

# Projeto de Física Computacional

## **Simulação de um chuveiro electromagnético produzido por um fóton**

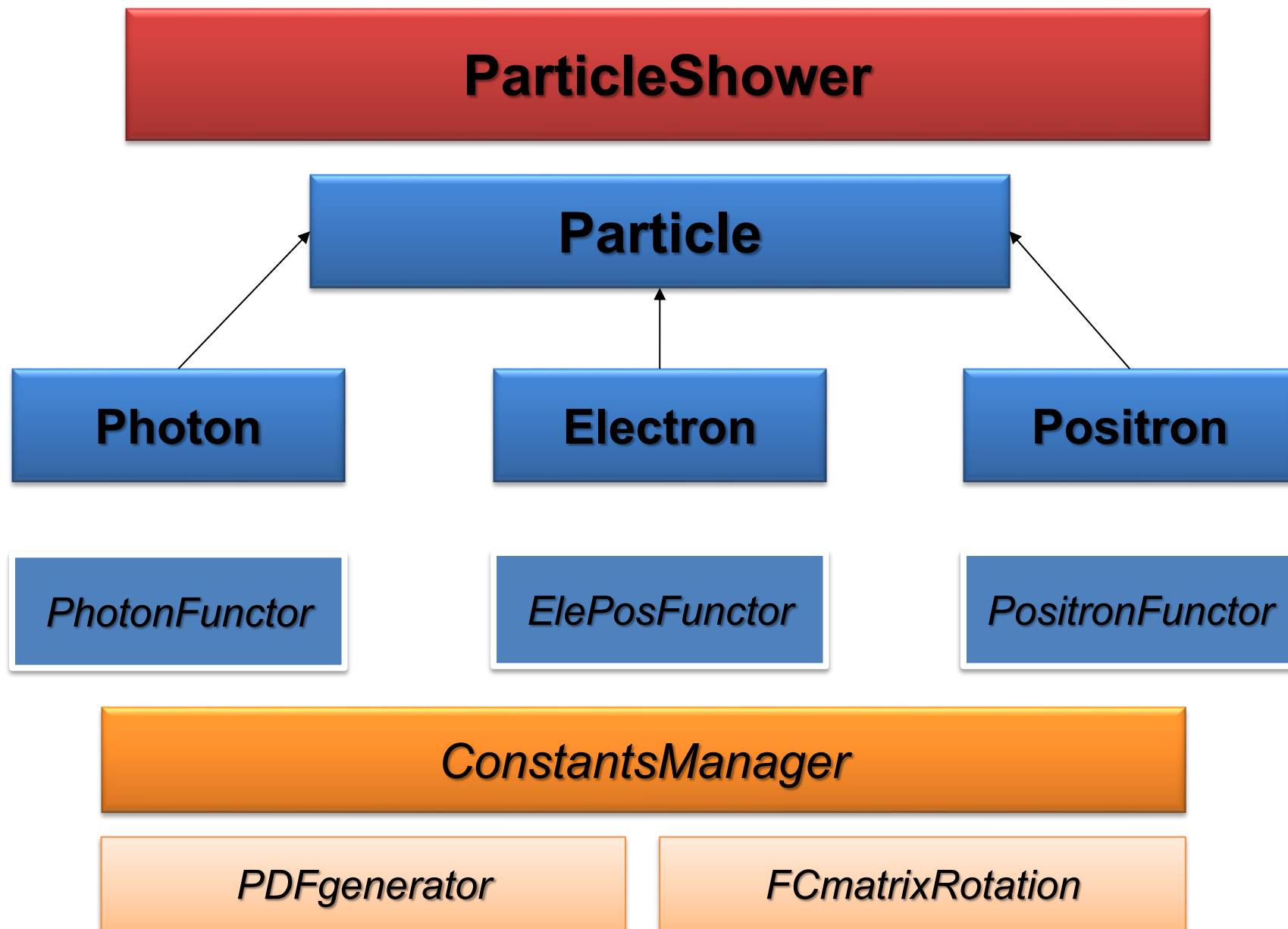
*Grupo C02*

*Autores:*

Filipe Miguel, nº 84381

João Bravo, nº 84390

# Hierarquia de Classes



# Particle

- A Classe Particle é puramente abstrata, e encontra-se reimplementada nas classes derivadas Photon, Electron e Positron.
- Tem os métodos usuais de Set e Get, reimplementados nas classes derivadas para lidar com variáveis físicas (Energia e Momento Linear)
- Possui o método puramente virtual Interact(), reimplementado mais uma vez nas classes derivadas que retorna uma lista de Particle. Este método é responsável por calcular as Interações que a partícula sofre, retornando as partículas resultantes da sua aniquilação na lista de Particle. Recebe como argumento uma referência de booleano, que introduz a opção de não apagar a partícula após ter sido chamado o método Interact, otimizando o programa.
- Cada uma das classes derivadas possui membros static Functor, que contém as expressões matemáticas, que são compartilhadas por todos os objetos dessa mesma classe, otimizando assim a compilação das fórmulas, já que este processo realiza-se apenas uma vez por execução do programa.

# Functors e outros objetos

- Há 3 classes Functor, que contêm todas as expressões matemáticas usadas ao longo do Programa (guardadas sob a forma de objetos de ROOT, TF1 e TF2).
- Contêm ainda objetos PDFgenerator para gerar distribuições aleatórias segundo as pdfs dadas (através do Método Acceptance-Rejection), objetos Integrator para realizar integrais numéricos e um objeto ConstantsManager, responsável pela gestão de todas as constantes físicas.
- Por fim têm métodos SetEnergy, que definem os parâmetros necessários nas equações físicas para o correto funcionamento do programa.
- Foi implementado um método Simpson Adaptive na classe Integrator de modo a integrar funções com singularidades de forma otimizada.
- O objeto ConstantsManager guarda todas as constantes físicas num ficheiro .data, tendo ainda a possibilidade de adicionar facilmente outros Elementos que não o Alumínio à base de dados de forma **Interativa** durante a execução do programa, possibilitando a simulação da Cascata em meio materiais de vários Elementos.

# Particle Shower

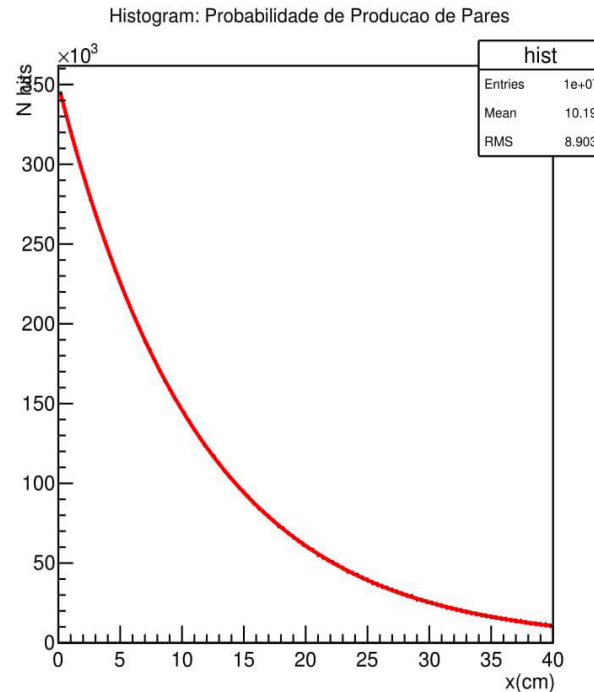
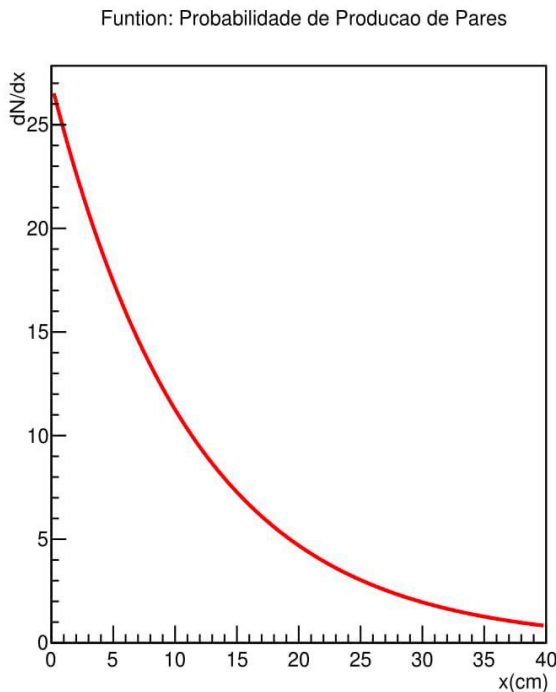
- Esta é a classe responsável pela propagação das partículas, contendo métodos que fazem a representação da cascata criada em 2 ou 3 dimensões e/ou recolhem data sobre a mesma.
- Desta forma, contém todos os objetos necessários a esses procedimentos, entre eles os de Root (cFCGraphics, TLine, TPolyLine3D, TPaveText, TLatex, TLegend, TAxis3D, TH1F, ....)
- O constructor da classe contém 4 flags (*bool*) que permitem escolher o tipo de Informação que queremos retirar:
  - **Print**: print info in bash;
  - **Draw**: draw Shower in 2 or 3 dimensions;
  - **Hist**: Gather data in TH1Fs;
  - **File**: Save data in file;
- Estas podem também ser alteradas depois da instanciação do objeto por métodos Set (que incluem um SetSeed e um SetElement do meio material).

# Particle Shower

- Os métodos AddParticle e AddZPhoton permitem adicionar partículas a uma lista interna que depois é gerida pelo método Propagate, de forma a ser criada a Cascata a partir de qualquer tipo e número de partículas na lista inicial, pela chamada do método Interact de cada partícula da lista e adição das resultantes à mesma.
- Este método trata simultaneamente a informação de acordo com as flags ativas e com as especificações dadas ao chamar o método (*2D, 3D, distribuição dos eixos coordenados e “partículas a realçar no pdf final”*).
- Há ainda o método ReadFile, que lê os ficheiros criados pelo método anterior e trata a informação dessa cascata da mesma forma que o Propagate.
- Finalmente, o método Draw permite desenhar num Canvas toda a informação tratada até ao momento e o Print guarda-o num ficheiro.

# Distância de Interação para uma dada secção eficaz

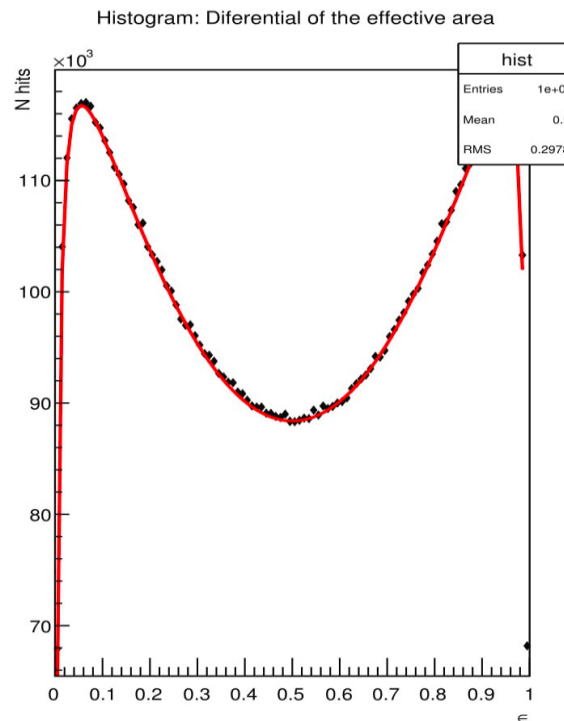
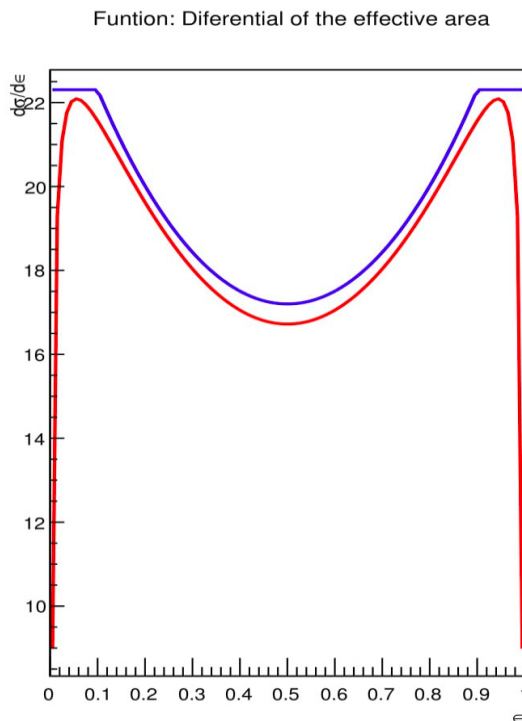
- A distribuição de distâncias de interação na relativamente a uma dada área eficaz é exponencial, pelo que, é simples, recorrendo à técnica da inversa, gerar aleatórios segundo a distribuição pedida.
- A título de exemplo ilustra-se a distribuição de distâncias de Interação para fótons no alumínio, sendo que o  $\lambda$  de interação é de 11.4376 (cm).



- Nesta figura, tal como na maioria das que se seguem pode-se ver do lado esquerdo a função segundo a qual queremos criar a nossa distribuição e do lado direito um histograma, que foi ajustado a um múltiplo da função inicial para demonstrar a validade do método.

