

Simulação computacional de chuueiros atmosféricos extensos

Projeto de iniciação científica para o programa Pesquisando Desde o Primeiro Dia (PDPD)

Edital UFABC/Propes nº 06/2025

Resumo

O estudo dos raios cósmicos de ultra-alta energia (RCUAEs) é um ramo de pesquisa que se situa entre a física de partículas elementares e a astrofísica. A área teve uma enorme revitalização nas últimas décadas, devido a avanços nas técnicas experimentais e a descoberta de novas estruturas no espectro de raios cósmicos e de novas fontes astrofísicas de partículas e de raios- γ de altas energias. Ao incidirem na atmosfera da Terra, os raios cósmicos colidem com núcleos atômicos produzindo multiplamente partículas secundárias que se desenvolvem numa cascata, conhecida como *chuueiro atmosférico extenso* (CAE).

Neste projeto de iniciação científica, faremos um estudo das principais simulações de chuueiros atmosféricos extensos, procurando por formulações analíticas que descrevam o seu comportamento, tendo em vista todos os processos físicos que ocorrem no desenvolvimento do CAE na atmosfera.

Palavras-chave: Raios Cósmicos, Chuueiros Atmosféricos Extensos, Simulações.

Área e sub-área de conhecimento: Física (Física de Partículas Elementares e Campos).

I. INTRODUÇÃO

Usualmente, definem-se os raios cósmicos de ultra-alta energia (RCUAEs) como partículas de origem cósmica que atingem o topo da atmosfera da Terra com energias maiores que 10^{17} eV ou 0.1 EeV [1]. Apesar de existirem vários problemas no estudo dos RCUAEs, existem duas questões centrais. A primeira resulta da observação de eventos com energias de até 100 EeV — energia correspondente a um objeto macroscópico com ~ 16 J. Existem evidências de aceleração em fontes tanto na nossa Galáxia como em outras galáxias de partículas com energias variando sobre vinte ordens de magnitude. Então, levanta-se a questão de qual é a natureza dos mecanismos de aceleração eficientes para a produção destas partículas. A primeira questão, portanto, é a da origem dos raios cósmicos o que implica no conhecimento dos mecanismos de aceleração. A segunda questão central relaciona-se ao fato que a densidade de energia dos raios cósmicos é uma fração significativa da energia do universo como um todo, ou seja, é da mesma ordem de grandeza da densidade de energia das estrelas e dos campos magnéticos galácticos. Segue que os raios cósmicos desempenham um papel importante no balanço energético total do universo.

As técnicas experimentais exploram medidas como o espectro de energia, a composição e a direção de chegada dos RCUAEs. Outra fonte de informação é a propagação dos raios cósmicos no espaço interestelar e intergaláctico até atingir a Terra. Neste caminho, sabemos que atravessam campos magnéticos que afetam sua direção e interagem com o gás e a poeira interestelar, bem como com os fótons ópticos ou de outras faixas do espectro eletromagnético. Estas interações causam perda de energia, assim como quebras de núcleos pesados. Para as energias mais altas, os raios cósmicos interagem com os fótons do fundo cósmico de radiação de corpo negro de 2,7 K, promovendo, de acordo com os cálculos teóricos, um corte no espectro de raios cósmicos em torno de 5×10^{19} eV, conhecido como corte GZK [2], [3].

A primeira observação de raios cósmicos com energias acima de 5×10^{19} eV foi feita em 1962 por Linsley [4] no arranjo de Volcano Ranch. Desde então, vários eventos com energias acima de 10^{20} eV foram observados em diversos experimentos como Fly's Eye [5], Agasa [6] e Haverah Park [7]. Ou seja, eventos com energias acima do corte GZK. Entretanto, estes experimentos possuem áreas de coleção menores que 100 km^2 , não provendo estatística suficiente de dados, devido ao baixíssimo fluxo nesta faixa de energia, na ordem de ~ 1 evento século $^{-1} \text{ km}^{-2}$ [8], [9]. Com a finalidade de aumentar consideravelmente esta estatística, o Observatório Pierre Auger [10] foi construído na Argentina utilizando-se de duas técnicas diferentes: um conjunto de 1660 tanques Čerenkov e de 4 telescópios de fluorescência num arranjo cobrindo 3.000 km^2 .

