

## Na primeira análise:

Seção de choque do espalhamento de um  $\mu$  por uma molécula de álcool isopropílico ( $Z = 36$ ).

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{Z\alpha\hbar c}{2T(T + 2mc^2) \sin^2 \frac{\theta}{2}} \right)^2 \left( (mc^2)^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} + (T + mc^2)^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (1)$$



$E_\mu$ (MeV)	l (cm)
10	0.18
50	3.6
100	11.6
500	175

Energia dos muons ~ 10 a 100 MeV

## Na primeira análise:

Seção de choque do espalhamento de um  $\mu$  por uma molécula de álcool isopropílico ( $Z = 36$ ).

**Problema!!!**

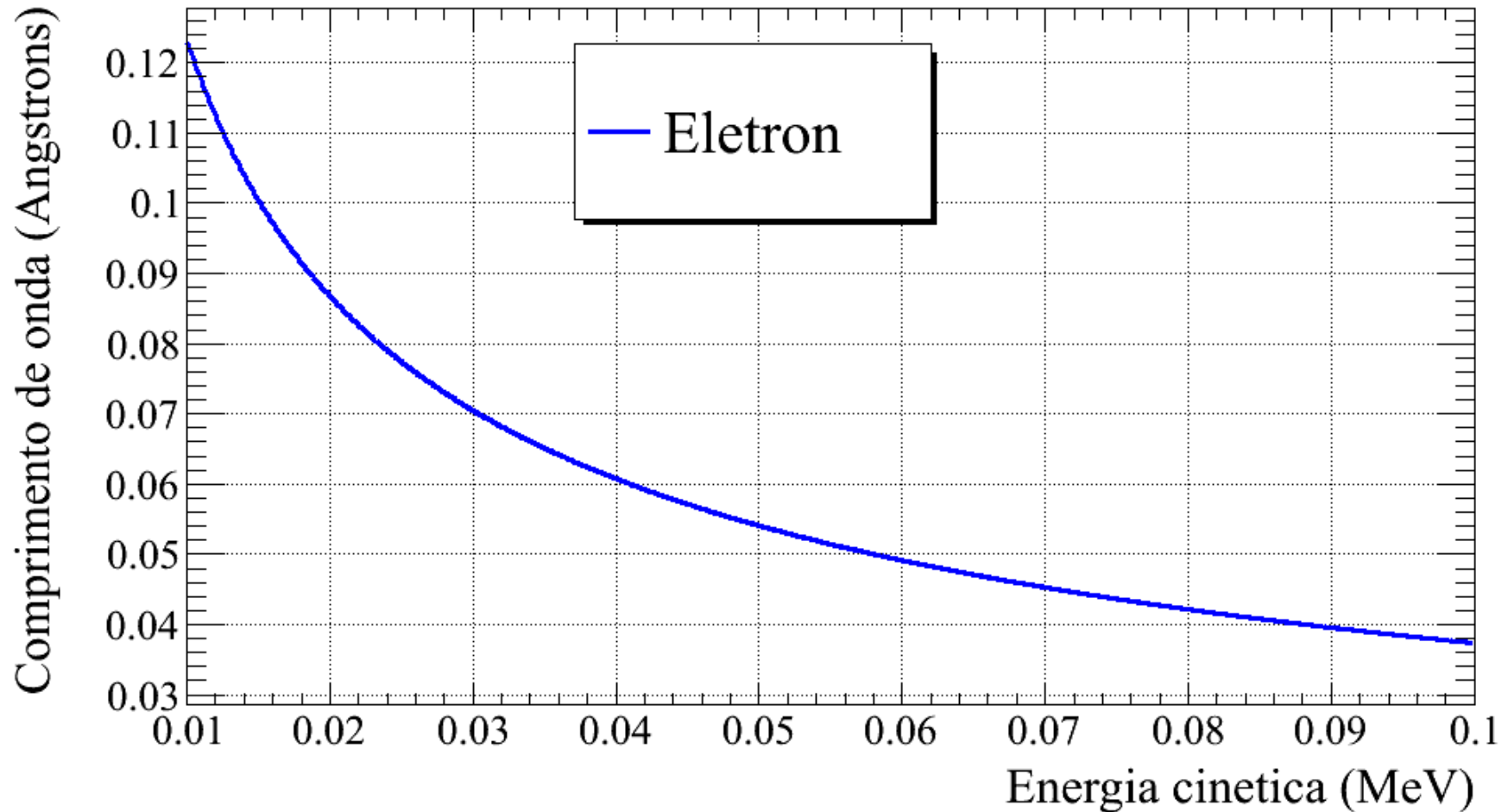
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{Z\alpha\hbar c}{2T(T + 2mc^2) \sin^2 \frac{\theta}{2}} \right)^2 \left( (mc^2)^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} + (T + mc^2)^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (1)$$



