

Revista
Brasileira de
**ASTRO
NOMIA**

Produzida pela Sociedade
Astronômica Brasileira

Volume 8 | Número 30
Ano 2026

Espaço-Tempo

Matéria e Energia Escuras

Divulgação da Astronomia em Valinhos

Simulações Cosmológicas



Editorial

A astronomia é uma ciência eminentemente observacional. No entanto, quando buscamos compreender a evolução do Universo, especialmente nos seus momentos iniciais, esbarramos em um limite fundamental: não podemos viajar no tempo para testemunhar o processo de formação das primeiras galáxias e das estruturas em larga escala logo após o Big Bang. O universo primitivo nos deixou pistas, como a radiação cósmica de fundo, mas a intrincada teia cósmica que vemos hoje levou bilhões de anos para se tecer. Para testar nossas hipóteses científicas em cenários onde a observação direta do passado é impossível, os astrônomos modernos recorrem a simulações em supercomputadores.

As simulações cosmológicas funcionam como pontes entre as teorias físicas e a realidade observável. Ao alimentarmos esses sistemas com as leis da gravidade, da hidrodinâmica e da física de partículas, conseguimos dar "início" à evolução do universo e assistir ao colapso da matéria escura moldando o nascimento das primeiras estruturas. O artigo de destaque desta edição detalha como esses modelos computacionais avançados têm refinado nosso entendimento sobre a evolução galáctica e os limites do modelo cosmológico padrão.

Dois outros artigos desta edição abordam assuntos correlatos: a gradativa construção do conceito de espaço-tempo e a perturbadora constatação de que continuamos sem respostas claras acerca das componentes escuras do universo – com o perdão do trocadilho.

Finalizamos a edição com uma descrição das atividades de divulgação e ensino realizadas pela equipe de funcionários e monitores do Observatório Abrahão de Moraes, que nos mostra como a atividade do astrônomo profissional não pode ser apartada do público que o financia através dos impostos.

Helio J. Rocha-Pinto
Presidente da Sociedade Astronômica Brasileira

Esquerda

Detalhe da nuvem molecular Orion A (Crédito: ESA/Webb, NASA & CSA, T. Megeath, M. Zamani).

Capa

Conjunção entre Júpiter e Vênus, em 14/03/2012 (Crédito: Science Museum Group/Science Photo Library).

Revista Brasileira de Astronomia

produzida pela

Sociedade Astronômica Brasileira

ISSN 2764-9423

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

Contato secretaria@sab-astro.org.br

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

Para submissões

Contacte um membro do conselho editorial



Presidente

Helio J. Rocha-Pinto

Vice-Presidente

Lucimara Martins

Secretária-Geral

Marina Trevisan

Secretário

Matthieu Castro

Tesoureira

Paula Coelho

Endereço

Sociedade Astronômica Brasileira

Rua do Matão, 1226

05508-090 São Paulo – SP

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

4 Simulações cosmológicas

Rodrigo de Freitas discute como as simulações de galáxias têm auxiliado a compreensão da evolução de galáxias.

12 Espaço-Tempo

João Pedro Custodio de Sousa faz um resumo sobre como a concepção de espaço-tempo foi construída a partir da interpretação dos fenômenos físicos.

19 Nébula no universo escuro

A gatinha Nébula também se questiona sobre o que seriam a matéria escura e a energia escura.

20 Matéria escura e energia escura

Pedro Moraes aponta que os componentes escuros do Universo podem indicar limites à lei de Gravitação.

27 Divulgação no OAM

Nesta parte final de uma série de três artigos sobre o Obs. Abraão de Moraes, Ramachrisna Teixeira fala sobre as atividades de divulgação científica que revitalizaram o observatório.

Simulações de formação de galáxias podem ser diretamente comparadas com os dados observacionais com vistas ao refinamento de nossas hipóteses sobre a evolução do Universo.

Há milênios a nossa espécie observa o céu e tenta entendê-lo. Representamos o céu observado por meio de mapas, acompanhamos sua evolução por calendários e, em exercícios mais ambiciosos, tentamos reproduzir a evolução dos astros com modelos matemáticos.

Descrever matematicamente a trajetória de um único planeta ao redor de uma estrela é um problema relativamente simples. No entanto, adicionar um terceiro corpo ao sistema (como uma segunda estrela) pode transformar o problema em uma equação sem solução analítica geral conhecida. Em outras palavras, não exis-

te uma fórmula matemática que nos diga onde cada corpo do sistema estará em qualquer instante futuro. Esse é o chamado problema dos três corpos: aparentemente simples, mas matematicamente desafiador. Exceto em alguns casos muito específicos, a única saída é integrar numericamente as equações de movimento, calculando posições e velocidades em pequenos e sucessivos passos de tempo. E se apenas três corpos nos colocam em tal nível de dificuldade, imagine modelar uma galáxia com centenas de bilhões de estrelas interagindo simultaneamente.

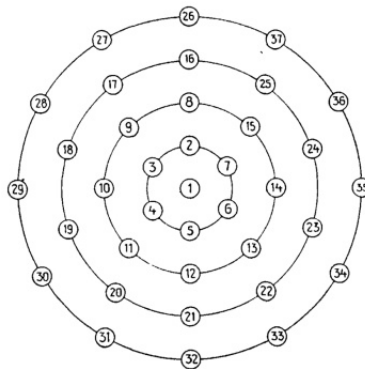
Essa limitação não é exclusiva da dinâmica planetária, mas tam-

bém permeia diversas áreas da astrofísica. Está presente na formação de aglomerados de estrelas, nas colisões entre galáxias e na distribuição de matéria em escalas cósmicas. Todos esses fenômenos envolvem um número tão grande de corpos em interação mútua que os métodos analíticos são insuficientes. Diante disso, as simulações computacionais tornam-se não apenas convenientes, mas indispensáveis para modelagens precisas. Calcular manualmente as posições e velocidades de apenas uma dezena de estrelas que interagem gravitacionalmente já seria impraticável, cansativo e exigiria muito papel! Por isso, dada a complexidade dos sistemas astrofísicos com muitos corpos, um caminho natural para modelá-los é utilizar o poder de cálculo dos computadores. Uma pessoa desavisada poderia pensar que o uso de tais máquinas seria um privilégio dos tempos atuais, mas isso não é verdade. Há mais de 2000 anos, os gregos antigos já haviam construído o primeiro computador analógico de que se tem re-

gistro (nomeado Mecanismo de Antikythera), com o claro propósito de explicar o movimento dos planetas conhecidos na época, prever eclipses e o nascer e o ocaso helíaco das constelações. Em certo sentido, podemos ver nesse antigo mecanismo a primeira tentativa de uma modelagem computacional dos astros, uma primeira simulação do cosmos (ou de uma parte dele). Muitos séculos depois, na década de 1940, antes mesmo do advento dos computadores digitais, foi executada a primeira simulação de galáxias por Erik Holmberg. Em um experimento engenhoso, ele utilizou lâmpadas para representar os elementos de massa de duas galáxias, e as forças gravitacionais entre elas foram calculadas a partir da medição dos fluxos de luz por meio de fotocélulas. Mesmo com essa rudimentar simulação de N corpos (em que N representa o número total de partículas simuladas), Holmberg foi capaz de representar o encontro entre duas galáxias (cada uma com apenas 37 lâmpadas) e mostrar que

Na página anterior
Projeção da distribuição das estrelas em uma das simulações do projeto IllustrisTNG (Crédito: TNG Collaboration).

Abaixo
Imagem à esquerda: Fragmento do Mecanismo de Antikythera (Crédito: Logg Tandy). Imagem central: Disposição das 37 lâmpadas utilizadas no experimento de Erik Holmberg em 1941. Imagem à direita: Supercomputador Frontier, primeiro supercomputador exascale do mundo (Crédito: Oak Ridge Leadership Computing Facility).



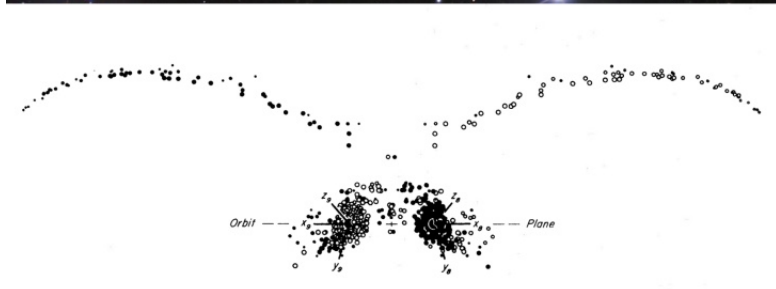
elas formavam caudas de maré à medida que a colisão ocorria.

Com o passar das décadas, computadores mais potentes se tornaram disponíveis à comunidade científica e o número de elementos de massa, também referidos como "partículas" no contexto de simulações de galáxias, cresceu significativamente. As simulações evoluíram tanto a ponto de, em 1972, Toomre & Toomre conseguirem reproduzir estruturas estelares muito semelhantes às observadas no par de galáxias NGC 4038 e NGC 4039 (as Galáxias Antenas). Os computadores e os métodos numéricos continuaram a evoluir, permitindo simulações cada vez mais complexas e de maior escala. Na década de 2000, observamos as primeiras simulações cosmológicas de larga escala que, além de representarem as

estrelas e a matéria escura de galáxias, também incluíam a modelagem de suas componentes gasosas. Essa crescente complexidade nas simulações reflete a própria natureza dos objetos que buscamos modelar. Galáxias são sistemas extensos, compostos por estrelas, gás, poeira, buracos negros supermassivos e a misteriosa matéria escura. Além disso, a formação e evolução de galáxias envolvem múltiplas escalas espaciais e temporais. Por esse motivo, as simulações mais sofisticadas e completas são fortemente fundamentadas em uma série de disciplinas, como cosmologia, hidrodinâmica, termodinâmica, astroquímica e evolução estelar. Além disso, para que uma simulação cosmológica reproduza fielmente a formação de estruturas, é preciso definir seu ponto de partida: as chamadas condições iniciais. As observações do fundo cósmico de micro-ondas (a radiação remanescente do universo primitivo, emitida quando ele tinha apenas 380 mil anos de idade) permitiram determinar com grande precisão as flutuações primordiais na densidade da matéria. Foram exatamente essas pequenas perturbações no plasma do universo jovem que, ao longo de bilhões de anos, amplificadas pela gravidade, deram origem a todas as estruturas que observamos hoje: galáxias, aglomerados e os imensos filamentos da chamada teia cósmica. Então, utilizando con-

Abaixo

Par de galáxias em interação, NGC 4038 e NGC 4039 (Crédito: ESA/Hubble). Imagem inferior: Projeção de uma das simulações de Toomre & Toomre no seu artigo de 1972, que tenta modelar o sistema NGC 4038/4039.

