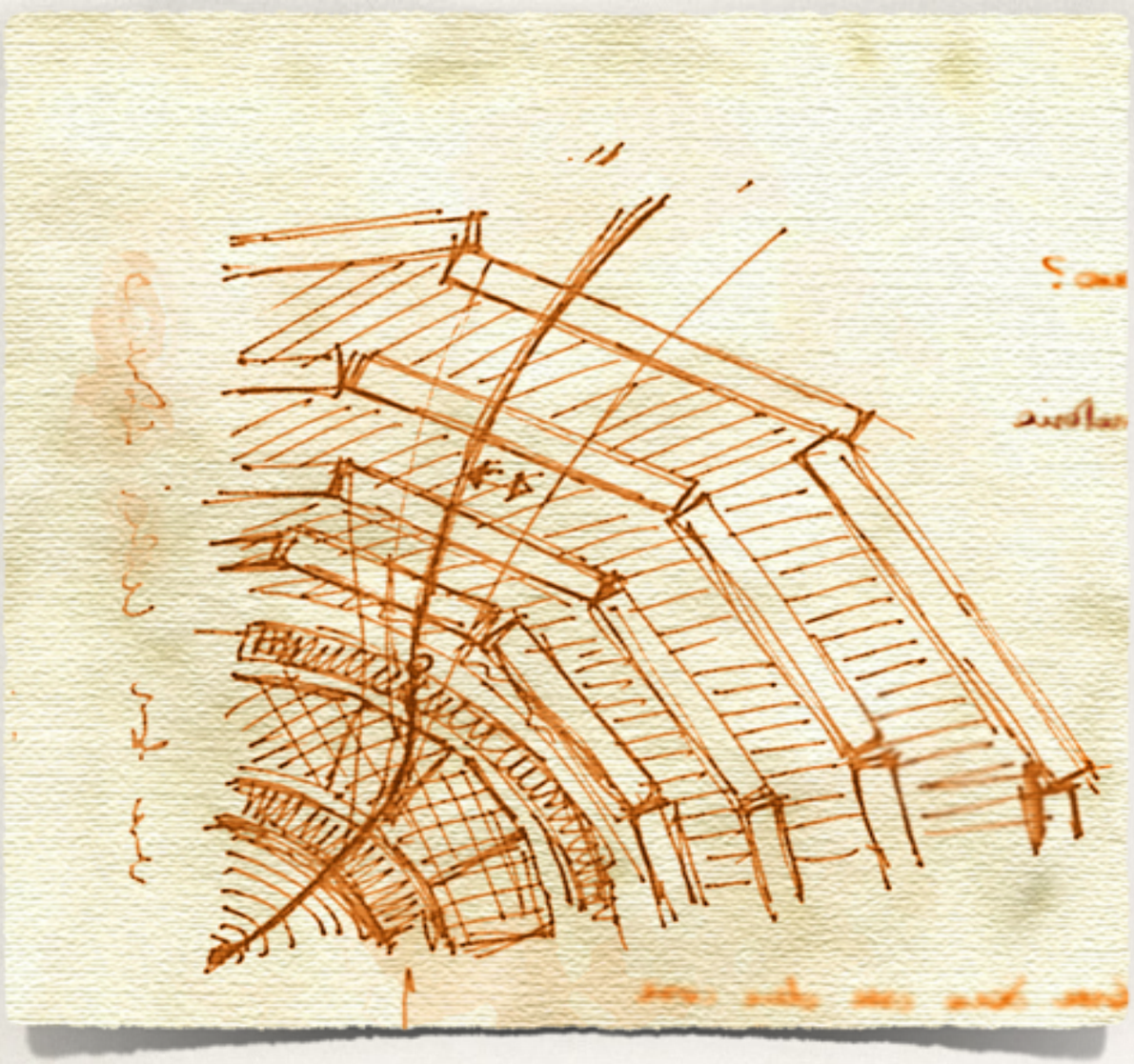


XI Escola do CBPF

Curso de Pós-Graduação

Notas de Aula

A Física dos Detectores de Partículas

Dr Arthur M. Moraes - CBPF (web-page: http://cern.ch/amoraes)

20 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)

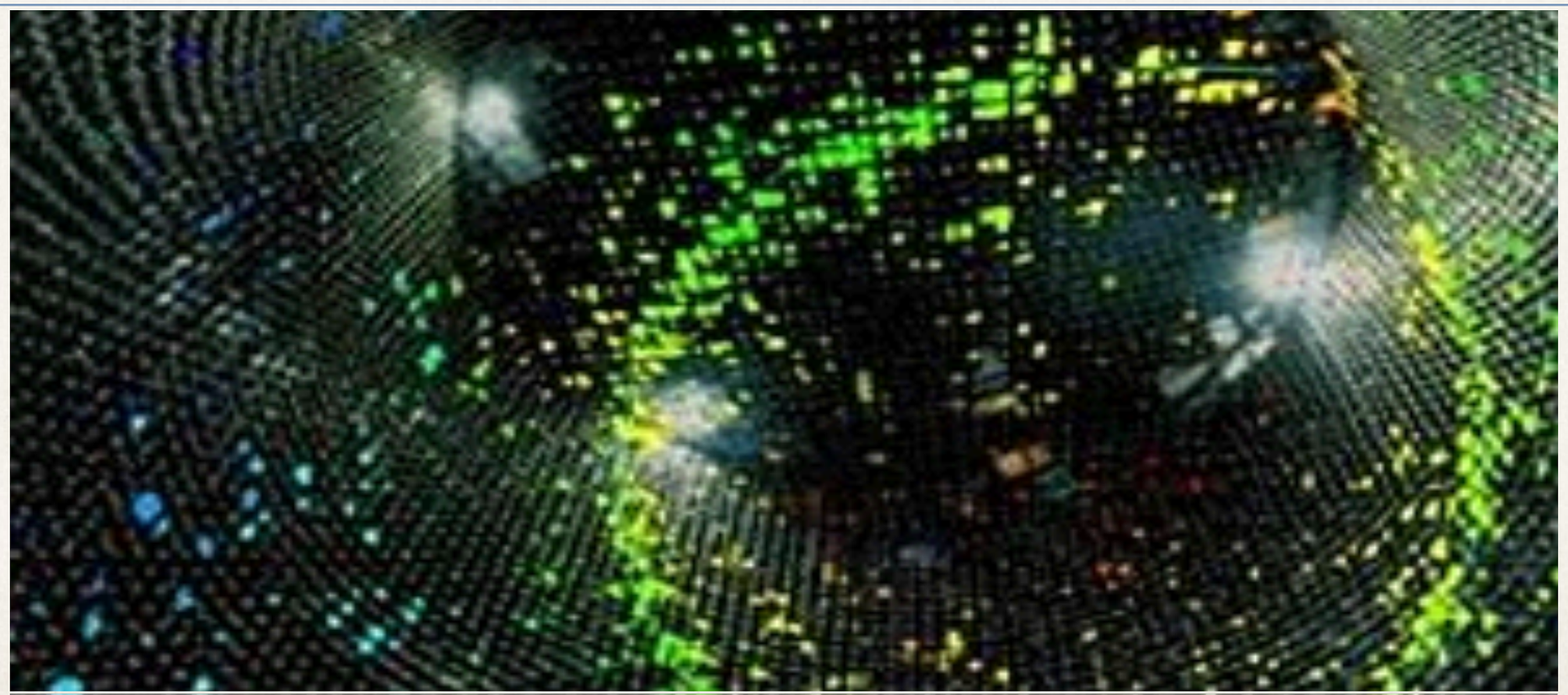
Aula 7: Calorímetros: eletromagnéticos & hadrônicos. (5ªf. 27/07)

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

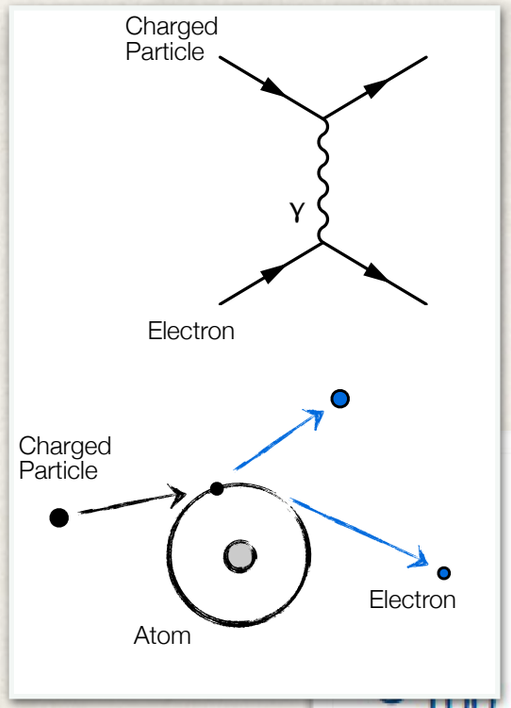
http://cern.ch/amoraes

Aula 3

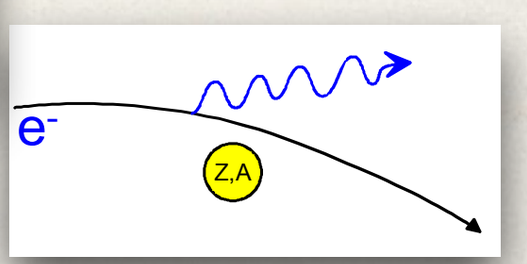
Interações das partículas com a matéria

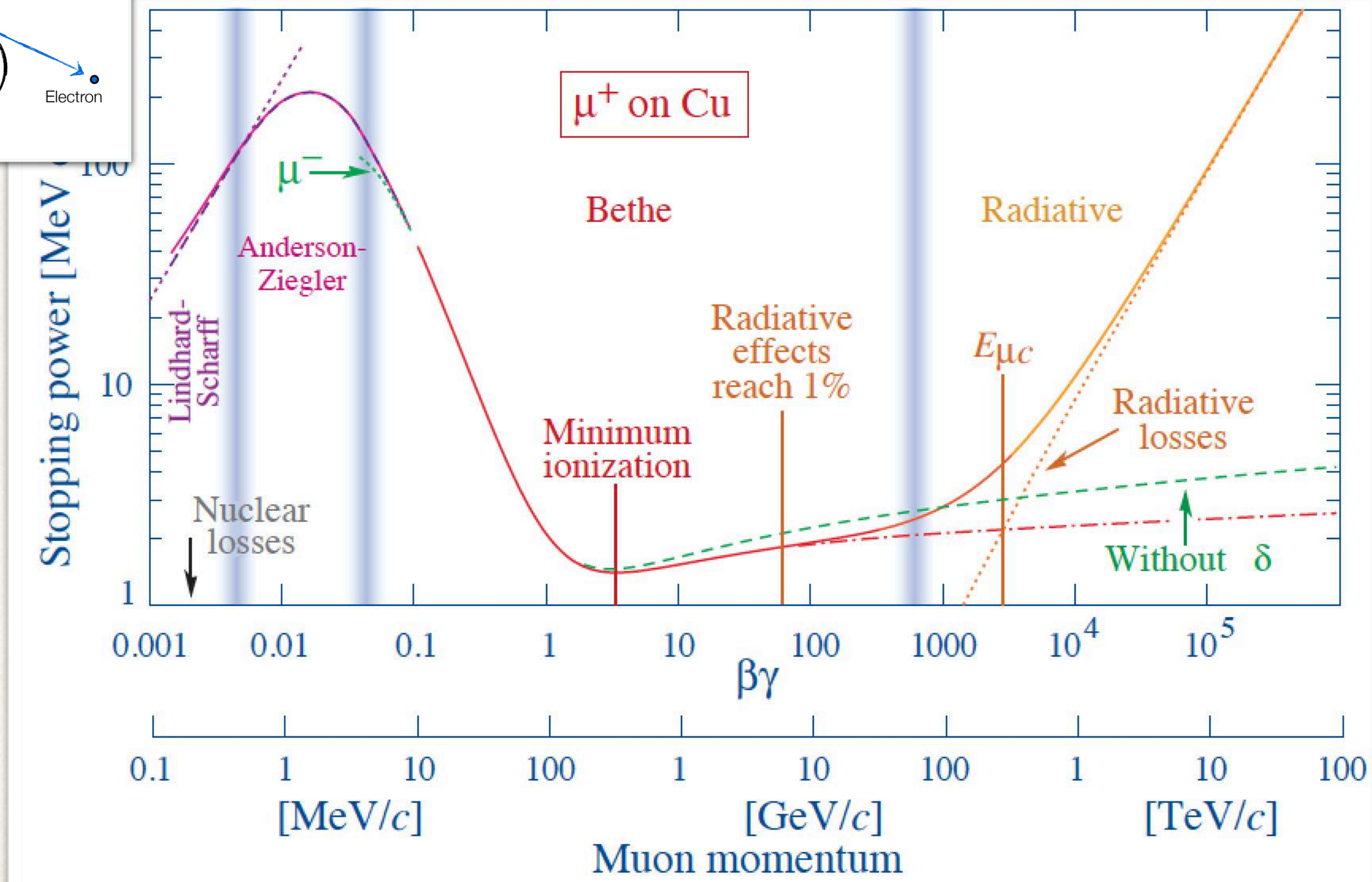


http://cern.ch/amoraes



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





http://cern.ch/amoraes

Interação de partículas carregadas

Detecção de partículas carregadas ocorre através da ***interação das partículas com a matéria.***

exemplo: perda de energia no meio (ionização)

Perda de energia deve sere detectada, feita visível, geralmente na forma de sinais ***elétricos ou luminosos***

Principal interação de partículas carregadas com o meio: ***interação eletromagnética***

energia é perdida principalmente através da interação das partículas com os elétrons dos átomos do meio

Seção de choque é (tipicamente) ***grande***: $\sigma \sim 10^{-17} - 10^{-16}$ cm^2

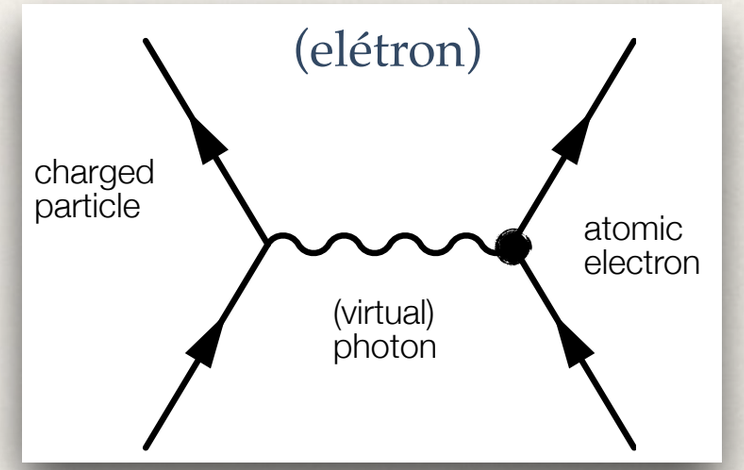
energia perdida por colisão individual é pequena, porém, há um grande número de colisões em materiais densos.

http://cern.ch/amoraes

Interação de partículas carregadas

Interação de partículas carregadas com o meio via

interação eletromagnética

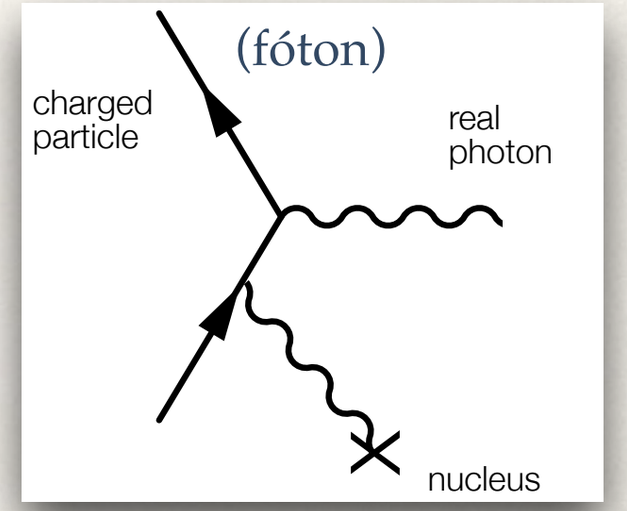


Três processos possíveis:

Ionização ✓

Radiação Cherenkov (hoje)

Radiação de Transição (hoje)



Para a derivação da equação de perda de energia, ou da intensidade da radiação emitida considere

Partícula carregada com velocidade $v=\beta c$

Constante dielétrica do meio $\varepsilon=\varepsilon_1 + i\varepsilon_2$

http://cern.ch/amoraes

A constante dielétrica

Fótons (virtuais) interagem com átomos do meio.

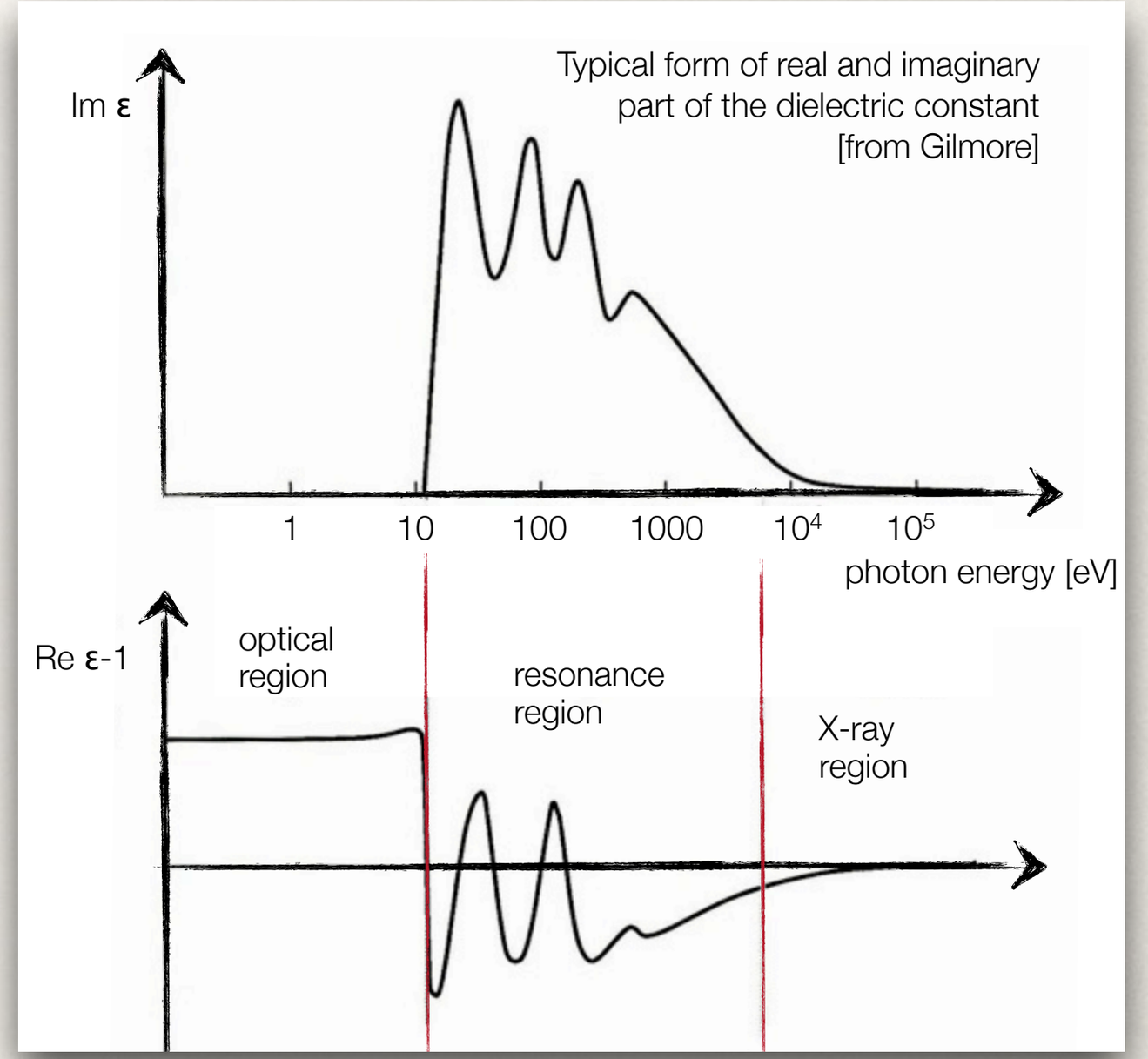
Efeito é descrito pela ***constante dielétrica***

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$$

Propriedade óptica do meio depende da constante dielétrica.