$E_\mu$ (MeV)	l (cm)
10	0.18
50	3.6
100	11.6
500	175

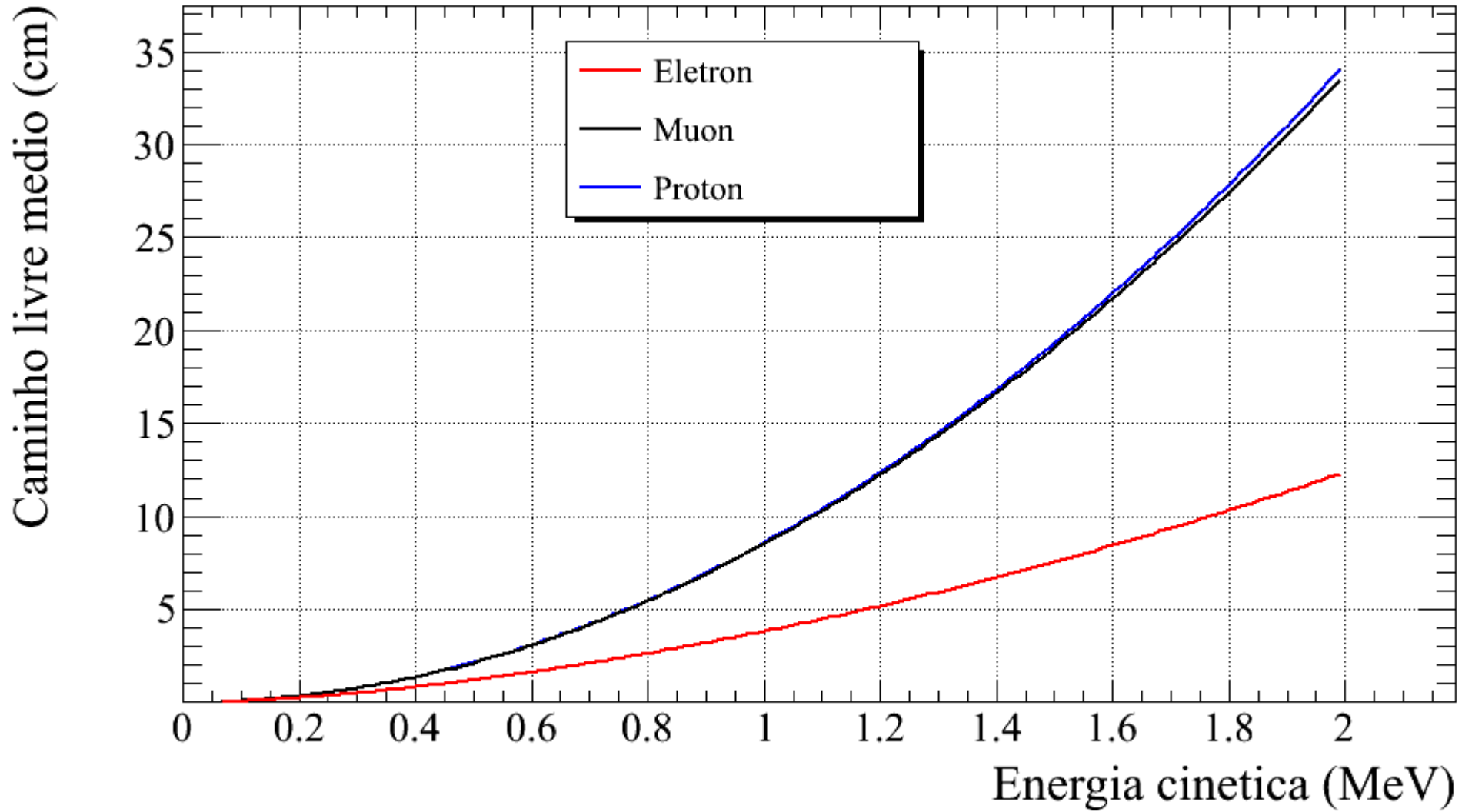
Energia dos muons ~ 10 a 100 MeV

(comprimento de onda)  $0.01 \text{ \AA} \ll 1.5 \text{ \AA}$  (tamanho da molécula)