As respostas das questões relativas à composição, ao espectro, à propagação e à isotropia se correlacionam e interferem umas nas outras, o que torna tão desafiante o estudo dos raios cósmicos. São necessários mais dados experimentais para produzirem-se modelos capazes de explicar todas as questões ainda em aberto nesta área.

II. METODOLOGIA

A atmosfera da Terra recebe constantemente partículas altamente energéticas provenientes do espaço exterior, os raios cósmicos. Ao atingirem a profundidade, tipicamente, da estratosfera os raios cósmicos colidem com núcleos atômicos, produzindo cascatas de partículas secundárias, denominadas *chuveiros atmosféricos extensos*. Há dois tipos de cascatas que podem se formar subsequentemente: as *cascatas eletromagnéticas* e as *cascatas hadrônicas* (vide figura 1).

A cascata eletromagnética é gerada por processos puramente eletromagnéticos, sendo constituída somente por fótons, elétrons e pósitrons. Fótons interagem com o campo elétrico de núcleos atômicos, dando origem à criação de pares de elétrons e pósitrons. Os elétrons e os pósitrons são acelerados pelos campos elétricos da matéria emitindo outros fótons, pelo processo conhecido como *Bremsstrahlung*. Estes fótons geram mais pares de elétrons e pósitrons e assim, sucessivamente, por várias gerações. Tipicamente, cada geração será formada após um *comprimento de radiação eletromagnética* (l_{em}). O processo de multiplicação segue enquanto as energias das partículas secundárias forem maiores que a *energia crítica no ar*, $E_c = 84 \text{ MeV}$. Abaixo da energia crítica, perdas de energia por ionização ou excitação predominam e a atmosfera começa absorver a energia da cascata eletromagnética.

A cascata hadrônica é gerada por processos regidos pelas forças forte e fraca, consequência das interações de altas energias que os hádrons sofrem nestas colisões. Primeiramente, há a *produção múltipla de píons* e as duas principais componentes do chuveiro são formadas: a *componente eletromagnética* e a *componente muônica* (vide figura 2). Os píons neutros (π^0) geram a componente eletromagnética, pois seu principal modo de decaimento é $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$, que se dá quase imediatamente após serem produzidos. Por outro lado, os píons carregados (π^\pm) decaem em múons e neutrinos ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ou $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$). Os múons são léptons carregados que só interagem eletromagnética e fracamente. Eles podem depositar alguma energia na matéria, ionizando e excitando os átomos atmosféricos, mas com menor probabilidade se comparados aos elétrons e aos pósitrons. Caso

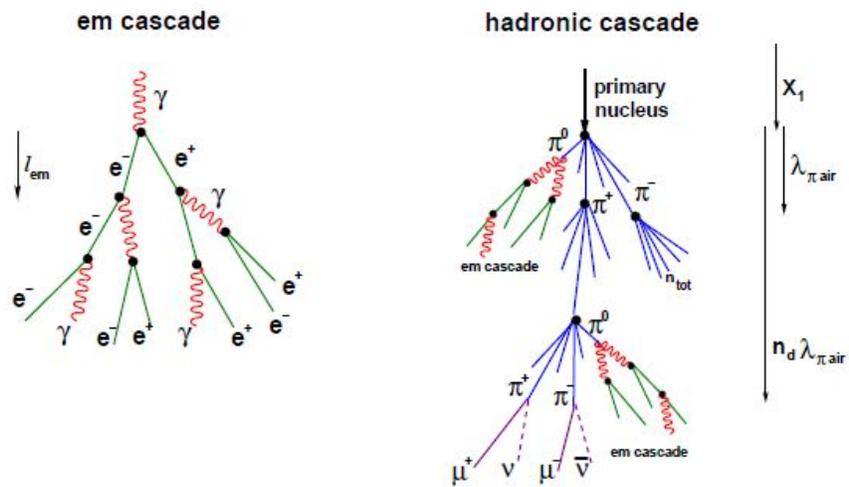


Figura 1: Cascata eletromagnética (à esquerda); cascata hadrônica (à direita).