Parte imaginária: absorção de fótons (seção de choque de absorção)

Parte real: refração (modificação da velocidade de fase)



http://cern.ch/amoraes

A constante dielétrica

Propriedade óptica do meio depende da constante dielétrica.

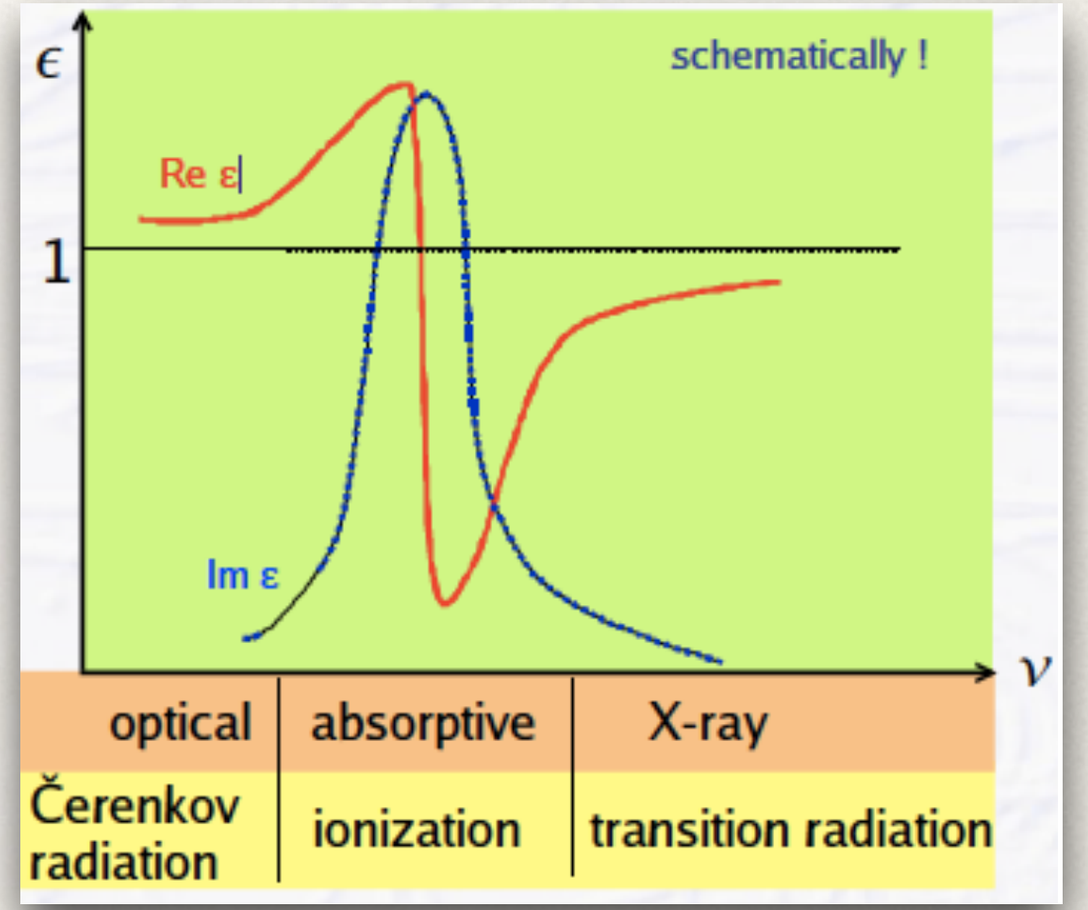
$$\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$$

Parte imaginária: absorção de fótons (seção de choque de absorção)

$$Im\ \varepsilon = k$$ (parâmetro de absorção)

Parte real: refração (modificação da velocidade de fase)

$$Re\ \sqrt{\varepsilon} = n$$ (índice de refração)



http://cern.ch/amoraes

Radiação Cherenkov

Partículas carregadas atravessando um meio dietético com velocidade $v > c/n$ (velocidade superior à da propagação da luz no meio) emitem uma radiação característica conhecida como radiação Cherenkov.

Para fótons com energias abaixo da energia de excitação:

$$\frac{d\sigma}{dE} = \frac{z^2\alpha}{\beta^2\pi}\frac{1}{N_\alpha\hbar c}\left(\beta^2 - \frac{\epsilon_1}{|\epsilon|^2}\right)\Theta$$

$\varepsilon_2 = 0$ e $\sigma_\gamma = 0 \rightarrow$ apenas o último termo de $d\sigma/dE$ contribui

Comportamento no limite de transição via fase Θ

$$\Theta = \arg(1-\varepsilon_1\beta^2 + i\varepsilon_2\beta^2) = \arg(1-\varepsilon_1\beta^2)$$

$$\sqrt{\epsilon}\frac{v}{c}\cos\theta_C = 1$$

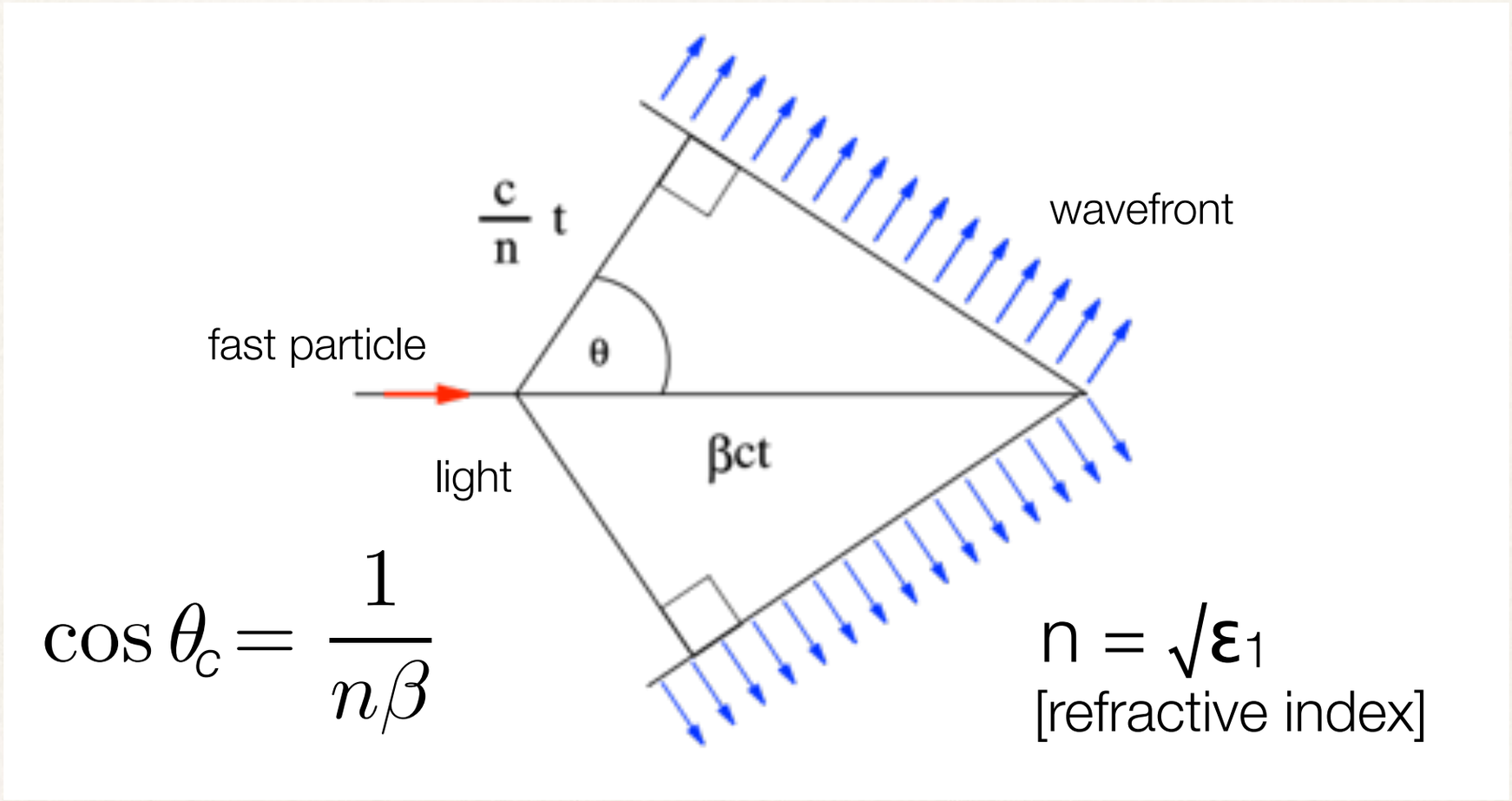
[θ_C: Cherenkov angle]

varia de 0 a π para $\varepsilon_1 > 1/\beta^2$ ou $1 < v/c\sqrt{\varepsilon_1}$ limite Cherenkov

http://cern.ch/amoraes

Radiação Cherenkov

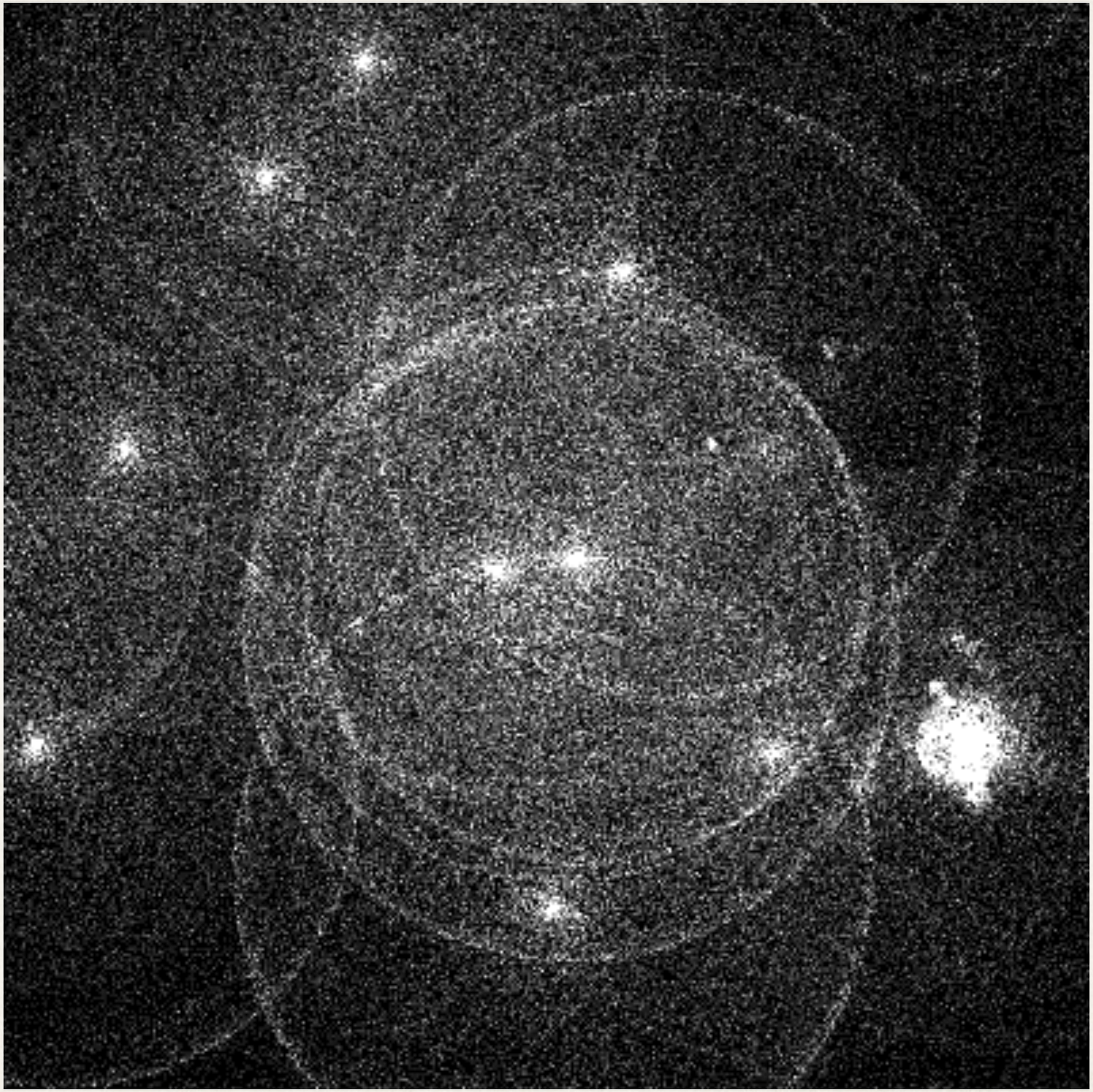
Partículas carregadas atravessando um meio dietético com velocidade $v > c/n$ (velocidade superior à da propagação da luz no meio) emitem uma radiação característica conhecida como radiação Cherenkov.



http://cern.ch/amoraes

Radiação Cherenkov

Partículas carregadas atravessando um meio dietético com velocidade $v > c/n$ (velocidade superior à da propagação da luz no meio) emitem uma radiação característica conhecida como radiação Cherenkov.



http://cern.ch/amoraes

Perda de energia atribuída a emissão de radiação Cherenkov são pequenas quando comparadas com energia perdida em ionização (~1%)

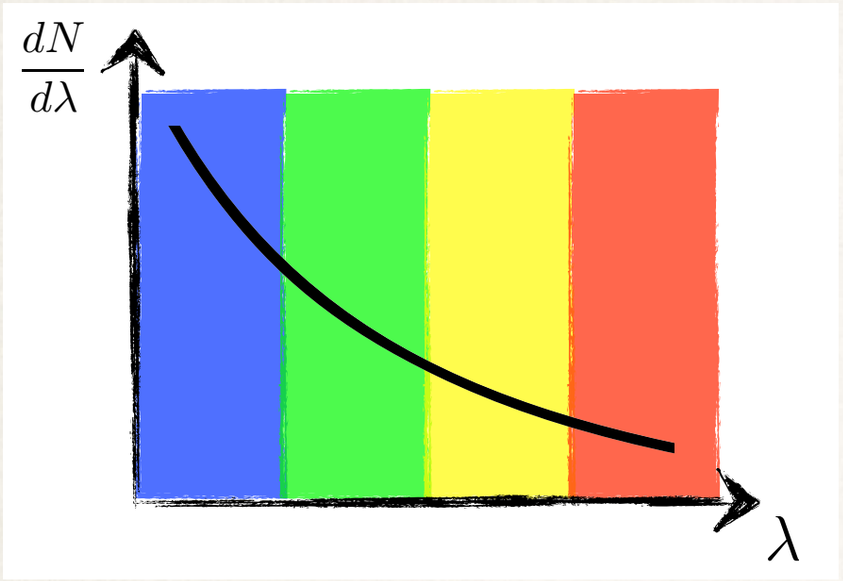
dE/dx (Cherenkov) ~ 0.01 - 0.02 MeV / g cm^{-2} (gás)

vs.

dE/dx (Ionização mínima) ~ 1.5 MeV / g cm^{-2} (gás)

http://cern.ch/amoraes

Número de fótons emitidos em função do comprimento de onda



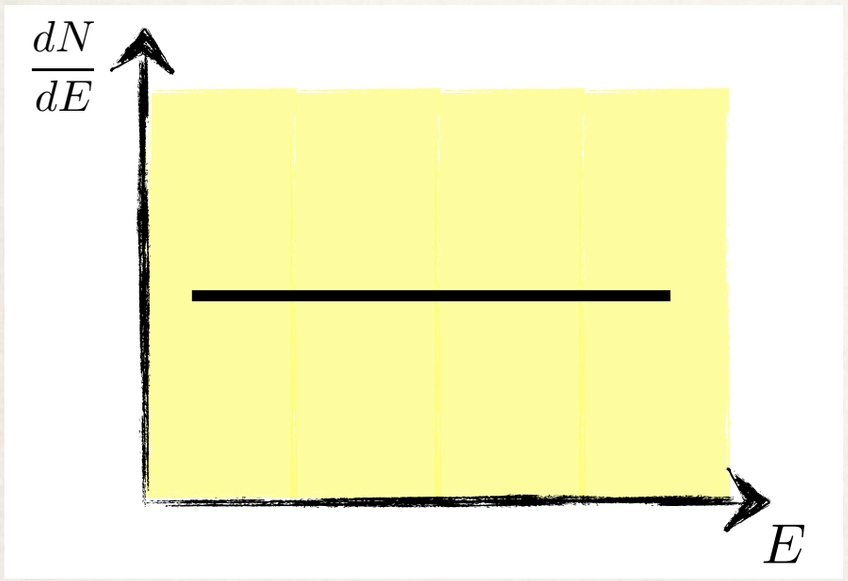
$$\frac{d^2N}{d\lambda dx} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2}\left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)}\right) = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2}\sin^2\theta_C$$

Integrate over sensitivity range:
[for typical Photomultiplier]

$$\frac{dN}{dx} = \int_{350\text{ nm}}^{550\text{ nm}} d\lambda \frac{d^2N}{d\lambda dx}$$

$$= 475\ z^2 \sin^2\theta_C \text{ photons/cm}$$

Quantidade de fótons emitidos em função da energia é constante



$$\frac{d^2N}{dEdx} = \frac{z^2\alpha}{\hbar c}\left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)}\right) = \frac{z^2\alpha}{\hbar c}\sin^2\theta_C$$

$$\approx \text{const}$$

For single charged particle:

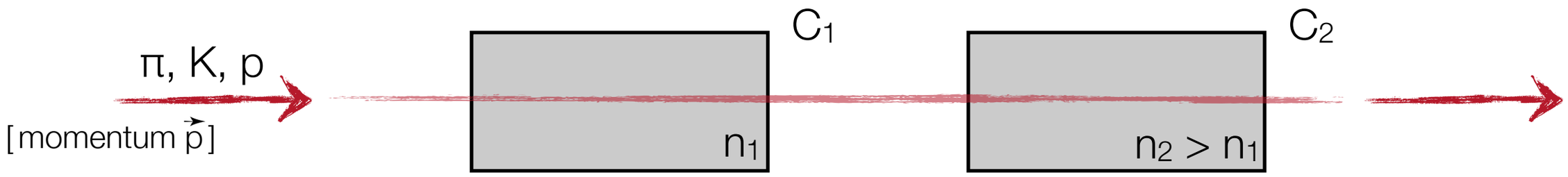
$$\frac{d^2N}{dEdx} = 370\ \sin^2\theta_C\ \text{eV}^{-1}\ \text{cm}^{-1}$$

http://cern.ch/amoraes

Radiação Cherenkov: exemplo de aplicação

Threshold detection:

