

Revista
Brasileira de
**ASTRO
NOMIA**

Produzida pela Sociedade
Astronômica Brasileira

Volume 8 | Número 31
Ano 2026

Astronomia de raios gama

Blue stragglers ♦ Projeto Viscacha ♦ O novo espectrógrafo STELES



Editorial

Dois dos artigos desta edição tratam de instrumentos que exploram formas diferentes de obtenção de dados astronômicos. Por um lado, temos o STELES, um espectrógrafo echelle de grande eficiência que deve aumentar ainda mais a competitividade do telescópio SOAR. Desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Astrofísica, o STELES coroa anos de aperfeiçoamento tecnológico brasileiro no campo de instrumentação astronômica. O outro artigo, que ilustra a capa desta edição, apresenta a criação de um grande detector de raios gama a partir da observação da radiação Cherenkov produzida por chuveis de partículas que penetram a atmosfera. A operação desse conjunto de detectores permitirá a observação de vários fenômenos do Universo que ocorrem no regime de altíssimas energias.

O leitor também conhecerá o projeto VISCACHA, idealizado e liderado por brasileiros, que explora as especificidades do SOAR para fazer um levantamento dedicado à caracterização dos aglomerados estelares nas Nuvens de Magalhães. O quarto e último artigo discute a existência de estrelas retardatárias azuis — ou azuis tardias, como prefere o autor. Trata-se de estrelas que tiveram sua evolução totalmente modificada pela presença de uma estrela companheira.

O trimestre que se encerra marca a eleição da próxima diretoria da Sociedade Astronômica Brasileira, que tomará posse em 1º de novembro. Esperamos que os colegas que representarão a SAB nos próximos 3 anos tragam novas ideias que dinamizem a interação entre os astrônomos e a sociedade brasileira.

De todo modo, a eleição mais importante é aquela para o legislativo e para o executivo em níveis federal e estadual. Votem com consciência, em candidatos que valorizem a educação, a cultura e a soberania científica! Sem isso, o país não tem futuro.

*Helio J. Rocha-Pinto
Presidente da Sociedade Astronômica Brasileira*

Esquerda

Detalhe do par de galáxias NGC 7253 e Arp 278 (Crédito: International Gemini Observatory / NOIRLab/NSF/AURA).

Capa

O detector de radiação Cherenkov atmosférica LST-1 durante uma observação no CTAO-Norte, em La Palma, Espanha (Crédito: CTAO gGmbH).

Revista Brasileira de Astronomia

produzida pela

Sociedade Astronômica Brasileira

ISSN 2764-9423

Conselho Editorial Alan Alves Brito,
Reinaldo Ramos de Carvalho, Lucimara
Martins, Ramachrisna Teixeira,
Thiago Signorini Gonçalves
Editor Helio J. Rocha-Pinto
Assistente Hélio Dotto Perottoni

Contato secretaria@sab-astro.org.br

Para anunciar Escreva ao email acima ou
ligue (11) 3091-8684,
Seg. a Sex. 10 às 16 h.

Para submissões

Contacte um membro do conselho editorial



Presidente

Helio J. Rocha-Pinto

Vice-Presidente

Lucimara Martins

Secretária-Geral

Marina Trevisan

Secretário

Matthieu Castro

Tesoureira

Paula Coelho

Endereço

Sociedade Astronômica Brasileira

Rua do Matão, 1226

05508-090 São Paulo – SP

<http://www.sab-astro.org.br>

4 Espectrógrafo STELES

Felipe Navarete apresenta o novo espectrógrafo STELES que equipará o telescópio SOAR.

13 Nebula

A gatinha Nebula viaja até as Nuvens de Magalhães, galáxias satélites da Via Láctea.

14 Projeto Viscacha

Conheça o projeto de caracterização dos aglomerados estelares das Nuvens de Magalhães, idealizado por Bruno Dias, Leandro Kerber, João Francisco dos Santos Jr. e Francisco Maia.

24 Astronomia de raios gama

Elisabete Dal Pino, Stela Adduci e Maria del Valle escrevem sobre a astronomia de raios gama e o Universo extremo.

32 Estrelas azuis tardias

Rafael Santucci aborda a existência de estrelas azuis que parecem ter tido uma evolução mais lenta do que o esperado.



STELES

Um novo capítulo para a espectroscopia brasileira

Instalado no telescópio SOAR, no Chile, o novo espectrógrafo de alta resolução desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Astrofísica inicia sua fase de Verificação de Ciência no segundo semestre de 2026, ampliando as possibilidades da espectroscopia no visível e ultravioleta.

Quando observamos uma estrela através de um telescópio, sua luz aparece como um ponto luminoso. Ao dispersá-la em diferentes comprimentos de onda, um espectrógrafo transforma esse ponto em uma assinatura espectral que registra informações sobre composição química, temperatura, velocidade e diversas outras propriedades do objeto. Essa técnica, conhecida como espectroscopia, é uma das principais ferramentas da astronomia moderna.

É justamente essa capacidade que o novo espectrógrafo STELES (*SOAR Telescope Echelle Spectrograph*)

leva ao SOAR, um dos principais telescópios ópticos da classe de 4 metros do hemisfério sul, localizado no Cerro Pachón, no Chile. Desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA/MCTI) em colaboração com outros institutos nacionais, o STELES amplia as possibilidades de espectroscopia de alta resolução disponíveis à comunidade científica.

O Brasil é co-proprietário do SOAR, com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) responsável pelos recursos necessários à participação brasileira e o LNA responsável pela gestão dessa participação. Essa parceria garante cerca de cem noites de

observação por ano para a comunidade astronômica brasileira, que passa agora a contar também com o STELES entre as ferramentas disponíveis para suas pesquisas.

Do projeto ao céu: a história do STELES

A construção de um instrumento astronômico leva anos e envolve diversas decisões de projeto, fabricação de componentes de alta precisão, integração de sistemas ópticos, eletrônicos e mecânicos e inúmeros testes antes que o equipamento possa produzir seus primeiros dados científicos.

O nome STELES é um acrônimo para *SOAR Telescope Echelle Spectrograph*, refletindo sua ligação com o telescópio SOAR e sua função principal: realizar espectroscopia de alta resolução. O projeto foi liderado pelo astrônomo Dr. Bruno Castilho (LNA), Investigador Principal do instrumento desde sua concepção. Como instrumento de segunda geração do SOAR, o STELES foi projetado para ampliar as capacidades do telescópio em espectroscopia de alta resolução e atender às demandas científicas da comunidade.

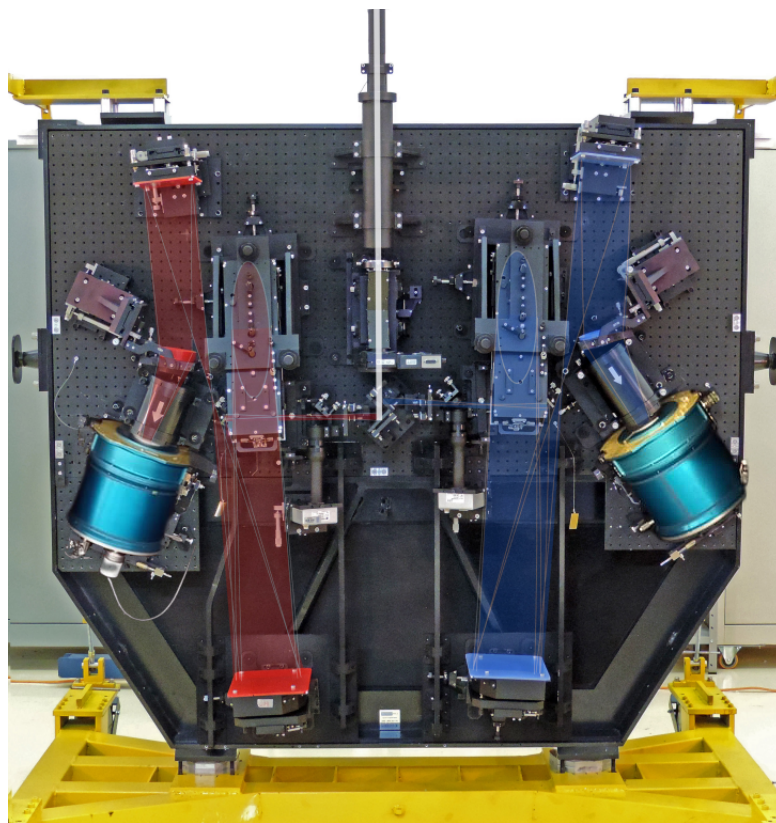
Desenvolvido por meio de uma colaboração entre instituições brasileiras e internacionais, o projeto reuniu especialistas em óptica, mecânica de precisão, eletrônica, software e astronomia observacional. Nas etapas iniciais, o con-

ceito optomecânico teve como referência o UVES (*Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph*), instalado no *Very Large Telescope* (VLT) do Observatório Europeu do Sul (ESO). O desenvolvimento contou também com a colaboração do engenheiro óptico Bernard Delabre do ESO, que realizou o desenho óptico do STELES.

Desde sua concepção, um dos principais objetivos foi maximizar a eficiência no ultravioleta próximo, particularmente entre 300 e 340 nm. Para isso, o STELES adotou um desenho óptico que minimiza perdas de luz e aproveita as características do SOAR, cujos espelhos revestidos de alumínio apresentam excelente re-

Na página anterior
STELES montado no Yoke do telescópio SOAR, logo abaixo do foco nasmyth óptico.

Abaixo
Caminho óptico da luz no interior do espectrógrafo STELES. Após entrar no instrumento, o feixe é dividido por um filtro dicróico em dois canais independentes (azul e vermelho), e segue por colimadores, elementos dispersores e câmeras, até os respectivos detectores. Os dois canais permitem registrar simultaneamente diferentes regiões do espectro, cobrindo aproximadamente de 300 a 960 nm em uma única exposição.



fletividade em comprimentos de onda curtos. Essa configuração permite explorar o ultravioleta próximo com elevada eficiência sem comprometer o desempenho no restante do espectro óptico.

Antes de sua instalação definitiva no SOAR, o instrumento passou por uma extensa campanha de pré-comissionamento no laboratório de testes e integração do telescópio. Nesse estágio, seus subsistemas foram testados e ajustados, incluindo modificações importantes no sistema de fendas e no suporte dos detectores. Essas etapas garantiram que o instrumento atendesse aos requisitos de projeto antes de sua instalação no telescópio, em julho de 2025.

As primeiras observações astronômicas ocorreram em agosto de 2025 e marcaram a Primeira Luz do STELES. Esse momento simbolizou a passagem de anos de desenvolvimento para uma nova etapa de caracterização e validação científica, preparando o instrumento para sua disponibilização à comunidade astronômica.

Mas o que torna o STELES diferente de outros espectrógrafos? É nas escolhas feitas durante seu projeto que estão algumas das características que fazem dele um instrumento singular no hemisfério sul.

Por dentro do STELES: o que o torna especial

À primeira vista, o STELES pode parecer apenas mais um espectró-

grafo instalado em um grande telescópio. No entanto, seu projeto reúne diversas soluções de engenharia e escolhas feitas para maximizar o desempenho científico, equilibrando eficiência, simplicidade operacional e versatilidade.

Assim como o UVES, o STELES pertence à família dos espectrógrafos *echelle*, que combinam alta resolução espectral com ampla cobertura em comprimento de onda. Em uma única observação, dezenas de ordens espectrais registram diferentes regiões do espectro, preservando detalhes finos das linhas de absorção e emissão dos objetos astronômicos.

A primeira dessas escolhas foi dividir o instrumento em dois canais independentes, azul e vermelho. Após entrar no espectrógrafo, o feixe de luz é dividido por um filtro dicróico, permitindo que dois detectores registrem simultaneamente diferentes regiões do espectro. Juntos, os canais cobrem uma faixa entre 300 e 960 nm, abrangendo praticamente toda a região óptica acessível a partir do solo. Essa ampla cobertura espectral permite observar, em uma única exposição, diferentes assinaturas espectrais associadas à composição química e às propriedades físicas dos objetos estudados.

A segunda decisão foi otimizar o instrumento para observações no ultravioleta próximo, uma região historicamente difícil de explorar com alta eficiência. O de-

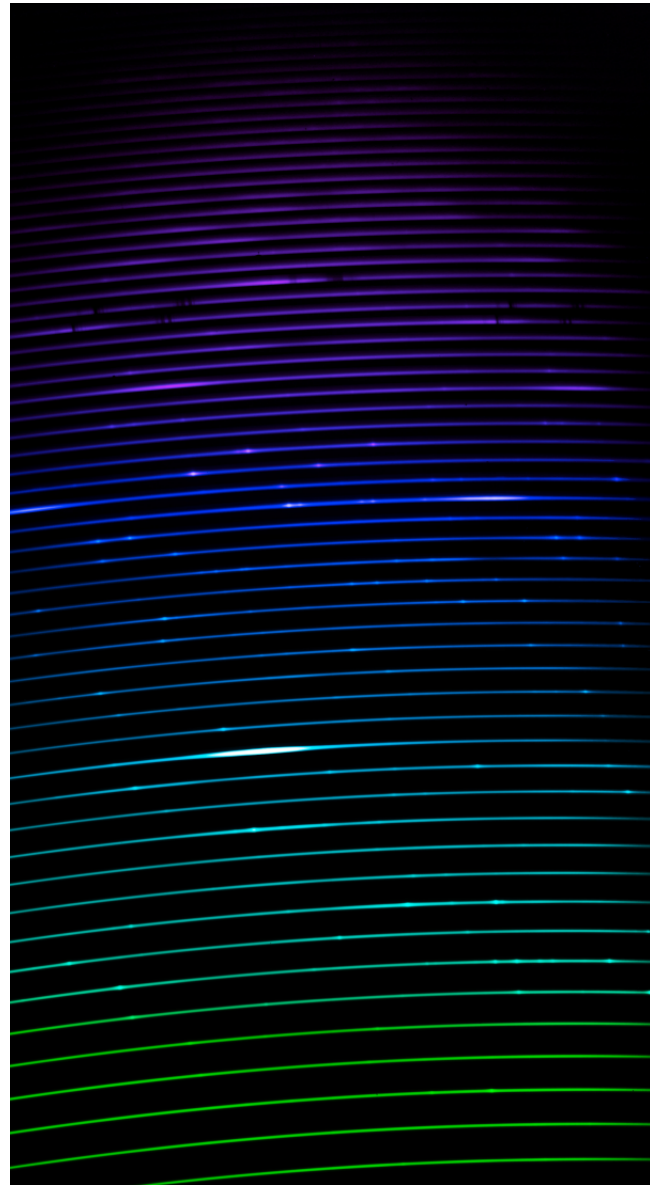
senho óptico do STELES, combinado às características do SOAR, com seus espelhos revestidos de alumínio, permite alcançar elevada eficiência entre 300 e 340 nm, faixa particularmente relevante para estudos de abundâncias químicas estelares e outras aplicações que dependem dos menores comprimentos de onda acessíveis ao instrumento.