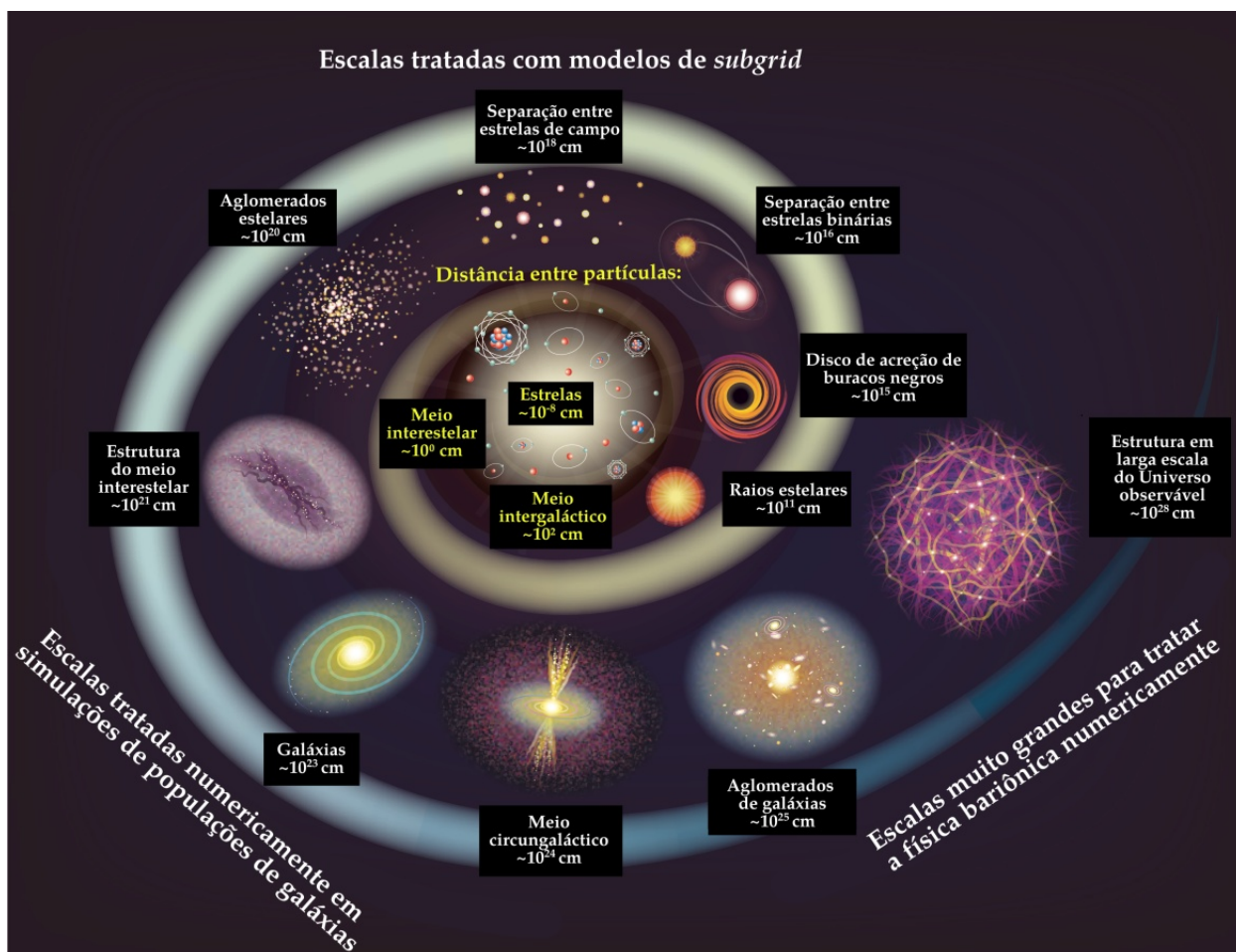


dições iniciais baseadas nos resultados obtidos pelos observatórios do fundo cósmico de micro-ondas e adotando um modelo cosmológico específico, temos o ponto de partida para simular pequenos universos virtuais.

No contexto da formação e evolução de galáxias, algumas das simulações mais ambiciosas já realizadas incluem a modelagem de volumes de algumas dezenas de megaparsecs (Mpc) ao longo de vários bilhões de anos, com cálculos autoconsistentes da evolução do gás, das estrelas e da matéria escura em um contexto cosmológico. Alguns exemplos de sucesso são as simulações Illustris-TNG, EAGLE, Simba, entre outras. Um problema inerente a tais simulações cosmológicas hidrodinâmicas é que, com recursos computacionais limitados, é necessário encontrar um equilíbrio entre a resolução espacial e o tamanho da caixa cosmológica simulada. Por esse motivo, até o momento, as simulações realizadas para entender os detalhes da formação das galáxias e de suas estruturas internas são normalmente limitadas a regiões com volume inferior a 100^3 Mpc³. Além disso, há um limite real de quão minuciosamente conseguimos fatiar o espaço e o tempo. Para sistemas que envolvem múltiplas escalas, como galáxias, torna-se impossível evitar que certos fenômenos ocorram em escalas menores do que a resolução da simu-

lação. Uma analogia útil é a dos modelos climáticos terrestres, que representam a atmosfera em células de alguns quilômetros de lado, mas cujos processos de formação de nuvens (que ocorrem em escalas muito menores) precisam ser descritos por meio de parametrizações aproximadas. O princípio é idêntico nas simulações de galáxias.

Nas simulações cosmológicas hidrodinâmicas, esse problema de escala é parcialmente contornado por modelos de *subgrid*, que tratam processos físicos em pequenas escalas (geralmente inferiores a alguns parsec) por meio de prescrições aproximadas. Um exemplo clássico desse tipo de modelo é o da acreção de matéria em buracos negros ativos no centro de galáxias, já que tais simulações cosmológicas não têm a resolução necessária para captar todos os detalhes do disco de acreção. Essas prescrições precisam levar em conta a energia que os buracos negros ativos emitem de volta para o gás da galáxia. Esse processo de injeção de energia no meio galáctico é o que os astrofísicos chamam de retroalimentação, ou simplesmente *feedback*. Dois tipos são especialmente relevantes para a regulação da evolução das galáxias. O primeiro, dominante em galáxias de menor massa estelar, é o *feedback* estelar: explosões de supernovas e ventos estelares provenientes de estrelas massivas injetam energia



Acima

Ilustração esquemática da ampla variação das escalas espaciais dos processos físicos que influenciam a formação e a evolução das galáxias (Crédito: Robert A. Crain & Freeke van de Voort/ARAA).

e momento no gás interestelar, aquecendo-o e, em alguns casos, expulsando-o da galáxia. O segundo, predominante em galáxias mais massivas, é o *feedback* de núcleos galácticos ativos: a acreção de gás pelo buraco negro supermassivo central libera enormes quantidades de energia, sob a forma de radiação intensa ou de poderosos jatos de partículas, o que pode afetar a formação de novas estrelas.

Apesar das limitações das grandes simulações descritas acima, elas são capazes, de forma geral, de reproduzir morfologias de galáxias observadas, como as espi-

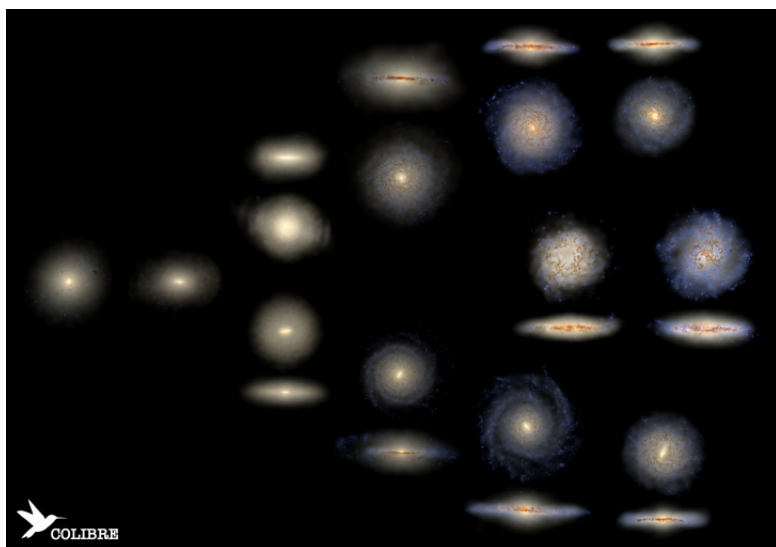
rais, elípticas, barradas e irregulares. Além disso, são capazes de prever como as galáxias podem perder gás ao entrarem em aglomerados, como se distribuem espacialmente em grandes escalas e qual fração de galáxias deixa de formar estrelas sob diferentes condições. Uma das propriedades mais importantes das galáxias é a quantidade de massa na forma de estrelas, ou seja, sua massa estelar. Ela está relacionada a uma série de outras propriedades físicas da galáxia, como a taxa de formação de novas estrelas, a metalicidade (a abundância

de elementos além do hidrogênio e do hélio) e o tamanho. As simulações mais recentes também são capazes de reproduzir, de forma geral, tais relações, porém utilizando diferentes modelos de *sub-grid* e técnicas distintas para simular pequenas porções de universos virtuais. O estudo dessas diferenças nas abordagens físicas de cada simulação é muito importante para entendermos os mecanismos que explicam o crescimento, a fusão, a evolução e o fim da formação de estrelas nas galáxias. Principalmente porque, apesar dos sucessos em reproduzir certos aspectos da população de galáxias, tais simulações ainda apresentam discrepâncias significativas em relação às observações. Por exemplo, é um problema conhecido que simulações cosmológicas hidrodinâmicas preveem que uma parte considerável das galáxias de baixa massa estelar (galáxias anãs) não esteja mais formando estrelas, mas verifica-se, justamente, o oposto nos dados observacionais. Há também o fato de os discos em galáxias simuladas não serem muito realistas e parecerem muito espessos quando comparados aos discos de galáxias observadas no Universo local. As primeiras simulações cosmológicas hidrodinâmicas capazes de criar galáxias com resolução razoável nos ensinaram uma lição crucial: a evolução das galáxias é fortemente regulada pelos processos de retroalimentação.

