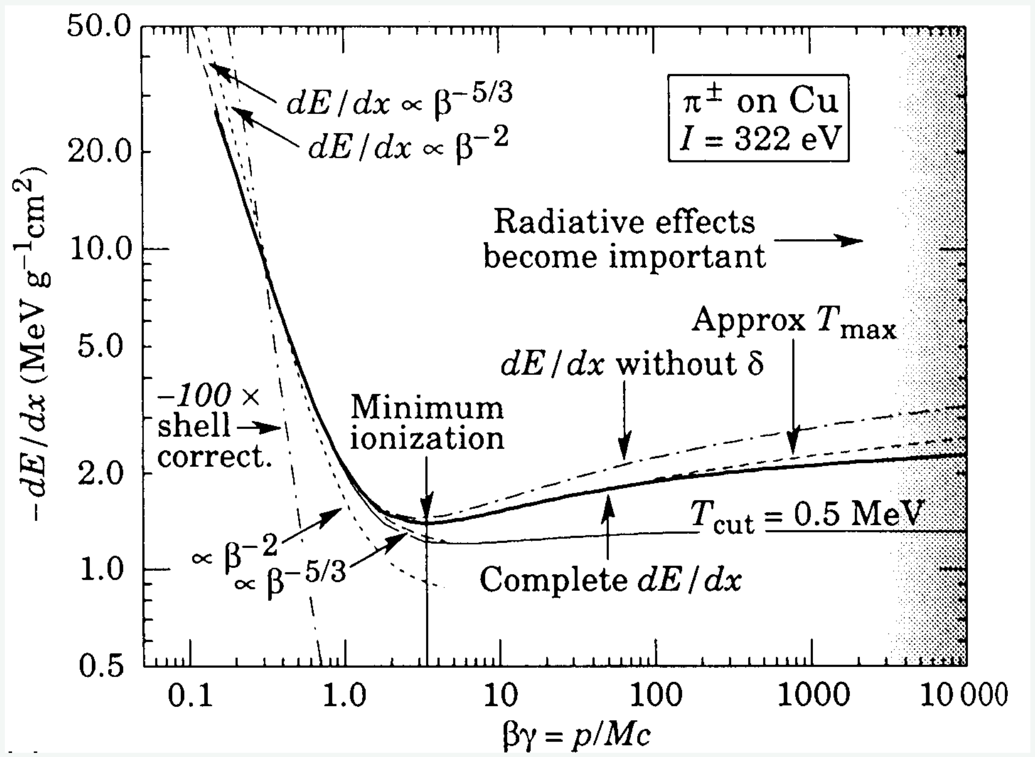
http://cern.ch/amoraes

Um pouco mais sobre a Equação de Bethe-Bloch

Dependência 1/β²

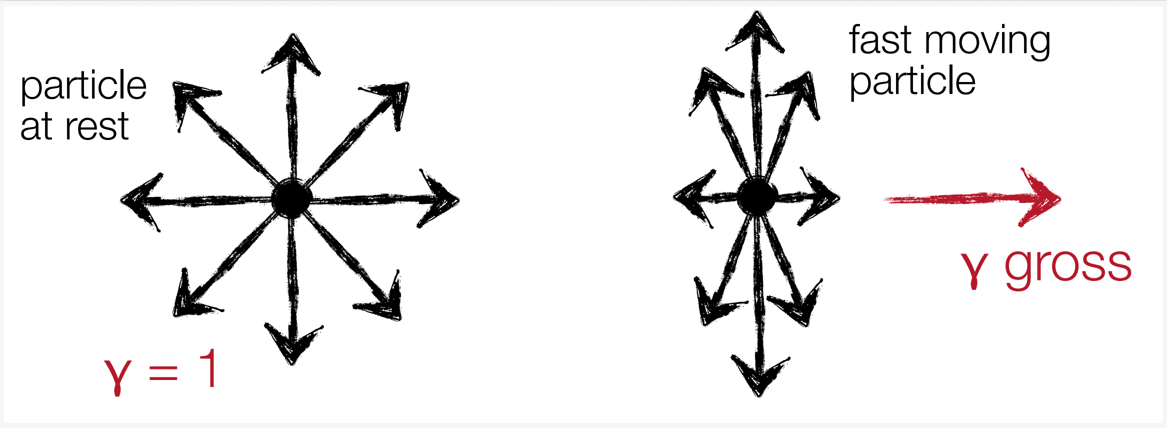
Partículas que movem mais lentamente pelo meio "sentem" a força elétrica dos elétron atômicos por mais tempo

$$\Delta p_\perp = \int F_\perp dt = \int F_\perp \frac{dx}{v}$$



Aumento relativístico para βγ > 4

Partícula de alta-energia: componente transversa do campo elétrico aumenta devido transformação de Lorentz: $E_y \rightarrow \gamma E_y$. Assim, seção de choque das interações aumenta.

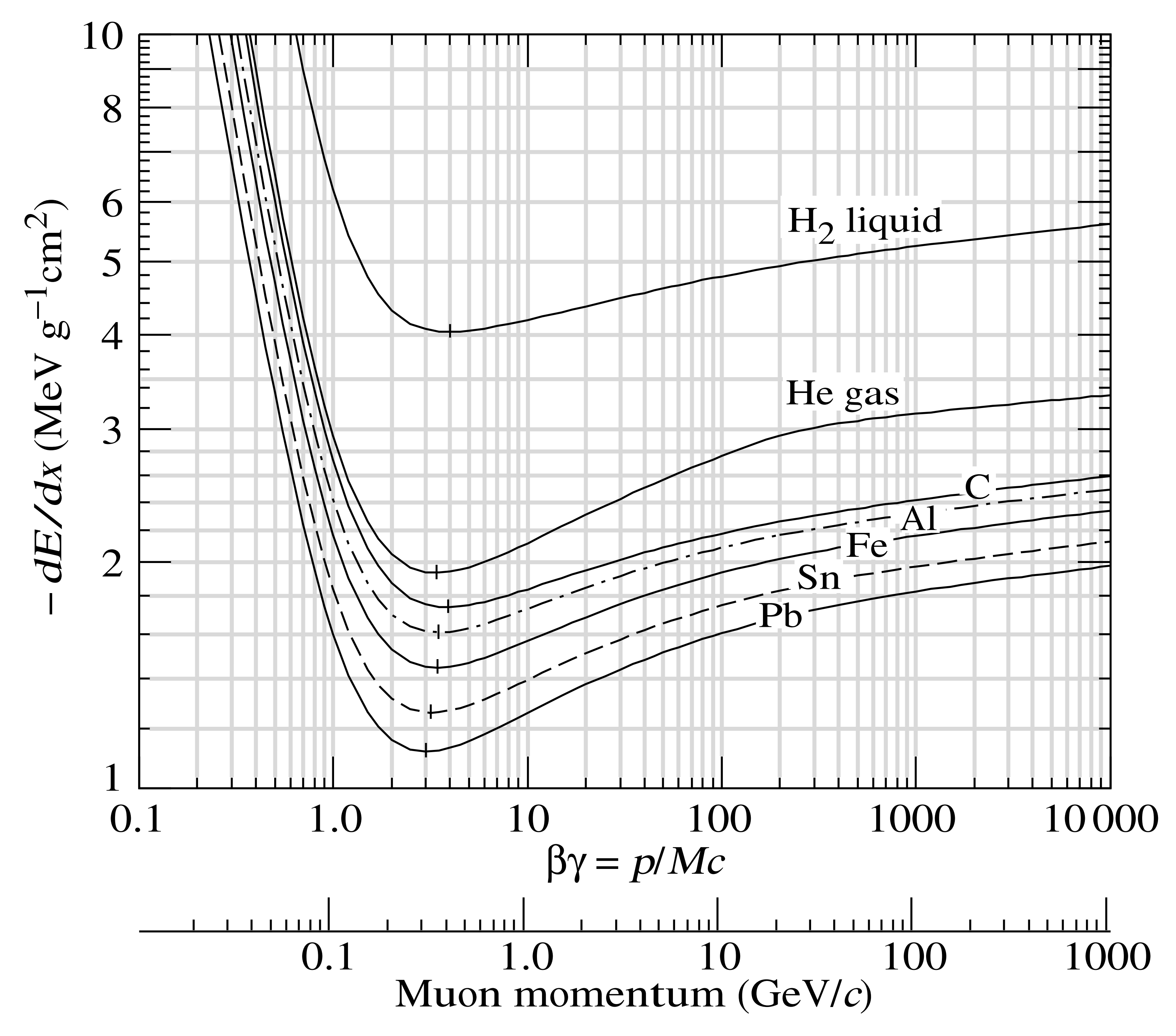


Correções:

- baixa energia: correções para efeitos de camada eletrônica (velocidade da partícula próxima da velocidade orbital - possível captura de elétron)
- alta energia: correcções para efeitos de densidade (polarização). Leva a saturação em altas energias.

http://cern.ch/amoraes

Perda de energia - partículas carregadas



http://cern.ch/amoraes

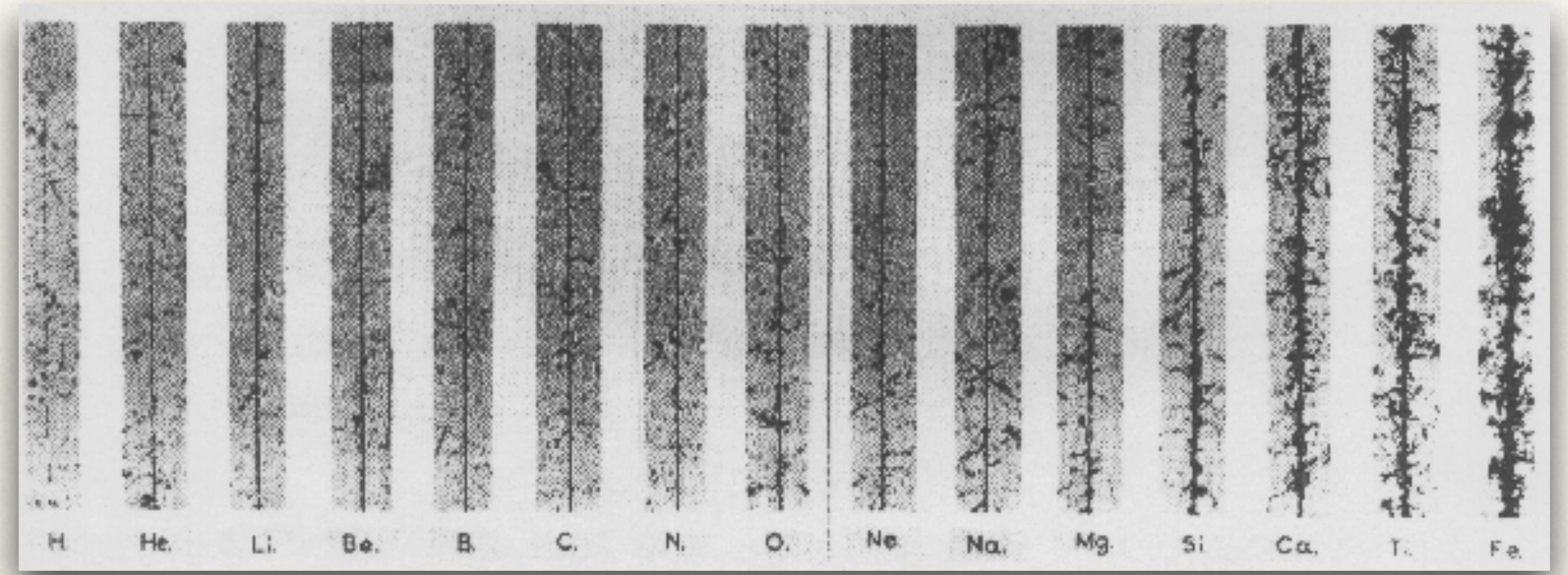
Depende de:

