

Aula 1: Introdução à Física de Astropartículas

Prof. Dr. Marcelo Augusto Leigui de Oliveira

1. Física de Astropartículas: Uma Ciência Interdisciplinar

A **Física de Astropartículas** é um campo científico moderno e profundamente interdisciplinar. Ela surge da necessidade de compreender fenômenos cósmicos extremos por meio da detecção de partículas subatômicas e radiações altamente energéticas que chegam à Terra vindas do Universo.

Por unir técnicas e conceitos da física de partículas, astrofísica, cosmologia e relatividade geral, esse campo representa uma fronteira natural entre o muito pequeno e o muito grande — entre os constituintes fundamentais da matéria e as estruturas do cosmos.

1.1 Impacto na Astrofísica

Na astrofísica, a física de astropartículas oferece ferramentas para investigar eventos de altíssima energia, como:

- Supernovas, pulsares e buracos negros.
- Galáxias ativas e explosões de raios gama (GRBs).
- Ambientes com campos magnéticos e gravitacionais intensos.

A detecção de partículas cósmicas fornece evidências sobre esses objetos e sobre os mecanismos de aceleração natural de partículas.

1.2 Conexão com a Física de Partículas

A física de partículas fornece o arcabouço teórico necessário para interpretar as observações:

- A observação de neutrinos astrofísicos confirma as **oscilações de neutrinos** e aponta para novas físicas além do Modelo Padrão.
- Experimentos buscam partículas hipotéticas como WIMPs, axions e monopólos magnéticos.

- As interações de raios cósmicos com a atmosfera permitem estudar colisões de altíssima energia, superiores às alcançadas por aceleradores terrestres.

1.3 Relações com a Cosmologia

A cosmologia moderna se beneficia dos dados de astropartículas:

- As partículas cósmicas transportam informações do **universo primordial**.
- A matéria escura, responsável por cerca de 27% do universo, é um dos principais focos da física de astropartículas.
- Neutrinos cósmicos e radiação de fundo contribuem para a compreensão da evolução e composição do cosmos.

1.4 Relatividade Geral e Ondas Gravitacionais

A detecção de **ondas gravitacionais** tornou possível estudar eventos cósmicos extremos com precisão sem precedentes:

- Eventos como GW170817 revelaram uma emissão conjunta de neutrinos, fótons e ondas gravitacionais.
- Isso inaugurou a **astronomia multimessageira**, combinando partículas e perturbações no espaço-tempo.
- Testes de gravidade e relatividade em regimes extremos são agora possíveis.

1.5 Inovação em Tecnologias de Detecção

O desenvolvimento de detectores revolucionou não apenas a ciência, mas também outras áreas como medicina e indústria:

- Detectores como IceCube, Super-Kamiokande, Pierre Auger e AMS-02 permitem medir partículas em escalas nunca antes acessadas.
- Instrumentos baseados em **efeito Cherenkov, cintiladores e semicondutores** estão entre os mais sensíveis já construídos.
- Tecnologias derivadas são utilizadas em tomografia por emissão de pósitrons (PET) e monitoramento de radiação.

1.6 Efeitos Atmosféricos e Geofísicos

As interações de partículas cósmicas com a atmosfera produzem efeitos detectáveis e relevantes:

- Geração de **chuveiros atmosféricos** com múons, neutrinos e partículas secundárias.
- Interferência em sistemas eletrônicos, telecomunicações e redes elétricas.
- Influência sobre a ionosfera e o clima espacial.

1.7 Efeitos Biológicos e Saúde Espacial

O impacto da radiação cósmica em organismos vivos é um campo emergente e crucial:

- Múons e partículas secundárias contribuem para a radiação de fundo na superfície terrestre.
- Em voos aéreos e missões espaciais, a exposição à **radiação cósmica galáctica (GCR)** é significativamente maior.
- O estudo da radiação cósmica é essencial para a segurança de astronautas e para a biotecnologia espacial.

1.8 Conclusão

A Física de Astropartículas se apresenta como uma ciência do futuro e do presente. Ela responde a grandes questões:

- De onde vêm os raios cósmicos de altíssima energia?
- Qual é a natureza da matéria escura?
- Existem partículas além das previstas pelo Modelo Padrão?
- Como surgiram as estruturas cósmicas que observamos hoje?

Ao integrar física fundamental, observações astrofísicas, tecnologias de ponta e preocupações com o meio ambiente e a saúde, a física de astropartículas ocupa uma posição central na busca pelo conhecimento sobre o universo e sobre nós mesmos.

2. Motivação Histórica da Física de Astropartículas

A origem da Física de Astropartículas remonta ao início do século XX, com descobertas experimentais sobre uma radiação ionizante misteriosa. A sequência de contribuições de diversos cientistas permitiu desvendar a existência de partículas de alta energia vindas do espaço, conhecidas hoje como *raios cósmicos*. A seguir, destacamos os marcos históricos mais relevantes.

2.1 C. T. R. Wilson (1895-1901)

O físico escocês Charles T. R. Wilson, ao desenvolver a câmara de nuvens, notou que o ar era constantemente ionizado por uma fonte desconhecida. Essa observação indicava a existência de uma radiação penetrante presente na atmosfera de origem incerta.

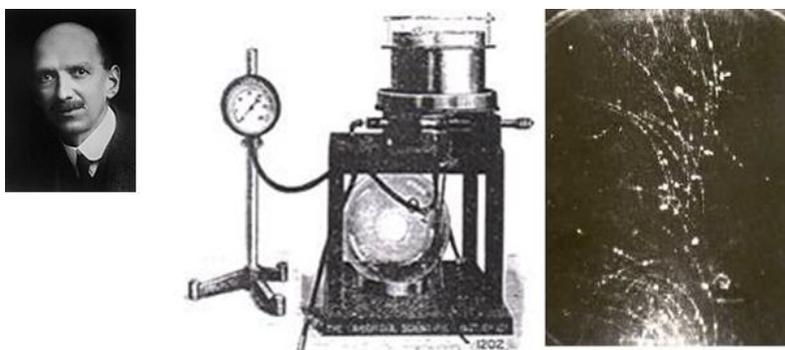


Figure 1: Charles Wilson e a câmara de nuvens(1912).

2.2 Theodor Wulf (1909)

Theodor Wulf, físico jesuíta, usou um eletrômetro para medir a taxa de ionização no topo da Torre Eiffel (300 metros). Embora tenha observado uma diminuição da radiação com a altitude, ela era muito menor do que a esperada se a radiação fosse exclusivamente terrestre. Essa anomalia sugeria uma origem extraterrestre.

