

Rastreando assinaturas de vida na Galáxia por meio da abundância universal de elementos químicos induzida por raios cósmicos

Projeto de iniciação científica para o programa Pesquisando Desde o Primeiro Dia - Ações Afirmativas (PDPD-AF)

Edital UFABC/Propes n° 07/2025

Resumo

A Via Láctea serve como o maior laboratório natural para interações nucleares induzidas por colisões entre partículas de raios cósmicos e a matéria interestelar. Acredita-se que os raios cósmicos — compostos por prótons, elétrons, núcleos mais pesados e suas antipartículas — se originem de três fontes primárias: choques de supernovas no meio interestelar, choques de supernovas nos ventos estelares das estrelas progenitoras e radiogaláxias. Essas origens propostas são apoiadas por modelos quantitativos cada vez mais consistentes de transporte e de interação de raios cósmicos. Observações em várias ordens de grandeza de energia permitem a determinação das abundâncias químicas dos raios cósmicos, revelando que certos elementos — como Li, Be, B, muitos elementos com Z ímpar e núcleos subferrosos — são produzidos principalmente como produtos secundários por espalação. Em energias muito baixas, as perdas por ionização levam a um corte abrupto, redistribuindo as partículas na população térmica e modificando a composição química do meio interestelar.

Neste projeto interdisciplinar de iniciação científica faremos um estudo de como a propagação de raios cósmicos através do meio interestelar influencia a distribuição de elementos essenciais à vida e como isso afeta as potenciais bioassinaturas na Via Láctea. Buscamos conectar a astrofísica de raios cósmicos com os pré-requisitos elementares para a vida e por estratégias de detecção bioastronômica, visando construir um modelo de “zonas de habitabilidade astroquímica” com base em abundâncias modificadas por raios cósmicos.

Palavras-chave: Raios Cósmicos, Abundância Universal de Elementos, Astrobiologia.

I. INTRODUÇÃO

Raios cósmicos (RCs) são astropartículas de alta energia — prótons ou núcleos atômicos — que se movem pelo espaço a velocidades próximas à da luz. Eles se originam de fora do Sistema Solar, na Via Láctea, e de galáxias distantes [1]. Ao impactarem na atmosfera terrestre, os raios cósmicos produzem chuvas de partículas secundárias, denominadas *chuveiros atmosféricos extensos*, e algumas delas atingem a superfície da Terra e até penetram a crosta terrestre ou o mar. Durante sua propagação através do meio interestelar, os raios cósmicos galácticos (RCGs) surgem como cruciais, não apenas para a compreensão da astrofísica de alta energia, mas também para desvendar a paisagem astroquímica que fundamenta a habitabilidade em nossa Galáxia.

Observações coletadas por instrumentos como AMS-02 [2], ACE/CRIS [3] e SuperTIGER [4] revelam um aumento característico de elementos leves raros em RCs — principalmente Li, Be e B — em comparação com as abundâncias do sistema solar, como mostrado no gráfico de abundância elementar de RCs (vide figura 1). Esses elementos leves secundários são ordens de magnitude mais abundantes em populações de RCs do que o esperado a partir da nucleossíntese estelar ou de modelos do Big Bang. Essa discrepância é atribuída à *espalação* de RCs, um processo no qual núcleos primários de RCs de alta energia colidem com núcleos interestelares de carbono, nitrogênio e oxigênio e arrancam fragmentos de seus núcleos. Tais fragmentos incluem isótopos de Li, Be e B, elementos que não podem ser produzidos significativamente em núcleos estelares devido a restrições de ligação nuclear. Assim, a espalação de raios cósmicos atua como um canal essencial de nucleossíntese para elementos leves em ambientes galácticos.

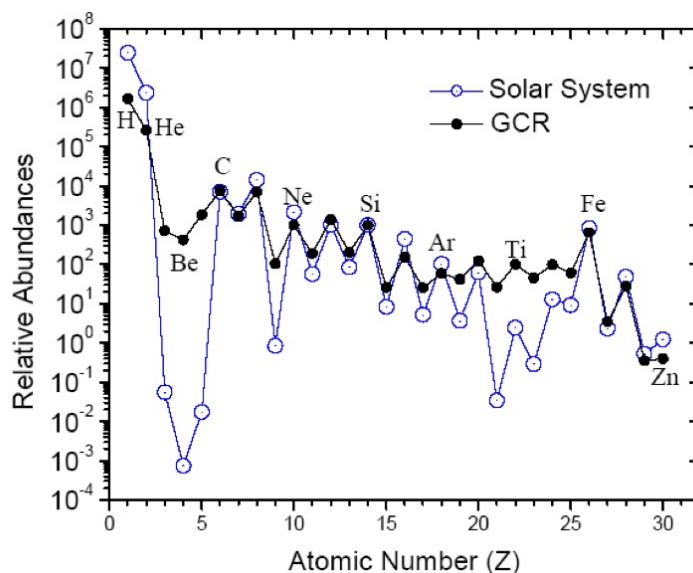


Figura 1: Abundâncias relativas de elementos químicos na matéria do Sistema Solar e nos raios cósmicos galácticos.