# Distribuição de energias entre o positrão e o eletrão na produção de pares (fotão)

- A Distribuição de Heitler não é invertível por métodos convencionais pelo que foi usado o método de aceitação rejeição.
- Como função majorante foi utilizada uma combinação por ramos de  $a \cdot \cosh(b \cdot x)$  com uma função constante (a azul na figura da esquerda), sendo as constantes determinadas em função da energia da partícula.



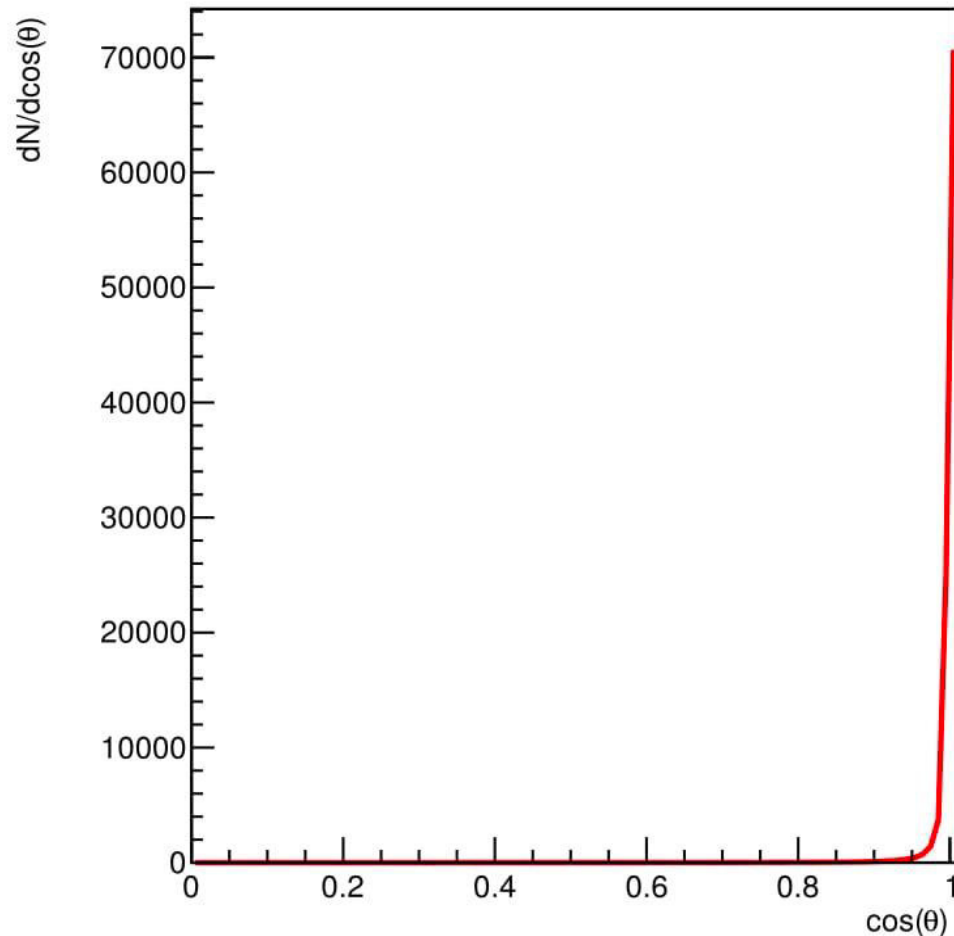
- Computando um rácio entre as integrais da função distribuição e da função auxiliar, chegamos a uma eficiência próxima de 90% do método de aceitação rejeição.
- A figura ao lado foi obtida para uma energia de 1000 MeV, concluindo-se que o método gera aleatórios com sucesso segundo a distribuição dada.



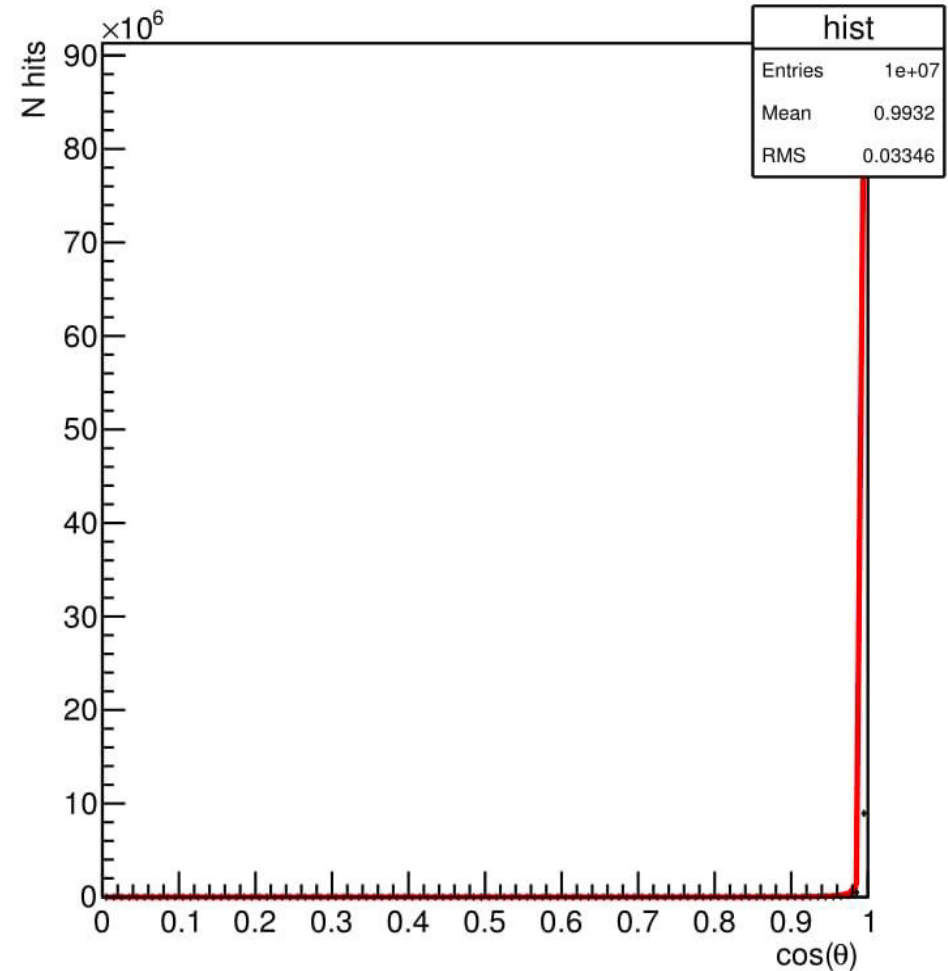
# Distribuição angular dos elementos resultantes da produção de pares $dN/d\cos(\theta)$

- A geração de aleatórios fez-se segundo a técnica da inversa, na figura está representada uma energia de 10 MeV.

Funtion: Distribuicao do cos(theta) dos fotoes

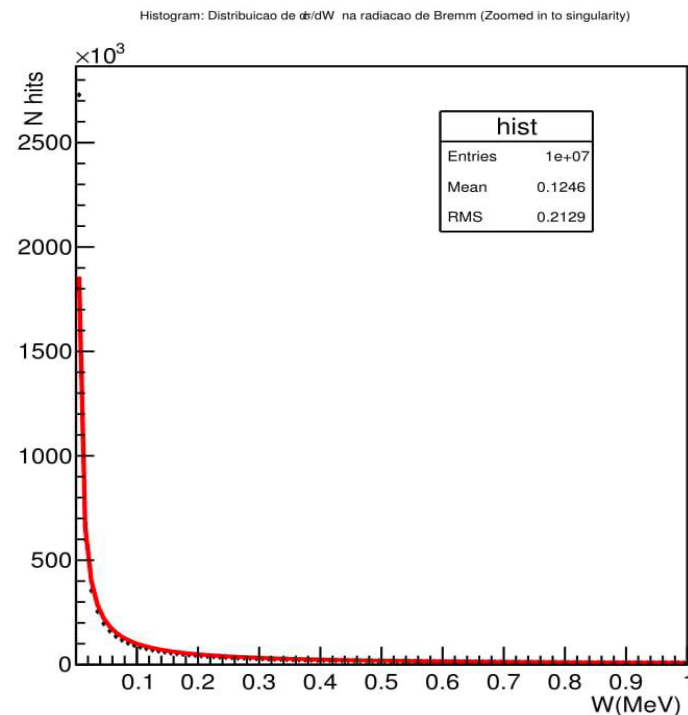
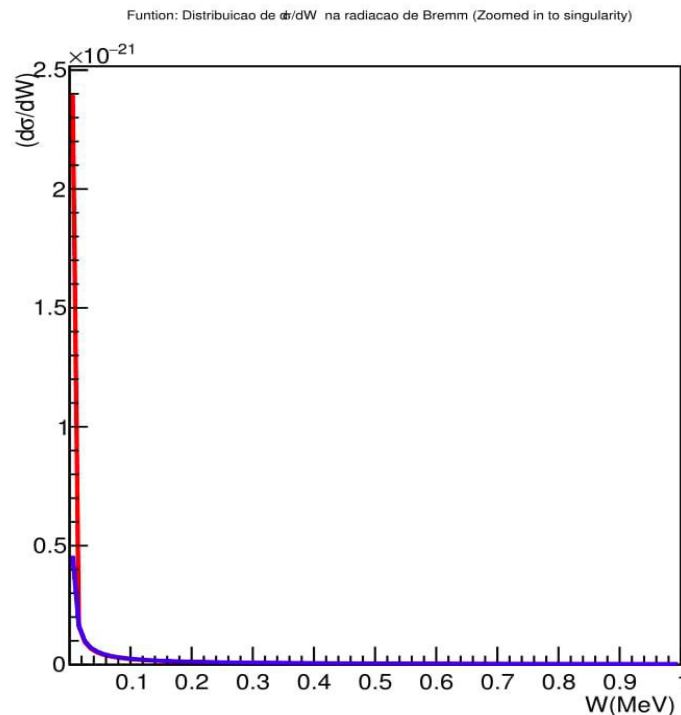


Histogram: Distribuicao do cos(theta) dos fotoes



# Radiação de Brems distribuição de energia do Fóton ( $d\sigma/dW$ )

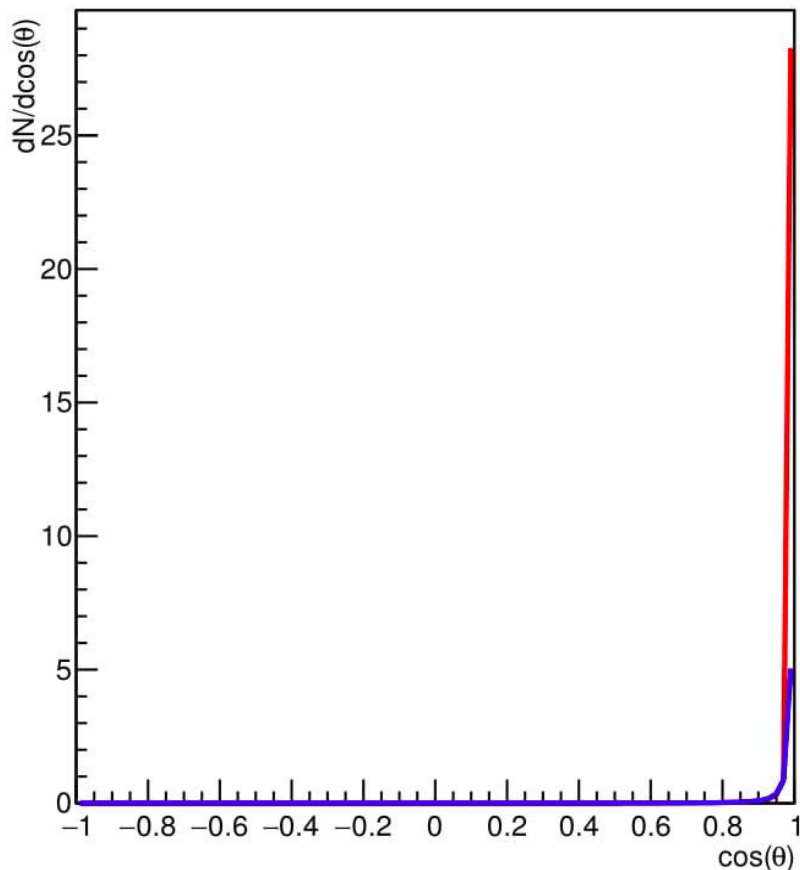
- A Função utilizada para majorar a distribuição de energia foi do tipo  $\frac{A}{x}$  (a azul no gráfico da esquerda), sendo A a constante necessária para que a função auxiliar interceptasse a distribuição na energia de corte ( $W_c = 1e-5$  Mev).
- Computando a razão entre as áreas para várias energias, estimamos uma eficiência de 91 %. Na figura podemos ver esta distribuição para uma energia de 10 Mev.