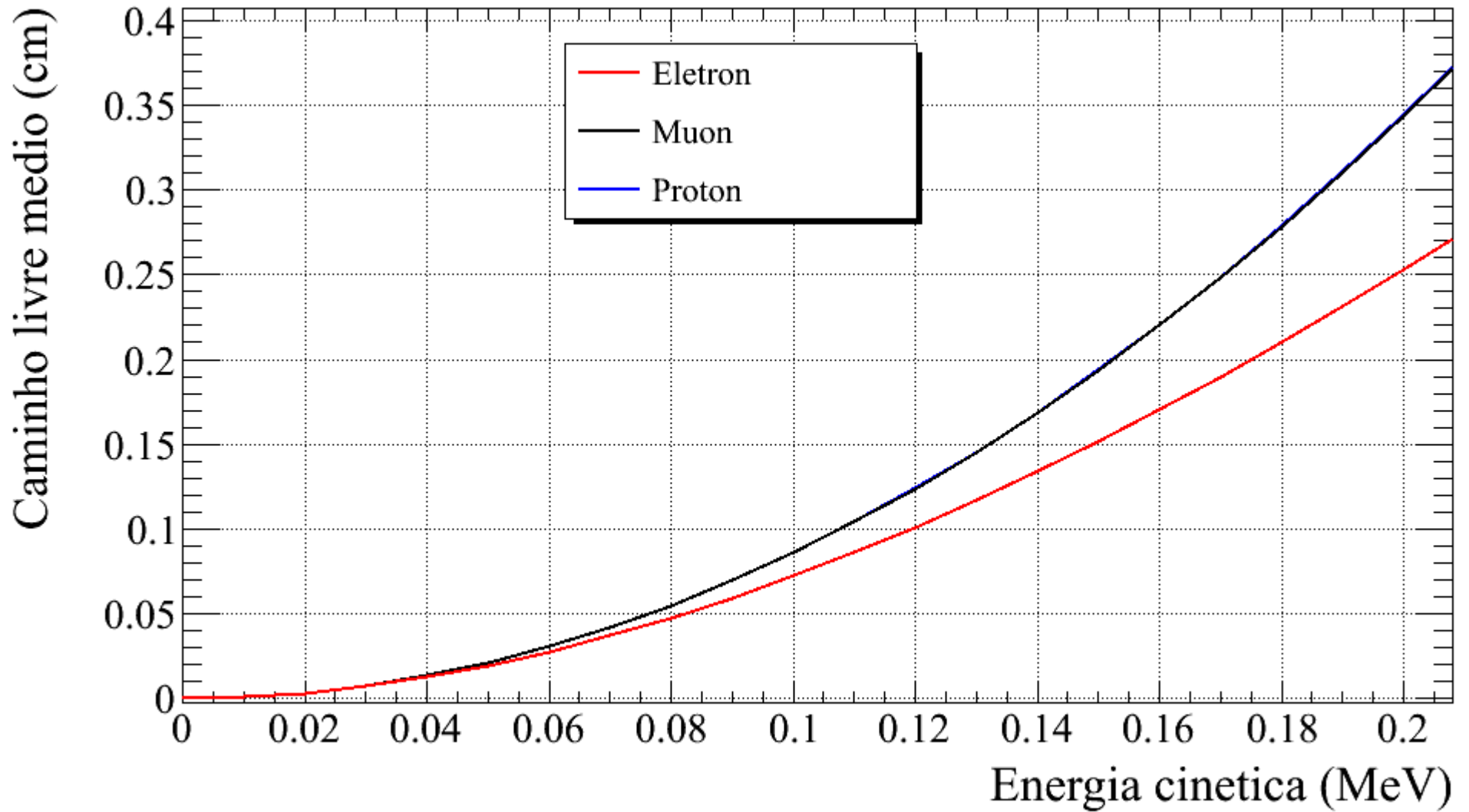


Elétron/Muon enxerga o átomo  $\rightarrow Z = 6!!!$

# Caminho livre médio usando $Z = 6$



# Caminho livre médio usando $Z = 6$



**Antes**  
energia ~ 50 MeV

**Agora**  
energia ~ 0.1 MeV

Incompatível com PDG  
energia ~ 4 GeV

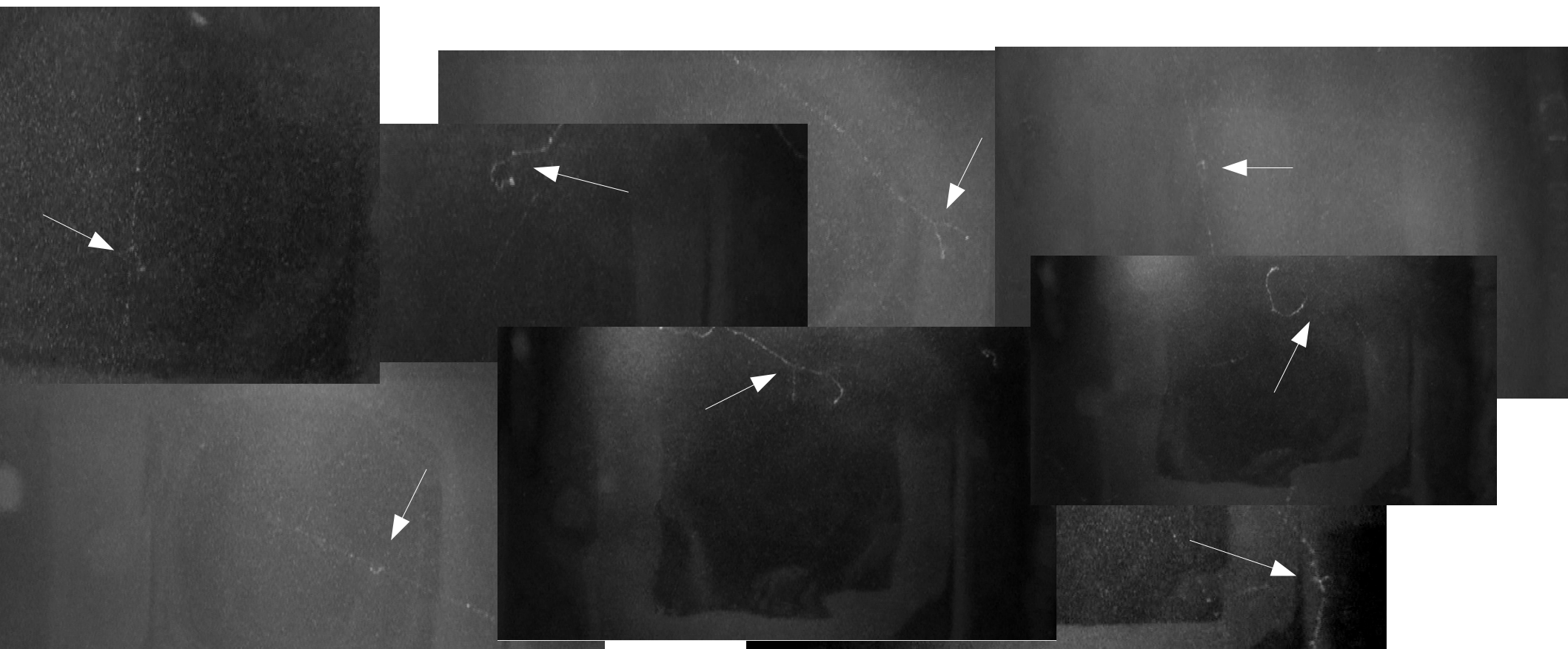
Partículas de baixa energia  
devem vir de outra fonte que  
não raios cósmicos...

## Knock-on electrons!!!

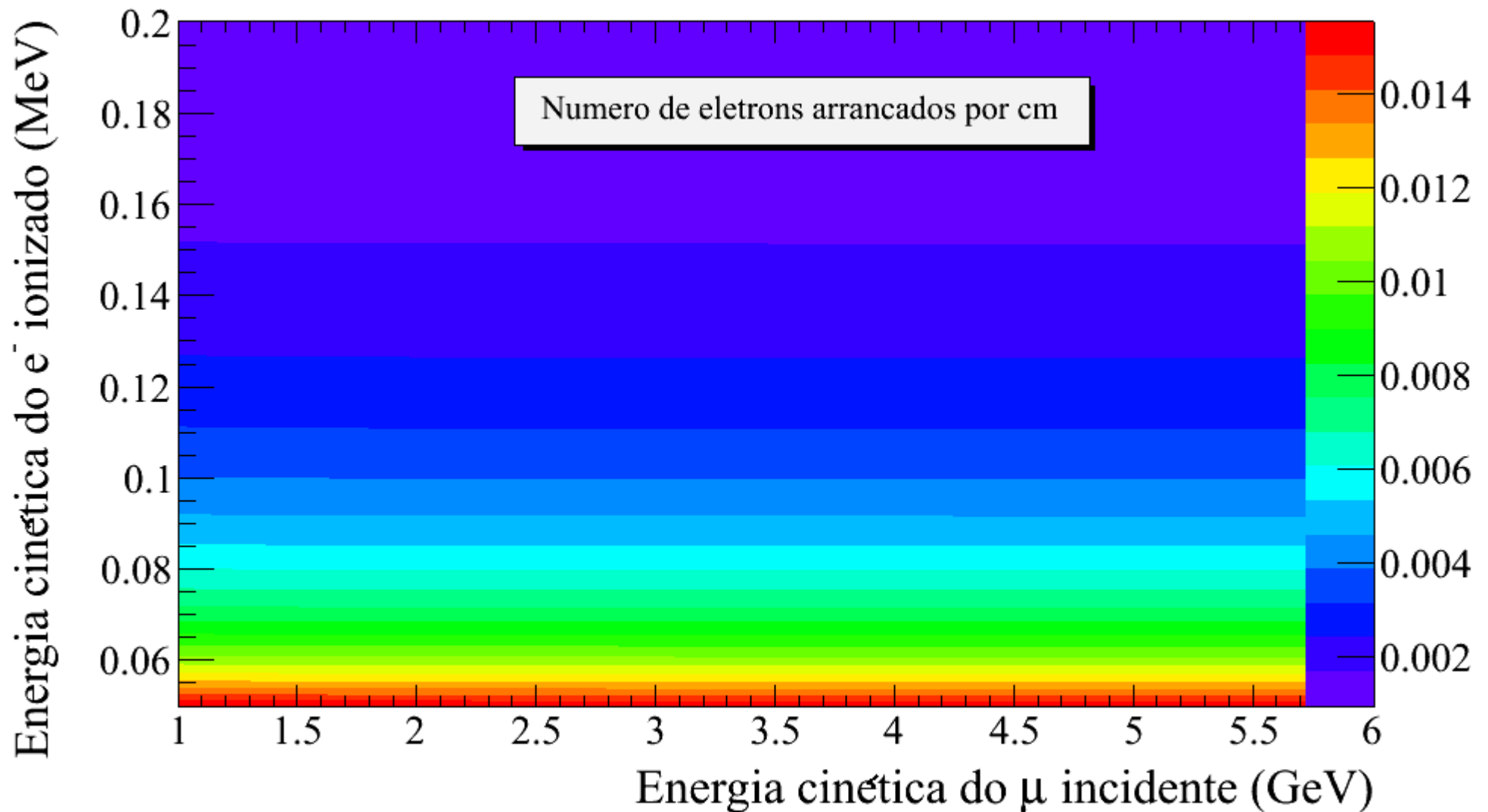
**27.2.3. Energetic knock-on electrons ( $\delta$  rays) :** The distribution of secondary electrons with kinetic energies  $T \gg I$  is [4]

$$\frac{d^2 N}{dT dx} = \frac{1}{2} K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \frac{F(T)}{T^2} \quad (27.5)$$