A terceira escolha foi a transmissão direta da luz do telescópio sem o uso de fibras ópticas. Embora a alimentação por fibras ofereça vantagens em estabilidade e flexibilidade operacional, ela introduz perdas de transmissão particularmente importantes no ultravioleta. Instalado logo abaixo da plataforma Nasmyth do SOAR, o STELES recebe a luz diretamente do telescópio por um sistema de prismas e lentes, preservando um número maior de fótons no ultravioleta próximo. Essa filosofia difere, por exemplo, da adotada pelo espectrógrafo GHOST, instalado no telescópio Gemini Sul, que utiliza fibras ópticas. Enquanto a alimentação direta favorece o desempenho do STELES nos menores comprimentos de onda, o GHOST apresenta maior eficiência em comprimentos de onda mais longos, onde as perdas nas fibras são menos significativas.

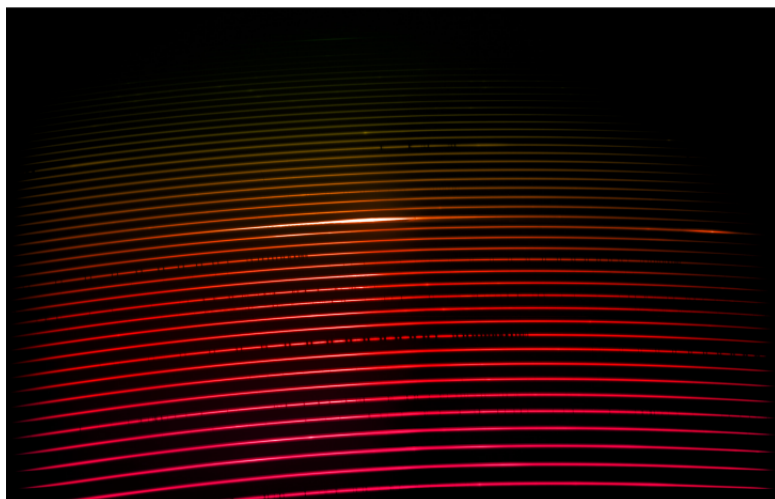
Por fim, o sistema de fendas também reflete uma importante decisão de projeto. Em vez da fenda ajustável prevista no conceito inicial, o instrumento foi equipa-

do com oito fendas de larguras fixas, entre 0,6 e 3,0 segundos de arco. Essa solução simplifica o sistema mecânico, aumenta sua estabilidade e a repetibilidade das observações, ao mesmo tempo em que oferece flexibilidade para diferentes condições atmosféricas e objetivos científicos.

Os primeiros resultados do comissionamento confirmaram o



Acima
Echellograma de Eta
Carinae no canal azul
(Crédito: CTIO/NOIRLab/
SOAR/NSF/AURA).



Acima
Echellograma de Eta
Carinae no canal vermelho
(Crédito: CTIO/NOIRLab/
SOAR/NSF/AURA).

acerto dessas escolhas. As medições de eficiência mostraram que o STELES apresenta desempenho compatível com o de importantes espectrógrafos ópticos em operação, destacando-se especialmente na região azul, onde poucos instrumentos combinam alta resolução e elevada eficiência. Essa característica abre novas possibilidades para estudos que dependem dos comprimentos de onda mais curtos.

Mais do que reunir soluções tecnológicas avançadas, o STELES foi concebido para extrair o máximo de informação da luz coletada pelo SOAR. É essa combinação entre desempenho instrumental e potencial científico que começa agora a ser explorada em sua fase de Verificação de Ciência, no segundo semestre de 2026.

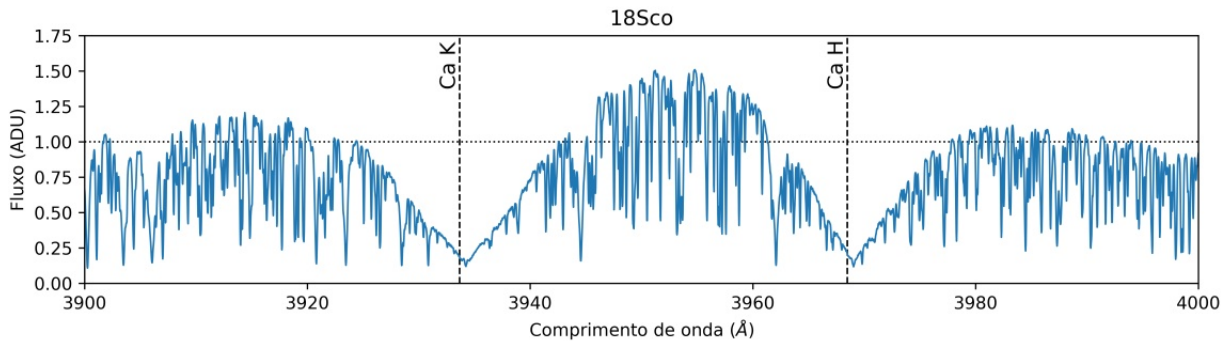
Verificação de Ciência: quando a comunidade entra em cena

Em agosto de 2025, a Primeira Luz marcou o início de uma no-

va etapa na história do STELES, mas produzir os primeiros espectros não significa que um instrumento esteja imediatamente pronto para uso científico. Após sua instalação, é necessário caracterizar seu desempenho em condições reais de observação, testar os procedimentos operacionais e de calibração, além de compreender suas capacidades e limitações. Esses testes fazem parte da etapa de Verificação de Ciência do instrumento, com início planejado para setembro de 2026.

Para essa primeira campanha, o STELES foi disponibilizado por meio de uma chamada pública de propostas aberta a pesquisadores e estudantes de todo o mundo. O interesse superou amplamente o tempo disponível: foram recebidas 71 propostas, totalizando 538 horas de observação solicitadas, mais de cinco vezes as 100 horas disponíveis, distribuídas em 11 noites. Esse resultado demonstra o interesse despertado pelo novo instrumento e a diversidade de projetos que podem explorar suas capacidades.

Planejada para o segundo semestre de 2026, a campanha marcará o início da operação científica do STELES. Enquanto os pesquisadores exploram essa nova capacidade, as observações permitirão à equipe do instrumento aperfeiçoar procedimentos de operação, calibração e preparação dos dados, consolidando o instrumento como parte da capacida-



de científica do SOAR.

Depois de anos de projeto, construção, testes e comissionamento, o STELES chega finalmente ao momento para o qual foi construído: observar o céu e transformar a luz dos objetos astronômicos em dados científicos inéditos. Mas qual tipo de ciência os astrônomos esperam fazer com essa nova capacidade?

Da composição química à dinâmica estelar

O potencial de um novo instrumento é revelado pelas perguntas científicas que ele permite investigar. No caso do STELES, a combinação de alta resolução espectral, ampla cobertura em comprimento de onda e acesso eficiente ao ultravioleta próximo abre oportunidades em diversas áreas da astrofísica, da composição química à dinâmica de sistemas estelares e objetos variáveis.

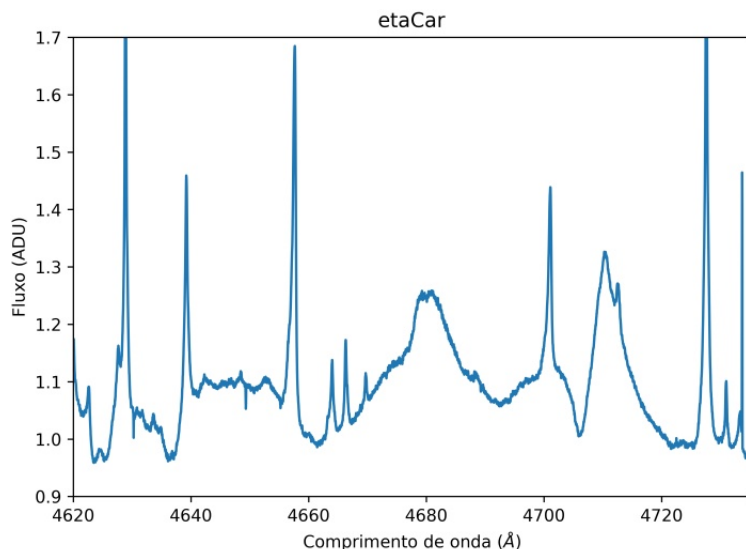
Composição química e evolução das estrelas. Uma das principais aplicações do STELES será o estudo da composição química de estrelas. A alta resolução permite separar e medir linhas espectrais

muito próximas, possibilitando determinar abundâncias de diferentes elementos e investigar a evolução química de estrelas e populações estelares.

O acesso ao ultravioleta próximo é particularmente valioso, pois diversos elementos possuem linhas importantes nessa região, difíceis de observar com eficiência a partir do solo. Entre eles estão o lítio e o berílio, que também fornecem informações sobre a estrutura interna das estrelas: enquanto o lítio é destruído em regiões relativamente rasas, o berílio sobrevive a temperaturas mais altas e permite investigar camadas mais profundas. A comparação entre suas abundâncias em estrelas com diferentes propriedades pode revelar processos de mistura interna não previstos pelos modelos tradicionais de evolução estelar.

O ultravioleta também será importante para estudar estrelas extremamente pobres em metais, que preservam informações sobre os primeiros episódios de enriquecimento químico da Galáxia. Linhas de elementos produzidos por processos de captura de nêutrons po-

Acima
Parte do espectro azul da estrela 18 Scorpii, obtido com o STELES.

**Acima**

Parte do espectro da estrela Eta Carinae, obtido com o STELES.

dem fornecer pistas sobre os eventos responsáveis pela produção e distribuição dos primeiros elementos pesados no Universo.

Estrelas massivas, rotação e perda de massa. O STELES permitirá estudar estrelas massivas, jovens e estrelas Be, que giram rapidamente e podem apresentar discos de material ao seu redor. Esses objetos apresentam espectros ricos em linhas de absorção e emissão, que permitem investigar rotação, perda de massa, ventos estelares e a formação e evolução de estruturas circunstelares, além da interação desses processos com o meio interestelar.

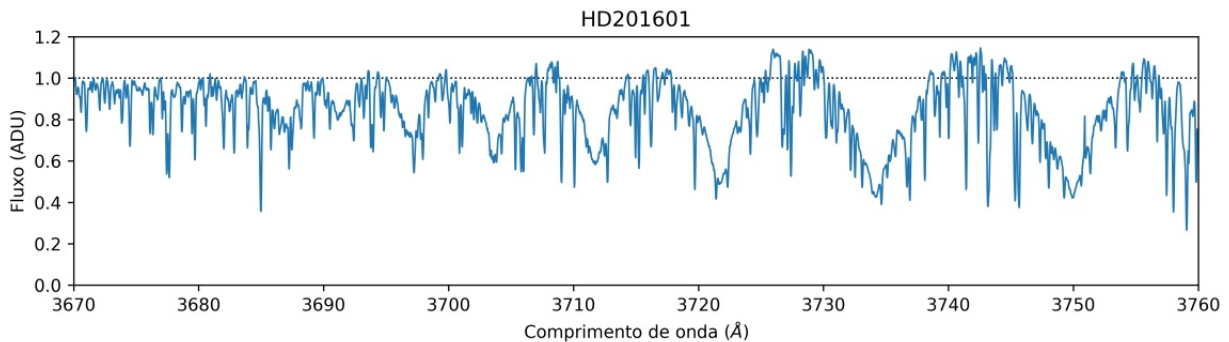
A alta resolução permite medir pequenas variações de velocidade radial e separar componentes espectrais muito próximas, possibilitando também identificar sistemas estelares múltiplos e caracterizar seus movimentos orbitais. Essa capacidade é particularmen-

te importante para estrelas de alta massa, cuja frequência de sistemas binários ou múltiplos e suas interações desempenham papel fundamental em sua evolução. Em objetos com linhas de emissão, a resolução espectral também permite investigar como o gás se movimenta ao redor das estrelas e compreender a formação e evolução dessas estruturas.

Espectroscopia para um Universo variável. Outra aplicação é o acompanhamento de objetos que mudam com o tempo, como sistemas binários e eclipsantes, estrelas pulsantes, variáveis cataclísmicas e outros objetos variáveis. Enquanto imagens e curvas de luz mostram mudanças no brilho integrado, a espectroscopia pode revelar o que está mudando fisicamente: temperatura, composição, velocidade ou geometria.

O STELES permite-nos acompanhar a evolução de linhas espectrais e investigar a dinâmica de material circunstellar, discos de acreção e outros fenômenos associados a objetos variáveis. Essa capacidade será especialmente relevante para fenômenos transitórios, nos quais observar o objeto no momento adequado pode ser decisivo.