A integração da física da propagação e da espalação de RCs com a distribuição espacial de abundâncias elementares bioessenciais (por exemplo: carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, fósforo e enxofre — CHNOPS) oferece uma estrutura única para avaliar potenciais zonas astrobiológicas na Via Láctea. Regiões com fluxo elevado de RCs podem injetar ou redistribuir sistematicamente a riqueza elementar — ou, inversamente, degradar compostos moleculares por meio de processos radiolíticos. Esses efeitos concorrentes influenciam a formação de moléculas prebióticas e a disponibilidade de elementos críticos para a vida.

Ao acoplar modelos de propagação com levantamentos elementares e dados de composição de fontes de RCs, este projeto busca mapear a interação entre abundâncias modificadas por espalação e os habitats galácticos com maior probabilidade de abrigar bioassinaturas. Para isso, propomos uma nova métrica: um índice de habitabilidade ajustado por RCs, que conecta campos de intensidade de RCs a zonas com química elementar favorável e potencial produção biótica.

II. METODOLOGIA

O fluxo principal dos RCGs encontra-se na região de energia de poucos GeV, embora o espectro de energia estenda-se 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:

$$d\phi \propto E^{-\gamma} dE, \quad (1)$$

onde $\gamma \approx 2.67$ para $10^9 \lesssim E \lesssim 10^{15}$ eV [5]. O fluxo de RCGs 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 pela intensidade do campo magnético dos ambientes galáctico, solar e terrestre. De acordo com [6], para os elementos como H, He, C, N, O e Fe, a lei de injeção pode ser escrita como uma lei de potência no momento p :

$$N(p) \propto p^{-2.67} dp, \quad (2)$$

que se estende até energias não relativísticas. Isso significa que com $p = Am_p c \gamma \beta$, onde A é o peso atômico do núcleo considerado, e γ e β são o fator de Lorentz e a velocidade em unidades da velocidade da luz c , o espectro em energias sub-relativísticas pode ser escrito como $\sim \beta^{-2.67} d\beta$.

A perda de energia em interações com elétrons livres é proporcional a n_e , a densidade de elétrons livres, ou ligados em uma camada ao redor de um núcleo de hidrogênio é proporcional a n_H , a densidade de átomos de hidrogênio neutros (elementos mais pesados podem normalmente ser desprezados aqui) da matéria térmica pode ser escrita como:

$$\frac{d\beta}{dt} \approx \frac{n_e, n_H}{\beta^2} Z^2, \quad (3)$$

onde Z é a carga do núcleo energético que perde energia. Este comportamento simples é válido apenas para energias supratérmicas e velocidades sub-relativísticas. Após a travessia da matéria térmica por algum tempo τ , a interação resulta em um corte de baixa energia. A energia de corte é dada por:

$$\beta_{crit} \approx \{Z^2(n_e, n_H)\tau\}^{1/3}. \quad (4)$$

Todas as partículas perdidas para o espectro de partículas energéticas abaixo do corte são deslocadas no espaço de fase para as partículas térmicas e podem modificar as abundâncias químicas lá. Este efeito é especialmente importante no caso em que as abundâncias químicas em partículas energéticas são muito diferentes daquelas no meio interestelar, e este é o caso de alguns elementos, como para muitos isótopos de Li, Be, B.

As partículas secundárias são então criadas e se difundem para fora da Galáxia e, portanto, sua equação de criação pode ser escrita como [6]:

$$\frac{dN_s}{dt} = \frac{N_p}{\tau_s} - \frac{N_s}{\tau_d}, \quad (5)$$

onde τ_s é a escala de tempo de espalçamento e τ_d é a escala de tempo para difusão para fora do disco da Galáxia. A solução para esta equação é no caso estacionário:

$$dN_s = N_p \frac{\tau_d}{\tau_s}, \quad (6)$$

que se traduz em uma dependência energética da razão entre isótopos secundários e primários e elementos de:

$$\frac{N_s}{N_p} \sim E^{-1/3}. \quad (7)$$

Desta forma, a proporção de núcleos secundários e primários (por exemplo, B/C) é utilizada como parâmetro observável nas medidas da abundância dos elementos químicos na Galáxia.

III. OBJETIVOS E METAS

O objetivo principal deste projeto de iniciação científica é realizar um estudo detalhado das proporções de diversos núclídeos no espaço galáctico em busca de regiões em que os elementos essenciais para a vida estejam presentes nas quantidades adequadas. No decorrer do projeto, exploraremos como a propagação de RCs através do meio interestelar influencia a distribuição de elementos essenciais à vida (CHNOPS) e como isso afeta as potenciais bioassinaturas na Via Láctea. Buscaremos conectar a

astrofísica de RCs com os pré-requisitos elementares para a vida e estratégias de detecção bioastronômica, visando construir um modelo de "zonas de habitabilidade astroquímica" com base em abundâncias modificadas por RCs.