Massa Atômica (A)

Número Atômico (Z)

dos núcleos do meio onde as partículas incidem

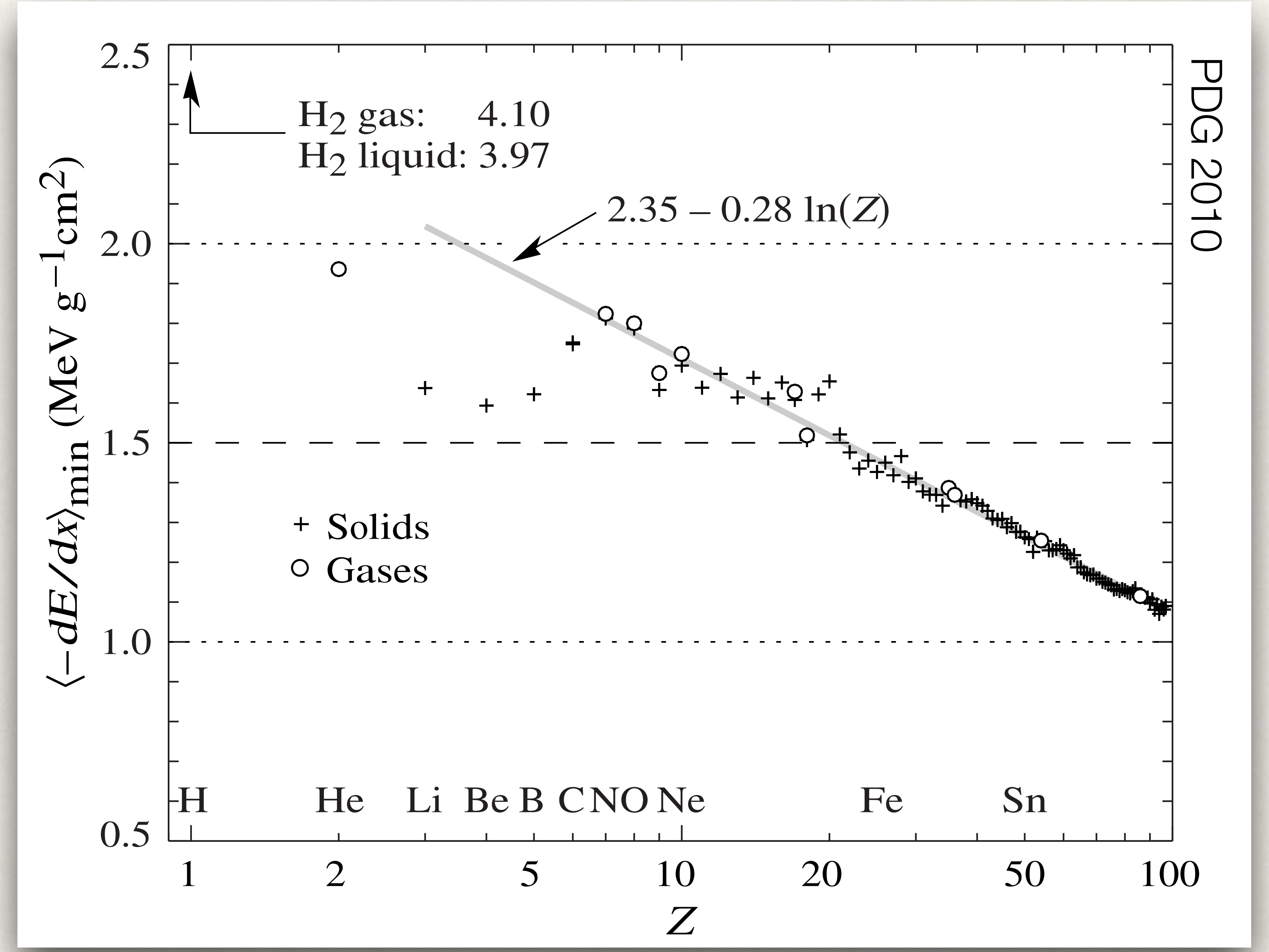
Perda de energia - partículas de baixa energia



Raios cósmicos: $dE/dx \propto Z^2$

http://cern.ch/amoraes

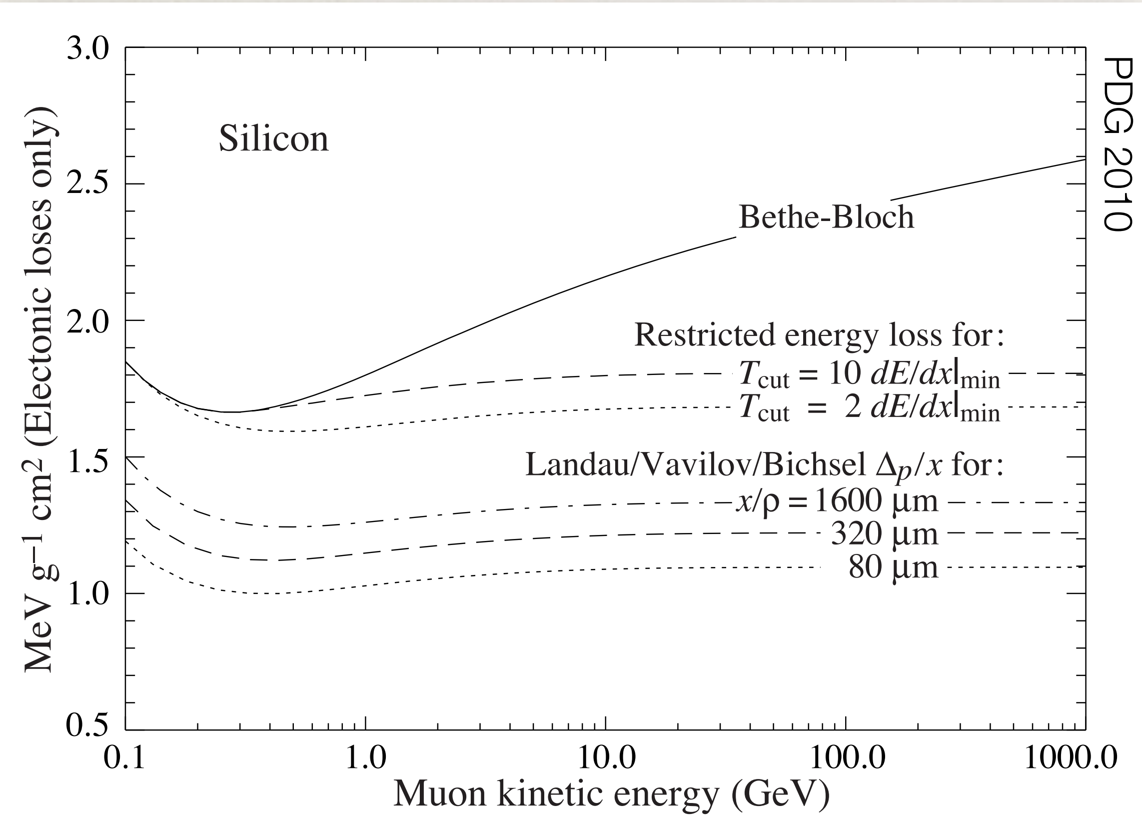
Poder de parada no ponto de ionização mínima



http://cern.ch/amoraes

Poder de parada no ponto de ionização mínima para vários elementos químicos. O fit da reta assume Z>6. Uma função linear em Z não é esperada tendo em vista que há dependência de outras variáveis.

Espessura do absorvente

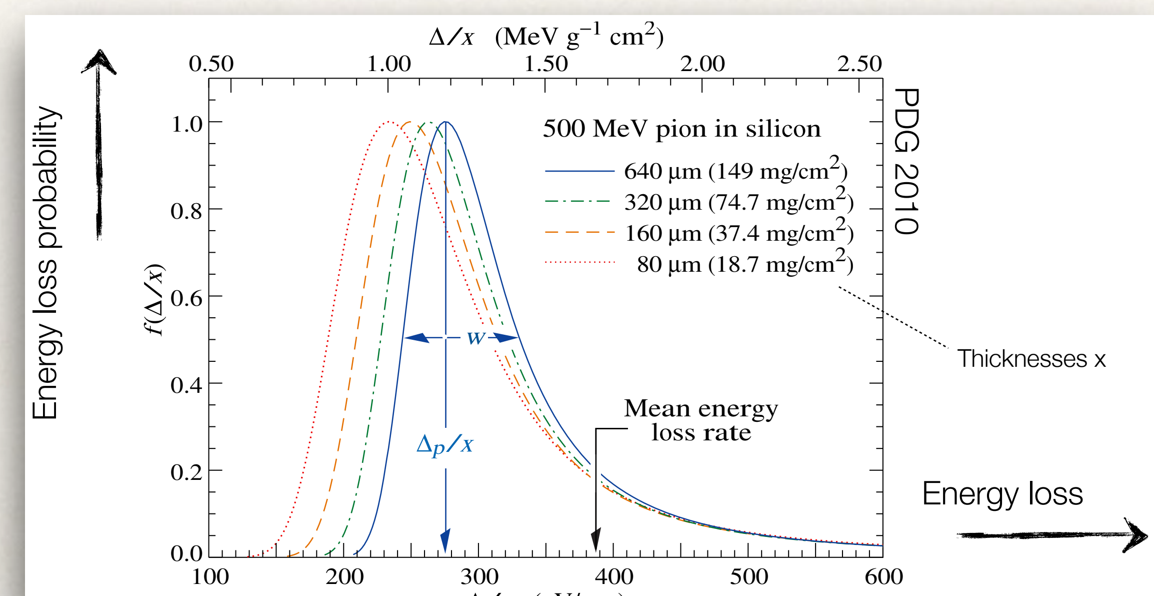


Equação de Bethe-Bloch descreve o **valor médio** da perda de energia

Quando uma partícula carregada atravessa um material de espessura x, a distribuição de energia de δ-elétrons e as **flutuações** de seu número produzem **flutuações** na perda de energia ΔE