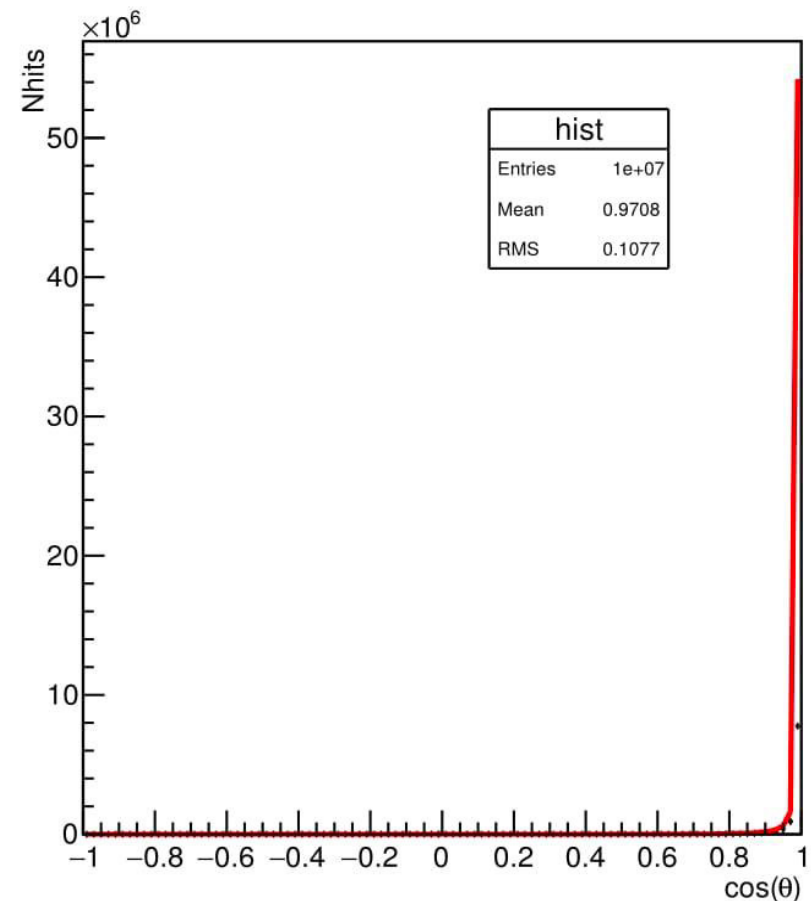
# Radiação de Bremm, distribuição angular do fóton resultante. ( $dN/d\cos(\theta)$ )

- De modo a majorar esta distribuição usou-se uma função do tipo  $\frac{A}{(1-\beta*x)^2}$ , obtendo-se uma eficiência média de 67%. Na figura podemos ver esta distribuição para uma energia de 10 Mev.

Funtion: Distribuicao dN/dcos(θ) para os fotoes radiados por Bremm

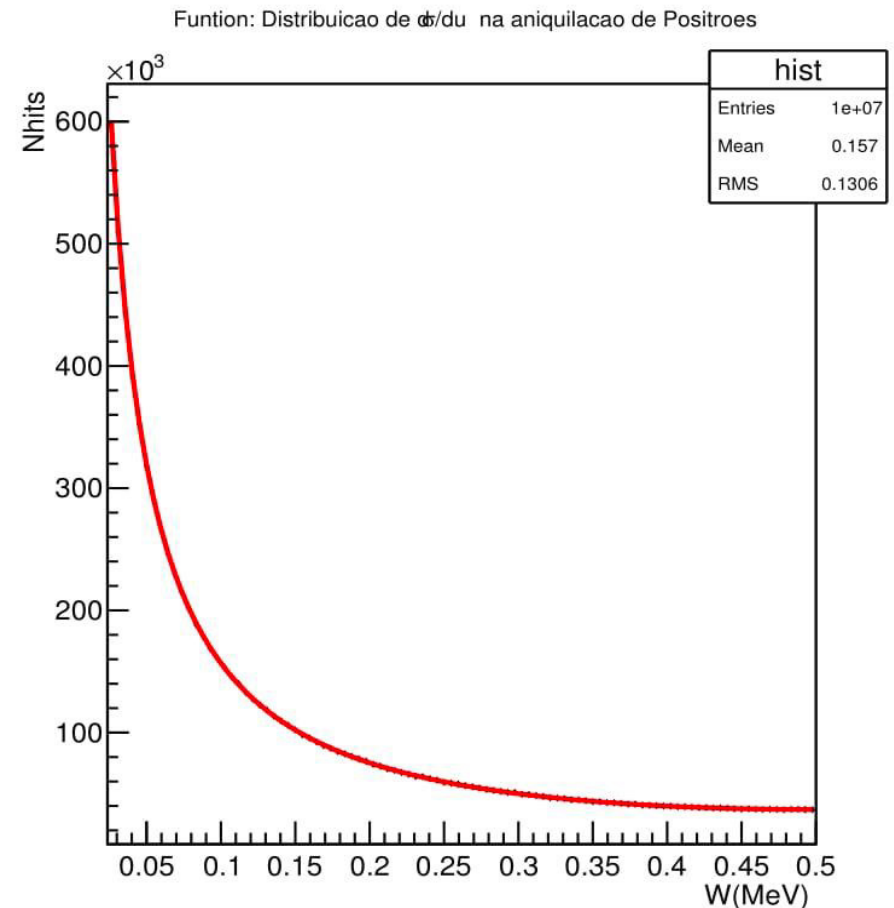
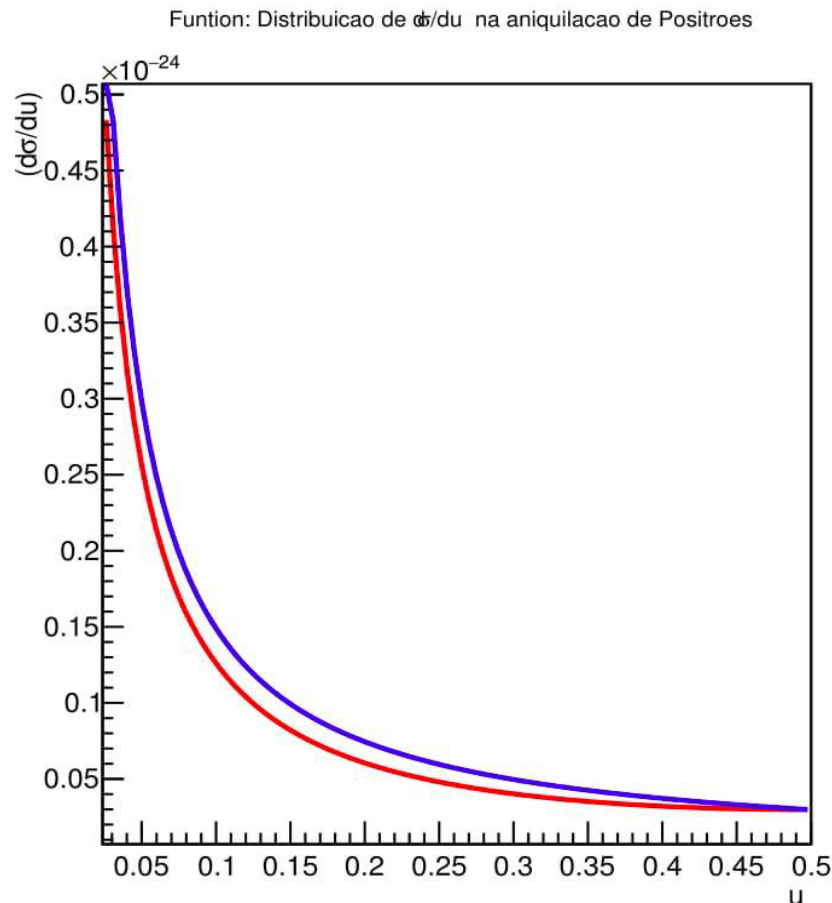


Histogram: Distribuicao dN/dcos(θ) para os fotoes radiados por Bremm



# Aniquilação do Positrão ( $d\sigma/du$ )

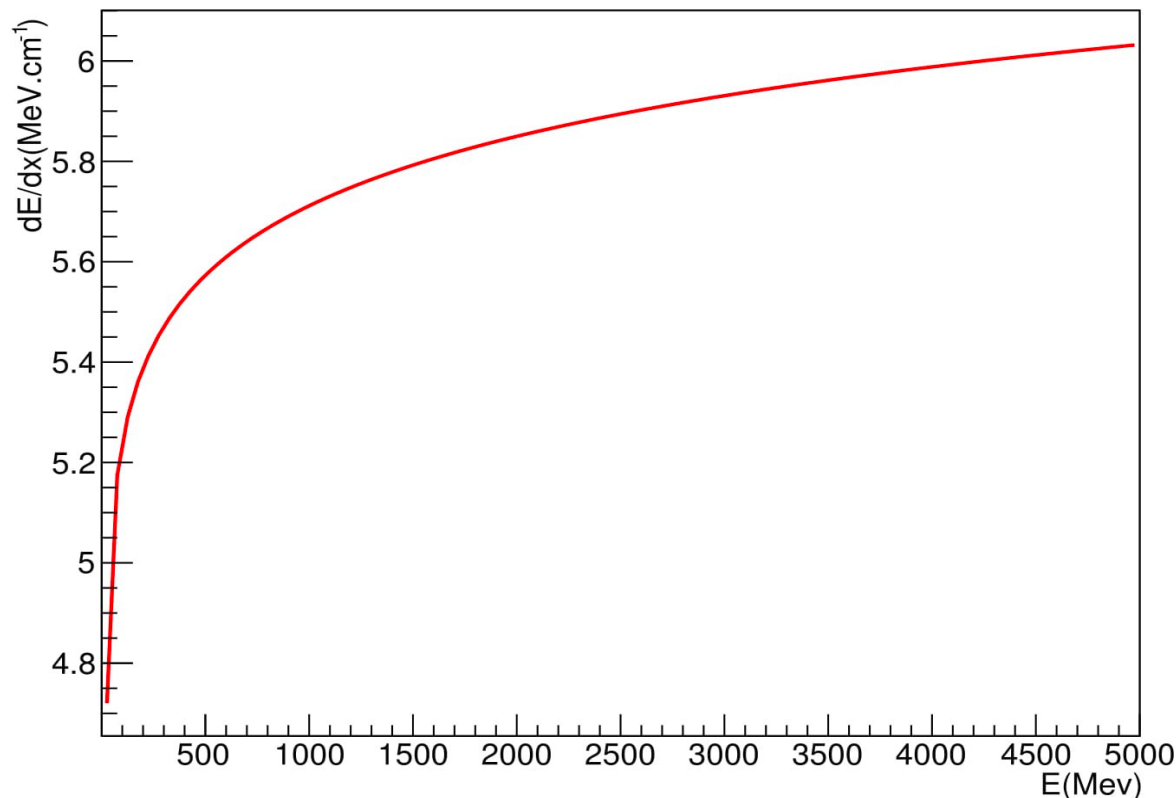
- Mais uma vês majorou-se esta distribuição com uma função do tipo  $\frac{A}{x}$ , com obrigando a intersecção para  $u = 0,5$ .
- Computando a razão média entre as áreas obtemos uma eficiência de 84%.
- Na figura vemos uma distribuição para  $E = 10$  MeV.



# Perda Contínua de Energia

- Na figura observamos a perda média de energia por unidade de comprimento em função da energia de um dado positrão (o caso do elétron é completamente análogo).

Funtion: Perda de Energia continua por unidade de distancia

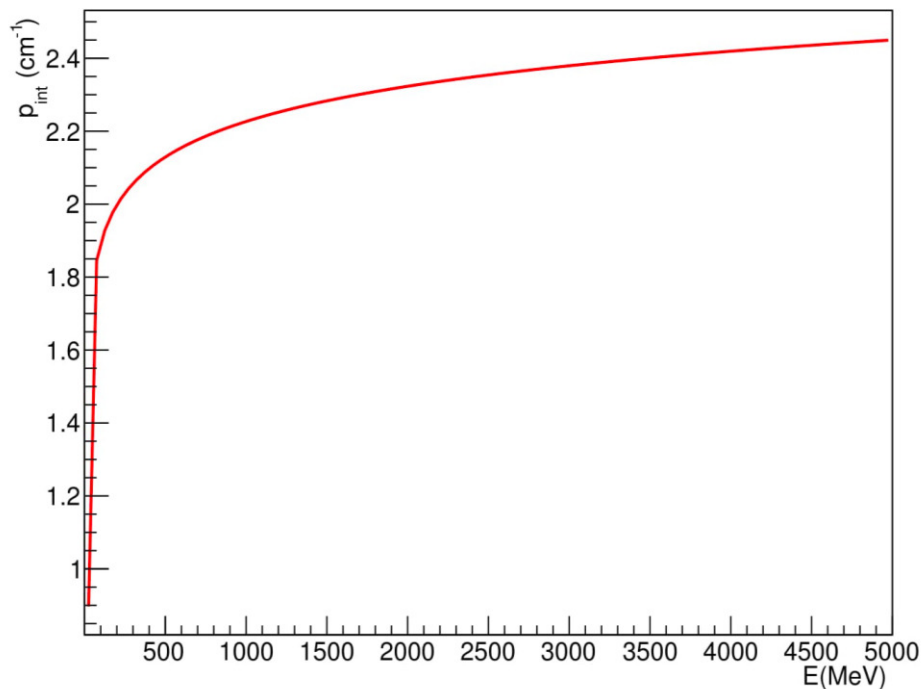


- Como podemos observar, com o aumento da Energia, a taxa de perda de energia aumenta de um modo semelhante a uma potência de  $\frac{1}{n}$ , assim podemos quantificar que este efeito é mais importante para energias pequenas, para as quais a perda relativa é muito maior.