E tal lição veio justamente do entendimento de que as galáxias dessas primeiras simulações não eram compatíveis com as observações. Consequentemente, a melhora no realismo das simulações mais recentes se deu pela modificação dos modelos físicos de pequena escala implementados e pelo aumento na resolução.

Na prática, é essencialmente impossível criar uma simulação em que todas as partículas subatômicas do Universo sejam incluídas no cálculo. Por isso, para modelarmos a formação das galáxias em seu contexto cosmológico, precisamos recorrer a aproximações significativas. Felizmente, podemos aprender muito quando nossos modelos para explicar a natureza falham. Ao avaliar cuidadosamente os ingredientes desses modelos falhos, podemos entender quais mecanismos físicos são mais importantes para explicar as observações. Dessa forma, as simulações aqui descritas servem como ferramentas para investigarmos, de forma controlada, diferentes aspectos físicos na complexa evolução das galáxias. Mesmo que não sejam modelos perfeitos, as simulações de galáxias ainda assim contribuem para o avanço do nosso conhecimento. Parafraseando o estatístico George Box: todos os modelos estão errados, mas alguns são úteis!

A próxima geração de simulações cosmológicas poderá, idealmente, ampliar os limites não so-

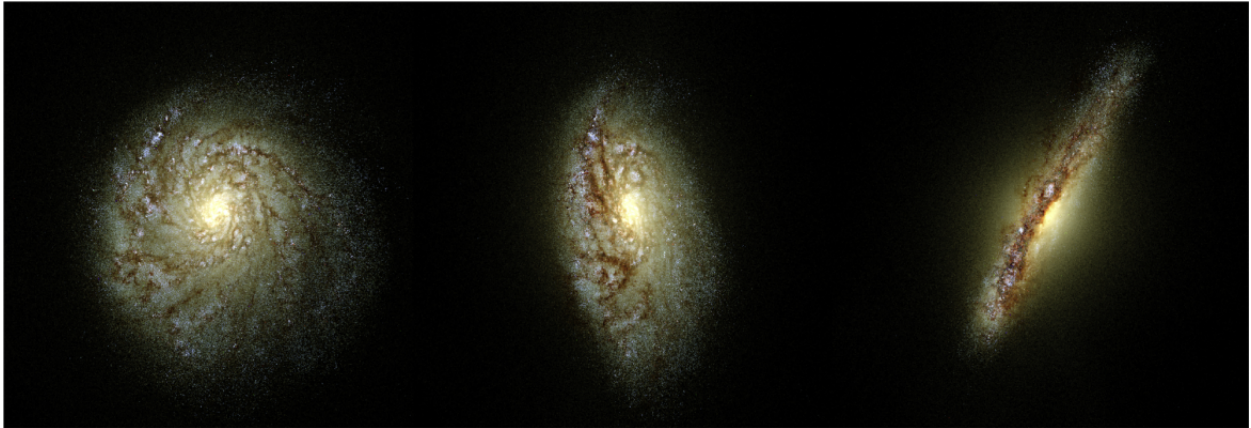


Acima

Sequência de Hubble representada por galáxias da simulação COLIBRE (Crédito: COLIBRE Team/Virgo Consortium).

mente em termos de resolução (com escalas cada vez menores sendo diretamente simuladas), mas também incluir um conjunto mais abrangente de processos físicos. Tais fenômenos relevantes incluem a inclusão de buracos negros de massa intermediária, a formação e evolução de aglomerados globulares, os efeitos dos raios cósmicos no meio interestelar e a modelagem do gás que leve em conta resfriamentos fora do equilíbrio termodinâmico. As melhorias descritas acima são difíceis de implementar, uma vez que, em princípio, exigem recursos computacionais adicionais para simulações que já são custosas. No entanto, esforços significativos estão sendo direcionados para melhorar a escalabilidade das simulações por meio de hardware, explorando a aceleração proporcionada por unidades de processamento gráfico (GPUs) e por unidades de processamento neurais (TPUs).

Os resultados observacionais obtidos até o momento, com observatórios recentes, como os telescópios James Webb e Euclid, constituem uma fonte importantíssima de comparação para a próxima geração de simulações cosmológicas que almejem modelar de forma fidedigna a população de galáxias em diferentes épocas cósmicas. Essa sinergia, contudo, é bidirecional. Ao mesmo tempo em que absorvem o legado dos telescópios atuais, as simulações ajudam a traçar planos para futuras campanhas de observação de instalações ainda em desenvolvimento (como o *Extremely Large Telescope*, o *Square Kilometre Array* e outros), prevendo onde e o que devemos procurar. Além desse viés prático, as simulações oferecem um laboratório virtual necessário para investigar modelos alternativos de matéria e de energia escura, ou modelos mais sofisticados e realistas de física bariônica na escala de galáxias. As comparações futuras entre simulações e observações idealmente poderão ocorrer de forma mais direta, com imagens de galáxias reais comparadas a imagens sintéticas de galáxias simuladas. Além disso, para comparar rigorosamente as previsões teóricas com as observações, será importante considerar os efeitos do caos determinístico (o famoso Efeito Borboleta). Em outras palavras, é importante considerar que pequenas variações nas con-



dições iniciais das simulações podem afetar significativamente as propriedades das galáxias geradas ao final do processo.

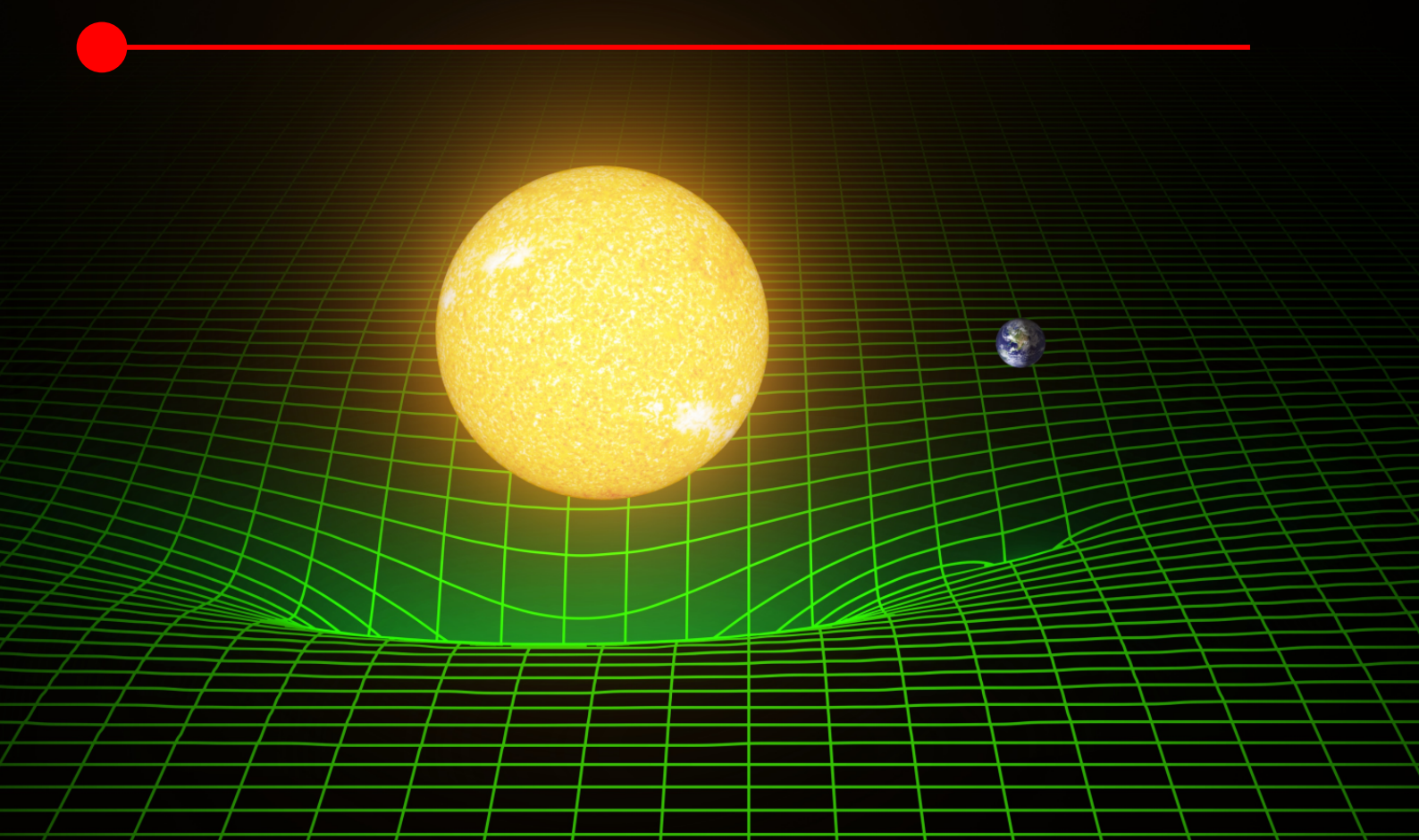
O leque de aplicações das simulações cosmológicas de galáxias é vasto. Elas servem como ferramenta essencial para testar modelos teóricos de formação de galáxias, possibilitando a comparação entre propriedades previstas e dados observacionais. Além disso, elas oferecem um meio de estudar a evolução de galáxias individuais ao longo do tempo e permitem o acesso a escalas e processos que não são diretamente observáveis. Assim como os antigos gregos foram capazes de modelar o cosmos conhecido à época com um mecanismo engenhoso, hoje temos o privilégio de simular porções inteiras do universo em máquinas que operam no limite do que é possível na computação. À medida que ampliamos esses limites (em resolução, em escala física e na riqueza dos processos incluídos), cada nova geração de simulações nos aproxima de um retrato mais fiel do cosmos

e das galáxias que o habitam. A sinergia entre novas observações e simulações cada vez mais realistas tem o potencial para revelar, nas próximas décadas, os segredos da formação das primeiras galáxias, a natureza da matéria escura e muito mais. Não é exagero afirmar que temos à frente uma era promissora para a astronomia extragaláctica e para a compreensão do nosso Universo •

Rodrigo Flores de Freitas
Universidade Cidade de São Paulo
rodrigoff.astro@gmail.com

Acima

Imagens simuladas de uma galáxia semelhante à Via Láctea, vista de três ângulos diferentes (Crédito: Desika Narayanan et al. 2021).



Espaço-Tempo

Einstein eliminou o éter e uniu tempo e espaço numa só estrutura. Mais de um século depois, ainda tentamos entender as consequências dessa junção.