Observation of Cherenkov radiation → $\beta > \beta_{thr}$



Choose n_1, n_2 in such a way that for:

n_2 : $\beta_\pi, \beta_K > 1/n_2$ and $\beta_p < 1/n_2$

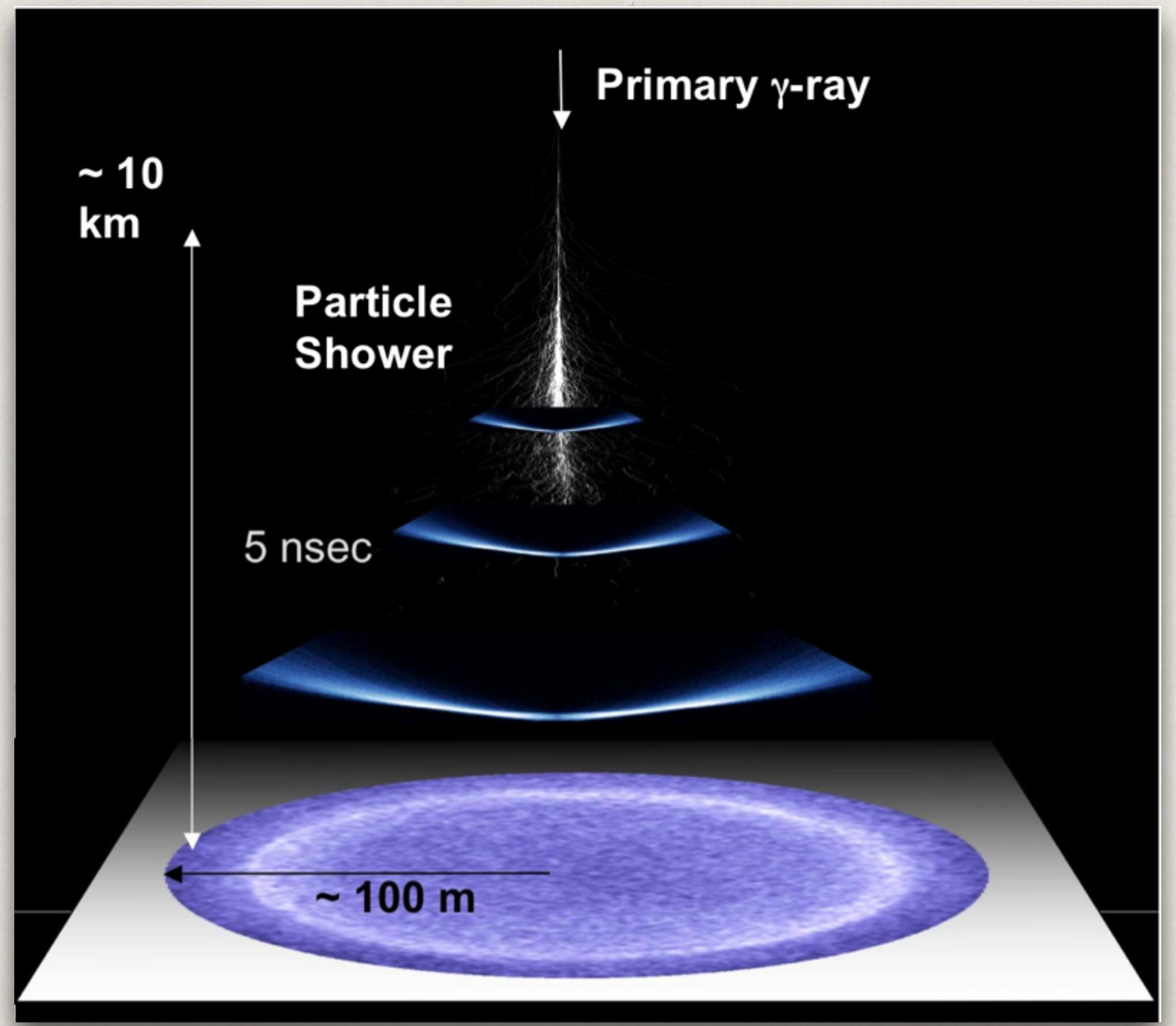
n_1 : $\beta_\pi > 1/n_1$ and $\beta_K, \beta_p < 1/n_1$

Light in C_1 and C_2 → identified pion

Light in C_2 and not in C_1 → identified kaon

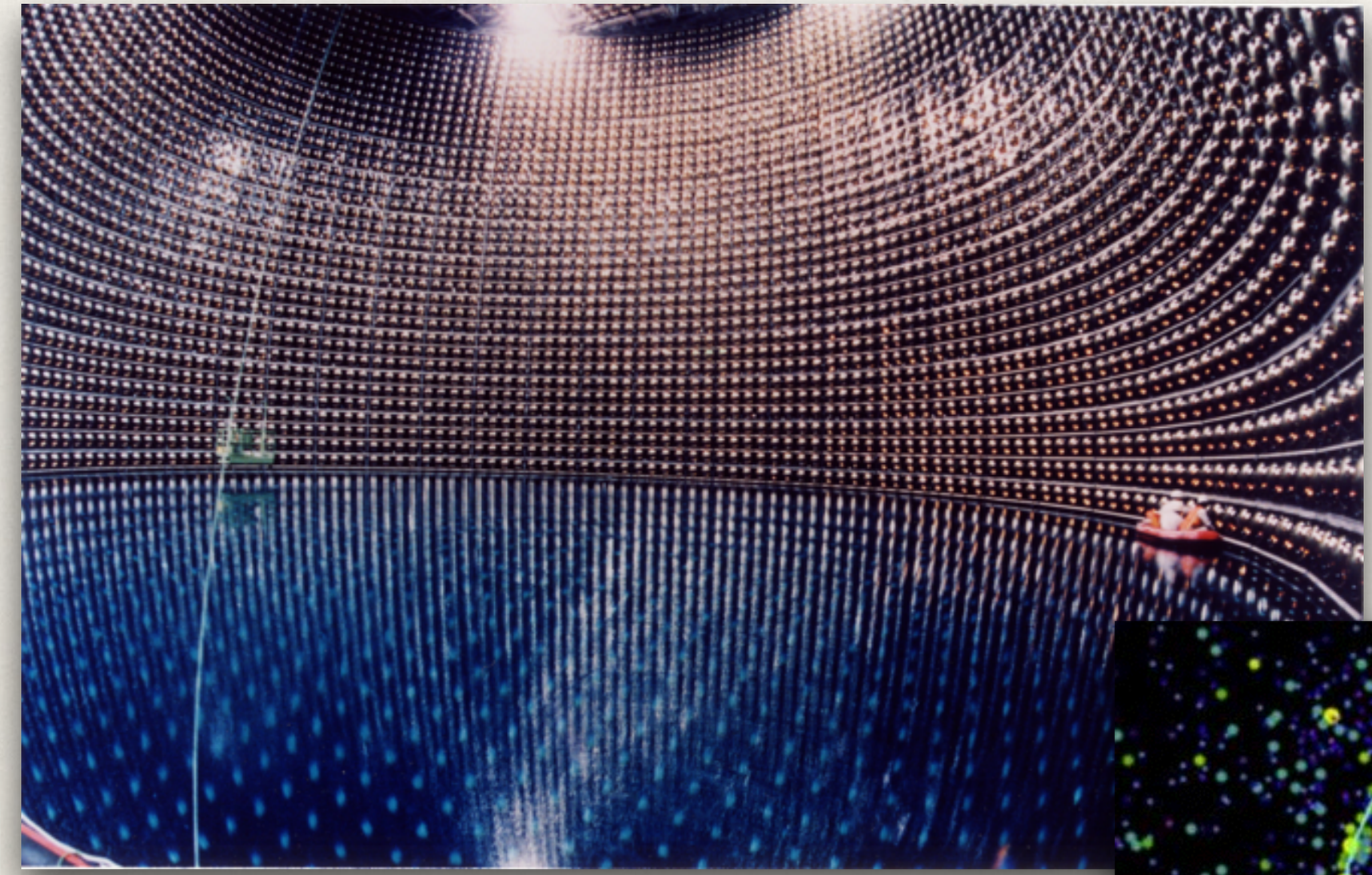
Light neither in C_1 and C_2 → identified proton

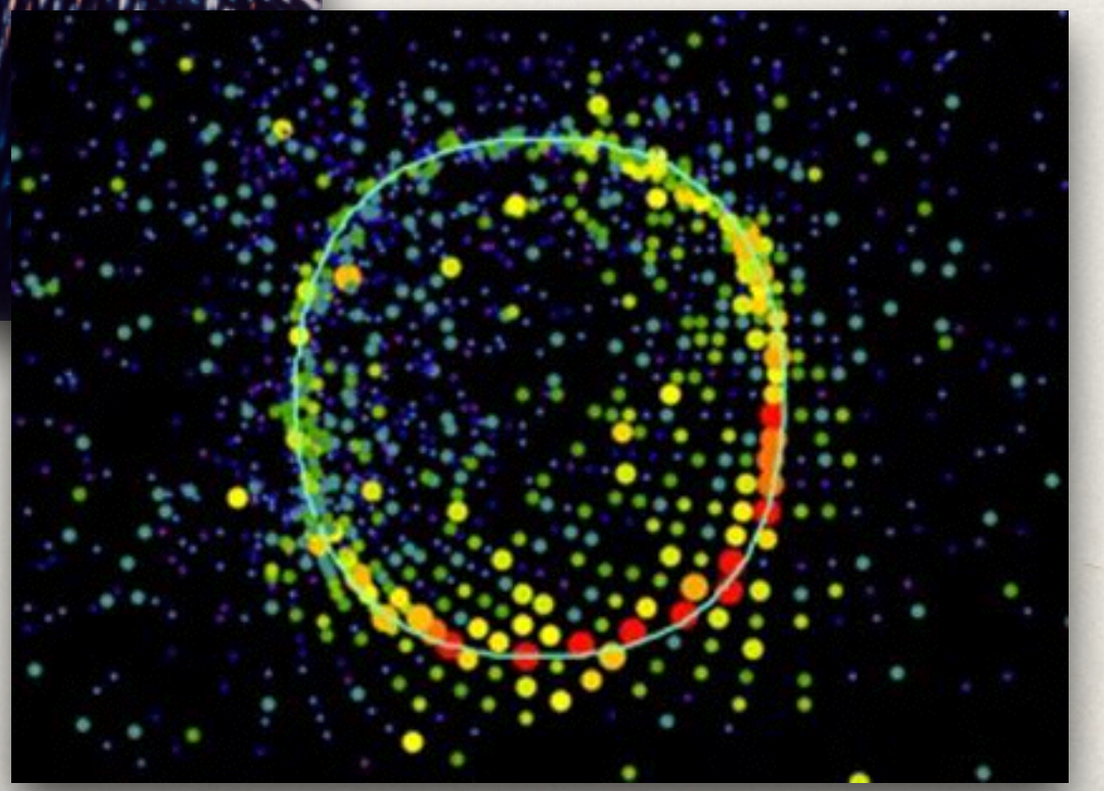
http://cern.ch/amoraes



http://cern.ch/amoraes

Super Kamiokande (Super-K)

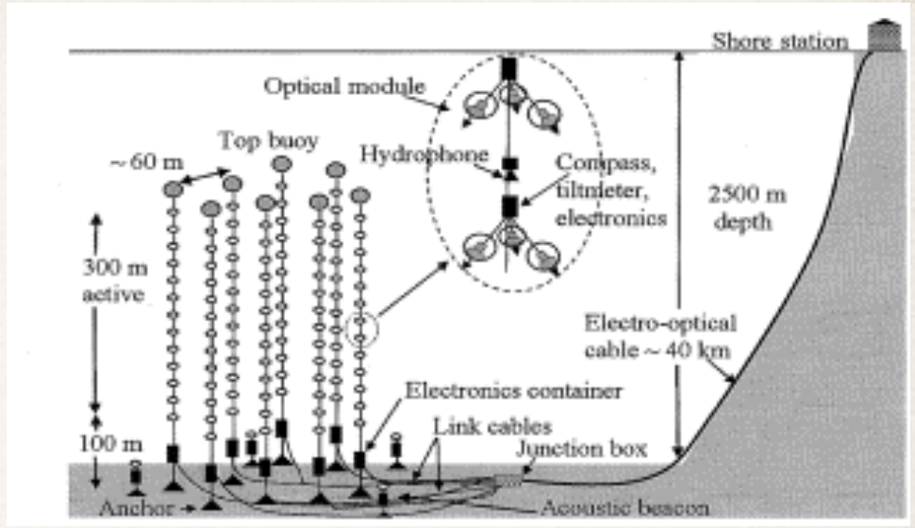


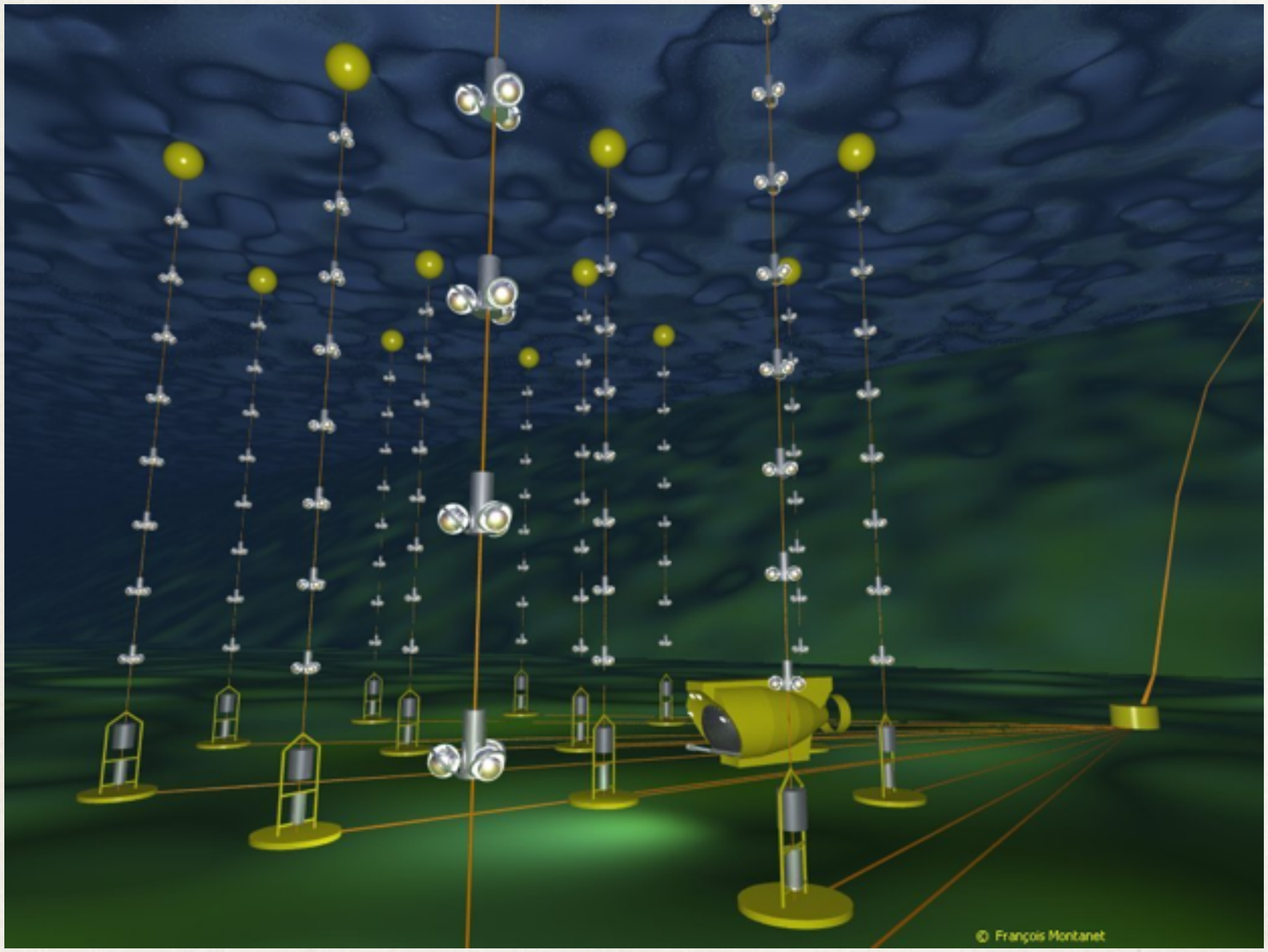


http://cern.ch/amoraes

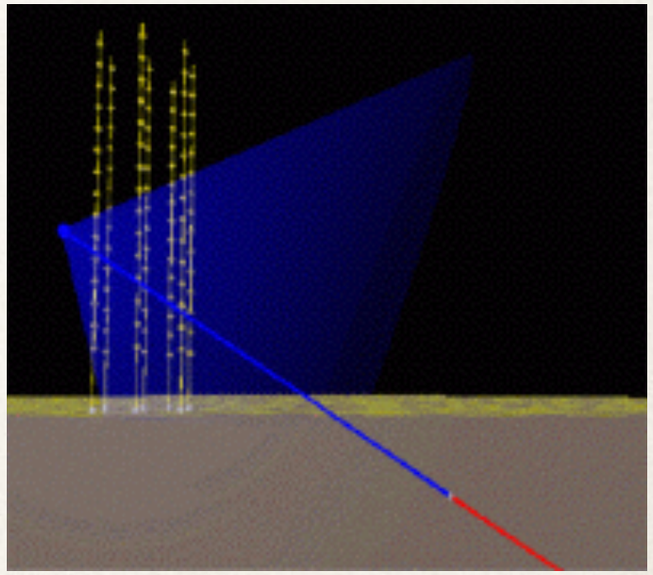
Experimento ANTARES

Astronomia com neutrinos (informação mais precisa sobre processos físico no interior de estrelas)!