 A composite image showing a photograph of the Eiffel Tower on the left and a table of ionization measurements on the right. The table is titled 'Phys. Zert. 11, 811 (1910)'.

Datum	O r t	Ionen ccm sec
28. März	Valkenburg	22,5
29. "	Paris, Boden	17,5
30. "	" Eiffelturm	16,2
31. "	" "	14,4
1. April	" "	15,0
2. "	" "	17,2
3. "	" Boden	18,3
4. "	" Valkenburg	22,0

Daraus ergeben sich als Mittelwerte für die drei Orte

	Ionen ccm·sec
Valkenburg	22,25
Paris Boden	18,0
Paris Eiffelturm	15,7

Figure 2: Medidas de ionização de T. Wulf na torre Eiffel (1909).

2.3 Victor Hess (1912)

Em uma série de voos de balão com eletroscópios selados, Victor Hess mediu o aumento da ionização a altitudes superiores a 5.000 metros. Concluiu que a radiação penetrante vinha do espaço, e não da Terra. Por essa descoberta, Hess recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1936.

Descoberta dos Raios Cósmicos

Victor Hess provou que a radiação ionizante aumentava com altitude, apontando para uma origem extraterrestre.

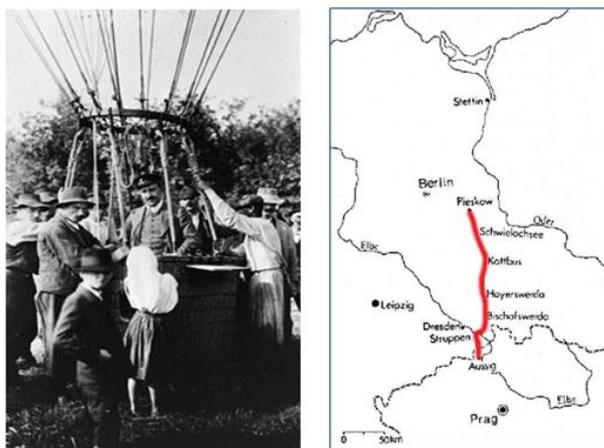


Figure 3: Voo de balão de Victor Hess (7/8/1912).

2.4 Werner Kölhörster (1913-1923)

Werner Kölhörster repetiu e estendeu os experimentos de Hess, atingindo altitudes ainda maiores. Seus resultados confirmaram o aumento da ionização com a altitude, solidificando a hipótese de origem cósmica.

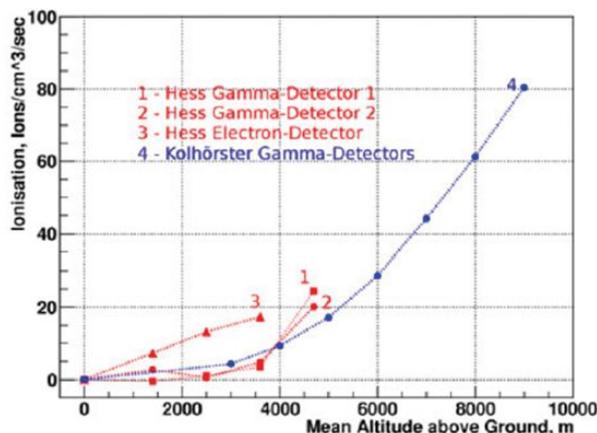


Figure 4: Medidas de ionização em função da altitude por Hess (1912) e Kolhörster (1914).

2.5 Robert A. Millikan (1925)

Millikan, inicialmente cético, realizou medições em lagos de alta altitude e cunhou o termo “*cosmic rays*” (raios cósmicos). Apesar de erroneamente acreditar que se tratava de radiação gama, seu trabalho ajudou a popularizar o estudo dessa radiação no meio científico.

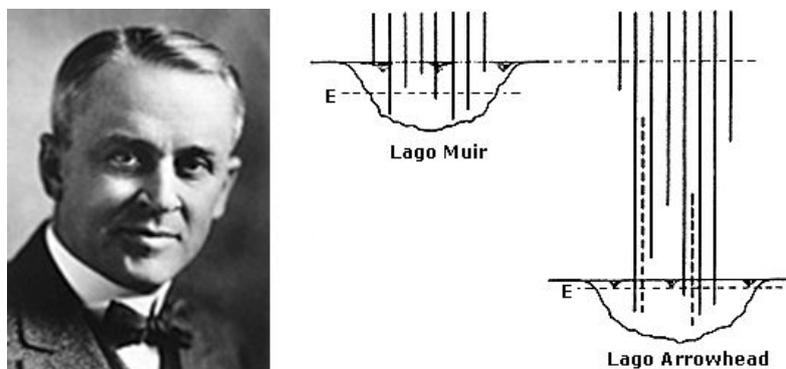


Figure 5: Experimento de Millikan (1926).

2.6 Erich Regener (1933)

Erich Regener utilizou câmaras de ionização em balões para estudar o perfil da radiação com a altitude. Foi um dos primeiros a sugerir que os raios cósmicos eram compostos por partículas, e não apenas radiação eletromagnética.

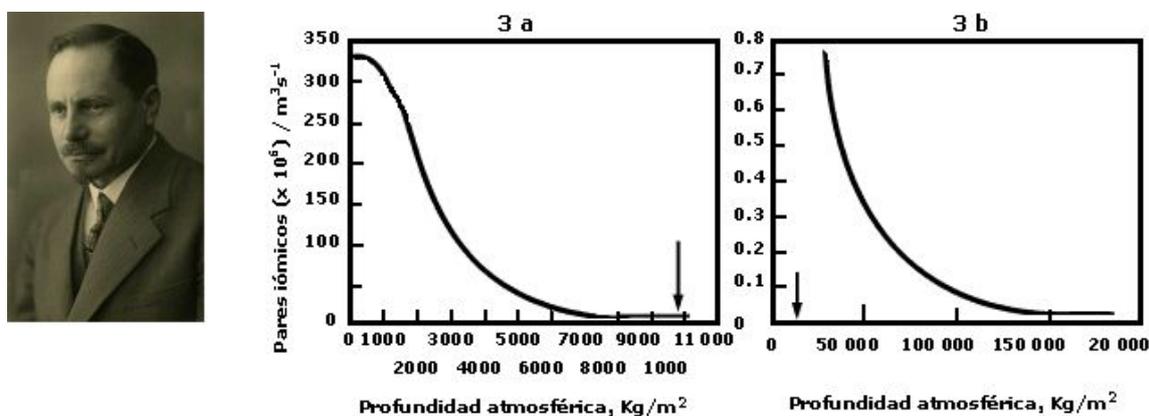


Figure 6: Medidas de Regener (1933).