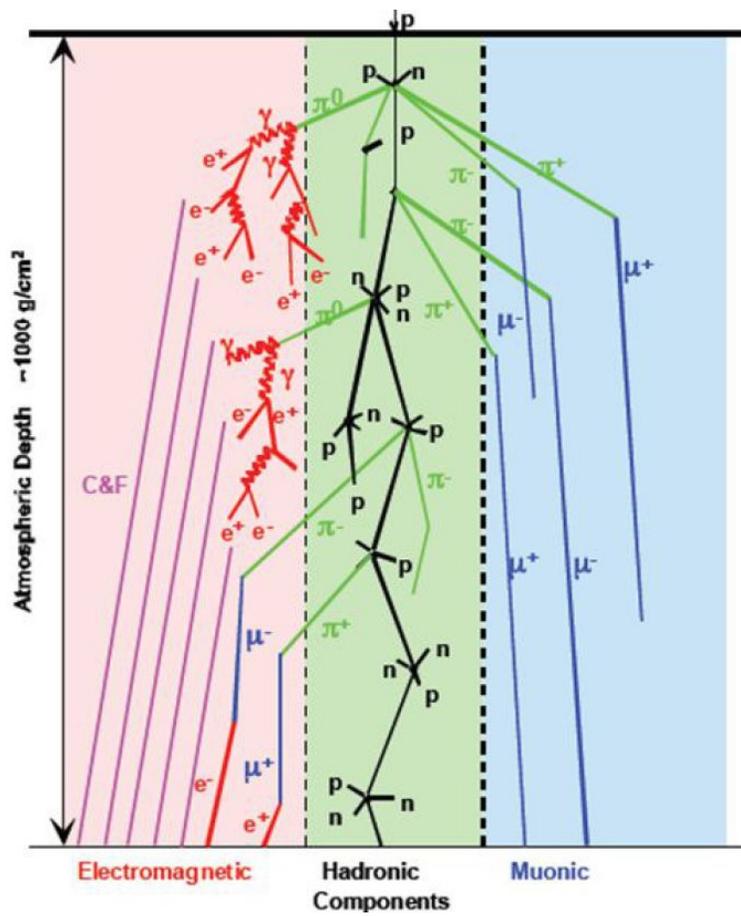


Figura 2: As componentes eletromagnética, hadrônica e muônica de um chuveiro atmosférico extenso.

venham a decair, os múons produzem elétrons ou pósitrons, alimentando a cascata eletromagnética, e neutrinos. Entretanto, na grande maioria dos casos, os múons propagam-se pela atmosfera em trajetórias quase retilíneas, desde o seu ponto de produção até o de absorção no interior da crosta terrestre ou no fundo do mar. Já os neutrinos são léptons desprovidos de carga elétrica e, portanto, interagem muito raramente na matéria, praticamente, eles atravessam a matéria da atmosfera e a da Terra sem sofrer alterações. Na região próxima à da projeção da direção do raio cósmico primário, encontra-se a *componente hadrônica*, no *eixo do chuveiro*, onde fragmentos de núcleos e diversos tipos de bárions e mésons são produzidos, podendo dar origem a novas colisões, produzindo mais píons, alimentando o chuveiro atmosférico, na componente hadrônica as partículas da hadrônica.

Neste projeto, faremos uso da principal simulação computacional de CAEs, o CORSIKA [11], um código detalhado que faz os cálculos das interações, propagações e decaimentos de todas as partículas envolvidas em um CAE. Serão obtidas as distribuições lateral e longitudinal de partículas do chuveiro, em várias condições de energia e composição mássica do primário, para uma melhor compreensão das propriedades físicas dos CAEs.

III. OBJETIVOS E METAS

O objetivo principal deste projeto de iniciação científica (IC) é realizar um estudo detalhado da evolução de CAEs na atmosfera, com o código CORSIKA [11]. Desenvolvido originalmente para simulações do experimento Cascade [12], o CORSIKA evoluiu para se tornar uma ferramenta importante utilizada por diversos grupos da área de astropartículas. O CORSIKA é capaz de reconhecer 50 tipos de partículas elementares e de simular os principais processos físicos (eletromagnéticos, hadrônicos e de decaimentos) que tais partículas podem sofrer.