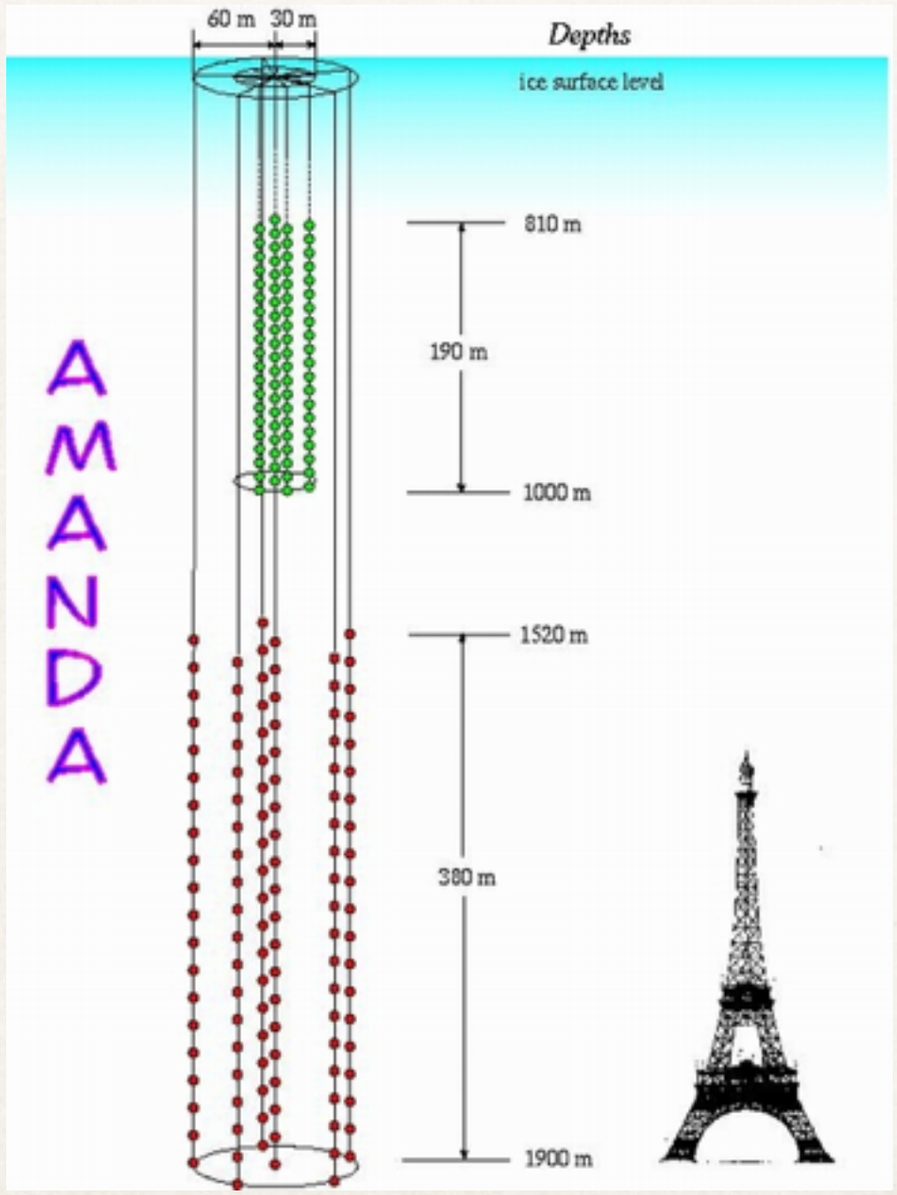


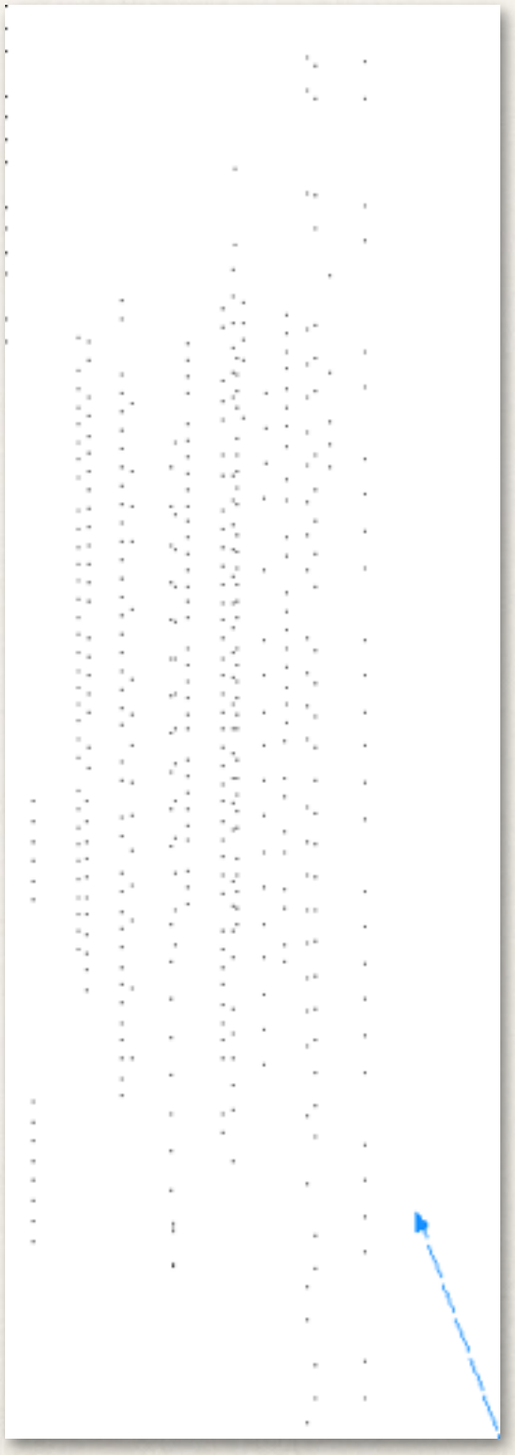
http://cern.ch/amoraes



Experimento AMANDA: Antarctic Muon and Neutrino Detector Array

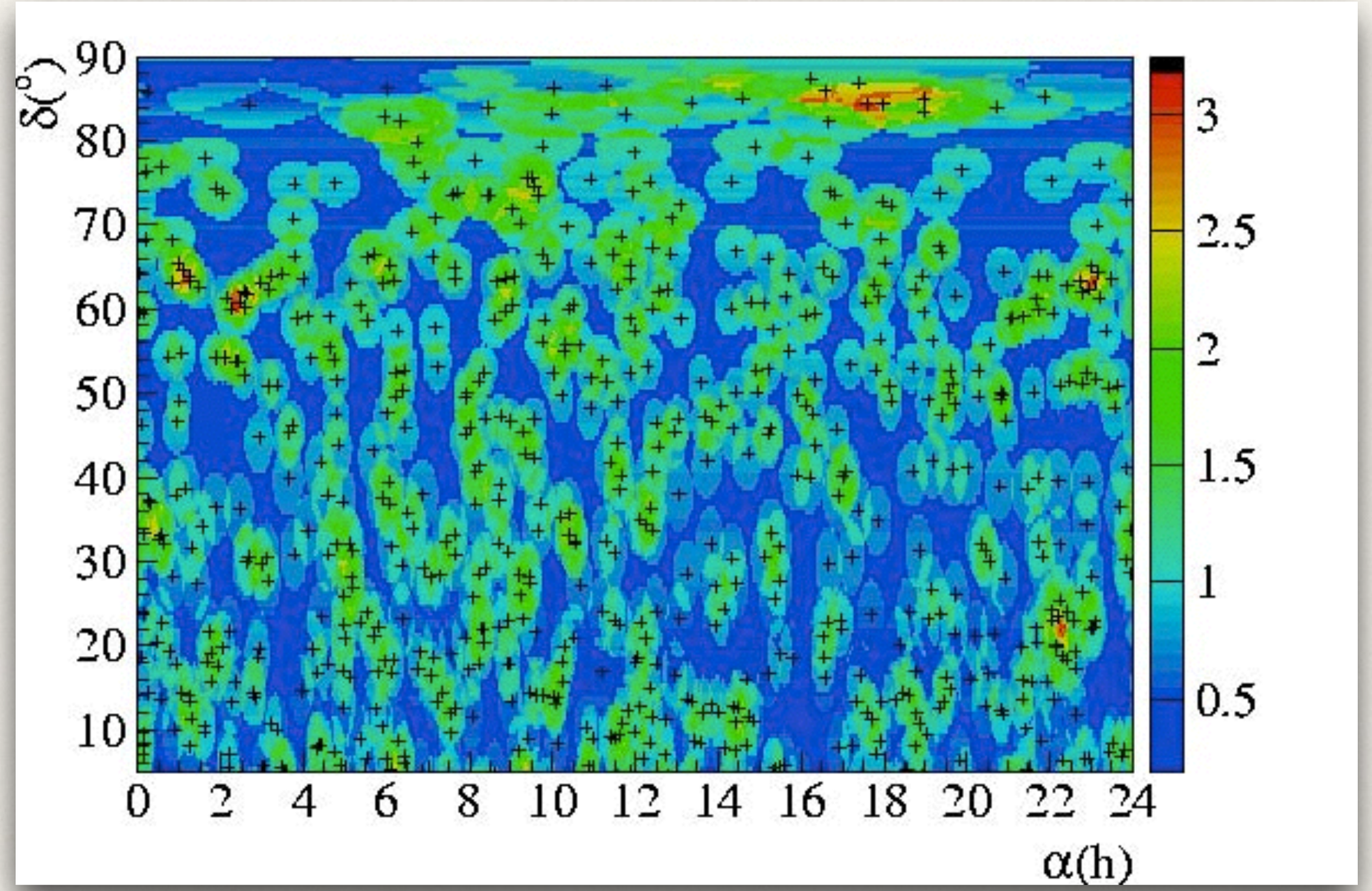
Telescópio de neutrinos (hoje, parte do experimento "IceCube Neutrino Observatory" no Polo Sul!)





http://cern.ch/amoraes

Experimento AMANDA: Antartic Muon and Neutrino Detector Array



The AMANDA-II team has produced the most detailed map of the high energy neutrino sky so far. No sources of continuous emission have yet been observed, but data is streaming in.

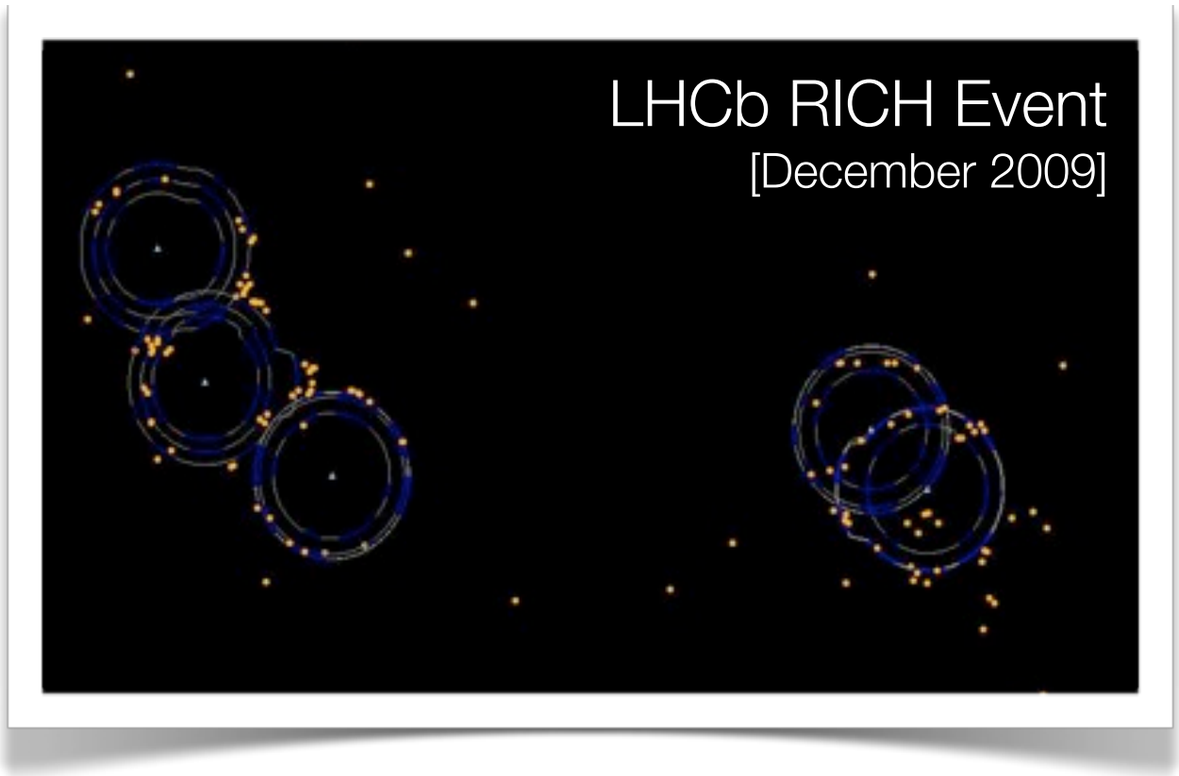
http://cern.ch/amoraes

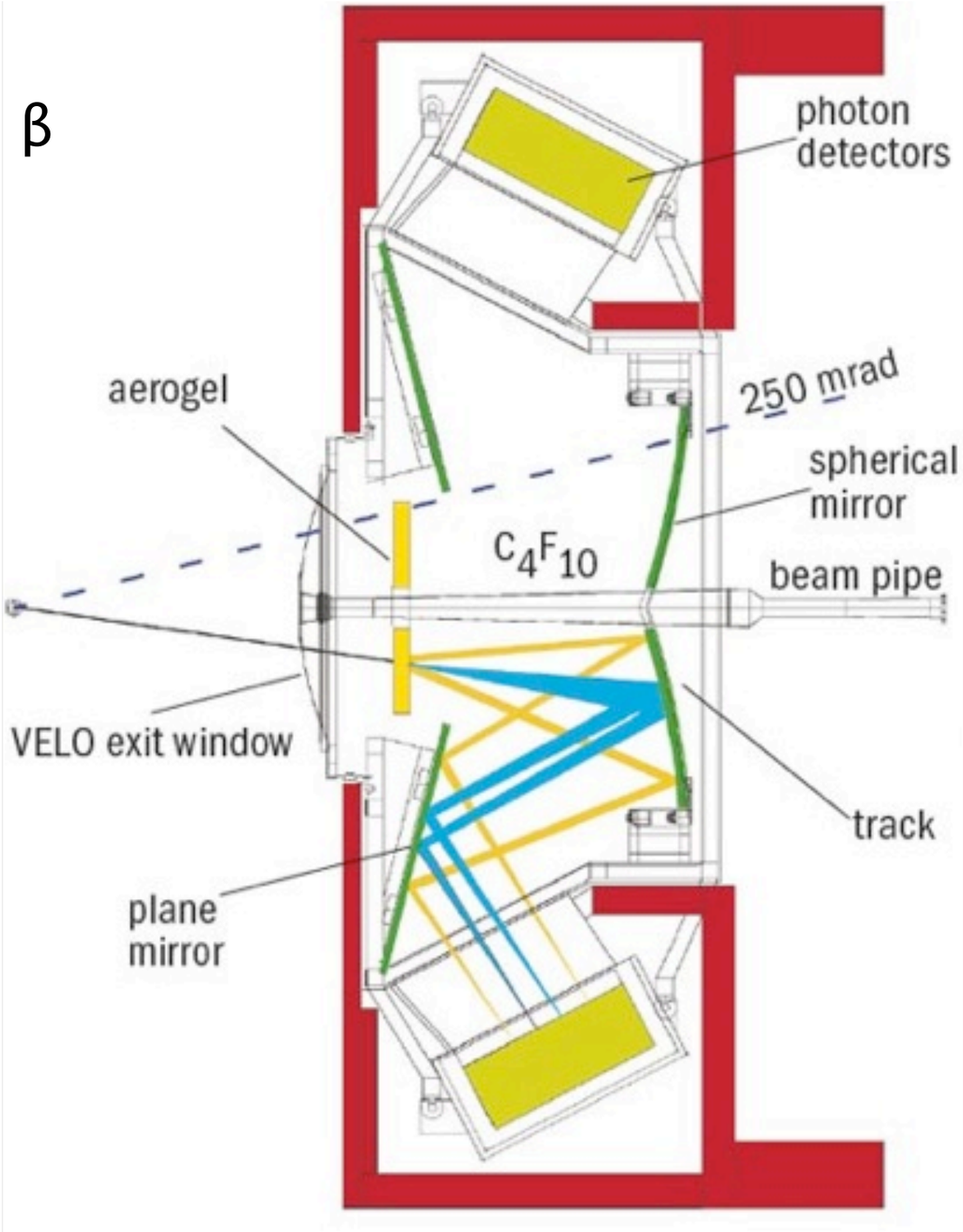
Experimento LHCb

Measurement of Cherenkov angle:
Use medium with known refractive index n ➛ β

Principle of:

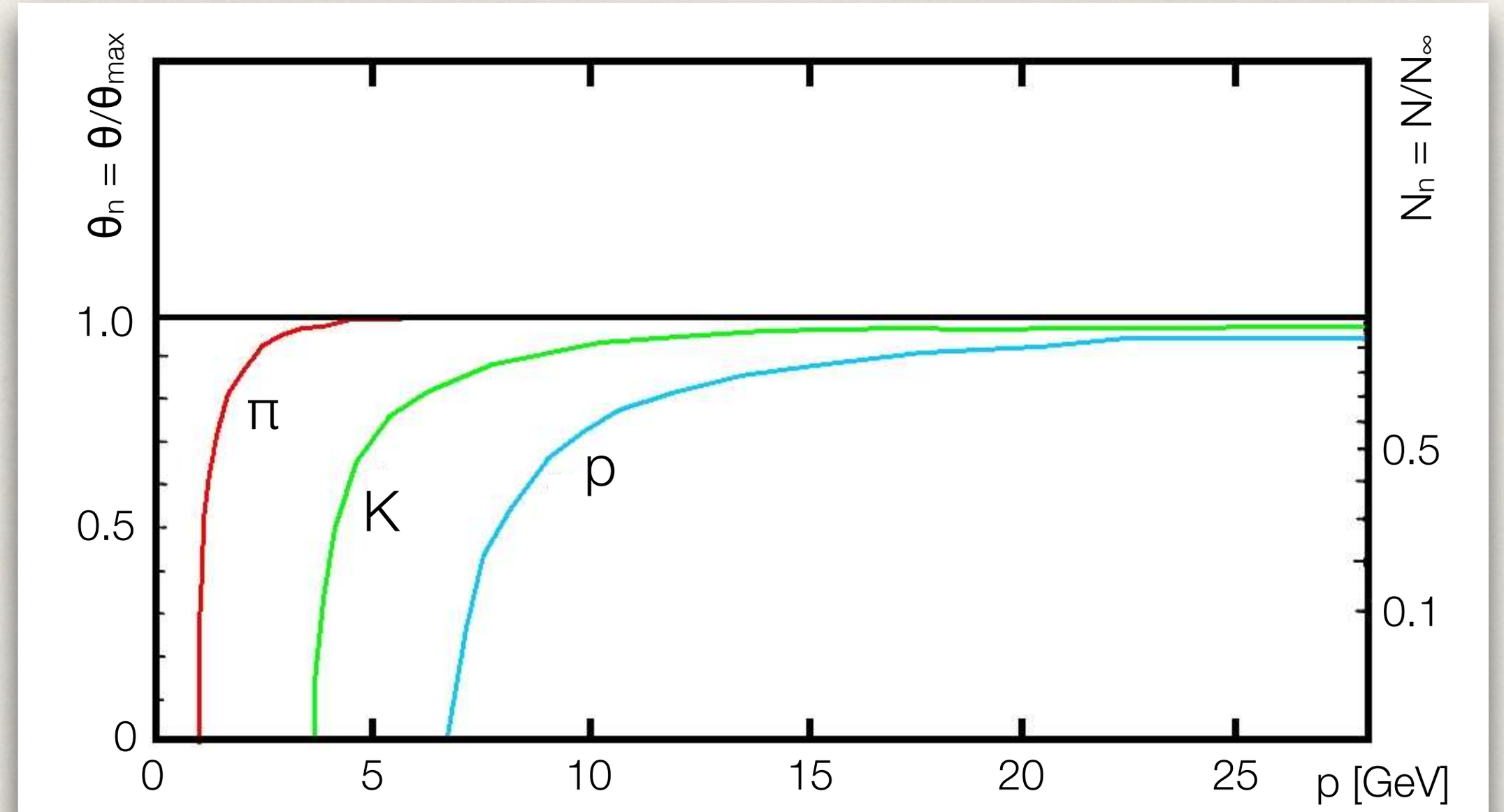
RICH (Ring Imaging Cherenkov Counter)
DIRC (Detection of Internally Reflected Cherenkov Light)
DISC (special DIRC; e.g. Panda)





LHCb RICH

http://cern.ch/amoraes



Cherenkov angle
Number of photons

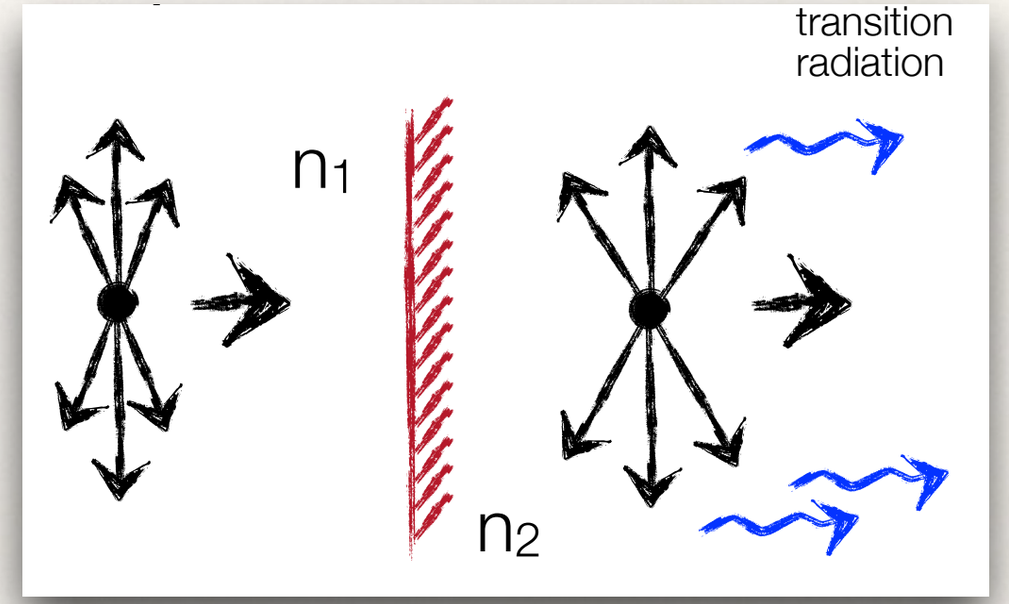
grows with β and reaches asymptotic value for $\beta = 1$

[$\theta_{max} = \arccos(1/n)$; $N_\infty = x \cdot 370/cm\ (1-1/n^2)$]

http://cern.ch/amoraes

Radiação de Transição

Radiação de Transição ocorre quando uma partícula carregada, com velocidade relativística (alta valor de γ) atravessa a interface de dois meios com índices de refração diferentes.