2.7 Carl D. Anderson (1932)

Trabalhando com câmaras de nuvens e campos magnéticos, Carl Anderson observou a trilha de uma partícula com carga positiva e mesma massa que o elétron — o **pósitron**. Foi a primeira detecção de uma partícula de antimatéria. Em 1936, descobriu também o **múon**, uma partícula instável mais massiva que o elétron.

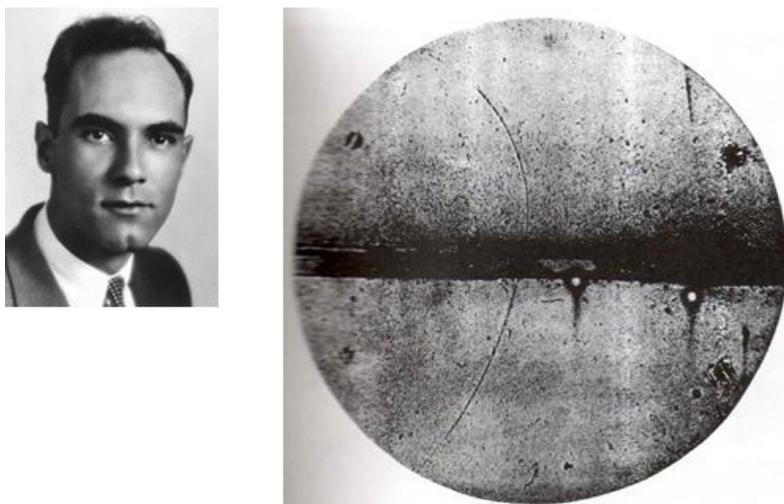


Figure 7: Anderson e a descoberta do pósitron (1932).

2.8 Pierre Auger (1938)

Pierre Auger observou correlações entre partículas detectadas a centenas de metros de distância, o que indicava que uma única partícula cósmica de altíssima energia poderia gerar um **chuveiro atmosférico extenso** (EAS). Esse fenômeno é fundamental para a detecção moderna de partículas cósmicas no solo.

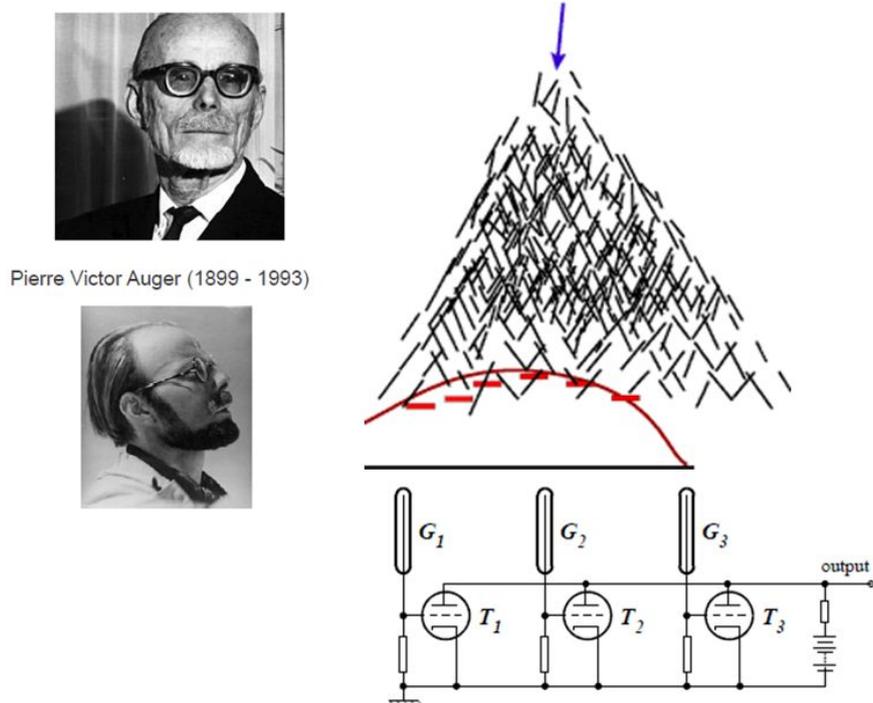


Figure 8: Pierre Auger e a descoberta dos chuveiros atmosféricos extensos (1938).

2.9 Enrico Fermi (1949)

Enrico Fermi desenvolveu um modelo para explicar como partículas poderiam alcançar energias tão elevadas. Ele propôs a **aceleração estocástica** em campos magnéticos em movimento (processo Fermi de 2ª ordem), mais tarde aperfeiçoado para choques de supernovas (processo Fermi de 1ª ordem).

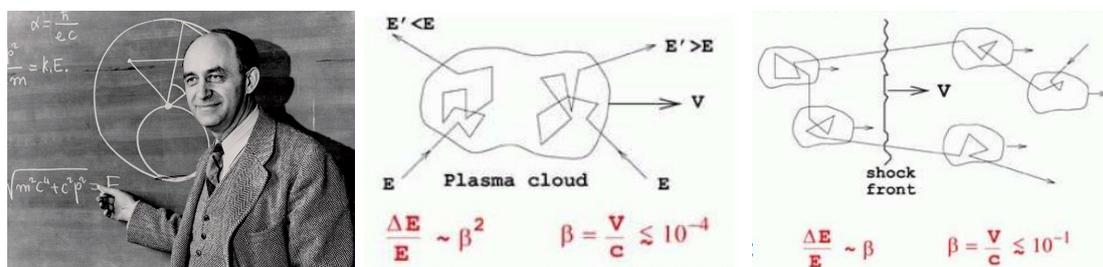


Figure 9: Enrico Fermi e os mecanismos de aceleração de 2ª e 1ª ordem.

2.10 John Linsley (1962)

John Linsley detectou um raio cósmico com energia superior a 10^{20} eV, demonstrando que existem fontes astrofísicas capazes de acelerar partículas a energias extremamente altas. Sua descoberta marcou o início do estudo dos **raios cósmicos ultraenergéticos**.

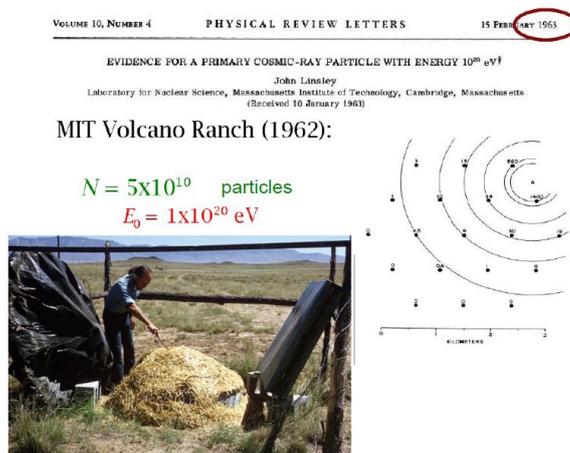


Figure 10: John Linsley em Volcano Ranch e a primeira medida de um chuveiro de ultra-alta energia ($E = 1 \times 10^{20}$ eV).