Uma nova janela para o Universo próximo. Esses exemplos representam apenas parte do potencial científico do STELES. A campanha de Verificação de Ciência se-



rá o primeiro grande laboratório para explorar essas possibilidades, abrangendo diferentes classes de objetos e questões científicas e demonstrando as capacidades do instrumento em condições reais de observação.

O STELES não foi construído para responder a uma única pergunta, mas para oferecer uma nova capacidade observacional à comunidade. Seu uso poderá abrir caminhos para investigações que hoje ainda não imaginamos, revelando, na luz que atravessa os céus do Chile e chega ao SOAR, novas perguntas sobre o Universo.

Um legado para a ciência e a tecnologia brasileiras

A entrega do STELES vai além da entrada de um novo espectrógrafo em operação no SOAR. O instrumento demonstra a capacidade brasileira de desenvolver e entregar instrumentação científica de nível internacional, desde a concepção e o projeto até a fabricação, integração, testes e operação em um dos principais observatórios astronômicos da classe de 4 metros do hemisfério sul.

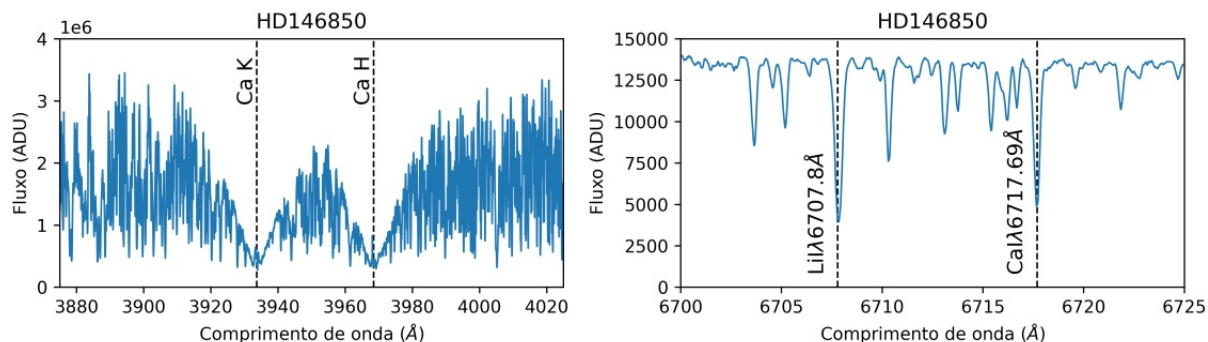
Seu desenvolvimento envolveu

anos de trabalho de pesquisadores, engenheiros e técnicos, consolidando competências em áreas que vão muito além da astronomia, como óptica de precisão, mecânica, eletrônica, detectores, controle, software e processamento de dados. O projeto também contribuiu para a formação de recursos humanos especializados e para a criação e consolidação, no LNA, de infraestrutura e laboratórios voltados ao desenvolvimento e à caracterização de instrumentação científica, hoje utilizados como laboratórios multiusuários em diversas aplicações.

O impacto do STELES, portanto, não será medido apenas pelos artigos científicos que produzirá. Cada espectro obtido com o instrumento será também resultado de uma cadeia de conhecimento, infraestrutura e tecnologia construída no país. A formação de recursos humanos, a experiência acumulada e a capacidade de desenvolver instrumentação para grandes projetos internacionais constituem parte igualmente importante desse legado.

Para a astronomia brasileira, o STELES abre uma nova janela pa-

Acima
Parte do espectro azul da estrela HD 201601, obtido com o STELES.



Acima

Parte do espectro no azul (esquerda) e no vermelho (direita) da estrela HD 146850, obtido com o STELES.

ra o Universo. Para a ciência, tecnologia e inovação nacionais, representa algo ainda maior: a demonstração de que o Brasil é capaz de transformar conhecimento científico em instrumentos de alta complexidade e colocá-los em operação em instalações astronômicas de referência internacional.

Agora, cabe à comunidade científica explorar essa nova capacidade. As primeiras observações da Verificação de Ciência serão apenas o começo de uma história que deverá se estender por muitos anos. Seu legado poderá estar não apenas nas descobertas feitas a partir da luz das estrelas, mas também nas pessoas, tecnologias, infraestrutura e novos instrumentos que nascerão do conhecimento acumulado ao longo desse caminho •

Felipe Navarete
Laboratório Nacional de Astrofísica
fnavarete@lna.br





VISCACHA

Descobrimos a história oculta das Nuvens de Magalhães

As nuvens que tanto intrigaram os primeiros navegadores europeus a atingir o hemisfério sul são galáxias satélites da Via Láctea. Ainda que próximas, elas guardam segredos que só agora conseguimos desvendar.

Olhe para o céu do hemisfério sul em uma noite escura, mais para o final do ano, e você poderá ver duas galáxias vizinhas muito especiais: a Grande e a Pequena

Nuvem de Magalhães (LMC e SMC, nessa ordem). Localizadas, respectivamente, a 160 e 200 mil anos-luz, elas estão entre as galáxias mais próximas da Via Láctea e são suas duas galáxias satélites mais massivas. Justamente por esta re-

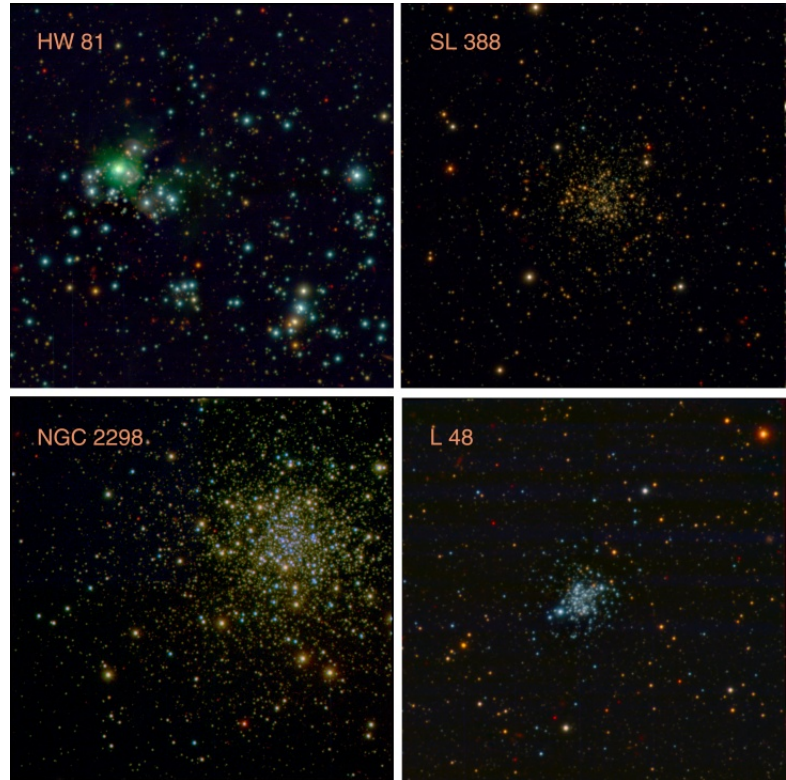
lativa proximidade e por estarem afastadas do disco da Via Láctea, os astrônomos conseguem estudar estrelas individuais dentro delas com um nível extraordinário de detalhes como em nenhum outro ambiente extragaláctico.

Mas as Nuvens de Magalhães são muito mais do que duas galáxias bonitas no céu noturno. Elas são verdadeiros laboratórios para entendermos como as galáxias se formam, evoluem, interagem e se transformam ao longo do tempo.

Sabemos que a LMC e a SMC interagem gravitacionalmente entre si e também com a Via Láctea. O mesmo efeito de maré que observamos nas praias também ocorre em escalas muito maiores. As forças de maré produzidas por essas interações geram enormes estruturas de gás que se estendem por uma grande parte do céu, incluindo a Corrente de Magalhães e a Ponte de Magalhães. A LMC também pode ter trazido consigo galáxias menores enquanto cai no campo gravitacional da Via Láctea.

Estudar essas interações é importante porque as galáxias não são sistemas isolados. Elas crescem e evoluem por meio de interações e fusões. As Nuvens de Magalhães nos oferecem, portanto, um exemplo próximo de processos que também ocorreram ao longo da história do Universo.

Por outro lado, a observação individual de suas estrelas permite aos astrônomos reconstruir a his-



tória dessas galáxias estudando suas populações estelares e, especialmente, seus aglomerados estelares.

Um aglomerado estelar é um grupo de estrelas que nasceram juntas, a partir da mesma nuvem de gás. Ao estudar suas estrelas em conjunto, os astrônomos podem determinar propriedades como idade, composição química e massa. Nesse sentido, os aglomerados estelares funcionam como fósseis: eles preservam informações sobre as condições em que se formaram e sobre o ambiente no qual evoluíram.

Há um ponto de vista interessante sobre os estudos astronômicos — e sobre todas as ciências em geral — segundo o qual os astros

Acima
Exemplos de aglomerados observados pelo VISCACHA (Crédito: VISCACHA).

Na página anterior
Nuvens de Magalhães vistas do norte da Bahia (Crédito: Breno Quevin).

e fenômenos físicos são apenas objetos de estudo, enquanto o conhecimento científico é uma construção humana que utiliza a matemática como linguagem. Dessa forma, a colaboração VISCACHA é um conjunto de pessoas que tenta entender e explicar os fenômenos que definem a história da evolução das Nuvens de Magalhães e de seus aglomerados estelares.

O protagonismo brasileiro na colaboração VISCACHA

O levantamento VISCACHA nasceu de uma colaboração entre astrônomos brasileiros interessados em utilizar o telescópio SOAR, no Chile, para estudar aglomerados estelares nas Nuvens de Magalhães.

Em 2016, quatro astrônomos começaram a desenvolver o pro-

jeto. Bruno Dias e Leandro Kerber estudavam a Pequena Nuvem de Magalhães, enquanto João Francisco C. Santos Jr. e Francisco Maia trabalhavam com a Grande Nuvem de Magalhães. Eles logo perceberam que estavam investigando questões científicas muito semelhantes. Em vez de trabalharem separadamente, decidiram criar um levantamento conjunto. Assim nasceu o VISCACHA, um projeto internacional de longo prazo desenvolvido especificamente para obter observações profundas e de alta resolução de aglomerados estelares nas Nuvens de Magalhães.

Um ingrediente fundamental foi o SAM, o módulo de óptica adaptativa do SOAR, que utiliza essa tecnologia para reduzir os efeitos de distorção nas imagens causados pela turbulência da atmosfera terrestre. Isso é particularmente importante porque os centros dos aglomerados estelares contêm muitas estrelas concentradas em uma pequena região do céu. O SAM deixa as imagens mais nítidas e permite o estudo de estrelas individuais nos centros densos dos aglomerados.

O VISCACHA desenvolveu, portanto, um nicho observacional muito específico e, até então, único: investigar individualmente centenas de aglomerados estelares nas Nuvens de Magalhães e resolver suas estrelas, especialmente nas regiões centrais mais densas. Atualmente, nenhum outro levantamento é capaz de alcançar o ní-

Ao lado

Fundadores do projeto VISCACHA. Na foto superior, da esquerda para a direita: Bruno Dias (atual líder, UNAB, Chile), Francisco Maia (UFRJ, Brasil) e João Francisco C. Santos Jr. (UFMG, Brasil), na área interna do telescópio SOAR. Na foto inferior, Leandro Kerber (UESC, Brasil) em frente ao telescópio SOAR, com o telescópio Gemini Sul ao fundo (Crédito: Arquivo pessoal de Bruno Dias e Leandro Kerber).



vel de precisão com profundidade fotométrica e grande quantidade de aglomerados nestas galáxias vizinhas.

O nome VISCACHA foi escolhido para destacar as raízes brasileiras do projeto e sua conexão com o Chile, onde está localizado o SOAR, além de fazer referência a nomes indígenas associados às Nuvens de Magalhães. O acrônimo VISCACHA vem de “*Visible Soar photometry of star Clusters in Tapi'i HuguA*”, combinando as versões em tupi-guarani dos nomes da Grande (Tapi'i HuguA, “bebedouro da anta”) e da Pequena (Coxi HuguA, “bebedouro do porco-do-mato”) Nuvem de Magalhães. Além disso, VISCACHA remete à vizcacha, um roedor semelhante a um coelho encontrado no Cerro Pachón, onde estão localizados os telescópios SOAR e Gemini Sul.

A colaboração VISCACHA

O VISCACHA não é apenas um projeto científico; é também um enorme esforço de colaboração. O que começou com um pequeno grupo de astrônomos brasileiros gradualmente se transformou em uma grande colaboração internacional, envolvendo pesquisadores de diversos países e resultando na publicação de artigos científicos, na formação de capital humano avançado, no desenvolvimento de software, no lançamento de catálogos, na produção de comunicados de imprensa e na



Acima

Parte da colaboração VISCACHA em frente ao telescópio SOAR (Crédito: Bruno Dias).

realização de palestras convidadas, proporcionando visibilidade internacional ao projeto e às pessoas e instituições envolvidas. O projeto cresceu e gerou sinergias com outros projetos internacionais, como DELVE, SDSS-V e Roman, além de observações de seguimento com espectroscopia no Observatório Gemini Sul.

A principal campanha observacional com o SAM foi concluída em 2026, após um total de 12 anos. Ao longo de todos esses anos, foi inestimável o suporte dos operadores e cientistas do telescópio SOAR e do LNA, que contribuíram para o sucesso do VISCACHA.