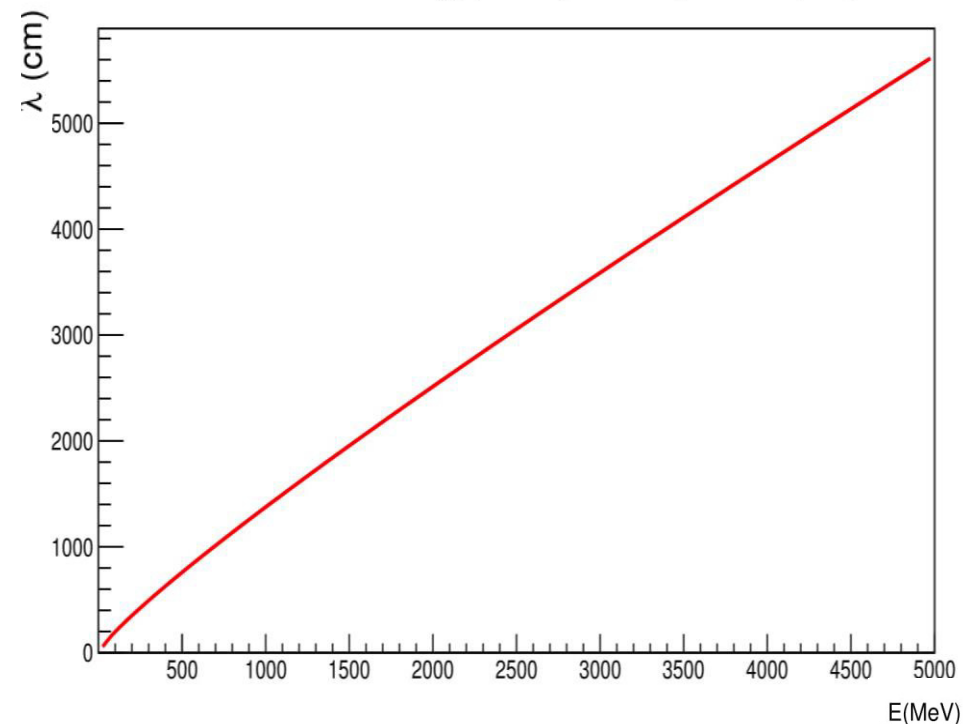
# Densidades de Probabilidades de Interação

- Nos dois gráficos seguintes encontra-se representada a densidades de probabilidade de interação para a Radiação de Bremm e o comprimento de semi vida para a aniquilação de Positrões em Função da energia da Partícula.
- Podemos constatar que no caso da radiação de Bremm a probabilidade de interação aumenta com a Energia, pelo que quanto maior a Energia, maior número de radiações de Bremm que irão ocorrer, diminuindo a distância entre as interações.
- No caso da aniquilação pelo contrário, percebemos que com o aumento da energia aumenta o comprimento para ocorrer aniquilação, sendo esta relação aproximadamente linear.

Funtion: Distribuicao de  $p_{int}$  (1/cm) na radiacao de Bremm



Funtion: Distribuicao de  $\lambda_{int}(E)$  na aniquilacao de positroes E(MeV)