O termo “cosmos” é um conceito que abrange tudo aquilo que existe, existiu e um dia existirá, compreendendo um universo complexo, ordenado e cronológico. O espaço-tempo é um conceito físico que pode ser compreendido como a estrutura de tudo aquilo que existe nesse cosmos.

Newton foi um dos primeiros a tentar descrever formal e matematicamente esse universo, sendo sua teoria uma das mais robustas e importantes até os dias de hoje. Na relatividade, o único

conceito que não é relativo, ou seja, que é absoluto e independente do referencial, é o de que a velocidade da luz no vácuo é a mesma em qualquer parte do universo. Além disso, todo referencial é relativo a outro, ou seja, não existe um referencial privilegiado, em que ele está parado e todo o universo está se movendo. Ao invés disso, tudo se move na estrutura do tempo e do espaço em relação a outro observador também inserido nessa estrutura. Essas duas premissas permitiram que Einstein pudesse solucionar (ou eliminar) o proble-

ma do éter, introduzindo uma nova fase para a física moderna. A partir disso, as equações de Einstein permitiram que Alexander Friedmann e Georges Lemaître inferissem teoricamente um cosmos dinâmico, abrindo caminho para que Edwin Hubble, anos mais tarde, observasse e comprovasse a expansão do Universo. A história do espaço-tempo exemplifica claramente por que devemos estudar a fundo, questionar com cautela e aprimorar continuamente os fundamentos das teorias que regem o paradigma científico vigente.

Contexto histórico

Em 1704, Isaac Newton (1643-1727), no livro *Third Book of Opticks*, sugeriu um conceito de “meio etéreo”, em que ao passar por meios mais densos, como a água, vidro e cristais, esse éter se tornaria mais rarefeito, como se esse éter não preenchesse aquela parte do espaço que os objetos se encontram, ou preenchesse parcialmente, fazendo com que os raios de luz se curvassem em fenômenos visualizados como a refração da luz. Ainda sugeriu que, em corpos celestes como estrelas, planetas e cometas, esse éter também se torna muito mais rarefeito que no espaço vazio entre eles. Newton especulou, principalmente em seus escritos sobre óptica, sobre a possível existência de um “meio etéreo” que poderia explicar fenômenos como a refra-

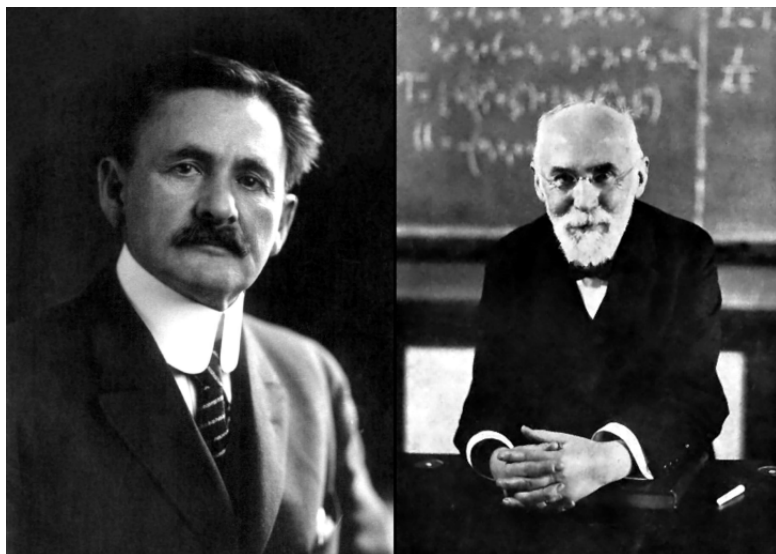
ção da luz. Ele chegou a sugerir que corpos celestes poderiam alterar a densidade desse éter ao seu redor, criando gradientes que influenciariam o movimento dos objetos. No entanto, essa ideia nunca foi integrada formalmente à sua teoria da gravitação — que era descrita como ação à distância, sem necessidade de um meio material.

Durante o século XIX, muito por causa da influência de Newton, a física clássica partia da ideia de que a luz precisava de um meio material para se propagar, o chamado éter luminífero, que supostamente preenchia todo o espaço e permanecia em repouso absoluto. Esperava-se que a velocidade da luz medida na Terra variasse conforme o movimento do planeta em relação a esse meio e essa suposição motivou diversos experimentos. O mais importante desses testes experimentais foi realizado em 1887 por Albert Michelson (1852-1931) e Edward Morley (1838-1923), com o objetivo de detectar diferenças na velocidade da luz em direções distintas. Caso a Terra estivesse se movendo através do éter, tais diferenças deveriam aparecer. No entanto, o experimento não encontrou qualquer variação significativa, produzindo um resultado inesperado que contrariava diretamente as previsões da física clássica da época.

Na tentativa de explicar esse resultado negativo, George Fitzge-

Na página anterior

Corpos com massa distorcem o espaço-tempo, como indicado pela teoria da relatividade geral (Crédito: T. Pyle/Caltech/MIT/LIGO Lab).



Acima

À esquerda: Albert Abraham Michelson, conhecido por seus experimentos cruciais em interferometria que questionaram a física clássica. À direita: Hendrik Antoon Lorentz, físico que desenvolveu as transformações matemáticas capazes de relacionar as coordenadas de espaço e tempo entre diferentes observadores.

rald (1851-1901) e, independentemente, Hendrik Lorentz (1853-1928) propuseram que corpos em movimento através do éter sofreriam uma contração em seu comprimento na direção do movimento. Essa contração faria com que os efeitos esperados nos experimentos ópticos fossem anulados. Embora essa hipótese resolvesse o problema de forma prática, ela foi introduzida sem uma justificativa física mais profunda, sendo vista como uma solução artificial. Lorentz desenvolveu então uma teoria mais elaborada, introduzindo transformações matemáticas que relacionavam as coordenadas espaciais e temporais de diferentes referenciais em movimento relativo. Essas transformações explicavam por que a velocidade da luz permanecia a mesma em todos os referenciais e também incorporavam efeitos que distorcem as componentes físicas da matéria e do tempo. Apesar disso, a teoria de Lorentz a-

inda dependia da existência do éter como um referencial privilegiado.

Henri Poincaré (1854-1912) contribuiu de maneira decisiva ao reconhecer o significado mais profundo dessas transformações. Ele mostrou que elas formavam um grupo matemático consistente e defendeu que as leis da física deveriam ter a mesma forma em todos os referenciais inerciais. Poincaré também destacou a dificuldade fundamental de detectar o movimento absoluto e apontou que o conceito de simultaneidade precisava ser reformulado, embora ainda mantivesse o éter em sua visão teórica.

A ruptura definitiva ocorreu em 1905, quando Albert Einstein (1879-1955) apresentou uma abordagem completamente nova. Em vez de tentar preservar o éter, ele eliminou sua necessidade. Einstein baseou sua teoria em dois postulados simples: a equivalência de todos os referenciais inerciais para as leis da física e a constância da velocidade da luz no vácuo. A partir desses princípios, ele reconstruiu os conceitos de espaço e tempo desde suas bases. Essa nova formulação levou a consequências profundas, como a relatividade da simultaneidade, a dilatação do tempo e a contração do comprimento. Diferentemente das teorias anteriores, esses efeitos não eram mais explicados como resultados do movimento em relação a um meio oculto, mas como

propriedades fundamentais da própria estrutura do espaço-tempo. Com isso, a noção de tempo absoluto foi definitivamente abandonada. Pouco depois, Einstein demonstrou que massa e energia são aspectos diferentes de uma mesma grandeza física, estabelecendo a famosa relação $E = mc^2$. Essa equivalência revelou que pequenas quantidades de massa correspondem a enormes quantidades de energia, abrindo novas perspectivas tanto teóricas quanto práticas na física.

Em 1908, Hermann Minkowski (1864-1909) apresentou uma reformulação geométrica da relatividade especial, unificando espaço e tempo em um único contínuo quadridimensional chamado espaço-tempo. Nessa interpretação, eventos físicos são representados como pontos nesse espaço, e as transformações de Lorentz passam a ser entendidas como transformações geométricas entre sistemas de coordenadas. A abordagem de Minkowski forneceu a linguagem matemática adequada para o desenvolvimento da relatividade geral. A ideia de que o espaço-tempo possui uma estrutura geométrica própria tornou-se essencial para a interpretação da gravitação como curvatura do espaço-tempo, conceito central da teoria apresentada por Einstein em 1915.

Assim, a relatividade especial representou uma ruptura profunda com a física newtoniana, elimi-

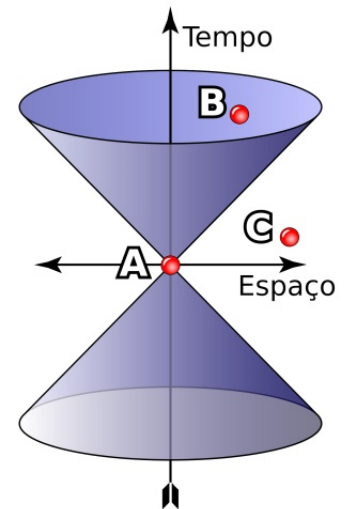
nando as noções de espaço e tempo absolutos. Ela se consolidou como um dos pilares da física moderna, com impacto duradouro em áreas como física de partículas, astrofísica e cosmologia, além de estabelecer o conceito de espaço-tempo como elemento fundamental da descrição da natureza.

Relatividade Restrita

Ao reconstruir as bases do espaço e do tempo, Einstein introduziu a teoria da relatividade restrita. Nela, as medidas de espaço e tempo deixam de ser absolutas e passam a depender diretamente da velocidade relativa entre o observador e o evento. Quando um objeto se move a uma velocidade próxima à da luz em relação a um observador, este notará que o comprimento do objeto parece encurtar na direção do movimento — fenômeno conhecido como contração do comprimento. Da mesma forma, o tempo passa a se comportar de maneira diferente: para o observador em repouso, o relógio do sistema em movimento parecerá rodar de forma mais lenta, caracterizando a dilatação temporal. Quanto mais a velocidade do objeto se aproxima do limite da luz, mais drásticos se tornam esses efeitos geométricos do espaço-tempo.