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

1. Modelar a propagação galáctica de raios cósmicos, usando modelos de transporte como GALPROP [7] ou DRAGON [8] para mapear espectros e fluxos de energia através do disco e halo galácticos;
2. Quantificar a nucleossíntese e espalação induzidas por raios cósmicos. Investigar como os RCs contribuem para a síntese de elementos leves (por exemplo, Li, Be, B) e alteram as abundâncias locais de elementos bio-relevantes por meio de reações de espalação e fragmentação;
3. Correlacionar abundâncias elementares com o potencial astrobiológico. Utilizar mapas de abundância (de Gaia-ESO [9], APOGEE [10], LAMOST [11]) para sobrepor campos de intensidade de RCs e avaliar quais regiões galácticas mantêm altas concentrações de CHNOPS e moléculas prebióticas.
4. Prever zonas galácticas com probabilidade de bioassinatura. Combinar modelos de abundância modificados por RCs com densidade estelar, taxas de ocorrência em sistemas planetários e radiação de fundo para identificar regiões com maior probabilidade de emitir sinais relacionados à vida (por exemplo, tecnoassinaturas ou gases de bioassinatura).

A. Viabilidade do projeto

O projeto apresentado tem total viabilidade de ser concluído com êxito, uma vez que possui nível adequado a uma estudante de graduação que inicia suas pesquisas científicas em astrofísica de partículas e astrobiologia. 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 pessoais e de conectividade entre o estudante e o orientador.

Além das atividades de pesquisa supracitadas, a 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 recentes 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 científicos nacionais e/ou internacionais.

IV. CRONOGRAMA

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

Mês	Atividades
1	Revisão bibliográfica
2	Instalação dos softwares: GALPROP/DRAGON
3	
4	Obtenção dos espectros de RCs na Galáxia
5	
6	Elaboração do relatório parcial
7	Estudo e simulação da espalação
8	
9	Obtenção dos mapas de abundância: Gaia-ESO/APOGEE/LAMOST
10	
11	Determinação das zonas de habitabilidade
12	Elaboração do relatório final

Tabela 1
Cronograma de atividades da IC.

V. CONCLUSÃO

A influência dos raios cósmicos na concentração de elementos químicos essenciais para a vida são um dos grandes problemas em aberto na astrobiologia da atualidade. Este projeto visa demonstrar que os raios cósmicos não são meramente agentes destrutivos, mas também desempenham um papel construtivo na redistribuição destes elementos e, potencialmente, na sementeira de ambientes astrobiologicamente favoráveis. Ao vincular a física dos raios cósmicos à bioquímica elementar e à distribuição de bioassinaturas, este estudo abre um novo caminho para otimizar a busca por vida extraterrestre. 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-AF da UFABC.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] M. Spurio, *Particles and Astrophysics: A Multi-Messenger Approach*, Springer International Publishing (2014). URL: <https://books.google.com.br/books?id=4P67BAAAQBAJ>
- [2] M. Aguilar *et al.* (AMS Collaboration), *Observation of New Properties of Secondary Cosmic Rays Lithium, Beryllium, and Boron by the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station*, Phys. Rev. Lett. **120**, 021101, (2018).
- [3] *Advanced Composition Explorer (ACE)*, SRL, 2006, URL: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/>
- [4] T. Hams, *et al.*, *Elemental Abundances of Ultra-Heavy GCRs Measured by SuperTIGER and ACE-CRIS and the Origin of Galactic Cosmic Rays*. (2015) In SISSA. URL: <https://doi.org/10.22323/1.236.0038>.
- [5] S. Eidelman *et al.*, Phys. Lett. **B592**, 1 (2004); available online at <http://pdg.lbl.gov>
- [6] P. L. Biermann, *Cosmic Ray Interactions and the Abundances of the Chemical Elements*, arXiv:astro-ph/9609110 URL: <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/9609110>
- [7] T. A. Porter, G. Johannesson, and I. V. Moskalenko, *The GALPROP cosmic-ray propagation and non-thermal emissions framework: Release v57*. URL: <https://arxiv.org/pdf/2112.12745>.
- [8] C. Evoli *et al.*, *Cosmic-ray propagation with DRAGON2: I. numerical solver and astrophysical ingredients*, URL: <https://arxiv.org/pdf/1607.07886>; *Cosmic-ray propagation with DRAGON2: II. Nuclear interactions with the interstellar gas*. URL: <https://arxiv.org/abs/1711.09616>
- [9] Gilmore, G., Randich, S., Asplund, M., *et al.* 2012, The Messenger, 147, 25.
- [10] Majewski, S. R., Schiavon, R. P., Frinchaboy, P. M., *et al.* 2017, AJ, 154, 94.
- [11] Cui, X.-Q., Zhao, Y.-H., Chu, Y.-Q., *et al.* 2012, Res. Astron. Astrophys., 12, 1197.