A perda de energia em uma camada de material segue uma distribuição de Landau

http://cern.ch/amoraes



alguns números…

Ionização mínima: 1 - 2 MeV/g cm^{-2}

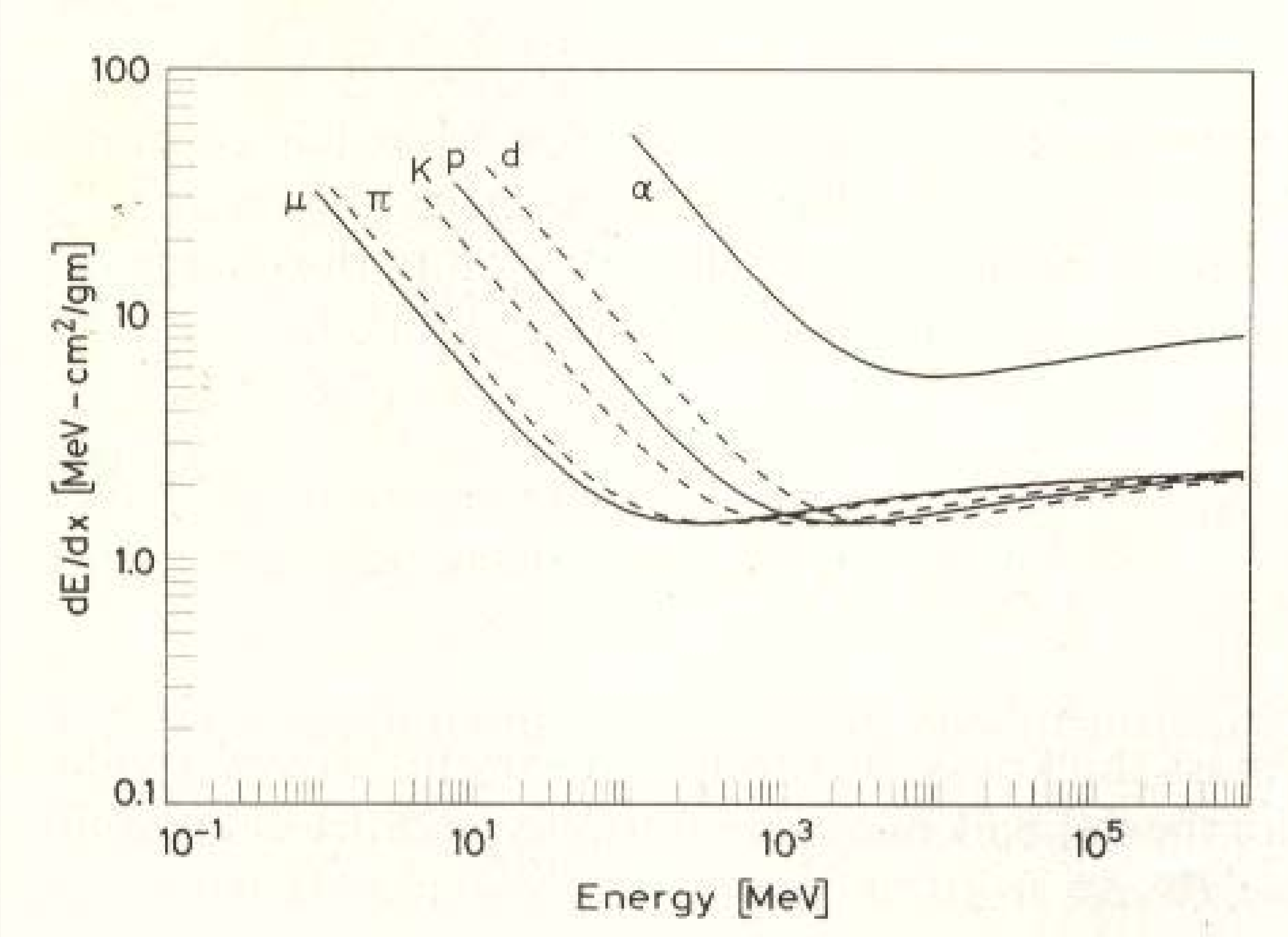
exemplo 1: material com ρ = 1 g/cm3
dE/dx = 1 - 2 MeV/cm

exemplo 2: ferro com espessura de 100 cm
$\rho = 7{,}87\ g/cm^3$
MIP: 1,4 MeV/g cm^{-2}
$dE \approx 1{,}4\ MeV\ g^{-1}\ cm^2 * 100cm * 7{,}87\ g\ cm^{-3} = 1102\ MeV$

Múon de 1 GeV pode atravessar um bloco de 1m de Fe

http://cern.ch/amoraes

dE/dx e identificação de partículas



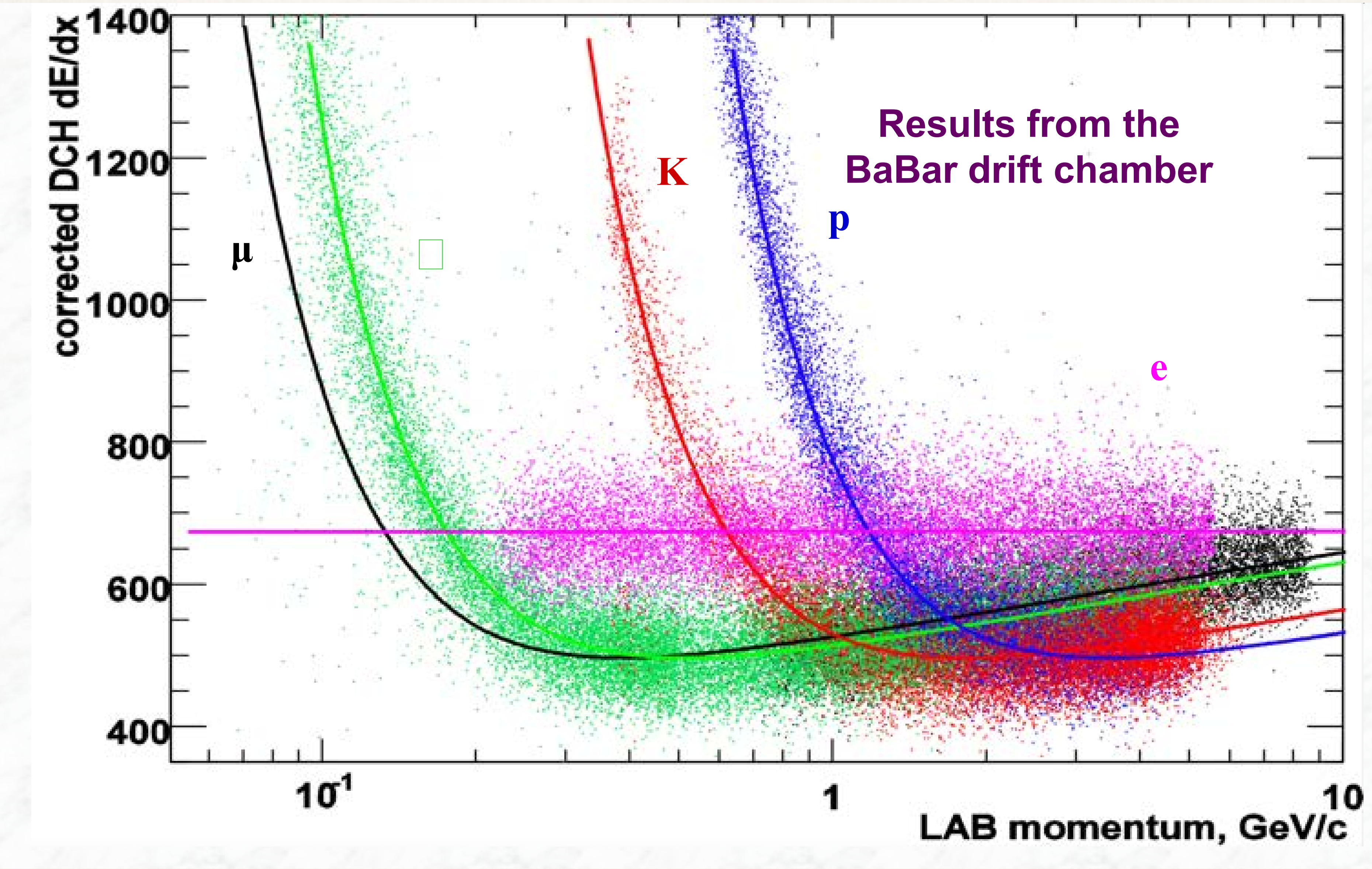
$$\beta\gamma = \frac{p}{E}\frac{E}{m} = \frac{p}{m}$$

http://cern.ch/amoraes

Perda de energia depende do momento das partículas p=mcβγ que **depende da massa** da partícula

Medindo-se o momento das partículas e a perda de energia, deduz-se a massa da partícula e pode-se fazer a identificação das partículas.

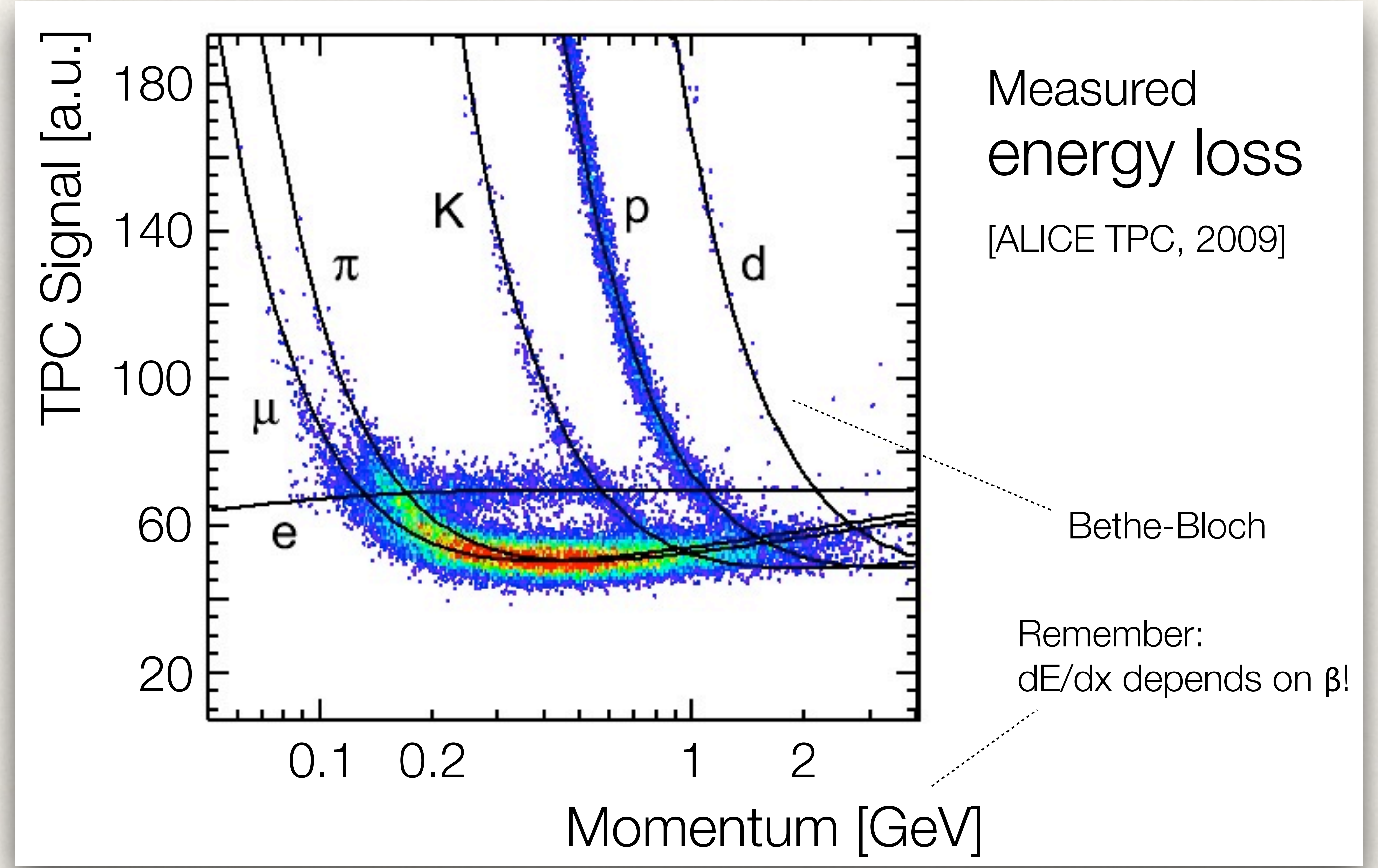
dE/dx e identificação de partículas



Perda de energia depende do momento das partículas p=mcβγ que **depende da massa** da partícula