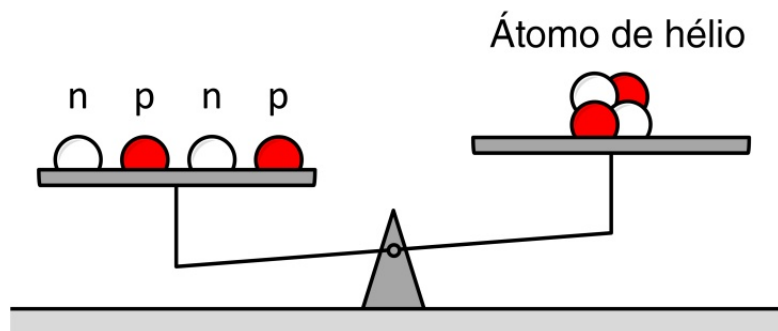
Relatividade Geral

Após a publicação da relatividade restrita em 1905, Einstein le-



Acima
Diagrama do cone de luz no espaço-tempo de Minkowski. O evento A representa o presente. O evento B está situado no interior do cone de luz futuro, representando uma região causalmente acessível a partir de A. O ponto C representa um evento fora do cone de luz, incapaz de interagir causalmente com A, pois exigiria uma velocidade de propagação de informação superior à da luz no vácuo (Crédito: Sakurambo/WikiMedia Commons).

vou dez anos para apresentar a teoria da relatividade geral, cujo núcleo são suas equações de campo. Na prática, elas estabelecem uma via de mão dupla: a matéria e a energia dizem ao espaço-tempo como se curvar, e o espaço-tempo curvo diz à matéria como se mover. Nessas equações, expressas através duma ferramenta matemática chamada cálculo tensorial, o lado esquerdo descreve minuciosamente a geometria e a curvatura do tecido cósmico, enquanto o lado direito detalha todo o conteúdo físico ali presente.



Acima

Demonstração visual do defeito de massa no núcleo de um átomo de hélio. A soma das massas de dois prótons e dois nêutrons isolados (à esquerda) é maior do que a massa do núcleo unificado (à direita). Essa diferença sutil de massa corresponde à energia liberada para o ambiente no momento da formação do núcleo, ilustrando na prática a equivalência entre massa e energia ($E=mc^2$) proposta por Einstein (Crédito: MikeRun/WikiMedia Commons).

O elemento central dessa descrição geométrica é a métrica, que funciona como uma espécie de mapa capaz de determinar distâncias, ângulos e intervalos de tempo em um espaço distorcido. Do outro lado, o conteúdo físico é mapeado por um termo que contabiliza não apenas a quantidade de matéria e a densidade de energia, mas também a pressão e os fluxos internos desses elementos. É dessa intrincada relação entre geometria e energia que emerge o fenômeno que chamamos de gravidade.

A constante cosmológica (frequentemente representada pela letra grega Lambda, Λ) pode ser interpretada como uma propriedade do próprio espaço-tempo, associada à energia do vácuo. Na cosmologia moderna, esse termo está relacionado à energia escura e à aceleração da expansão do universo. Fisicamente, esse termo atua como uma força repulsiva gravitacional em grandes escalas, capaz de equilibrar exatamente a atração da matéria e manter o universo estático. Ao aplicar suas equações de campo a uma descrição cosmológica homogênea e isotrópica, Einstein percebeu que elas não admitiam naturalmente um universo estático pois a gravitação faria o universo colapsar, ou então ele se expandiria. Ironicamente, Einstein não julgava possível que o universo estivesse em expansão e, em 1917, introduziu esse termo em suas equações justamente para que o universo descrito por ele tivesse uma solução estática, como era considerado à época. As soluções das equações de campo descrevem buracos negros, estrelas de nêutrons, ondas gravitacionais e sistemas binários de objetos compactos. Na cosmologia, elas fornecem a base matemática para os modelos de universo em expansão e para o estudo da formação de estruturas em larga escala. Em resumo, as equações de campo de Einstein representam a formulação mais profunda já alcançada da gravi-

tação, unificando geometria e física em uma única estrutura matemática baseada em tensores que descrevem a dinâmica do tecido cósmico.

Lei de Hubble-Lemaître

Embora matematicamente consistente, o universo estático de Einstein era instável: pequenas perturbações levariam inevitavelmente à expansão ou à contração. Esse fato foi demonstrado posteriormente por outros cosmólogos, mostrando que a constante cosmológica havia sido introduzida apenas para preservar uma hipótese observacional equivocada.

A lei formulada por Edwin Hubble afirma que a velocidade com que uma galáxia distante parece se afastar de nós é diretamente proporcional à distância em que ela se encontra do observador. Para quantificar esse ritmo, utiliza-se a chamada constante de Hubble, que reflete a taxa atual de expansão do Universo. Para medir essas distâncias, Hubble utilizou estrelas cefeidas, cujo período de variação de luminosidade está relacionado à sua luminosidade absoluta. Comparando a luminosidade absoluta com a luminosidade observada, ele obteve a distância às galáxias que as continham. Essa combinação de distâncias independentes com velocidades obtidas por espectroscopia permitiu a construção da relação linear entre a velocidade de afastamento e a distân-



Acima

À esquerda: Edwin Powell Hubble, astrônomo estadunidense que revolucionou a cosmologia ao fornecer as evidências observacionais da expansão do Universo. À direita: Georges Henri Joseph Édouard Lemaître, físico e padre católico belga que propôs pioneiramente a teoria de um universo dinâmico e a relação linear entre a distância e a velocidade de recessão das galáxias.

cia das galáxias. Essa relação indica que galáxias mais distantes se afastam mais rapidamente, o que não ocorre em um universo estático imaginado por Newton e defendido primariamente por Einstein. Tal descoberta confirmou empiricamente os modelos cosmológicos dinâmicos previstos pelas equações de Einstein e tornou desnecessária a constante cosmológica como artifício para manter o universo estático. Diante da evidência observacional da expansão, Einstein abandonou o termo Λ , considerando sua introdução um erro motivado por um preconceito filosófico sobre a imutabilidade do universo.

Por décadas, a constante cosmológica foi vista como um termo artificial e desnecessário. No entanto, no final do século XX, observações de supernovas distantes mostraram que a expansão do universo está acelerando, o que levou a uma reinterpretação moderna da constante cosmo-

lógica como associada à energia do vácuo ou energia escura. Assim, a constante cosmológica passou de um artifício matemático para um dos elementos centrais da cosmologia contemporânea, desempenhando um papel fundamental na compreensão da expansão acelerada do universo.

A descoberta observacional de Hubble forneceu a confirmação empírica de que o universo é dinâmico, validando as soluções em expansão das equações de Einstein e encerrando definitivamente a ideia de um universo estático. Essa conexão entre teoria e observação estabeleceu as bases da cosmologia moderna e abriu caminho para o desenvolvimento dos modelos do Big Bang.

Por séculos, uma ideia de universo clássico, ideal e estático perdurou. Inserido no contexto histórico do modelo bem-sucedido de Newton, Einstein enxergou através das equações e vislumbrou um universo que se comportava como uma malha dinâmica, que podia ser distorcida e, posteriormente, esticada, em contraste com o universo descrito como um bloco sólido por Newton. Embora a relatividade tenha fornecido uma estrutura extremamente bem-sucedida para descrever a gravitação e a dinâmica do universo em grandes escalas, a busca por uma compreensão mais profunda de sua natureza fundamental permanece inconclusa, especialmente diante das li-

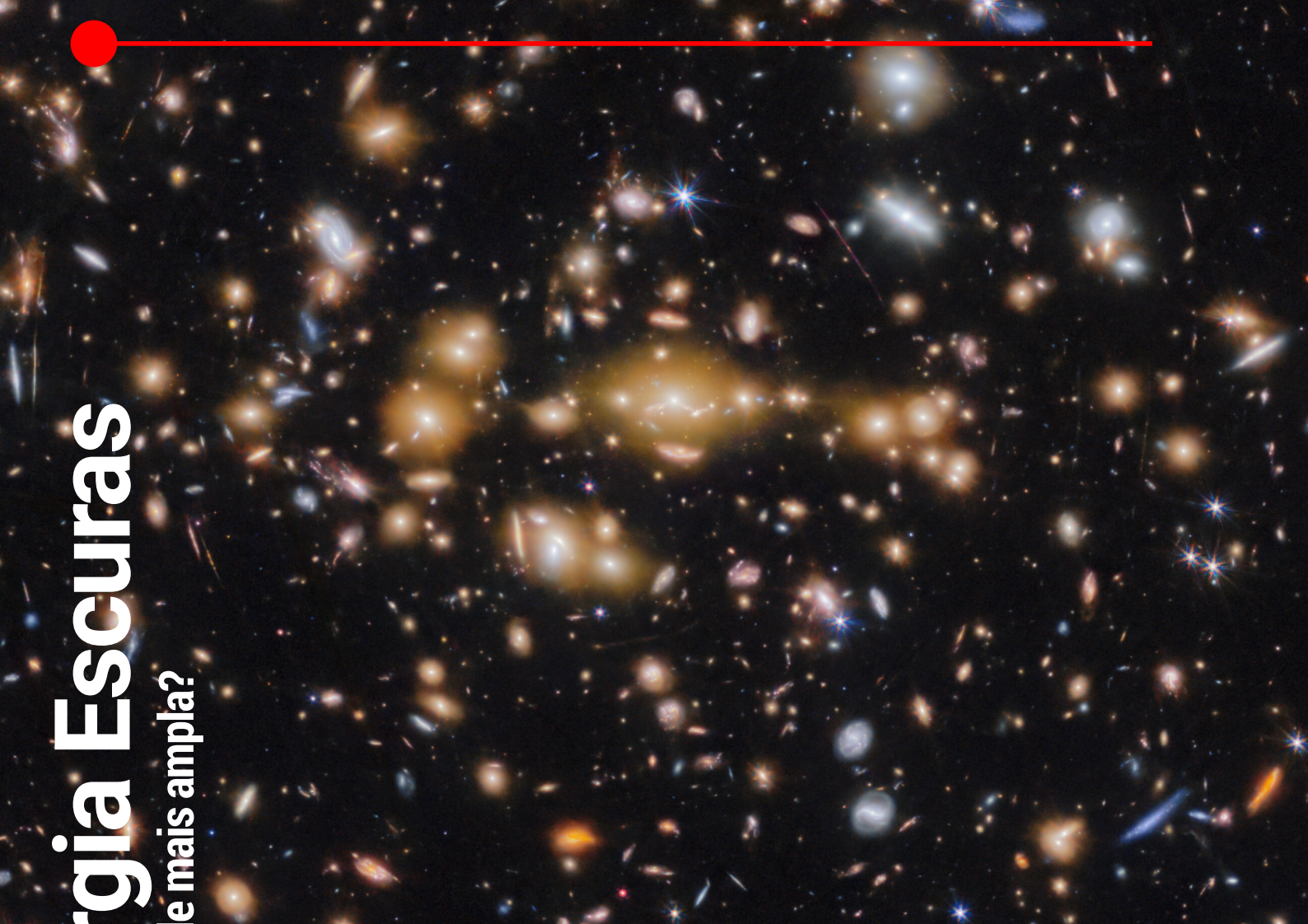
mitações impostas quando tentamos conciliá-la com a mecânica quântica. A história do espaço-tempo demonstra que sua compreensão evoluiu à medida que novas observações e formulações teóricas foram surgindo e é provável que novos desenvolvimentos ainda redefinam esse conceito de forma significativa. Cada tentativa de estender ou reformular nossa descrição do espaço-tempo não deve ser encarada como um esforço estéril, mas como uma resposta necessária às exceções e lacunas deixadas pelos modelos atuais ao explicar a totalidade dos fenômenos naturais. Seu estudo é essencial para evitar a estagnação do pensamento científico, pois questionar estruturas aparentemente bem estabelecidas é um passo indispensável para o avanço do conhecimento. Ainda que nunca alcancemos uma descrição definitiva do espaço-tempo em todas as escalas físicas, sua investigação contínua amplia nossa compreensão do universo em suas dimensões espaciais e temporais e evidencia que, enquanto a ciência avança, algumas questões fundamentais permanecerão, inevitavelmente, em aberto •

