

Grandes Questões em Astronomia

Documento Final, da Subcomissão SAB —
Grandes Questões em Astronomia, para a construção
do Plano Nacional de Astronomia 2025.

Rio de Janeiro
Julho 2025

Subcomissão Grandes Questões em Astronomia Equipe de Trabalho

Adriana Valio (CRAAM)
André Ribeiro (UESC)
Eder Martioli (LNA)
Elisabete dal Pino (IAG)
Fernando Roig (ON)
Karín Menéndez-Delmestre (UFRJ) – coordenação
Roberto Martins (ON)
Rogério Rosenfeld (UNESP)
Silvia Alencar (UFMG)

I. Introdução: O Universo como um Laboratório de Descobertas – multi-abordagem nas metodologias de exploração

Vivemos uma revolução na maneira como exploramos o cosmos. O Universo tornou-se, mais do que nunca, um laboratório de descobertas: um espaço onde fenômenos físicos são acessados por múltiplas janelas observacionais e onde a articulação entre tecnologia, inovação metodológica e colaboração internacional redefine as fronteiras da pesquisa. A astronomia contemporânea passou a operar de forma profundamente interdisciplinar, orientada por dados em larga escala, instrumentação de alta complexidade e modelagem teórica sofisticada.

A próxima década será marcada pela entrada em operação de uma nova geração de telescópios e experimentos que redefinirão os limites da observação astronômica. Telescópios como o ELT (Extremely Large Telescope) do ESO (European Southern Observatory), o GMT (Giant Magellan Telescope) e o CTAO (Cherenkov Telescope Array Observatory) inaugurarão regimes de sensibilidade e resolução sem precedentes no óptico e em raios gama. Novas facilidades em solo latino-americano — como o Vera Rubin Observatory, LLAMA (Large Latin American Millimetric Array), o BINGO (Baryon Acoustic Oscillations in Neutral Gas Observations) Telescope, o ASTRI Mini-Array e o futuro SWGO (Southern Wide field Gamma-ray Observatory) — oferecem ao Brasil oportunidades concretas de protagonismo em instrumentação científica e desenvolvimento tecnológico.

Ao mesmo tempo, a astronomia espacial — por meio de telescópios da NASA como JWST e o Roman Space Telescope, assim como missões da Agência Espacial Europeia (ESA) como PLATO, Euclid e ARIEL (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey) — estende nossas capacidades de estudo desde as finas atmosferas de planetas extrasolares até a detecção e estudo de galáxias distantes em tempos cósmicos antes inacessíveis. Inserir o Brasil nesses consórcios e expandir sua presença em missões futuras é condição estratégica para garantir acesso aos dados e para formar recursos humanos em setores-chave da astrofísica e da engenharia aeroespacial.

A comunidade científica brasileira manifesta, de forma clara, a necessidade de fortalecer o desenvolvimento nacional de instrumentação astronômica, priorizando capacitação técnica, criação de laboratórios experimentais e formação de equipes multidisciplinares. Garantir a manutenção contínua das facilidades existentes e fomentar novas iniciativas são passos fundamentais nesse processo.

A comunidade também destaca a necessidade de proteger o céu noturno, mitigar os efeitos das constelações de satélites e articular a astronomia com outras áreas do conhecimento — como física de partículas, ciência de dados e engenharias — de modo a ampliar a capacidade do Brasil de atuar nas fronteiras mais avançadas e áreas de ponta que exigem forte coordenação internacional.

Ciência de dados, simulações e inteligência artificial

A astronomia é hoje uma ciência orientada por dados. Grandes levantamentos com participação brasileira — como o LSST (Legacy Survey of Space and Time, no Vera Rubin Observatory), o J-PAS (Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey), o J-PLUS (Javalambre-Photometric Local Universe Survey), o S-PLUS (Southern Photometric Local Universe Survey) e o SDSS-V — geram petabytes de dados que exigem metodologias computacionais avançadas para serem processados, analisados e interpretados. O uso de inteligência artificial e aprendizado de máquina vem se tornando essencial para identificar padrões, acelerar a modelagem teórica e aprimorar a análise observacional. Redes neurais convolucionais, modelos generativos e algoritmos de classificação automatizada já atuam em múltiplas frentes: da busca por transientes à reconstrução de parâmetros estelares e galácticos.

No entanto, o papel das simulações numéricas permanece central. Modelos magnetohidrodinâmicos, simulações cosmológicas de alta resolução e códigos de evolução estelar são cruciais para conectar teoria e observação. É fundamental, portanto, o investimento em infraestrutura nacional de alto desempenho computacional para simulações e análise de dados, assim como a integração nacional aos desenvolvimentos internacionais.

Astronomia multimensageira, sinergias e soberania científica

O avanço da astronomia multimensageira — integrando observações de ondas gravitacionais, neutrinos, raios cósmicos, ondas eletromagnéticas e partículas exóticas — exige a articulação de múltiplos instrumentos, tempos de resposta rápidos e plataformas computacionais integradas. Essa abordagem é chave para enfrentar os grandes desafios científicos contemporâneos: da origem das ondas

gravitacionais primordiais à busca por partículas de matéria escura em galáxias anãs, da detecção de erupções de núcleos ativos à caracterização de kilonovas.

Essa complexidade demanda planejamento científico e político. A formação de redes de colaboração nacional entre observatórios, o estímulo à participação em consórcios internacionais e a criação de políticas públicas que reconheçam o valor estratégico da astronomia são elementos estruturantes para garantir soberania científica em um campo altamente competitivo.

A começar por esta introdução — que propõe a investigação metodológica como fundação —, estruturamos os eixos temáticos que seguem com base nas transformações científicas em curso no mundo, mas também com um olhar atento às potencialidades do Brasil. Ao abordar a natureza oculta do cosmos, o Universo em condições extremas, a formação das galáxias, o lugar de nossa Via Láctea e nossa Terra, e a busca por vida, o texto se articula em torno de um compromisso coletivo: imaginar e construir o futuro da astronomia como ciência estratégica, integradora e orientada pela descoberta.

II. A Natureza Oculta do Universo

A cosmologia teve um grande avanço nos últimos 60 anos. O desenvolvimento de instrumentos cada vez mais precisos e eficientes aliado ao aperfeiçoamento de previsões de modelos teóricos permitiram testar esses modelos a partir de vários tipos diferentes de observações do Universo. Esses avanços começaram com a descoberta da radiação cosmológica de fundo em 1964 (Nobel de Física em 1978), e passaram pela primeira medida de flutuações primordiais na densidade do Universo em 1992 que são a origem da rica estrutura que observamos hoje com a existência de galáxias, estrelas e planetas (Nobel de Física em 2006) e pela descoberta inesperada da expansão acelerada do Universo em 1998 (Nobel de Física em 2011). O aperfeiçoamento das previsões teóricas de observáveis cosmológicas foi reconhecida com o Nobel de Física dado a James Peebles em 2019. O estudo de curvas de rotação de galáxias na década de 1970 levaram à uma maior evidência da necessidade de matéria escura.

No início desse século as diferentes observações convergiram para um modelo cosmológico padrão, denominado Λ CDM, onde a matéria composta por átomos corresponde atualmente a apenas cerca de 5% do total do Universo. Os 95% restantes estão divididos em matéria escura (cerca de 25%) e energia escura (cerca de 70%). Este modelo também assume que o Universo passou por uma fase de expansão ultra-rápida em seu início, denominado fase inflacionária ou inflação,

que explica o fato de o Universo ser espacialmente plano e muito homogêneo no seu passado, com flutuações na densidade inferiores a uma parte em 100.000 na época onde a radiação cósmica de fundo foi produzida, quando o Universo tinha cerca de 400.000 anos. A fase inflacionária foi a responsável pela origem dessas flutuações, sementes das estruturas que observamos hoje.

O modelo Λ CDM é baseado na teoria da relatividade geral e no modelo padrão da física de partículas elementares. Além disso, a energia escura, responsável pela expansão acelerada do Universo, é descrita por uma constante cosmológica (denotada pela letra Λ), introduzida já em 1917 por Einstein. A matéria escura, por sua vez, é descrita por uma nova partícula elementar sem carga elétrica e estável ou com meia vida maior que a idade do Universo. As grandes questões que norteiam as pesquisas atuais podem ser resumidas em:

1. O modelo Λ CDM é o que melhor descreve o Universo?
2. Qual é a natureza da energia escura?
3. Qual é a natureza da matéria escura?
4. Qual é o melhor modelo para descrever a fase inflacionária?
5. Qual é o papel cosmológico dos neutrinos — em especial a soma de suas massas e a possível detecção do fundo cósmico de neutrinos?

Essas questões podem ser estudadas comparando previsões sólidas de modelos teóricos com medidas precisas de diferentes dados observacionais. Os diferentes dados observacionais são obtidos principalmente de instrumentos que medem:

- A temperatura, polarização e lenteamento da radiação cósmica de fundo
- Grandes levantamentos astronômicos de objetos no Universo, como aglomerados de galáxias, galáxias (incluindo suas formas que podem ser distorcidas por lenteamento gravitacional) e supernovas
- Medidas precisas de supernovas próximas
- Abundância no Universo de elementos químicos leves produzidos no início do Universo
- Raios gama de altas energias
- Raios cósmicos de altas energias
- Neutrinos cósmicos
- Linhas de 21 cm do hidrogênio neutro para BAO e reionização
- Ondas de rádio provenientes da transição de 21cm do hidrogênio
- Ondas gravitacionais
- Experimentos subterrâneos de busca por matéria escura
- Produção e detecção de matéria escura em aceleradores de partículas

Vamos agora abordar brevemente os avanços em responder às 5 questões listadas acima.

1. O modelo Λ CDM é o que melhor descreve o Universo?

Apesar do modelo Λ CDM ter sido capaz de descrever todos os diferentes dados observacionais até o momento, atualmente há dois resultados que mostram uma tensão estatisticamente significativa no modelo.

O primeiro é resultado de medidas precisas da taxa de expansão do Universo, determinada pela constante de Hubble. Medidas a partir de supernovas locais quando comparadas com medidas indiretas provenientes de ajustes precisos do espectro de potência angular da radiação cósmica de fundo, que admitem o modelo Λ CDM, diferem com uma significância estatística de cerca de 5 desvios padrões. Essas diferenças constituem a chamada “tensão de Hubble”. Caso essa tensão não seja o resultado de incertezas sistemáticas ainda desconhecidas, ela apontaria para uma falha do modelo Λ CDM. A tensão de Hubble pode ser melhor quantificada em futuros experimentos que medem de maneira independente a taxa de expansão do Universo, como por exemplo a medida de eventos de ondas gravitacionais com contrapartida eletromagnética. Há grupos brasileiros trabalhando nos experimentos LIGO/Virgo/Kagra e no futuro Einstein Telescope, que podem contribuir no futuro para confirmar ou não a tensão de Hubble. Também há grupos teóricos no Brasil que estudaram possíveis mudanças no modelo Λ CDM, como por exemplo a inclusão de uma nova componente denominada “early dark energy”, que pode diminuir a tensão de Hubble.

O segundo resultado provém de uma análise cosmológica usando a distribuição de galáxias (que mostra o pico em correlações de dois pontos conhecido como “oscilações acústicas bariônicas” ou BAO na sigla em inglês), em conjunto com dados de supernovas e de CMB. Em janeiro de 2024, um trabalho da colaboração Dark Energy Survey (DES) analisou dados de cerca de 1500 novas supernovas do tipo Ia obtidos em 5 anos de observações que, quando combinados com dados também obtidos pelo DES da distribuição de galáxias e de suas formas, incluindo BAO, selecionam um modelo com energia escura dinâmica com uma significância estatística de cerca de dois desvios padrão comparados a um modelo com constante cosmológica. Essa significância aumentou para cerca de três a quatro desvios padrões com os dados de BAO do Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) anunciados em abril de 2024 e março de 2025, quando combinados com dados de supernovas. Essa tensão entre o modelo de Λ CDM e um modelo com energia escura variável ou dinâmica será melhor entendida em breve com a análise final

dos 6 anos de dados de DES, da análise final dos dados do DESI e de futuros levantamentos, como o Legacy Survey of Space and Time (LSST), Euclid, Roman Space Telescope, J-PAS e outros. Cabe ressaltar que existem grupos de pesquisadores do Brasil trabalhando no DES e no LSST, devido em grande parte aos esforços do Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia (LIneA). O BAO em baixos redshifts pode ser medido em rádio no futuro projeto BINGO, com grande participação nacional. Também há grande participação nacional no projeto J-PAS.