2.11 Conclusão Histórica

Esses marcos estabeleceram os fundamentos da Física de Astropartículas. De uma radiação desconhecida, revelaram-se partículas fundamentais, novas interações, efeitos atmosféricos e conexões cósmicas. O campo se consolidou como uma interface entre a física de partículas, a astrofísica e a cosmologia.

3. Origens das Partículas Cósmicas

Os raios cósmicos são partículas altamente energéticas que chegam à Terra vindas do espaço. Sua origem, composição e propagação estão diretamente ligadas a processos astrofísicos extremos. Eles são tradicionalmente classificados em **primários** e **secundários**, conforme a etapa em que são observados e sua interação com a atmosfera terrestre.

3.1 Partículas Primárias e Secundárias

- **Primárias:** São as partículas que chegam do espaço e interagem pela primeira vez com a atmosfera terrestre. A maioria são prótons e núcleos leves. Essas partículas são aceleradas por fontes astrofísicas como supernovas, pulsares, jatos relativísticos, galáxias ativas e outros ambientes extremos.
- **Secundárias:** São produzidas pelas interações das primárias com os átomos da atmosfera (principalmente nitrogênio e oxigênio). Essa colisão desencadeia uma cascata de partículas chamada **chuva atmosférica extensa**, composta por:
 - **Múons** - resultado do decaimento de píons e káons.
 - **Píons, Káons, Bárions** - produzidos nas interações hadrônicas.
 - **Elétrons, Pósitrons, Fótons** - oriundos de decaimentos e conversões.
 - **Neutrinos** - emitidos em decaimentos fracos.

Essas partículas secundárias são detectadas por experimentos terrestres como o Pierre Auger, IceCube, e detectores de superfície com cintiladores ou Cherenkov.

3.2 Composição dos Primários

A composição dos raios cósmicos primários depende da energia. Abaixo, está a distribuição geral por faixa energética:

- **$E < 10^9$ eV (100 MeV - 1 GeV):** Componente dominado por partículas solares, vento solar, com grande influência do ciclo solar.
- **$10^9 - 10^{15}$ eV (região galáctica):**
 - **Prótons (H):** 90%
 - **Núcleos de Hélio (He):** 9%
 - **Outros núcleos pesados (Li, C, O, Fe):** 1%
 - **Elétrons e pósitrons:** pequena fração (< 1%)

- $10^{15} - 10^{18}$ eV (região do "joelho"):
 - A composição se torna gradualmente mais rica em **núcleos pesados**, como C, O, Si e Fe.
- $> 10^{18}$ eV (região do "tornozelo" até ultra-altas energias):
 - A origem pode ser extragaláctica.
 - Há debate: algumas observações indicam presença de **prótons** predominantemente; outras, uma mistura com **elementos pesados**.

Modelo da Caixa Furada

O “*leaky box model*” é uma analogia simples para descrever a propagação de partículas cósmicas na Galáxia. Imagine uma caixa fechada (a galáxia), onde partículas são injetadas pelas fontes (supernovas, por exemplo). As partículas colidem, se espalham e eventualmente escapam por pequenas “fugas” nas bordas da caixa.

Esse modelo permite estimar o tempo médio de confinamento e as taxas de interação com o meio interestelar, e ajuda a explicar a abundância relativa de elementos leves e secundários, como o lítio e o boro.

4. Espectro Energético dos Raios Cósmicos

Os raios cósmicos apresentam uma distribuição de energia que cobre mais de 11 ordens de grandeza, desde 10^9 eV até acima de 10^{20} eV. Essa ampla faixa energética revela informações sobre os mecanismos de aceleração e propagação dessas partículas no universo.

4.1 Espectro Geral

O espectro diferencial de raios cósmicos (número de partículas por unidade de energia, área, tempo e ângulo sólido) é bem descrito por uma **lei de potência**:

$$\Phi(E) = k \cdot E^{-\gamma}, \quad (1)$$

onde:

- $\Phi(E)$ é o fluxo (em partículas / $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{eV}$)
- E é a energia da partícula (em eV)
- γ é o índice espectral