*João Pedro Custodio de Sousa
Univ. Fed. do Rio de Janeiro
joao22@ov.ufrj.br*

Nébulas explica: Matéria Escura



@nebulas.astronomia



Matéria e Energia Escuras

ou efeitos de uma teoria de gravidade mais ampla?

O Universo é realmente composto por matéria e energia que não entendemos ou será que nossa descrição da gravitação ainda é incompleta?

Em 1687, Isaac Newton (1643-1727) publicou a a-famada Lei da Gravitação universal em sua monumental obra *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Mais que um livro de gravitação, o Principia também nos presenteia, por exemplo, com as três leis de movimento, entre outros fundamentos da mecânica clássica.

Uma importante revolução conceitual ostentada no Principia é a destruição do tratamento dos céus como domínio separado da natureza. Antes de Newton, havia

uma divisão muito forte entre a "física terrestre", ligada a Aristóteles (384 a.C. - 322 a.C.) e depois a Galileu Galilei (1564-1642), e a "física celeste", ligada às órbitas planetárias, estudadas por Johannes Kepler (1571-1630). Newton mostrou que uma pedra caindo em direção à superfície da Terra, a Lua orbitando a Terra e os planetas orbitando o Sol obedecem às mesmas leis dinâmicas. Houve assim a percepção de que o universo inteiro (conforme conhecido à época) poderia ser descrito por leis matemáticas universais.

Analisando dados observacionais extremamente precisos de Tycho Brahe (1546-1601), o astrônomo Johannes Kepler obteve empiricamente suas leis de movimento planetário. A Lei da Gravitação Universal de Newton, junto com suas leis de movimento, explicam e englobam as leis empíricas de Kepler. Newton mostrou que as regularidades observadas por Kepler nas órbitas planetárias surgem naturalmente da gravitação.

Com o aumento da precisão observacional, surgiram discrepâncias importantes entre teoria newtoniana e observações. Ao longo do século XIX, astrônomos perceberam que o ponto da órbita em que Mercúrio fica mais próximo do Sol, seu periélio, não permanecia fixo, mas girava lentamente ao longo do tempo. Parte desse avanço podia ser explicada pelas perturbações gravitacionais causadas pelos outros planetas, e a teoria newtoniana funcionava muito bem nesse cálculo. No entanto, sobrava uma pequena diferença entre a previsão teórica e as observações astronômicas. Essa persistente discrepância intrigou a comunidade científica por décadas.

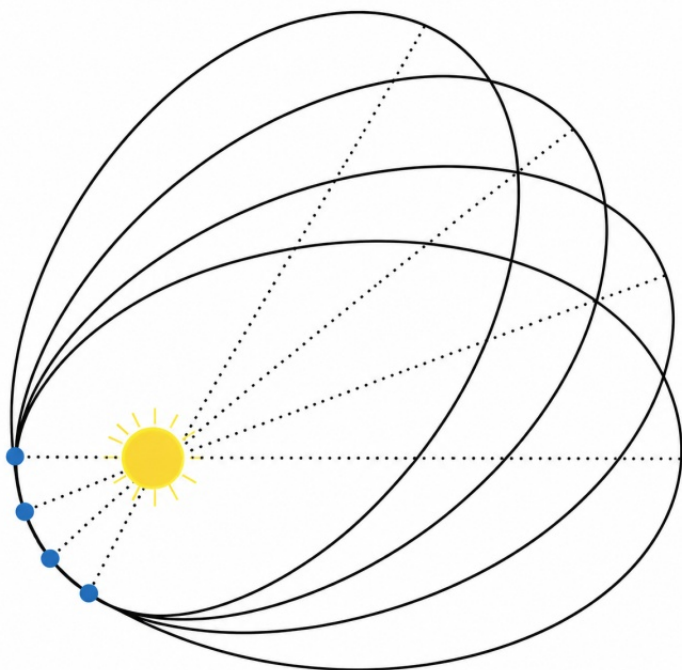
Diferentes explicações foram propostas para justificar tal discrepância, entre elas, a de que existia um planeta mais próximo ao Sol, ainda não observado, mas cuja presença poderia perturbar a órbita de Mercúrio, eventualmente empurrando seu periélio. A es-

te hipotético planeta foi, inclusive, dado um nome: Vulcano.

A hipótese do planeta Vulcano foi formulada por Urban Le Verrier (1811-1877), o mesmo astrônomo que anteriormente havia previsto corretamente a existência do planeta Netuno a partir de perturbações gravitacionais. No início do século XIX, astrônomos perceberam que a órbita de Urano apresentava pequenas irregularidades: o planeta não estava exatamente onde os cálculos previam. Alguns cientistas levantaram a hipótese de que existiria um outro planeta, ainda desconhecido, perturbando gravitacionalmente a órbita de Urano. Le Verrier usou de cálculos teóricos para estimar onde esse planeta deveria estar no céu. Em 1846, astrônomos do Observatório de Berlin observaram a região indicada por ele e encontraram Netuno praticamente na posição prevista. Isso trouxe uma perspectiva promissora à procura por Vulcano. No entanto, por não existir, este jamais foi detectado.

Por que então o periélio de Mercúrio avança lentamente a cada volta? Publicada por Albert Einstein (1879-1955) em 1915, a Teoria da Relatividade Geral resolveu esse problema ao descrever a gravidade não como uma força convencional, mas como uma curvatura do espaço-tempo produzida por uma distribuição de massa e energia. No caso, a curvatura considerada é a gerada pelo Sol, e

Na página anterior
Aglomerado de galáxias
SPT0615-JD1 (Crédito: ESA/
Webb, NASA & CSA, L.
Bradley, A. Adamo, the
Cosmic Spring
collaboration).



Acima

Representação esquemática do avanço do periélio de Mercúrio. Diferentemente do que ocorre na mecânica newtoniana, em que a órbita elíptica de um planeta permanece fixa no espaço, a Relatividade Geral prevê uma lenta rotação da elipse orbital em torno do Sol. Como consequência, a posição do periélio desloca-se gradualmente ao longo do tempo. A figura não está em escala e tem caráter meramente ilustrativo.

como Mercúrio está próximo a ele, se move em uma região onde essa curvatura é mais intensa, fazendo com que sua órbita não seja uma elipse perfeitamente fechada. A cada revolução, é previsto pela Relatividade Geral que o periélio se desloque um pouco, exatamente na quantidade observada astronomicamente.

A explicação correta do avanço do periélio de Mercúrio teve um impacto enorme. Foi uma grande evidência de que a Relatividade Geral era uma teoria fisicamente correta. Einstein havia, então, demonstrado que o problema não estava necessariamente na ausência de um novo planeta, mas nas limitações da teoria gravitacional newtoniana.

É notável, curioso e, até mesmo, fascinante perceber que podemos

estar passando, nos dias de hoje, por uma situação cientificamente bastante similar a essa narrada acima.

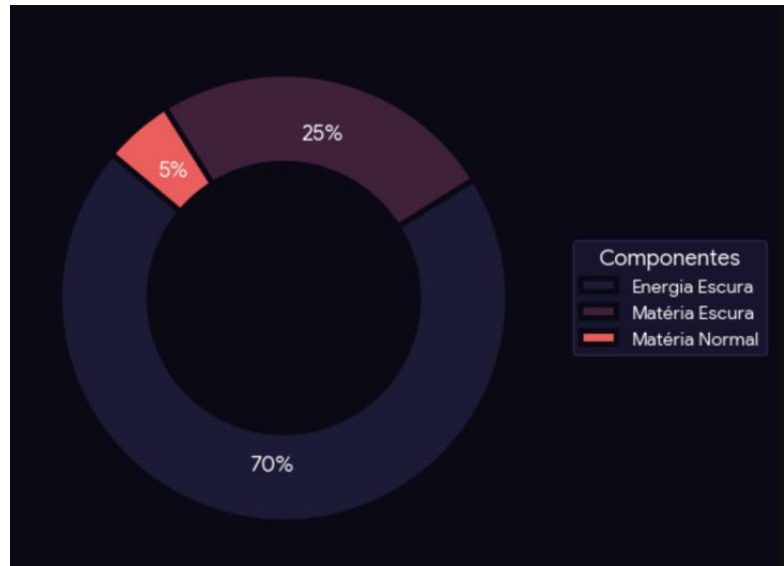
O atual modelo cosmológico padrão, que tem como um de seus pilares a Teoria da Relatividade Geral de Einstein, é chamado Modelo Λ CDM, onde Λ representa a constante cosmológica e CDM a matéria escura fria (do Inglês *cold dark matter*). A constante cosmológica está associada à energia quântica do vácuo, e às vezes também é referida como energia escura, enquanto a matéria escura fria é um tipo de matéria que não interage com a luz, portanto não pode ser vista (em qualquer faixa do espectro eletromagnético). Constante cosmológica e matéria escura serão tratadas mais cuidadosamente a seguir. Por ora, ressalte-se que de acordo com o modelo cosmológico padrão e observações cosmológicas, 70% do universo está associado à energia escura, 25% é composto por matéria escura e apenas os restantes 5% referem-se à matéria que conhecemos (matéria bariônica).