Efeito pode ser explicado pelo "re-arranjo" do campo elétrico.

(efeito previsto por Ginzburg e Frank em 1946; confirmado experimentalmente nos anos 70)

Radiação de Transição

Radiated power:

$$\frac{dP}{d\omega} = r^2 \int \frac{d^2S}{d\omega d\Omega}\, d\Omega$$

$\int \sin^2\theta d\Omega$

$$= r^2 \int \frac{8e^2v^2 \sin^2\theta}{4\pi r^2 c^3}\, d\Omega = \frac{8\pi}{3}\frac{8e^2v^2}{4\pi c^3} = 16\frac{e^2v^2}{3c^3}$$

$$\frac{dP}{d(\hbar\omega)} = 2\,\frac{16}{3}\,\frac{e^2}{\hbar c}\,\frac{\frac{1}{2}mv^2}{mc^2} = \frac{32}{3}\,\frac{e^2}{\hbar c}\,\frac{E}{mc^2}$$

$$\propto \quad \alpha \cdot \frac{E}{mc^2}$$

dP **ω**-independent

classically expect white spectrum

dP ~ **γ**

"risky" relativistic generalization

via Energy dependence

dP ~ **α**

one **α** per boundary

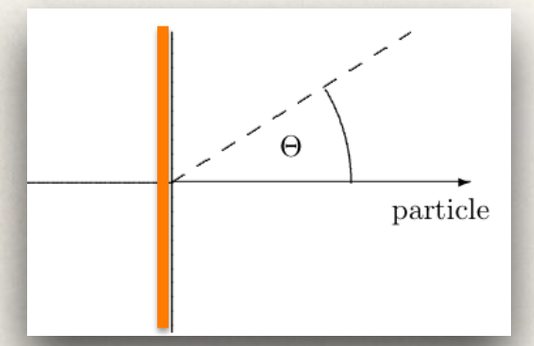
http://cern.ch/amoraes

Radiação de Transição

A energia total emitida na forma de "radiação de transição" é proporcional ao fator de Lorentz γ

$$\gamma = \frac{E}{m} = \frac{\sqrt{p^2 + m^2}}{m} \approx \frac{p}{m}$$

ou seja, esse mecanismo é extremamente útil para identificar partículas com alto momento/energia (para $\beta \approx 1$)



http://cern.ch/amoraes

- **Ângulo de emissão (valor típico): $\Theta = 1/\Upsilon$**
- **Energia dos fótons radiados: ~ Υ**
- **Número de fótons radiados: $\propto z^2$**
- **Limite efetivo: $\Upsilon > 1000$**

Angular distribution strongly forward peaked
[Interference; coherence condition]

$$\theta \leq 1/\gamma$$

Coherent radiation is generated only
over a very small formation length

Plasma frequency
[from Drude model]

$$D = \gamma c/\omega_p$$

Volume element from which coherent
radiation is emitted ...

$\rho_{max} = \gamma v/\omega$
[transversal range ...
... with large polarization]

$$V = \pi D \rho_{max}^2$$

Maximum energy of radiated photons
limited by plasma frequency ...
[results from requiring $V \neq 0 \rightarrow \omega = \gamma\omega_p$]

$$E_{max} = \gamma\hbar\omega_p$$

[X-Rays ➛ large γ!!]

Typical values: CH_2: $\hbar\omega_p = 20$ eV; $\gamma = 10^3$
[Air: $\hbar\omega_p = 0.7$ eV]

$D = 10\ \mu m$

[d > D: absorption dominates]

http://cern.ch/amoraes

Radiação de Transição

Principal aplicação: identificação de elétrons

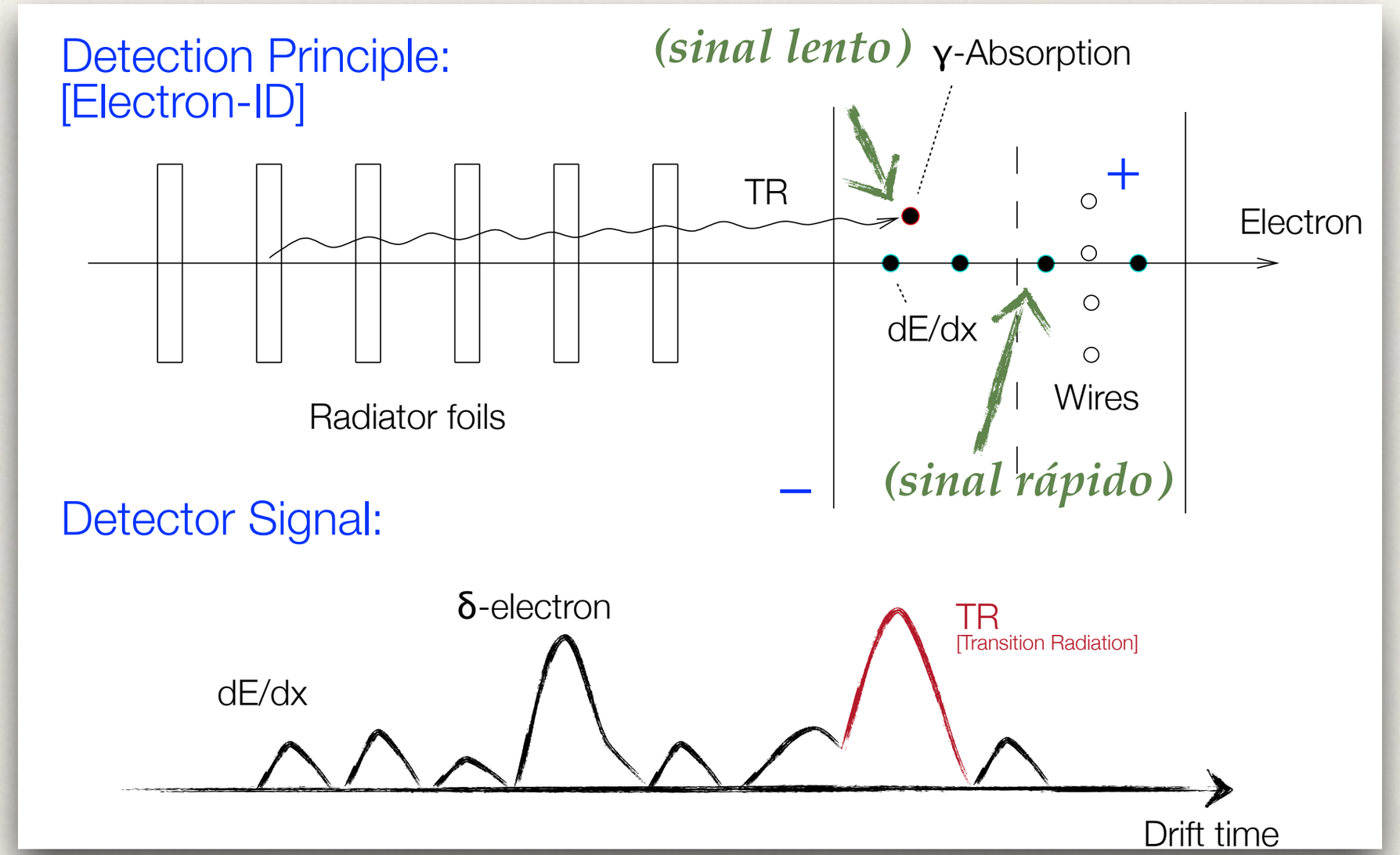
Para um dado momento p, o fator γ é muito maior para elétrons do que para hádrons leves: fator 273 vezes maior para elétrons comparando-se com π^+ ou π^-

$$\gamma = \frac{E}{m} = \frac{\sqrt{p^2 + m^2}}{m} \approx \frac{p}{m}$$

Para um fator γ de 10^3 (elétron com p=0.5 GeV, ou π^+ ~140 GeV) aproximadamente metade da energia radiada é encontrada na faixa de energias de Rontgen (2 - 20 keV para γ radiado).

http://cern.ch/amoraes

Radiação de Transição



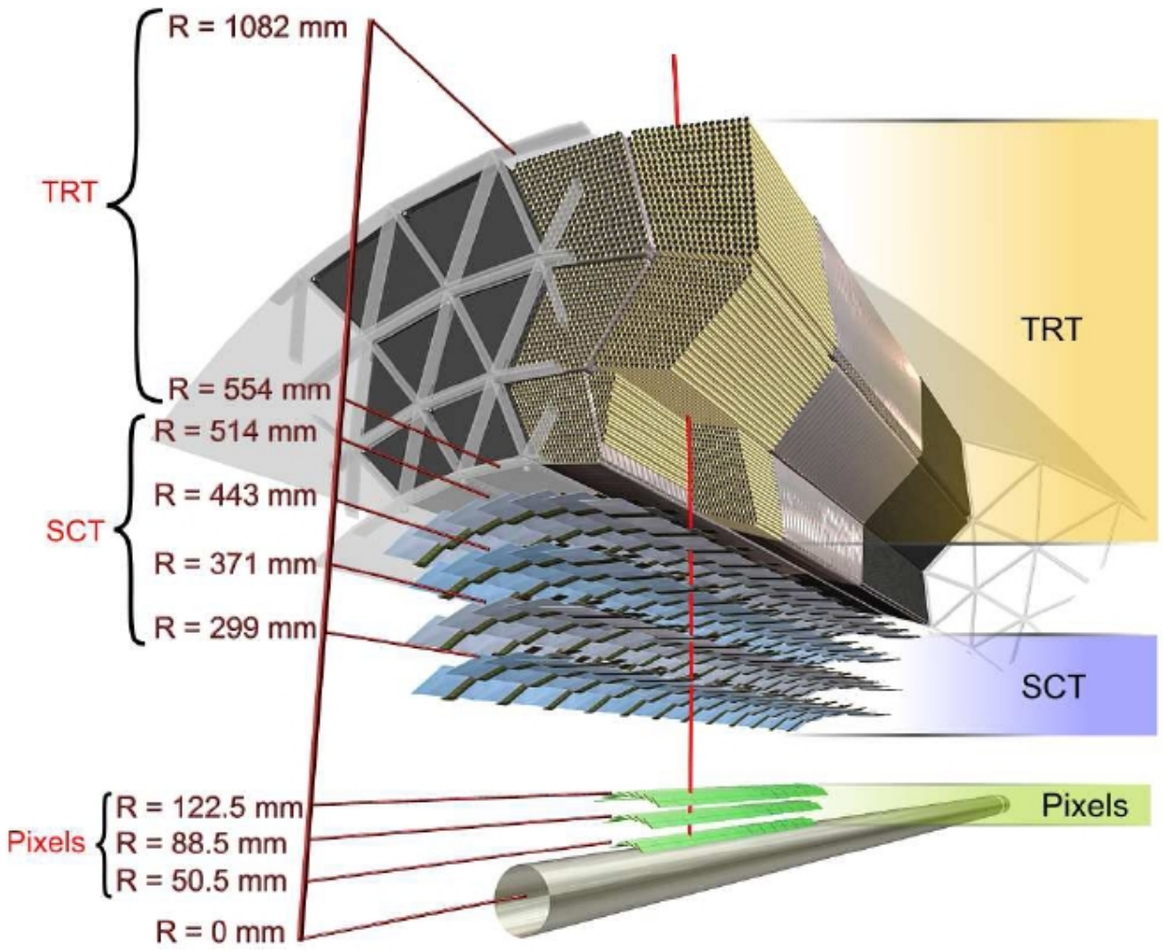
Camadas de material com baixo Z são empilhadas formando várias transições e adiciona-se um detector com gás de alto Z

(note que apenas raios-X com E>20 keV conseguem atravessar as camadas do "radiador" sem serem absorvidos)

http://cern.ch/amoraes

Detectores de Radiação de Transição

ATLAS - TRT





- straw tubes with xenon-based gas mixture
- 4 mm in diameter, equipped with a 30 μm diameter gold-plated W-Re wire