Medindo-se o momento das partículas e a perda de energia, deduz-se a massa da partícula e pode-se fazer a identificação das partículas.

dE/dx e identificação de partículas

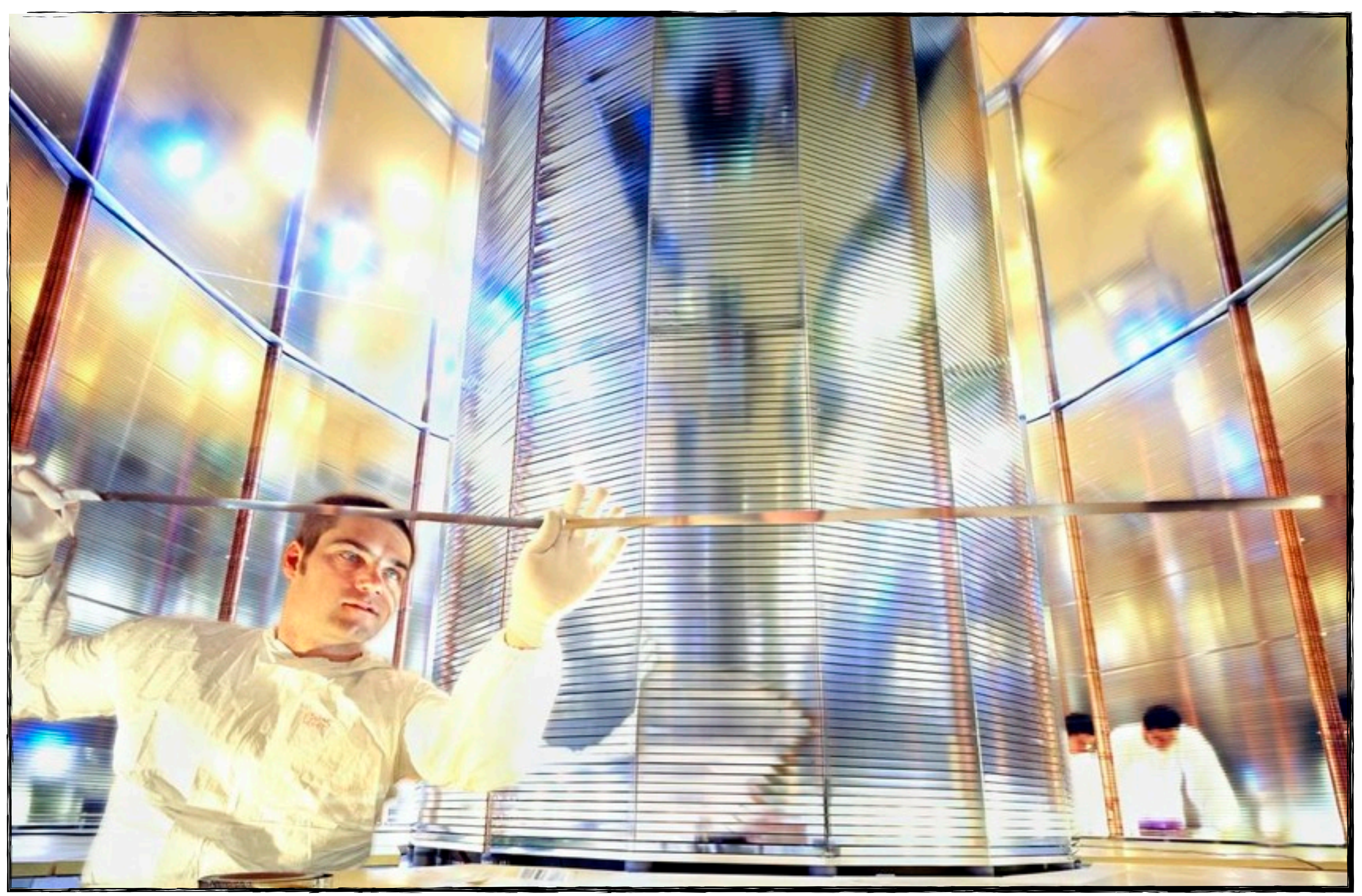


Perda de energia depende do momento das partículas p=mcβγ que **depende da massa** da partícula

Medindo-se o momento das partículas e a perda de energia, deduz-se a massa da partícula e pode-se fazer a identificação das partículas.

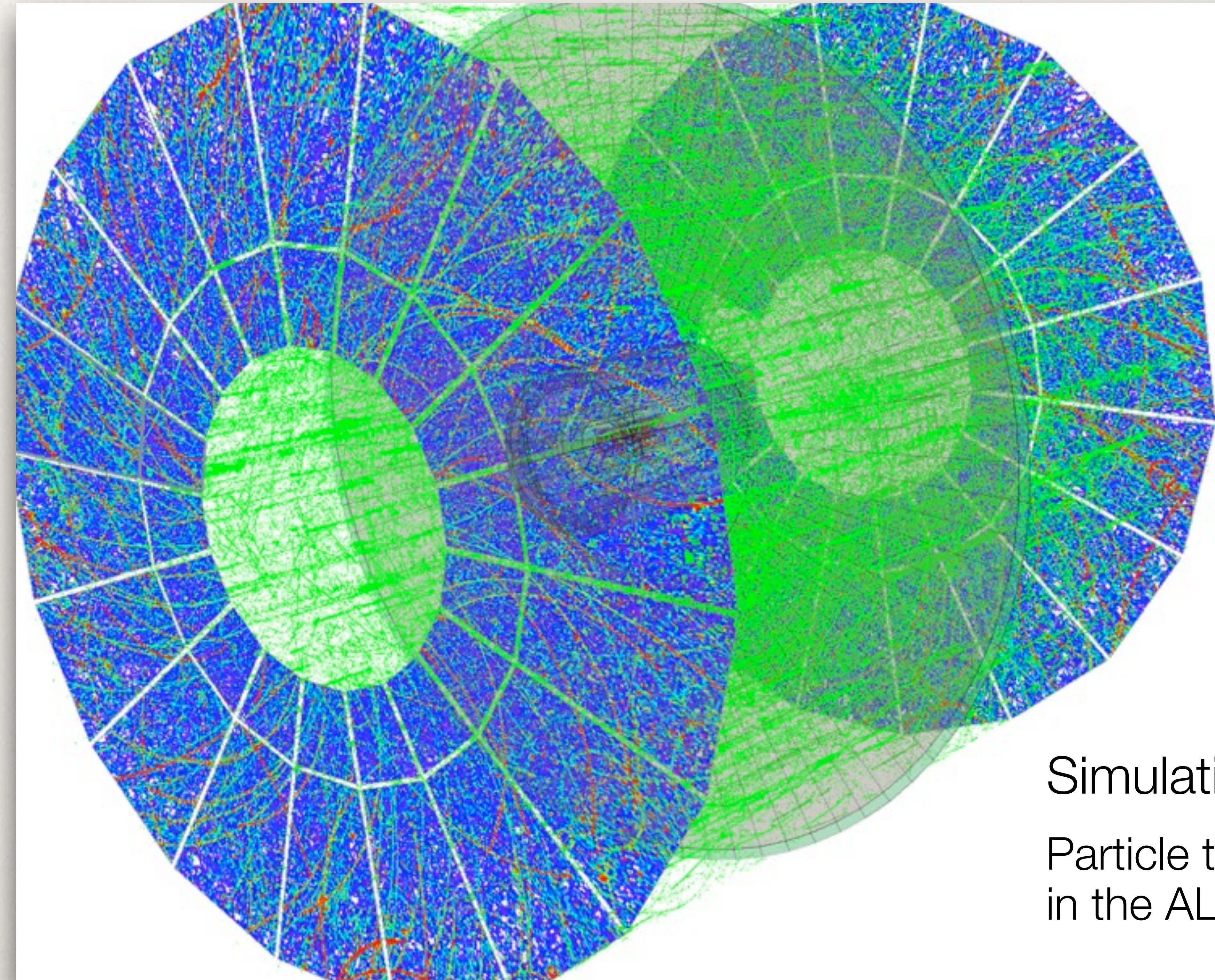
http://cern.ch/amoraes

ALICE: Time Projection Chamber (TPC)