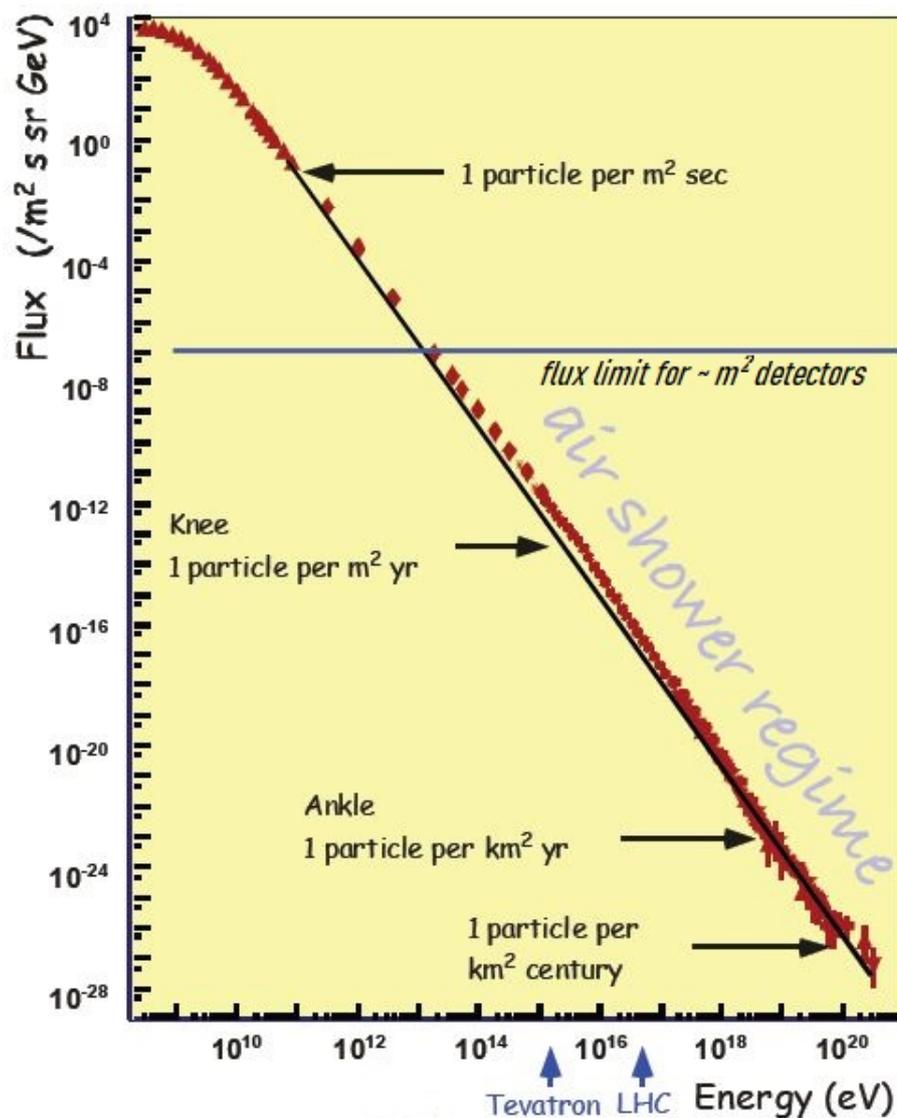


Figure 11: Espectro de raios cósmicos em escala log-log.

Em gráfico log-log, o espectro apresenta trechos aproximadamente lineares, com diferentes inclinações:

- Abaixo de 10^{15} eV: $\gamma \approx 2.7$
- Entre 10^{15} e 10^{18} eV (região do “joelho”): $\gamma \approx 3.0$
- Acima de 10^{18} eV (região do “tornozelo”): $\gamma \approx 2.6$ (indício de transição para fontes extragalácticas)

4.2 Espectro Modificado: $E^\gamma \cdot \Phi(E)$

Para melhor visualização das estruturas do espectro, é comum multiplicar o fluxo pela energia elevada ao expoente do primeiro trecho da curva ($E^{2.7}$):

$$I(E) = E^{2.7} \cdot \Phi(E)$$

Esse procedimento “achata” a curva em uma determinada faixa de energia, realçando desvios — como a queda acentuada no joelho e o endurecimento no tornozelo.

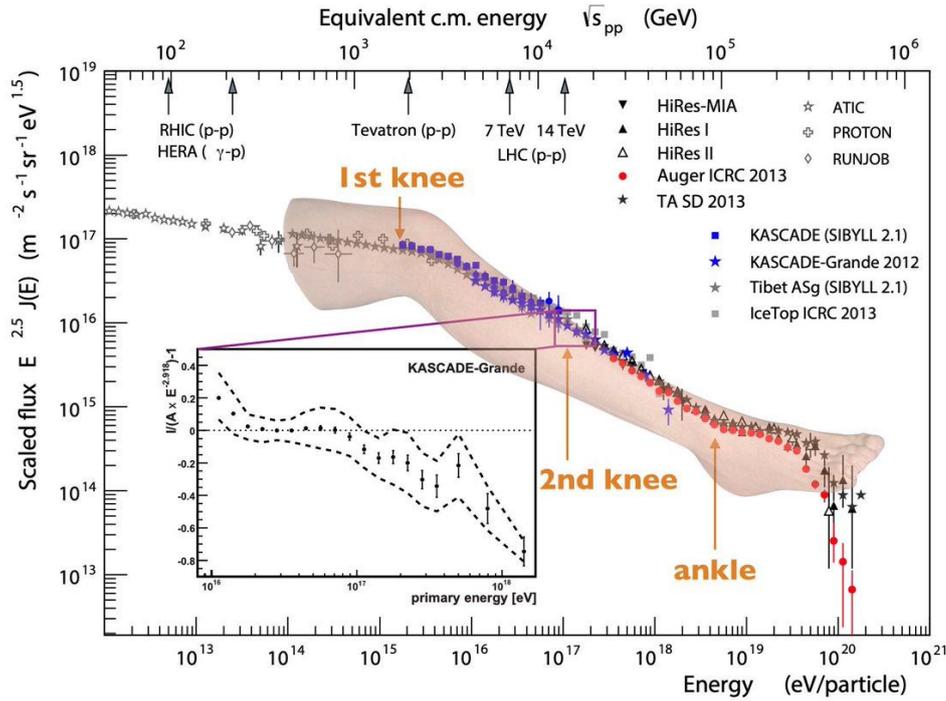


Figure 12: Espectro multiplicado por $E^{2.5}$, evidenciando desvios da lei de potência simples.

Lei de Potência a partir de um Gráfico Log-Log

Se um gráfico de $\log_{10} \Phi(E)$ versus $\log_{10} E$ resulta em uma linha reta, podemos deduzir uma relação de potência da forma:

$$\log_{10} \Phi(E) = \log_{10} k - \gamma \cdot \log_{10} E \Rightarrow \Phi(E) = k \cdot E^{-\gamma}$$

Assim, a inclinação da reta corresponde a $-\gamma$, e o intercepto em $E = 1$ é $\log_{10} k$. Este comportamento caracteriza sistemas com escalas invariantes, típicos de processos não térmicos.

7. Código Python

Objetivo: Gerar espectro energético em gráfico log-log.

```

1  %matplotlib inline
2
3  import numpy as np
4  import matplotlib.pyplot as plt
5
6  # Definição da faixa de energia (10^9 a 10^20 eV)
7  E = np.logspace(9, 20, 500) # energia em eV
8  gamma = -2.7
9  k = 1e20 # constante de normalização arbitrária
10
11 # Espectro de energia com lei de potência
12 phi = k * E**gamma
13
14 # Gráfico log-log
15 plt.figure(figsize=(8, 5))
16 plt.loglog(E, phi, label=r'$\Phi(E) = k \cdot E^{-2.7}$', color='blue')
17 plt.xlabel('Energia (eV)')
18 plt.ylabel(r'Fluxo $\Phi(E)$ (unidades arbitrárias)')
19 plt.title('Espectro de Energia com Lei de Potência ($\gamma = -2.7$)')
20 plt.grid(True, which='both', linestyle='--', linewidth=0.5)
21 plt.legend()
22 plt.tight_layout()
23 plt.show()