http://cern.ch/amoraes

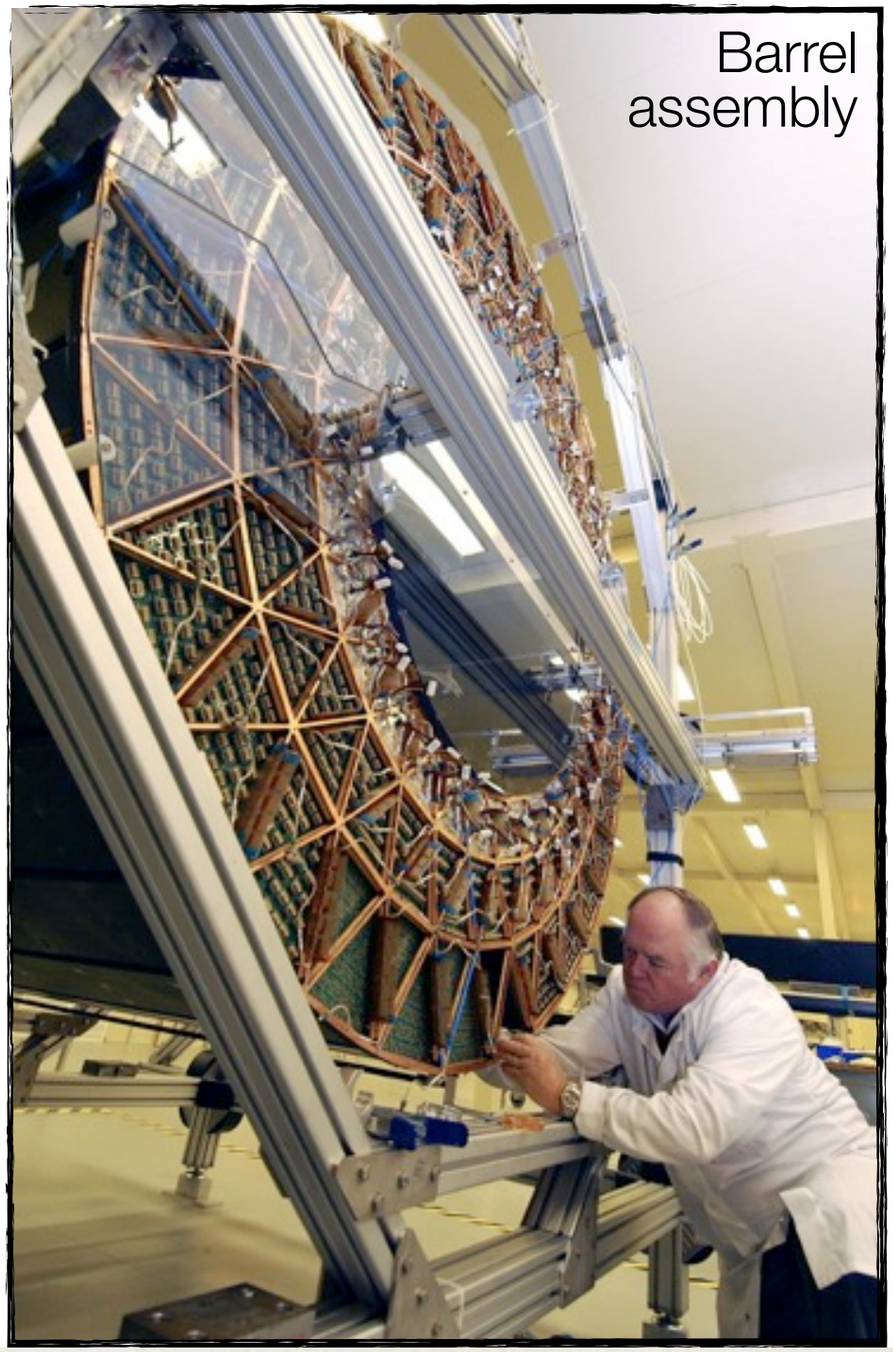
Detectores de Radiação de Transição

ATLAS - TRT

Straw Tube Tracker
with interspace filled with foam

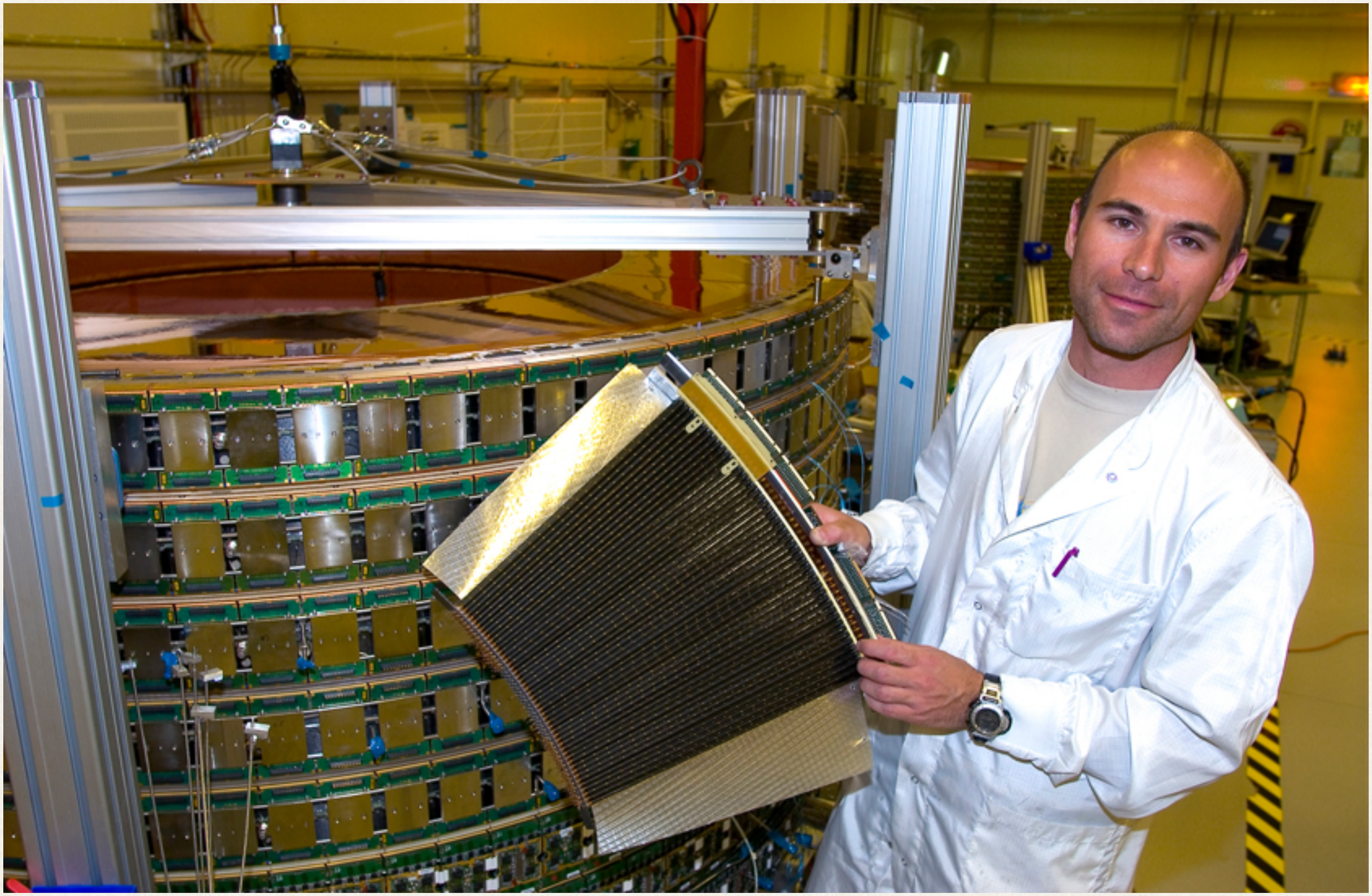
➛ Tracking & transition radiation





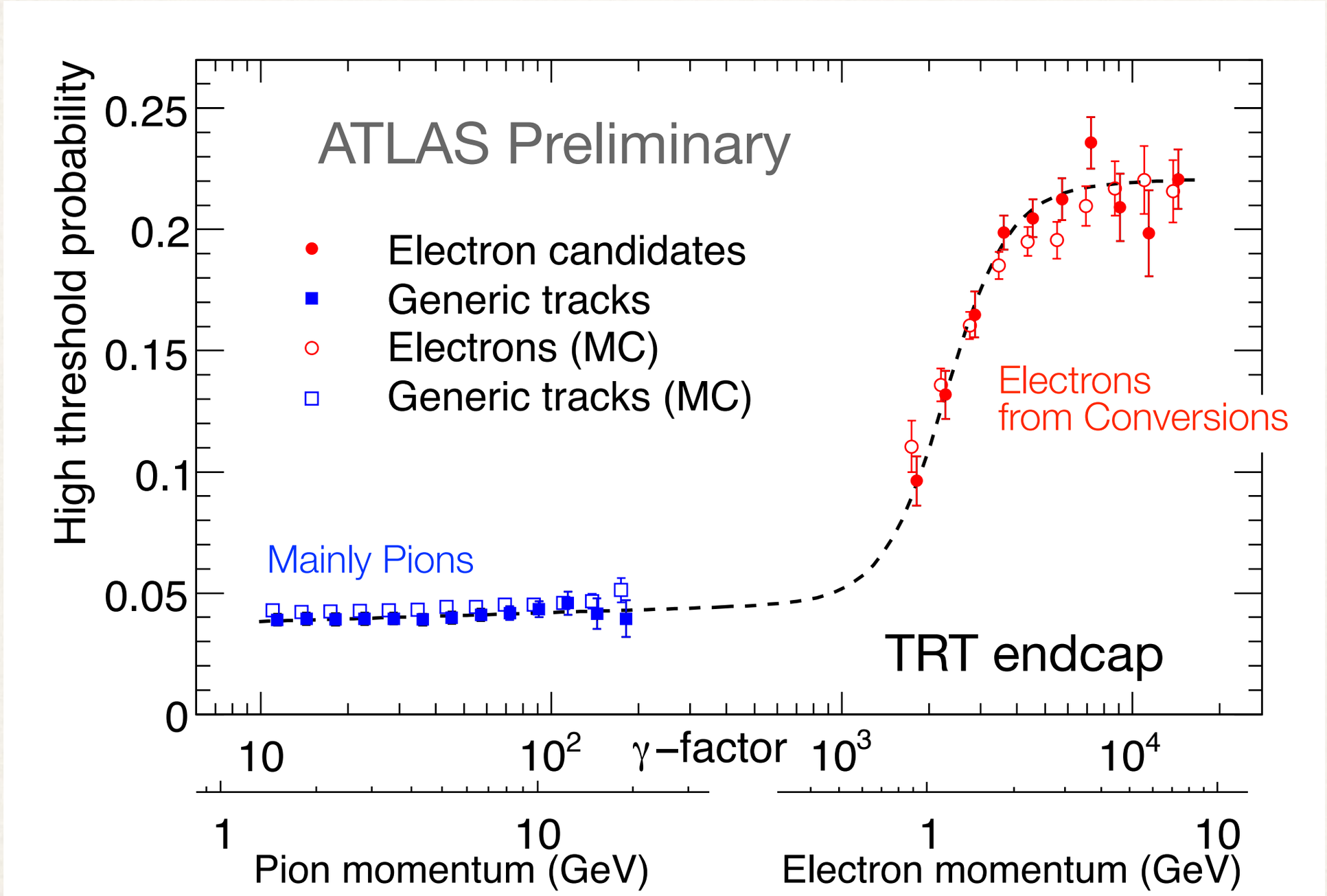
http://cern.ch/amoraes

ATLAS - TRT



http://cern.ch/amoraes

Detectores de Radiação de Transição



http://cern.ch/amoraes

Cintiladores



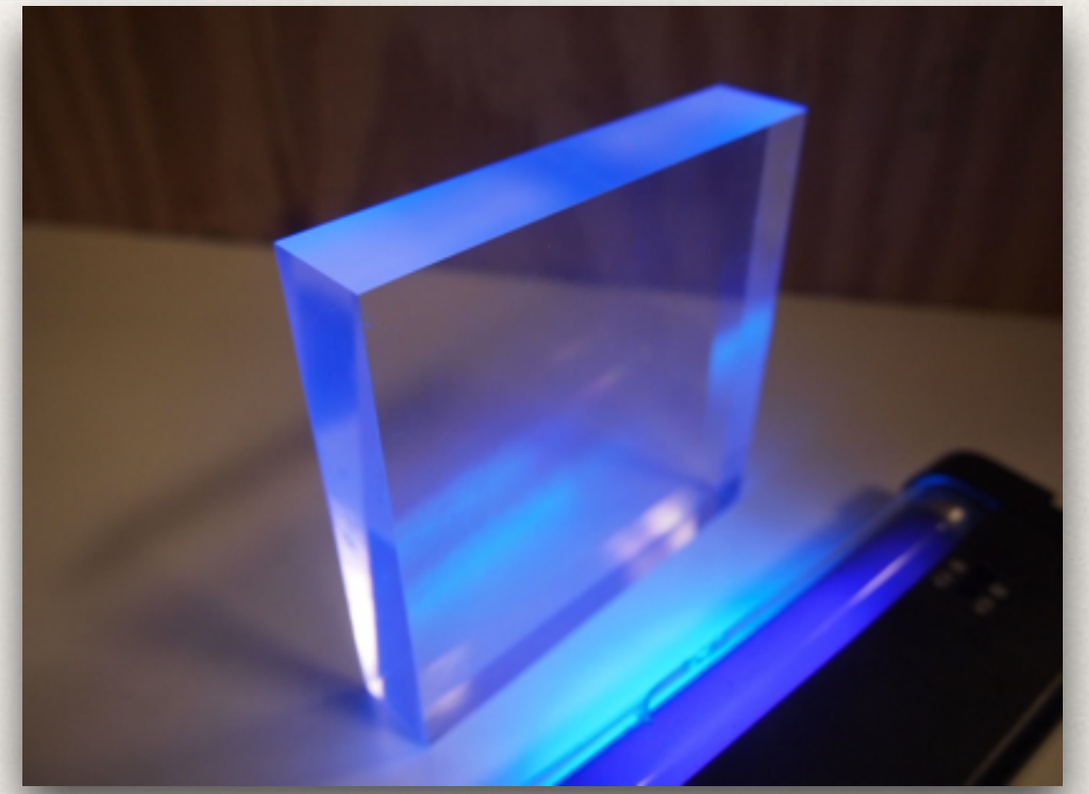
http://cern.ch/amoraes

Cintiladores

Princípio:

- *dE/dx é convertida em luz visível*
- *detecção feita com foto-sensor*

(fotomultiplicadora, olho humano)



Características principais:

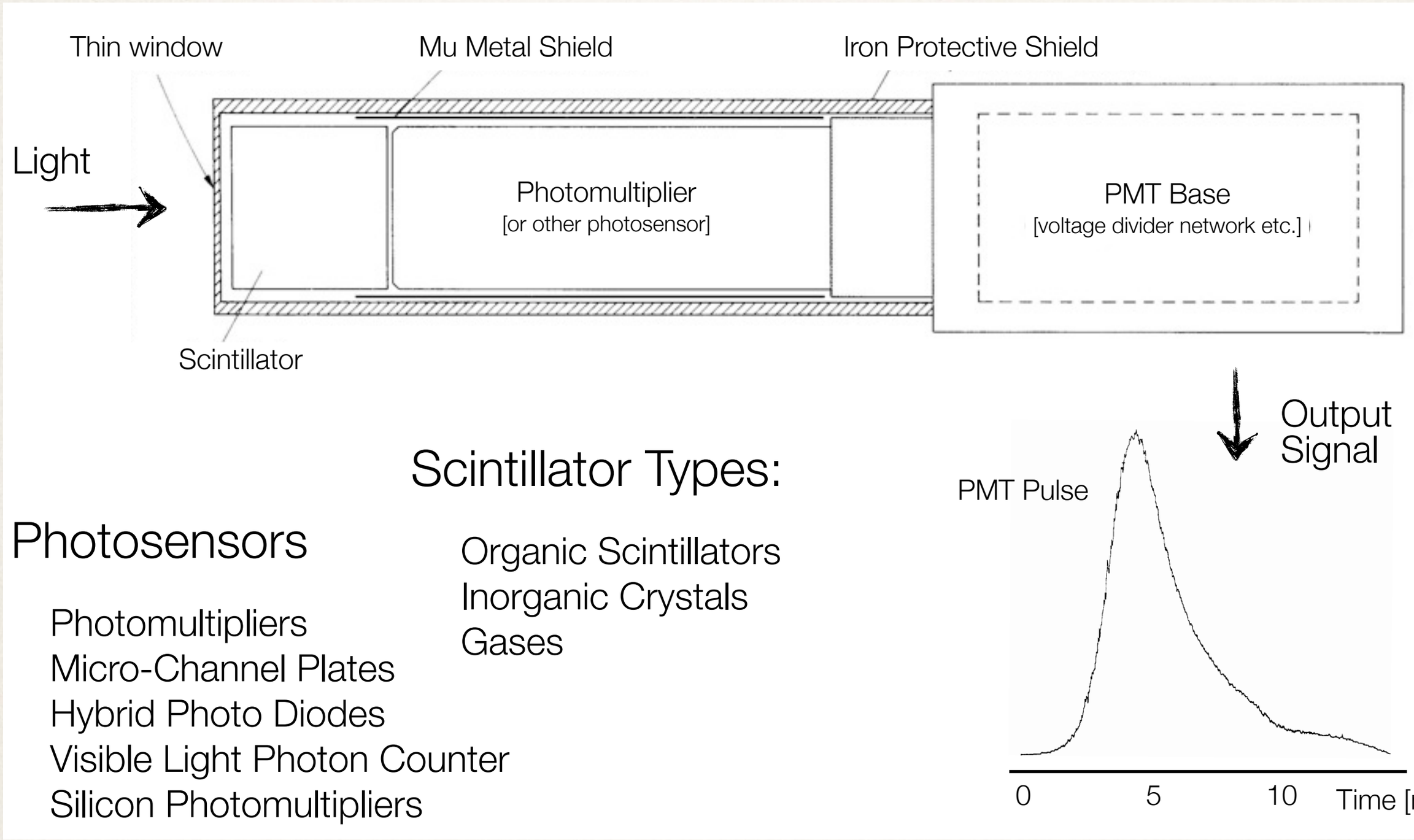
- *sensitividade à energia*
- *rápida resposta (curto tempo de resposta)*
- *perfil de pulso bem característico*

Requisitos:

- *alta-eficiência para conversão de energia de excitação em radiação fluorescente*
- *transparência à radiação fluorescente para permitir transmissão da luz*
- *emissão da luz na região do espectro detectável por fotossensores*
- *curto tempo de decaimento permitindo resposta rápida*

http://cern.ch/amoraes

Cintiladores



Scintillator Types:

- Organic Scintillators
- Inorganic Crystals
- Gases

Photosensors

- Photomultipliers
- Micro-Channel Plates
- Hybrid Photo Diodes
- Visible Light Photon Counter
- Silicon Photomultipliers

http://cern.ch/amoraes

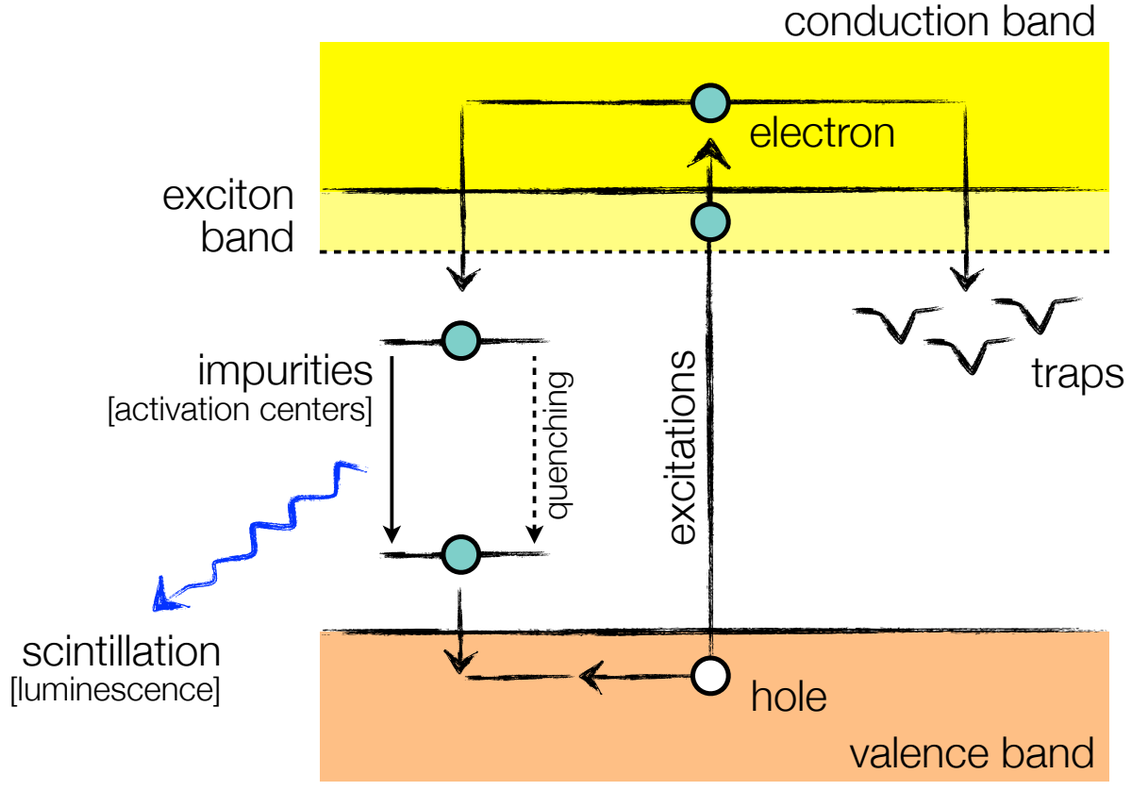
Cintiladores: cristais inorgânicos

Materiais:

- *Iodeto de sódio (NaI)*
- *Iodeto de césio (CsI)*
- *Floreto de bário (BaF_2)*
- *....*

Mecanismo:

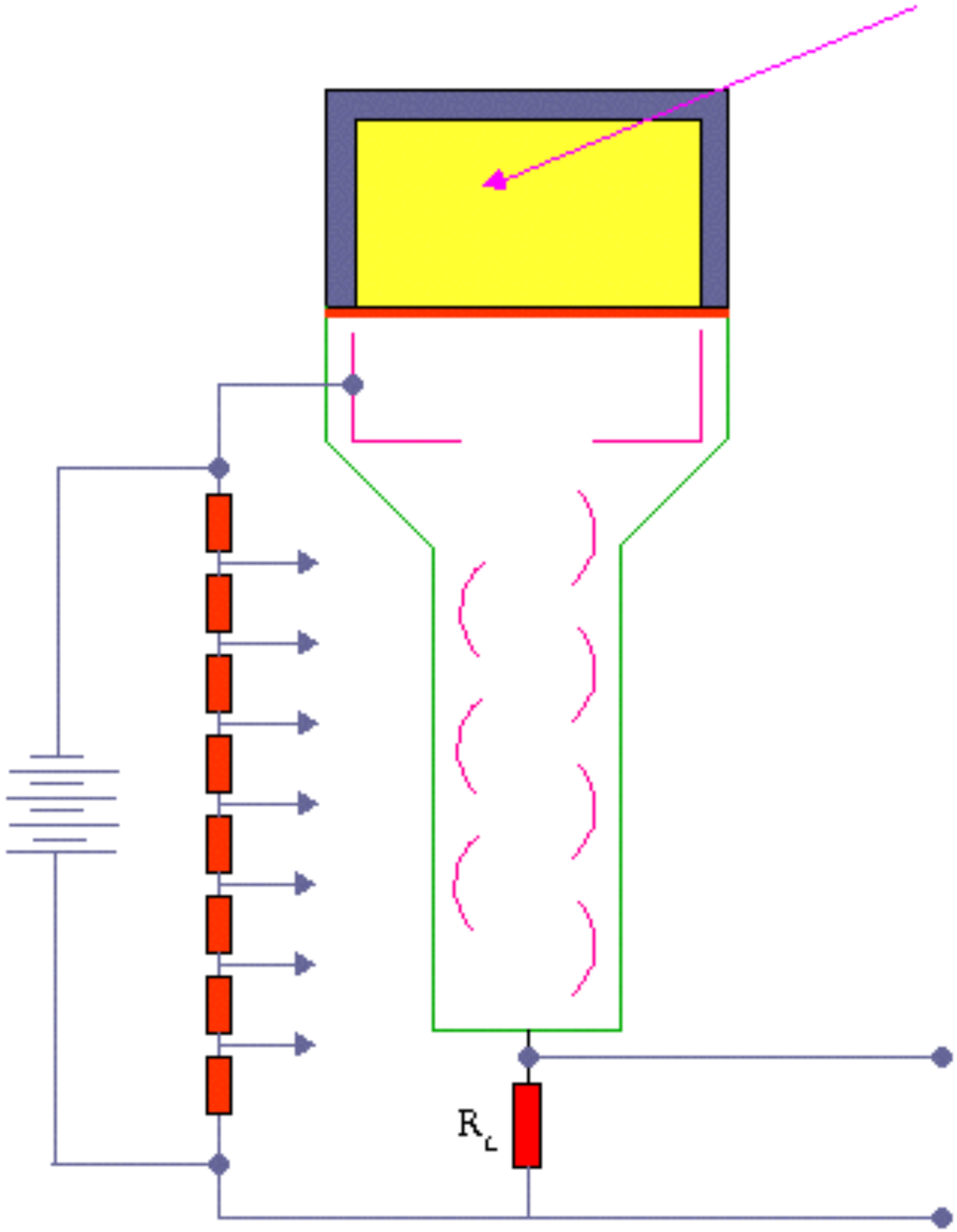
- *Deposição de energia por ionização*
- *Transferência de energia à impurezas*
- *Radiação por cintilação de fótons*