http://cern.ch/amoraes

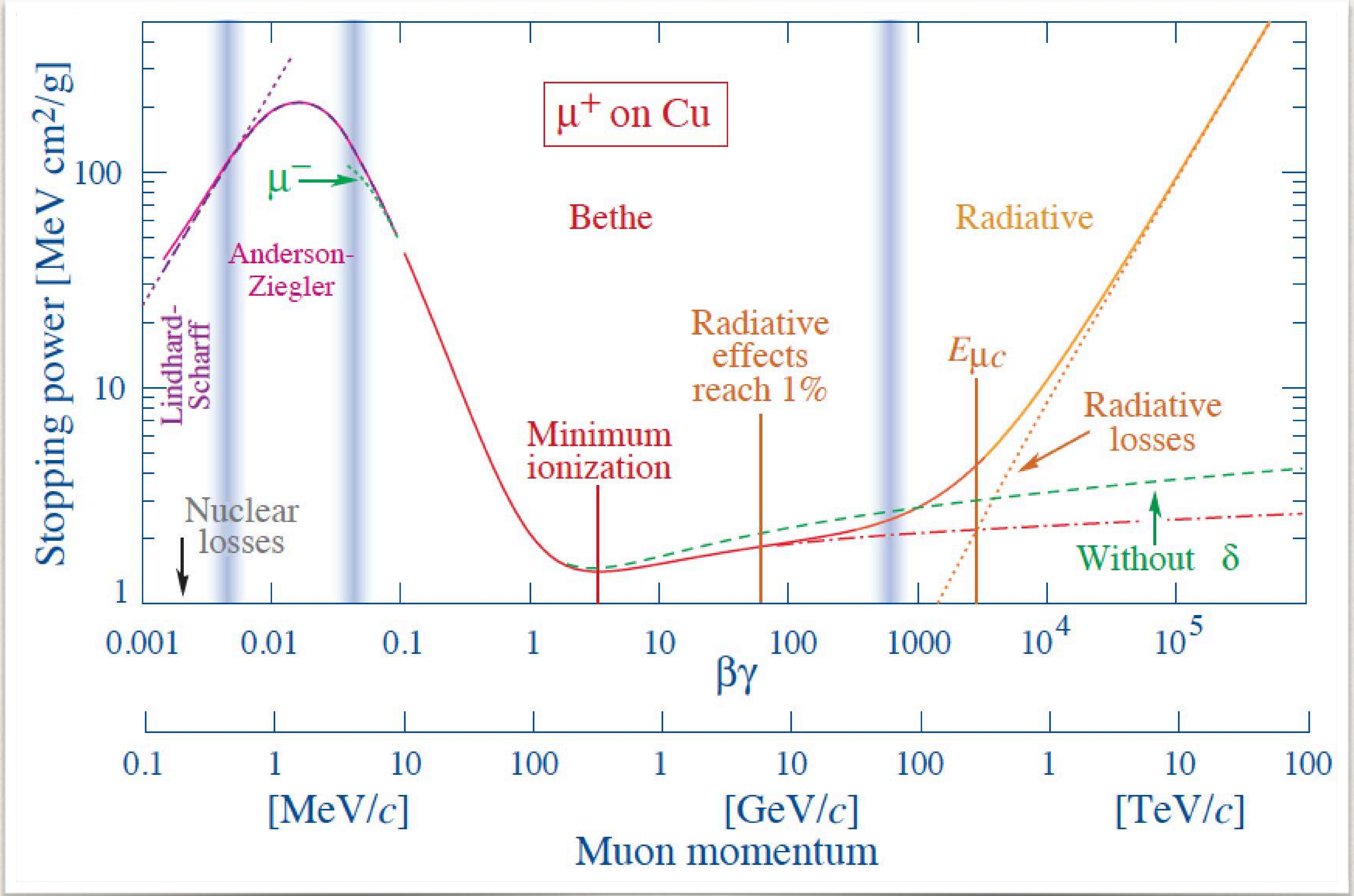
ALICE: Time Projection Chamber (TPC)



Simulation

Particle tracks
in the ALICE TPC

http://cern.ch/amoraes



http://cern.ch/amoraes

Perda de energia - partículas de baixa energia

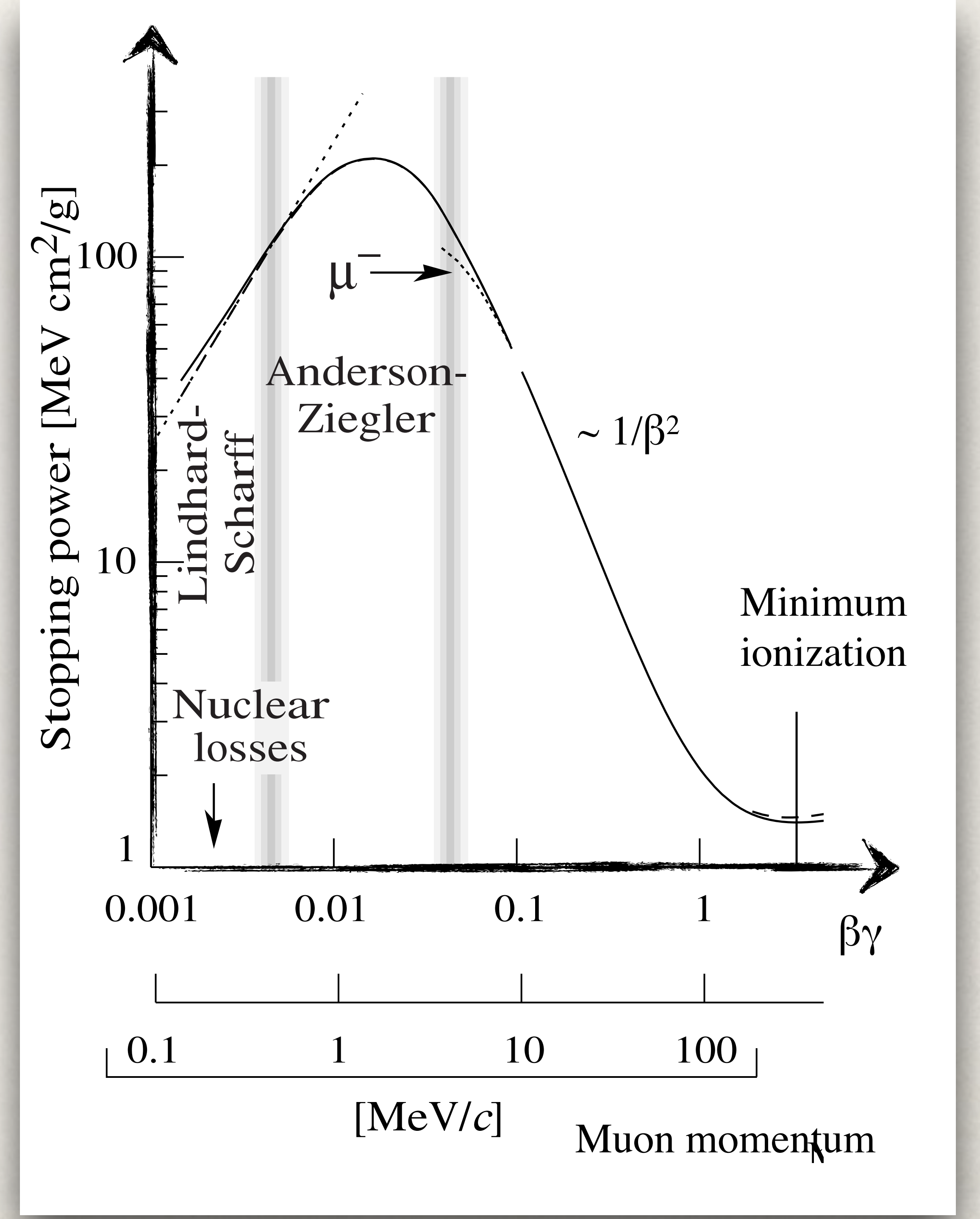
Perda de energia aumenta para baixos valores de $\beta\gamma$ (menores do que MIP)

correção para efeito de camada eletrônica (correção para ligação atômica)

correção para efeito fenomenológicos (energias correspondentes a $\beta\gamma < 0.05$)

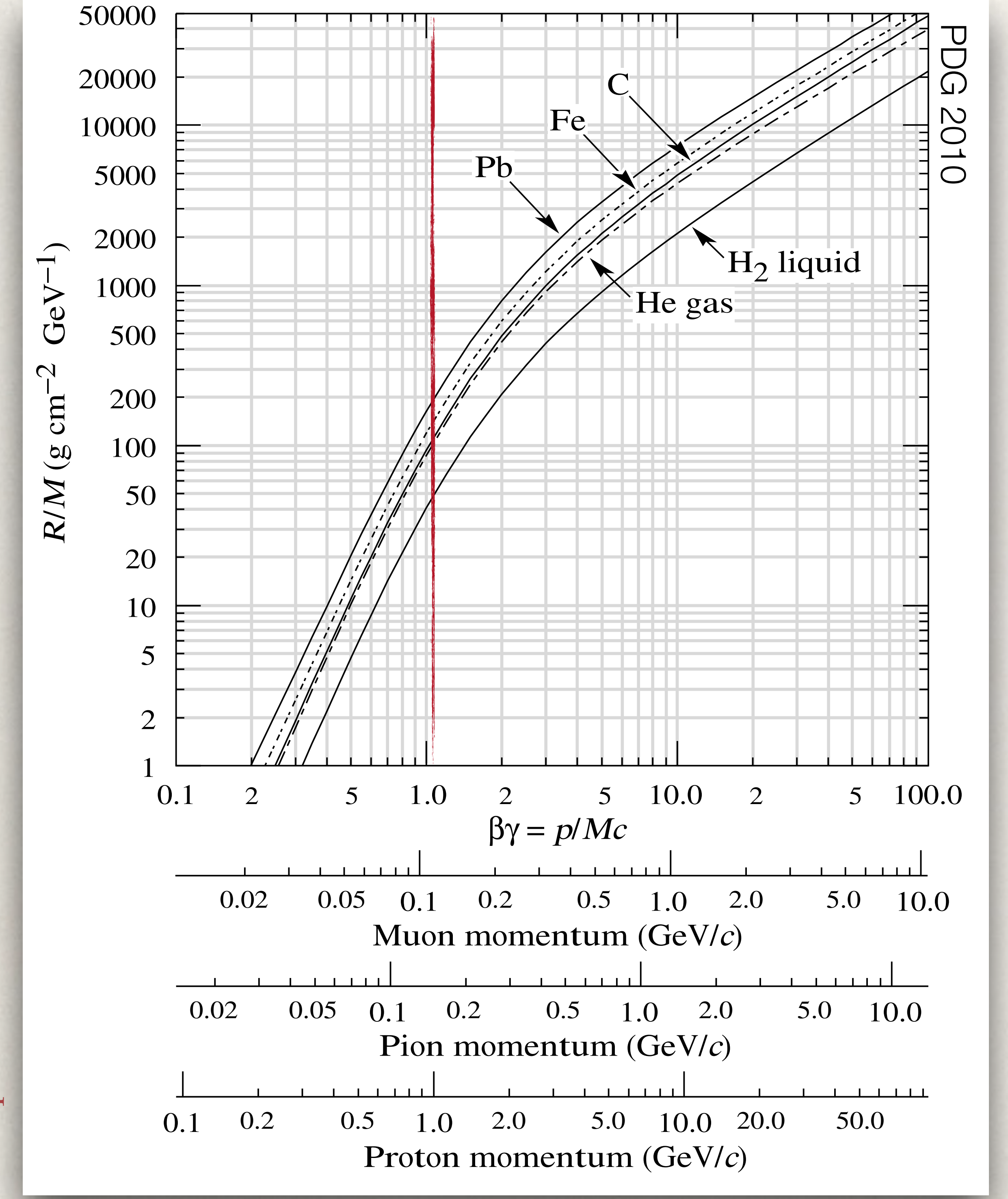
Correções de Bloch (efeitos de altas ordens)

Correções de Barkas (cargas positivas vs. negativas)



http://cern.ch/amoraes

Distância média percorrida pelas partículas



http://cern.ch/amoraes

Cálculo da distância média percorrida:

$$R = \int_E^0 \frac{dE}{dE/dx}$$

(integral da energia perdida de E a 0)

exemplo: Próton de p=1 GeV
alvo de Pb com $\rho = 11{,}34\ \mathrm{g/cm^3}$
$R/M = 200\ \mathrm{g\ cm^{-2}\ GeV^{-1}}$ (do gráfico)
$R = 200/11{,}34/1$ cm ~ 20 cm

Energia depositada

βγ > 3.5:

