

## 3 Chuveiros Extensivos de Ar

Chuveiros extensivos de ar são cascatas de partículas que se propagam pela atmosfera. Elas são geradas pela interação dos raios cósmicos primários de alta energia com as moléculas no topo da atmosfera que viajam com velocidades próximas as da luz. O número de partículas secundárias na cascata aumenta com a subsequente geração de interações das partículas e isto deveria aumentar continuamente para interagir e permitir que a energia gerada atinja um valor crítico de energia. Devido ao rápido decaimento dos píons neutros, cerca de 30% da energia em cada geração é transferida para uma cascata eletromagnética. As outras duas componentes dos chuueiros extensivos de ar são muônicas e hadrônicas. A figura 3.1 mostra o desenvolvimento de um chuueiro.

### 3.1 Desenvolvimento de EAS

#### 3.1.1 Cascatas Hadrônicas

A componente hadrônica da cascata é comumente formada por píons carregados ou káons provenientes de decaimentos, colisões ou ressonâncias de bárions estranhos. Esta componente forma o eixo do chuueiro, juntamente com outras componentes. Através do decaimento dos píons neutros e das partículas em fótons ou em produção de pares, criando uma cascata eletromagnética. Píons de energias mais baixas e kaons decaem para formar a componente muônica.

As interações hadrônicas a energias mais elevadas são um dos pontos de estudo e fontes de erros na análise dos chuueiros de ar, visto que um colisor capaz de reproduzir tais energias ainda não existe.

#### 3.1.2 Componente Muônica

A componente muônica é originada pelo decaimento dos píons e kaons carregados em neutrinos e muons. O número de muons encontrado em um

chuveiro iniciado hadronicamente depende da probabilidade dos píons decaírem antes de interagirem, entretanto é sensível a conteúdo barionico do primário, energia e densidade local do ar. Os neutrinos não contribuem muito, eles não são detectados e não interagem porque têm uma seção de choque extremamente pequena. Por outro lado, os múons tem um grande tempo de vida por causa do fator da dilatação do fator de Lorentz portanto, eles são capazes de atingir o solo. O número de muons que atingem o solo é cerca de  $5 \times 10^8$  com energias acima de 1 GeV para  $10^{20}$  eV protons induzidos por chuva. Muons com alta energia viajam mais ou menos em trajetória retilínea, porque sofrem um pequeno espalhamento o que faz com cheguem mais rápido ao solo do que os elétrons. Devido a essas características a componente muónica é muito útil na reconstrução das frentes do chuva (no caso da detecção do SD).

Os muons de energia mais elevadas são detectados ao nível do mar e são capazes de fornecer informação acerca dos processos ocorridos recentemente no desenvolvimento do chuva, pois a componente muonica é acoplada diretamente com a componente hadronica, logo reflete mais propriedades dos hadrons iniciais. Portanto, muons podem ser usados para se estudar a composição química do raio cósmico primário, porque sua multiplicidade depende do número atomico da partícula primária.

É uma importante consideração que todos os parametros sensíveis para a composição química do raio cósmico primário depende da energia primária, a profundidade máxima atmosférica depende da multiplicidade dos muons. Sendo assim, é de grande importância que sejam medidos diretamente.

### 3.1.3

#### Cascata Eletromagnética

A componente eletromagnética é um processo dominante no desenvolvimento de chuvas extensivos de ar, porque as outras componentes terminam antes dela (mais de 1/3 da energia das componentes hadrónicas vem da evolução da cascata eletromagnética em cada estágio). Cada fóton de alta energia gera um sub-chuva eletromagnético alternando produção de pares e bremsstrahlung. Estes processos são repetidos iterativamente, gerando uma cascata de pares elétron-pósitron e fótons que continuarão até que a energia dos elétrons secundários atinja um nível crítico,  $E_c \approx 80 MeV/Z$ , onde a perda de ionização é igual a do bremsstrahlung. A cascata eletromagnética dissipa cerca de 90% da energia da partícula primária e então o número total de partículas eletromagnéticas é proporcional a energia do chuva.

### 3.1.4

### Propagação de EAS

A atmosfera é um calorímetro cujas propriedades variam com a altitude e o tempo, por esta razão, a quantidade que melhor descreve a variação de densidade na atmosfera é a profundidade vertical atmosférica (matéria transversa):

$$X_v(h) = \int_h^\infty \rho_{atm}(z) dz \quad (3-1)$$

onde  $\rho_{atm}(h) = \rho_0 e^{h/h_0}$  é a densidade atmosférica, com  $h_0 = \frac{RT}{\mu}$  o peso de escala da atmosfera,  $R$  a constante do gás ideal,  $\mu$  a média molecular do peso do ar,  $g$  a gravidade,  $T \approx 288K$  a temperatura e  $z$  o peso.