Energy bands in impurity activated crystal

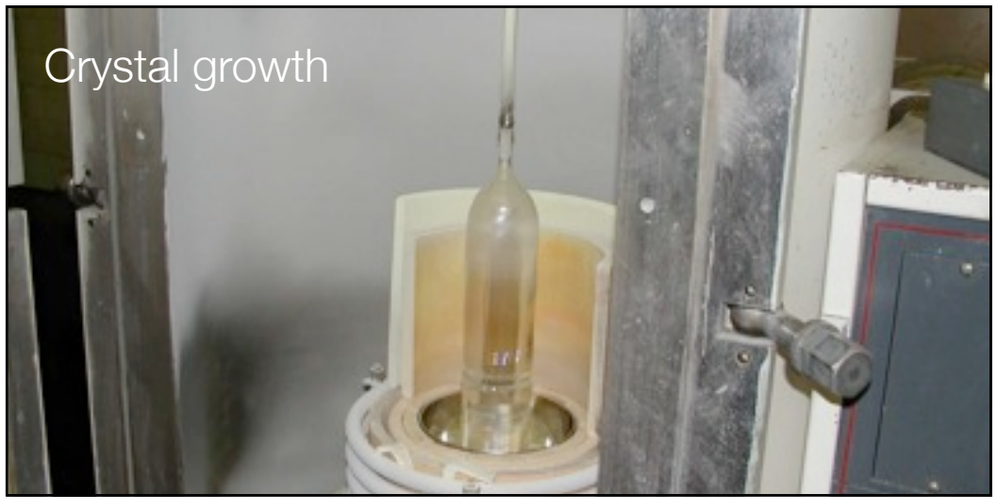
showing excitation, luminescence, quenching and trapping

http://cern.ch/amoraes

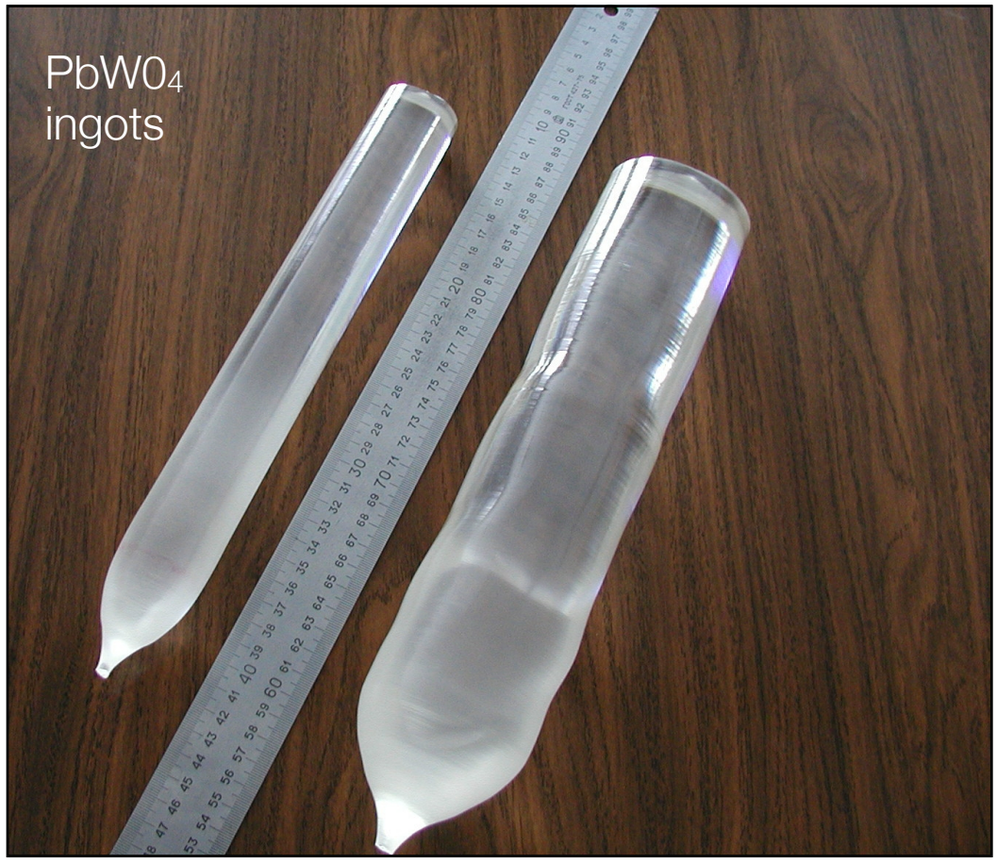


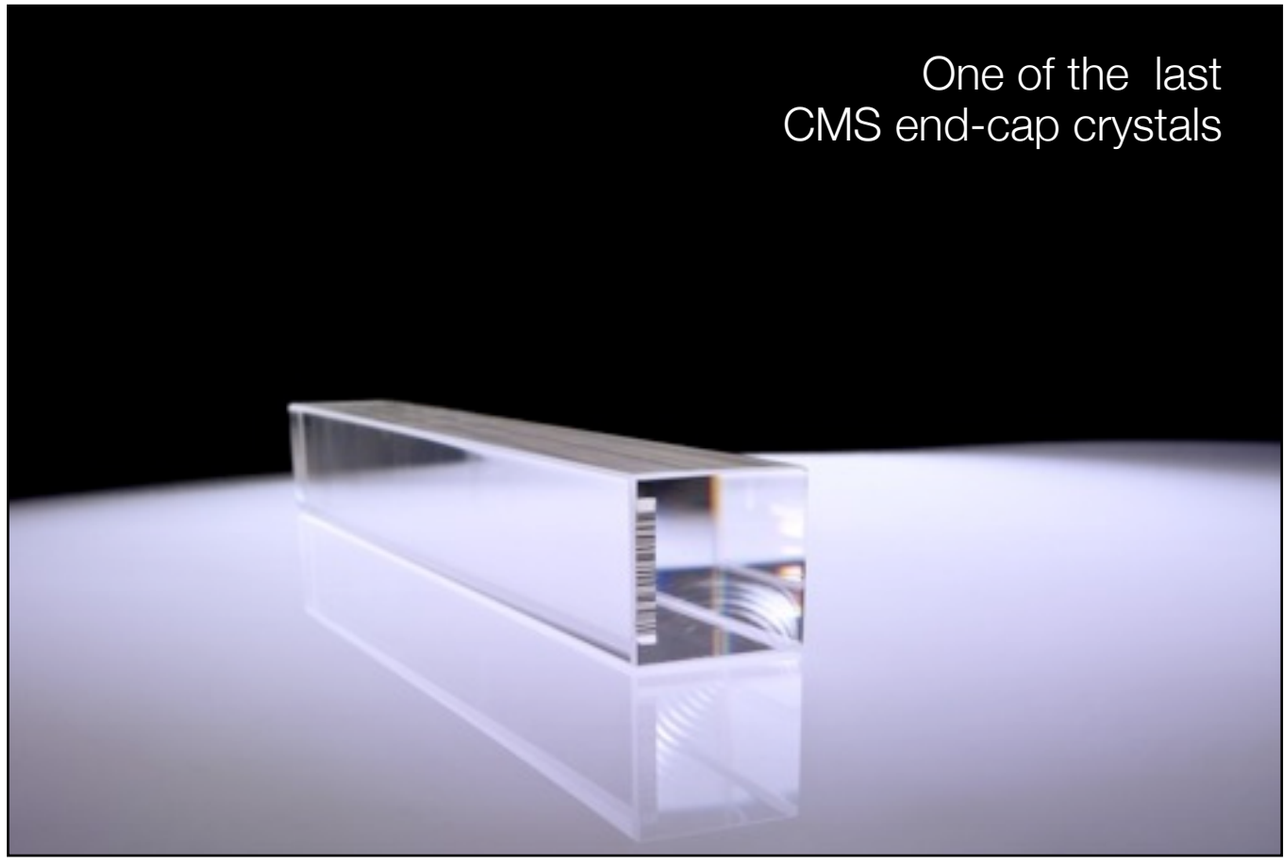
http://cern.ch/amoraes

Cintiladores: cristais inorgânicos



Example CMS
Electromagnetic Calorimeter





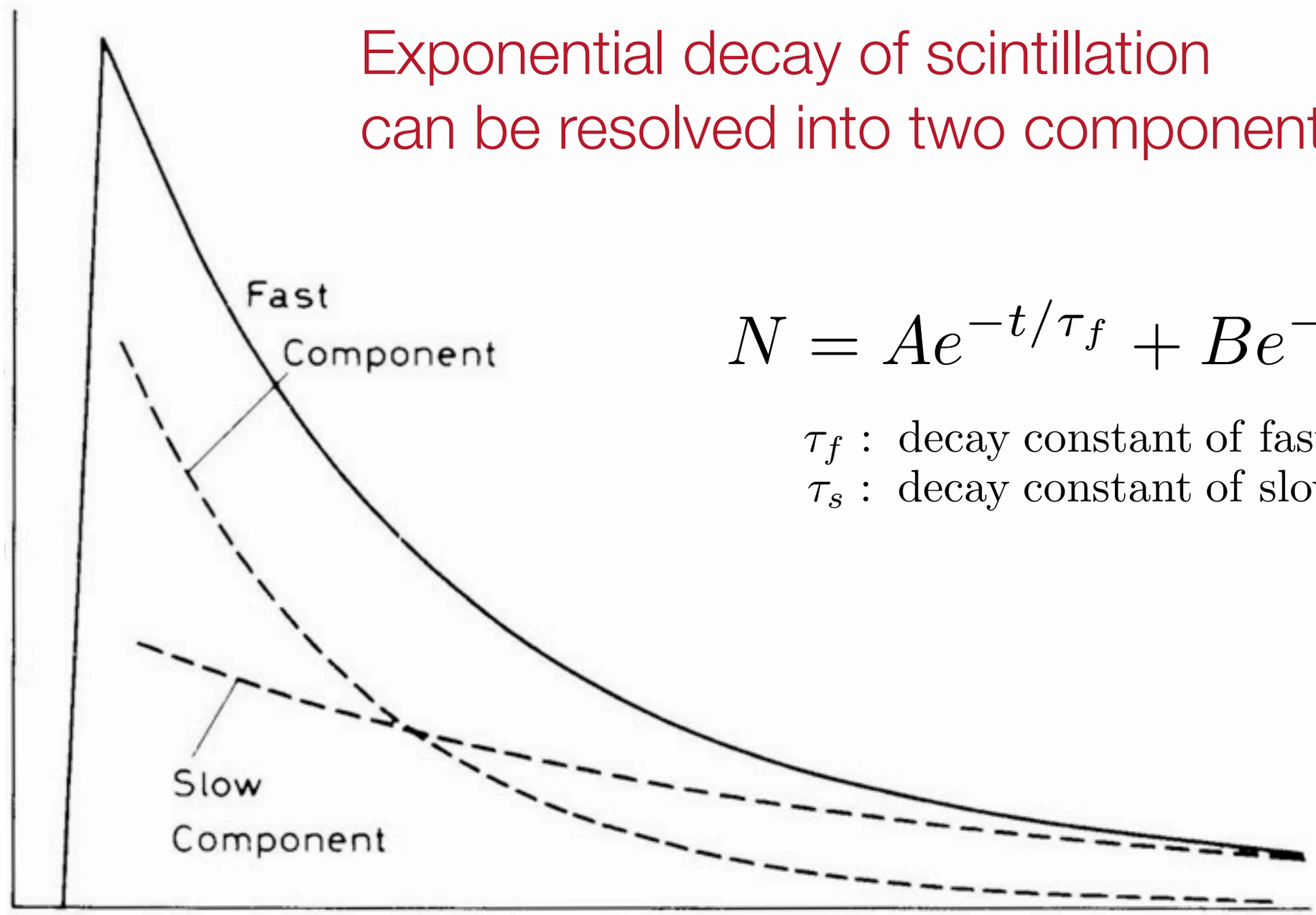
http://cern.ch/amoraes

Cintiladores: cristais inorgânicos



http://cern.ch/amoraes

Cristais inorgânicos: constante de tempo



Exponential decay of scintillation
can be resolved into two components ...

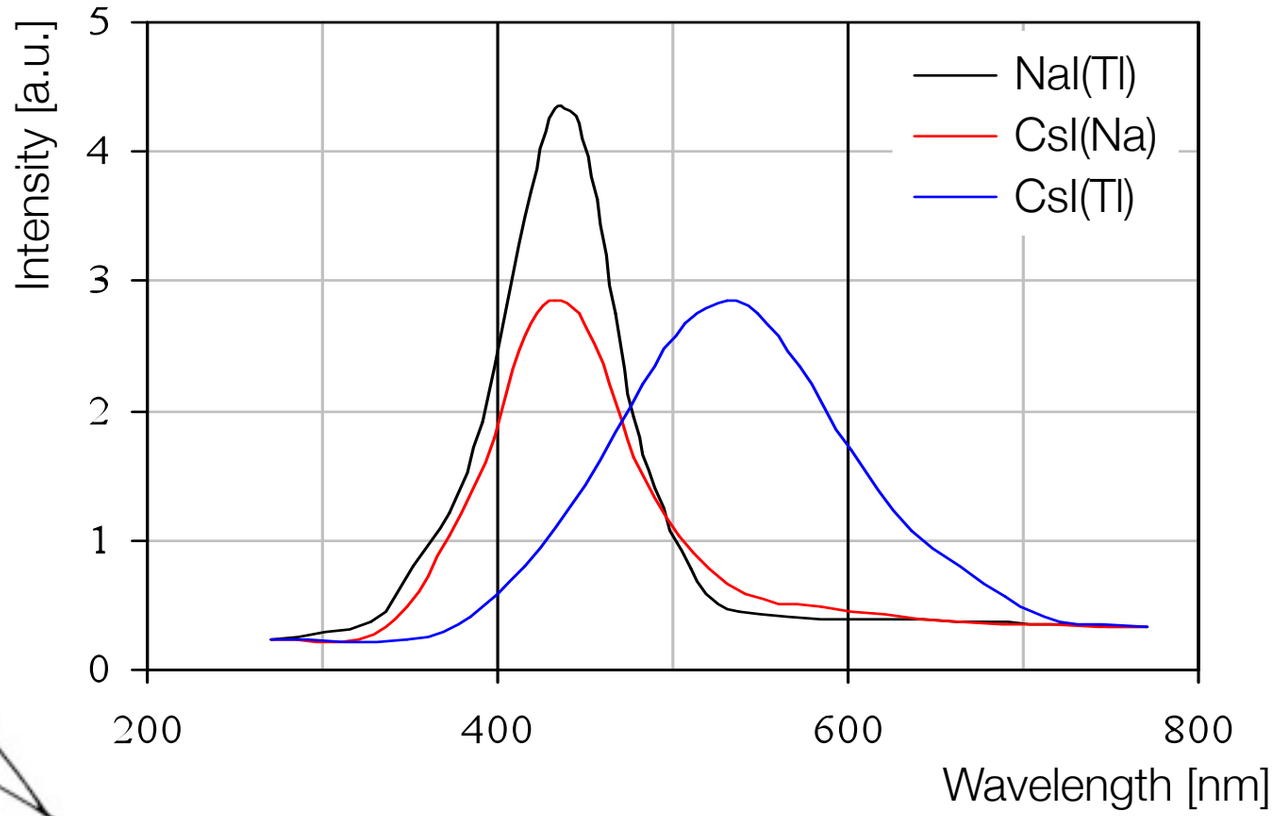
$$N = Ae^{-t/\tau_f} + Be^{-t/\tau_s}$$

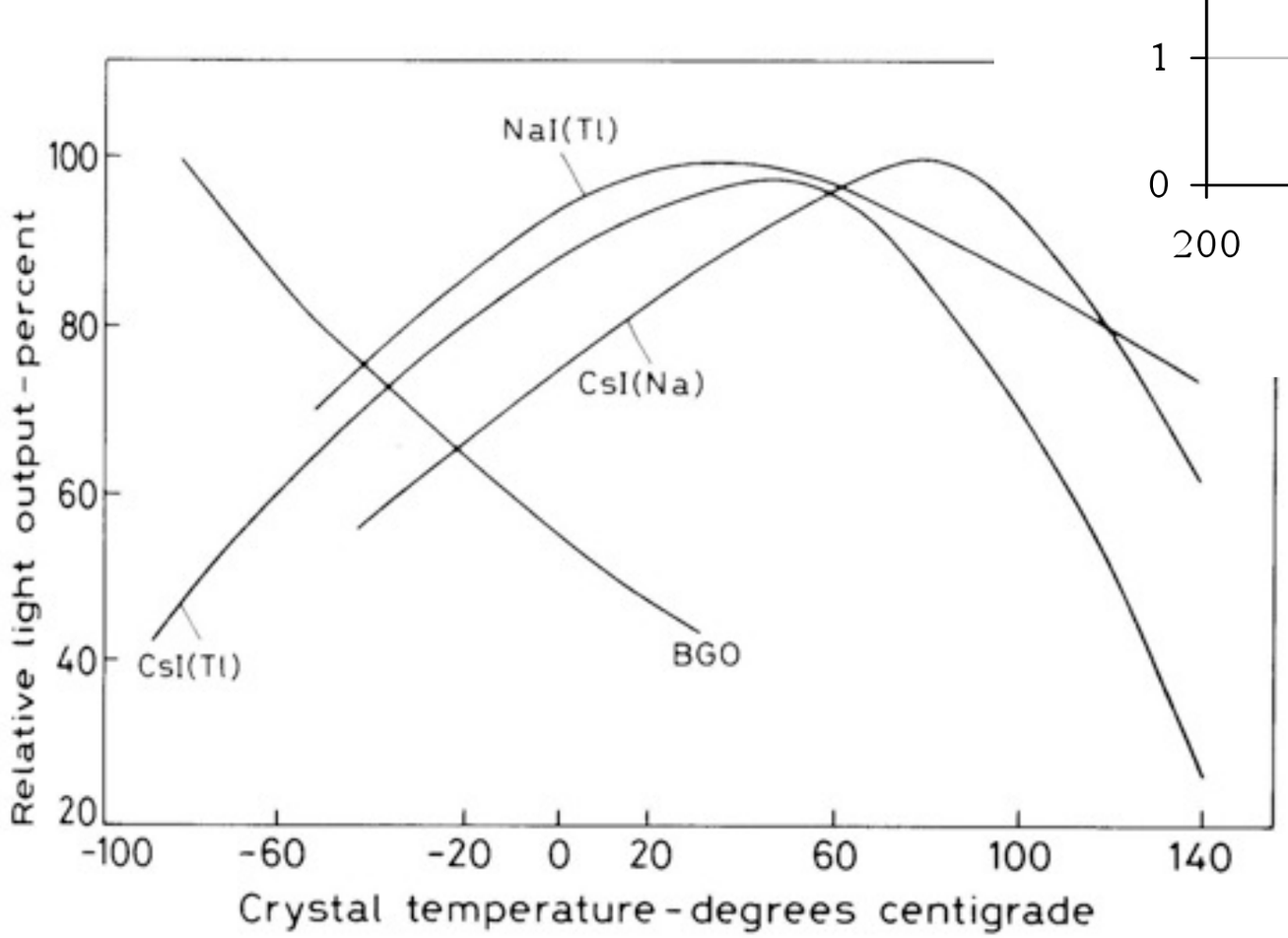
τ_f : decay constant of fast component
τ_s : decay constant of slow component

http://cern.ch/amoraes

Cristais inorgânicos: luz de saída

Scintillation Spectrum for NaI and CsI





Strong
Temperature Dependence
[in contrast to organic scintillators]

http://cern.ch/amoraes

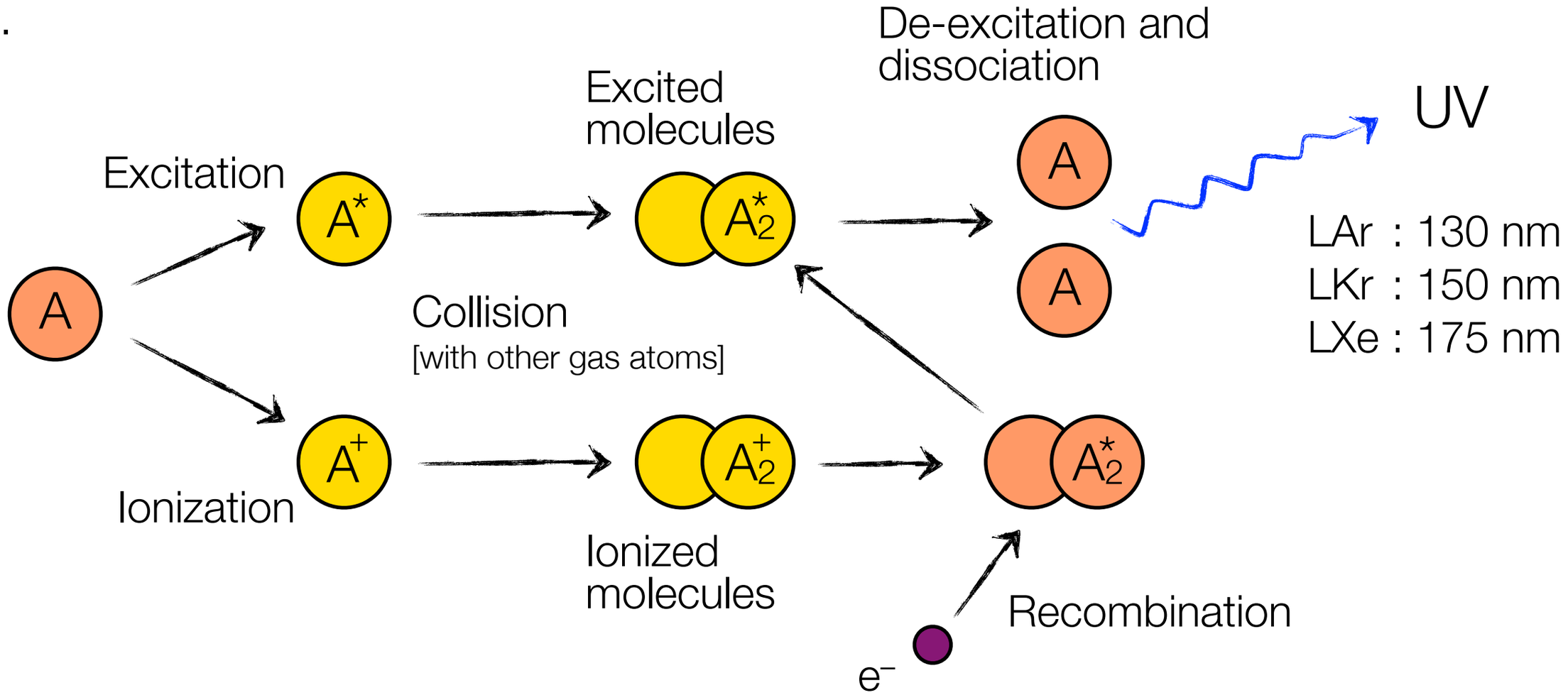
Cintiladores: gases nobres líquidos

Materials:

Helium (He)
Liquid Argon (LAr)
Liquid Xenon (LXe)
...