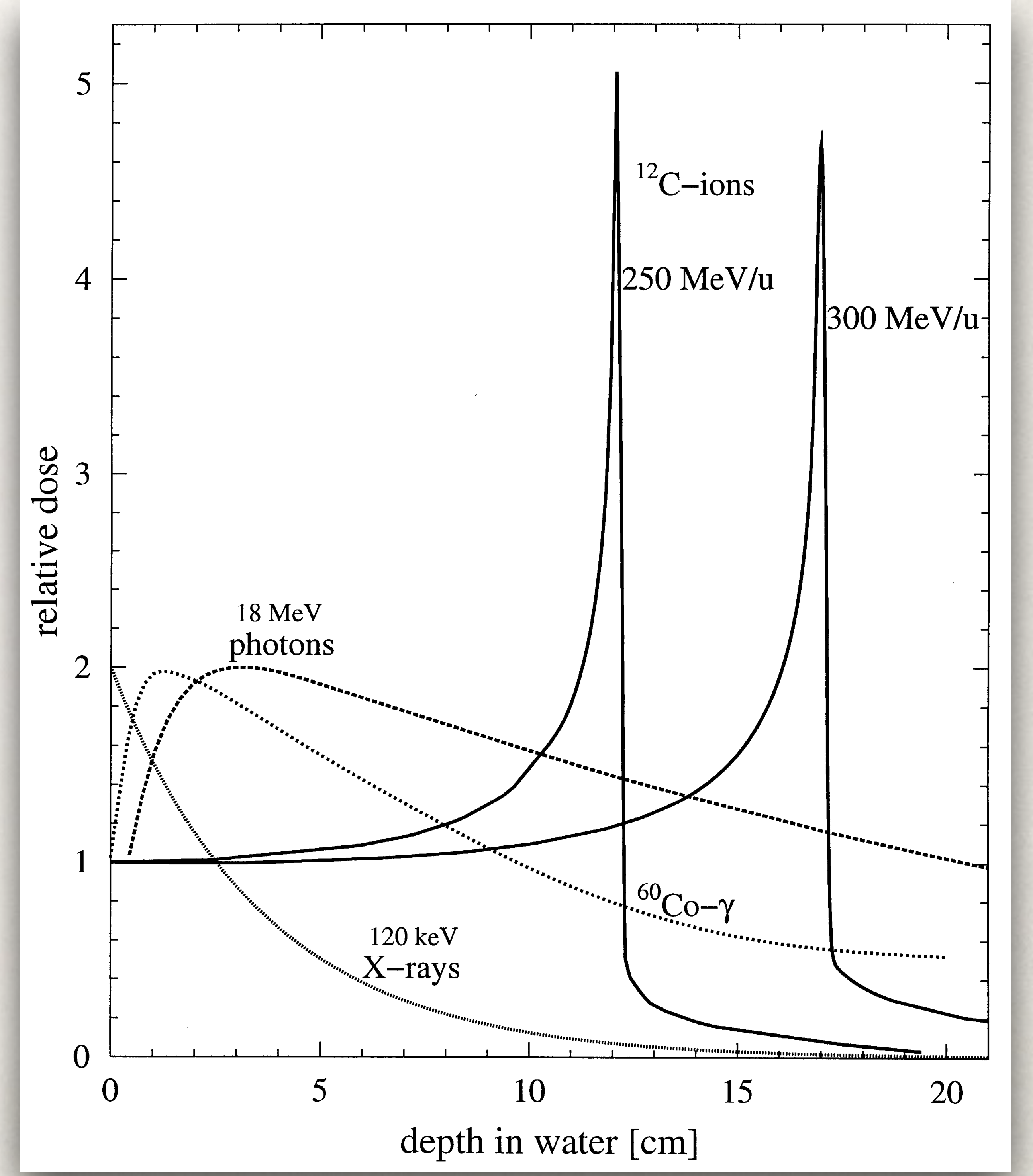
$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \approx \left. \frac{dE}{dx} \right|_{\mathrm{min}}$$

βγ < 3.5:

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \gg \left. \frac{dE}{dx} \right|_{\mathrm{min}}$$

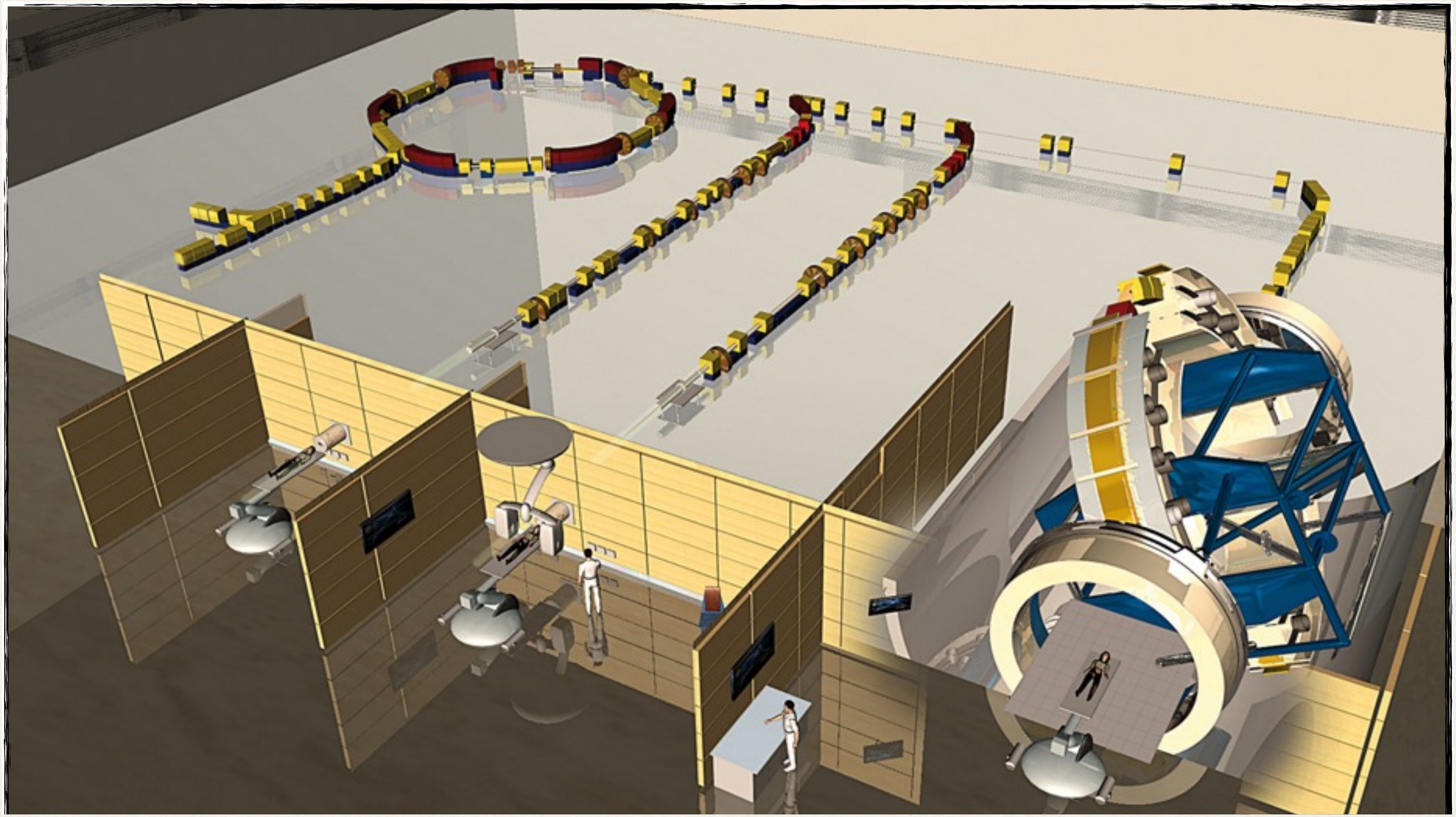
Possibilidade de depositar dose em profundidade bem definida em função da E_{beam}

Aplicação em Terapia para tratamento de tumor



http://cern.ch/amoraes

Heidlberg Ion-Beam Therapy Centre (HIT)



http://cern.ch/amoraes

http://cern.ch/amoraes

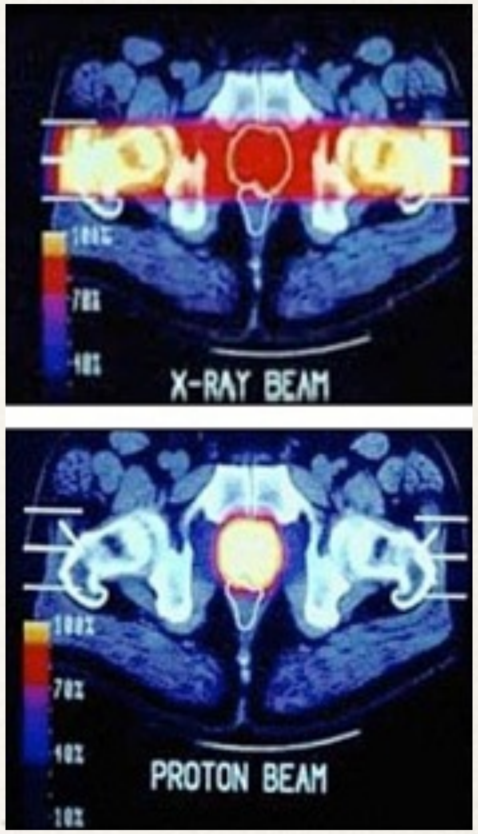
Aplicações em Medicina

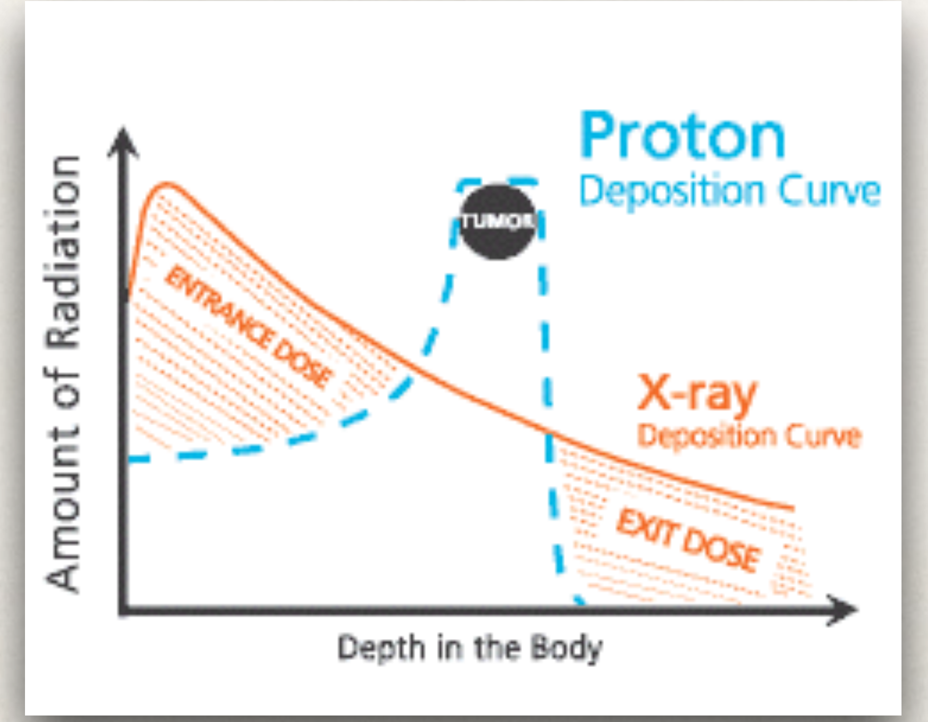
Terapia de tratamento de câncer

Feixes de prótons utilizados em tratamento de câncer.

