

# Raios cósmicos, produção de íons e propriedades elétricas da atmosfera da Terra

## Projeto de Iniciação Científica

### Resumo

Os raios cósmicos são os principais atores nas propriedades elétricas da atmosfera e no chamado circuito elétrico global. Sendo partículas carregadas de altas energias, os raios cósmicos penetram na baixa atmosfera promovendo a formação de pares de elétrons e íons, alterando a condutividade, o potencial ionosférico e a corrente elétrica vertical da atmosfera. Além disso, sabe-se que tais íons são os precursores de processos de nucleação de aerossóis que, por sua vez, levam à formação de nuvens. Os estudos das correlações que estes fenômenos têm com a incidência de raios cósmicos galácticos têm atraído muito o interesse da comunidade científica internacional, devido às suas relações com as alterações climáticas globais.

Neste projeto de iniciação científica faremos um estudo dos processos de eletromagnéticos na atmosfera da Terra, em especial, pesquisando os mecanismos de formação de íons, de descargas elétricas e o circuito elétrico global. Será desenvolvido um modelo computacional e um protótipo em laboratório para o circuito elétrico global.

**Palavras-chave:** Raios Cósmicos, Ionização Atmosférica, Formação de Nuvens, Circuito Elétrico Global.

## I. INTRODUÇÃO

Raios cósmicos galácticos são compostos, principalmente, por prótons de alta energia aceleradas em fontes energéticas na Via Láctea. O fluxo principal encontra-se na região de energia de poucos GeV, embora o espectro de energia se estenda por 11 ordens de grandeza, caindo por um fator de aproximadamente 500 a cada década. Por conseguinte, descreve-se o fluxo como uma lei de potência:  $dF \propto E^{-\gamma} dE$ , onde  $\gamma \approx 2.7$  para  $10^9 \lesssim E \lesssim 10^{15}$  eV [1]. O fluxo de raios cósmicos galácticos é modulado pela intensidade do campo magnético solar, tipicamente, em algumas dezenas de por cento, variando com a latitude e a altitude da observação. E uma vez que o Sol tem um ciclo de atividade de 11 anos, em períodos de alta atividade, em que seu campo magnético é mais intenso, mais raios cósmicos galácticos são defletidos e deixam de chegar à Terra — e vice-versa, para os períodos de baixa atividade. Portanto, o clima do nosso planeta pode sofrer influências tanto da atividade solar quanto da incidência de raios cósmicos da Galáxia.

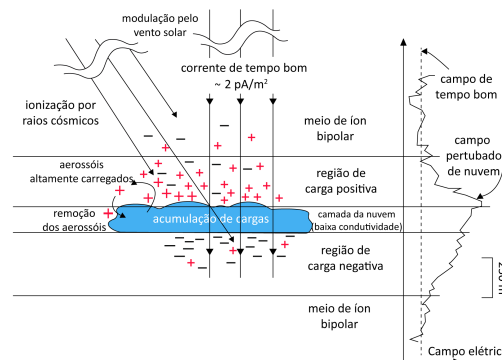


Figura 1: Intensidade do campo elétrico em função da altitude e ilustração da formação de cargas elétricas acima e abaixo das nuvens modulada pelo fluxo de raios cósmicos e pela corrente de tempo bom.

Os primários da radiação cósmica interagem na atmosfera, tipicamente em altitudes da estratosfera, produzindo chuveis de partículas secundárias que penetram pela troposfera, podendo atingir a superfície e até penetrar na crosta terrestre ou no mar. Abaixo de 7 km de altitude, os secundários são principalmente múons. As partículas carregadas dos chuveis perdem energia por ionização e são os principais responsáveis pela ionização na troposfera em condições de tempo bom. As taxas de produção de pares de íons variam de cerca de  $2 \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$  ao nível do solo, a  $10 \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$  a 5 km de altitude a entre  $20$  e  $50 \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$  a 15 km de altitude, dependendo da latitude geomagnética. Levando-se em conta as taxas de produção e os mecanismos de perda, tais como recombinação e aderência a aerossóis, as concentrações de equilíbrio de pares iônicos variam de entre  $200$  a  $500 \text{ cm}^{-3}$  ao nível do solo a entre  $1000$  e  $3000 \text{ cm}^{-3}$  na estratosfera inferior [2]. O mecanismo proposto que busca ligar o fluxo raios cósmicos galácticos à formação cargas elétricas nas nuvens (vide figura 1) leva em conta a hipótese de que a ionização modula

a corrente elétrica de toda a ionosfera da Terra que, por sua vez, influencia nas propriedades eletrostáticas das nuvens através do congelamento das gotículas, entre outros processos microfísicos.