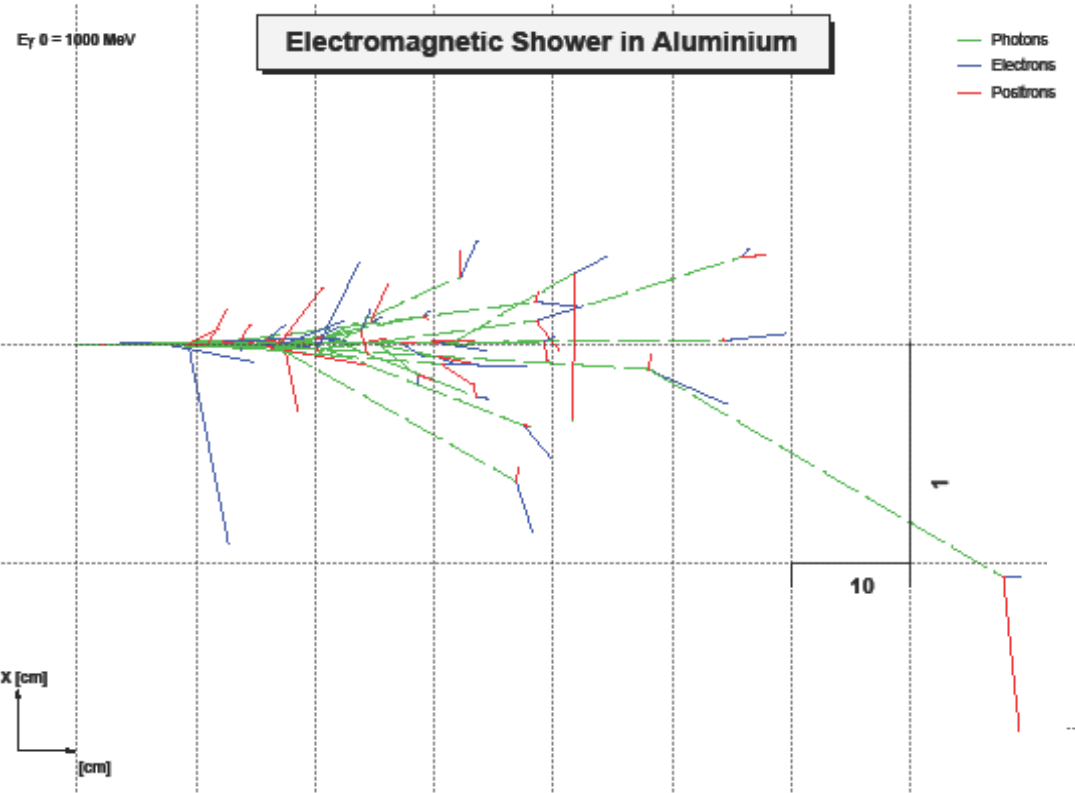


# Particle Shower Diagrams

1000 MeV

Electromagnetic Shower in Aluminium

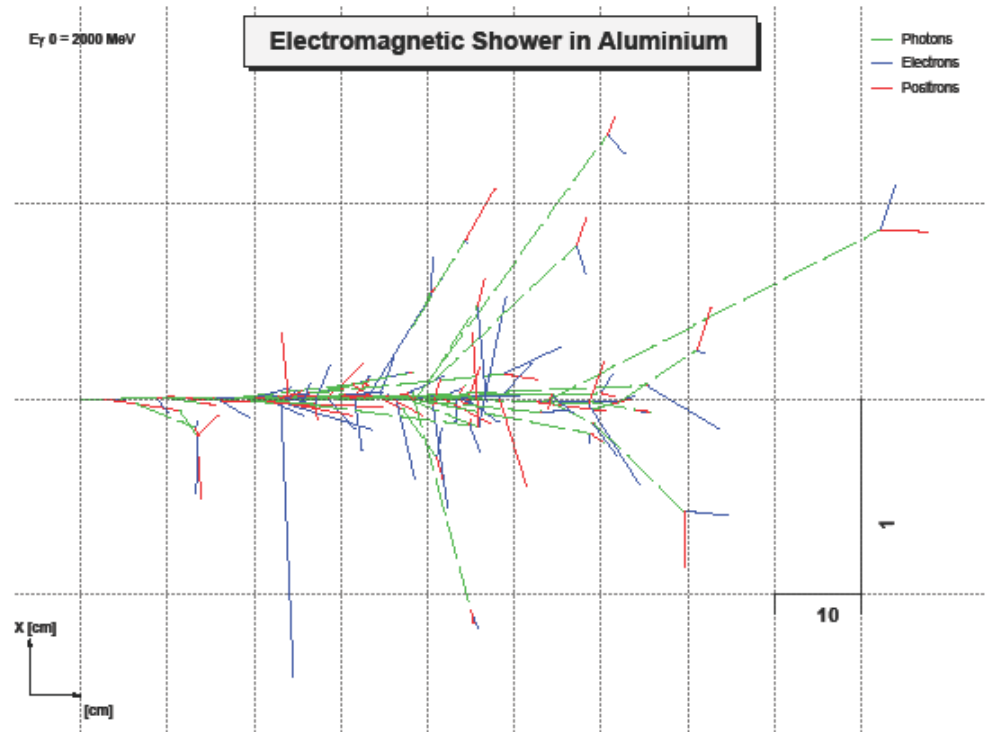
— Photons  
— Electrons  
— Positrons



2000 MeV

Electromagnetic Shower in Aluminium

— Photons  
— Electrons  
— Positrons

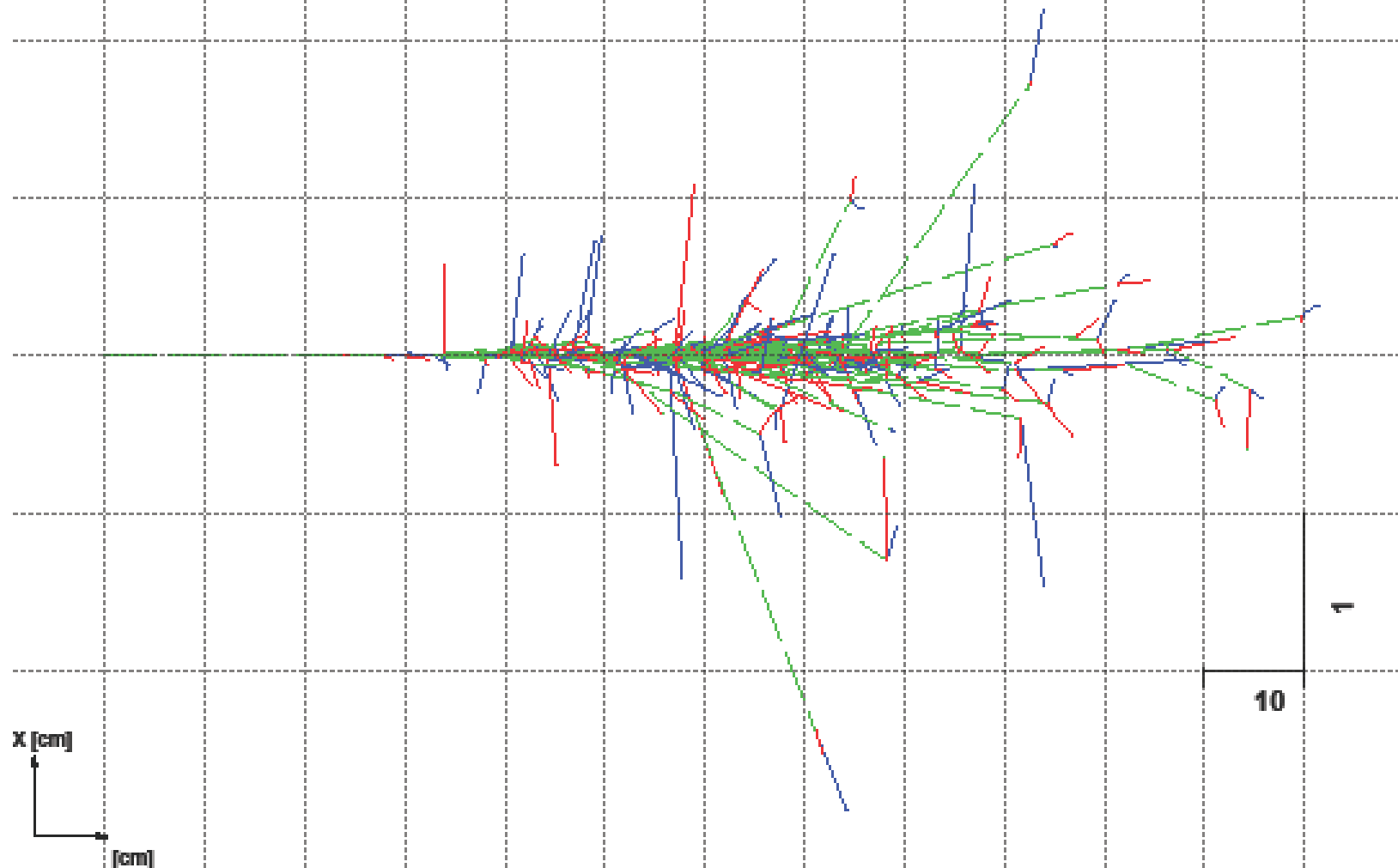


# 5000 MeV

$E_{\gamma 0} = 5000 \text{ MeV}$

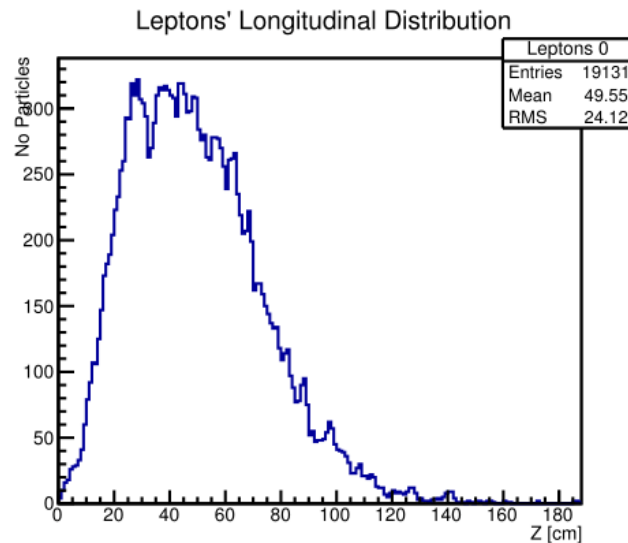
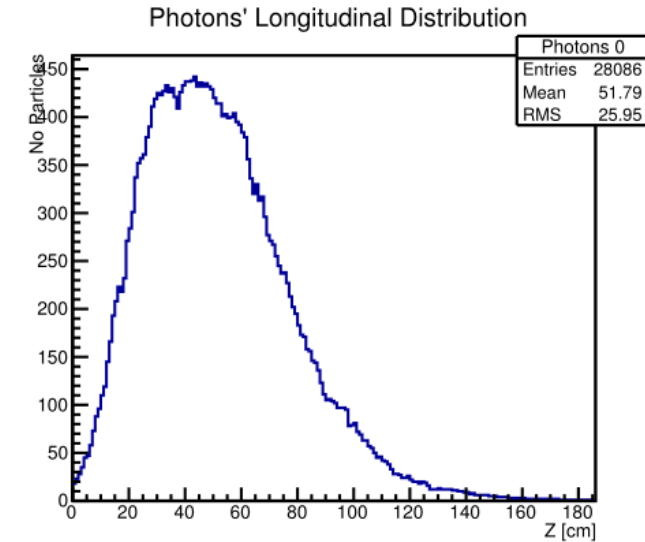
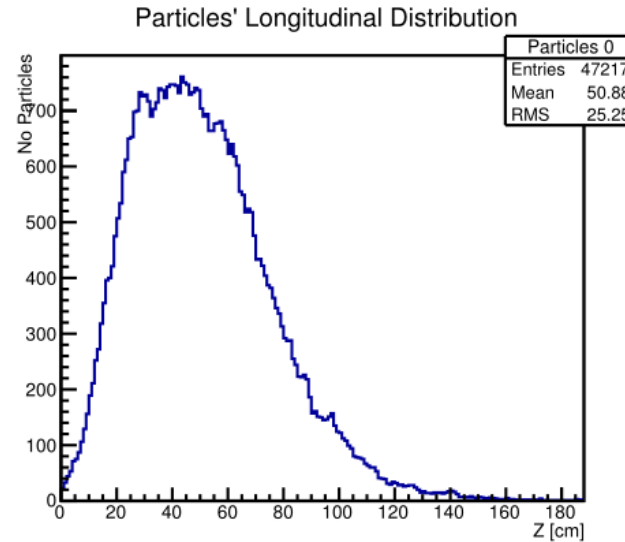
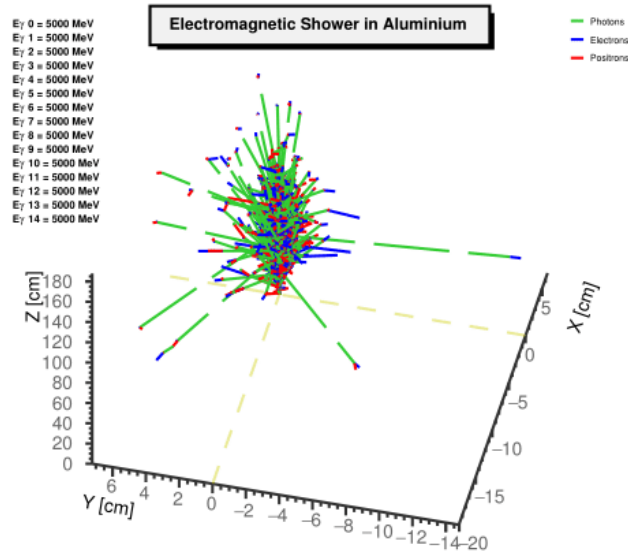
## Electromagnetic Shower in Aluminium

— Photons  
— Electrons  
— Positrons





# Histogramas Para 5 Gev – 15 Fotões



**Electromagnetic Shower in Aluminium**  
Generated by a photon with  $E_i = 5000$  MeV

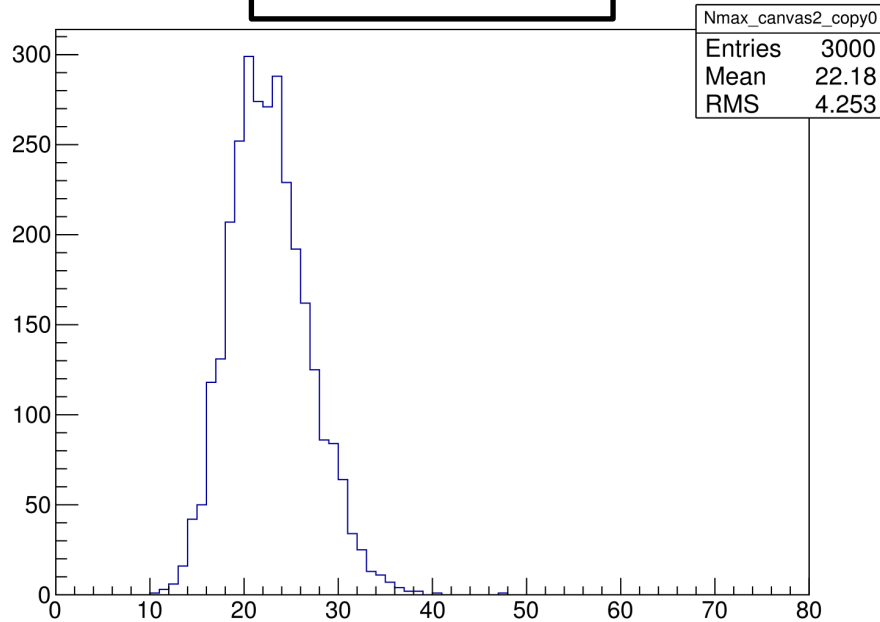
**Total No of Particles: 7274**  
**No of Photons: 2868**  
**No of Leptons: 4406**

**No of Photon Pair Production Events: 2203**  
**No of Bremsstrahlung Radiation Events: 25027**  
**No of Electron-Positron Annihilation Events: 386**

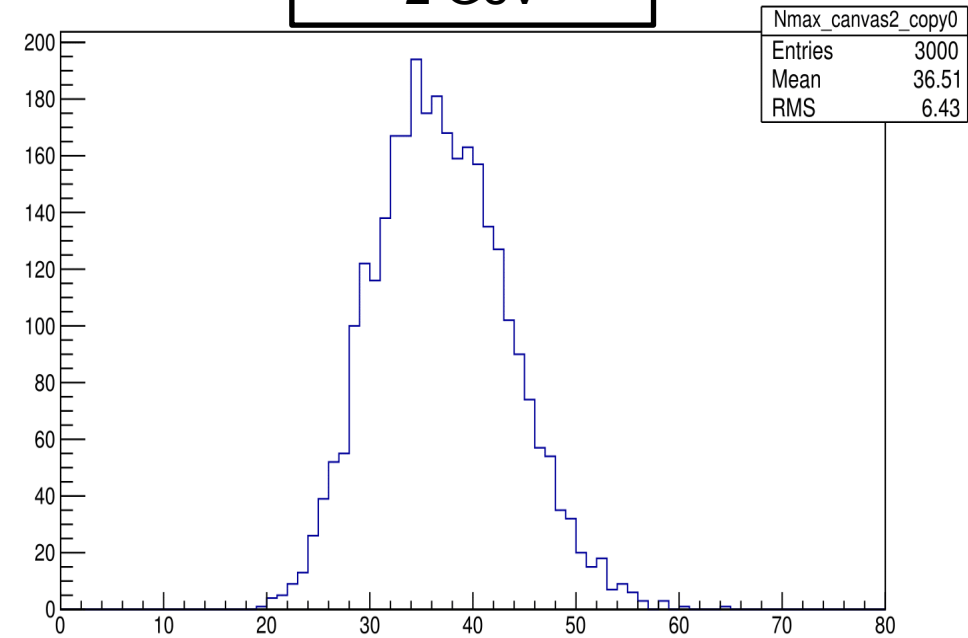
**Max Longitudinal Profile at 44 cm with 761 particles**  
**Shower's Length: 188 cm**  
**Shower's Width: 20.582654 cm**

# Histogramas N Max

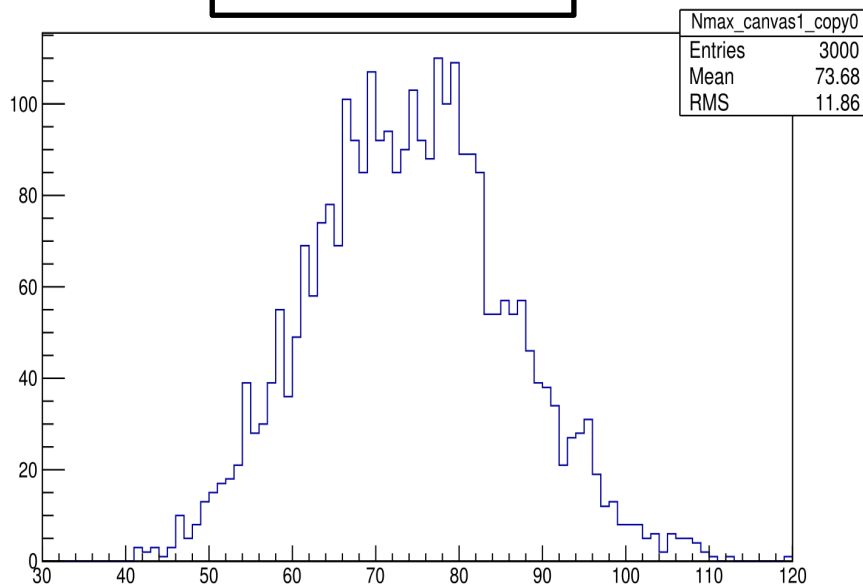
1 GeV



2 GeV



5 GeV



Nmax expetável:

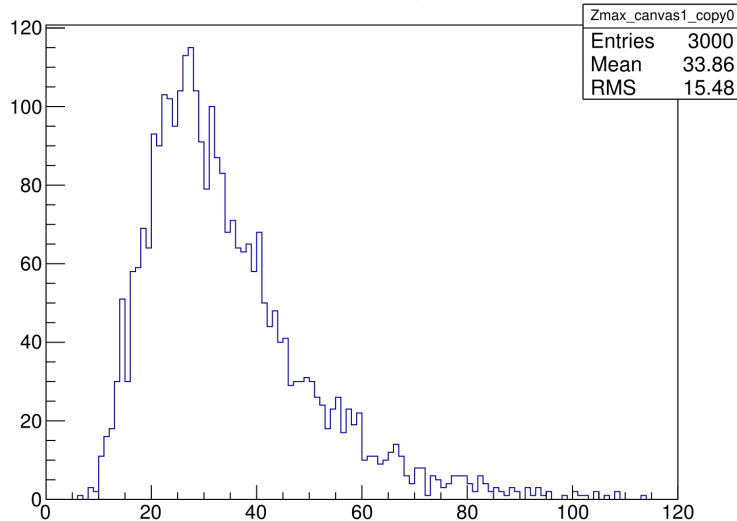
- 1 GeV: 23.26
- 2 GeV: 46.51
- 5 GeV: 116.28

Como se pode observar, o número experimental de partículas no ponto com perfil longitudinal máximo aumenta, mas afasta-se tanto do valor teórico da aproximação simplista de Heitler quanto maior a energia.

# Histogramas Z Max

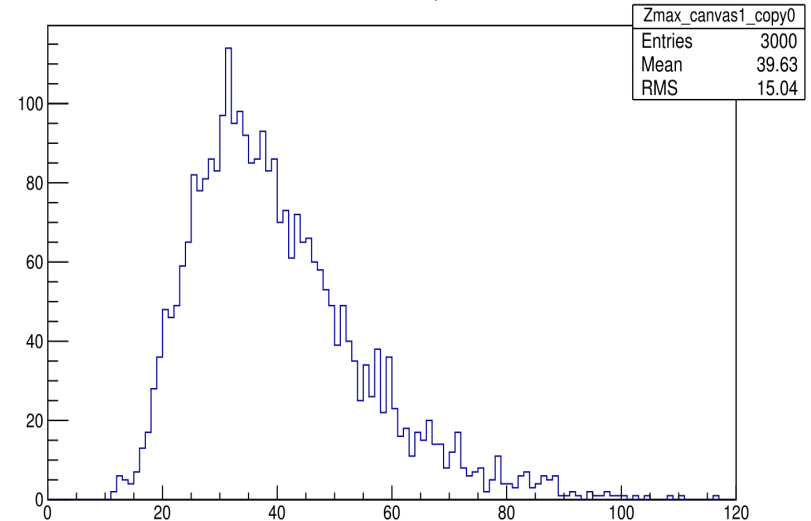
1 GeV

Z on the max profile



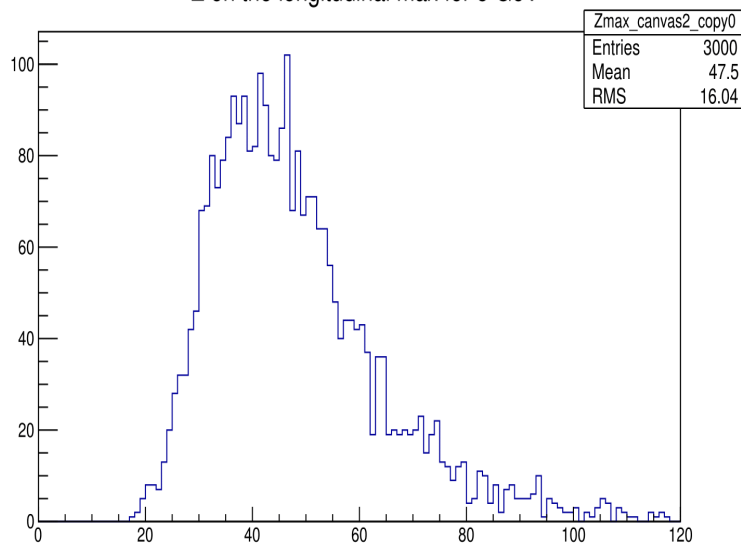
2 GeV

Z on the max profile



5 GeV

Z on the longitudinal max for 5 GeV

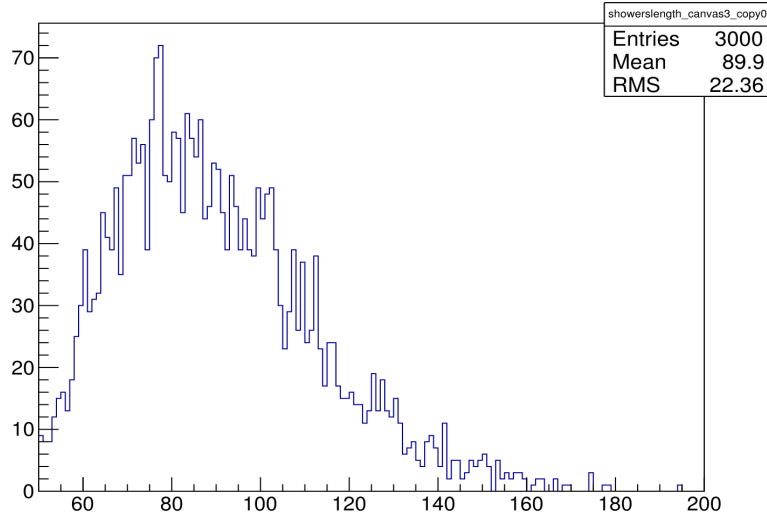


Como se pode observar, o ponto experimental de perfil longitudinal máximo é tanto quanto a energia.