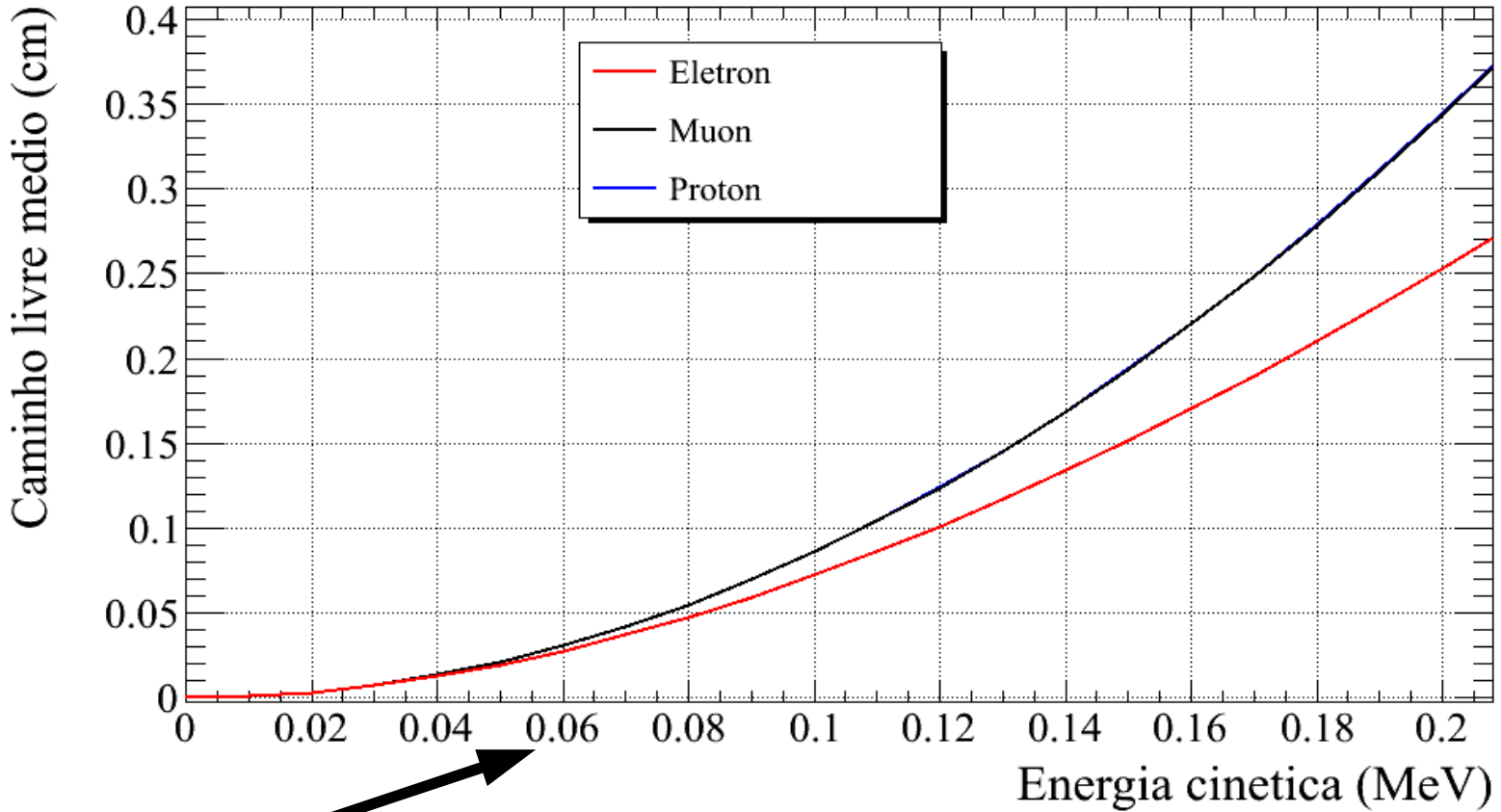
for  $I \ll T \leq T_{\max}$ , where  $T_{\max}$  is given by Eq. (27.2). Here  $\beta$  is the velocity of the primary particle. The factor  $F$  is spin-dependent, but is about unity for  $T \ll T_{\max}$ . For



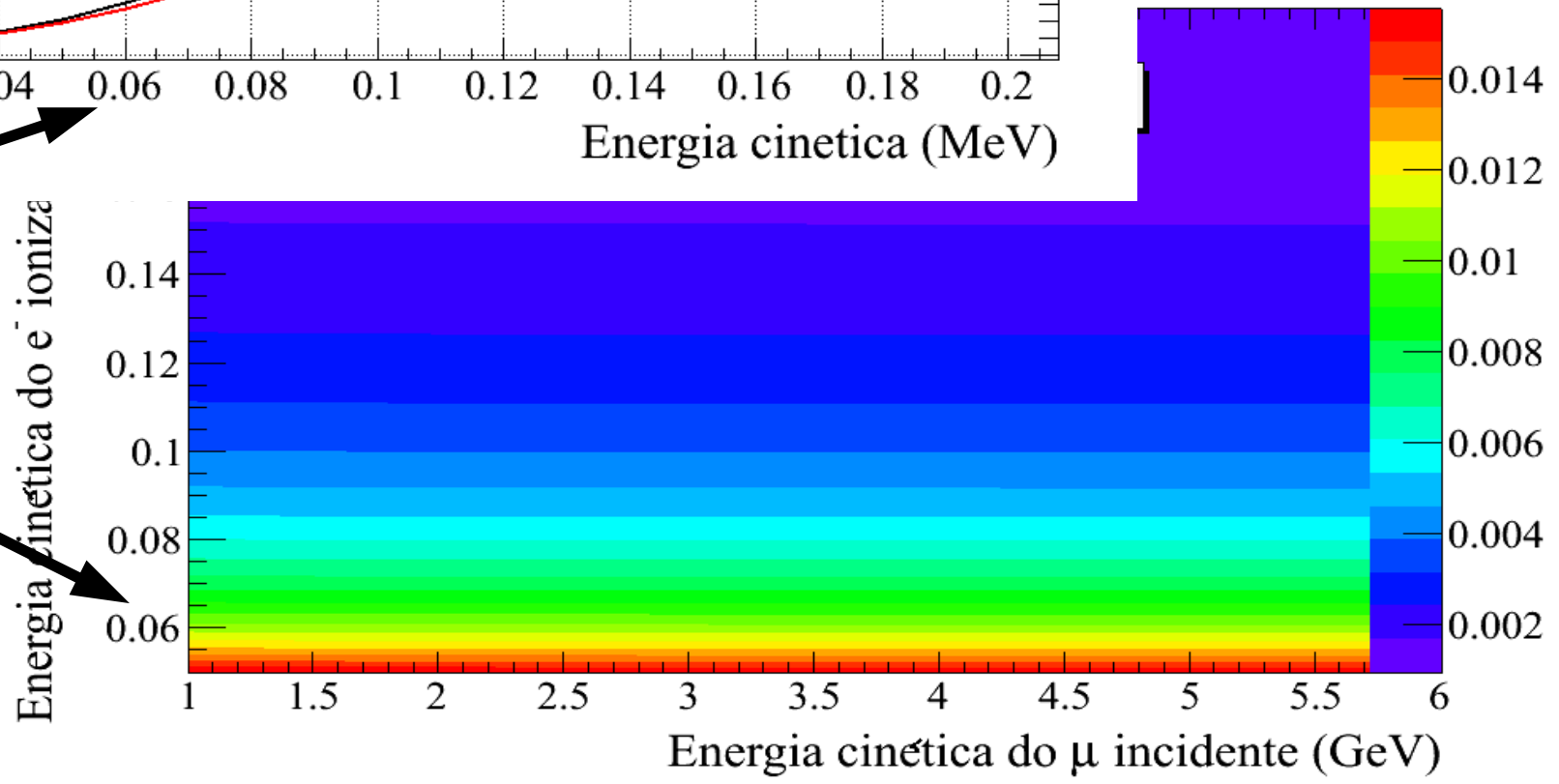
# Distribuição de energia de elétrons arrancados