Durante esse período inicial, a colaboração acumulou aproxima-

damente: 700 horas de observações no telescópio SOAR; 130 horas de observações no telescópio Gemini Sul; mais de 330 aglomerados estelares observados com o SOAR e 40 com o Gemini Sul; cerca de 16.000 imagens individuais; mais de 300 GB de dados observacionais; cerca de 50 pesquisadores em 10 países; formação de mais de 20 estudantes; mais de 15 artigos publicados; 3 dissertações de mestrado concluídas (UFMG e UFRJ, Brasil); 6 teses de doutorado concluídas (USP e UFMG, Brasil, e UNAB, Chile); 2 catálogos publicados; 1 software publicado (SI-ESTA); e o trabalho continua...

Mas os números, por si só, não explicam por que o VISCACHA é importante para o estudo das Nu-

vens de Magalhães. O verdadeiro valor científico do levantamento está nas descobertas que essas observações permitiram realizar. A seguir mostramos três descobertas recentes.

Uma fusão de galáxias há 6 bilhões de anos

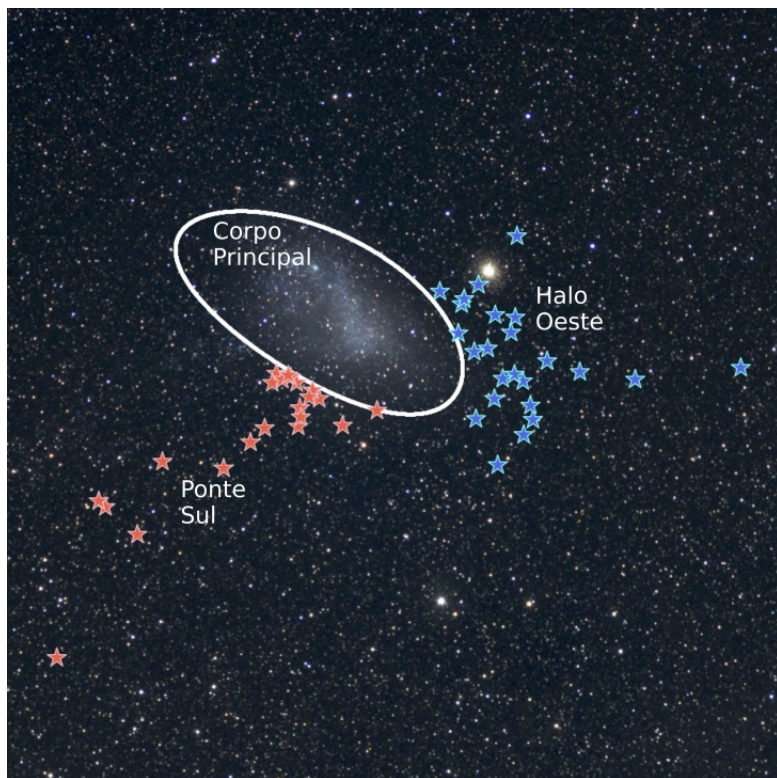
Um dos resultados mais surpreendentes do VISCACHA diz respeito à Pequena Nuvem de Magalhães. Os astrônomos podem estimar a idade e a composição química dos aglomerados estelares comparando suas estrelas observadas com modelos teóricos de evolução estelar. Quando as medidas do VISCACHA para aglomerados localizados em diferentes regiões da SMC foram combinadas, surgiu um padrão até então desconhecido.

Os aglomerados estelares de algumas regiões apresentavam uma relação muito coerente entre idade e composição química, no sentido de que, quanto mais jovem o aglomerado, maior a metalicidade (a fração de elementos químicos mais pesados que o hidrogênio e o hélio). Entretanto, a história particular das regiões do Halo Oeste e da Ponte Sul incluía uma queda acentuada na metalicidade há aproximadamente 6 bilhões de anos.

Para explicar esse padrão, os modelos de evolução química exigem que uma grande quantidade de gás relativamente pouco enriquecido quimicamente tenha en-

Abaixo

Vista da SMC, destacando três regiões. As posições dos aglomerados que levaram à descoberta da fusão estão indicadas (Crédito da imagem de fundo: Mellinger).



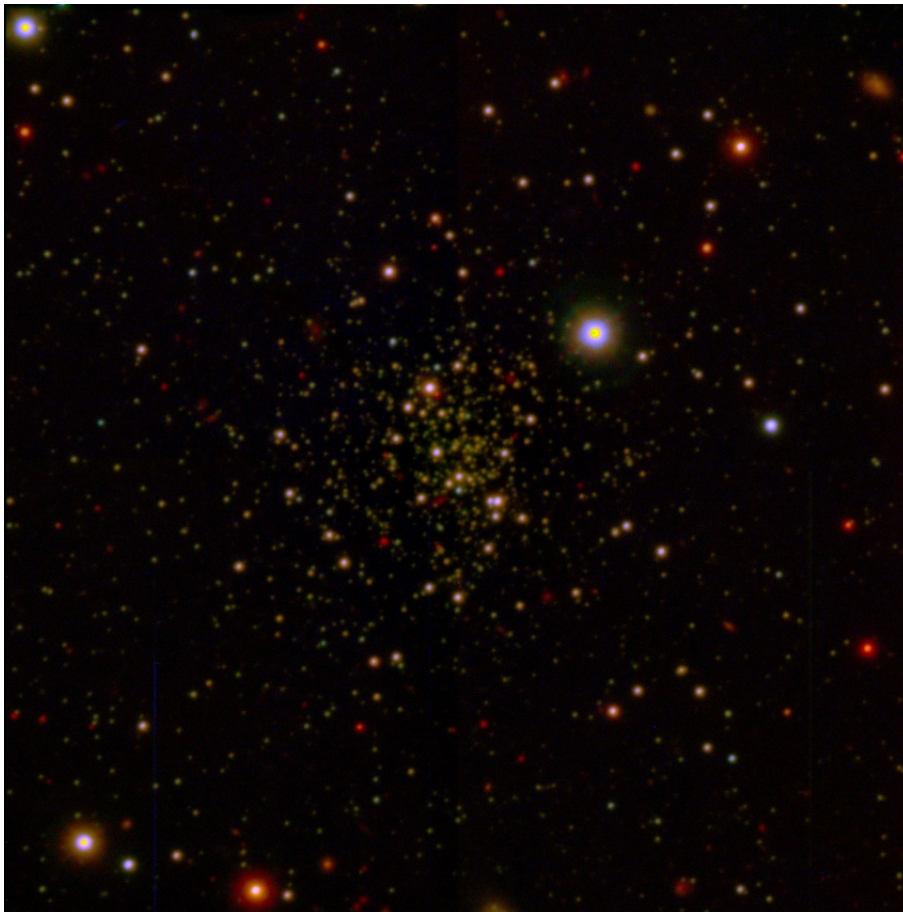
trado no sistema. A quantidade necessária é enorme: aproximadamente 100 milhões de vezes a massa do Sol.

A interpretação é que a Pequena Nuvem de Magalhães que vemos hoje pode ser o resultado da fusão entre duas galáxias menores, ocorrida aproximadamente 6 bilhões de anos atrás. Essa é uma conclusão extraordinária, porque significa que a SMC pode não ter sido sempre uma galáxia única, como a que vemos atualmente. Esta é uma excelente demonstração de que a determinação de idades e metalicidades de aglomerados de forma precisa e cri-

teriosa pode levar a conclusões muito fortes sobre a evolução de sua galáxia anfitriã.

Essa interpretação abre novas perguntas muito interessantes. Por exemplo: se a fusão ocorreu há 6 bilhões de anos, por que ainda conseguimos observar sinais desse evento hoje? A resposta ainda não é completamente conhecida. Os astrônomos agora precisam desenvolver modelos dinâmicos detalhados para determinar se as estruturas observadas poderiam preservar a memória de um evento tão antigo.

Esse é um dos aspectos mais interessantes da ciência: uma des-



Ao lado
O intruso SL2 (Crédito:
VISCACHA).

coberta não necessariamente encerra uma questão. Às vezes, ela cria outras perguntas muito interessantes e mais profundas.

SL2, um intruso na Grande Nuvem de Magalhães

A Grande Nuvem de Magalhães possui uma população intrigante de aglomerados estelares conhecida como “aglomerados da lacuna de idade” (do inglês, “*age-gap clusters*”).

A LMC formou estrelas de forma contínua durante toda a sua existência, mas algo curioso é observado no caso dos aglomerados estelares. Existem muitos aglomerados com aproximadamente mais de 10 bilhões de anos ou mais

jovens que aproximadamente 4 bilhões de anos. Pouquíssimos aglomerados parecem ter se formado durante o período intermediário, que chamamos de lacuna de idade.

A pergunta natural é: por que isso ocorreu? Ainda não existe consenso na literatura científica, mas as observações recentes do VISCACHA forneceram uma nova pista importante.

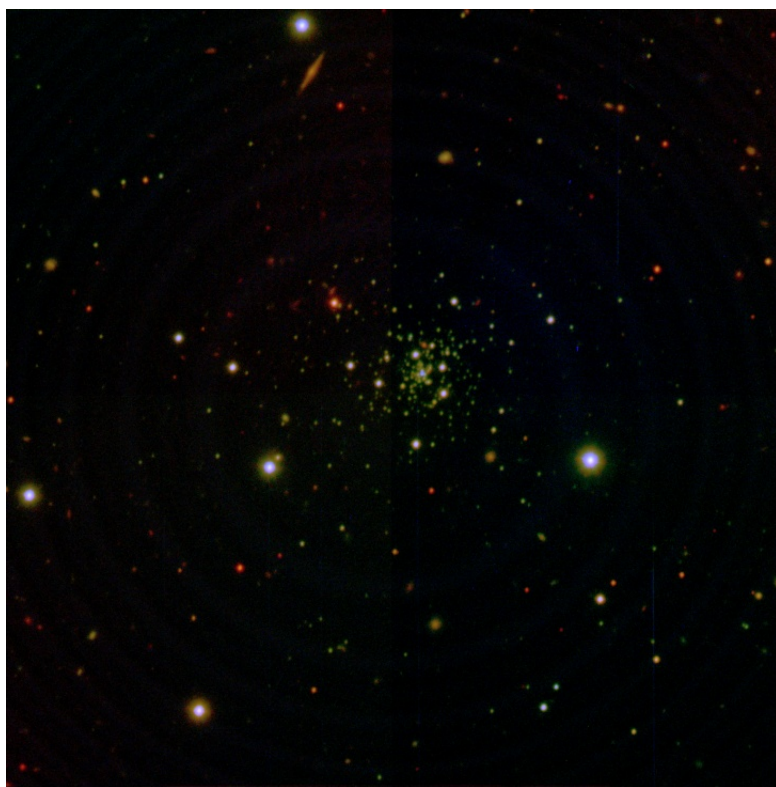
O levantamento descobriu que o aglomerado SL2 está na lacuna de idade. Ele é particularmente interessante porque está localizado na periferia oeste da LMC, justamente na direção da SMC, em uma região associada à Ponte de Magalhães. Mais importante ainda, sua idade e composição química são mais compatíveis com aglomerados associados à SMC do que com a população típica da LMC.

Isso sugere que SL2 pode não ter-se formado originalmente na LMC. Em vez disso, ele pode ter sido capturado da SMC. Se essa interpretação for confirmada, SL2 será uma evidência de que as interações entre as duas Nuvens de Magalhães podem transferir fisicamente aglomerados estelares de uma galáxia para outra. Isso também levanta uma possibilidade mais ampla: talvez pelo menos parte dos misteriosos aglomerados da lacuna de idade da LMC sejam, na realidade, imigrantes provenientes da SMC.

A resposta ainda não é defini-

Abaixo

Aglomerado AM3 evaporando (Crédito: VISCACHA).



tiva, mas o VISCACHA transformou uma possibilidade teórica interessante em um problema observacional concreto que pode ser testado com novos dados.

Aglomerados estelares em processo de evaporação

Os aglomerados estelares não são estruturas permanentes. Eles podem perder estrelas lentamente.

Dentro de um aglomerado, as estrelas interagem continuamente por meio da gravidade. Ao longo de períodos muito longos, essas interações podem fazer com que algumas estrelas de menor massa se movam em direção às regiões externas e, eventualmente, escapem do aglomerado. Essa perda gradual de estrelas é conhecida como “evaporação”.

Forças gravitacionais externas podem acelerar esse processo. A interação entre a LMC, a SMC e a Via Láctea pode modificar o ambiente gravitacional ao redor de um aglomerado e facilitar o processo de evaporação nas regiões externas dos aglomerados.

O VISCACHA identificou pelo menos um exemplo particularmente interessante: o aglomerado chamado AM3, que possui uma idade intermediária de aproximadamente 5 bilhões de anos e é relativamente pouco massivo. Sua população de estrelas de baixa massa é muito menor do que o esperado. O resultado é consistente com a hipótese de que o AM3

já tenha perdido uma quantidade significativa de suas estrelas de baixa massa.