## II. OBJETIVOS E METAS

O objetivo principal do projeto é realizar um estudo detalhado da influência de raios cósmicos na formação de cargas elétricas e nas condições elétricas da atmosfera, construindo um modelo computacional e experimental para o circuito elétrico global. Para o presente projeto, idealizamos as seguintes metas específicas a serem atingidas pelo estudante:

1. Estudar a física de ionização de gases por partículas carregadas e de formação de descargas elétricas na atmosfera;
2. Obter dados de densidade, pressão, temperatura e de campo elétrico ao longo de diferentes altitudes da atmosfera;
3. Obter dados de simulações de chuviscos atmosféricos extensos [3] com perfis da quantidade e da energia depositada por partículas carregadas (elétrons e múons) em função da altitude;
4. Escrever uma simulação em linguagem C++, orientada a objetos e estruturada nas classes;
5. Montar e realizar ensaios experimentais em laboratório com um circuito elétrico global de escala reduzida.

Além disso, temos como objetivo geral do projeto a formação de recursos humanos, através do treinamento do candidato em métodos avançados de pesquisa, desde simulações até o projeto e construção de experimentos científicos e a análise de seus dados. Outra meta a ser considerada é a apresentação e a publicação dos resultados em encontros nacionais ou internacionais da área, bem como no Simpósio de Iniciação Científica da UFABC.

## III. METODOLOGIA

Sabe-se que o circuito elétrico atmosférico envolve uma corrente global de cerca de 1400 A (a 400 MW), sustentada pelas tempestades tropicais [4] [5] [6], vide figura 2 para um exemplo do modelo a ser implementado. As tempestades transportam cargas negativas para o chão e uma corrente positiva equivalente flui até a ionosfera. Devido às altas correntes, grandes campos elétricos são gerados acima das tempestades e o ar pode quebrar-se eletricamente para produzir *flashes* ópticos, conhecidos como duendes e elfos. Este gerador de corrente mantém a ionosfera a um potencial positivo em relação à Terra de cerca de 250 kV. A corrente de retorno entre a ionosfera e a superfície flui por toda a atmosfera, em regiões de tempo perturbado ou de tempo bom, e é realizada pelo arraste vertical de íons pequenos. A densidade média de corrente vertical de bom tempo é de 2,7 pA/m<sup>2</sup> [5] [6]. Ao controlar a concentração de pares de íons da baixa atmosfera, os raios cósmicos galácticos podem afetar a corrente de tempo bom, a condutividade atmosférica, o potencial da ionosfera e o gradiente vertical de potencial na atmosfera. Nas regiões polares, estas quantidades são também influenciadas por partículas ionizantes de baixa energia da precipitação de elétrons relativísticos ( $\sim 1$  MeV), o que pode ocorrer durante a travessia de limites setoriais magnéticos do vento solar.

O projeto será executado inicialmente através da modelagem computacional do circuito elétrico global. O aluno desenvolverá um programa estruturado em classes que em cujos métodos cálculos matemáticos e físicos serão escritos, descrevendo as leis e propriedades da atmosfera, dos chuviscos de raios cósmicos, da ionização por partículas carregadas e da eletricidade. De posse da simulação, gráficos como a corrente global de relâmpagos em função do fluxo incidente de raios cósmicos poderão ser feitos e estudados com relação aos diferentes parâmetros da simulação.

Paralelamente, o aluno montará um protótipo do circuito elétrico global em laboratório (vide figura 2). O potencial representando a ionosfera certamente não será de 250 kV, em vez disso, adotaremos uma tensão adequadamente menor e numa escala mais segura de algumas centenas de volts. Para simular os relâmpagos, dois eletrodos serão instalados próximos o suficiente para produzirem faíscas, sendo um deles o terminal representando as núvens e o outro o terminal representando a Terra. Envolvendo os terminais em uma câmara de vidro, diferentes condições de pressão, temperatura e umidade poderão ser testadas. A ideia é monitorar a corrente no circuito em função de diferentes parâmetros físicos envolvidos na simulação.

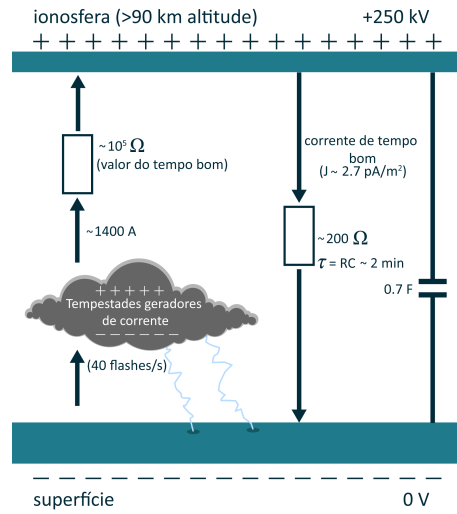


Figura 2: Representação esquemática do circuito elétrico global (figura adaptada de [4]).