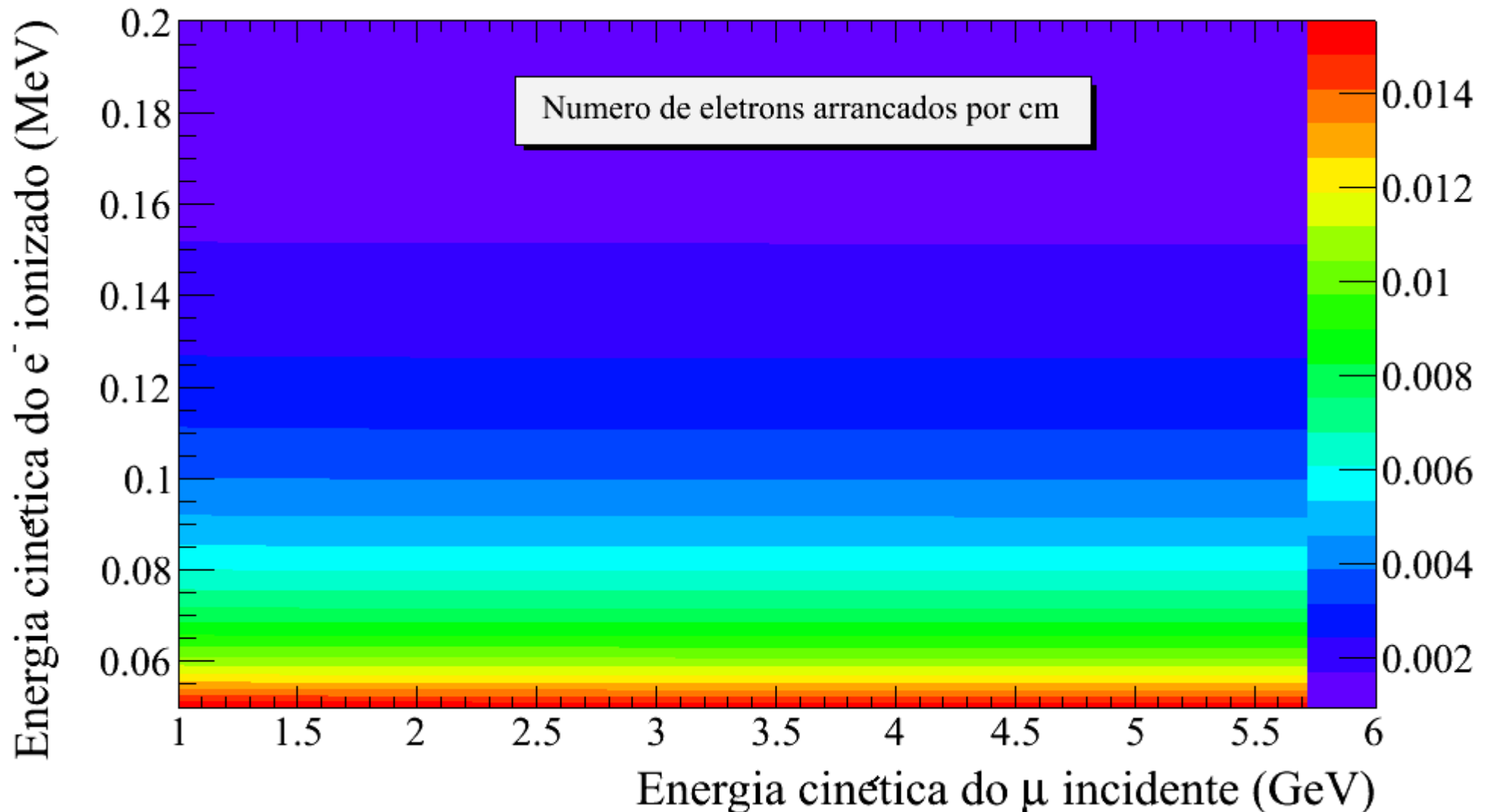




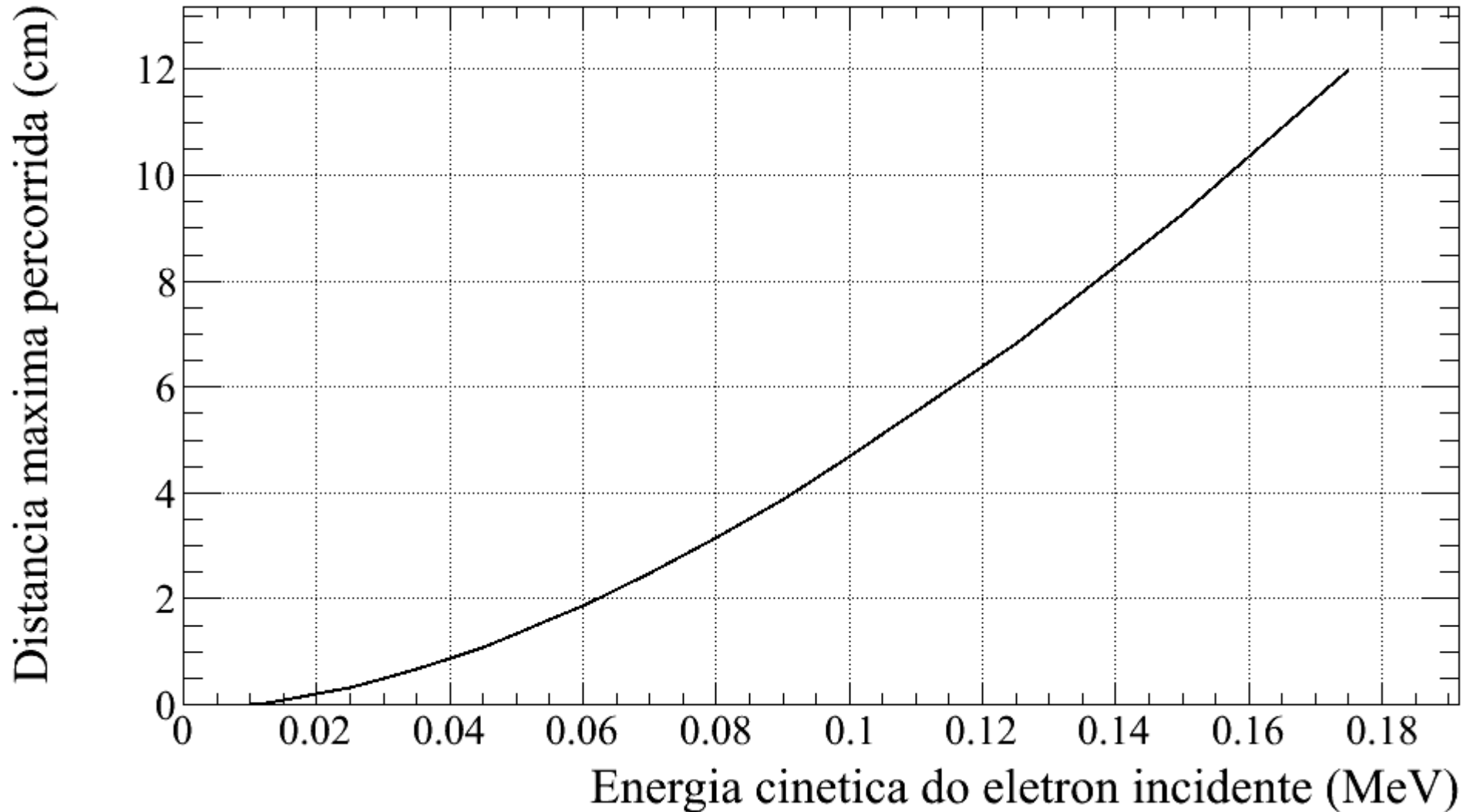
Elétrons arranca-  
dos por muons  
de 4 GeV têm  
caminho livre  
médio compati-  
vel com obser-  
vado!!