# Histogramas Length

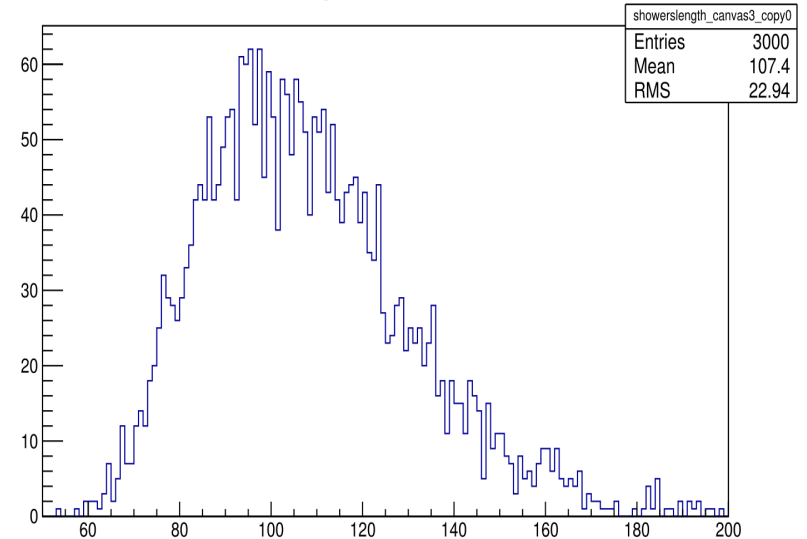
1 GeV

Length of the shower



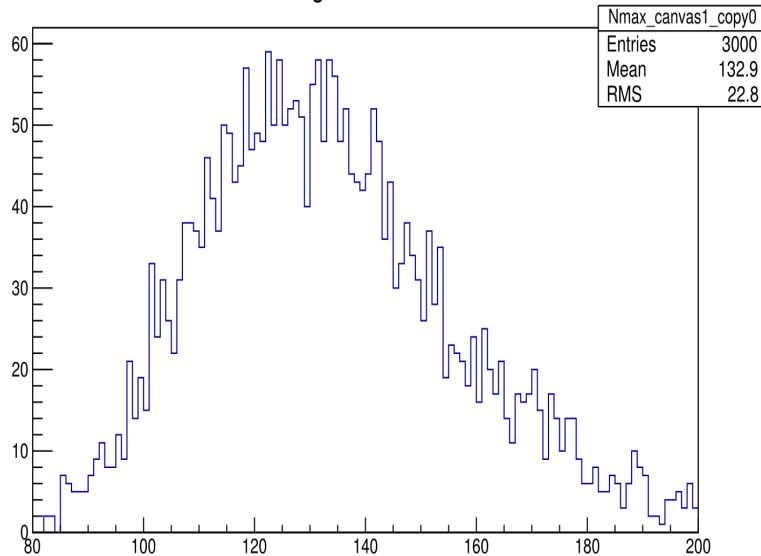
2 GeV

Length of the shower



5 GeV

Legth for 5 GeV

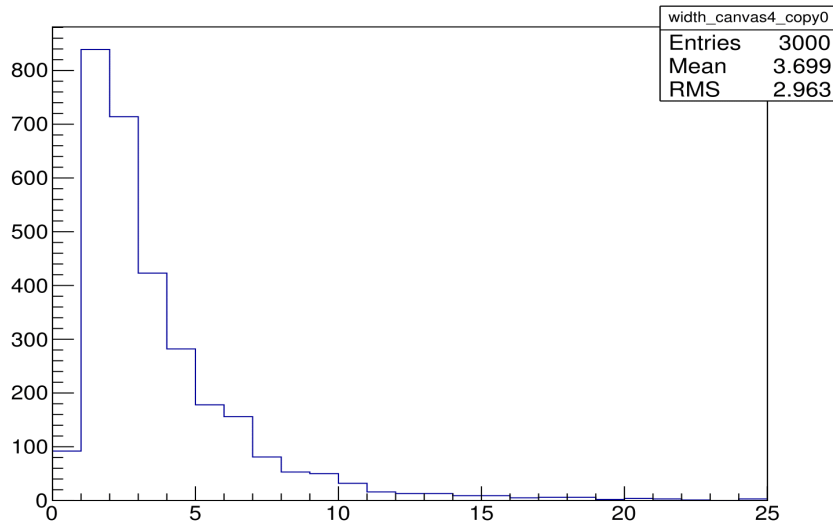


Por análise dos resultados, o comprimento experimental da cascata aumenta com a energia inicial do fóton.

# Histogramas Width

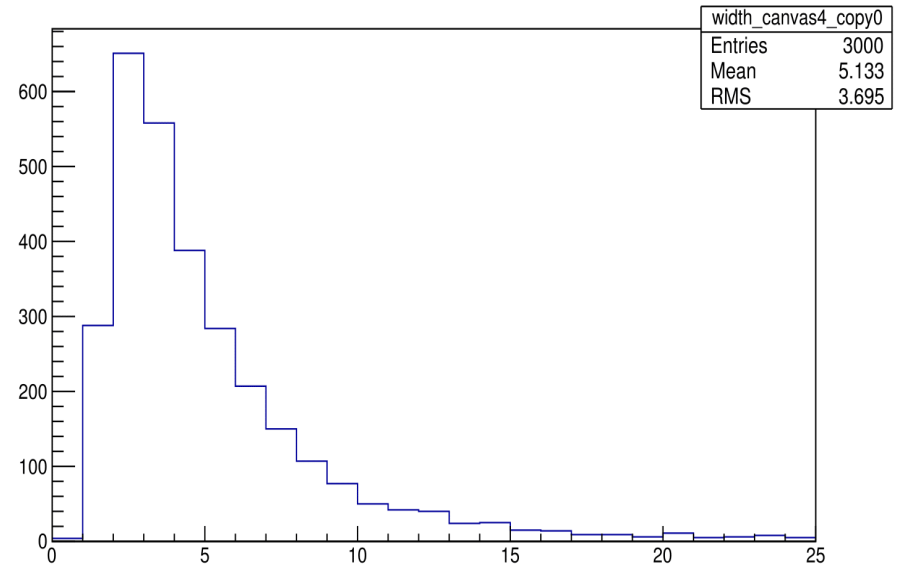
1 GeV

Width of the shower



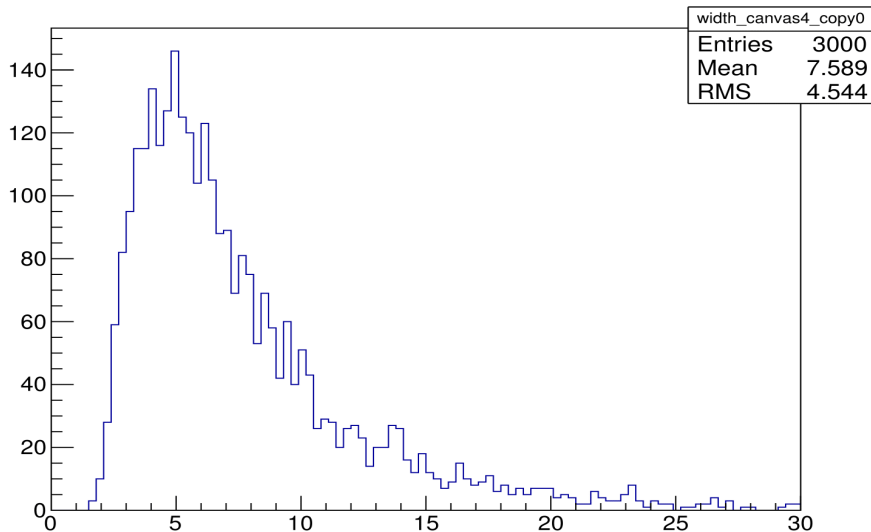
2 GeV

Width of the shower



5 GeV

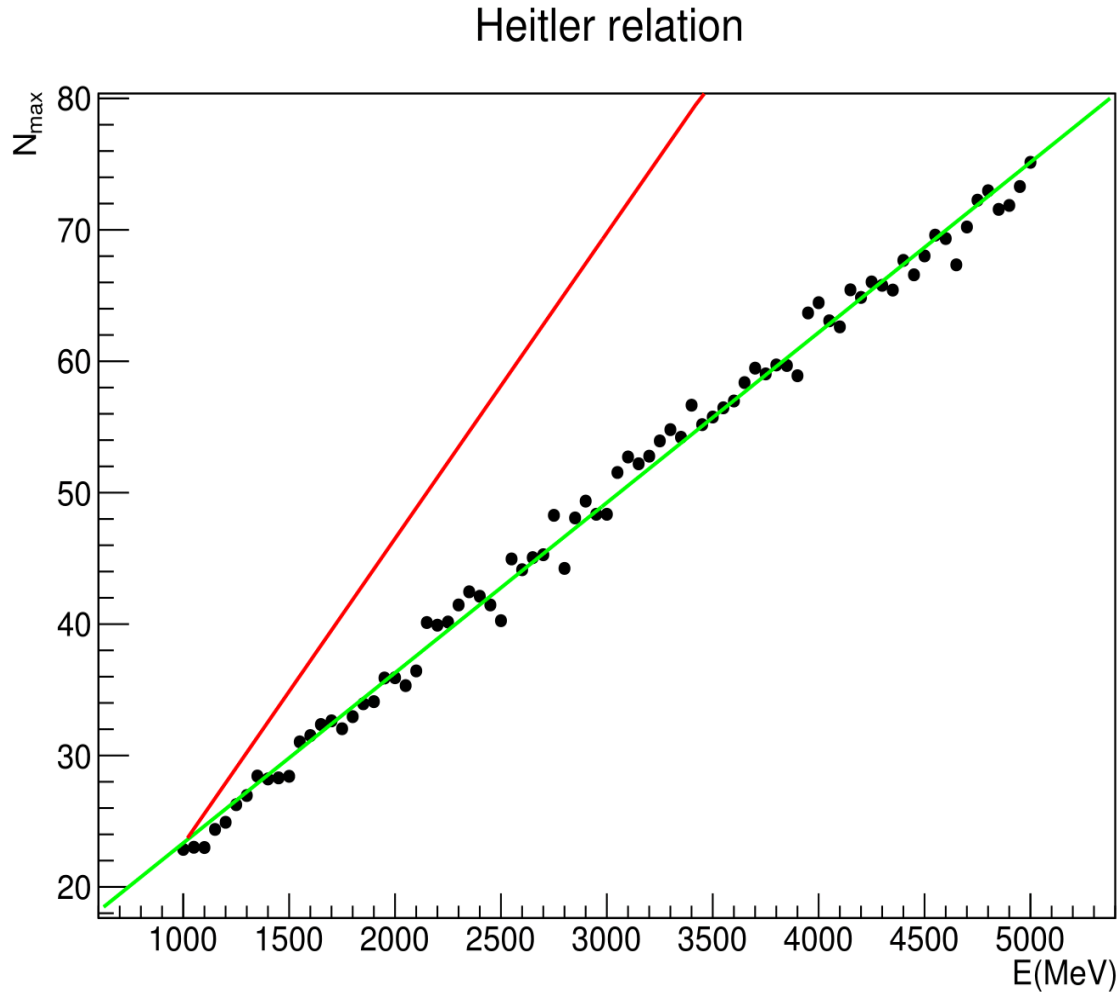
Width of the shower



Por análise dos resultados, a largura experimental da cascata aumenta com a energia inicial do fóton.

Denota-se também que, considerando todos os desvios angulares nas interações entre partículas, este valor deveria aumentar.