Abordemos cada um desses componentes exóticos do universo, a começar pela matéria escura. O que é matéria escura? A resposta curta: ninguém sabe. Vamos à resposta longa.

O primeiro indício de existência de matéria escura surgiu na década de 1930, quando o astrônomo Fritz Zwicky (1898-1974) es-

tudou o aglomerado de galáxias de Coma. Ao analisar a velocidade das galáxias no interior do aglomerado, Zwicky percebeu que elas se moviam rápido demais para permanecer gravitacionalmente ligadas apenas pela matéria visível observada. Ele concluiu que deveria existir uma grande quantidade de massa invisível contribuindo para a gravidade do sistema, e nomeou essa componente desconhecida como "*dunkle Materie*" (do Alemão para "matéria escura"). A proposta foi inicialmente recebida com ceticismo e levou cerca de quatro décadas para que fosse consolidada.

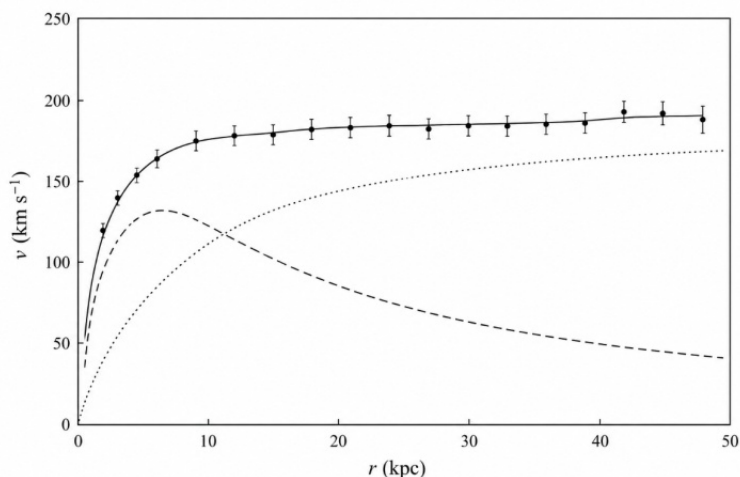
Nos anos 1970, uma série de estudos sobre curvas de rotação de galáxias foram realizados sob a liderança da astrônoma Vera Rubin (1928-2016). Curvas de rotação de galáxias são diagramas que relacionam a velocidade orbital quase circular de uma dada estrela ao redor do centro de sua galáxia hospedeira com sua distância até o centro dessa galáxia. Embora a predição teórica para a velocidade das estrelas se ajustava muito bem às observações para regiões mais próximas ao centro galáctico, para regiões mais externas, mostrou-se haver uma discrepância significativa entre teoria e observação para diferentes galáxias. Enquanto a teoria previa que nas regiões mais externas da galáxia, a velocidade orbital das estrelas deveria cair com o inverso da raiz quadrada da distância,



as observações apontavam que essa velocidade se mantinha aproximadamente constante e significativamente mais alta do que o previsto. Para ajustar dados observacionais à predição teórica, Rubin propôs a existência de um halo de matéria escura envolvendo as galáxias e se estendendo além de seu raio visível. Embora essa massa não fosse vista, estaria contribuindo para a gravidade da galáxia e, consequentemente, alterando a velocidade das estrelas.

O problema está no que segue. Supõe-se que matéria escura seja feita por partículas. Muitos modelos teóricos de partículas de matéria escura têm sido propostos: áxions, neutrinos estéreis, gravitinos e muitos outros. A questão crucial é: nenhuma partícula de matéria escura foi diretamente detectada até hoje. Esforços para uma eventual detecção não têm sido poupados. Se existe uma á-

Acima
Gráfico da composição do universo. A imagem representa a distribuição estimada dos componentes do cosmos com base em modelos cosmológicos atuais: energia escura (70%), que impulsiona a expansão acelerada do espaço; matéria escura (25%), componente invisível identificada por seus efeitos gravitacionais; e matéria normal ou bariônica (5%), que engloba toda a matéria visível existente, como estrelas, planetas, galáxias e seres vivos.



Acima

As curvas de rotação de galáxias. No eixo das ordenadas, temos a velocidade de rotação de estrelas ao redor do centro galáctico, em unidades de quilômetros por segundo (km/s). No eixo das abscissas, temos a distância ao centro galáctico, em unidades de quiloparsec (kpc), sendo 1 pc igual a 3,26 anos-luz. A curva sólida com pontos e barras de erro representa uma curva de rotação observacional típica. A curva tracejada representa a contribuição esperada da matéria bariônica observada, incluindo estrelas e gás. A curva pontilhada representa uma contribuição adicional usualmente atribuída a um halo de matéria escura. A figura não se refere a uma galáxia específica, mas ilustra conceitualmente o problema da matéria escura em galáxias.

rea da física experimental que recebeu enormes investimentos nas últimas décadas é a busca por partículas de matéria escura.

O outro componente exótico do universo mencionado anteriormente é a energia do vácuo. Antes de prosseguir no tema, porém, é importante distinguir três termos que frequentemente aparecem como sinônimos, embora não sejam exatamente a mesma coisa. São eles: constante cosmológica, energia do vácuo e energia escura.

A constante cosmológica é um termo que pode ser acrescentado à teoria de Einstein e que produz um efeito gravitacional repulsivo em escalas cosmológicas. A energia do vácuo surge da mecânica quântica e corresponde à energia associada ao próprio espaço vazio. Já energia escura é um termo mais geral, utilizado para designar qualquer mecanismo capaz de explicar a expansão acelerada do universo.

A descoberta dessa aceleração foi anunciada em 1998 por duas equipes independentes que observavam supernovas do tipo Ia. Desde a descoberta da expansão cósmica por Edwin Hubble (1889-1953), em 1929, acreditava-se que a gravidade exercida pela matéria deveria frear gradualmente essa expansão. A grande dúvida era se essa desaceleração seria suficiente para interrompê-la no futuro. As observações revelaram exatamente o contrário: o universo não está apenas expandindo, mas expandindo cada vez mais rapidamente.

A explicação mais simples para esse comportamento envolve justamente a constante cosmológica (curiosamente introduzida por Einstein em suas equações da Relatividade Geral em 1917, embora por uma razão distinta). A observação da expansão acelerada trouxe Λ de volta ao centro da cosmologia. Hoje, um valor positivo em particular da constante cosmológica descreve com notável sucesso os dados observacionais.

A mecânica quântica prevê que mesmo o espaço vazio possui energia. Essa energia do vácuo exerce um efeito gravitacional repulsivo com as mesmas propriedades atribuídas à constante cosmológica, o que sugere que ambas possam corresponder ao mesmo fenômeno físico. O problema aparece quando se calcula o valor dessa energia. As estimativas

obtidas pela física quântica são imensamente maiores do que o valor inferido para Λ a partir das observações astronômicas. A discrepância pode chegar a cerca de 120 ordens de grandeza, sendo frequentemente apontada como a maior divergência já encontrada entre teoria e observação em toda a história da física.

Assim, embora a constante cosmológica descreva muito bem a aceleração cósmica, sua interpretação física permanece uma incógnita. Portanto, muitos cosmólogos preferem utilizar o termo energia escura, que não pressupõe uma explicação específica. Sabemos que existe algum agente responsável pela aceleração da expansão do universo, mas ainda não sabemos exatamente o que ele é, então o chamamos de energia escura.

O fato de ainda não termos detectado diretamente nenhuma partícula de matéria escura faz com que questionemos sua existência. Em paralelo, parece que falta algo na Relatividade Geral que seja capaz de propriamente descrever a aceleração cósmica. Esses são agentes motivadores para o desenvolvimento de teorias de gravidade modificada.

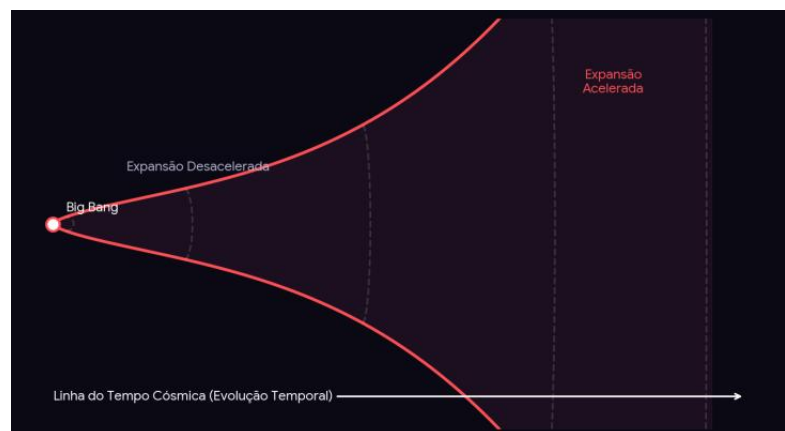
É inevitável o paralelo entre a não detecção de partículas de matéria escura nos dias de hoje e a não-deteção/observação do planeta Vulcano no século XIX. Da mesma forma que a teoria de Newton requeria um "planeta escu-

ro" para explicar os observáveis referentes à órbita de Mercúrio, a teoria de Einstein requer matéria escura para concordar com certos dados observacionais. A partir desse paralelo, pode-se imaginar que uma teoria de gravidade mais ampla que a de Einstein esteja guardando esses efeitos gravitacionais em seu próprio formalismo, não necessitando forçar a existência de matéria escura.

Da mesma forma, a energia escura é muitas vezes tratada como um fluido exótico responsável pela maior parte da composição do universo, e cuja própria existência influenciaria sua dinâmica. Como a energia escura também jamais foi detectada, há margem para pensar que esse comportamento exótico na dinâmica do próprio universo esteja guardado e previsto numa teoria de gravidade mais ampla que a Relatividade Geral.

Enquanto Einstein nos ensinou que gravidade é a curvatura, as teorias de gravidade modificada

Abaixo
Representação esquemática da evolução temporal da expansão do universo no escopo do modelo cosmológico padrão. O diagrama ilustra a transição física entre a fase inicial de expansão desacelerada - dominada pelo conteúdo material (matéria bariônica e matéria escura fria) - e a era posterior de expansão acelerada, governada pela energia escura.



questionam se a geometria do espaço-tempo pode ser mais rica do que a descrita pela Relatividade Geral. Podemos estar diante de uma iminente quebra de paradigma, na qual a ausência de detecção de componentes extras nos encoraja a considerar a possibilidade de que a teoria gravitacional não esteja completa.