**Problema:** o número de elétrons arrancados cresce para elétrons com baixa energia: seria esperado observar  *muito* mais elétrons com  $E < 0.05$  MeV



**Tudo bem:** elétrons pouco energéticos andam pouquíssimo!  
*talvez* sejam os pontos brilhantes na trajetória... (Franciole)



**Surpresa?** distância máxima percorrida é compatível com o observado!!

# Conclusão: três análises distintas levam à mesma conclusão: knock-on electrons

- Caminho livre médio  $l = 0.22 \text{ cm} \rightarrow E = 0.18 \text{ MeV}$
- Distância máxima\*  $d_{\text{max}} = 2.54 \text{ cm} \rightarrow E = 0.07 \text{ MeV}$
- Knock-on elétrons por muons de 4 GeV  $E = 0.05 \text{ MeV}$

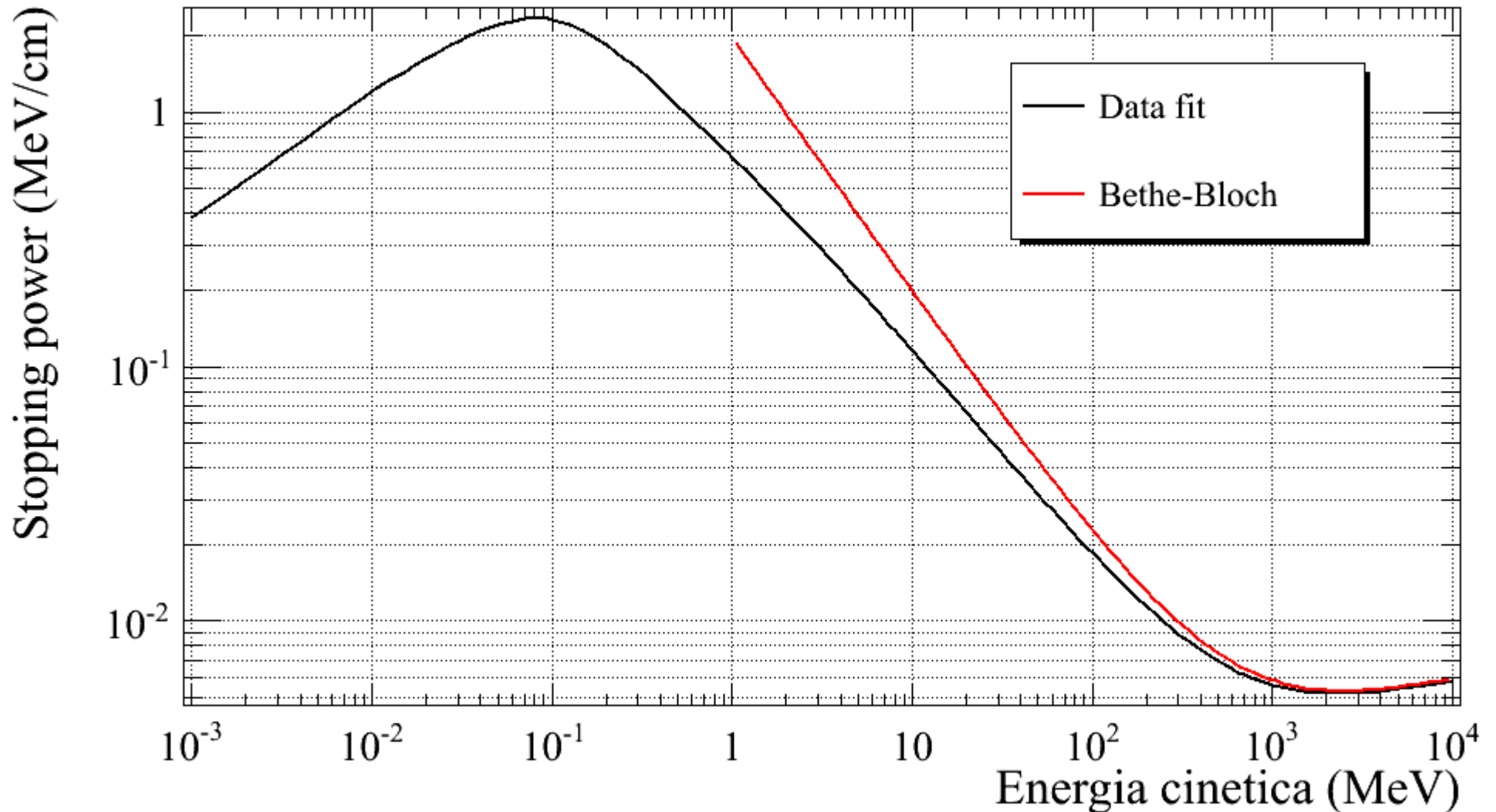


\*elétron em propano

Como calcular a distância máxima se Bethe-Bloch quebra  $< 6$  MeV?