Existem muitos modelos além de Λ CDM, com a introdução de novos componentes no Universo, como em modelos de “early dark energy” ou mesmo introduzindo modificações na teoria da relatividade geral. Para testar esses modelos, é necessário desenvolver previsões teóricas robustas para serem comparadas com medidas observacionais. Alguns desafios para previsões teóricas robustas são: efeitos não-lineares da gravitação, efeitos de bárions na densidade de galáxias, incertezas na determinação de redshifts fotométricos (para levantamentos fotométricos como o DES e o LSST), incertezas na modelagem do chamado viés de galáxias (relação entre contraste de densidade de matéria escura com o contraste de densidade em galáxias), entre outros. Simulações numéricas são cada vez mais importantes para realizar previsões teóricas. Outro desafio importante para realizar estes testes é a necessidade de computação de alto desempenho: a exploração do espaço de alta dimensionalidade de parâmetros cosmológicos com a inclusão dos chamados parâmetros de “nuisance” requer o uso de técnicas estatísticas avançadas, como por exemplo o Markov Chain Monte Carlo, que demanda um alto custo computacional. Nesse sentido, seria recomendável criar-se um centro computacional para nossa comunidade, tanto para o armazenamento de dados das diversas colaborações quanto para seu processamento e análise, como por exemplo o chamado Independent Data Access Center que está em adiantado estado de construção pelo LIneA no LNCC.

2. Qual a natureza da energia escura?

Energia escura é a denominação da componente responsável pela expansão acelerada do Universo. No modelo Λ CDM, ela é uma simples constante cosmológica. A energia escura tornou-se relevante recentemente na história cósmica e afeta a formação de estruturas no Universo. Portanto, o estudo da distribuição de galáxias e de supernovas traz informações sobre a natureza da energia escura. Como descrito acima, o modelo de uma constante cosmológica está menos favorecido atualmente quando comparado com uma parametrização simples

onde a energia escura é dinâmica. Com novas análises de grandes levantamentos de galáxias e de supernovas, como o LSST por exemplo, teremos uma maior certeza estatística se o modelo da constante cosmológica pode ser de fato descartado, o que representaria uma nova revolução em nosso conhecimento sobre o Universo. O LSST irá combinar medidas de funções de correlação de dois pontos envolvendo a posição e o lenteamento fraco de galáxias (o chamado 3x2pt), BAO, supernovas, e contagem de aglomerados de galáxias como função de sua massa para identificar o melhor modelo que descreve o Universo.

O desafio teórico é a construção de modelos ditos microscópicos, baseados em teoria de campos para a energia escura, como os chamados modelos de quintessência (e não simples parametrizações da equação de estado), implementá-los em códigos de Boltzmann (como CAMB e CLASS) e fazer previsões realistas para observáveis cosmológicas, levando em consideração efeitos não-lineares, modelos de bias de galáxias, feedback bariônico e muitos outros.

3. Qual a natureza da matéria escura?

A matéria escura corresponde a cerca de 25% da densidade de energia do Universo. A evidência para sua existência até o momento vem apenas de observações astronômicas. Não sabemos qual é a natureza da matéria escura. Sabemos apenas que deve ser não-relativística (fria) para atuar na formação de estruturas no Universo, deve ser estável (para estar presente no Universo) e eletricamente neutra (para não interagir com a luz). Existe um grande número de candidatos, com massas variando de partículas super leves (como “axion-like particles”) até a possibilidade da contribuição de buracos negros.

Existem quatro métodos de estudar a natureza da matéria escura: a produção em aceleradores de partículas, como o LHC, a detecção direta da matéria escura em nosso halo em detectores terrestres subterrâneos (como DarkSide), a detecção indireta através de produtos de aniquilação da matéria escura em regiões de alta concentração (como o centro de nossa galáxia) e efeitos astronômicos. Grupos brasileiros trabalhando no experimento CMS do LHC participam de análises de matéria escura. Há também um grupo do Brasil participando do experimento DarkSide.

A detecção indireta de matéria escura através do estudo de, por exemplo, raios gama de altas energias e neutrinos provenientes da aniquilação de matéria escura, será abordada em mais detalhes na próxima seção. No entanto, vale a pena enfatizar que grandes levantamentos foram e serão importantes para a identificação

de galáxias anãs na vizinhança da Via Láctea. Essas galáxias são dominadas por matéria escura e, portanto, são fontes dos produtos de aniquilação. O DES, por exemplo, praticamente dobrou o número desses objetos. A busca de raios gama emitidos por esses objetos pelo satélite Fermi colocou limites restritivos na massa dos candidatos à matéria escura. Espera-se que o LSST descubra muitos outros desses objetos.

O sinal clássico de matéria escura leve é a supressão do espectro de potência devido ao “free-streaming” da partícula. O estudo da distribuição de galáxias é um método de obter limites na massa, hoje em alguns keV. No entanto, outros modelos de matéria escura, como “fuzzy dark matter” e “interacting dark matter”, preveem essa supressão apenas em escalas muito pequenas (da ordem de $k=100 \text{ h/Mpc}$). Nessas escalas as incertezas de feedback bariônico e de não-linearidades afetam a acurácia de previsões teóricas, dificultando a obtenção de resultados robustos. O “Report of the Topical Group on Cosmic Probes of Dark Matter for Snowmass 2021” ([Drlica-Wagner, Alex, et al. 2022](#)) oferece uma excelente revisão desses aspectos.

Novos sinais estão sendo estudados para a detecção de matéria escura em nossa Galáxia. Por exemplo, dentro da colaboração DESC do LSST, estuda-se a possibilidade de detecção de “buracos” em correntes estelares em nossa Galáxia causados pela passagem de um mini-halo de matéria escura. Outro estudo promissor é o efeito de matéria escura na dinâmica de aglomerados estelares.

4. Qual é o melhor modelo para descrever a fase inflacionária?

É muito provável que o Universo tenha passado por uma fase de rápida expansão em seus primórdios, denominada fase inflacionária. Essa fase explica porque o Universo é espacialmente plano e porque a radiação cósmica de fundo é uniforme em todas as escalas. Mais ainda, ela provê as pequenas flutuações de uma parte em 100.000 observadas na radiação cósmica de fundo e que são as sementes das galáxias. Atualmente, a melhor maneira de obter informações sobre a fase inflacionária é a partir do estudo da polarização da radiação cósmica de fundo (CMB). Os limites sobre a razão entre as amplitudes tensoriais e as escalares obtidos pelo satélite Planck em 2018 a partir de limites na observação do chamado modo B (modo rotacional) de polarização da CMB já excluiu diversos modelos inflacionários. Espera-se que novos instrumentos, como o Simons Observatory no Chile, possam explorar com mais precisão a busca pelo modo B, que confirmaria a teoria inflacionária (outro experimento promissor, o CMB-S4, foi praticamente cancelado pelo NSF). No momento não há grupos brasileiros envolvidos nessa

atividade, mas novos cosmólogos contratados esse ano estão participando de alguns projetos relacionados.

5. Qual é o papel cosmológico dos neutrinos?

Neutrinos são partículas sem carga elétrica que não interagem com a luz e, portanto, são parte da matéria escura no Universo. Assim como fótons, neutrinos foram produzidos no início do Universo e estavam em equilíbrio térmico com o fluido cósmico através das interações fracas. Eles se desacoplaram do fluido cósmico quando o Universo tinha cerca de apenas 1 segundo. A densidade em número de neutrinos cósmicos (que aparecem em três famílias associadas aos elétrons, múons e taus) hoje é comparável ao número de fótons da CMB: cerca de 340 por centímetro cúbico, formando um gás de férmions com temperatura de 1,95 K. A detecção em laboratórios terrestres desse fundo de neutrinos cosmológicos é desafiadora pois eles possuem energia muito pequena. Seus efeitos são detectados apenas em medidas cosmológicas.

Não sabemos o valor da massa de neutrinos. A partir de dados de oscilação de neutrinos sabemos que a soma de suas massas deve ser maior que 0,6 eV (de fato, esse valor aumenta para 0,10 eV se a hierarquia de massas é “invertida”). Neutrinos afetam o crescimento de perturbações no Universo e as previsões de, por exemplo, o espectro de potência das perturbações dependem de suas massas. Os limites cosmológicos em suas massas, obtidos a partir de observáveis como o espectro angular da CMB, dependem do modelo cosmológico. Por exemplo, Planck (combinado com dados de BAO) encontra um limite superior de 0,12 eV para a soma da massa de neutrinos no modelo Λ CDM espacialmente plano. Já em um modelo onde a energia escura possui uma equação de estado do tipo $w(a) = w_0 + (1-a) w_a$, com dois parâmetros adicionais com relação ao modelo Λ CDM, o limite é relaxado. Apenas para ter uma ideia, caso a soma da massa de neutrinos seja 0,1 eV, sua contribuição hoje para a densidade de energia do Universo é de apenas 1% — muito menor que a contribuição da matéria escura. O limite mais restrito atualmente vem da combinação de dados recentes do DESI com outros dados é de 0,072 eV, novamente no contexto de Λ CDM plano. Possivelmente levantamentos como o LSST podem contribuir para obter medidas com maior precisão na soma da massa de neutrinos.

Neutrinos de altas energias não têm origem cosmológica, sendo produzido por fontes astronômicas em condições extremas, como AGNs e são discutidos na seção seguinte.

Diversos temas complementares se adicionam aos subtemas fundamentais da natureza escura do Universo. Alguns destes são:

- Observações cosmológicas em 21 cm: BINGO (BAO em $z \sim 0,3$), HIRAX e SKA mapearão HI da reionização a baixo redshift.
- Feedback bariônico: ventos galácticos e AGNs impactam lentes fracas e devem ser modelados em simulações hidrodinâmicas.
- Dados abertos & HPC (High Performance Computing ou Computação de Alto Rendimento) brasileiro: consolidar um ecossistema nacional de análise (LIneA, LNCC, CENAPAD) para simulações, machine-learning e acesso a big-data astronômico.

Investir na natureza oculta do Universo — refinar o valor de H_0 , mapear matéria e energia escuras, determinar a massa dos neutrinos e explorar o céu em 21 cm — significa apoiar projetos que exigem instrumentação de última geração, grande capacidade de processamento de dados e formação de especialistas. Esses mesmos recursos fortalecem competências nacionais em sensores, análise de big-data e modelagem de sistemas complexos, com aplicações que vão além da astronomia. Ao participar ativamente das colaborações internacionais que lideram esses estudos, o Brasil assegura acesso a dados estratégicos, consolida sua capacidade científica de longo prazo e contribui de forma reconhecida para entender os 95 % do cosmos que ainda permanecem misteriosos.

III. O Universo em condições Extremas

Explorar o Universo em condições extremas significa investigar cenários em que a matéria, a energia e o próprio espaço-tempo desafiam nossos modelos mais sofisticados de física. Em torno de buracos negros supermassivos, discos de acreção giram a velocidades relativísticas, gerando jatos de partículas aceleradas a velocidades relativísticas; o interior de estrelas de nêutrons abriga densidades tão elevadas que podemos testar diretamente a equação de estado da matéria nuclear; e, no instante que sucede o Big Bang, flutuações quânticas se traduzem em ondas gravitacionais que carregam memórias da infância do cosmos. Para desvendar esses mistérios, confiamos hoje em uma combinação inédita de telescópios e detectores multimessageiros, simulações de altíssimo desempenho e inteligência artificial capazes de vasculhar petabytes de dados em busca de sinais tênues e

fugazes. Essa sinergia é o alicerce para transformar o cosmos num verdadeiro laboratório de descobertas.

Os Grandes Desafios e Questões Fundamentais

A exploração do Universo em condições extremas se debruça sobre uma série de questões fundamentais que impulsionam a pesquisa astrofísica global. Entre os temas mais relevantes, destacam-se:

- **Ondas Gravitacionais como Sondas do Extremo:** A detecção de ondas gravitacionais revolucionou nossa capacidade de observar eventos cósmicos violentos. As observações conjuntas dos interferômetros LIGO,¹ Virgo² e KAGRA³ já revelaram fusões de estrelas de nêutrons e buracos negros. Quando acompanhadas por contrapartidas eletromagnéticas — como kilonovas (explosões resultantes da fusão de estrelas de nêutrons) e surtos breves de raios gama (GRBs) —, essas detecções permitem medir diretamente propriedades fundamentais, como o raio e a massa dessas estrelas densas, além de testar a Relatividade Geral em regiões de curvatura extrema. Projetos futuros, como o Einstein Telescope⁴ e o LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*),⁵ prometem estender esse alcance, sondando ondas geradas no Universo primordial e abrindo a possibilidade de detectar, pela primeira vez, sinais da própria inflação quântica no tecido do espaço-tempo. Isso traria informações cruciais sobre os primeiros instantes do Universo.
- **Aceleradores Cósmicos, Pevatrons, e Astrofísica Multimessageira:** O cosmos abriga verdadeiros aceleradores de partículas naturais cujas energias ultrapassam em milhões de vezes aquelas alcançáveis em laboratórios terrestres: buracos negros, pulsares, estrelas de nêutrons, surtos de raios gama (GRBs) e supernovas injetam partículas ultrarrelativísticas em jatos, fluxos de acreção, e ondas de choque que produzem raios gama e raios cósmicos de altíssima energia. A observação desses fótons de alta energia é

¹ <https://www.ligo.caltech.edu/>

² <https://www.virgo-gw.eu/>

³ <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>

⁴ <https://www.einstein-telescope.it/en/home-en/>

⁵ <https://lisa.nasa.gov/>

essencial para revelar a natureza da aceleração de raios cósmicos a energias extremas e para identificar fenômenos transientes — como flares de AGNS-blazares e GRBs —, bem como para localizar os “Pevatrons” galácticos, os maiores aceleradores de partículas da Via Láctea a energias da ordem de 10^{15} eV (ou mais). Observatórios terrestres de próxima geração — CTAO (*Cherenkov Telescope Array Observatory*),⁶ seu Precursor ASTRI Mini-Array,⁷ e SWGO (Southern Wide-field Gamma-ray Observatory),⁸ além dos em operação como HAWC⁹ e LHAASO¹⁰ — proporcionarão sensibilidade e resolução angular sem precedentes, permitindo mapear com detalhe a emissão dessas fontes e fenômenos até centenas de TeV. Além disso, a astrofísica multimessageira, que integra observações de ondas gravitacionais, raios gama, neutrinos e raios cósmicos, é também fundamental para desvendar a origem dos raios cósmicos de ultra-alta energia (acima de PeV, ou peta-elétron-volts). Esses raios cósmicos, com energias extraordinárias, são ainda um mistério. Essa abordagem holística não apenas revela a natureza dos mecanismos de aceleração em fontes compactas e transientes, mas também permite a correlação de diferentes “mensageiros” emanados de um mesmo evento, fornecendo uma compreensão integrada dos processos físicos que impulsionam as partículas a limites extremos de energia.