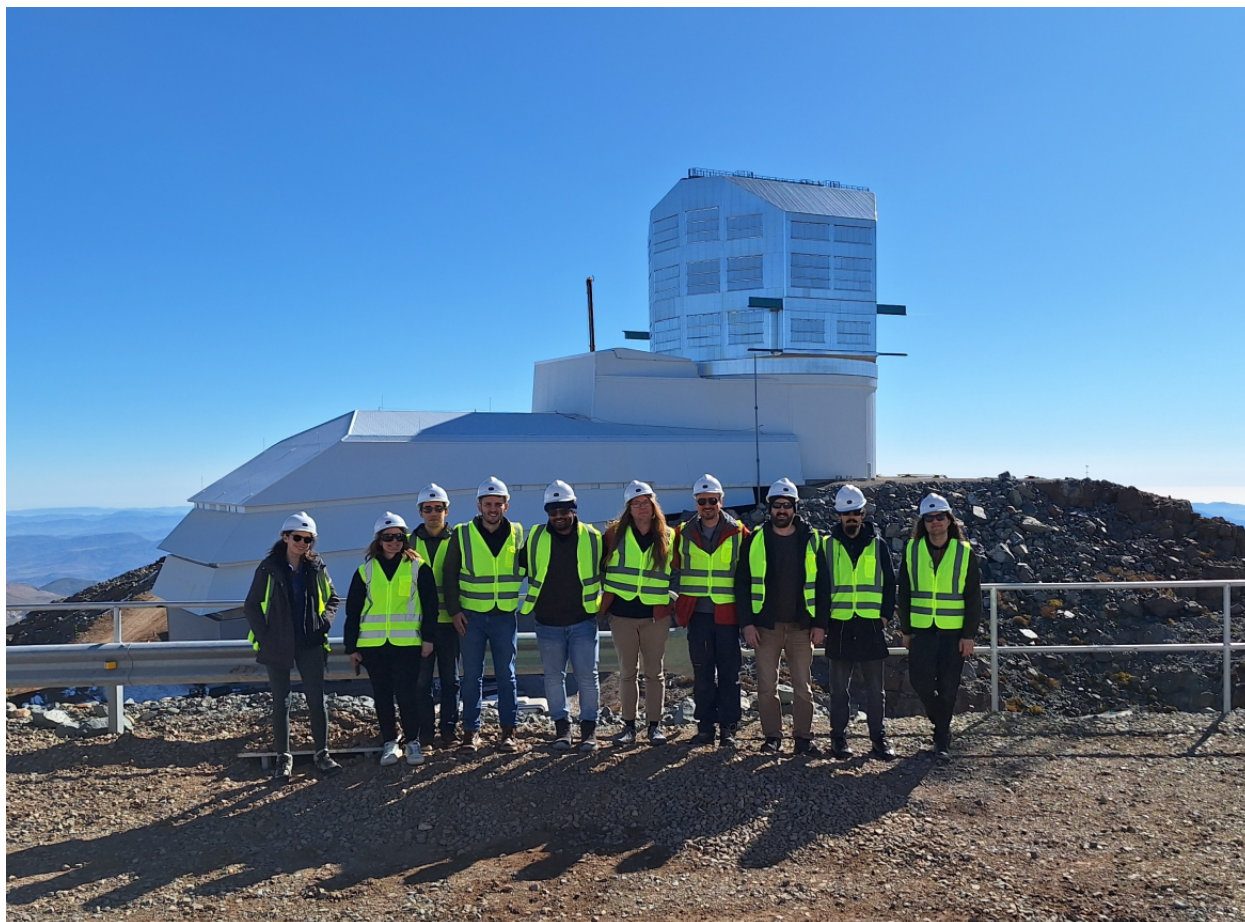
Isso é importante porque oferece aos astrônomos a oportunidade de observar a evolução de um aglomerado acontecendo diante de nós. Em vez de estudar apenas aglomerados no início ou no final de suas vidas, podemos procurar sistemas que estejam atualmente passando por um processo de transformação.

Observações futuras com outros instrumentos, incluindo o Observatório Vera C. Rubin e levantamentos espectroscópicos, poderão revelar para onde foram essas estrelas que escaparam. Elas podem formar um halo estelar ao redor do aglomerado ou até mesmo uma corrente estelar que se estende pela galáxia.

Entender esse processo também pode ajudar a explicar outro mistério mencionado anteriormente: por que a LMC possui tão poucos aglomerados na lacuna de idade entre aproximadamente 4 e 10 bilhões de anos. Talvez alguns desses aglomerados tenham se formado, mas tenham evaporado gradualmente e já não sejam observados hoje.

Olhando para o futuro

O VISCACHA já demonstrou quanto podemos aprender ao resolver estrelas individuais em aglomerados estelares, mas o projeto é apenas uma parte de um esforço científico muito maior. O pró-



Acima

Alguns membros da colaboração VISCACHA na visita ao Rubin por ocasião do V VISCACHA & friends meeting em 2024 (Crédito: Bruno Dias).

ximo passo é combinar a fotometria de alta resolução do VISCACHA com outros conjuntos de dados poderosos que complementem sua base de dados.

Levantamentos espectroscópicos, como o SDSS-V/LVM, podem fornecer informações sobre a com-

posição química e os movimentos das estrelas. O Observatório Vera C. Rubin observará repetidamente o céu do hemisfério sul, alcançando regiões muito mais profundas do que muitos levantamentos anteriores e potencialmente revelando estrelas que escaparam de aglomerados em dissolução. A missão Gaia fornecerá medições precisas dos movimentos estelares, enquanto futuros observatórios espaciais, como o Telescópio Espacial Nancy Grace Roman, da NASA, oferecerão resolução e profundidade excepcionais para grandes regiões das Nuvens de Magalhães.

Para saber mais

Informação sobre o projeto, time, produtos

<http://www.astro.iag.usp.br/~viscacha/>

Leitura complementar

Kerber, L., & Dias, B. 2025, *Nuvens de Magalhães — Peças-chaves no quebra-cabeça cósmico*, Revista Brasileira de Astronomia (ISSN 2764-9423), v. 27, pp. 27-39

Juntas, essas observações podem transformar as Nuvens de Magalhães em um laboratório tridimensional. Poderemos perguntar não apenas onde estão suas estrelas, mas também como elas se movimentam, quando se formaram, do que são feitas e como suas galáxias mudaram ao longo de bilhões de anos.

A história do VISCACHA também ilustra algo fundamental sobre a ciência. Grandes descobertas nem sempre surgem da construção do maior telescópio ou da coleta do maior conjunto de dados. Às vezes, elas surgem de uma pergunta precisa, do desenvolvimento da técnica observacional adequada e da união de pessoas com diferentes conhecimentos e experiências trabalhando em equipe.

As Nuvens de Magalhães vêm evoluindo há bilhões de anos, sofrendo uma verdadeira metamorfose devido às interações entre elas, com a Via Láctea e, possivelmente, com uma população de galáxias menores que orbitam a LMC. Nossa tarefa, como cientistas, é reconstruir sua história a partir das evidências que elas deixaram para trás e extrapolar esse conhecimento para o caso de galáxias mais distantes, que não podem ser observadas com o mesmo nível de detalhe que nossas vizinhas LMC e SMC.

E o VISCACHA está nos ajudando a ler essa história — um aglomerado estelar de cada vez •



Bruno Dias
Universidad Andrés Bello
bruno.dias@unab.cl

Leandro Kerber
Univ. Estadual de Santa Cruz
lokerber@uesc.br

Francisco Maia
Univ. Fed. do Rio de Janeiro
ffsmaia@if.ufrj.br

João Francisco C. Santos Jr.
Univ. Fed. de Minas Gerais
jfcsj@ufmg.br



ASTRI, CTAO e o brilho do Universo extremo

Raios gama não chegam ao solo. Ainda assim, deixam na atmosfera um clarão azulado de poucos nanossegundos, breve demais para nossos olhos, mas não para as câmeras de telescópios especiais. Explicamos como essa técnica funciona e que perguntas o ASTRI Mini-Array e o CTAO pretendem responder.

Antes de encontrar a Terra, um único fóton gama pode ter cruzado a Via Láctea ou viajado por bilhões de anos desde uma galáxia distante. Nas camadas mais altas da atmosfera, sua trajetória termina, mas a energia que carregava dá origem a uma cascata de partículas e a um clarão azulado de poucos nanossegundos. A comparação entre as imagens desse clarão registradas por diferentes telescópios permite esti-

mar de onde o fóton veio e quanta energia carregava. Do ASTRI Mini-Array, em Tenerife, ao CTAO-Sul, no Atacama, essa técnica ganha alcance e precisão.

Uma luz que não chega ao solo

Um telescópio Cherenkov nunca vê diretamente o raio gama que procura. Quando o fóton alcança as camadas mais altas da atmosfera, interage com o ar e é absorvido. Sua energia, no en-

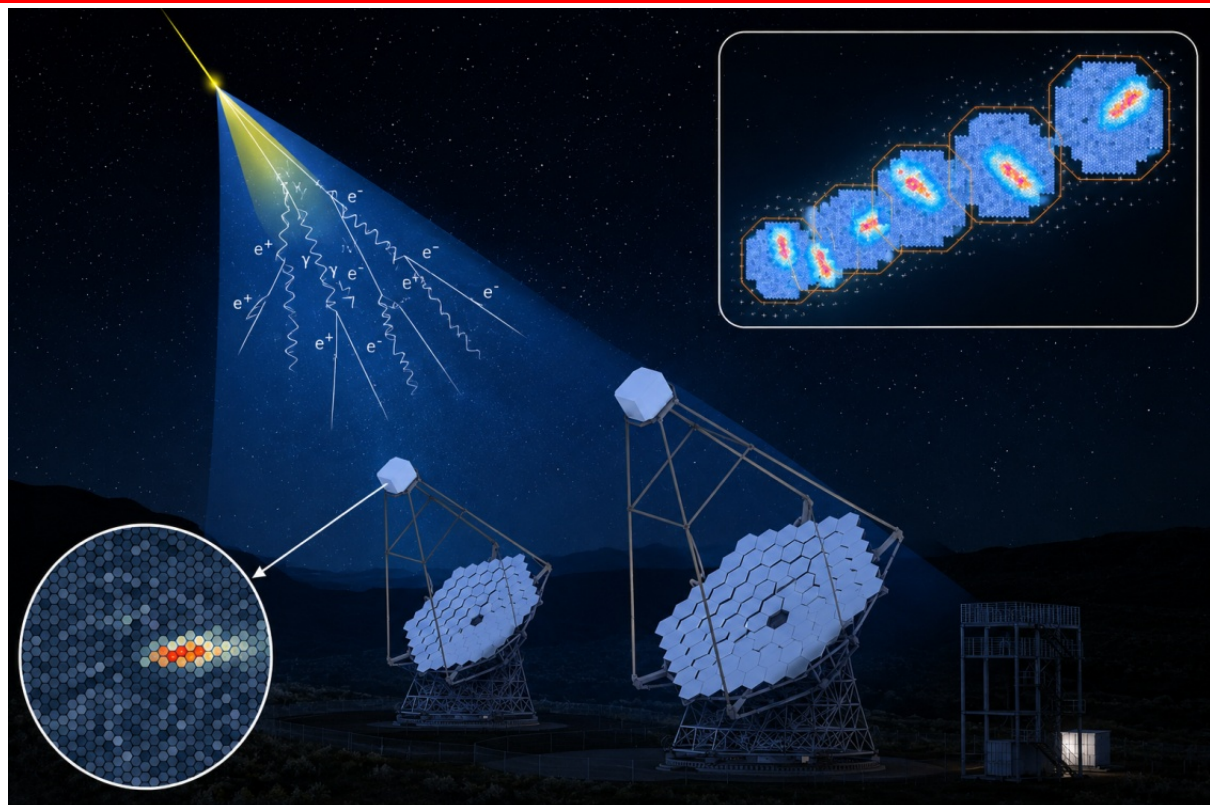
tanto, desencadeia uma cascata de partículas que avança em direção ao solo e produz um lampejo azulado. É essa marca, e não o fóton original, que os telescópios registram. O céu em raios gama é muito diferente daquele que vemos à noite. As estrelas comuns praticamente desaparecem, enquanto se destacam regiões próximas a buracos negros, pulsares, remanescentes de supernovas e explosões cósmicas: laboratórios naturais em que matéria, campos magnéticos e radiação alcançam con-

dições extremas. Como a atmosfera absorve essa radiação, os astrônomos encontraram uma maneira engenhosa de transformar essa barreira em parte do detector.

A cascata começa quando o fóton gama transfere sua energia para partículas eletricamente carregadas, que interagem com o ar e produzem outras partículas, multiplicando o processo. Em pouquíssimo tempo, forma-se um chuveiro atmosférico que avança em direção ao solo. Algumas das par-

Na página anterior
Via Láctea (Crédito: Daniel López/IAC).

Como a atmosfera se torna um detector?



1. Interação: o raio gama atinge a atmosfera e inicia uma cascata de partículas. 2. Lampejo: partículas eletricamente carregadas produzem um breve clarão de luz Cherenkov. 3. Registro: câmeras instaladas em telescópios de posições diferentes captam o mesmo evento. 4. Reconstrução: a comparação entre as imagens permite estimar a direção e a energia do raio gama que iniciou a cascata (Crédito: imagens adaptadas de Cherenkov Telescope Array Observatory).

Quanta energia cabe em 1 TeV?

UM ÚNICO FÓTON

1 TeV
= 10^{12} eV

Cerca de **500 bilhões de vezes** a energia de um fóton típico de luz visível.

DA LUZ VISÍVEL AOS RAIOS GAMA

Cada passo multiplica a energia por mil.