### A. Viabilidade do projeto

Dispomos na UFABC de todo o material necessário para a execução do projeto, desde computadores com os softwares para o desenvolvimento das simulações até os instrumentos necessários para a montagem do protótipo do circuito elétrico global, no Laboratório de Astropartículas. Vale ressaltar ainda que o aluno já foi orientado por mim em projeto anterior num tema correlacionado e, nesta ocasião, realizou um excelente trabalho. No atual projeto, ele dará continuidade a estes trabalhos. Portanto, temos total capacidade de desenvolvê-lo com êxito e, ademais, perspectivas para o aprofundamento das pesquisas.

## IV. CRONOGRAMA

O cronograma das atividades a serem realizadas pelo estudante no presente projeto resume-se às seguintes etapas básicas:

- Revisão bibliográfica com estudos sobre a física de ionização e de fenômenos elétricos na atmosfera (1 mês);
- Coleta de dados sobre densidade, pressão, temperatura e campo elétrico em função da altitude (1 mês);
- Simulação básica da atmosfera e estudos das variações de seus parâmetros na troposfera, estratosfera e ionosfera (1 mês);
- Simulação dos espectros energéticos de partículas carregadas obtendo o perfil de ionização atmosférica (2 meses);
- Elaboração do relatório parcial (1 mês);
- Coleta de dados sobre o fluxo de raios cósmicos e sobre a incidência de raios e tempestades (1 mês);
- Simulação completa do circuito elétrico global (2 meses);
- Montagem, testes e medidas com protótipo do circuito elétrico global (2 meses);
- Elaboração do relatório final (1 mês).

## V. CONCLUSÃO

A atmosfera da Terra está constantemente sendo bombardeada por radiações e partículas de diferentes naturezas: desde ondas eletromagnéticas de todas as faixas do espectro até os raios cósmicos num amplo espectro de energia. Os raios cósmicos são os precursores de vários processos físicos, químicos e biológicos em nosso planeta. Em seu caminho pela atmosfera, as partículas

dos chuueiros provocam uma série de fenômenos, tais como a formação de íons, a produção de isótopos radioativos ou a emissão de ondas de rádio, de micro-ondas, luz de fluorescência, radiação Cherenkov, raios X ou raios gama. Tais fenômenos são as assinaturas das passagens dos raios cósmicos pela atmosfera e podem ser utilizados como sinais para as suas detecções. Desta forma, há várias linhas de investigação que buscam a correlação entre o fluxo dos raios cósmicos e os processos climáticos, de formação de núvens ou de descargas atmosféricas.

Neste projeto de iniciação científica, apresentamos uma proposta de pesquisa para o aluno nestes temas. A proposta envolve a simulação computacional e a montagem de um protótipo experimental do circuito elétrico global. De posse dos dois, poderemos realizar diversos estudos acerca das condições elétricas da atmosfera em função das diferentes condições físicas presentes na mesma. Levando-se em conta a vasta experiência do orientador na área, a já bem-sucedida orientação anterior do candidato, bem como as condições adequadas para o desenvolvimento no projeto, temos plena capacidade de executá-lo com êxito no âmbito do programa de iniciação científica da UFABC.

## VI. REFERÊNCIAS

- [1] S. Eidelman *et al.*, Phys. Lett. **B592**, 1 (2004); available online at <http://pdg.lbl.gov>
- [2] V.I. Ermakov, G.A. Bazilevskaya, P.E. Pokrevsky and Y.I. Stozhkov, *Ion balance equation in the atmosphere*, J. Geophys. Res. **102**, 23413 (1997).
- [3] CORSIKA - an Air Shower Simulation Program, <https://www.ikp.kit.edu/corsika>
- [4] J. Kirkby, *Cosmic Rays and Climate*, Surveys in Geophysics **28**, 333-375 (2007); arXiv: 0804.1938v1.
- [5] J.H. Kraakevik, *Measurements of current density in the fair weather atmosphere*, J. Geophys. Res. **66**, 3735-3748 (1961).
- [6] M.J. Rycroft, S. Israelsson and C. Price, *The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change*, J. Atm. Sol. Terr. Phys. **62**, 1563-1576 (2000).
- [7] J. M. Wallace and P. Hobbs, *Atmospheric Science - An Introductory Survey*, Elsevier (2006).
- [8] M.L. Salby, *Physics of the Atmosphere and Climate*, Cambridge (2012).