- **Física Fundamental Além do Modelo Padrão e a Natureza da Matéria Escura:** As condições extremas do Universo funcionam como um laboratório natural para testar os limites da física conhecida e buscar pistas de fenômenos além do Modelo Padrão. Em ambientes onde densidades, campos magnéticos e energias atingem valores incomparáveis, podemos investigar desde a existência de buracos negros primordiais – hipotéticos remanescentes do Universo primordial – até candidatos a matéria escura, como partículas tipo áxion, que se converteriam em fótons sob a ação de campos magnéticos intensos. Observações multimessageiras, que combinam raios gama, raios cósmicos, neutrinos e ondas gravitacionais, são chaves para caracterizar esses fenômenos transientes extremos. Detectores de

⁶ <https://www.ctao.org/>

⁷ <https://www.nuclearinstruments.eu/projects/astri/>

⁸ <https://www.swgo.org/>

⁹ <https://gcn.nasa.gov/missions/hawc>

¹⁰ <https://www.eoportal.org/ftp/satellite-missions/l/LHAASO-030621/LHAASO.html>

neutrinos de altíssima energia, como IceCube-Gen2 no Polo Sul, KM3NeT no Mediterrâneo, DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) e Hyper-Kamiokande, buscam partículas que escapam de núcleos galácticos ativos e remanescentes de supernovas, revelando mecanismos de aceleração capazes de atingir energias inacessíveis a aceleradores terrestres. Simultaneamente, observatórios de raios cósmicos — Pierre Auger e Telescope Array — mapeiam a composição e as anisotropias das partículas ultra-energéticas que inundam nosso planeta, e ao mesmo tempo, observatórios de raios gama, como o HESS e os futuros CTAO e ASTRI Mini-Array medem a contrapartida eletromagnética dessas mesmas fontes. O cruzamento desses dados multimensageiros amplia enormemente nosso poder de sondagem. Por exemplo, ao buscar padrões de conversão de partículas tipo axion em fótons de alta energia nos espectros de raios gama, podemos restringir propriedades dessas partículas e testar modelos de matéria escura. Da mesma forma, um outro candidato à matéria escura fria, os WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) – ao aniquilarem-se podem gerar raios gama observáveis em linhas espectrais ou excessos de emissão difusa no halo galáctico. Ainda, o estudo de atrasos de chegada de fótons gama de diferentes energias produzidos em fontes muito distantes permite colocar limites cada vez mais rigorosos à violação da invariância de Lorentz (da constância da velocidade da luz), um possível sinal de estrutura quântica do espaço-tempo. Em conjunto, esses esforços estão pavimentando o caminho para descobertas revolucionárias: novas interações fundamentais até evidências diretas de partículas de matéria escura, como axions e WIMPs, e até mesmo sinais do próprio Big Bang, codificados em raios gama, neutrinos e partículas cósmicas que atravessam o cosmos. A convergência de detectores de última geração e abordagens multimensageiras nos aproxima de compreender a física que governa o Universo em suas condições mais extremas — e, quem sabe, de ultrapassar o horizonte do que hoje consideramos possível.

- **Origem dos buracos negros supermassivos:** Como se formam buracos negros com massas de 10^6 – $10^{10} M_{\odot}$ em épocas tão jovens ($z > 6$)? Modelos via colapso direto de nuvens de gás, crescimento por acreção super-Eddington e fusões sucessivas competem para explicar esse enigma. Ondas

gravitacionais de fusões de buracos negros de massas intermediárias (10^2 – $10^4 M_\odot$) detectadas por LIGO,¹¹ Virgo e KAGRA, se confirmadas, podem fornecer pistas diretas sobre essa população primordial.

- **Horizontes de eventos reais vs. singularidades nuas:** Dentro da Relatividade Geral, buracos negros apresentam horizontes de evento que selam singularidades invisíveis. Contudo, a possibilidade de “singularidades nuas” — regiões onde a curvatura diverge sem horizonte envolvente — continua em aberto. O Event Horizon Telescope (EHT), ao produzir imagens da sombra de M87* e de Sgr A*, colocou em evidência a geometria do horizonte. Futuras campanhas com maior resolução e sensibilidade no mm/sub-mm poderão detectar desvios sutis esperados em cenários que violem o teorema da censura cósmica, ou evidências de matéria exótica próxima ao horizonte.
- **Emissão Difusa, Efeitos de Propagação e Campos Magnéticos Cósmicos:** O estudo da emissão difusa de raios gama (radiação gama que não pode ser atribuída a uma fonte pontual específica) e os efeitos de sua propagação através do espaço são cruciais para medir a Extragalactic Background Light (EBL), que é o brilho acumulado de todas as fontes extragalácticas que emitem luz no infravermelho, visível e ultravioleta desde distâncias cosmológicas. Além disso, permite a caracterização de campos magnéticos galácticos e extragalácticos que influenciam a propagação de partículas carregadas. Essas investigações também fornecem *insights* valiosos sobre a física dos raios cósmicos e do meio interestelar e intergaláctico, além de incluir temas fundamentais relacionados à propagação cosmológica dos raios gama, como a atenuação por interação com a EBL

Meios, Técnicas e Experimentos de Nova Geração

Para enfrentar esses desafios complexos, a comunidade científica global está investindo em uma nova geração de observatórios, técnicas e abordagens computacionais de ponta.

Observatórios e Experimentos de Ponta

¹¹ <https://www.ligo.caltech.edu/>

A interseção de dados de raios gama, ondas gravitacionais, neutrinos e raios cósmicos forma o cerne da astrofísica multimessageira. A era da astronomia multimessageira exige a colaboração de diversas instalações observacionais, cada uma sensível a diferentes "mensageiros" cósmicos:

- **Observatórios de Raios Gama:** Projetos como o CTAO (Cherenkov Telescope Array Observatory), que será a maior e mais sensível rede de telescópios Cherenkov do mundo, atuando nas faixas de 50 GeV a 300 TeV, o seu Precursor: o ASTRI Mini-Array, um arranjo menor de telescópios Cherenkov de pequeno tamanho atuando na faixa 1-300TeV, o SWGO (Southern Wide-field Gamma-ray Observatory) - observatório de tanques Cherenkov de campo amplo, no hemisfério sul - e sua contrapartida já em operação no hemisfério norte: o LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory) na China, ambos atuando em multi-TeV, trabalharão em conjunto para mapear o céu com sensibilidade e alcance sem precedentes. Esses observatórios desempenham um papel vital na detecção de raios gama até energias ultra-altas produzidas pelas fontes aceleradoras cósmicas. Essas instalações visam identificar fenômenos transientes, como explosões (flares) de raios gama, e também emissões persistentes de AGNs (núcleos galácticos ativos), supernovas, kilonovas e pulsares, bem como sondar a radiação difusa que cruza o Universo e seus efeitos na EBL. Além disso, terão papel fundamental na detecção de interações entre partículas de matéria escura (WINPs) em regiões como o halo da Galáxia, e na medida indireta dos campos magnéticos galácticos e intergalácticos interagentes com as partículas carregadas resultantes do cascadeamento dos raios gama de fontes distantes.
- **Observatórios de Ondas Gravitacionais:** Detectores como LIGO, Virgo e KAGRA já revolucionaram nossa compreensão de fusões de buracos negros e estrelas de nêutrons. Projetos futuros, como o Einstein Telescope na Europa (com sensibilidade em frequências superiores, podendo capturar sinais de fundo estocástico gravitacional), e o LISA (Laser Interferometer Space Antenna), missão espacial (com sensibilidade em frequências baixas 10^{-4} a 10^{-1} Hz), permitirão estender esse alcance, sondando ondas geradas no Universo primordial de menos de 1 segundo de idade e abrindo a possibilidade de detectar sinais da própria inflação quântica no tecido do

espaço-tempo, explorando possíveis extensões da Relatividade Geral em escala quântica.

- **Observatórios de Neutrinos:** Detectores de neutrinos de nova geração — IceCube-Gen2 no Polo Sul, KM3NeT no Mediterrâneo, DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) e Hyper-Kamiokande — buscam partículas tênues que podem revelar processos de aceleração em supernovas e núcleos galácticos ativos (AGNs). À medida que parcerias como a AMON (Astrophysical Multimessenger Observatory Network) amadurecerem, tornaremos possível emitir alertas em tempo real, mobilizando toda a comunidade astronômica quando um evento extraordinário acontece, seja um flash de neutrinos, um pico de raios gama ou uma onda gravitacional.
- **Telescópios de Raio-X, Ópticos, e de Rádio de Próxima Geração - contrapartidas eletromagnéticas nas baixas energias:** Satélites de raios X atuais e futuros são cruciais para sondar os emissores de alta energia imediatamente após um alerta multimensageiro. Instrumentos como o Chandra X-ray Observatory, o XMM-Newton e o NuSTAR mapeiam regiões de acreção em buracos negros e de choque em remanescentes de supernovas, enquanto o futuro Athena (Advanced Telescope for High-ENergy Astrophysics) aumentará em muito a sensibilidade e a resolução espectral, permitindo estudar a física do plasma relativístico e a termodinâmica de discos de acreção. Em coordenação com alertas de ondas gravitacionais, raios gama e neutrinos, observações de raios-X revelam o início dos processos de ejeção de jatos e caracterizam a evolução temporal de flares. Projetos como o ELT (Extremely Large Telescope) e o GMT (Giant Magellan Telescope), ambos na fase de construção no Chile, serão os maiores telescópios ópticos do mundo, graças aos seus espelhos primários de 39 m e 24,5 m, respectivamente. Levantamentos de grande escala como LSST (Legacy Survey of Space and Time), operado pelo Observatório Vera C. Rubin, J-PAS (Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey) e S-PLUS (Southern Photometric Local Universe Survey) são essenciais para identificar as contrapartidas eletromagnéticas de eventos multi-mensageiros e para o mapeamento detalhado de galáxias e estruturas em larga escala. Além destes, o Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor (SVOM) e o futuro THESEUS serão fundamentais para varrer rapidamente grandes áreas do céu em várias

bandas, capturando eventos transientes logo após um alerta de LIGO, Virgo ou KAGRA, ou do CTAO (Cherenkov Telescope Array Observatory) ou ASTRI Mini-Array. Ainda assim, a latência na emissão de alertas e a necessidade de coordenação global permanecem gargalos que a rede AMON (Astrophysical Multimessenger Observatory Network) procura mitigar, distribuindo triggers quase em tempo real e permitindo follow-up coordenado. No âmbito das baixas frequências de rádio e milimétricas, observatórios como os futuros LLAMA (Large Latin American Millimeter Array), localizado na Argentina, e BINGO (Baryon Acoustic Oscillation from Integrated Neutral Gas Observations), no Brasil, contribuirão para o estudo de gás neutro e campos magnéticos, bem como para pesquisa em cosmologia. O MeerKAT, na África do Sul, e o futuro Square Kilometre Array (SKA), com antenas distribuídas por diversos países, oferecerão sensibilidade e resolução sem precedentes para detectar emissões de rádio fracas, mapear estruturas em grande escala e capturar sinais transientes de pulsares e jatos relativísticos. Além disso, a colaboração com o Event Horizon Telescope (EHT) abre a perspectiva de estender a técnica de VLBI (Very Long Baseline Interferometry) ao LLAMA, proporcionando linhas de base ainda maiores para “detectar” regiões próximas ao horizonte de eventos de buracos negros. Essa combinação poderá ajudar a revelar detalhes cruciais sobre a existência — ou não — de horizontes de eventos ideais, testando na prática se certas singularidades permanecem “nuas” ou ficam ocultas atrás de um horizonte de eventos.

