

Estudo do sinal Cherenkov de chuueiros atmosféricos extensos em telescópios de raios gama

Projeto de Iniciação Científica para o Edital UFABC/Propes 04/2022

Resumo

Primários da radiação cósmica colidem com núcleos de átomos da alta atmosfera, produzindo gerações sucessivas de partículas que se multiplicam numa cascata conhecida como chuva atmosférico extenso (CAE). No caminho do chuva até a superfície da Terra, as partículas ultrarrelativísticas da componente eletromagnética (elétrons e pósitrons), ao viajarem com velocidade superior à da luz no meio ($v > c/n$, onde n é o índice de refração), emitem radiação do tipo Cherenkov. Esta radiação, que é luz com comprimentos de onda típicos na região entre o azul e o ultravioleta, é usada como sinal para a observação de CAEs em telescópios de imageamento Cherenkov atmosférico (IACTs, na sigla em inglês) na astronomia de raios gama.

Uma nova geração de IACTs no mundo será iniciada com o Cherenkov Telescope Array (CTA), que será composto por mais de 100 telescópios instalados em ambos os hemisférios, com um arranjo nas Ilhas Canárias e outro no norte do Chile. Os telescópios do CTA proverão uma ampla cobertura no espectro energético, desde 20 GeV até 100 TeV, ampliando a cobertura do céu em resolução angular e sensibilidade de energia em cerca de uma ordem de grandeza às dos atuais IACTs.

Neste projeto de iniciação científica (IC), faremos uma revisão da física da radiação Cherenkov e, posteriormente, estudaremos com uma detalhada simulação computacional a formação do sinal Cherenkov nos telescópios do CTA.

Palavras-chave: Astropartículas, Raios gama, Radiação Cherenkov.

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

I. INTRODUÇÃO

Radiações de energia muito alta e ultra-alta, quer sejam raios cósmicos ou raios gama, são produzidas por objetos astrofísicos ativos, tais como: supernovas, pulsares, núcleos galácticos ativos (AGNs, na sigla em inglês), quasares e rádio-galáxias. Nossa Galáxia tem um raio de aproximadamente 10 kpc, com o Sol localizado a aproximadamente 8 kpc do centro galáctico, e espessura de 100 pc. A Via-Láctea é membro de um grupo de galáxias numa escala de aproximadamente 2 Mpc. Este grupo, por sua vez, faz parte de um supergrupo numa escala de 50 Mpc centrado na constelação de Virgem, a cerca de 20 Mpc de distância. O supergrupo local possui uma grande quantidade de AGNs, de rádio-galáxias e de quasares que podem produzir a energia suficiente para acelerar os raios cósmicos a energias de até 0.1 EeV. Consequentemente, raios gama provenientes de decaimentos ou de interações dessas partículas com o meio também são produzidos. Além do supergrupo local, existem outros supergrupos estendendo-se até o limite do universo observável. As estimativas para as várias fontes de energia durante seus tempos de vida são: 10^{49} a 10^{51} eV para supernovas, 10^{56} a 10^{57} eV para os AGNs, até 10^{62} eV para as rádio-galáxias e 10^{58} eV para os quasares [1]. Estrelas de nêutrons e discos de acreção de buracos negros são os mais prováveis como fontes galácticas de raios cósmicos na faixa de energia até PeV.

Nas últimas décadas, foram desenvolvidos os instrumentos capazes de captar as radiações de altíssimas energias com sensibilidade e estatística suficientes para a investigação de suas fontes de produção. Dentre os instrumentos atuais estão o H.E.S.S. [2], o MAGIC [3] e o VERITAS [4] — na categoria dos IACTs, ou telescópios de imageamento Cherenkov atmosférico —, juntamente com os satélites Fermi [5] e AGILE [6] e com os experimentos Milagro [7], Tibet AS-gamma [8] e ARGO-YBJ [9], observatórios de CAEs que foram também concebidos para a detecção de raios gama. O Cherenkov Telescope Array (CTA) [10] será formado por 2 conjuntos de telescópios (como os da figura 1) com sensibilidade e resolução angular suficientes para responder a muitas das perguntas que ainda persistem na comunidade da área de astropartículas. O CTA permitirá a detecção de mais de 1000 fontes ao longo de todo o céu e dentre os principais temas científicos a serem pesquisados com os dados do CTA estão: a origem dos raios cósmicos galácticos (RCGs) nos assim chamados *PeVatrons* (jovens remanescentes de supernova que podem acelerar partículas até energias de PeV), a obtenção de informações sobre buracos negros, jatos, sobre a formação de estrelas do universo e a natureza da matéria escura, além de outros problemas acerca da física fundamental, tais como a procura por partículas tipo-áxion, os efeitos da gravidade quântica e violações da invariância de Lorentz [11] [12] [13].