# Variação do N° de Partículas com a Energia Inicial



Ajustando os pontos de várias simulações para energia iniciais diferentes a uma expressão:  $y = \frac{x}{a} + b$

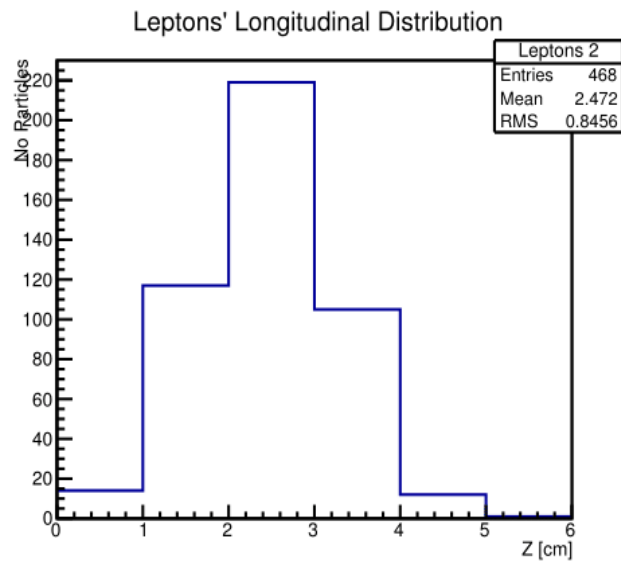
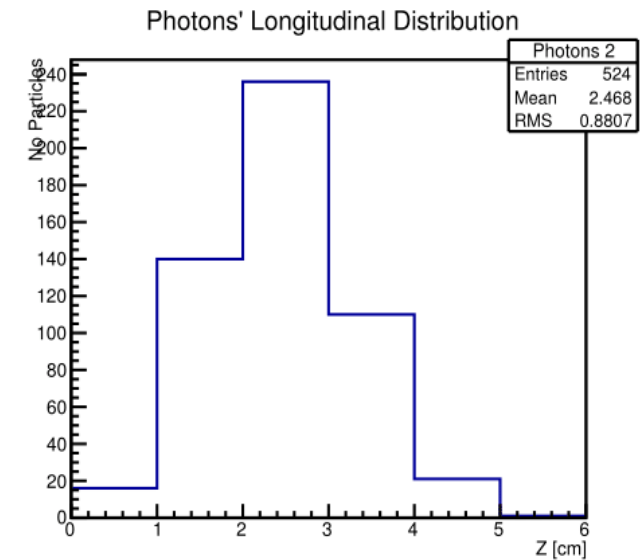
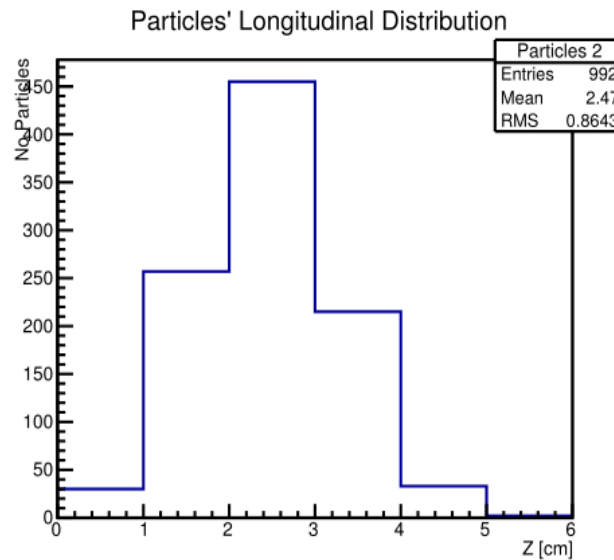
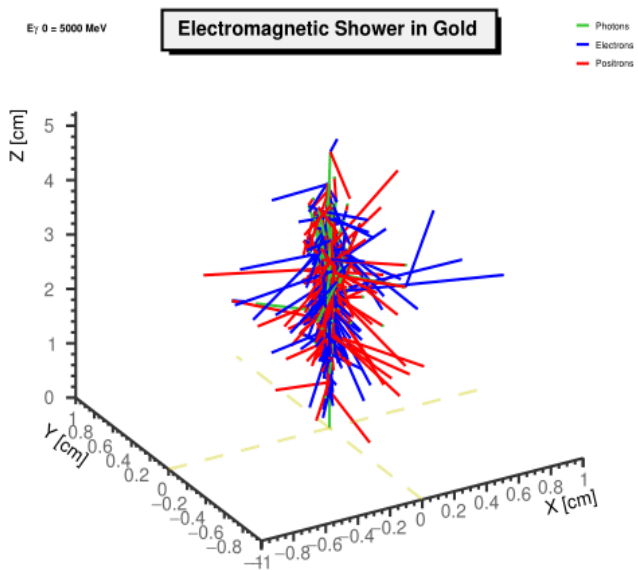
Obteve-se:

- $a = 77.2 \pm 0.7$
- $b = 10.4 \pm 0.4$

Sendo o valor teórico de  $a = 43$ , nota-se um declive experimental menor, pelo que o número de partículas simuladas é menor do que o real. Isto é explicado devido à falta de consideração de outras interações entre partículas.

# Outros Elementos (3D)

- Novos elementos adicionados à database:



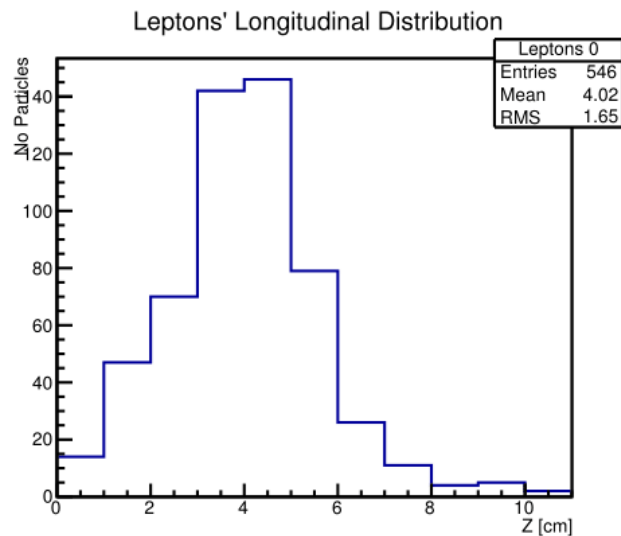
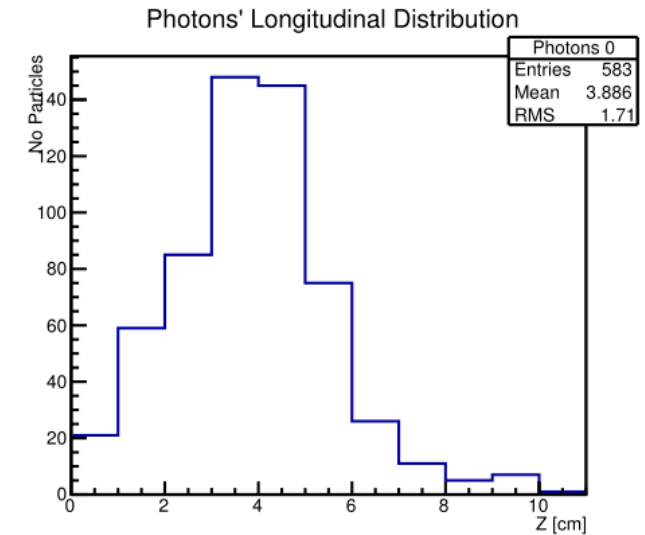
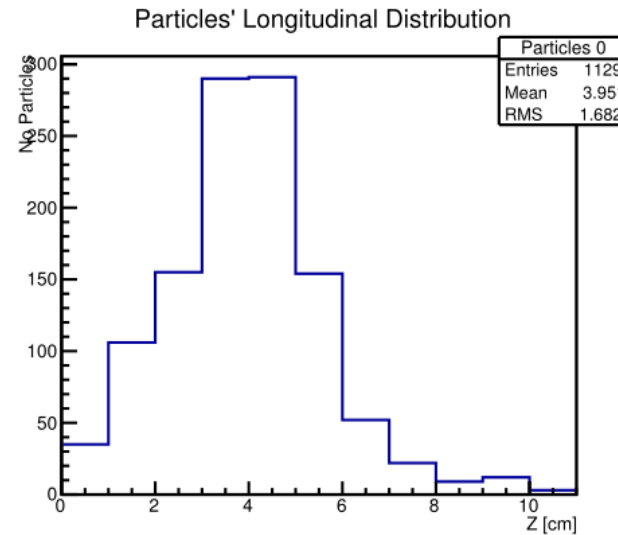
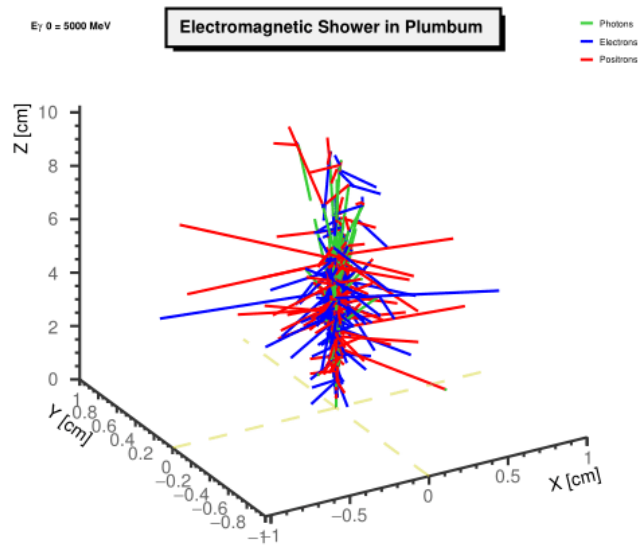
**Electromagnetic Shower in Gold**  
 Generated by a photon with  $E_i = 5000 \text{ MeV}$

Total No of Particles: 969  
 No of Photons: 387  
 No of Leptons: 582

No of Photon Pair Production Events: 291  
 No of Bremsstrahlung Radiation Events: 6700  
 No of Electron-Positron Annihilation Events: 51

Max Longitudinal Profile at 3 cm with 455 particles  
 Shower's Length: 6 cm  
 Shower's Width: 0.970602 cm

# Outros Elementos (3D)



**Electromagnetic Shower in Plumbum**  
Generated by a photon with  $E_i = 5000 \text{ MeV}$

Total No of Particles: 957  
No of Photons: 369  
No of Leptons: 588

No of Photon Pair Production Events: 294  
No of Bremsstrahlung Radiation Events: 6875  
No of Electron-Positron Annihilation Events: 42

Max Longitudinal Profile at 5 cm with 291 particles  
Shower's Length: 11 cm  
Shower's Width: 1.043915 cm