Sendo assim, o desenvolvimento de chuveiros extensivos de ar na atmosfera é dado pela profundidade a qual define a densidade da coluna de ar atravessada pelo chuveiro. Para chuveiros inclinados do ângulo zenital  $\theta$  é dada uma boa aproximação ( $\theta \leq 80^\circ$ ) por:

$$X = \frac{X_v(h)}{\cos\theta} \quad (3-2)$$

Uma parametrização aproximada da evolução longitudinal dos chuveiros de ar foi proposta por Gaisser (36). e Hillas (15).

$$N(X) = N_{max} \left( \frac{X - X_0}{X_{max} - X_0} \right)^{\frac{X_{max} - X_0}{\lambda}} \exp \left[ \frac{X_{max} - X}{\lambda} \right] \quad (3-3)$$

sendo  $X_0$  o ponto da primeira interação e  $\lambda \approx 70g/cm^2$  o livre caminho médio hadrónico no ar. Integrando todas as partículas carregadas ao longo da profundidade, a energia calorimétrica pode ser encontrada.

$$E_{cal} = \int_0^\infty \frac{dE}{dX} |_{ion} dX \approx \frac{E_{crit}}{X} \int_0^\infty N(X) dX \quad (3-4)$$

Para um chuveiro de fótons induzidos, o desenvolvimento longitudinal pode ser aproximado por:

$$N_e(E_{prim}, t) = 0.31 \left( \ln \frac{E_{prim}}{E_{crit}} \right)^{-1/2} \exp [t(1 - 1.5 \ln s)] \quad (3-5)$$

com  $t = X/X_0$  sendo a profundidade atmosférica em termos do comprimento da radiação eletromagnética  $X_0$  e  $s$  é a idade do chuveiro:

$$s = \frac{3t}{t + 2 \ln \left( \frac{E_{prim}}{E_{crit}} \right)} \quad (3-6)$$

que é igual a zero quando o chuveiro está começando e é igual a um quando atinge seu máximo.

### 3.1.5 Distribuição Lateral do Chuveiro

A distribuição lateral de um chuveiro é geralmente determinada pelo espalhamento múltiplo de elétrons, sabendo que a componente eletromagnética é a mais dominante no chuveiro.

A propagação lateral de um chuveiro puramente eletromagnético pode ser calculado e parametrizado pela função NKG, após Nishimura, Kamata e Greisen.

$$\rho_e \approx C(s) \frac{N_e}{2\pi r_m^2} \left( \frac{r}{r_m} \right)^{(s-2)} \left( 1 + \frac{r}{r_m} \right)^{(s-4.5)} \quad (3-7)$$

onde  $r_m$  denota o raio de Moliere e  $C(s)$  é um fator de normalização dado por:

$$C(s) = \frac{\Gamma(4.5 - s)}{\Gamma(s)\Gamma(4.5 - s)} \quad (3-8)$$

onde  $s$  é a idade do chuveiro.

Por outro lado, a componente muónica de um EAS depende da probabilidade dos píons decaírem ao invés de interagirem. A componente muónica está também relacionada a componente hadrónica e portanto reflete mais diretamente que a componente eletromagnética as propriedades iniciais dos hadrons. A distribuição lateral dos muons é mais suave que a distribuição dos elétrons, logo, para distâncias afastadas do eixo, a densidade de muons e a densidade eletromagnética começa a ser comparável e o sinal (que depende do tipo de detector) da componente muónica torna-se a componente eletromagnética. Na figura 3.2 é mostrada a distribuição lateral para partículas carregadas e muons.