Técnicas Computacionais Avançadas

A explosão de dados gerada por esses observatórios exige ferramentas computacionais igualmente avançadas para análise e interpretação:

- **Simulações Magnetohidrodinâmicas (MHD) de Alta Performance:** A utilização de computação de alta performance (HPC) em simulações magnetohidrodinâmicas (MHD) é fundamental para modelar a evolução de jatos relativísticos e fluxos de acreção, formação de frentes de choques, reconexão magnética em meios magnetizados e as explosões de supernovas. Códigos como AthenaPK, Athena++, PLUTO e RAMSES rodam em

supercomputadores com milhares de CPUs e/ou GPUs, capturando interações turbulentas e instabilidades que determinam como partículas são aceleradas e emitidas. Essas simulações permitem testar teorias, prever resultados observacionais e explorar cenários que são inacessíveis por experimentos diretos.

- **Inteligência Artificial (IA) e Redes Neurais:** Mesmo com HPC, cada simulação pode gerar petabytes de dados, e é aí que a **Inteligência Artificial (IA)** e o Aprendizado de Máquina (Machine Learning), especialmente as redes neurais, entram em cena:

- Cálculos e Modelagem Numérica: Acelerar cálculos complexos em modelos teóricos e simulações, permitindo uma exploração mais rápida e eficiente de diferentes cenários.
- Tratamento de Grandes Bases de Dados Multi-mensageiros: Redes convolucionais identificam padrões em imagens de detectores, redes neurais podem reconstruir trajetórias de partículas em telescópios de raios gama, e modelos generativos podem acelerar o cálculo de processos físicos complexos, atuando como “emuladores” que tornam viável explorar amplos espaços de parâmetros.
- A IA também é crucial para o armazenamento e compactação de grandes volumes de dados observacionais, otimizando o uso de recursos computacionais e facilitando o acesso e a análise por parte da comunidade científica.
- Agilização da Análise Observacional: Melhorar a sensibilidade dos detectores, otimizar a calibração de dados e auxiliar na reconstrução de eventos cósmicos a partir de sinais fracos e ruidosos, incluindo a filtragem de ruídos, a classificação de eventos e a identificação rápida de fenômenos transientes raros.

Desafios e Perspectivas Futuras

Explorar o Universo em condições extremas é um dos desafios mais instigantes da astrofísica moderna. Os grandes desafios do Universo em condições extremas residem na sua própria complexidade. Para enfrentá-los, não basta um único “olho” no céu ou um supercomputador isolado; é necessária a sinergia de observatórios de

última geração, experimentos multimessageiros, supercomputação e inteligência artificial.

Proteger essa sinergia de múltiplas frentes será o grande desafio na próxima década. É preciso investir em infraestruturas de dados interoperáveis, padronizar formatos de arquivos, garantir acesso amplo às comunidades científicas e treinar jovens pesquisadores no uso de HPC e IA. Somente assim, unindo o poder de observação dos telescópios, a sensibilidade dos detectores e a velocidade da análise computacional, poderemos avançar em questões fundamentais: como “O que mais podemos aprender com raios gama, ondas gravitacionais e neutrinos acerca das fontes compactas e seus eventos extremos?”; Existe de fato um “pico” de densidade de matéria escura em torno de buracos negros? “Como associar diferentes mensageiros a um mesmo evento?”; e “É possível sondar o Universo primordial: como era ele nos instantes iniciais que hoje nos escapam, e de que forma a gravidade quântica pode se revelar?

O futuro da exploração do Universo em condições extremas é intrinsecamente ligado à nossa capacidade de inovar em tecnologia, computação e colaboração. Ao ultrapassar essas fronteiras, desvendaremos os segredos mais profundos do cosmos, revelando a física por trás dos fenômenos mais energéticos e misteriosos do Universo. Em suma, o Universo em condições extremas nos convida a ultrapassar fronteiras tecnológicas e conceituais. A convergência entre instrumentação de ponta, supercomputação e inteligência artificial não é apenas uma tendência: é o caminho para transformar o cosmos num verdadeiro laboratório de descobertas, onde as perguntas mais ousadas ganham resposta e onde cada fóton, cada neutrino e cada ondulação no espaço-tempo carrega um pedaço do quebra-cabeça cósmico.

IV. A Origem e o Destino das Galáxias

Entender a origem e evolução das galáxias é uma das grandes questões abertas da astrofísica moderna. Como estruturas fundamentais do Universo visível, as galáxias abrigam estrelas, gás, poeira, buracos negros supermassivos e matéria escura. São nelas que ocorrem os principais processos de formação estelar e enriquecimento químico, além de desempenharem papel central na construção das estruturas cósmicas em larga escala. Investigar como se formam, crescem e se

transformam ao longo do tempo é essencial para construir um quadro coeso da história do cosmos.

Nas últimas décadas, avanços em observações multi-banda, modelagens teóricas sofisticadas e simulações numéricas em larga escala transformaram nosso entendimento das galáxias. Telescópios como o James Webb Space Telescope (JWST) já permitem observar galáxias formadas nos primeiros 500 milhões de anos, revelando o colapso do gás em halos de matéria escura e os primeiros ciclos de formação estelar. No entanto, muitas perguntas fundamentais permanecem em aberto: como se dá o colapso inicial do gás em halos de matéria escura? Quais mecanismos regulam a formação estelar e o crescimento de buracos negros centrais? Que papel desempenham os ambientes em grande escala, como aglomerados e filamentos cósmicos, na história evolutiva das galáxias?

O estudo detalhado de galáxias no Universo próximo, em contrapartida ao estudo do Universo distante, oferece a oportunidade de avaliar o resultado “final” dos processos astrofísicos que transformam esses sistemas ao longo do tempo cósmico desde sua formação inicial. Observações detalhadas da emissão das estrelas, da poeira e do gás, assim como do movimento do gás e das estrelas permitem reconstruir a história de formação estelar e a evolução dinâmica de galáxias individuais com precisão sem precedentes. Amostras cada vez maiores com dados espectroscópicos de campo integral (e.g., MANGA, SAMI), e em particular com mapas altamente resolvidos que traçam a emissão de populações estelares e a dinâmica interna em escalas sub-galácticas no Universo próximo (e.g., MUSE no óptico e ALMA no milimétrico) vêm alimentando de forma notável modelos de formação e evolução de galáxias. Esses estudos locais fornecem a referência necessária para interpretar populações observadas em tempos cósmicos mais primitivos e calibrar modelos de formação e evolução galáctica.

O estudo das galáxias conecta áreas centrais da astrofísica – como o estudo do meio interestelar, evolução estelar, estrutura em grande escala e cosmologia, entre outras. Porém ela também dialoga com outras disciplinas, como química (evolução da metalicidade ao longo do tempo cósmico), física fundamental (testes de matéria e energia escuras), assim como ciência de dados aplicada (manipulação de enormes volumes de dados) e inteligência artificial (e.g., machine learning e deep learning). Assim, sua relevância ultrapassa fronteiras disciplinares: fomenta desenvolvimento tecnológico, formação de capital humano especializado e inovação em métodos analíticos que beneficiam setores além da astronomia. Investir nessa área é também uma forma de fortalecer uma base científica interdisciplinar, fomentando a inovação e desenvolvendo competências em ciência de dados, modelagem

computacional e instrumentação — elementos cada vez mais centrais em economias baseadas em tecnologia, inovação e conhecimento.

Formação e Evolução de Galáxias

A formação de galáxias é um processo complexo que começa com pequenas flutuações de densidade no Universo primordial, amplificadas pela gravidade. Essas flutuações evoluem para estruturas cada vez maiores, originando os halos de matéria escura dentro dos quais o gás colapsa e se resfria, iniciando a formação estelar. Desde então, galáxias evoluem por meio de processos internos (e.g, atividade de formação estelar, crescimento de buracos negros supermassivos, SMBHs) e processos externos (e.g, fusões e interações com outras galáxias, acreção de gás proveniente do meio intergaláctico). Nos processos internos, a formação de estrelas e o ciclo de evolução estelar aumenta o conteúdo de massa estelar, contribui para a formação de estruturas estelares e enriquece quimicamente o meio interestelar por meio de ventos estelares e explosões de supernovas. O crescimento de buracos negros supermassivos (SMBHs) também impacta a evolução das galáxias à medida que os SMBHs se alimentam de gás, podendo produzir jatos e gerando processos de retroalimentação que aquecem e/ou expulsam o gás nas proximidades (combustível necessário para formação estelar), alterando a capacidade de formar novas estrelas. Já os processos externos – como fusões e interações com outras galáxias (massivas ou satélites), assim como acreção de gás do meio intergaláctico – rearranjam a massa estelar, momento angular e distribuição de gás do sistema, levando a modificações em massa total, morfologia e enriquecimento metálico.

A evolução das galáxias não segue um processo idêntico para todas as galáxias: a evolução galáctica depende da massa do sistema, de seu ambiente (se se encontra em regiões densamente povoadas por outras galáxias ou em áreas mais isoladas) e da época na história cósmica. Galáxias massivas tendem a formar estrelas de modo rápido e eficiente, cessando a formação estelar cedo na história cósmica. As menos massivas mantêm atividade por mais tempo e são mais suscetíveis a influências ambientais. Observações mostram que ventos estelares e jatos de SMBHs podem expulsar ou aquecer o gás, regulando – ou mesmo interrompendo – novos ciclos de formação estelar, e compreender essa retroalimentação é um dos maiores desafios em simulações hidrodinâmicas. A relação entre a formação estelar e o crescimento de buracos negros centrais ainda é mal compreendida: embora se observe uma correlação entre a massa do buraco negro e a do bojo, os mecanismos causais dessa coevolução permanecem um mistério aberto.

Outro desafio importante é entender como surgem e evoluem os diversos componentes galácticos — disco, bojo, braços espirais e halo estelar. Evidências observacionais indicam que fusões entre galáxias, interações gravitacionais e instabilidades internas moldam essas estruturas de forma dinâmica. Fusões de galáxias e instabilidades internas resultam em movimentação global do gás, alterando a distribuição de metais e gerando acúmulos de gás que desencadeiam surtos de formação estelar. Esses surtos ocorrem tanto na escala global (impactando o sistema como um todo) quanto na escala local, e.g., quando barras direcionam gás ao centro e produzem surtos de formação estelar nucleares. O estudo das dinâmicas internas e de gradientes de metalicidade mapeados por espectroscopia integral de campo (e.g., MUSE, MANGA e SAMI, entre outros) oferece uma cronologia dinâmica e química valiosa, conectando observação e teoria.

O ambiente também exerce papel fundamental, modulando a formação estelar. Em aglomerados densos, mecanismos como a pressão de arraste (onde o gás quente retido pelo potencial gravitacional global do aglomerado retira o gás frio da galáxia conforme esta se insere no aglomerado) aceleram o fim da formação estelar. Isso resulta em uma sobre-incidência de galáxias passivas e vermelhas (por conta de uma emissão dominada por estrelas velhas que emitem preferencialmente nas bandas mais vermelhas) nas regiões mais densas de aglomerados de galáxias, enquanto galáxias com maior atividade de formação estelar (e portanto, com estrelas jovens e massivas que emitem fortemente nas bandas mais azuis) nas beiradas destas grandes estruturas: a dita “relação morfologia-densidade” onde galáxias elípticas são frequentemente encontradas nas regiões centrais de aglomerados e galáxias espirais, nas partes mais periféricas. Já em filamentos da rede cósmica, o suprimento contínuo de gás frio pode sustentar a atividade por mais tempo. Mapear sistematicamente essa dependência ambiental é crucial para compreender a diversidade em propriedades (e.g., morfologia, taxas de formação estelar, massa estelar e atividade de crescimento de SMBHs) das galáxias.

Grandes Levantamentos Astronômicos, Observatórios e Instrumentos de Próxima Geração

A chave para decifrar a evolução das galáxias está em reunir amostras estatisticamente robustas, cobrindo amplos intervalos de tempo cósmico. Para isso, a astronomia internacional entrou na era dos grandes levantamentos observacionais, que combinam imageamento profundo e espectroscopia em grandes áreas do céu em sinergia com telescópios espaciais e terrestres.