Milhares de pacientes já foram beneficiados com esses tratamentos (desde 1990).

~ 39 hospitais utilizando essas técnicas.





Feixes prótons permitem maior deposição de energia em tumores em regiões internas com menor efeito nos tecidos ao redor do tumor.

http://cern.ch/amoraes

Perda de energia: Elétrons

Equação Bethe-Bloch precisa ser modificada para elétrons.

Elétron incidente e alvo tem a mesma massa m_e

Espalhamento de partículas idênticas, indistinguíveis

$$\boxed{-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle_{\text{el.}} = K \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \frac{m_e \beta^2 c^2 \gamma^2 T}{2I^2} + F(\gamma) \right]}$$

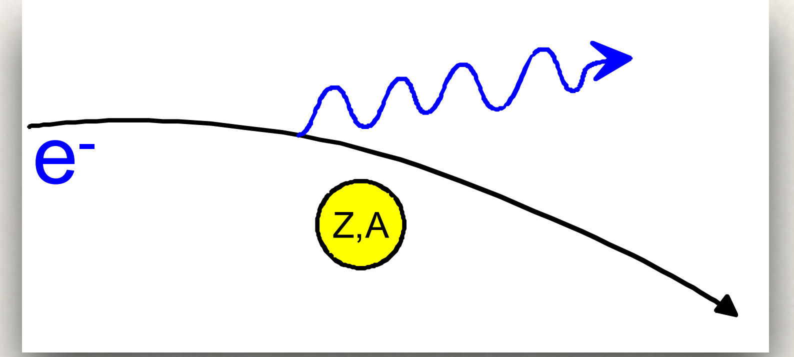
[T: kinetic energy of electron]

Observação: elétrons e pósitrons de baixa energia possuem perdas de energia diferentes (tratamento diferente)

http://cern.ch/amoraes

Perda de energia: Elétrons

Bremsstrahlung



Bremsstrahlung surge quando partículas são aceleradas no campo de Coulomb do núcleo atômico

Processo dominante para E_e > 10-30MeV

$$\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{z^2 Z^2}{A}\left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 E \ \ln\frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} \propto \frac{E}{m^2}$$

Perda de energia é proporcional a **$1/m^2$** (grande relevância para elétrons!)

http://cern.ch/amoraes

Perda de energia: Elétrons

Bremsstrahlung

Considere elétrons:

$$\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{Z^2}{A} r_e^2 \cdot E \ \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}}$$

$$\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0} \qquad \text{with} \quad X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A \ Z^2 r_e^2 \ \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}}}$$

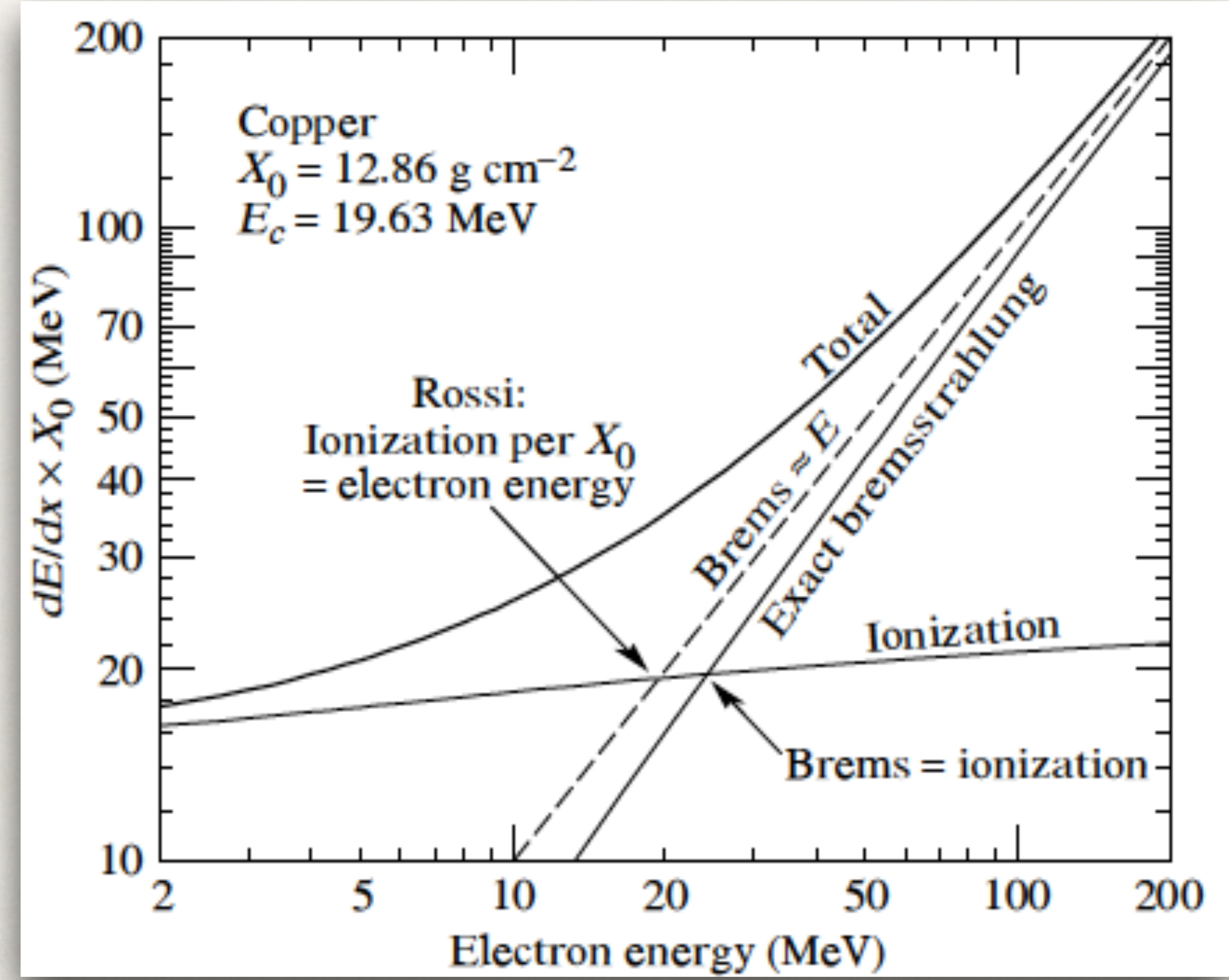
[Radiation length in g/cm^2]

$$\Rightarrow E = E_0 e^{-x/X_0}$$

Após a passagem de uma unidade X_0, o elétron estará com uma fração (1/e) de sua energia inicial (~63%)

Perda de energia: Elétrons

Bremsstrahlung



E_c = critical energy

$$\boxed{\left.\frac{dE}{dx}(E_c)\right|_{Brems} = \left.\frac{dE}{dx}(E_c)\right|_{Ion}}$$

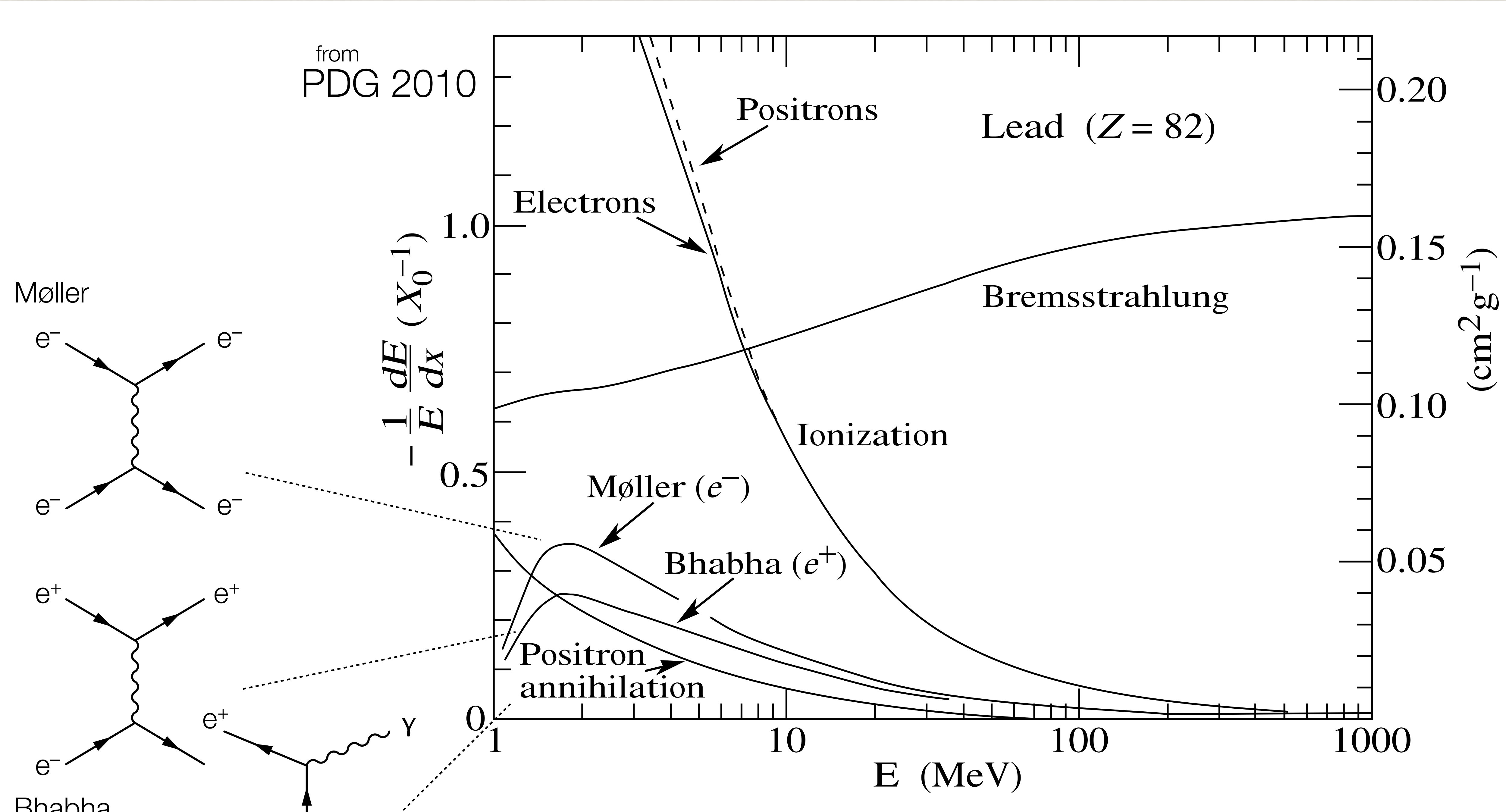
http://cern.ch/amoraes

X_0 e E_c para vários materiais

Material	Z	X_0 (cm)	E_c (MeV)
H_2 Gas	1	700000	350
He	2	530000	250
Li	3	156	180
C	6	18.8	90
Fe	26	1.76	20.7
Cu	29	1.43	18.8
W	74	0.35	8.0
Pb	82	0.56	7.4
Air	7.3	30000	84
SiO_2	11.2	12	57
Water	7.5	36	83