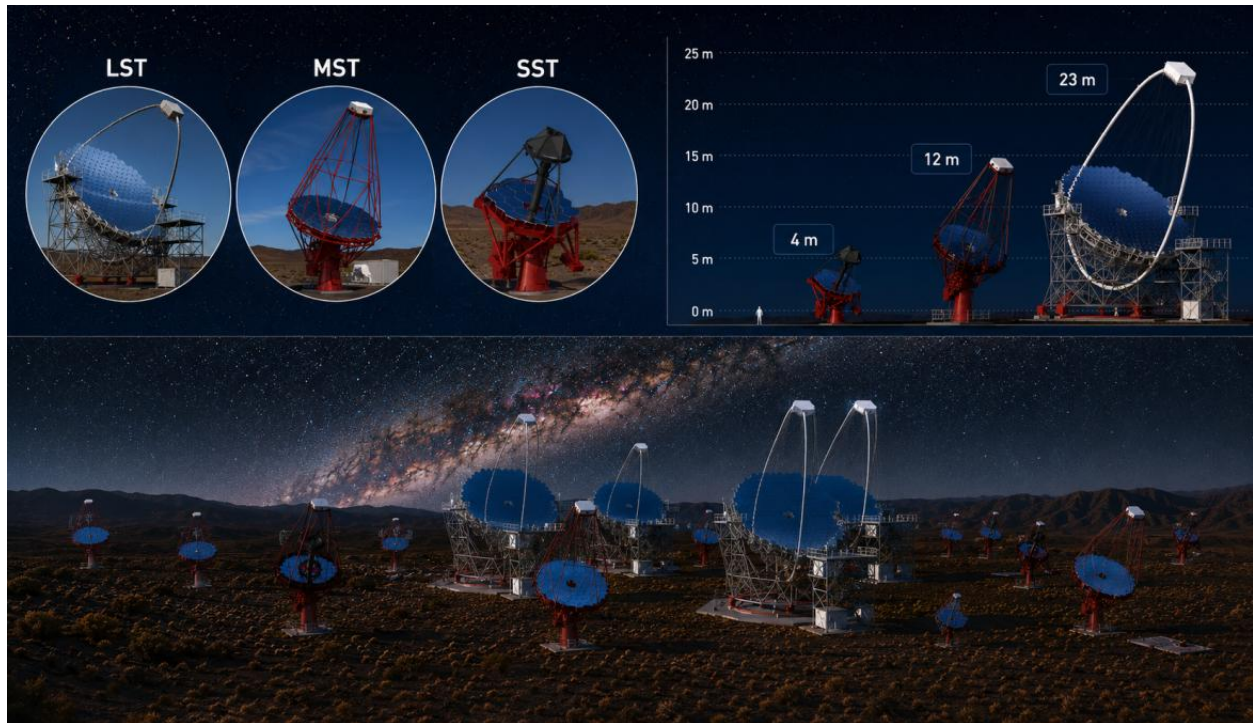
tículas carregadas desse chuveiro atravessam o ar mais rápido do que a luz se propaga nesse meio. Isso não contraria a relatividade: a velocidade da luz no vácuo continua sendo a máxima permitida pelas leis da Física, mas no ar a luz se desloca um pouco mais devagar. As moléculas da atmosfera excitadas por essas partículas superluminais produzem um cone azulado conhecido como luz Cherenkov. O clarão dura apenas alguns nanossegundos e aparece na câmera como uma imagem alongada, cujo brilho e formato dependem de como a cascata se desenvolveu.

Um único telescópio registra apenas uma perspectiva do evento. Quando vários observam a mesma cascata de posições diferentes, cada um produz uma imagem ligeiramente distinta, como nossos dois olhos, cujas perspectivas o cérebro combina para perceber a profundidade. A comparação entre as imagens permite estimar a direção e a energia do raio gama que iniciou o evento. É com essa técnica que observatórios como H.E.S.S., MAGIC e VERITAS produzem mapas do céu de muito alta energia, com catálo-

gos de centenas de fontes na Via Láctea e em outras galáxias. Cada nova detecção, porém, traz perguntas que os instrumentos atuais nem sempre conseguem responder: em regiões complexas da Galáxia, emissões de objetos diferentes aparecem misturadas; fenômenos transientes desaparecem antes de serem observados em detalhe; nas energias mais altas, os eventos se tornam cada vez mais raros. Responder a essas perguntas exigia observar uma área maior, reagir rapidamente ao inesperado e reconstruir cada evento com mais precisão. Era preciso levar a técnica a uma nova escala.

O salto de escala do ASTRI Mini-Array e do CTAO

Se todos os raios gama produzissem o mesmo tipo de clarão, bastaria construir um telescópio maior. A energia do fóton, porém, muda o sinal que chega ao solo. Nas energias mais baixas, o lampejo é fraco e difícil de registrar. Nas mais altas, as cascatas são mais intensas, mas os eventos se tornam muito mais raros. O Cherenkov Telescope Array Observatory, o CTAO, foi planejado para respon-



der a esse contraste. Em vez de um único modelo de telescópio, o observatório combinará dezenas de instrumentos de três tamanhos em dois sítios. O sítio norte, no Observatório Roque de los Muchachos, em La Palma, favorece a observação de fontes fora da Via Láctea, como núcleos ativos de galáxias e explosões de raios gama. O sítio sul, em construção na região de Paranal, no Chile, terá acesso privilegiado ao centro da Galáxia e a grande parte do plano galáctico. Juntos, cobrirão energias de dezenas de gigaelétron-volts a centenas de teraelétron-volts. Nenhum desenho de telescópio trabalha com a mesma eficiência em toda essa faixa. Na de menor energia operam os telescópios grandes, os LSTs, com espelhos de 23 m de diâmetro, capazes de coletar a

pouca luz dos lampejos mais fracos e de mudar rapidamente de direção ao receber um alerta. Os telescópios médios, os MSTs, de 12 m, cobrem a região intermediária, na qual muitas fontes conhecidas emitem com maior intensidade. Na faixa de maior energia operam os telescópios pequenos, os SSTs, com cerca de 4 m de diâmetro. Nessas energias as cascatas produzem luz suficiente para espelhos menores, mas os eventos são raros: espalhar muitos SSTs por uma área extensa aumenta a chance de registrá-los. Na configuração Alpha, o CTAO-Norte terá quatro LSTs e nove MSTs (20 GeV a 50 TeV); o CTAO-Sul terá 14 MSTs e 37 SSTs, distribuídos por cerca de 3 km² (80 GeV a 300 TeV), com os primeiros dados previstos a partir de 2030. Os SSTs a-

Acima
O CTAO utilizará telescópios de diferentes tamanhos para observar uma ampla faixa de energias. No painel inferior, concepção artística do sítio Sul, no Paranal, Chile. Acima, imagens das três classes de telescópios do observatório: o LST com espelho de 23 m de diâmetro, o MST com 12 m de diâmetro, e o SST com cerca de 4 m de diâmetro (Créditos: adaptada de Gabriel Pérez Díaz/IAC, Marc-André Besel/CTAO, ESO e N. Risinger).



Acima

O ASTRI Mini-Array no Observatorio del Teide, em Tenerife. A geometria do conjunto permite observar uma mesma cascata atmosférica de diferentes perspectivas. (Crédito: ASTRO Collaboraion).

Abaixo

A unidade ASTRI 1, e seu sistema óptico de dois espelhos. (Crédito: ASTRO Collaboraion).



dotam a tecnologia do projeto ASTRI, cujo arranjo precursor de nove telescópios, o ASTRI Mini-Array, já observa o céu a partir de Tenerife.

Para entender o salto em qualidade, imagine uma região da Via Láctea que hoje aparece como uma única mancha de emissão, na qual coexistem um remanescente de supernova, uma nebulosa alimentada por um pulsar, um aglomerado de estrelas massivas e nuvens de gás. Com maior sensibilidade e resolução angular, o CTAO poderá distinguir estruturas que os instrumentos atuais enxergam misturadas. Identificar qual

delas produz os raios gama, porém, será apenas o primeiro passo. Para compreender o fenômeno, os astrônomos combinam a posição da fonte, a forma da emissão (compacta ou extensa), o espectro (como a intensidade muda com a energia) e a variabilidade (se a fonte muda em minutos, horas ou anos). Nenhuma dessas pistas conta a história completa sozinha; em conjunto, elas permitem identificar quais partículas estão envolvidas e quais mecanismos são capazes de acelerá-las a energias extremas. O salto do CTAO estará em transformar essas observações em uma ferramenta para reconstruir os ambientes e os processos responsáveis por alguns dos aceleradores de partículas mais extremos do Universo.

De Tenerife a Atacama: o ASTRI Mini-Array

ASTRI é a sigla italiana de *Astrofisica con Specchi a Tecnologia Replicante Italiana*, uma referência à tecnologia empregada na produção de seus espelhos. Concebido como um conjunto de nove te-

lescópios Cherenkov instalados no Observatorio del Teide, em Tenerife, o projeto reúne instituições da Itália, do Brasil, da Espanha e da África do Sul. Desde junho de 2026, as estruturas dos nove telescópios estão instaladas; três delas já operam com câmeras Cherenkov e iniciaram as primeiras observações estereoscópicas. Os telescópios ASTRI são facilmente reconhecidos pela estrutura vermelha e pelo sistema de espelho duplo, baseado na configuração óptica Schwarzschild–Couder, utilizada de forma pioneira em telescópios Cherenkov. A combinação dos dois espelhos corrige distorções longe do centro da imagem e permite o uso de uma câmera menor e mais compacta, preservando imagens nítidas em uma ampla região do céu. Esse grande campo de visão — superior a 100 graus quadrados — favorece tanto o estudo de fontes extensas quanto a observação de regiões da Via Láctea onde diferentes objetos aparecem muito próximos uns dos outros, além de aumentar a chance de capturar fenômenos inesperados. O ASTRI Mini-Array é um precursor do CTAO, e sua tecnologia foi escolhida para os 37 SSTs em construção para o observatório no Chile. Longe de ser apenas uma versão reduzida do futuro CTAO, porém, ele será um observatório de raios gama com programa científico próprio. Um de seus grandes objetivos é investigar a origem dos raios cósmicos

de energia extrema e, em particular, os chamados PeVatrons: aceleradores cósmicos capazes de levar partículas a energias da ordem de petaelétron-volts. Fontes que emitem raios gama nessas energias já foram reveladas por observatórios como o LHAASO, mas a natureza de vários desses objetos e os mecanismos responsáveis pela aceleração permanecem um mistério. Com sensibilidade, resolução angular e campo de visão jamais alcançados nessas energias, o ASTRI poderá estudar esses aceleradores e regiões complexas como o centro da Galáxia e o plano galáctico, além de microquasares, sistemas binários, fontes extragalácticas e fenômenos transientes. Combinadas a dados em outras frequências e a outros mensageiros cósmicos, como neutrinos e ondas gravitacionais, essas observações abrirão, antes mesmo da entrada em operação do CTAO completo, uma nova janela para estudar onde e como o Universo acelera partículas às energias mais extremas conhecidas.

O que queremos descobrir

Onde estão os aceleradores cósmicos? Raios cósmicos são partículas muito energéticas, principalmente prótons e núcleos atômicos. Como possuem carga elétrica, suas trajetórias são desviadas pelos campos magnéticos da Galáxia e, ao chegar à Terra, já não apontam para onde foram acelera-

dos. Os raios gama, sem carga, viajam em linha reta e preservam a direção da região onde foram produzidos: encontrar uma fonte emissora permite localizar um possível acelerador cósmico. Ainda assim, elétrons, prótons e núcleos podem produzir raios gama por mecanismos diferentes, e identificar a fonte não revela imediatamente quais partículas estão envolvidas. Nas energias mais altas, experimentos de amplo campo como HAWC e LHAASO detectaram fontes que emitem fótons com dezenas ou centenas de teraelétron-volts, fortalecendo a busca pelos PeVatrons, aceleradores naturais capazes de levar partículas a 10^{15} elétron-volts, isto é, 1000 TeV. A detecção de um fóton próximo de 100 TeV não demonstra sozinha que a fonte seja um PeVatron, mas indica que partículas ainda mais energéticas participaram de sua produção. O ASTRI Mini-Array, desenhado para produzir imagens e espectros detalhados justamente no domínio dos TeVs, complementará esses levantamentos, e o CTAO-Sul ampliará essa capacidade com seus 37 SSTs. O objetivo não é apenas “achar PeVatrons”, mas identificar os processos físicos, combinando morfologia, espectro, ambiente e observações em outras faixas.

Como o céu extremo muda? O céu de raios gama não permanece constante. Algumas fontes mudam de brilho em minutos ou menos, si-

nal de que a emissão vem de uma região compacta ou de matéria que se desloca a velocidades próximas à da luz. Os blazares reúnem essas condições: são núcleos ativos de galáxias cujos jatos relativísticos, alimentados por um buraco negro supermassivo, apontam aproximadamente em nossa direção. Acompanhar um surto ajuda a investigar onde as partículas ganham energia e como ela se propaga pelo jato. Nesse tipo de observação, chegar atrasado pode significar perder o fenômeno. Explosões de raios gama, surtos em blazares e possíveis contrapartidas de neutrinos ou ondas gravitacionais surgem sem aviso. Por isso, o CTAO receberá alertas de outros observatórios e poderá reposicionar seus telescópios enquanto o céu ainda está mudando. O CTAO e o ASTRI Mini-Array foram concebidos para integrar essa rede multimensageira de alertas e observações de seguimento, em que fótons, neutrinos e ondas gravitacionais são combinados para reconstruir o mesmo fenômeno.

Que física pode ser testada? Um raio gama carrega informações não apenas sobre sua fonte, mas também sobre o caminho percorrido. Ao longo de bilhões de anos, fótons muito energéticos encontram a luz tênue acumulada por estrelas e galáxias e podem desaparecer, dando origem a um elétron e um pósitron. A marca des-

Três perguntas para o universo extremo**01 ACCELERADORES CÓSMICOS**

Onde estão os objetos da Via Láctea capazes de acelerar partículas até energias da ordem de petaeletrôn-volts?

02 UM CÉU VARIÁVEL

Como buracos negros e explosões cósmicas liberam tanta energia em tão pouco tempo?