```

Listing 1: Gráfico do fluxo de raios cósmicos

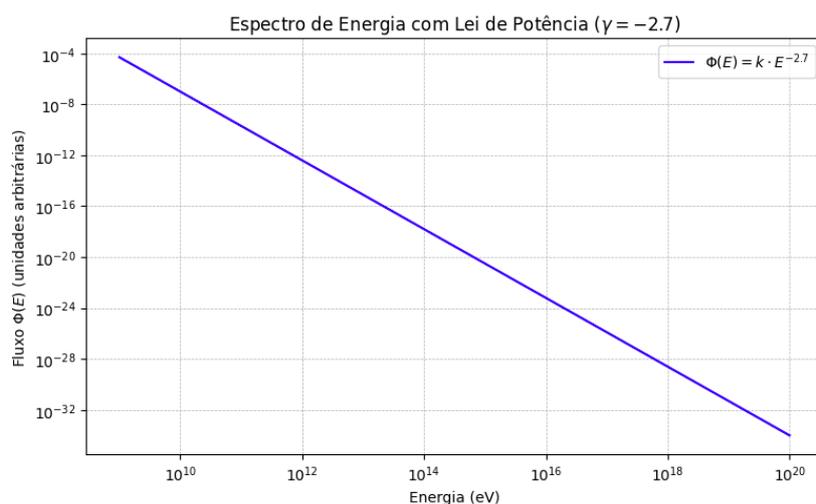


Figure 13: Espectro energético de uma lei de potência em gráfico log-log.

8. Exercícios

1. Explique a diferença entre partículas cósmicas primárias e secundárias.
2. Calcule a razão $\Phi(10^{12} \text{ eV})/\Phi(10^{10} \text{ eV})$ para $\gamma = 2.7$.
3. Justifique o uso de escalas logarítmicas no espectro energético.
4. Como as astropartículas podem indicar física além do Modelo Padrão?

9. Referências

- M. Spurio, *Particles and Astrophysics: A Multi-Messenger Approach*, Springer International Publishing (2014).
- Gaisser, T. K. *Cosmic Rays and Particle Physics*.
- Longair, M. S. *High Energy Astrophysics*.
- PDG: *Review of Particle Physics*.

Aula 2 - Raios C3smicos e Atmosfera Terrestre

Os raios c3smicos prim3rios, ao atingirem a atmosfera terrestre, desencadeiam uma s3rie de intera33es nucleares que geram uma cascata de part3culas secund3rias, conhecidas como **chuveiros atmosf3ricos extensos**. Essa cascata 3 observ3vel por detectores em solo e fornece informa33es sobre a part3cula incidente e o meio de propaga33o.

Quando uma part3cula c3smica prim3ria (geralmente um pr3ton ou n3cleo leve) colide com n3cleos do alto da atmosfera terrestre, inicia uma sequ3ncia de intera33es que produzem um grande n3mero de part3culas secund3rias. Esse fen3meno 3 chamado de **chuveiro atmosf3rico extenso** (em ingl3s, Extensive Air Shower — EAS).

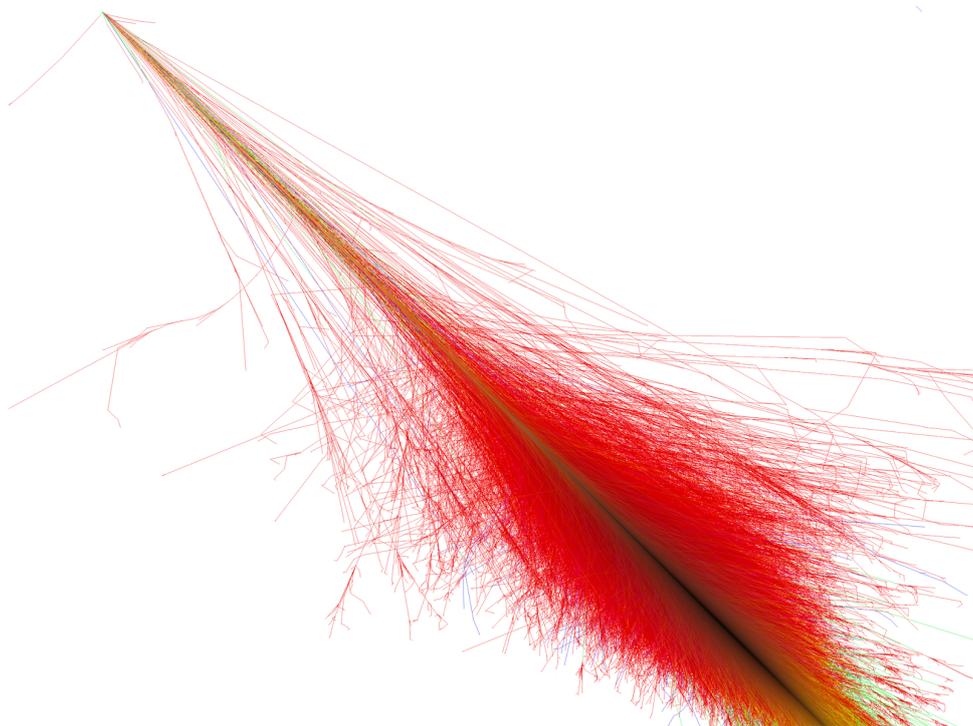


Figure 14: Um chuveiro atmosf3rico extenso produzido durante a intera33o de um raio c3smico de alta energia com a atmosfera. Diferentes tipos de part3culas secund3rias s3o produzidas.

1. Intera33es de Altas Energias na Atmosfera

Quando um pr3ton ou n3cleo prim3rio de alta energia colide com n3cleos do ar (principalmente nitrog3nio e oxig3nio), a energia cin3tica 3 convertida em produ33o de part3culas:

- Intera33es hadr3nicas com produ33o de π^\pm , π^0 , K^\pm , b3rions, etc.
- Decaimento de $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ inicia o componente eletromagn3tico.
- Decaimento de $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$ gera m3ons e neutrinos.

A partícula primária tem energia tipicamente entre 10^9 e 10^{20} eV. A atmosfera funciona como um alvo de absorção com espessura mássica de aproximadamente 1030 g/cm^2 ao nível do mar.

2. Componentes do Chuveiro Atmosférico

- **Componente hadrônica:** formada por mésons e bárions que continuam gerando subcascatas.
- **Componente eletromagnética:** composta por elétrons, pósitrons e fótons, resulta da conversão e decaimento de π^0 .
- **Componente muônica:** composta por múons estáveis que viajam longas distâncias e chegam ao solo.