Atualmente, destacam-se os seguintes projetos:

- James Webb Space Telescope (JWST) – em operação desde 2022, o JWST tem revolucionado a astronomia extragaláctica ao observar as primeiras galáxias formadas no Universo, revelar como o gás colapsa em halos de matéria escura e mapear, com detalhe inédito, o crescimento estelar e dos buracos negros até $z \sim 10$. Suas imagens e espectros infravermelhos também mostram a estrutura interna de galáxias mais próximas, permitindo ligar, num mesmo observatório, a formação inicial à evolução madura dos sistemas. Um exemplo dessa capacidade é o COSMOS-Web, levantamento profundo que usará o JWST para catalogar mais de um milhão de galáxias, criando a referência de alta resolução que calibrará Euclid, Roman e LSST na próxima década.
- Euclid – lançado em 2023, iniciou observações científicas em 2024. Seu Wide Survey cobrirá cerca de $15\,000\text{ deg}^2$ com resolução espacial próxima à do telescópio espacial Hubble, em bandas ópticas e no infravermelho próximo, além de espectroscopia de baixa resolução nesse mesmo intervalo de comprimentos de onda. Medindo as formas de mais de 1,5 bilhão de galáxias até $z \sim 2$ e obtendo redshifts para dezenas de milhões, Euclid cartografará a distribuição de matéria escura e a evolução da estrutura cósmica, estabelecendo a linha de base estatística para estudos de energia escura, crescimento de estruturas e formação de galáxias.
- Nancy Grace Roman Space Telescope – com lançamento previsto para o fim da década, o Roman realizará levantamentos mais profundos em área menor ($\sim 2\,000\text{ deg}^2$), usando um campo de visão $100 \times$ maior que o Hubble e sensibilidade superior no infravermelho próximo. Seu High Latitude Survey complementarará o Euclid ao atingir galáxias mais tênues, refinando medições de lenteamento fraco e estendendo o censo de galáxias até $z \sim 3$. A espectroscopia com grisma fornecerá redshifts e linhas de emissão para milhões de objetos, permitindo rastrear, em detalhe, a história de formação estelar, a montagem de massa e a influência ambiental na evolução das galáxias ao longo de 10 Gyr.
- Vera C. Rubin Observatory / LSST – com *first light* em 2025, mapeará $\sim 18\,000\text{ deg}^2$ do céu austral durante dez anos, revisitando cada campo centenas de vezes em seis bandas ópticas. Entregará fotometria e morfologias para > 20 bilhões de galáxias até $z \sim 1$, medições de lenteamento fraco para cosmologia, estatísticas sem precedentes sobre interações, fusões e variabilidade em núcleos ativos, além de séries temporais que revelarão supernovas e a evolução estrutural das galáxias em diferentes ambientes. A profundidade e a cadência farão do LSST um pilar para conectar a evolução

estrutural das galáxias ao ambiente e a fases transitórias de formação estelar e atividade nuclear.

- SPHEREx – lançado em 2025, realizará o primeiro levantamento espectrofotométrico de todo o céu no infravermelho próximo. Seus mapas trarão um catálogo de > 1 bilhão de fontes com espectros de baixa resolução, permitindo estudar a história de formação estelar, a distribuição de poeira e a evolução química das galáxias em uma ampla faixa de distâncias cósmicas. Esses dados servirão de ponte entre levantamentos ópticos de grande área e observações profundas de alta resolução, oferecendo contexto estatístico essencial para investigar a formação e o destino das galáxias.
- Levantamentos de espectroscopia integral de campo (MaNGA, SAMI, MUSE) – O MaNGA (SDSS-IV) obtém espectros espacialmente resolvidos para $\approx 10\,000$ galáxias de redshifts baixos a intermediários, fornecendo um panorama estatístico sem precedentes dos gradientes de metalicidade, idades estelares e campos de velocidade internos. O australiano SAMI aplica metodologia similar a $\approx 3\,000$ galáxias, complementando o MaNGA ao explorar ambientes mais extremos (aglomerados densos, grupos) e oferecendo outro conjunto controlado para análise populacional. Já o MUSE, instalado no VLT, alia o poder coletor de um telescópio de 8 m a alta resolução espacial e espectral, permitindo dissecar populações estelares, regiões H II e cinemática fina em galáxias próximas e distantes. A sinergia entre amostragem estatística volumosa (MaNGA + SAMI) e detalhamento físico de alta resolução (MUSE) constrói um retrato completo da evolução das galáxias, unindo escala populacional e processos internos em nível de poucos parsecs.
- VLT / VISTA e grandes levantamentos espectroscópicos óptico-NIR (MOONS, 4MOST, DESI, ERIS) – MOONS, o novo espectrógrafo multiobjeto óptico-NIR do VLT, e 4MOST, instalado no VISTA, gerarão redshifts, metalicidades e mapas cinemáticos para milhões de galáxias ao longo de uma vasta faixa de distâncias; o DESI, já em operação no telescópio Mayall, cartografa a distribuição tridimensional de galáxias e quasares com precisão inédita, refinando limitações sobre energia e matéria

escuras; e o ERIS, imager / espectrógrafo NIR de alta resolução do VLT, complementará esses levantamentos com observações focadas na dinâmica interna e nos episódios de formação estelar em galáxias próximas e distantes.

- Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) – em operação desde 2013, o ALMA revolucionou os estudos de galáxias ao mapear, com resolução sub-arcsegundo, o gás molecular e a poeira que alimentam a formação estelar e os buracos negros supermassivos, desde galáxias anãs locais até sistemas intensamente formadores de estrelas a $z > 6$. As atualizações do programa ALMA2030 (faixas de frequência mais largas, receptores de maior sensibilidade e correlador aprimorado) dobrarão a largura de banda e aumentarão significativamente a eficiência, possibilitando levantamentos rápidos de grandes amostras e imagens ainda mais detalhadas de discos, barras e fluxos de gás em galáxias próximas e distantes. Essas melhorias manterão o ALMA como laboratório essencial para entender como a matéria-prima fria se converte em estrelas e estrutura galáctica ao longo da história do Universo.
- ngVLA (Next Generation Very Large Array) – com operações previstas para 2031, combinará centenas de antenas em uma rede que cobrirá frequências de 1,2 a 116 GHz, preenchendo a lacuna entre o desempenho do ALMA em comprimentos de onda menores e o futuro SKA em comprimentos de onda maiores. Oferecerá um salto significativo em sensibilidade e resolução em relação aos radiotelescópios atuais, permitindo mapear o gás molecular frio em galáxias próximas e distantes com resolução de poucos parsecs e, assim, ligar diretamente os reservatórios de gás às taxas de formação estelar, ao crescimento de buracos negros supermassivos e à evolução química dos sistemas ao longo do tempo cósmico, entre outras pesquisas.
- Square Kilometre Array (SKA) – apoiado pelos pathfinders já em operação MeerKAT (África do Sul) e ASKAP (Austrália), o SKA formará o maior radiotelescópio do mundo. Seu legado para a ciência de galáxias será o censo definitivo do gás neutro (H I), do Universo local até $z \sim 2$, revelando como o fluxo de gás alimenta as galáxias, como interações o removem em aglomerados e como a disponibilidade de H I regula o ritmo de formação estelar.

O Brasil colabora ativamente nos levantamentos fotométricos S-PLUS, J-PLUS e J-PAS, que mapeiam grandes áreas do céu com conjuntos de filtros ópticos de múltiplas bandas — 12 no S-PLUS e J-PLUS, e mais de 50 no J-PAS — possibilitando estimativas fotométricas de redshift, distribuição de metais e idades estelares para milhões de galáxias. Esses projetos complementam levantamentos

espectroscópicos e de imagem profunda ao fornecer catálogos homogêneos de populações estelares e parâmetros físicos, criando um elo essencial entre dados de alta resolução e grandes amostras estatísticas. No âmbito teórico e computacional, grupos brasileiros também integram consórcios de simulações cosmológicas de ponta, como IllustrisTNG, EAGLE e Magneticum, reforçando a capacidade nacional de confrontar observações e modelos de evolução galáctica.

Os volumes de dados gerados por esses projetos com participação brasileira – em escala de petabytes, com sensibilidade e resolução inéditas – exigem ciência de dados avançada, inteligência artificial e infraestrutura de HPC (High Performance Computing ou Computação de Alto Rendimento). A comunidade brasileira já dispõe de competências consolidadas em análise de big-data astronômico; com planejamento e investimento em HPC, o Brasil pode assumir posição de liderança científica nesses consórcios globais.

O momento atual apresenta uma chance estratégica para a astrofísica brasileira se posicionar como protagonista internacional em estudos de galáxias. O país já dispõe de grupos consolidados em áreas como análise de grandes volumes de dados, modelagem de espectros de galáxias, ambientes de aglomerados, evolução morfológica, e conexões com matéria escura e energia escura.

A próxima década será decisiva para responder quando e como as primeiras galáxias se formaram, de que modo o ambiente regula a formação estelar e qual é o papel dos buracos negros supermassivos na evolução desses sistemas.

Observatórios e levantamentos como JWST, Euclid e Roman no espaço, e na superfície terrestre o Rubin/LSST, os espectrógrafos MOONS e 4MOST no VLT/VISTA, além de radiotelescópios em operação ou construção — ALMA, ngVLA e SKA com seus pathfinders MeerKAT e ASKAP — oferecem uma visão multi-banda sem precedentes, que cobre desde o gás neutro e molecular até as populações estelares resolvidas de bilhões de galáxias.

O Brasil já atua de forma decisiva em várias frentes dessa agenda, sustentado por grupos consolidados em análise de grandes volumes de dados, simulações cosmológicas e instrumentação óptica, infravermelha e de rádio. Ao aprofundar essa participação — assumindo responsabilidades na exploração científica dos grandes levantamentos — o país converte seu potencial em liderança efetiva, produz resultados originais e coloca a comunidade brasileira no primeiro plano das pesquisas sobre a origem e o destino das galáxias.

V. A Via Láctea e o Lugar da Terra no Universo

Responder simultaneamente às perguntas “Qual é o lugar da Terra no Universo?” e “Como a Via Láctea constrói esse cenário?” exige muito mais do que posicionar nosso planeta em coordenadas cósmicas: requer entender a trajetória da própria Galáxia — desde sua montagem inicial, o enriquecimento químico de seus discos, halo e bojo, até os ambientes dinâmicos que propiciaram a formação do Sol. Ao investigar a história da Via Láctea, elucidamos os processos que governam a formação de estrelas, discos protoplanetários e exoplanetas, conectando a diversidade de mundos habitáveis que encontramos (ou ainda encontraremos) ao pano de fundo galáctico que os nutre. Assim, o estudo conjunto da estrutura e evolução da Via Láctea, da caracterização detalhada das estrelas que a compõem e da multiplicidade de sistemas planetários que abriga é fundamental para decifrar o contexto cósmico que permitiu a existência da Terra — e para avaliar quão comuns podem ser cenários semelhantes em nossa Galáxia.

Explorando a Formação e Evolução de Sistemas Planetários e Estelares

A formação e evolução de sistemas planetários, a caracterização de exoplanetas e o estudo profundo da evolução estelar são as chaves para decifrar o contexto cósmico que permitiu a existência da vida terrestre. O avanço de técnicas de detecção e caracterização de exoplanetas, aliado a observações multiespectrais de estrelas e discos protoplanetários, que já vêm revolucionando a ciência nos últimos anos, promete transformar ainda mais a nossa visão sobre a diversidade de mundos e sobre os caminhos possíveis para o descobrimento de planetas habitáveis nas próximas décadas. Este tema constitui, de maneira ampla, o estudo dos alicerces astrofísicos que definem o nosso lugar no Cosmos.

A Formação e Evolução de Sistemas Planetários

Nebulosas compostas por gás e poeira, em colapso gravitacional, dão origem às estrelas e, ao seu redor, aos discos protoplanetários — os berços dos planetas. Compreender a composição, a estrutura e a evolução desses discos é fundamental para conectar as condições iniciais da formação estelar à arquitetura final dos sistemas planetários. Avanços recentes revelaram uma diversidade surpreendente nos caminhos evolutivos desses sistemas, desafiando os modelos clássicos baseados exclusivamente no Sistema Solar.

Observações de alta resolução em múltiplos comprimentos de onda (óptico, infravermelho, submilimétrico) são essenciais para mapear discos de formação planetária, para realizar modelagens físico-químicas detalhadas que integrem hidrodinâmica, crescimento de grãos e migração planetária. Monitoramento temporal é importante para entender fenômenos dinâmicos como ventos, acreção e instabilidades. Esses estudos esclarecem os mecanismos que governam a evolução de discos protoplanetários e a formação de planetas rochosos e gigantes, bem como os fatores que levam à formação de zonas habitáveis.

Instrumentos como o Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) têm revolucionado o estudo de discos protoplanetários ao revelar anéis, lacunas e assimetrias com resolução sub-UA (menor que 1 unidade astronômica), sugerindo interações precoces com planetas em formação. Em sinergia, o James Webb Space Telescope (JWST) está abrindo novas janelas para a caracterização espectral de regiões internas e quimicamente ricas desses discos, especialmente em infravermelho médio.