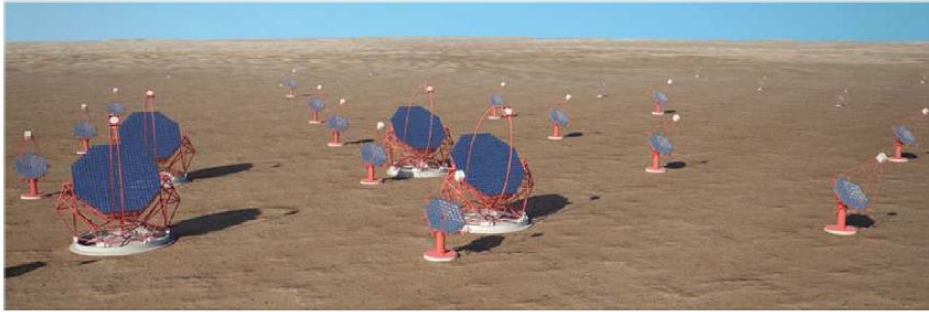


Figura 1: Concepção básica do CTA: visão da parte central do arranjo, com 4 telescópios de tamanho grande (LSTs), ~ 30 telescópios de tamanho médio (MSTs) e ~ 50 telescópios de tamanho pequeno (SSTs).

II. METODOLOGIA

A técnica de detecção das cascatas de partículas (CAEs) induzidas por raios gama na atmosfera, a ser utilizada no CTA, é a comprovada captação da luz Cherenkov, formando-se imagens estereoscópicas de cada CAE, simultaneamente com vários telescópios, e reconstruindo-se as propriedades do raio gama primário a partir dessas imagens (vide figura 2). Esta é a técnica adotada em todos os IACTs. O CTA alcançará uma cobertura completa do céu com sensibilidade e resolução sem precedentes, sendo cerca de dez vezes mais sensível do que qualquer instrumento existente em sua faixa de energia. Ele permitirá a detecção e o estudo aprofundado de grandes amostras de fontes conhecidas de raios gama, explorando-se pioneiramente uma ampla gama de candidatos a emissores de raios gama e será sensível a possíveis fenômenos novos que estão além da sensibilidade dos instrumentos atuais. Na faixa de energia entre cerca de 100 GeV a alguns TeV, o CTA terá sensibilidade de milicrab, ou seja, suficiente para um fluxo de $\sim 10^{-3}$ vezes ao da fonte mais forte e constante de raios gama: a da Nebulosa do Caranguejo (*Crab*, em inglês); e um fator de 10^{-4} menor ao dos mais altos fluxos medidos até agora de surtos transientes de raio gama (GRBs). Esta faixa dinâmica

não só permitirá o estudo das fontes mais fracas e de novos tipos de fontes, mas também reduzirá o viés de seleção na classificação dos tipos de fontes conhecidas.