**R:** Dados reais! [physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html](http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html)

(elétron em propano = o mais próximo que eu achei de álcool isopropílico)



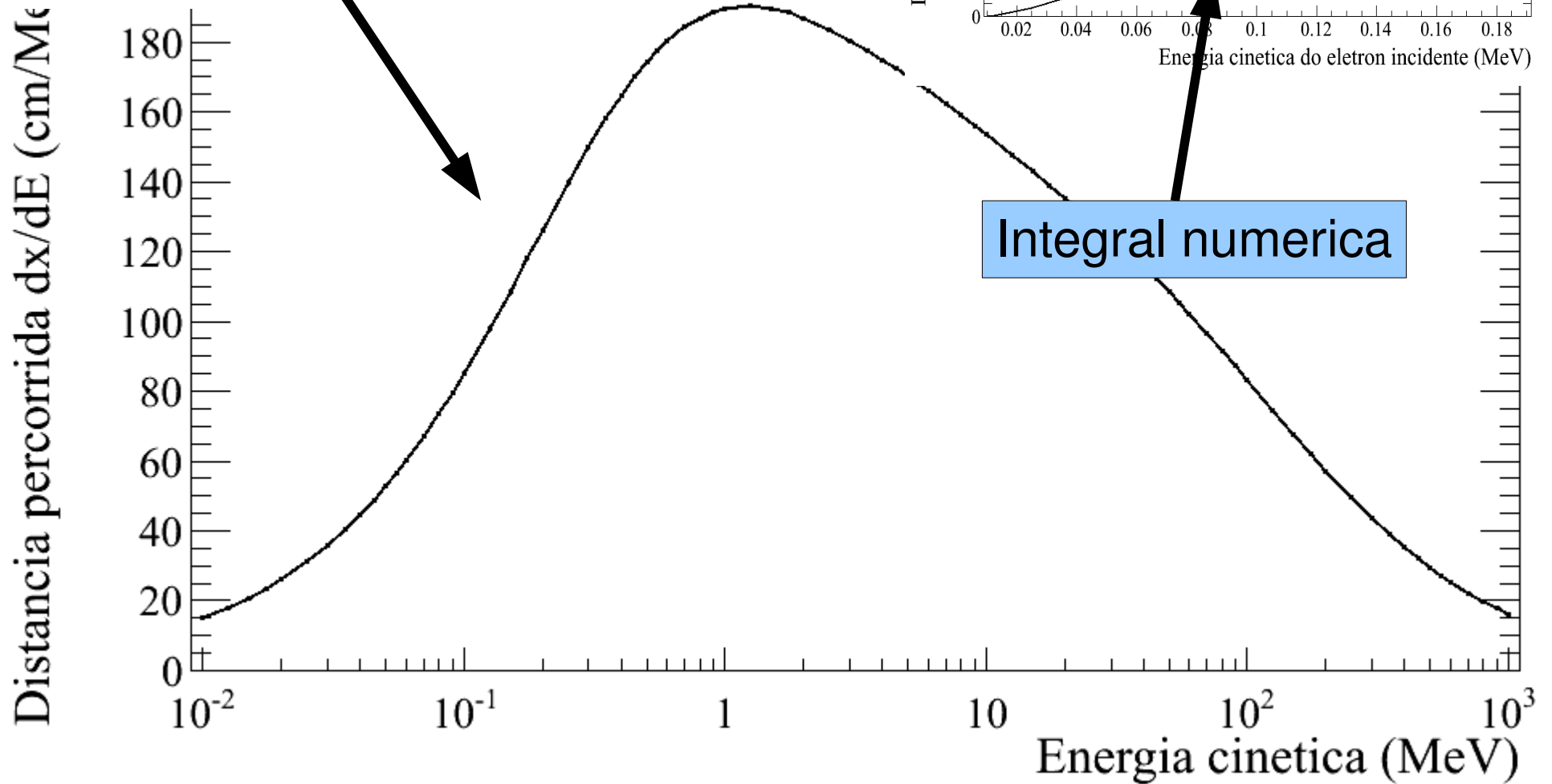
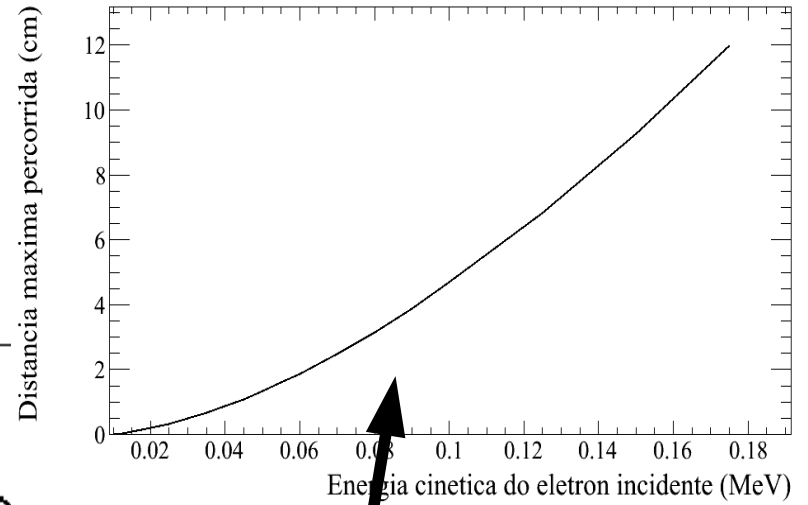
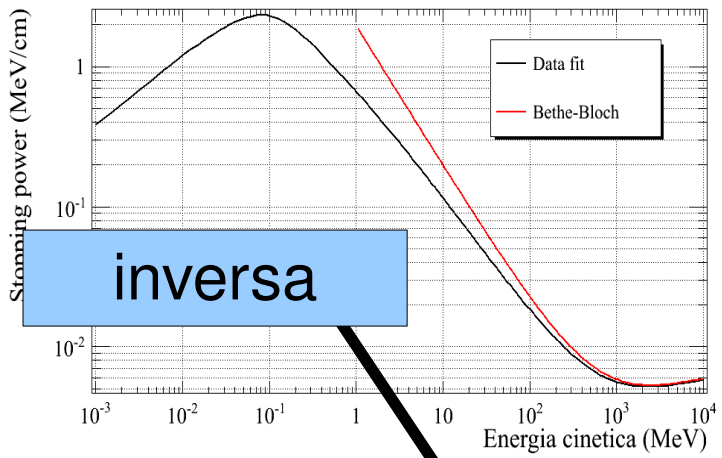