03 FÍSICA FUNDAMENTAL

O que os raios gama podem revelar sobre a matéria escura e os limites das teorias atuais?

se processo no espectro permite investigar a transparência do Universo e a luz produzida por gerações anteriores de estrelas e galáxias. As observações também podem procurar sinais previstos por modelos de matéria escura no centro da Via Láctea e em galáxias anãs próximas, que podem concentrar grandes quantidades dessa matéria. Uma emissão nessas regiões, contudo, não demonstraria sua existência, pois fontes astrofísicas conhecidas também produzem radiação de alta energia. As resoluções angular e energética do CTAO permitirão procurar características espectrais compatíveis com a aniquilação ou o decaimento de partículas de matéria escura, mas uma eventual detecção exigiria testes rigorosos contra explicações alternativas e confirmação independente. A detecção de raios gama pode ir ainda mais longe e testar as próprias leis fundamentais da física. Durante um surto de uma fonte distante, a comparação entre os tempos de chegada de fótons de diferentes energias permite procurar diferenças mínimas em sua propagação, acumuladas ao longo de bilhões de anos. Um atraso dependente da e-

nergia poderia indicar uma violação da invariância de Lorentz, ou seja, da constância da velocidade da luz no vácuo prevista pela relatividade — desde que se descartem atrasos produzidos na própria fonte ou por efeitos instrumentais. Esse é o poder e também a dificuldade da astronomia de raios gama: os dados reúnem efeitos produzidos na fonte, durante a viagem dos fótons e no próprio instrumento. O avanço virá de populações de fontes, observações repetidas, campanhas coordenadas e descobertas que hoje não sabemos antecipar. É por isso que participar da construção e do início da operação desses equipamentos é tão importante — tema que será tratado no segundo artigo desta série, no próximo semestre •

S. Adduci Faria
Universidade de São Paulo
stela.faria@usp.br

E. M. de Gouveia Dal Pino
Universidade de São Paulo
dalpino@iag.usp.br

M. V. del Valle
Universidade de São Paulo
delvalle.mariavictoria@gmail.com



Estrelas azuis tardias

Algumas estrelas parecem ter-se rejuvenescido ou evoluído mais lentamente que as demais. Ou será que elas indicam algo mais único em sua evolução?

O diagrama cor-magnitude constitui uma das ferramentas mais fundamentais da astrofísica observacional, estabelecendo a comparação gráfica direta entre o índice de cor e o brilho aparente de uma população estelar. Em 1953, Allan Sandage construiu o primeiro diagrama para o aglomerado globular M3, um sistema situado a cerca de 34 mil anos-luz da Terra, composto por aproximadamente 500 mil estrelas. Seu objetivo principal neste trabalho era medir a idade do aglomerado, hoje estimada em 11,4 bilhões de

anos, e compará-lo a outros aglomerados.

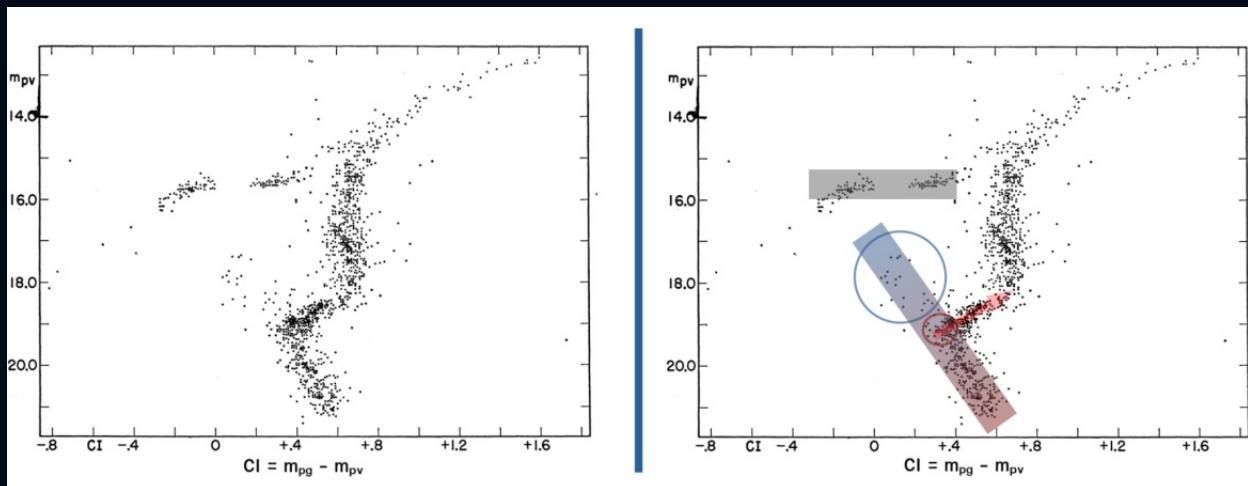
No diagrama, o estágio inicial da evolução estelar é representado pela sequência principal, fase na qual as estrelas fundem hidrogênio em hélio em seus núcleos. À medida que o hidrogênio central se esgota, as estrelas abandonam a sequência principal no chamado ponto de desligamento (*turnoff*), cuja posição é utilizada como indicador direto da idade da população. No entanto, ao analisar o diagrama de M3, Sandage identificou um grupo de objetos situados na extensão superior da sequên-

cia principal, acima do ponto de desligamento. Por apresentarem temperatura e luminosidade superiores às demais estrelas do aglomerado, era nítido que estes objetos já deveriam ter evoluído, então Sandage as denominou de "estrelas anômalas azuis".

Apenas em 1958, ao estudar o aglomerado aberto NGC 7789, Margaret Burbidge introduziu a designação *blue stragglers*. No Brasil, uma das primeiras traduções propostas foi "retardatárias azuis", apresentada por Helio Jaques Ro-

cha-Pinto nos anos 2000. Contudo, para evitar conotações inadequadas ou a ideia ambígua de que tais objetos teriam sido "ultrapassados", aqui adota-se a denominação de *estrelas azuis tardias*, que expressa de forma nítida o seu aparente atraso evolutivo. Essas estrelas não são necessariamente azuis em termos absolutos, são apenas mais quentes e azuis do que o ponto de desligamento da sequência principal do ambiente em que habitam. Em aglomerados globulares, correspondem típica-

Na página anterior
Região central do
aglomerado M 47 (Crédito:
ESO).



Acima

No painel esquerdo podemos ver o diagrama cor-magnitude do aglomerado globular M3, originalmente elaborado por Allan Rex Sandage em 1953. A sigla CI significa "índice de cor", em inglês; trata-se da subtração entre as magnitudes m_{pg} e m_{pV} , que representam o brilho aparente medido por placas fotográficas que são sensíveis à luz mais azul (m_{pg}) e à luz visível (m_{pV}), respectivamente. Estas magnitudes são análogas às magnitudes B e V, do sistema fotométrico Johnson, que são usadas até os dias de hoje. No painel direito temos a identificação de pontos importantes do diagrama para compreender a evolução desta população de estrelas. A região colorida destaca o estágio inicial da evolução estelar, chamado de sequência principal: momento em que as estrelas nascem e brilham por queimar hidrogênio em seus núcleos. O círculo vermelho indica o ponto de desligamento da sequência principal (*turnoff*); ele é usado para estimar a idade desta população de estrelas. A seta vermelha indica a direção que as estrelas tomam ao evoluir e sair da sequência principal. O círculo azul indica a região em que Sandage identificou estrelas anômalas azuis que já deveriam ter deixado a sequência principal. A área cinza mostra a localização do ramo horizontal, estágio avançado da evolução estelar onde as estrelas brilham porque queimam hélio em carbono em seus núcleos..

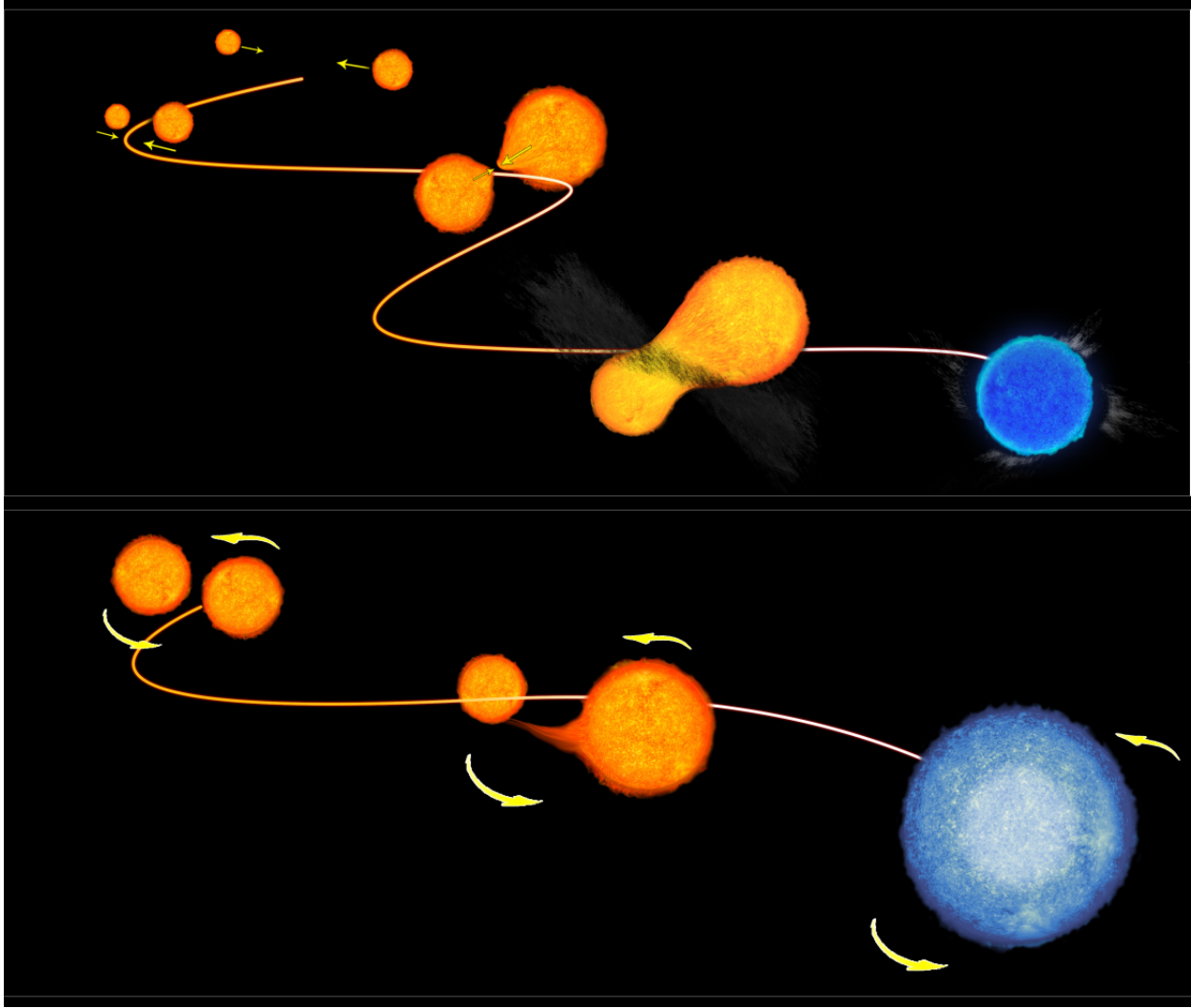
Nesta página

Aglomerado globular M3. Localizado a cerca de 34 mil anos-luz da Terra, o aglomerado reúne aproximadamente 500 mil estrelas com idade estimada em 11,4 bilhões de anos. A saturação de cor foi acentuada para destacar a população azulada; contudo, as estrelas azuis mais brilhantes visíveis no campo correspondem às estrelas do ramo horizontal, cujo brilho supera em cerca de dez vezes o das azuis tardias identificadas por Sandage na extensão da sequência principal (Crédito: NASA, ESA e A. Sarajedini).

mente a estrelas de tipo espectral A ou F, com temperaturas superficiais entre 6500 K e 9000 K.

O surgimento de estrelas mais quentes e massivas na sequência principal de populações velhas

motivou diversas hipóteses. Já em 1955, Fred Hoyle e John Crawford sugeriram, de forma independente, que o fenômeno estaria associado à evolução em sistemas binários. Em 1956, Zdeněk Kopal de-

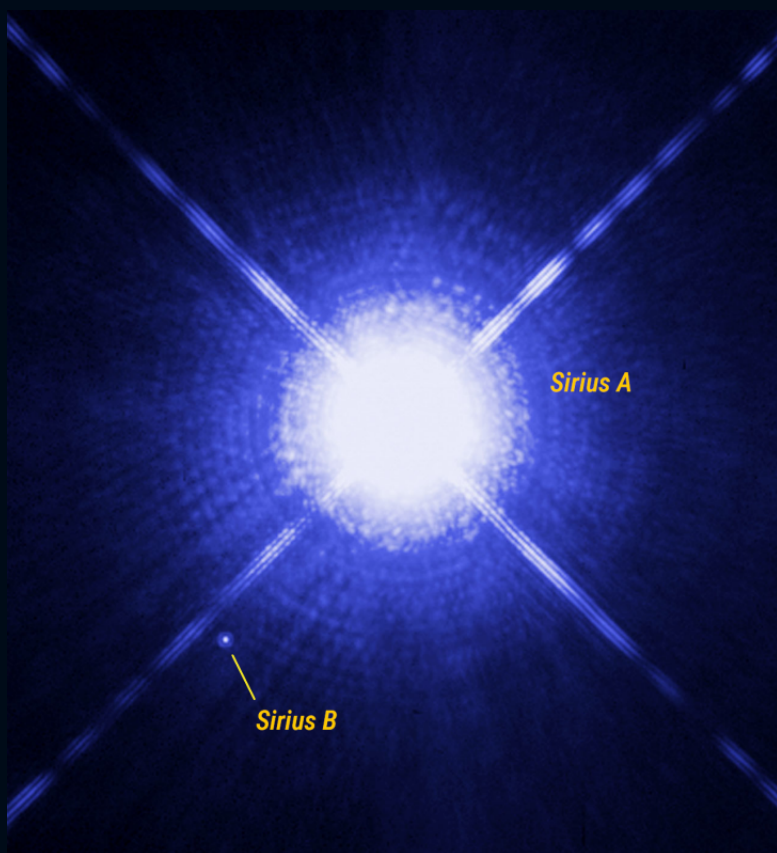


talhou o mecanismo de “transbordamento” do lóbulo de Roche (*Roché Lobe Overflow*), pelo qual a estrela primária, ao evoluir e expandir seu envoltório, transfere massa para a companheira secundária menos evoluída. Em 1964, William McCrea demonstrou teoricamente que esse processo de acreção gera uma estrela receptora “rejuvenescida”, pois se tornará mais massiva e luminosa, fazendo com que o sistema seja observado agora como um único obje-

to aparentemente mais jovem do que a população circundante: uma estrela azul tardia.