Alguns passos far-se-ão necessários para a capacitação do estudante na realização das atividades do projeto, seguem-se abaixo as metas específicas a serem atingidas:

1. Estudar a física dos CAEs, incluindo-se os processos de interações das radiações com a matéria;
2. Aprender a simular chuveiros pelo código CORSIKA [11]. Serão simulados CAEs iniciados por prótons, núcleos pesados ou fótons de diversas energias, inclinações e profundidades iniciais;
3. Compreender a influência dos modelos para interações hadrônicas de altas energias na produção de partículas e distribuição de seus parâmetros físicos;
4. Estudar a taxa de alongação (dependência do X_{max} em função da energia) para chuveiros de diferentes composições primárias;
5. Estudar a influência da função de distribuição lateral de densidade de partículas na reconstrução de parâmetros dos chuveiros;

A. Viabilidade do projeto

O projeto apresentado tem total viabilidade de ser concluído com êxito, uma vez que possui nível adequado a um estudante de graduação que inicia suas pesquisas científicas em astrofísica de partículas. Projetos como este já vêm, há muito tempo, sendo apresentados e executados, juntamente com o orientador, por alunos da IC e do programa PDPD da UFABC. Ademais, o projeto demanda apenas de computadores e de conectividade entre o estudante e o orientador. Além das atividades de pesquisa supracitadas, o estudante deverá participar de reuniões periódicas do Grupo de Raios Cósmicos (GRC) da UFABC, com o orientador, em que serão discutidos aspectos técnicos, teóricos ou experimentais, das pesquisas na área. Temos também como metas as apresentações de seus resultados nas reuniões do GRC, no Simpósio de Iniciação Científica (SIC) da UFABC, bem como em encontros nacionais e/ou internacionais de física de astropartículas.

IV. CRONOGRAMA

O cronograma das atividades a serem realizadas no presente projeto de IC está apresentada na tabela abaixo:

Mês	Atividades
1	Revisão bibliográfica
2	Simulação de CAEs
3	com até $E \leq 10^{15}$ eV
4	Estudo da distribuição longitudinal
5	
6	Elaboração do relatório parcial
7	Simulação de CAEs
8	com $E \geq 10^{15}$ eV
9	Estudo da distribuição lateral
10	
11	Análise final dos dados
12	Elaboração do relatório final

Tabela 1
Cronograma de atividades da IC.

V. CONCLUSÃO

Os RCUAes são um dos grandes problemas em aberto na física da atualidade: sua existência e seus mecanismos de produção permanecem como mistérios a serem elucidados. Os raios cósmicos são importantes para a astrofísica por causa das informações que eles fornecem sobre as condições e os processos de energia ultra-alta nas fontes produtoras e aceleradoras. São também importantes para a física de partículas pela possibilidade de se estudar processos exóticos e de partículas raras como neutrinos.

No presente projeto, propusemos atividades de pesquisa para a introdução de um estudante em problemas da física de raios cósmicos. Os estudos fornecerão a base adequada para o estudante prosseguir seus estudos na área. Aproveitando-nos dos vários anos de experiência profissional do orientador, bem como de sua participação em importantes colaborações científicas, como a do Observatório Pierre Auger, temos plena capacidade de realizar com êxito a orientação proposta no âmbito do programa de PDPD da UFABC.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] M. Nagano and A. A. Watson, *Rev. of Modern Phys.*, **Vol. 72**, No. 3, July (2000) 689.
- [2] K. Greisen, *Phys. Rev. Letters*, **16** (1966) 748.
- [3] G. T. Zatsepin and V. A. Kuz'min, *JETP Lett.*, **4** (1966) 78.
- [4] J. Linsley, *Phys. Rev. Lett.*, **34**(1963) 146.
- [5] D. J. Bird *et al.*, *Astrophys. J.*, **441**(1995) 144.
- [6] N. Hayashida *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **73**(1994) 3491.
- [7] M. A. Lawrence, R. J. O. Reid and A. A. Watson, *J. Phys.*, **G17**(1991) 733.
- [8] M. Takeda *et al.*, Astro/ph-0209422, Nov. (2002).
- [9] D. J. Bird *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **71**(1993) 3401.
- [10] J. Abraham *et al.*, *Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory*. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.: **A523** (2004) 50;
Pierre Auger Design Report, Fermilab (1997), <http://www.auger.org/admin/DesignReport/index.html>
- [11] D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw, Report **FZKA 6019** (1998), Forschungszentrum Karlsruhe; <http://www-ik.fzk.de/heck/publications/fzka6019.pdf>
- [12] K. H. Kampert *et al.*(Kascade Collaboration), Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City (UAS) **3** (1999) 159.