A próxima geração de telescópios terrestres, como o Extremely Large Telescope (ELT) do ESO e o Giant Magellan Telescope (GMT), oferecerá resolução angular e sensibilidade sem precedentes, permitindo estudar a formação planetária em escalas espaciais que se aproximam da unidade astronômica para sistemas próximos. Essas capacidades serão essenciais para investigar a ligação entre subestruturas nos discos e a formação de planetas rochosos e gigantes.

Deteção e Caracterização de Exoplanetas

Desde a descoberta dos primeiros exoplanetas, ficou evidente que a diversidade de sistemas planetários supera amplamente nossas expectativas iniciais. Para compreender como a Terra se insere nesse espectro, é essencial expandir nossa capacidade tanto de detecção quanto, sobretudo, de caracterização desses sistemas, onde incluem-se:

- Melhorar a precisão dos métodos de trânsito, velocidade radial e astrometria, visando detectar planetas menores e mais distantes de suas estrelas;
- Avançar nas técnicas de espectroscopia de transmissão e emissão para sondar atmosferas planetárias em busca de bioassinaturas e condições compatíveis com a vida;
- Estabelecer estatísticas robustas sobre a ocorrência de exoplanetas, por meio de várias técnicas isoladas e combinadas, incluindo o método de

microlentes gravitacionais, ampliando a cobertura no espaço de parâmetros planetários — inclusive planetas similares à Terra em zonas habitáveis ($\eta\oplus$);

- Desenvolver missões espaciais dotadas de coronógrafos e interferômetros capazes de imagear diretamente exoplanetas ao redor de estrelas próximas;
- Investir em grandes levantamentos com instrumentos dedicados, promovendo a caracterização homogênea de amplas populações estelares e planetárias;
- Priorizar o estudo detalhado dos sistemas que compõem a vizinhança solar, onde a proximidade possibilita observações mais profundas e abrangentes.

Nesse cenário, missões dedicadas à caracterização atmosférica de exoplanetas, como a Ariel (ESA), que analisará em larga escala as atmosferas de centenas de exoplanetas, e a proposta HWO (Habitable Worlds Observatory), da NASA — voltada para imageamento direto e espectroscopia de mundos potencialmente habitáveis — serão peças-chave para investigar a diversidade de composições atmosféricas e buscar assinaturas da habitabilidade. Já na superfície da Terra, o espectrógrafo de alta resolução ANDES (ArmazoNes high Dispersion Echelle Spectrograph), do Extremely Large Telescope, com participação brasileira, complementarà essas missões ao medir velocidades radiais e espectros planetários com precisão ímpar, ampliando o leque de ferramentas disponíveis para a caracterização detalhada de exoplanetas.

A combinação de grandes levantamentos (como TESS, PLATO e o Roman Space Telescope) com instrumentos de alta precisão, operando em telescópios de pequeno e médio porte — como o Observatório do Pico dos Dias (OPD), o Southern Astrophysical Research Telescope (SOAR) e o Canada France Hawaii Telescope (CFHT) — será fundamental. Instrumentos especializados, como o SPARC4 (no OPD), o STELES (no SOAR) e o SPIRou (no CFHT), aliados a modos de operação voltados para surveys dedicados, otimizam o uso desses observatórios e ampliam sua relevância na caracterização detalhada de exoplanetas.

Além disso, o uso de telescópios de maior abertura como o Observatório Gemini e o envolvimento em telescópios de nova geração, como o Giant Magellan Telescope (GMT) e o Extremely Large Telescope (ELT), é de importância estratégica. Esses instrumentos alcançarão limites de magnitude e resolução angular sem precedentes, permitindo o estudo direto de estrelas em formação e de sistemas planetários ainda imersos em seus discos protoplanetários, além do acesso a uma população extremamente diversa de sistemas planetários em todos os

estágios de evolução. Tais capacidades tornarão viável a exploração de amostras mais completas e a descoberta de uma diversidade planetária ainda inimaginável.

Caracterização Profunda de Estrelas e Subestruturas Estelares

A compreensão precisa das estrelas que hospedam planetas é fundamental para interpretar corretamente os sistemas planetários. Parâmetros como massa, idade, composição química e atividade magnética afetam tanto a formação, capacidade de caracterização, quanto à habitabilidade dos planetas. Neste contexto, ressaltam-se as seguintes linhas estratégicas:

- Medir propriedades fundamentais de estrelas com precisão sem precedentes, integrando espectroscopia, fotometria, astrometria em séries temporais para estudo de ciclos de atividade, asterossismologia e variabilidade estelar;
- Estudar binaridade estelar e interações em sistemas múltiplos, que afetam diretamente a formação planetária;
- Investigar a metalicidade estelar e abundâncias específicas como preditores da composição planetária e como marcadores do histórico de formação do sistema planetário;
- Usar populações estelares como traçadores do histórico dinâmico e químico da Galáxia, com foco em sua relação com a formação planetária.

A caracterização detalhada das estrelas permitirá conectar populações planetárias a ambientes galácticos e históricos evolutivos distintos.

Evolução Estelar e o Ambiente da Habitabilidade

Estrelas evoluem, e com elas mudam as condições de habitabilidade de seus planetas. Compreender essa evolução é essencial para estimar as janelas de tempo nas quais a vida pode surgir e persistir. Neste contexto, destacam-se as seguintes linhas estratégicas:

- Modelos evolutivos estelares calibrados por observações em múltiplas fases da vida estelar;
- Estudo do impacto de ventos estelares, ejeções de massa e radiação de alta energia na atmosfera de exoplanetas;
- Exploração de zonas habitáveis em torno de diferentes tipos estelares, inclusive anãs M e estrelas subgigantes.

Esses dados permitirão construir uma cronologia precisa da habitabilidade nos sistemas estelares, incluindo o nosso próprio.

A Via Láctea

Compreender a Via Láctea — nossa galáxia natal — é fundamental para responder a algumas das questões mais profundas da astrofísica: Como as galáxias se formam e evoluem? Qual é a história do enriquecimento químico do cosmos? E, em última instância, qual é o lugar da Terra e da humanidade no Universo? Ao reconstruir a história da Via Láctea e de suas vizinhas, podemos traçar o caminho cósmico que levou à formação do Sistema Solar e da vida como a conhecemos.

Nas próximas décadas, avanços em levantamentos ópticos, espectroscopia e astrometria nos permitirão fazer um mapeamento sem precedentes da estrutura, composição e história dinâmica da nossa galáxia. Portanto, é importante manter uma agenda científica focada em revelar a arqueologia galáctica por meio de investigações sobre a formação estelar, o enriquecimento químico e a interação com galáxias satélites.

História Química e Formação Estelar no Disco, Halo e Bojo Galáctico

A distribuição de elementos químicos nas estrelas do disco fino, disco espesso, halo e bojo oferece uma cronologia detalhada do processo de formação estelar ao longo do tempo. Investigações espectroscópicas permitirão:

- Mapear gradientes químicos radiais e verticais;
- Determinar idades estelares com alta precisão;
- Estabelecer as taxas de enriquecimento químico em diferentes ambientes galácticos;
- Compreender as relações entre metalicidade, massa estelar e cinemática.

Esses dados serão cruciais para modelar a evolução galáctica e para diferenciar entre cenários de formação interna versus acreção externa.

A caracterização química detalhada das populações estelares depende diretamente do acesso a instrumentação espectroscópica de alta resolução e ampla cobertura espectral. Investimentos em instrumentos como o GHOST (Gemini High-resolution Optical SpecTrograph), recentemente instalado no Gemini Sul, e o

STELES, em fase de comissionamento no SOAR, são fundamentais para posicionar a comunidade nacional na fronteira da arqueoquímica galáctica. Esses espectrógrafos permitem determinar com alta precisão abundâncias de dezenas de elementos, incluindo traçadores de processos de nucleossíntese (α , ferro-pico, n-cap, etc.) e parâmetros atmosféricos estelares essenciais.

Complementarmente, a polarimetria de grande campo tem ganhado relevância no mapeamento da estrutura do meio interestelar. Instrumentos como o SouthPol, previsto para ser instalado no novo telescópio robótico de 1 metro do OPD, permitirão sondagens sistemáticas da polarização interestelar em larga escala. Esses dados são essenciais para:

- Traçar a geometria e intensidade do campo magnético galáctico, com implicações diretas na dinâmica da formação estelar;
- Mapear a distribuição de grãos de poeira e suas interações com o gás interestelar;
- Entender como o acoplamento entre campo magnético, gás e poeira afeta a estrutura e evolução do disco e do halo.

Para enfrentar o desafio de mapear grandes populações estelares de forma eficiente, também é prioritário o desenvolvimento e acesso a espectrógrafos multiobjetos com múltiplas fendas ou fibras ópticas instalados em grandes telescópios. Instrumentos promissores nesse contexto incluem o PFS (no Telescópio Subaru), o MOONS (no VLT) e o MSE (no CFHT), além de projetos emergentes no hemisfério sul voltados a levantamentos galácticos e extragalácticos. Tais espectrógrafos permitirão observar simultaneamente centenas de estrelas, viabilizando levantamentos de grande campo com precisão química e cinemática adequadas à arqueologia galáctica moderna.

A sinergia entre espectroscopia de alta resolução, polarimetria e levantamentos fotométricos e astrométricos de grande escala constituirá a base para uma reconstrução detalhada da história da Via Láctea e dos processos que moldaram o ambiente galáctico onde surgiu o Sistema Solar.

Populações Estelares Antigas, Galáxias Anãs e Fluxos Estelares

As populações estelares antigas são testemunhas diretas das primeiras fases da formação da Via Láctea. Galáxias anãs e fluxos estelares remanescentes de interações passadas são registros fósseis do processo de acreção hierárquica previsto pela cosmologia Λ CDM.

Combinando dados de astrometria (como os do Gaia), espectroscopia de alta resolução e fotometria profunda, poderemos:

- Identificar estruturas estelares subjacentes;
- Associar populações a progenitores extragalácticos;
- Determinar a contribuição das galáxias anãs na montagem do halo estelar;
- Medir as assinaturas químicas e dinâmicas de eventos de fusão antigos.

Interações com Satélites Galácticos e a Morfologia do Disco

As galáxias satélites em órbita da Via Láctea, como a Grande Nuvem de Magalhães e a Galáxia Anã de Sagitário, provocam perturbações no disco galáctico, gerando ondulações, barras e espessamentos verticais. Estudar essas interações nos permitirá:

- Avaliar os impactos dinâmicos de interações recentes e antigas;
- Inferir a massa do halo escuro da Via Láctea;
- Compreender como a acreção contínua molda a morfologia galáctica;
- Explorar como essas perturbações influenciam a formação estelar.

Modelagens dinâmicas e simulações cosmológicas calibradas por observações serão ferramentas-chave para este esforço.

A Arqueologia Galáctica por Meio de Levantamentos Ópticos

Levantamentos ópticos como Gaia, LSST (Vera C. Rubin Observatory), SDSS-V e futuros telescópios de grande campo permitirão a reconstrução detalhada da história da Via Láctea por meio da chamada arqueologia galáctica. Neste contexto, destacam-se as seguintes linhas estratégicas:

- Mapear bilhões de estrelas com posições, velocidades e composições químicas;
- Identificar estruturas subjacentes como correntes estelares, agregados dissolvidos e remanescentes de fusões;
- Derivar idades e trajetórias orbitais para grandes amostras de estrelas;
- Unificar dados observacionais com modelos teóricos em tempo real.

Esses levantamentos servem como base para a próxima geração de pesquisas em astrofísica galáctica.

A Terra não é apenas um pálido ponto azul no cosmos — ela é o resultado de uma complexa e longa cadeia de processos astrofísicos e químicos que conectam a

formação da Via Láctea à evolução de estrelas, planetas e, eventualmente, à emergência da vida. Com os avanços previstos para a próxima década, estaremos em posição de investigar, com precisão sem precedentes, tanto a estrutura e história química da nossa galáxia quanto a diversidade e as condições de habitabilidade de sistemas planetários em sua vastidão.

A busca por mundos semelhantes ao nosso, aliada ao mapeamento arqueológico da Via Láctea, ampliará nosso entendimento sobre como as galáxias se formam, como estrelas e planetas evoluem e sob quais circunstâncias a vida pode surgir. O presente levantamento propõe um caminho estratégico e integrado para enfrentar questões fundamentais tais como: somos uma raridade cósmica ou o resultado natural da evolução do Universo?

Compreender o lugar da Terra no Universo requer uma abordagem abrangente que una o estudo profundo da nossa galáxia — a Via Láctea — com a investigação detalhada da formação de estrelas, sistemas planetários e mundos habitáveis. As implicações observacionais, teóricas e de formação de pessoal delineadas acima convergem com as recomendações transversais apresentadas no final deste documento.

