

Trabalho

Título em Português: Simulação e análise de dados de chuveiros atmosféricos extensos

Título em Inglês: simulation and data analysis of extensive air showers

Autor: Nathan Mayer Hunhoff

Instituição: Universidade de São Paulo

Unidade: Instituto de Física de São Carlos

Orientador: Luiz Vitor de Souza Filho

Área de Pesquisa / SubÁrea: Física das Partículas Elementares e Campos

Agência Financiadora: FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

Simulação e análise de dados de chuveiros atmosféricos extensos

Nathan Mayer Hunhoff

Prof. Dr. Luiz Vitor de Souza Filho

Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo

nathan.hunhoff@usp.br

Objetivos

Chuveiros atmosféricos extensos (EAS) são cascatas de partículas iniciadas pela interação de raios cósmicos e raios gama de alta energia com a atmosfera da Terra: a partícula primária adentra as camadas mais altas da atmosfera a velocidades relativísticas e interage com moléculas ali presentes, formando novas partículas que, por sua vez, também interagem com o meio atmosférico, gerando uma reação em cadeia de criação de partículas conforme se aproximam do solo até que a energia da partícula primária seja totalmente dissipada. O estudo de EAS oferece informações importantes para as origens, composição e mecanismos de propagação de partículas de altíssimas energias (alguns EAS podem atingir energias milhões de vezes maiores que as obtidas em aceleradores como o CERN)¹ já que, apesar de ser um método indireto de estudo, é a única alternativa para esses mensageiros do universo, tendo em vista a impossibilidade de uma detecção direta nessa faixa energética.

Este projeto foca em avançar simulações e técnicas de análise de dados para o estudo de chuveiros atmosféricos extensos em física de partículas, alavancando as capacidades singulares dos observatórios Pierre Auger e Cherenkov Telescope Array Observatory (CTAO). O projeto visa estudar e desenvolver estruturas de simulação para representar com precisão os perfis longitudinais e laterais de chuveiros atmosféricos.

O perfil longitudinal de um EAS é a medida da deposição de energia na atmosfera como função da quantidade de matéria transpassada (profundidade). Já o perfil lateral e a profundidade máxima são, respectivamente, medidas do espalhamento lateral e da penetração do chuveiro na atmosfera – todas quantidades muito relevantes para os estudos destes eventos.

Serão utilizadas técnicas computacionais avançadas, incluindo computação de alta performance e aprendizado de máquina, que serão aplicadas para otimizar a reconstrução dos eventos e diferenciação das partículas. Será dada ênfase especial em explorar medições de X_{\max} (profundidade máxima do chuveiro) e das distribuições angulares dos fótons Cherenkov para refinar estudos de composição feitos no CTAO.

Métodos e Procedimentos

A metodologia para realização deste projeto iniciou-se com o estudo das bibliografias [1], [2], e [3] que tratam os fundamentos de física de partículas necessários à elaboração do presente trabalho, a citar: Modelo Padrão de física de partículas, forças fundamentais, diagramas de Feynman e leis de conservação. Além disso, tais obras apresentam também um panorama geral de raios cósmicos e chuveiros atmosféricos, incluindo: composição e espectro de energia de raios cósmicos, chuveiros hadrônicos e

eletromagnéticos e seus mecanismos de formação, bem como seus principais métodos de medição.

Serão aplicados também os métodos numéricos e computacionais descritos nas bibliografias [4] e [5] que destrinchem ferramentas de relevância para elaboração de uma simulação simplificada baseada no modelo de Heitler-Mathews. Tal simulação terá como objetivo representar com precisão os perfis laterais e longitudinais de chuveiros atmosféricos extensos, com foco na medida de $X_{\text{máx}}$ e da distribuição angular da luz Cherenkov.

Os recursos computacionais necessários para realização deste projeto incluem a infraestrutura grupo de pesquisa bem como acesso ao supercomputador Santos Dumont (SINAPAD) para realização das análises de dados mais custosas computacionalmente.

Feita a simulação, os resultados obtidos serão comparados àqueles obtidos utilizando simulações avançadas com softwares sofisticados de Monte Carlo, tais como CONEX e CORSIKA.

Resultados

Espera-se que a simulação simplificada baseada no modelo de Heitler-Mathews seja capaz de reproduzir características essenciais dos chuveiros atmosféricos extensos, em especial, o valor de $X_{\text{máx}}$ e a distribuição angular dos fótons Cherenkov. A validação será realizada por meio da comparação com softwares como CONEX e CORSIKA, permitindo verificar a consistência dos resultados e as limitações da abordagem simplificada.

Conclusões

Este projeto busca explorar simulações computacionais simplificadas de chuveiros atmosféricos que sejam capazes de reproduzir os principais parâmetros relacionados a estes

eventos com potencial de se equiparar com os métodos mais intrincados.

Além disso, projeta-se que a metodologia proposta apresente vantagens em termos de custo computacional para tais simulações, o que poderá torná-la uma alternativa viável para abordagens mais simplistas.