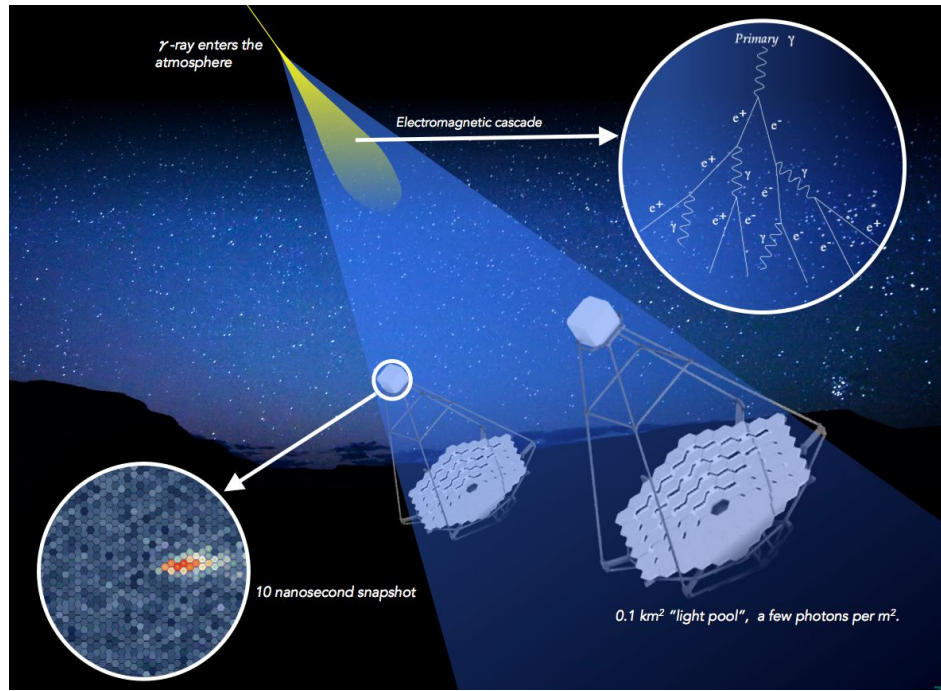


Figura 2: Ilustração da técnica de detecção do CTA através da captação da luz Cherenkov produzida por chuueiros atmosféricos.

Para alcançar as metas de desempenho e, especificamente, a vasta faixa de energias a ser coberta, os instrumentos necessitam ser otimizados. Desta forma, eles foram projetados com 3 tamanhos diferentes (vide figura 1):

1. Os **telescópios de grande porte (LSTs)** para a região de baixa energia (≤ 100 GeV). Para detectar chuueiros a partir de algumas dezenas de GeV, a luz Cherenkov precisa ser amostrada de maneira eficiente. Uma vez que a taxa de eventos é elevada, a área desta parte do arranjo pode ser relativamente pequena (da ordem de alguns 10^4 m²). O projeto do CTA assume um pequeno número (≤ 4) de LSTs, com um diâmetro do espelho de cerca de 24 m, colocados próximos para recolher o máximo possível de fótons Cherenkov dos chuueiros de baixa energia.
2. Os **telescópios de médio porte (MSTs)** para a região de energia entre 0.1 e 10 TeV. A detecção de chuueiros e a reconstrução nesta faixa de energia são bem compreendidos pelos instrumentos atuais. O passo apropriado para melhorar o desempenho é um arranjo de MSTs, com espelhos de cerca de 12 m de diâmetro, e espaçamento de cerca de 100 m. A sensibilidade melhorada em relação aos instrumentos existentes será obtida tanto pelo aumento da área coberta pelo arranjo de telescópios como pela maior qualidade da reconstrução dos chuueiros.
3. Os **telescópios de pequeno porte (SSTs)** para a região de alta energia > 10 TeV. Aqui, a principal limitação é o fluxo de chuueiros de raios gama a serem detectados. Por conseguinte, para alcançar melhoria, o arranjo precisa cobrir uma área de vários quilômetros quadrados. E como, em altas energias, a produção de luz de um chuueiro é grande, bastam espelhos pequenos (com diâmetro da ordem de 6 m) para a captação da luz Cherenkov.

O estudante produzirá a distribuição dos fótons, ao longo do desenvolvimento da cascata na atmosfera, gerados no processo Cherenkov, com o auxílio de uma das mais importantes simulações computacionais de CAEs, o código CORSIKA [14]. O CORSIKA é uma simulação detalhada de chuueiros atmosféricos iniciados por partículas de alta energia. Prótons, núcleos leves até o ferro e raios gama, etc., podem ser utilizadas como primários. As partículas produzidas são traçadas pela atmosfera até decaírem ou sofrerem reações com os núcleos do ar. Existem vários modelos de interações hadrônicas de altas ou baixas energias que podem ser empregados (VENUS [15], QGSJET [16], DPMJET [17], HDPM [18], SIBYLL [19]) e GHEISHA [20]) e as interações eletromagnéticas tratadas detalhadamente pelo código EGS4 [21].

III. OBJETIVOS E METAS

O objetivo principal do projeto é produzir as distribuições espaciais e energéticas de fótons produzidos pelo efeito Cherenkov na atmosfera para, posteriormente, simularmos a captação destes fótons em telescópios com as especificações do CTA. Estudaremos a formação de sinais produzidos por chuviros hadrônicos e de raios gama. Finalmente, faremos a reconstrução dos dados, aplicando as mesmas técnicas do CTA, através do software CTOOLS [22] e verificaremos a acurácia das reconstruções.