Mecanismos alternativos baseados na evolução de estrelas isoladas foram propostos, mas subsequentemente descartados por inconsistência física. A hipótese de mistura interna eficiente de hidrogênio (lançada por Wheeler, em 1979) ou de formação estelar tardia isolada não explicavam por que tais processos ocorreriam seletivamente em apenas uma fra-

Acima
Representação artística de dois processos que criam estrelas azuis tardias. No primeiro caso, há coalescência de duas estrelas em uma estrela única. No segundo caso, há transferência de massa da estrela gigante para uma anã, que modifica a evolução dessa última, fazendo com ela pareça rejuvenescida (Crédito: NASA/ESA).



Ao lado

A estrela mais brilhante do céu noturno: Sirius A (uma estrela de sequência principal, no centro da imagem) e sua companheira compacta (anã branca, no canto inferior esquerdo) Sirius B, que é invisível aos nossos olhos. Sirius não é classificada como uma estrela azul tardia por dois motivos: trata-se de uma estrela até mais jovem do que o Sol e não há ainda um consenso sobre a natureza do seu sistema. Estudos sobre abundância química de Sirius A mostraram que ela tem um enriquecimento químico elevado de elementos específicos e, por conta disso, parece ter recebido material já processado durante os estágios finais da evolução de Sirius B. Outros estudos teóricos que envolvem a dinâmica orbital e as massas das estrelas neste sistema sugerem que elas não tiveram proximidade o suficiente para transferir material entre elas (Crédito: NASA/Hubble).

ção das estrelas de um mesmo aglomerado. Em 1976, J. G. Hills e C. A. Day propuseram outro canal: a colisão direta e fusão de estrelas em ambientes de alta densidade estelar, como os núcleos de aglomerados globulares.

A controvérsia sobre a proporção relativa entre transferência de massa e colisões diretas perdurou por décadas. Contudo, em 2026, um estudo abrangente de aglomerados globulares liderado por Francesco Ferraro demonstrou que a transferência de massa em sistemas binários é o mecanismo mais determinante para a formação das estrelas azuis tardias. O estudo evidenciou que a frequência espe-

cífica desses objetos decresce e se anticorrelaciona significativamente com o aumento da densidade central, da dispersão de velocidade central, do brilho superficial central, da luminosidade total e da idade dinâmica do aglomerado, além de acompanhar diretamente a diminuição da fração global de estrelas binárias nesses ambientes. Em aglomerados globulares muito densos e massivos, os encontros gravitacionais frequentes tendem a romper os sistemas binários progenitores antes que a transferência de massa se conclua, reduzindo a eficiência de formação das estrelas azuis tardias.

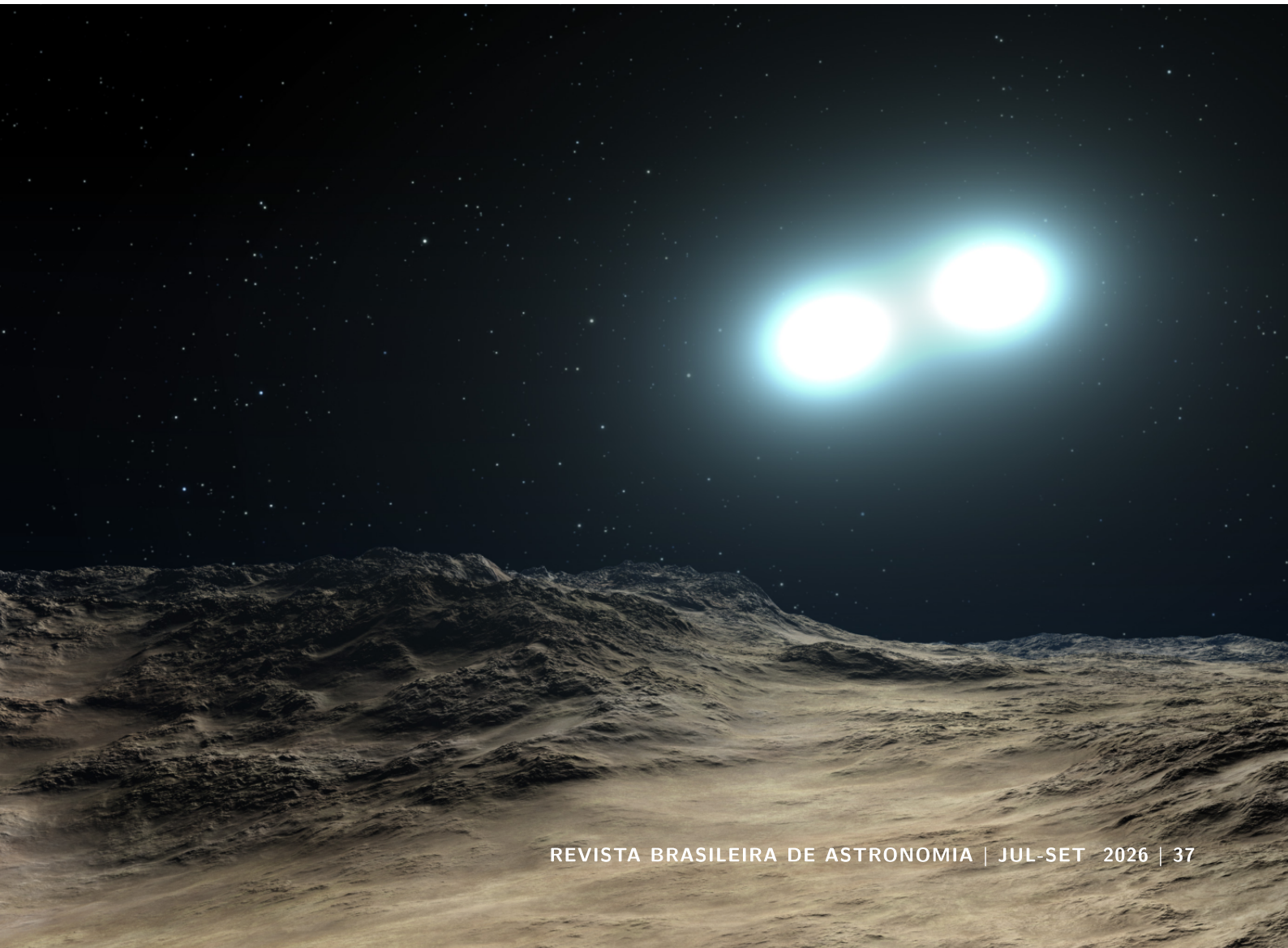
A preservação de sistemas binários em ambientes de baixa densidade estelar sugere que as estrelas azuis tardias devem ser mais abundantes fora dos aglomerados globulares. De fato, esses objetos têm sido identificados em múltiplos componentes da Galáxia, incluindo o bojo, o halo, aglomerados abertos e até mesmo fora dela, em galáxias anãs próximas.

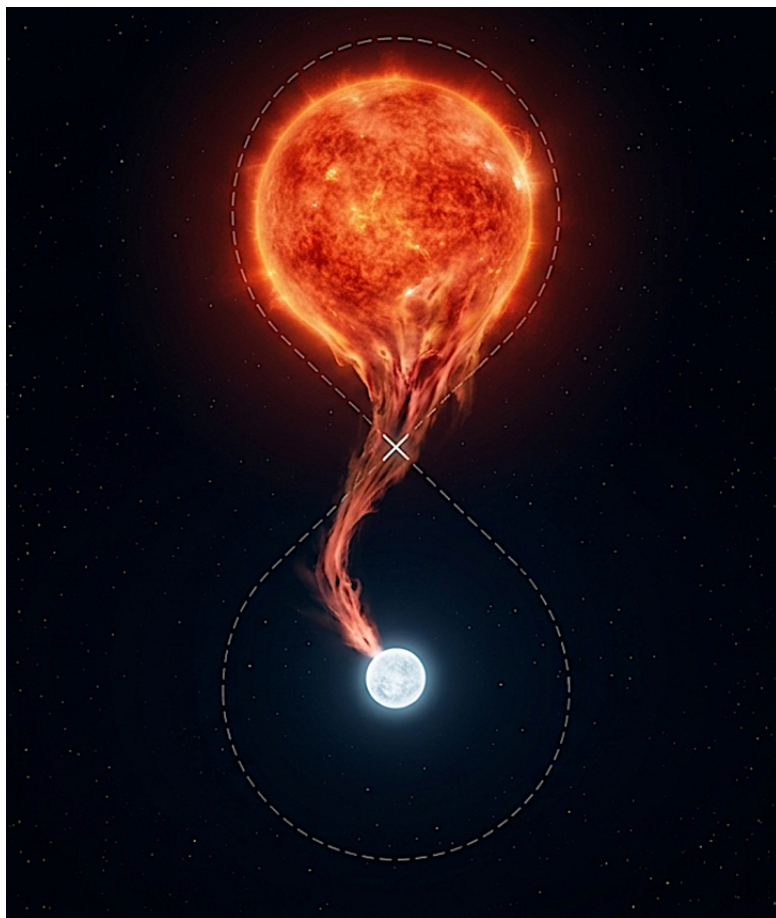
George W. Preston foi o pioneiro na caracterização das estrelas azuis tardias de campo. Em 1994, Preston confirmou que esses objetos compartilham a mesma baixa metalicidade das estrelas do ha-

lo, descartando a hipótese de que seriam estrelas jovens do disco arrancadas por interações gravitacionais. Em monitoramentos de velocidade radial concluídos no ano 2000, Preston demonstrou que pelo menos 60% das estrelas azuis tardias do halo eram sistemas binários, com companheiras não detectáveis diretamente na faixa óptica, mas com massas equivalentes a remanescentes estelares do tipo anã branca. O contraste de luminosidade nesses sistemas explica a dificuldade de detecção direta da estrela doadora de massa. A estrela mais brilhante do céu no-

Abaixo

Representação artística de um par de binárias cerradas que está evoluindo em direção à coalescência, após a qual se tornarão estrelas azuis tardias (Crédito: NASA, ESA, G. Bacon/STScI).





Acima

Em sistemas binários próximos, uma estrela em fase final de evolução pode se expandir até preencher o seu Lóbulo de Roche — que corresponde à sua fronteira gravitacional, isto é, o limite do seu domínio. Ao ultrapassar esse limite, o gás da estrela doadora é sugado diretamente para a sua companheira por meio do ponto lagrangeano de equilíbrio (marcado com um X), em um processo contínuo de transferência de massa direta. Esta é uma das formas de produzir estrelas azuis tardias.

turno, Sirius, é um exemplo simbólico para este caso: enquanto Sirius A (estrela de sequência principal) possui magnitude aparente de $-1,5$, sua companheira Sirius B (anã branca) possui magnitude de $8,5$, sendo aproximadamente 10 mil vezes menos brilhante.

Com o início da era dos grandes levantamentos de dados fotométricos e espectroscópicos automatizados, como o *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), Brian Yanny e colaboradores identificaram milhares de candidatas a estrelas azuis tardias no halo galáctico. A razão entre o número de estrelas azuis tardias e estrelas azuis do

ramo horizontal no halo foi determinada em aproximadamente 2:1, contrastando com os valores observados em aglomerados globulares, que variam entre 0,07 e 0,94. Em 2007, Yazan Momany determinou que esta razão para estrelas em galáxias anãs do grupo local é de $2,24 \pm 0,17$, valor estatisticamente equivalente à taxa de $2,15 \pm 0,13$ medida para o halo da Via Láctea em 2015. Essa concordância fornece sustentação observacional ao modelo de formação hierárquica da Galáxia, segundo o qual o halo galáctico mostra evidências de acreção e canibalismo de galáxias menores, cenário que, desde 2017, tem sido amplamente validado pelos dados astrométricos da missão espacial Gaia.

No halo galáctico, as estrelas azuis tardias são, ao menos, 2 vezes mais numerosas e cerca de 10 vezes menos luminosas do que as estrelas azuis do ramo horizontal. Consequentemente, ao considerar somente a luz emitida por ambos os grupos, as estrelas azuis tardias respondem por pouco mais de um terço da luminosidade destas populações juntas. Visto que estes objetos não são raros, desde 2009, alguns modelos de síntese de populações estelares propostos têm incorporado a contribuição das estrelas azuis tardias. Estes modelos são ferramentas computacionais utilizadas na astrofísica para reconstruir a história, a composição e a e-

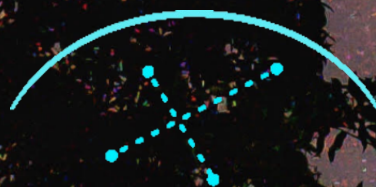
volução de galáxias a partir da luz que elas emitem, principalmente quando não é possível individualizar os objetos que as compõem.

Além disso, como a maioria das estrelas azuis tardias de campo resulta da evolução binária e hoje apresenta uma companheira anã branca, esses sistemas constituem progenitores em potencial para supernovas do tipo Ia. Assim, futuramente, em especial quando for possível resolver estrelas em galáxias distantes e, também, estimar a taxa de ocorrência das supernovas, as estrelas azuis tardias talvez possam conectar a dinâmica de populações estelares aos mecanismos de evolução química existentes •

Rafael Miloni Santucci
Universidade Federal de Goiás
rafaelsantucci@ufg.br

Contracapa

Céu do inverno. Fotografia tirada em Campo Grande, MS, no dia 5 de julho de 2026 (Crédito: José Guilherme dos Santos Camargo/@gui_astronomy).



S.A.B.