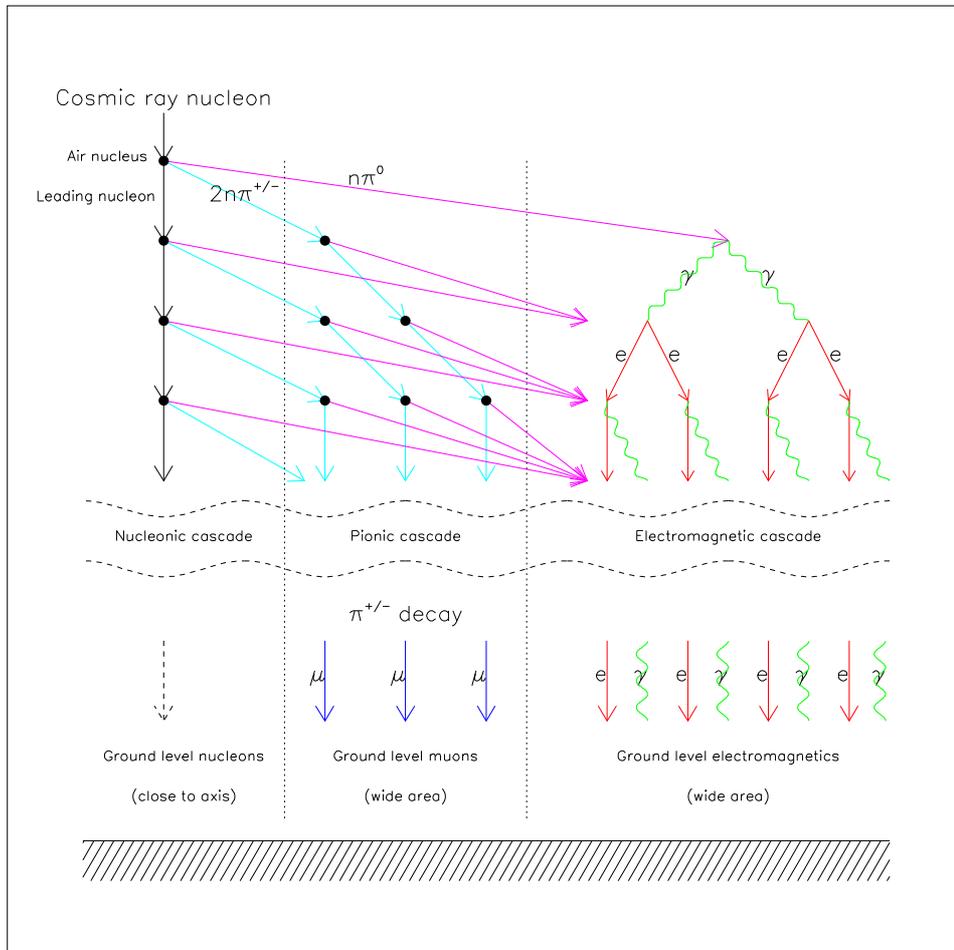


Figura 3.1: Representação de um EAS. É mostrado o processo principal de uma cascata de partículas, considerando que o raio cósmico primário é um nucleon. A cascata está dividida em três categorias: Hadrônica, Muônica e Eletromagnética (35).

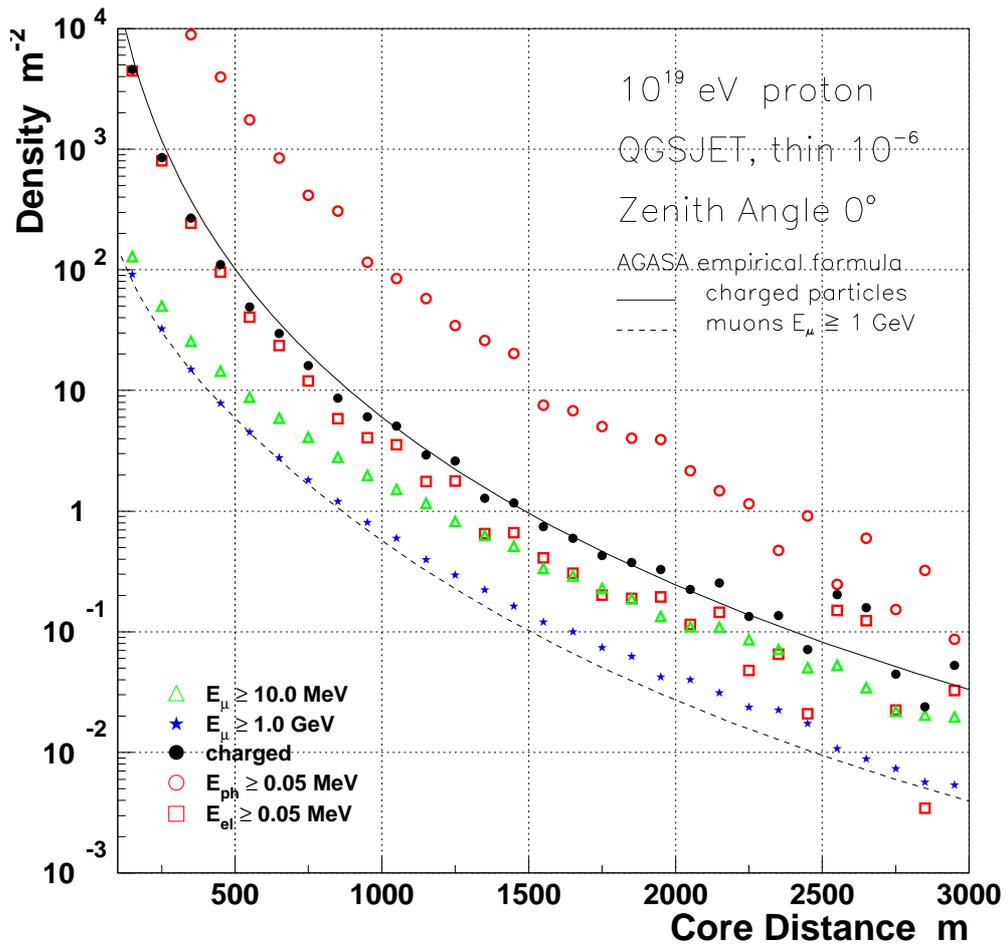


Figura 3.2: Distribuição lateral para múons, elétrons e gamas simulados com Corsika usando o modelo hadrónico de interação QGSJET para um próton com energia da ordem de  $10^{19}$ eV, comparado aos dados experimentais de AGASA. A linha contínua corresponde às partículas carregadas, e a linha pontilhada corresponde aos múons com energias maiores que 1 GeV (60).