VI. A Vida no Cosmos: Possibilidades e Caminhos

A busca por vida fora da Terra representa uma das mais profundas e abrangentes questões científicas da atualidade. Essa investigação não apenas estimula a curiosidade humana, mas também mobiliza diversas disciplinas — da astrofísica e química interestelar à biologia, geofísica, ciência planetária e inteligência artificial. O objetivo central dessa empreitada é compreender como a vida pode surgir e evoluir em diferentes ambientes cósmicos, quais condições são necessárias para sua sustentação e qual seria o papel da vida em uma perspectiva cósmica.

A descoberta dos primeiros exoplanetas na década de 1990 marcou o início de uma nova era na astrofísica, transformando profundamente nossa compreensão sobre a formação e evolução de sistemas planetários. Em reconhecimento a esse avanço, o Prêmio Nobel de Física de 2019 foi concedido a Michel Mayor e Didier Queloz, pela detecção do primeiro planeta orbitando uma estrela do tipo solar, 51 Pegasi b, em 1995. Desde então, o número de exoplanetas confirmados ultrapassou 6.000, revelando uma diversidade surpreendente de tamanhos, composições e órbitas. Essa enorme variedade de planetas e arquiteturas orbitais extrapolou qualquer previsão anterior, desafiando os modelos clássicos baseados no Sistema Solar. Por

exemplo, os planetas mais abundantes em nossa Galáxia são super-Terras e mini-Netunos, planetas inexistentes em nosso Sistema Solar.

A seguir, apresentamos um conjunto articulado de questões que podem nortear o desenvolvimento de pesquisas interdisciplinares voltadas à caracterização da habitabilidade no Universo e à busca ativa por bioassinaturas. Um ponto de partida fundamental reside na compreensão dos caminhos químicos que conduzem à formação, evolução e estabilidade de moléculas complexas em ambientes astrofísicos. A astroquímica tem mostrado que nuvens moleculares interestelares, discos protoplanetários e atmosferas planetárias abrigam compostos orgânicos complexos, alguns dos quais são considerados precursores da vida. Mapear a diversidade e abundância dessas moléculas, utilizando espectroscopia de alta resolução, pode revelar os ingredientes disponíveis para a química prebiótica em diferentes fases da evolução cósmica.

A composição molecular dos ambientes astrofísicos é decisiva para a formação planetária. A presença de água, metano, dióxido de carbono e compostos nitrogenados, por exemplo, influencia diretamente as condições físico-químicas dos discos protoplanetários, afetando a formação de planetas rochosos e gasosos, bem como a possibilidade de retenção de atmosferas. Entender esses processos é essencial para avaliar a propensão de sistemas planetários à habitabilidade.

A formação e evolução dos sistemas planetários, por sua vez, é uma área em plena transformação. Dados de missões espaciais e observações por telescópios terrestres revelaram que a diversidade de sistemas planetários vai muito além do que se imaginava há poucas décadas. Questões fundamentais ainda permanecem em aberto: como se distribuem os planetas potencialmente habitáveis em torno de estrelas de diferentes tipos? Como as interações dinâmicas, migrações planetárias e perturbações gravitacionais moldam a estabilidade e as condições de seus ambientes?

As estrelas, com suas propriedades físicas e campos magnéticos, exercem papel crucial na habitabilidade planetária. A erosão atmosférica de exoplanetas é um processo fundamental para entender sua evolução e potencial habitabilidade, especialmente em sistemas orbitando estrelas ativas. Entre os mecanismos mais relevantes estão a fotoevaporação, causada pela absorção de fótons de alta energia (UV e raio X) que aquecem e expandem as camadas superiores da atmosfera até que elas escapem do campo gravitacional do planeta. Além disso, ventos estelares — fluxos contínuos de partículas carregadas — podem interagir com a atmosfera, removendo material por processos de arrasto e choque. Episódios de atividade estelar intensa, como explosões (flares) acompanhadas por emissões ultravioleta

extremas (EUV) e ejeções de massa coronal (CMEs), podem intensificar significativamente essas perdas atmosféricas, especialmente em planetas próximos à estrela hospedeira. Esses processos são particularmente importantes para planetas em torno de estrelas anãs M, onde a proximidade com a estrela os torna mais vulneráveis a essas formas de erosão, com consequências diretas para sua composição atmosférica e possível habitabilidade. A caracterização do clima espacial, especialmente em sistemas com planetas na zona habitável, torna-se, assim, uma prioridade.

Nesse cenário, os exoplanetas — especialmente os potencialmente habitáveis — ocupam posição de destaque. Estimativas atuais indicam que deve haver bilhões de planetas na Galáxia, dos quais uma fração significativa pode apresentar condições propícias à vida. A caracterização de suas atmosferas é um próximo passo. Novas gerações de telescópios espaciais e terrestres, como o James Webb Space Telescope e os observatórios ELT e GMT, permitirão a detecção e análise de atmosferas planetárias, inclusive com a possibilidade de identificar biomarcadores em mundos semelhantes à Terra.

A espectroscopia de transmissão é uma técnica poderosa para estudar a composição atmosférica de exoplanetas durante o trânsito, quando o planeta passa em frente à sua estrela hospedeira. Nesse momento, parte da luz estelar atravessa a atmosfera do planeta e é parcialmente absorvida por diferentes espécies químicas, deixando assinaturas espectrais características nos comprimentos de onda correspondentes. Ao comparar o espectro da estrela com e sem o planeta em trânsito, é possível inferir a presença de moléculas como H_2O , CO , CH_4 e Na , entre outras. Para extrair essas informações, utiliza-se o método de reconstrução atmosférica, que consiste no ajuste de modelos teóricos às observações espectrais, geralmente por meio de técnicas estatísticas como amostragem de Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC) ou *nested sampling*. Esses modelos consideram parâmetros como composição química, perfil de temperatura, presença de nuvens ou neblinas e estrutura de pressão, permitindo inferências quantitativas sobre a atmosfera observada. A combinação da espectroscopia de transmissão com técnicas de reconstrução atmosférica tem sido essencial para caracterizar atmosferas de planetas gigantes e, mais recentemente, de super-Terras e mini-Netunos, oferecendo pistas sobre sua origem, evolução e potencial habitabilidade.

A espectroscopia de alta precisão, aliada a métodos avançados de machine learning, está ampliando a sensibilidade dos instrumentos na detecção de sinais sutis. Técnicas de aprendizado de máquina são particularmente promissoras para identificar padrões complexos e não lineares em grandes volumes de dados, o que pode viabilizar a detecção de moléculas em desequilíbrio químico — como

oxigênio coexistindo com metano e vapor d'água — fortes indícios de processos biológicos ativos.

Astrobiologia

Nesse contexto, surge também a pergunta fundamental: a vida na Terra é um fenômeno exclusivamente local ou fruto de um processo de panspermia, em que compostos orgânicos, ou até mesmo formas microbianas, teriam sido transportadas por meteoritos ou cometas? Essa hipótese se conecta a investigações sobre a existência de vida em corpos do Sistema Solar, como Marte, Europa, Encélado e Titã. Esses mundos, com oceanos subterrâneos, atividade geotérmica ou ambientes ricos em compostos orgânicos, são alvos prioritários em missões de exploração astrobiológica.

A possibilidade de bioquímicas alternativas — isto é, formas de vida baseadas em solventes distintos da água ou estruturas moleculares não baseadas no carbono — amplia ainda mais o escopo das investigações. Explorar essa diversidade exige não apenas novas teorias, mas também instrumentação adaptada a detectar formas de vida radicalmente diferentes da terrestre.

A astrobiologia surge assim como eixo estruturador de um vasto programa de pesquisa. Ela engloba desde a detecção de bioassinaturas (sinais diretos ou indiretos da presença de vida) até o estudo de processos químicos prebióticos em ambientes planetários e interestelares. A investigação das condições que permitiram o surgimento da vida na Terra — especialmente em ambientes extremos, como fontes hidrotermais, lagos hipersalinos ou regiões com radiação intensa — fornece modelos importantes para a identificação de habitats potenciais em outros mundos.

Por fim, propõe-se também a promoção de estudos focados em ambientes extremos terrestres, como análogos naturais a habitats extraterrestres, especialmente nos campos da microbiologia, geoquímica e física de sistemas extremos. Esses estudos contribuem diretamente para a identificação de limites da vida e para o desenvolvimento de modelos aplicáveis à astrobiologia planetária.

Sistema Solar

A composição molecular de ambientes astrofísicos exerce influência direta sobre a formação planetária e a possível habitabilidade. A detecção de moléculas orgânicas

complexas em discos protoplanetários, por meio de instrumentos como o ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), já revelou que compostos precursores da vida estão presentes desde as fases iniciais da formação estelar. Entender como esses compostos se preservam, se transformam ou se acumulam em corpos sólidos é central para avaliar os caminhos da vida no cosmos.

Nessa perspectiva, o estudo dos meteoritos e dos processos de acreção planetária é essencial. Em particular, os meteoritos preservam registros primordiais dos materiais que compunham o Sistema Solar em seus primeiros milhões de anos. Investigações isotópicas e mineralógicas desses objetos podem fornecer pistas sobre a origem da água, compostos orgânicos e elementos voláteis fundamentais para a vida. A integração entre meteorítica, astroquímica e geociências planetárias deve ser incentivada como estratégia para desvendar a origem da vida e a evolução planetária.

Ainda no contexto do Sistema Solar, é necessário enfatizar também a importância dos pequenos corpos — asteroides, cometas e objetos transnetunianos — como testemunhos da formação e evolução do sistema planetário. Missões como OSIRIS-REx e Hayabusa2 ilustram o potencial científico do retorno de amostras desses corpos. Os estudos do cinturão de Kuiper e da região transnetuniana, por sua vez, fornecem acesso a uma população de objetos praticamente inalterados desde a origem do Sistema Solar, alguns dos quais podem conter materiais voláteis e orgânicos relevantes para a astrobiologia.

Mais recentemente, a passagem de objetos interestelares como ‘Oumuamua (2017) e 2I/Borisov (2019) introduziu uma nova dimensão ao estudo da matéria extraterrestre. A caracterização física e composicional desses corpos, que se acredita terem se originado em outros sistemas planetários, pode oferecer oportunidades únicas para investigar a diversidade de materiais em diferentes regiões da galáxia. O desenvolvimento de programas de vigilância e interceptação de tais objetos deve ser incentivado.

Outro campo de destaque é a astrogeologia, especialmente no que diz respeito a processos de impacto e à geologia de superfícies planetárias. As colisões cósmicas moldaram a história do Sistema Solar, influenciaram a composição atmosférica de planetas e luas, e possivelmente atuaram como gatilho para o surgimento da vida ao fornecer energia e matéria orgânica. A análise geológica de crateras, depósitos de impacto e morfologias de superfície em planetas e satélites é fundamental para reconstruir cenários de habitabilidade passada.

Além das questões astrobiológicas, a segurança da vida em nosso próprio planeta também merece atenção. Monitorar objetos potencialmente perigosos, como asteroides e cometas próximos à Terra, exige vigilância constante e desenvolvimento de estratégias de mitigação. O crescente problema do lixo espacial — resíduos de satélites, foguetes e detritos orbitais — também demanda soluções tecnológicas e acordos internacionais.

Por fim, a previsão do clima espacial, especialmente em resposta à atividade solar, é fundamental para proteger infraestruturas críticas, como redes de comunicação, satélites e sistemas de navegação. O avanço na modelagem do Sol e na compreensão de sua variabilidade ajudará a reduzir os impactos de tempestades solares em nosso planeta.

Observações

No plano observacional, a espectroscopia de alta resolução e o uso de técnicas espectro-polarimétricas têm papel central na caracterização de atmosferas planetárias, tanto dentro quanto fora do Sistema Solar. Avanços nos espectrógrafos como o ANDES (ArmazoNEs high Dispersion Echelle Spectrograph), previsto para ser instalado no ELT e que conta no seu desenvolvimento com a participação do Brasil, o telescópio PLANETS (Polarized Light from Atmospheres of Nearby ExtraTerrestrial Systems), que também conta com participação do Brasil na sua construção, e plataformas espaciais como o James Webb Space Telescope (JWST) permitirão detectar traços moleculares como oxigênio, metano, dióxido de carbono e vapor d'água em exoplanetas potencialmente habitáveis.

Esses instrumentos devem ser acompanhados por técnicas de ponta em processamento de dados e inteligência artificial, que permitam extrair assinaturas sutis em meio ao ruído. Algoritmos de machine learning e redes neurais profundas vêm sendo empregados para reconhecer padrões em curvas de luz, espectros atmosféricos e sinais de rádio, aumentando a sensibilidade na detecção de sinais astrobiológicos.

Nesse contexto, é fundamental propor investimentos contínuos em estudos de atmosferas exoplanetárias, com ênfase em espectroscopia de transmissão, emissão e reflexão, e na análise de desequilíbrios químicos atmosféricos como possíveis indicadores de processos biológicos ativos. Modelos teóricos de bioassinaturas em diferentes cenários planetários — mundos oceânicos, desertos, análogos à Terra primitiva — devem ser incorporados às bases de dados e estratégias de observação.