As seguintes metas específicas foram idealizadas para o atual projeto de IC:

1. Aprender a instalar, compilar e rodar as simulações do CORSIKA nos supercomputadores da UFABC;
2. Produzir uma biblioteca de chuviros com diversos valores de energia e de composição do primário, extraindo delas os dados sobre os fótons Cherenkov;
3. Estudar e produzir a propagação dos fótons na atmosfera;
4. Estudar e produzir a captação dos fótons em telescópios com a mesma abertura do CTA;
5. Realizar a reconstrução dos dados;
6. Produzir gráficos e histogramas com o sistema de análise de dados ROOT [23].

A. Viabilidade do projeto

O projeto apresentado tem total viabilidade de ser concluído com êxito, uma vez que possui nível adequado para um estudante de graduação. Ademais, este projeto é uma continuação das pesquisas que o aluno já vem realizando, satisfatoriamente, em projetos anteriores de IC ou do programa PDPD. Este 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 de atividades a serem realizadas no presente projeto de IC está apresentada na tabela abaixo:

Mês	Atividades
1	Revisão bibliográfica
2	Instalação do CORSIKA e produção da biblioteca de CAEs
3	
4	
5	Elaboração do relatório parcial
6	
7	Instalação do CTOOLS
8	
9	Métodos de reconstrução dos sinais
10	
11	Análises finais
12	Elaboração do relatório final

V. CONCLUSÃO

O Cherenkov Telescope Array (CTA) é o projeto para a próxima geração de observatórios terrestres de raios gama de energias muito altas (IACTs). Ele encontra-se, atualmente, em fase de pré-produção e deverá entrar em operação nos próximos anos nos sítios de La Palma, no hemisfério norte, e do Chile, no hemisfério sul. O CTA deverá fornecer informações fundamentais em problemas em aberto na campo da física de astropartículas, que envolvem raios cósmicos, raios gama de altas energias, neutrinos e matéria escura. No presente projeto de pesquisa, apresentamos a proposta para o desenvolvimento de atividades teóricas e computacionais em que o bolsista desenvolverá simulações dos sinais observados nos telescópios do CTA. Aproveitando-nos dos vários anos de experiência profissional do orientador na área, bem como de sua participação no Consórcio do CTA, temos plena capacidade de desenvolver o projeto com êxito na UFABC.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] G. B. Christiansen, G. V. Kulikov and Yu. A. Fomin, *Ultrahigh Energy Cosmic Rays*, Moscou, Atomizdat (1975), p. 5.
- [2] F. Aharonian et al., HESS Collaboration, *A&A* 457 (2006) 899.
<http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/pages/about/telescopes>
- [3] MAGIC. <http://magic.mppmu.mpg.de>
- [4] VERITAS. <http://veritas.sao.arizona.edu>
- [5] W.B. Atwood et al., *ApJ* 697 (2009) 1071, <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/697/2/1071>. <http://fermi.gsfc.nasa.gov>
- [6] M. Tavani et al., *NIM A* 588 (2008) 52.
- [7] Milagro. <http://www.lanl.gov/milagro>
- [8] Tibet AS Gamma. <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/em/index.html>
- [9] G. Aielli et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 562 (2006) 92. <http://argo.na.infn.it>
- [10] B.S. Acharya et al., CTA Consortium, *Astropart. Phys.* 43 (2013) 3-18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.01.007>
- [11] J.A. Hinton, W. Hofmann, *Ann. Rev. Astronom. Astrophys.* 47 (2009) 523.
- [12] F.A. Aharonian et al., *Rep. Prog. Phys.* 71 (2008) 096901.
- [13] M. Martinez, *J. Phys. Conf. Ser.* 171 (2009) 012013.
- [14] 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>
- [15] K. Werner, *Phys. Rep.*, **232** (1993) 87.
- [16] N.N. Kalmykov, S.S. Ostapchenko, *Yad. Fiz.* **56** (1993) 105; *Phys. At. Nucl.* **56**(3) (1993) 346
- [17] J. Ranft, *Phys. Rev.* **D51** (1995) 64.
- [18] J.N. Capdevielle, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **15** (1989) 909.
- [19] R. S. Fletcher et al., *Phys. Rev. D*, **D50** (1994) 5710.
- [20] H. Fesenfeldt, Report **PITHA-85/02** (1985), RWTH Aachen.
- [21] W.R. Nelson, H. Hirayama and D.W.O. Rogers, Report **SLAC 265** (1985), Stanford Linear Accelerator.
- [22] The CTA Science Analysis Software, <http://cta.irap.omp.eu/ctools/>
- [23] ROOT Data Analysis Framework, <https://root.cern.ch/>