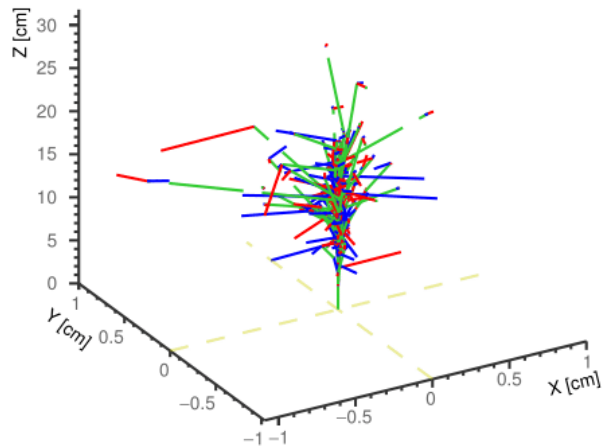


# Outros Elementos (3D)

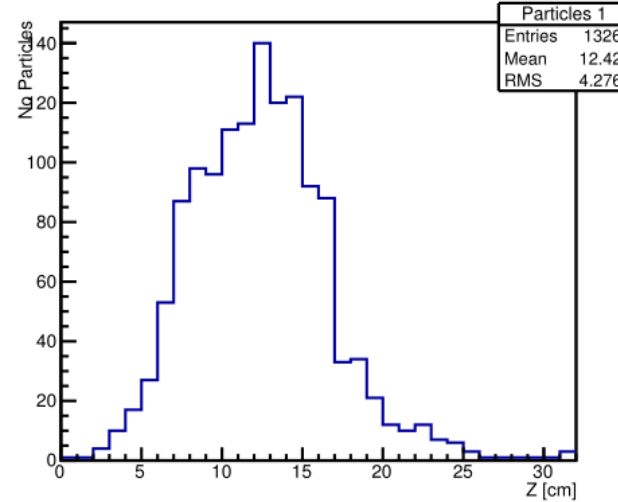
$E_i = 5000 \text{ MeV}$

## Electromagnetic Shower in Iron

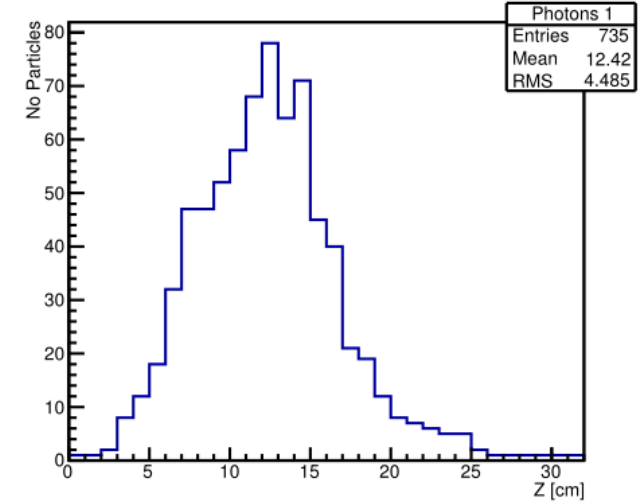
— Photons  
— Electrons  
— Positrons



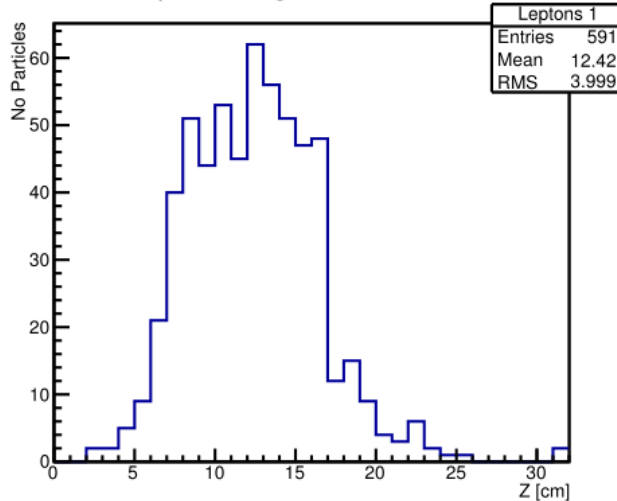
## Particles' Longitudinal Distribution



## Photons' Longitudinal Distribution



## Leptons' Longitudinal Distribution



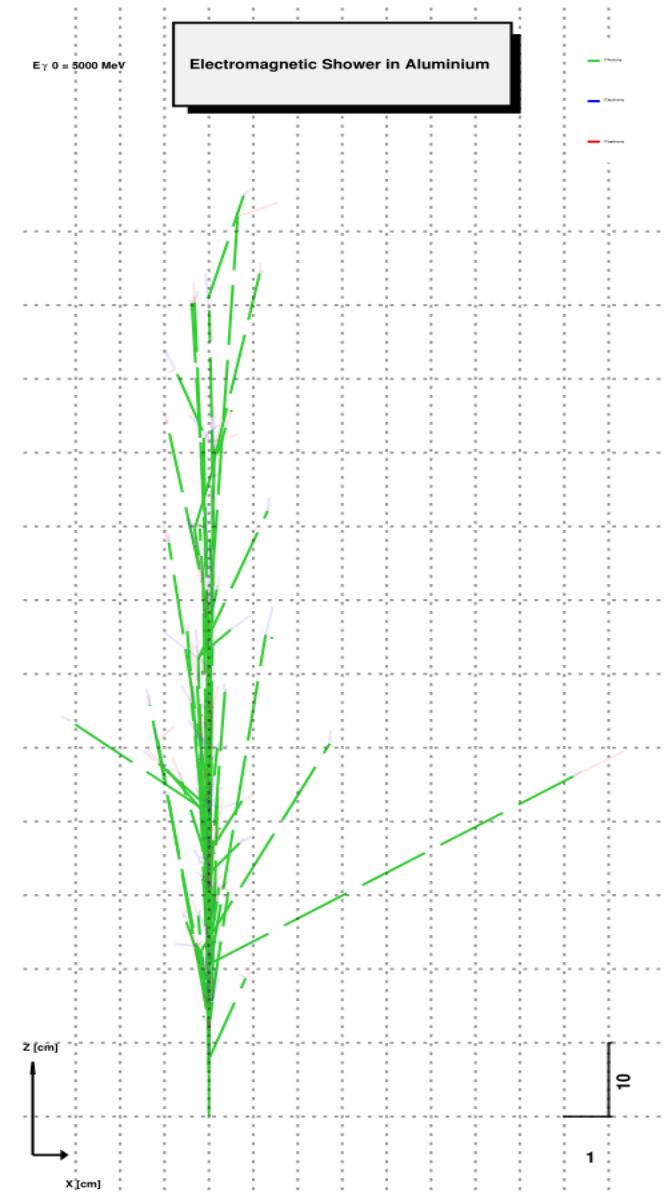
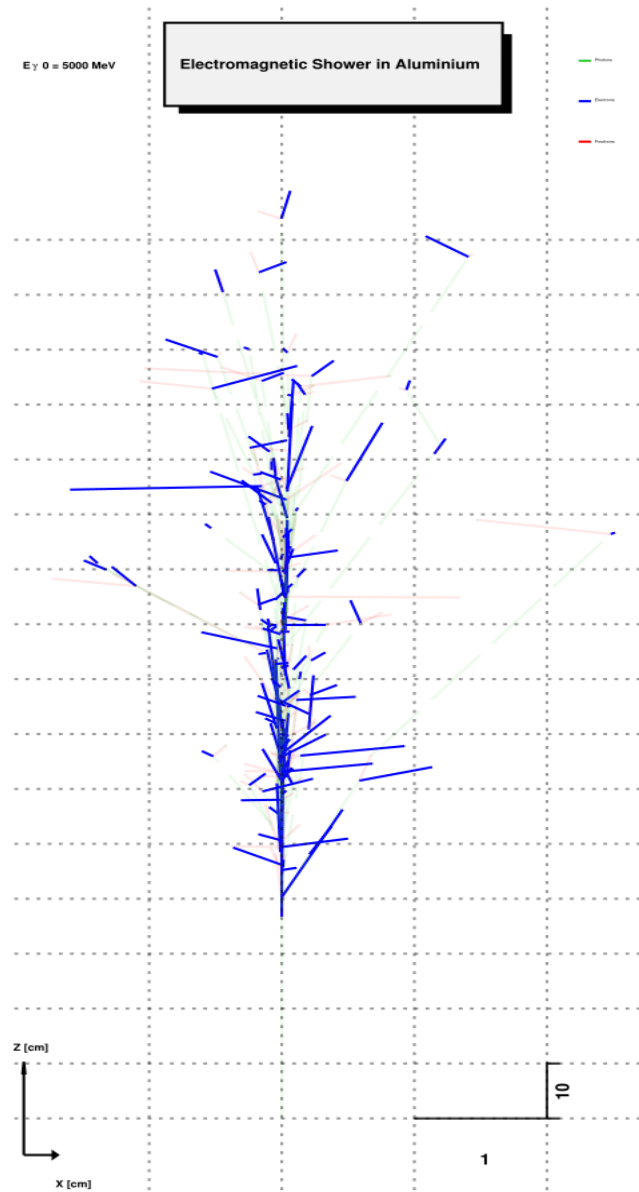
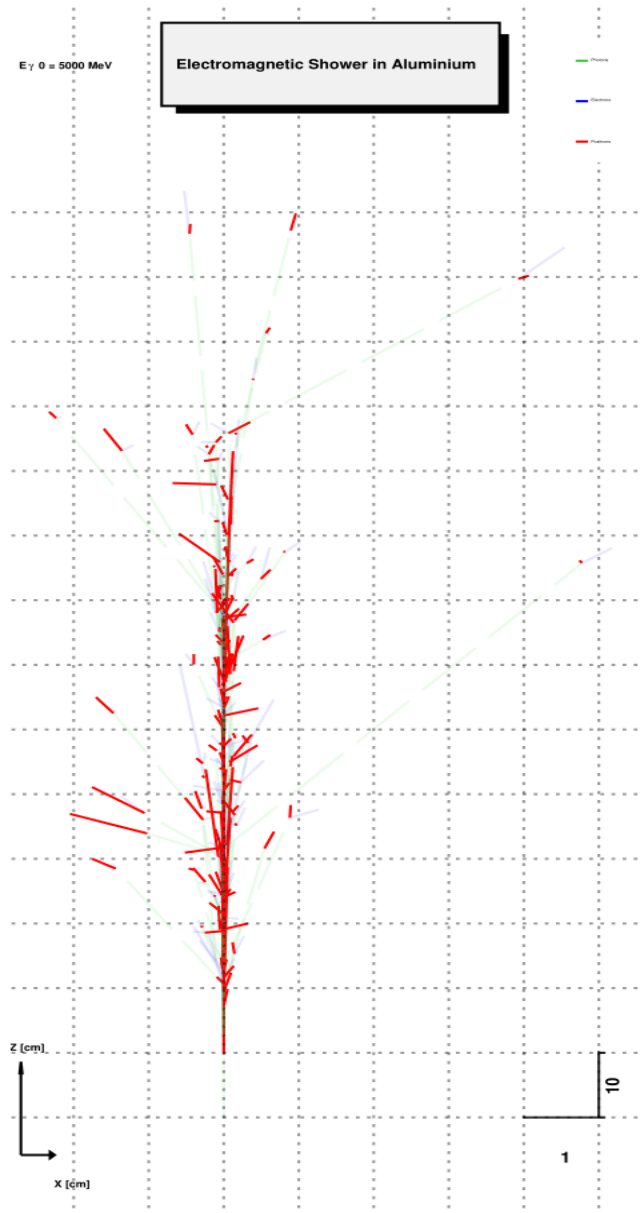
## Electromagnetic Shower in Iron Generated by a photon with $E_i = 5000 \text{ MeV}$

Total No of Particles: 662  
No of Photons: 260  
No of Leptons: 402

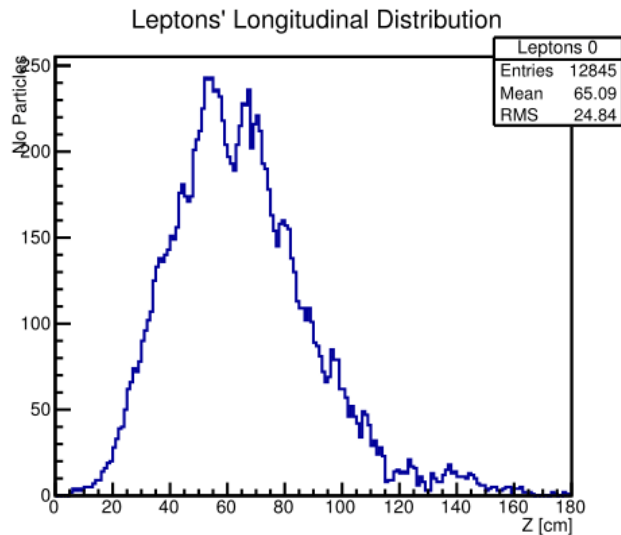
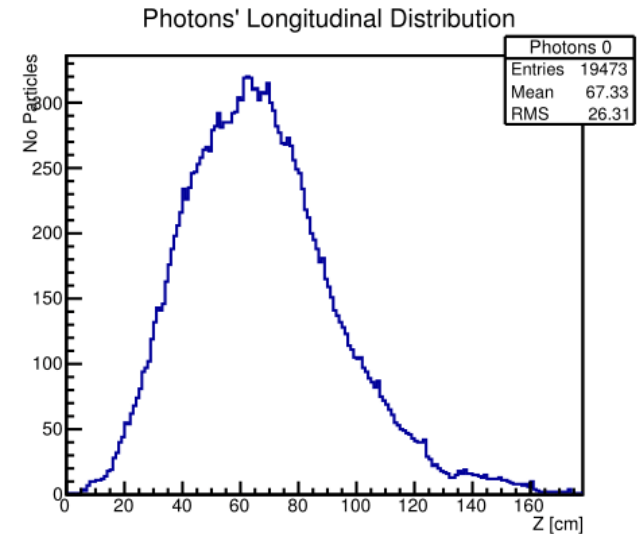
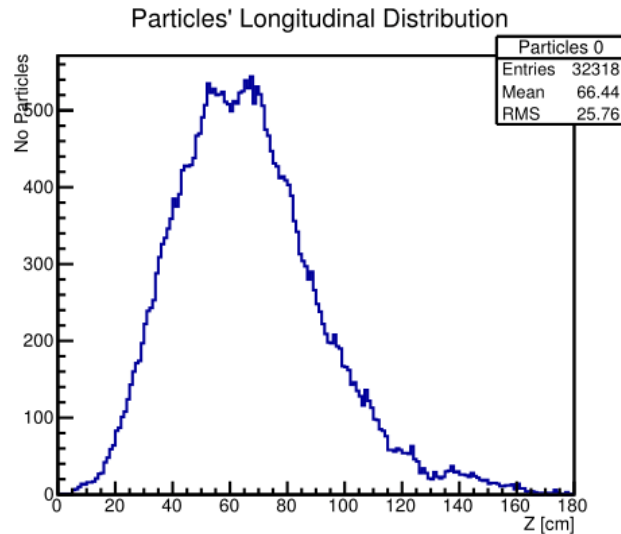
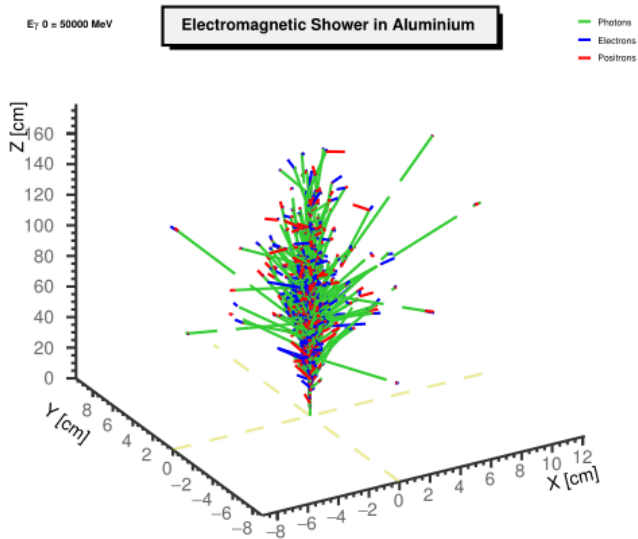
No of Photon Pair Production Events: 201  
No of Bremsstrahlung Radiation Events: 3050  
No of Electron-Positron Annihilation Events: 31

Max Longitudinal Profile at 13 cm with 140 particles  
Shower's Length: 32 cm  
Shower's Width: 1.503002 cm

# Transparências



# What about 50 GeV?



**Electromagnetic Shower in Aluminium**  
 Generated by a photon with  $E_i = 50000 \text{ MeV}$

**Total No of Particles: 4936**  
**No of Photons: 1966**  
**No of Leptons: 2970**

**No of Photon Pair Production Events: 1485**  
**No of Bremsstrahlung Radiation Events: 16920**  
**No of Electron-Positron Annihilation Events: 275**

**Max Longitudinal Profile at 68 cm with 544 particles**  
**Shower's Length: 180 cm**  
**Shower's Width: 13.658408 cm**