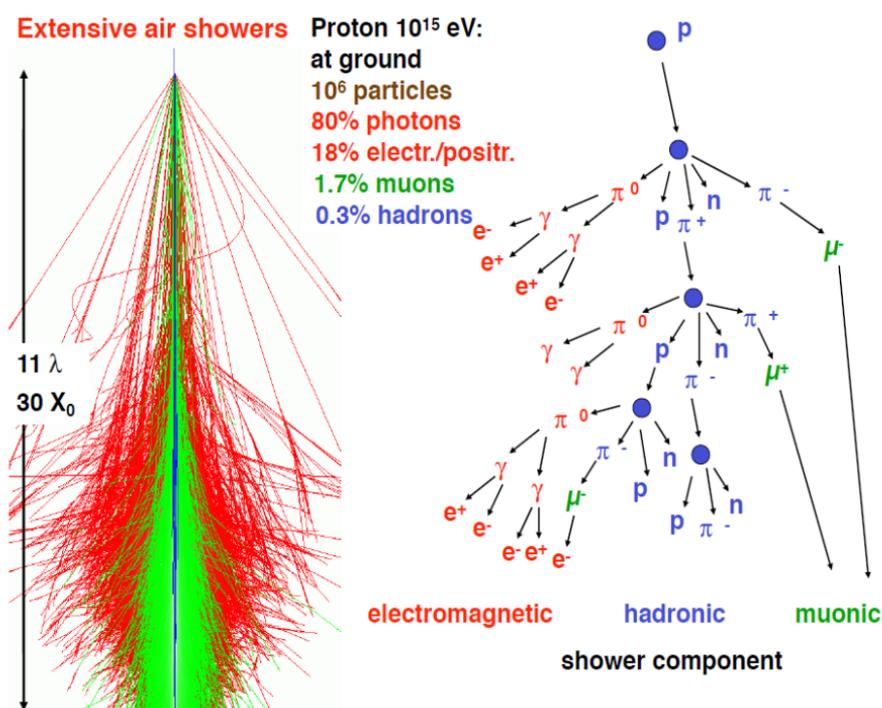


Figure 15: Desenvolvimento de um chuveiro atmosférico com suas três componentes principais: eletromagnética, hadrônica e muônica.

O chuveiro se desenvolve em várias camadas da atmosfera e possui três componentes principais, que se propagam e interagem de maneira diferenciada até atingir o solo.

5.1 Componente Hadrônica

A componente hadrônica é a primeira a se formar, logo após a colisão inicial da partícula primária com o núcleo atmosférico (N, O). Nesse processo:

- São produzidos **mésons** (principalmente píons π^\pm , π^0) e **káons**, além de outros bárions.
- Os píons carregados (π^\pm) podem:
 - Sofrer novas interações hadrônicas, continuando o chuveiro hadrônico.
 - Decair em múons e neutrinos: $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$.
- Os píons neutros (π^0) decaem quase instantaneamente em dois fótons:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

dando origem à componente eletromagnética.

A cascata hadrônica é responsável pela produção contínua das outras duas componentes do chuveiro.

5.2 Componente Eletromagnética

A partir dos fótons produzidos pelo decaimento dos π^0 , se inicia uma cascata de partículas eletromagnéticas, principalmente:

- **Produção de pares:**

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

- **Bremsstrahlung (frenagem):**

$$e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma$$

Essa cadeia alternada de processos continua enquanto a energia das partículas exceder um valor crítico, gerando uma grande população de elétrons, pósitrons e fótons. A componente eletromagnética representa a maior parte da energia visível do chuveiro e é detectável por telescópios Cherenkov, cintiladores e radiotelescópios.

5.3 Componente Muônica

Os múons (μ^\pm) são formados principalmente a partir do decaimento de píons e káons carregados. Eles possuem massa cerca de 200 vezes maior que a do elétron e têm uma vida média de aproximadamente $2,2 \mu\text{s}$.

- Devido à sua massa e ao tempo de vida relativamente longo, os múons conseguem atravessar grandes distâncias na atmosfera com pouca perda de energia.

- Muitos deles chegam até o nível do mar e podem até penetrar rochas ou camadas de gelo.
- Sua taxa de decaimento é:

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e + \nu_\mu$$

A componente muônica é crucial para a reconstrução do eixo do chuveiro e sua energia. Detectores subterrâneos ou blindados (como MINOS, IceCube, e detectores do Auger) são capazes de observar essas partículas mesmo sob cobertura.

5.4 Estrutura Global do Chuveiro

Figure 16: Esquema de um chuveiro atmosférico extenso com suas três componentes: hadrônica, eletromagnética e muônica.

O chuveiro cresce até atingir um número máximo de partículas (profundidade de máximo X_{\max}), e em seguida diminui devido à perda de energia e à absorção atmosférica. O estudo da morfologia do chuveiro permite inferir a energia e o tipo da partícula primária.

6. A Fórmula de Atenuação

Ao atravessarem a atmosfera, as partículas secundárias produzidas nos chuveiros atmosféricos sofrem perdas por absorção, decaimento ou espalhamento. A variação da quantidade de partículas com a profundidade atmosférica pode ser descrita por uma **lei de atenuação exponencial**, válida para partículas instáveis como os múons e para fótons com interação eletromagnética.

6.1 Profundidade Atmosférica e Espessura Mássica

A **profundidade atmosférica** X é uma medida da quantidade de matéria que uma partícula atravessa ao longo de sua trajetória. Ela é expressa como:

$$X = \int_0^h \rho(h') dh'$$

onde:

- X é a profundidade (em g/cm^2);
- $\rho(h')$ é a densidade do ar na altitude h' ;
- dh' é o elemento de altura (em cm).

Essa quantidade é conhecida como **espessura mássica** e permite comparar a capacidade de absorção de diferentes materiais. Por exemplo:

- 1 g/cm² de **ar** equivale a cerca de 8 metros de coluna de ar no nível do mar;
- 1 g/cm² de **água** equivale a 1 cm de profundidade;
- 1 g/cm² de **chumbo (Pb)** equivale a menos de 0,1 mm.

6.2 Tabela de Profundidade Atmosférica por Altitude

Abaixo está uma tabela com valores aproximados de densidade do ar e profundidade acumulada em g/cm² para diferentes altitudes:

Table 1: Densidade do ar e profundidade atmosférica acumulada

Altitude (km)	Densidade do ar (g/cm ³)	Profundidade acumulada (g/cm ²)
0 (nível do mar)	1.225e-3	1030
5	7.37e-4	540
10	3.12e-4	270
15	1.65e-4	130
20	8.89e-5	60
25	4.00e-5	30
30	1.85e-5	15

Esses valores são aproximados e dependem da latitude, estação do ano e condições meteorológicas.

6.3 A Lei de Atenuação

Seja N_0 o número de partículas presentes em uma certa altitude h_0 . À medida que descem, elas são absorvidas ou decaem segundo a expressão:

$$N(X) = N_0 \cdot e^{-X/\lambda}$$

onde:

- $N(X)$ é o número de partículas após atravessar profundidade X ;
- λ é o **comprimento de atenuação** (em g/cm²).