A participação do Brasil nesse cenário global de descobertas deve ser fortalecida, priorizando as parcerias já existentes e fomentando, por exemplo, a inserção do país em missões espaciais internacionais, além de novas colaborações com redes de pesquisa e a participação em grandes levantamentos astronômicos. Internacionalmente, a colaboração científica neste domínio é intensa e essencial. Destacam-se programas como os observatórios internacionais JWST, ALMA, VLT e TMT, o satélite TESS e PLATO (Planetary Transits and Oscillations of Stars), este último com participação do Brasil, e os futuros ELT e GMT, dos quais o Brasil poderia vir a ser parceiro.

No âmbito nacional, deve-se fortalecer iniciativas de estudo e monitoramento de asteroides próximos da Terra, como o projeto IMPACTON (Iniciativa de Mapeamento e Pesquisa de Asteroides nas Cercanias da Terra do Observatório Nacional), e redes de monitoramento de meteoros e bólidos, como o EXOSS Citizen Science Project e o Brazilian Meteor Observation Network (BRAMON), incentivando a sua expansão e a recuperação e estudo de meteoritos. Esses dados são valiosos para a compreensão da entrada de matéria extraterrestre na atmosfera terrestre, suas composições químicas e potenciais implicações astrobiológicas.

O estudo dos objetos transnetunianos e centauros também deve ser incentivado, fortalecendo os estudos sobre suas eventuais atmosferas, através de iniciativas como a Transneptunian Occultation Network (TON) e o projeto da Rede de Ocultações Sul-Americana (ROSA), nos quais o Brasil tem uma presença ativa.

Técnicas Computacionais Avançadas

O uso de High-Performance Computing (HPC) tem se tornado cada vez mais essencial na astrofísica moderna, especialmente nas áreas de detecção e caracterização de exoplanetas. O grande volume e complexidade dos dados obtidos por missões espaciais como Kepler, TESS e, mais recentemente, o JWST, exigem capacidades computacionais avançadas para o pré-processamento eficiente de curvas de luz, remoção de ruído e identificação de trânsitos planetários com alta precisão. Assim como o tratamento das curvas de luz de missões futuras, como o PLATO com participação de pesquisadores brasileiros, necessitará de computação de alta performance para tratamento de grandes volumes de dados.

Além disso, nos modelos de reconstrução atmosférica, o HPC permite a execução de algoritmos estatísticos intensivos — como MCMC e *nested sampling* — que requerem milhares a milhões de simulações para explorar o espaço de parâmetros e estimar incertezas de forma robusta. Isso é particularmente crítico quando se busca

inferir propriedades atmosféricas sutis a partir de espectros observacionais ruidosos ou com baixa resolução. O acesso à infraestrutura de HPC também facilita a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina para classificação automática de curvas de luz e detecção de assinaturas planetárias, contribuindo para acelerar a descoberta de novos exoplanetas e aprofundar nossa compreensão de suas atmosferas e condições físicas.

A discussão sobre a vida no cosmos deve refletir a complexidade e abrangência do tema, englobando desde os primeiros passos da formação do Sistema Solar até a busca por inteligência extraterrestre. O investimento em infraestrutura de observação, instrumentação científica, cooperação internacional e formação interdisciplinar é essencial para que o Brasil possa se inserir de forma competitiva e relevante nesse esforço global, contribuindo não apenas com observações e análises, mas também com ideias originais e abordagens inovadoras. A vida no Universo é uma fronteira científica, filosófica e cultural — e é tempo de colocá-la no centro de nossas prioridades de pesquisa.

Diante desse panorama, a agenda científica sobre a vida no cosmos converge para três grandes frentes interligadas de ação:

- 1. Caracterizar atmosferas de exoplanetas e buscar bioassinaturas**
Utilizar espectroscopia de transmissão, emissão e reflexão, aliada a modelos de reconstrução atmosférica, para detectar moléculas e sinais de desequilíbrio químico em planetas potencialmente habitáveis, visando identificar possíveis bioassinaturas.
- 2. Investigar corpos do Sistema Solar como pistas para a origem e persistência da vida**
Estudar Marte, Europa, Encélado, Titã e outros corpos com potencial astrobiológico, bem como meteoritos, cometas e objetos transnetunianos, para compreender a distribuição de compostos orgânicos, água e atividade geológica que possam sustentar ou preservar vida.
- 3. Compreender o impacto da atividade estelar e do clima espacial na habitabilidade**
Investigar como flares, ejeções de massa coronal e ventos estelares afetam atmosferas planetárias, com foco em processos de erosão atmosférica e estabilidade de ambientes em zonas habitáveis, especialmente em torno de estrelas anãs M.

A comunidade brasileira se posiciona para contribuir de forma decisiva às grandes questões sobre a vida no Universo, em total sinergia com os demais eixos deste documento — o Universo escuro, a física de extremos, formação de galáxias, arqueologia estelar e ciências planetárias. As oportunidades que se abrem, sejam elas em missões espaciais, grandes levantamentos ou infraestrutura computacional, reforçam a necessidade de ações transversais e coordenadas, apresentadas a seguir, como recomendações gerais.

VII. Recomendações Transversais e Oportunidades para a Astrofísica Brasileira

Estamos à beira de uma nova era de descobertas transformadoras no campo da astronomia. Ao combinar levantamentos observacionais em larga escala, novas gerações de telescópios e modelos teóricos avançados, seremos capazes de nos posicionar como comunidade dentro de um panorama internacional ambicioso, mas realizável. O conjunto de grandes questões aqui detalhadas — da matéria escura às condições para a vida, passando pela física de extremos, pela formação de galáxias e pela arqueologia da Via Láctea — aponta para prioridades comuns que exigem coordenação nacional e cooperação internacional. A seguir sintetizamos as recomendações que emergem de todos os temas.

1. Fortalecer infraestrutura observacional multiescala, promovendo a sinergia entre facilidades espaciais e terrestres atuais e futuras

- Observatórios espaciais de grande escala (Euclid, Nancy Grace Roman, SPHEREx, Athena, PLATO, TESS, Ariel e o futuro HWO): assegurar adesão formal a consórcios internacionais, participação em equipes científicas e acesso rápido aos dados; preparar pipelines nacionais para ingestão, calibração e análise de levantamentos cosmológicos, astrofísica galáctica e exoplanetas, além de estratégias de acompanhamento a partir de facilidades na superfície da Terra que maximizem o retorno científico.
- Na superfície da Terra, facilidades existentes de ponta (ALMA, ESO/VLT, LSST/Vera C. Rubin Observatory) e de próxima geração

(ELT, GMT, CTAO, SKA): consolidar o envolvimento científico e técnico da comunidade astronômica brasileira em telescópios de ponta em funcionamento e de nova geração, promovendo acordos de adesão, garantindo por um lado a inserção da comunidade brasileira como agente de peso nos espaços decisórios e, por outro, visando acesso a tempo de telescópio que promovam o crescimento de uma massa crítica de usuários brasileiros. No contexto de astronomia multimessageira e física em condições extremas, participar de forma estruturada em facilidades como LIGO-Índia, Einstein Telescope, LISA, IceCube-Gen2, KM3NeT, assim como na construção de CTAO, ASTRI Mini-Array e SWGO, garantindo expertise em rápidas respostas a alertas transientes.

- Rede nacional (OPD, SOAR, Gemini, CFHT): modernizar óptica, instrumentação (SPARC4, STELES, SPIRou, SouthPol) e modelos de operação para levantamentos e monitoramento de longo prazo; incentivar a criação de redes nacionais do tipo AMON (Astrophysical Multimessenger Observatory Network) para distribuição em tempo real de alertas (óptico, raio-X, rádio) e desenvolvimento de follow-up automático em telescópios de 1-4 m.
- Estímulo a parcerias internacionais e consolidar centros nacionais com infraestrutura adequada para observação, simulação e análise de dados astrobiológicos e astroquímicos.
- Proteção do céu: políticas de mitigação de constelações de satélites e de poluição luminosa, articuladas com órgãos ambientais e agências espaciais.

2. Construir capacidade computacional e de ciência de dados

- Criar um Centro Nacional de Astrofísica de Dados e Simulações, integrado à rede SINAPAD (Sistema Nacional de Processamento de Alto Desempenho) — com possível hospedagem inicial em unidades já consolidadas, como o LNCC —, oferecendo computação de alto rendimento (HPC) em escala de petabytes, nuvem pública para dados abertos e suporte a inteligência artificial (IA). Como

referência, o Data Center do LIneA, atualmente no LNCC, já opera com > 1 000 cores (~100 Tflops), 570 TB de banco de dados e serviços de JupyterHub acessíveis à comunidade

- Aplicar técnicas computacionais avançadas para análise de grandes volumes de dados astronômicos — e.g., curvas de luz, dados multi-banda, espectros, sinais multimensageiros. Isso amplia a capacidade de detectar e caracterizar fontes variadas — de exoplanetas a transientes extremos — e exige acesso permanente a centros HPC nacionais.
- Criar programas de formação em IA, aprendizado de máquina e análise de big-data aplicados à astronomia.

3. Promover sinergia Observação ↔ Teoria ↔ Simulação

- Desenvolver e aplicar modelos físico-químicos e/ou dinâmicos em diferentes escalas, incluindo:
 - (magneto)hidrodinâmica, enriquecimento químico, formação estelar e interação gravitacional em galáxias;
 - migração planetária em discos sub-galácticos; e
 - reconstrução atmosférica de exoplanetas, combinando espectroscopia de transmissão, emissão e reflexão para detectar bioassinaturas e sinais de desequilíbrio químico em mundos potencialmente habitáveis.
- Calibrar simulações hidrodinâmicas e cosmológicas (IllustrisTNG, EAGLE, TNG50, entre outras) com levantamentos observacionais (Gaia, LSST/Observatório Vera C. Rubin, SDSS-V, J-PAS, Euclid, entre muitos outros).
- Consolidar pipelines abertos que unam fotometria, astrometria, espectroscopia, polarimetria e asterossismologia em repositórios unificados e interoperáveis de forma eficiente e acessível (FAIR – da sigla em inglês: Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable), fomentando ciência aberta e reprodutível.
- Promover parcerias interdisciplinares para modelagem de processos acoplados – integrar dados observacionais, teoria e simulações por

meio de colaborações entre diferentes áreas (e.g., astrofísica, física solar, geociências e ciência de dados), a fim de construir modelos que conectem fenômenos de uma escala (e.g., atividade estelar) a suas consequências em outra (e.g., evolução de atmosferas planetárias) e, de forma análoga, outros cenários multiescala nas diferentes áreas temáticas.

4. Impulsionar formação de recursos humanos, Inclusão e Interdisciplinaridade

- Expandir bolsas de formação (iniciação científica → pós-doc), com ênfase em jovens de grupos sub-representados, e programas de mobilidade internacional de longa duração.
- Estimular colaborações interdisciplinares, criando programas que integrem astronomia, astrofísica, física de partículas, engenharia, ciência de dados, química, biologia, física solar e geociências – para fomentar inovação, novas tecnologias e transferência de conhecimento.

5. Fortalecer governança e financiamento

Com a combinação de novos telescópios, parcerias internacionais e poder computacional crescente, a astronomia coloca o Brasil diante de uma escolha estratégica: ser mero usuário de grandes descobertas ou participar ativamente de sua construção. Cada real investido nesta agenda retorna em três frentes concretas:

- Formação de talentos altamente qualificados — jovens treinados em ciência de dados, instrumentação de precisão e inteligência artificial, competências centrais para a economia digital.
- Geração de tecnologias exportáveis — detectores criogênicos, óptica adaptativa, algoritmos de aprendizado profundo e infraestrutura de supercomputação que transbordam para setores como saúde, energia e segurança.

- Projeção internacional do país — liderança científica em colaborações globais, atração de parcerias industriais e reforço da imagem do Brasil como provedor de conhecimento de fronteira.

Apostar na investigação da natureza oculta do Universo, do Universo em Condições Extremas, da origem e o destino das Galáxias, da Via Láctea e o Lugar da Terra no Universo, e da vida no Cosmos não é apenas buscar respostas cósmicas; é cultivar inovação, soberania tecnológica e inspiração coletiva. O Brasil, ao articular sua comunidade astronômica em torno desses temas, pode não apenas se manter alinhado com a fronteira do conhecimento, mas contribuir de forma original e significativa. Essa inserção estratégica exige planejamento, investimento e vontade política, mas representa um caminho de alto retorno científico, educacional e tecnológico. Mais do que uma questão de ciência, trata-se de uma oportunidade de desenvolvimento nacional. A capacidade de interpretar grandes volumes de dados, formar quadros qualificados e integrar redes internacionais de conhecimento é um ativo estratégico para o século XXI. Ao investir em pesquisa de ponta em astrofísica, o Brasil fortalece não apenas seu sistema de ciência e tecnologia, mas sua soberania científica, seu capital humano e sua capacidade de imaginar e construir futuros possíveis.