Agradecimentos

Agradecimento especial ao grupo de Astrofísica de partículas APOEMA, do IFSC-USP e ao professor Dr. Luiz Vitor de Souza que tornaram a realização deste trabalho possível.

O presente trabalho está sendo realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processos nº 2021/01089-1 e 2025/00124-9.

Referências

1. GAISSER, T. K. *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. Cap. 1-3.
2. GRIFFITHS, D. *Introduction to Elementary Particles*. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. Cap. 1-2.
3. THOMPSON, M. *Modern Particle Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. Cap. 1-6.
4. COWAN, G. *Statistical Data Analysis*. Oxford: Oxford University Press, 1998.
5. KOONIN, S. *Computational Physics*. Reading: Addison-Wesley, 1986.

Simulation and data analysis of extensive air showers

Nathan Mayer Hunhoff

Prof. Dr. Luiz Vitor de Souza Filho

Institute of Physics of São Carlos – University of São Paulo

nathan.hunhoff@usp.br

Objectives

Extensive air showers (EAS) are particle cascades initiated by the interaction of high-energy cosmic rays and gamma rays with the Earth's atmosphere: the primary particle enters the upper layers of the atmosphere at relativistic speeds and interacts with molecules present there, forming new particles that also interact with the atmospheric medium, generating a chain reaction of particle creation as they approach the ground, until the energy of the primary particle is completely dissipated. The study of EAS provides important information on the origins, composition, and propagation mechanisms of ultra-high-energy particles (some EAS can reach energies millions of times higher than those achieved in accelerators such as CERN)¹, since, despite being an indirect method of study, it is the only available alternative for these messengers from the universe, given the impossibility of direct detection at this energy scale.

This project focuses on advancing simulations and data analysis techniques for the study of extensive air showers in particle physics, leveraging the unique capabilities of the Pierre Auger Observatory and the Cherenkov Telescope Array Observatory (CTAO). The project aims to study and develop simulation frameworks to accurately represent the longitudinal and lateral profiles of air showers.

The longitudinal profile of an EAS is the measure of energy deposition in the atmosphere as a function of the amount of matter traversed (depth). The lateral profile and the shower maximum depth, on the other hand, are, respectively, measures of lateral spread and shower penetration in the atmosphere – all highly relevant quantities for the study of these events.

Advanced computational techniques, including high-performance computing and machine learning, will be applied to optimize event reconstruction and particle differentiation. Special emphasis will be placed on exploring measurements of X_{\max} (shower maximum depth) and the angular distributions of Cherenkov photons to refine composition studies performed at the CTAO.

Methods and procedures

The methodology for carrying out this project began with the study of the bibliographies [1], [2], and [3], which cover the fundamentals of particle physics necessary for the development of this work, namely: the Standard Model of particle physics, fundamental forces, Feynman diagrams, and conservation laws. In addition, these works also provide an overview of cosmic rays and air showers, including: cosmic-ray composition and energy spectrum, hadronic and electromagnetic showers and their formation

mechanisms, as well as their main measurement methods.

The numerical and computational methods described in bibliographies [4] and [5] will also be applied, as they detail relevant tools for the development of a simplified simulation based on the Heitler-Mathews model. This simulation will aim to accurately represent the lateral and longitudinal profiles of extensive air showers, with a focus on measuring X_{\max} and the angular distribution of Cherenkov light.

The computational resources required for this project include the research group's infrastructure as well as access to the Santos Dumont supercomputer (SINAPAD) to perform the most computationally demanding data analyses.

Once the simulation is completed, the results obtained will be compared with those from advanced simulations using sophisticated Monte Carlo software, such as CONEX and CORSIKA.

Results

It is expected that the simplified simulation based on the Heitler-Mathews model will be able to reproduce essential characteristics of extensive air showers, particularly the value of X_{\max} and the angular distribution of Cherenkov photons. Validation will be performed through comparison with software such as CONEX and CORSIKA, allowing for verification of result consistency and the limitations of the simplified approach.

Conclusions

This project seeks to explore simplified computational simulations of air showers capable of reproducing the main parameters related to these events, with the potential to match more intricate methods.

In addition, the proposed methodology is expected to offer advantages in terms of computational cost for such simulations, which could make it a viable alternative for simpler approaches.

Acknowledgments

Special thanks to the APOEMA Particle Astrophysics Group at IFSC-USP and to Professor Dr. Luiz Vitor de Souza, who made the realization of this work possible.

This work is being carried out with the support of the São Paulo Research Foundation (FAPESP), Brazil. Grants No. 2021/01089-1 and 2025/00124-9.

References

1. GAISSER, T. K. *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. Cap. 1-3.
2. GRIFFITHS, D. *Introduction to Elementary Particles*. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. Cap. 1-2.
3. THOMPSON, M. *Modern Particle Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. Cap. 1-6.
4. COWAN, G. *Statistical Data Analysis*. Oxford: Oxford University Press, 1998.
5. KOONIN, S. *Computational Physics*. Reading: Addison-Wesley, 1986.