Decay time constants:

Helium : $\tau_1 = .02\ \mu s$, $\tau_2 = 3\ \mu s$
Argon : $\tau_1 \leq .02\ \mu s$



http://cern.ch/amoraes

Cintiladores: propriedades

Scintillator material	Density [g/cm^3]	Refractive Index	Wavelength [nm] for max. emission	Decay time constant [μs]	Photons/MeV
NaI	3.7	1.78	303	0.06	$8 \cdot 10^4$
NaI(Tl)	3.7	1.85	410	0.25	$4 \cdot 10^4$
CsI(Tl)	4.5	1.80	565	1.0	$1.1 \cdot 10^4$
$Bi_4Ge_3O_{12}$	7.1	2.15	480	0.30	$2.8 \cdot 10^3$
CsF	4.1	1.48	390	0.003	$2 \cdot 10^3$
LSO	7.4	1.82	420	0.04	$1.4 \cdot 10^4$
$PbWO_4$	8.3	1.82	420	0.006	$2 \cdot 10^2$
LHe	0.1	1.02	390	0.01/1.6	$2 \cdot 10^2$
LAr	1.4	1.29*	150	0.005/0.86	$4 \cdot 10^4$
LXe	3.1	1.60*	150	0.003/0.02	$4 \cdot 10^4$

* at 170 nm

http://cern.ch/amoraes

Cintiladores: propriedades

Numerical examples:

NaI(Tl)	λ_{max} = 410 nm; hν = 3 eV photons/MeV = 40000 τ = 250 ns
$PBWO_4$	λ_{max} = 420 nm; hν = 3 eV photons/MeV = 200 τ = 6 ns

Scintillator quality:

Light yield – ε_{SC} ≡ fraction of energy loss going into photons

e.g. NaI(Tl) : 40000 photons; 3 eV/photon ➛ $\varepsilon_{SC} = 4 \cdot 10^4 \cdot 3$ eV/10^6 eV = 11.3%

$PBWO_4$: 200 photons; 3 eV/photon ➛ $\varepsilon_{SC} = 2 \cdot 10^2 \cdot 3$ eV/10^6 eV = 0.06%

[for 1 MeV particle]

http://cern.ch/amoraes

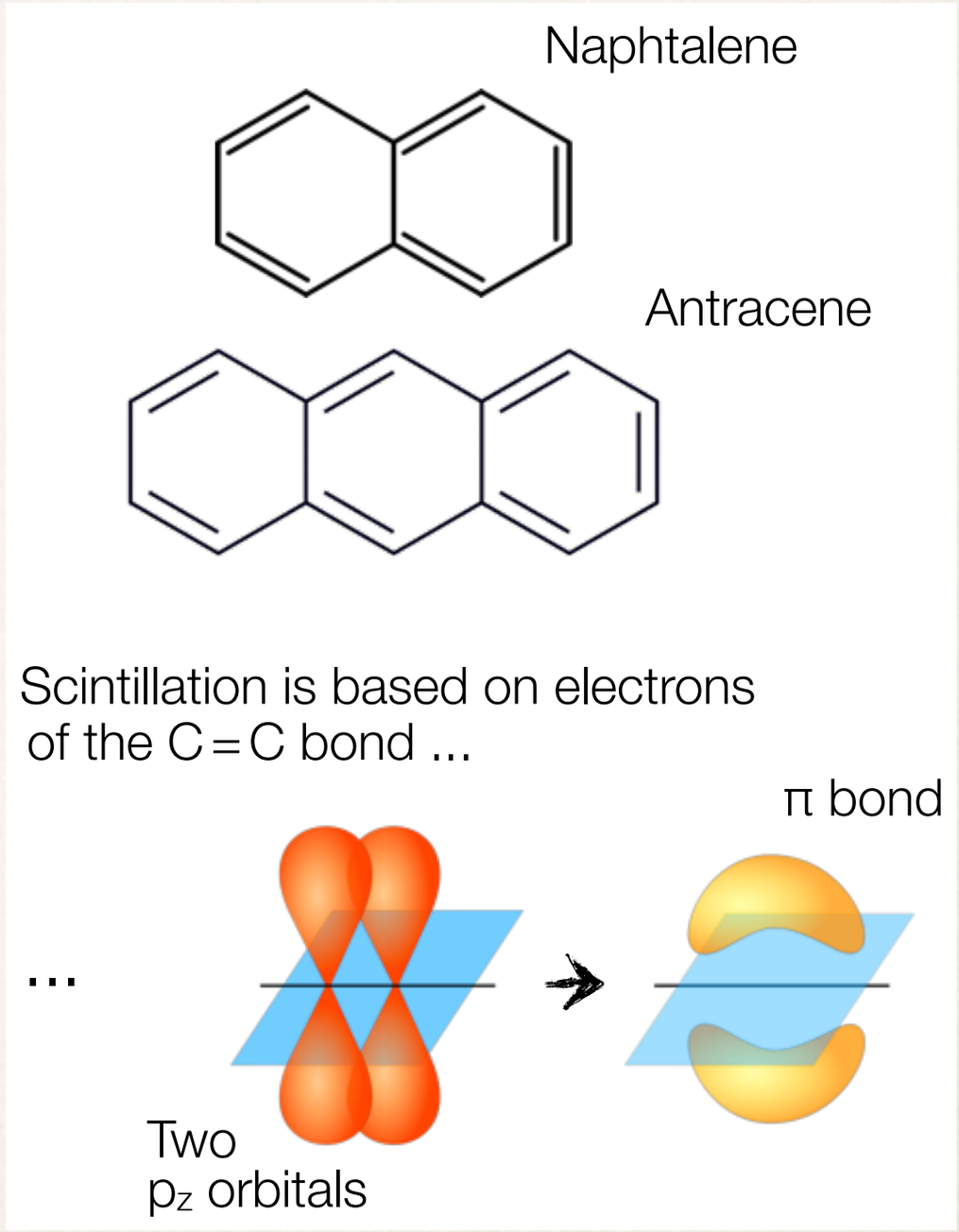
Cintiladores orgânicos

Compostos hidrocarbonetos aromáticos:

- *Naftaleno ($C_{10}H_8$)*
- *Antraceno ($C_{14}H_{10}$)*
- ....

Mecanismo:

- *Tempo de resposta muito rápido (~ns)!*
- *Transição de elétrons livres nos orbitais*
- *Luz de cintilação surge dos elétrons nos orbitais-π*



http://cern.ch/amoraes

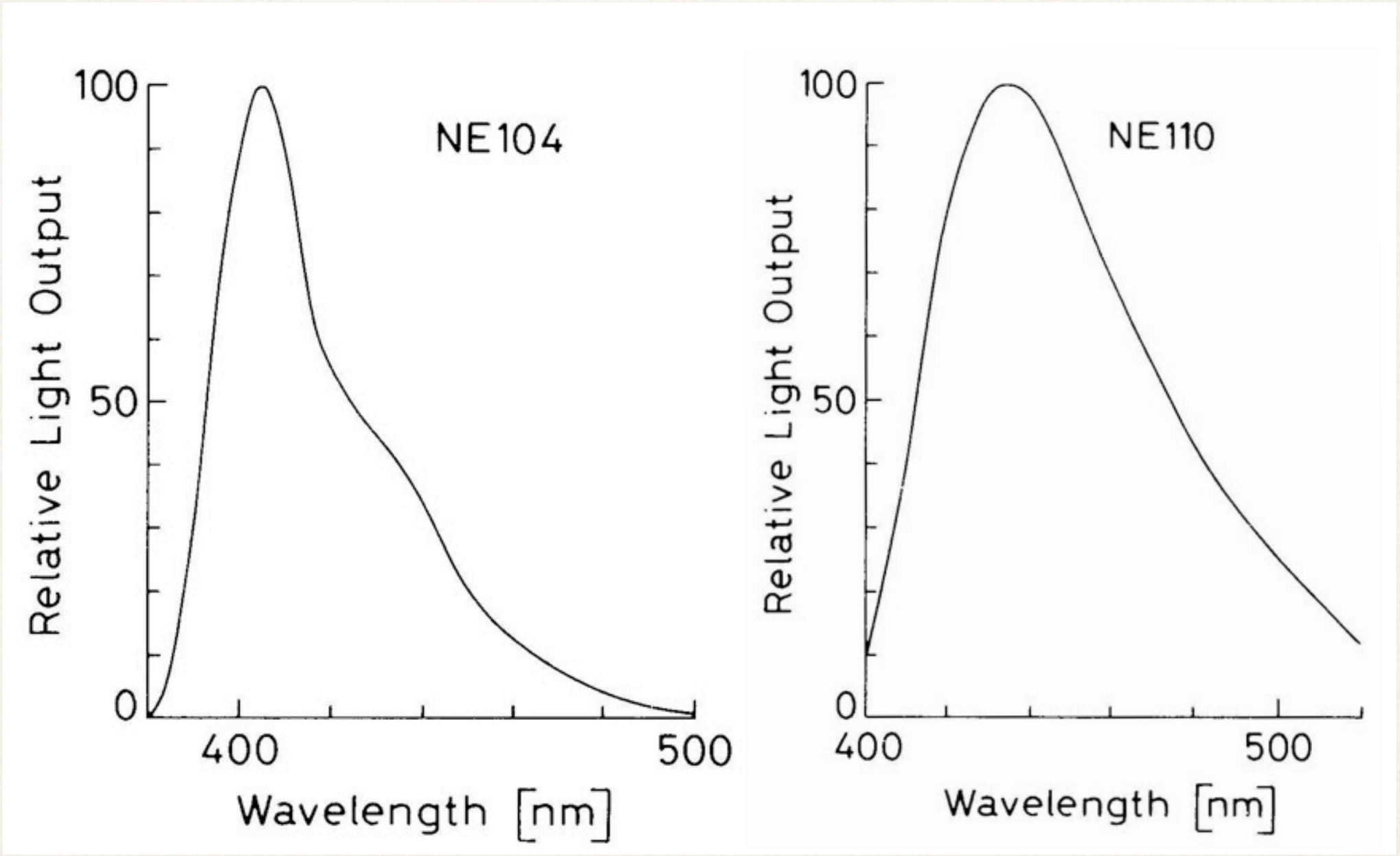
Cintiladores orgânicos

Scintillator material	Density [g/cm^3]	Refractive Index	Wavelength [nm] for max. emission	Decay time constant [ns]	Photons/MeV
Naphtalene	1.15	1.58	348	11	$4 \cdot 10^3$
Antracene	1.25	1.59	448	30	$4 \cdot 10^4$
p-Terphenyl	1.23	1.65	391	6-12	$1.2 \cdot 10^4$
NE102*	1.03	1.58	425	2.5	$2.5 \cdot 10^4$
NE104*	1.03	1.58	405	1.8	$2.4 \cdot 10^4$
NE110*	1.03	1.58	437	3.3	$2.4 \cdot 10^4$
NE111*	1.03	1.58	370	1.7	$2.3 \cdot 10^4$
BC400**	1.03	1.58	423	2.4	$2.5 \cdot 10^2$
BC428**	1.03	1.58	480	12.5	$2.2 \cdot 10^4$
BC443**	1.05	1.58	425	2.2	$2.4 \cdot 10^4$

* Nuclear Enterprises, U.K.
** Bicron Corporation, USA

http://cern.ch/amoraes

Cintiladores orgânicos



http://cern.ch/amoraes

Cintiladores: comparação

Inorganic Scintillators

Advantages	high light yield [typical; $\varepsilon_{sc} \approx 0.13$]
	high density [e.g. $PBWO_4$: 8.3 g/cm^3]
	good energy resolution
Disadvantages	complicated crystal growth
	large temperature dependence

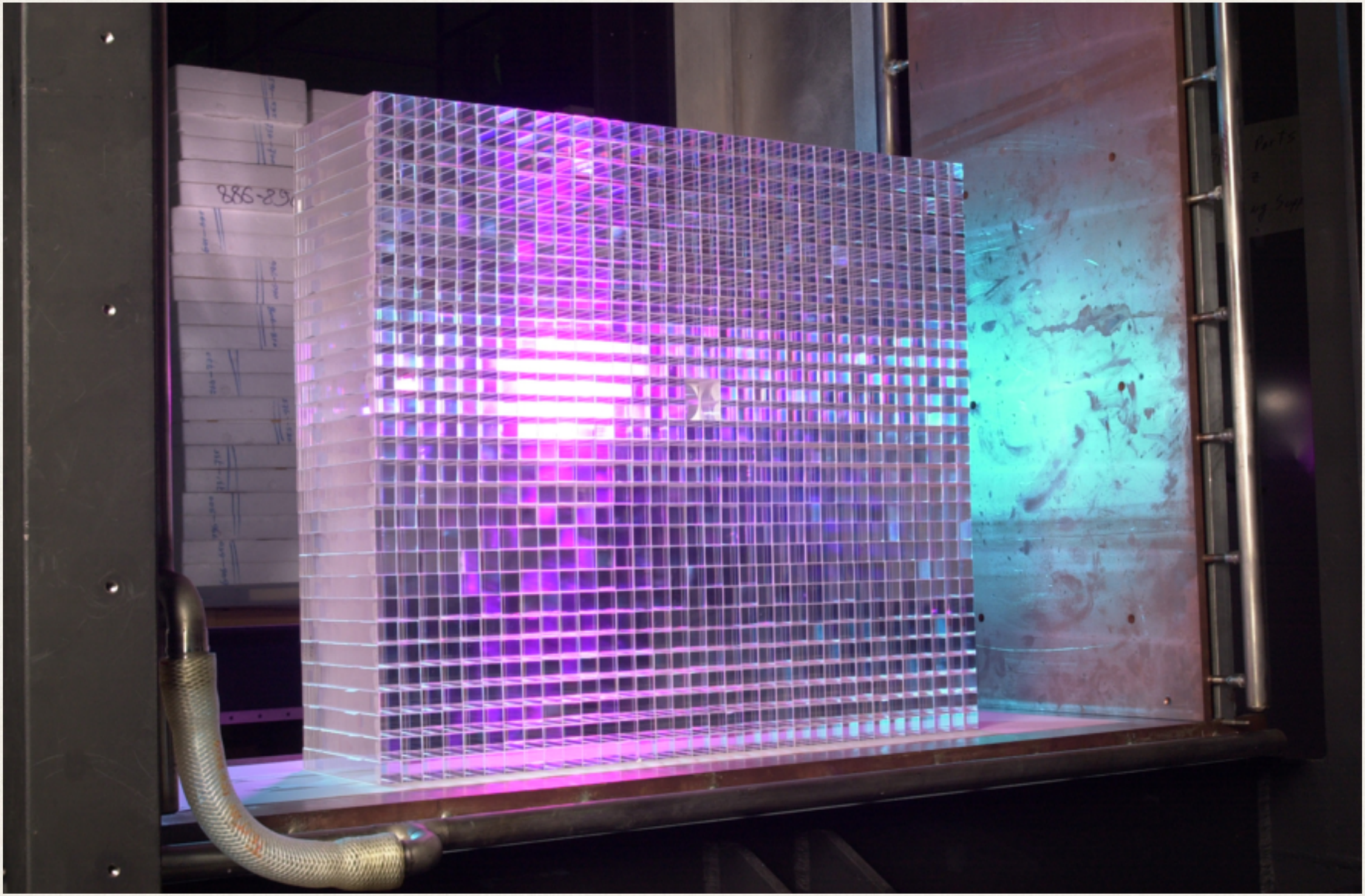
Expensive

Organic Scintillators

Advantages	very fast
	easily shaped
	small temperature dependence
	pulse shape discrimination possible
Disadvantages	lower light yield [typical; $\varepsilon_{sc} \approx 0.03$]
	radiation damage

Cheap

http://cern.ch/amoraes



http://cern.ch/amoraes

Extra...

http://cern.ch/amoraes

Seção de choque da interação

[Allison, Cobb; Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 30 (1980) 253]

Photo-absorption cross section

$$\frac{d\sigma}{dE} = \frac{z^2\alpha}{\beta^2\pi}\frac{\sigma_\gamma(E)}{EZ}\ln\left[(1-\beta^2\epsilon_1)^2+\beta^4\epsilon_2^2\right]^{-\frac{1}{2}}$$

Relativistic rise; polarization effect; saturation ...

Yields energy loss

dE/dx

$$+\frac{z^2\alpha}{\beta^2\pi}\frac{\sigma_\gamma(E)}{EZ}\ln\left(\frac{2mc^2\beta^2}{E}\right)$$

Rutherford scattering; photoelectric emission

$$+\frac{z^2\alpha}{\beta^2\pi}\frac{1}{E^2}\int_0^E\frac{\sigma_\gamma(E')}{Z}dE'$$

Compton scattering; Prod. of δ-electrons

$$+\frac{z^2\alpha}{\beta^2\pi}\frac{1}{N_\alpha\hbar c}\left(\beta^2-\frac{\epsilon_1}{|\epsilon|^2}\right)\Theta$$

Cherenkov & Transition Radiation

Particle charge

Density of medium

Phase of $1-\varepsilon_1\beta^2+i\varepsilon_2\beta^2$

http://cern.ch/amoraes

Equação Bethe-Bloch a partir de dσ/dE

Integrate cross section over all γ-energies:

$$\frac{dE}{dx} = \int_0^\infty EN \frac{d\sigma}{dE} dE$$

Electron density within medium

Energy of exchanged photon; E = ħω

$$\frac{d\sigma}{dE} = \frac{z^2\alpha}{\beta^2\pi}\frac{\sigma_\gamma(E)}{EZ}\ln\left[(1-\beta^2\epsilon_1)^2+\beta^4\epsilon_2^2\right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$+ \frac{z^2\alpha}{\beta^2\pi}\frac{\sigma_\gamma(E)}{EZ}\ln\left(\frac{2mc^2\beta^2}{E}\right) \quad (2)$$

$$+ \frac{z^2\alpha}{\beta^2\pi}\frac{1}{E^2}\int_0^E \frac{\sigma_\gamma(E')}{Z}dE' \quad (3)$$

$$+ \cdots$$

Bethe-Bloch results as an approximation:

$$\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2}\cdot\ln\frac{2mc^2\beta^2\gamma^2 T_{\max}}{I^2}$$

(2) (1) (3)

http://cern.ch/amoraes