Photo: Steve M. Miller

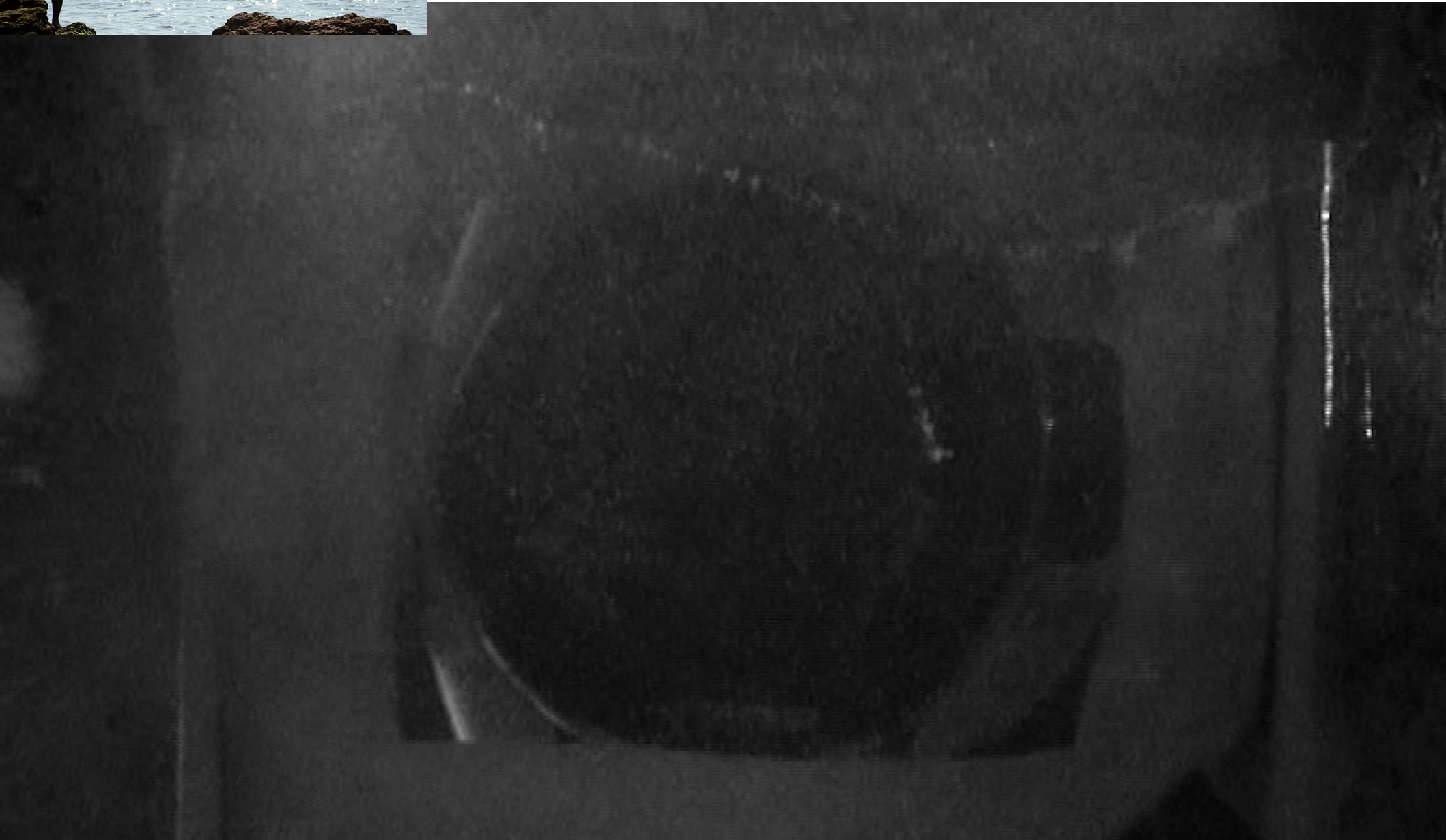
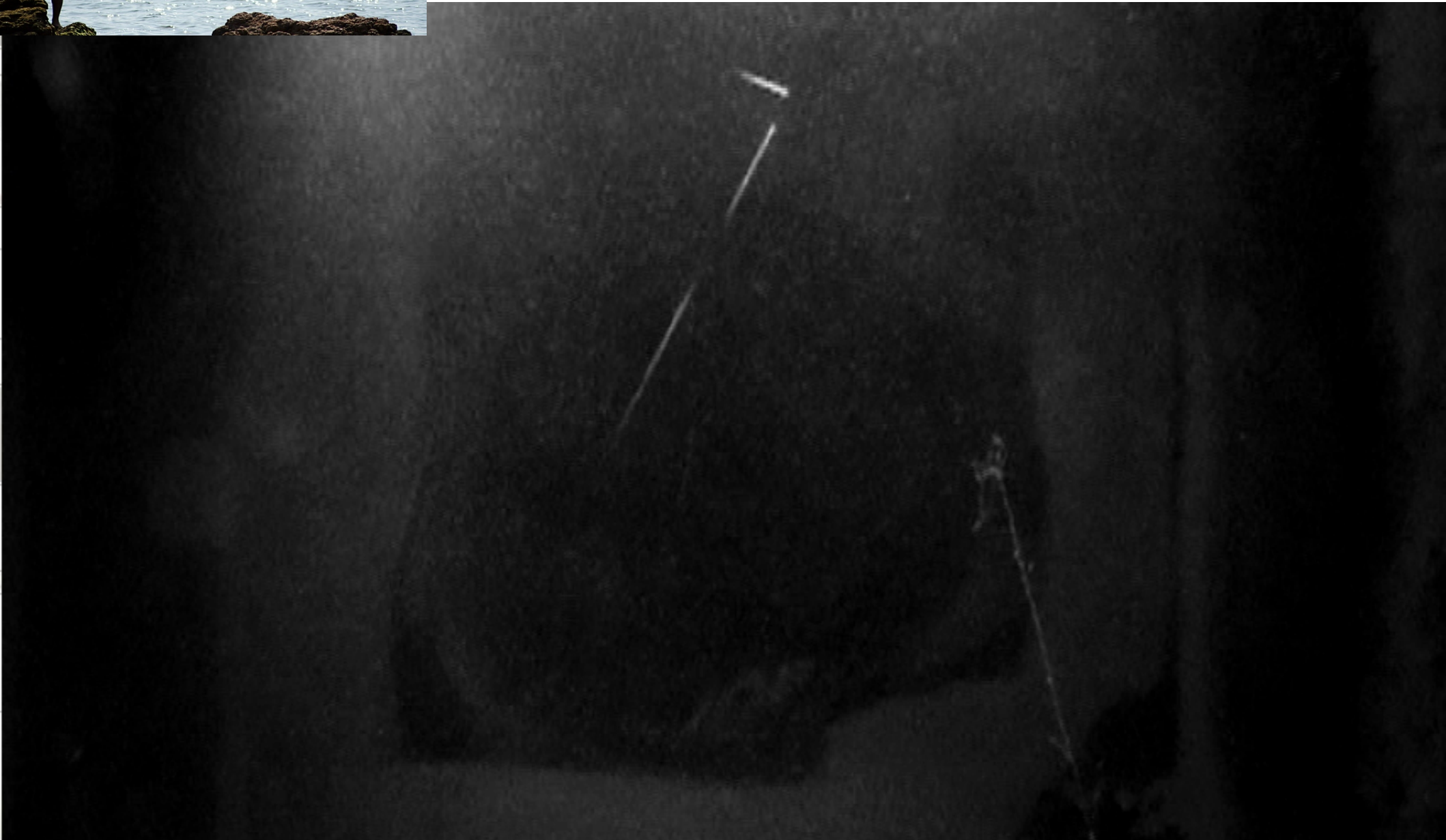






Photo: Steve M. Miller





## *Knock-on electrons resolve:*

- o problema apontado pelo Pedro do ângulo sólido
- porque os traços *começam e terminam* (Franciole)

## Questão:

- e o traço do muon primário...?

Video de um traço <http://sites.google.com/site/caiolagana/Home/cloud-chamber>

## Referências

- PDG, NIST (National Institute of Standards and Technology)

## Créditos

- Caio Laganá [caiolagana@gmail.com](mailto:caiolagana@gmail.com)