http://cern.ch/amoraes

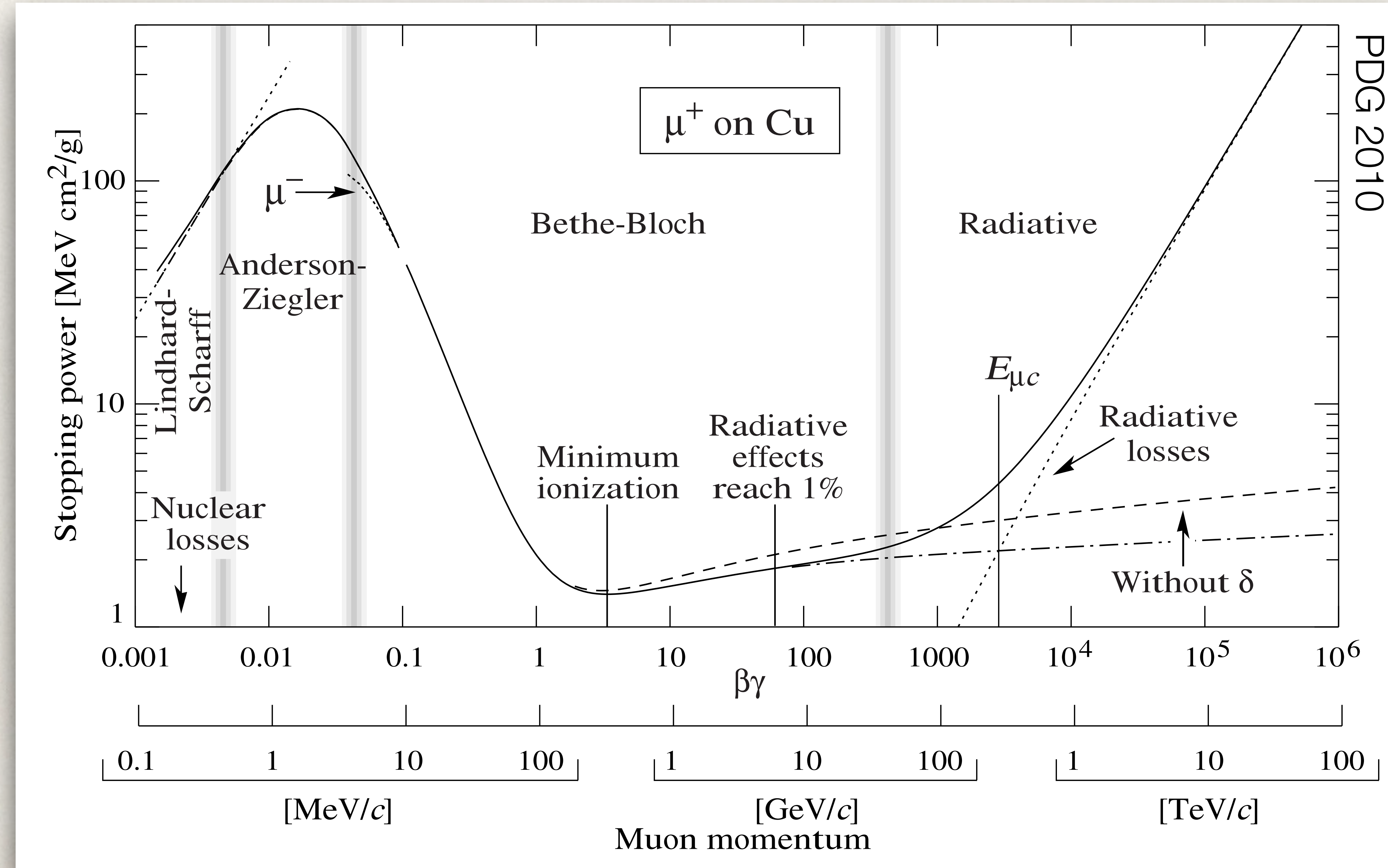
Perda de energia: Elétrons



Fractional energy loss per radiation length in lead as a function of electron or positron energy

http://cern.ch/amoraes

Perda de energia - Gráfico para Múons



http://cern.ch/amoraes

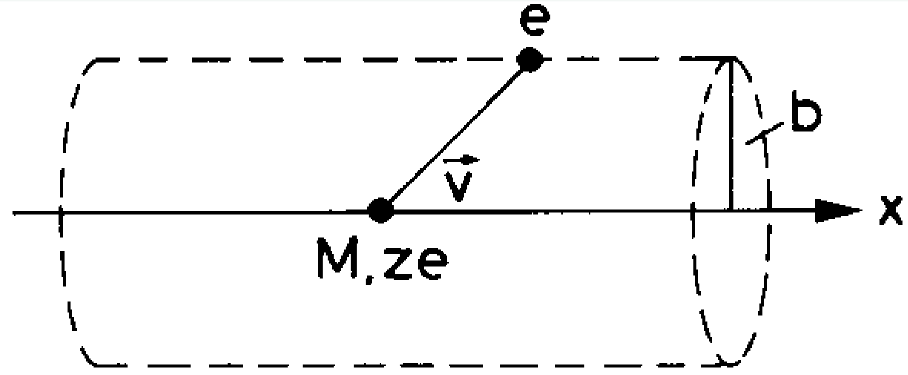
Apêndice

http://cern.ch/amoraes

Derivação clássica da equação de Bethe-Bloch

Particle with charge ze and velocity v moves through a medium with electron density n.

Electrons considered free and initially at rest.



Interaction of a heavy charged particle with an electron of an atom inside medium.

Momentum transfer:

Symmetry!

$$\Delta p_\perp = \int F_\perp dt = \int F_\perp \frac{dt}{dx} dx = \int F_\perp \frac{dx}{v} \qquad \Delta p_\parallel \;:\; \text{averages to zero}$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{ze^2}{(x^2+b^2)} \cdot \frac{b}{\sqrt{x^2+b^2}} \cdot \frac{1}{v}\, dx = \frac{ze^2 b}{v} \left[\frac{x}{b^2\sqrt{x^2+b^2}} \right]_{-\infty}^{\infty} = \frac{2ze^2}{bv}$$

More elegant with Gauss law:
[infinite cylinder; electron in center]

$$\int E_\perp (2\pi b)\, dx = 4\pi(ze) \rightarrow \int E_\perp dx = \frac{2ze}{b}$$

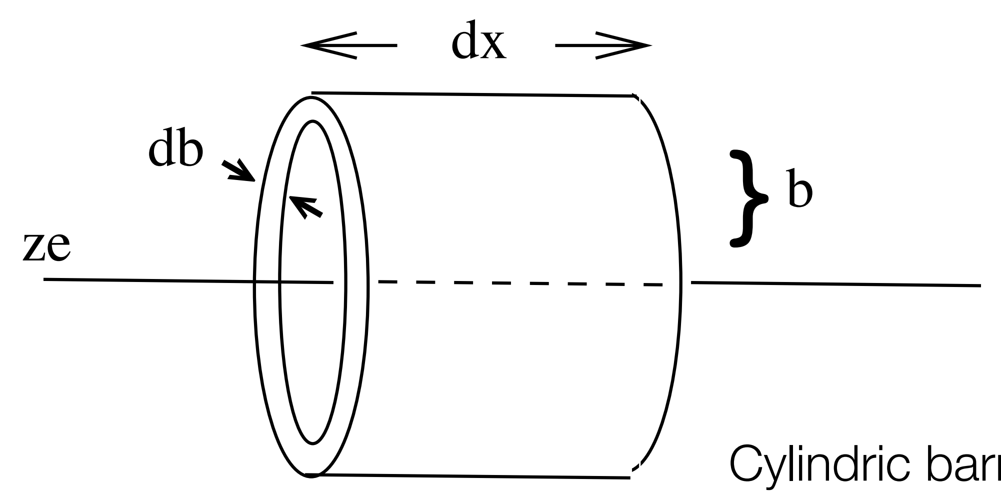
and then ...

$$\begin{cases} F_\perp = eE_\perp \\ \Delta p_\perp = e\int E_\perp \frac{dx}{v} = \frac{2ze^2}{bv} \end{cases}$$

http://cern.ch/amoraes

Derivação clássica da equação de Bethe-Bloch

Energy transfer onto single electron
for impact parameter b:



Cylindric barrel
with N_e electrons

$$\Delta E(b) = \frac{\Delta p^2}{2m_e}$$

Consider cylindric barrel ➛ $N_e = n \cdot (2\pi b) \cdot db\, dx$

Energy loss per path length dx for
distance between b and b+db in medium with electron density n:

Energy loss!

$$-dE(b) = \frac{\Delta p^2}{2m_e} \cdot 2\pi n b\, db\, dx = \frac{4z^2e^4}{2b^2v^2m_e} \cdot 2\pi n b\, db\, dx = \frac{4\pi\, n\, z^2e^4}{m_e v^2}\frac{db}{b}dx$$

Diverges for b ➛ 0; integration only
for relevant range [b_{min}, b_{max}]:

Bohr 1913

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi\, n\, z^2e^4}{m_e v^2} \cdot \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \frac{db}{b} = \frac{4\pi\, n\, z^2e^4}{m_e v^2} \ln\frac{b_{\max}}{b_{\min}}$$

http://cern.ch/amoraes

Derivação clássica da equação de Bethe-Bloch

Determination of relevant range [b_{min}, b_{max}]:
[Arguments: $b_{min} > \lambda_e$, i.e. de Broglie wavelength; $b_{max} < \infty$ due to screening ...]

$$b_{\mathrm{min}} = \lambda_{\mathrm{e}} = \frac{h}{p} = \frac{2\pi\hbar}{\gamma m_{\mathrm{e}} v}$$

Use Heisenberg uncertainty principle or
that electron is located within de Broglie wavelength ...

$$b_{\mathrm{max}} = \frac{\gamma v}{\langle \nu_{\mathrm{e}} \rangle} \; ; \quad \left[\; \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \; \right]$$

Interaction time (b/v) must be much shorter than period
of the electron (γ/ν_e) to guarantee relevant energy transfer ...

[adiabatic invariance]

$$\boxed{-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_{\mathrm{e}}\, c^2 \beta^2}\, n \cdot \ln \frac{m_{\mathrm{e}}\, c^2 \beta^2 \gamma^2}{2\pi\hbar \,\langle \nu_{\mathrm{e}} \rangle}}$$

Deviates by factor 2
from QM derivation

Electron density: $n = N_A \cdot \rho \cdot Z/A$!!
Effective Ionization potential: $I \sim h\langle\nu_e\rangle$