Por exemplo, para $N_0 = 10^6$ e $\lambda = 8$ km, calcule a intensidade em 20 km de altitude:

$$N(20) = 10^6 \cdot e^{-20/8} \approx 10^6 \cdot 0,0821 \approx 8,2 \times 10^4$$

Exemplo de Aplicação

Suponha que um feixe de múons com energia média alta esteja presente a 20 km de altitude, onde a profundidade atmosférica é de aproximadamente 60 g/cm². Para $\lambda = 120$ g/cm², qual a fração que chega ao nível do mar ($X = 1030$ g/cm²)?

$$\frac{N(1030)}{N(60)} = e^{-(1030-60)/120} \approx e^{-8.08} \approx 3.1 \times 10^{-4}$$

Ou seja, apenas cerca de 0,03% dos múons chegam ao solo.

3. Lei de Atenuação Exponencial

A quantidade de partículas secundárias que sobrevive até uma profundidade atmosférica X segue a lei:

$$N(X) = N_0 \cdot e^{-X/\lambda}$$

onde:

- X é a profundidade atmosférica (em g/cm²);
- λ é o comprimento de atenuação característico da partícula.

4. Exercício Resolvido - Energia Mínima de um Múon

Problema: Qual a energia mínima que um múon precisa ter para atravessar toda a atmosfera (1030 g/cm²) e chegar ao nível do mar?

Solução: Sabemos que a energia média perdida por um múon ao atravessar a atmosfera é de aproximadamente 2 MeV/(g/cm²). Assim, a energia mínima E_{\min} para um múon chegar ao nível do mar é:

$$E_{\min} = (2 \text{ MeV/g/cm}^2) \times (1030 \text{ g/cm}^2) = 2060 \text{ MeV} = 2.06 \text{ GeV}$$

Ou seja, o múon precisa ter pelo menos 2,06 GeV de energia para alcançar o solo, sem considerar efeitos relativísticos ou variações de trajetória.

5. Simulação Python - Atenuação de Múons

```

1 %matplotlib inline
2
3 import numpy as np
4 import matplotlib.pyplot as plt
5
6 X = np.linspace(0, 1030, 200) # profundidade em g/cm2

```

```

7 lambda_muon = 120 # comprimento de atenuação típico para múons
8
9 NO = 1.0 # número inicial (normalizado)
10 N = NO * np.exp(-X / lambda_muon)
11
12 plt.plot(X, N, label='N(X) = NO * exp(-X/?)')
13 plt.xlabel('Profundidade Atmosférica (g/cmš)')
14 plt.ylabel('Fração de múons sobreviventes')
15 plt.title('Atenuação de Múons na Atmosfera')
16 plt.grid(True)
17 plt.legend()
18 plt.show()

```

Listing 2: Simulação de atenuação de múons por profundidade atmosférica

Figure 17: Gráfico da atenuação de múons com a profundidade atmosférica.

Aula 3 - Detectores de Partículas em Astropartículas

1. Introdução: Interações de Altíssima Energia

Partículas cósmicas de energia superior a GeV interagem com a matéria por processos fundamentais:

- **Interações eletromagnéticas** Envolvem fótons, elétrons ou múons. A perda de energia por fótons ocorre via efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares. Elétrons e múons perdem energia principalmente por *Bremsstrahlung* e perdem ionização, segundo os princípios de Bethe-Bloch.

- **Interações hadrônicas** Partículas carregadas (prótons, núcleos) geram interações com núcleos, produzindo cascatas de mesões (π^\pm , π^0 , K), que por sua vez decaem em elétrons, fótons, neutrinos e múons, formando chuviscos atmosféricos.

—

2. Principais Detectores

Pierre Auger (raios cósmicos): Rede de tanques de água + telescópios de fluorescência cobrindo 3.000 km². Detecta partículas secundárias e luz Cherenkov da chuva atmosférica :contentReference[oaicite:6]index=6.

Telescópios Cherenkov (CTA, MAGIC, HESS): Detectam flashes de luz Cherenkov gerados por chuviscos. CTA será sensível de dezenas de GeV até centenas de TeV index=7.

Detectores de neutrinos (IceCube, KM3NeT): Redes de sensores ópticos em gelo ou água captam a luz Cherenkov de múons induzidos por neutrinos index=8.

Box - Como funciona um telescópio Cherenkov

Partículas relativísticas (muitas vezes elétrons/pósitrons) se movem no ar mais rápido que a luz no meio, emitindo pulsos de luz Cherenkov azul em ângulo θ_c com $\cos \theta_c = 1/(n\beta)$. Telescópios IACT usam grandes espelhos e câmeras sensíveis para captar flashes de 5-20 ns de chuviscos iniciados por raios gama index=9.

3. Simulação de Múons em Cintilador Plástico

Objetivo: Estimar a resposta de um cintilador plástico ao sinal de múons cósmicos, incluindo a flutuação de perda de energia segundo distribuição de Landau.

```

1 %matplotlib inline
2
3 import numpy as np
4 import matplotlib.pyplot as plt
5
6 # Parâmetros da simulação
7 N = 100000 # número de múons simulados
8 thickness_cm = 2.5
9 density = 1.02 # g/cm3 (plástico)
10 X = thickness_cm * density # espessura mássica (g/cm2)
11
12 # Perda média de energia (estimada)
13 mean_loss = 2.0 * X # MeV
14 sigma = 0.2 * mean_loss # desvio padrão (flutuação estatística)
15
16 # Simulação com distribuição gaussiana
17 dE = np.random.normal(loc=mean_loss, scale=sigma, size=N)
18
19 # Remover valores negativos que não fazem sentido fisicamente
20 dE = dE[dE > 0]
21
22 # Gráfico
23 plt.hist(dE, bins=100, density=True, alpha=0.7, color='skyblue',
24          edgecolor='black')
25 plt.xlabel('Perda de energia (MeV)')
26 plt.ylabel('Densidade de probabilidade')
27 plt.title('Simulação da perda de energia de múons (distribuição
28           Gaussiana)')
29 plt.grid(True)
30 plt.tight_layout()

```

```
plt.show()
```

Listing 3: Monte Carlo: múon em cintilador plástico

4. Referências

- CTAO - Cherenkov Telescope Array :contentReference[oaicite:10]index=10.
- Funcionamento de detectores Cherenkov :contentReference[oaicite:11]index=11.
- Pierre Auger - tanques de água e fluorescência :contentReference[oaicite:12]index=12.
- KM3NeT - detector de neutrinos submarino :contentReference[oaicite:13]index=13.
- Landau loss in plastic scintillators - distribuição de Landau em múons :contentReference[oaicite:14]index=14.