Muitas são as teorias de gravidade modificada propostas atualmente. O desafio para que uma delas (ou uma ainda a surgir) tome o posto da Relatividade Geral é enorme. Enquanto a Relatividade Geral se adapta de forma excelente aos dados observacionais invocando os componentes escuros, se estes não existirem, essa nova teoria deve fazer o mesmo, mas naturalmente, sem invocá-los, ou seja, descrevendo os efeitos gravitacionais "escuros" como algo previsto em seu próprio formalismo. Não apenas isso, mas a teoria deve também recuperar todo o sucesso da Relatividade Geral em regimes como o Sistema Solar, bem como na detecção de ondas gravitacionais, e tantos outros exemplos.

A história da ciência nos mostra que discrepâncias entre teoria e observação podem ter diferentes origens. Em alguns casos, elas apontam para a existência de novos componentes do universo, como ocorreu com Netuno. Em outros, revelam limitações da própria teoria utilizada para interpretar os fenômenos, como aconte-

ceu com a hipótese de Vulcano e a posterior formulação da Relatividade Geral. Hoje, diante dos mistérios da matéria escura e da energia escura, ainda não sabemos qual dessas histórias está prestes a se repetir. Serão elas o equivalente moderno de Netuno, revelando novos constituintes do universo? Ou serão os Vulcanos do século XXI, indicando a necessidade de uma teoria gravitacional mais ampla que a Relatividade Geral? A resposta permanece em aberto, e sua busca constitui uma das maiores aventuras científicas de nosso tempo •

Pedro H. R. S. Moraes
Universidade Cidade de São Paulo
moraes.phrs@gmail.com



Divulgação e Ensino

no Observatório Abrahão de Moraes

Um observatório continua a servir à sociedade, mesmo após seus instrumentos terem ficado inadequados à pesquisa de ponta

Em seu início, o Observatório Abrahão de Moraes foi muito pouco visitado e era impensável desenvolver qualquer tipo de trabalho com o público. Naquele momento, tanto no próprio Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP (IAG) quanto na universidade e de maneira geral, os chamados trabalhos de divulgação científica não

tinham quase que valor algum. Além disso, os pesquisadores que aqui vinham para trabalhar costumavam chegar no final da tarde e, no dia seguinte, dormir ou retornar a São Paulo.

Dessa forma, receber o público à noite comprometeria o trabalho e, ao longo do dia, não havia ninguém disponível para isso. Ainda assim, muito raramente, ocorria alguma visita durante o dia. Eu mesmo, quando ainda estudan-

Na página anterior

Parte de uma exposição sobre áreas da Astronomia, durante o I Festival de Arte, Ciência e Cultura do OAM, em novembro de 2025 (Crédito: Adkuesley Ferreira da Silva).

Abaixo

Visitantes do programa Noite com as Estrelas, em 2022.



te do Ensino Médio, fui recebido em um final de tarde pelos professores Luiz Bernardo Ferreira Clauzet e Roberto Boczko, que gentilmente me mostraram o Círculo Meridiano.

Tentei, desde o início de minhas atividades regulares no Observatório como aluno de IC, repetir esse gesto, com aqueles poucos curiosos que se aventuravam até aqui. Nessa época o Observatório era totalmente isolado da comunidade, sequer telefone tínhamos.

Depois de 5 anos de atividades regulares, quando meu local de trabalho como professor do IAG-USP foi transferido para o OAM e, portanto, quando fixei residência no município de Vinhedo, tanto em razão da minha maior disponibilidade quanto pela relação que fui estabelecendo com a comunidade, intensifiquei o atendimento ao público, recebendo es-

colas, funcionários de indústrias locais, professores, etc. Nesse momento, o Observatório era praticamente desconhecido ou considerado inacessível pela população. De todo modo, as visitas eram apenas diurnas.

Também, como professor no IAG, a exemplo de outros poucos colegas, sempre que possível trouxe minhas turmas de graduação para visitar o OAM. Certamente, para muitos alunos, nessas ocasiões ocorriam as melhores aulas. Essas excursões didáticas, sem o grande respaldo que têm hoje, se intensificaram e se estenderam a outros cursos, inclusive àqueles de extensão do próprio IAG.

De uma forma ou de outra, as visitas se tornaram cada vez mais frequentes, mas ainda eram sempre diurnas.

Somente por volta de 1996 passamos a receber público à noite para observação, ainda sem regularidade e, sempre, contando com ajuda de estudantes e com telescópios emprestados principalmente do Colégio Integrando de Itatiba. Os instrumentos existentes no Observatório não se prestavam para esse fim.

Aos poucos essa dinâmica foi ganhando força e, mesmo que sempre de maneira improvisada, cresceu significativamente, transformando o Observatório em um importante centro de difusão do



conhecimento científico na região. Para se ter uma ideia, no evento mais tradicional que realizamos mensalmente, “Noite com as Estrelas”, que recebe de 250 a 300 visitantes por fim de semana próximo ao quarto crescente lunar, as vagas se esgotam cerca de duas horas após a abertura das inscrições.

Um fator decisivo que muito impulsionou a abertura do Observatório para público foi, justamente, a automatização do Círculo Meridiano em maio de 1995. As imagens produzidas permitiam falar do instrumento, da Astronomia e do trabalho de pesquisa na área com mais conteúdo, em um ambiente, improvisado é verdade, mas bastante propício que é o prédio onde esse instrumento encontra-se instalado. Trata-se de um local amplo, com possibilidade de projeção de imagens, que conta ainda com o “espetáculo” de abertura e fechamento do teto. Enfim, um local onde os visitantes “se aproximam”, de certa forma, do que é, ou melhor, do que era, uma noite de observação.

Um importante marco nesse direcionamento das atividades de divulgação no OAM foi o Dia de Portas Abertas, realizado pela primeira vez em 1998 por iniciativa minha e sob minha coordenação, com 212 visitantes.

Pouco tempo depois, promovemos um outro evento: um estágio remunerado (cinco sábados)

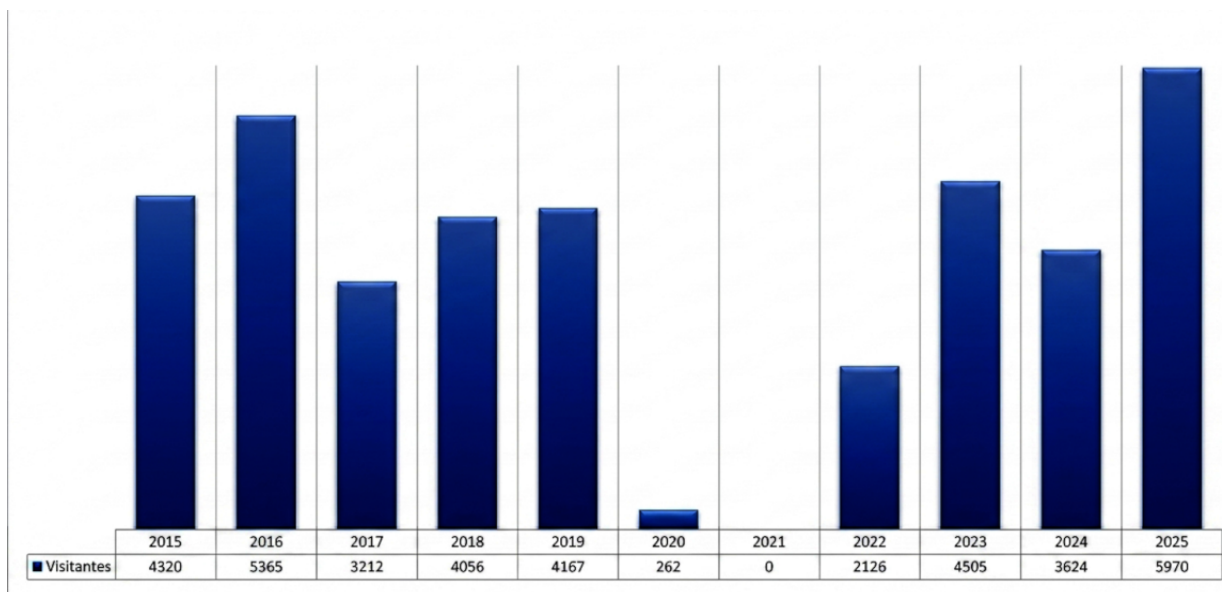


para 20 professores de escolas primárias da região, que também contribuiu significativamente para a divulgação do Observatório junto às comunidades vizinhas.

Tal direcionamento foi essencial para a sobrevivência do Observatório, que já não contava mais com dois de seus principais instrumentos: Telescópio de 60 cm transferido para o Observatório do Pico dos Dias (1992), e o Astrolábio Impessoal de Danjon, transferido para a sede do IAG em São Paulo (1994).

Essas iniciativas, de certa forma abriram as portas para uma

Acima
Exemplo de cartaz de divulgação de atividade pública no Observatório Abrahão de Moraes.



Acima

Número de visitantes no Observatório Abrahão de Moraes por ano nos últimos 10 anos.

Abaixo

Visitantes do programa Noite com as Estrelas, em 2023.



maior e melhor interação com as prefeituras dos municípios vizinhos, Valinhos e Vinhedo. Em 1998, foi formalizado um termo de convênio entre a Prefeitura do Município de Valinhos e o IAG/USP, justamente com base nas atividades que vinham sendo realizadas com o público e no potencial de crescimento que apresentavam.

Hoje, temos uma interação direta, bastante consolidada, com o público em eventos tradicionais e outros que estão se iniciando.

Noite com as Estrelas

Sem dúvida, a Noite com as Estrelas é o evento mais tradicional e conhecido do OAM. Acontece de forma regular desde 2008. Trata-se de atendimento ao público em geral para a realização de observações noturnas do céu por meio de dois telescópios MEADE de 12". Esse atendimento é realizado nos finais de semana (sexta-feira, sábado e domingo) mais próximos do quarto crescente da Lua. Os alunos monitores são responsáveis pelo atendimento: recepção dos visitantes, breve apresentação do Observatório, acompanhamento e apoio em diversas situações, observação do céu e discussão sobre tópicos de Astronomia e de Ciências em geral.



Nessas atividades os alunos monitores são respaldados por mim ou, como acontece na maioria das vezes, pelo Técnico de Laboratório do Observatório, Messias Fidêncio, ou ainda, menos frequentemente, por outros funcionários do Observatório.

Os grupos são formados já no momento do agendamento, que é obrigatório. São dois ou três grupos por noite, dependendo da época do ano, com aproximadamente 35 visitantes cada.

Esse evento faz enorme sucesso não somente junto às comunidades de Valinhos e de Vinhedo,

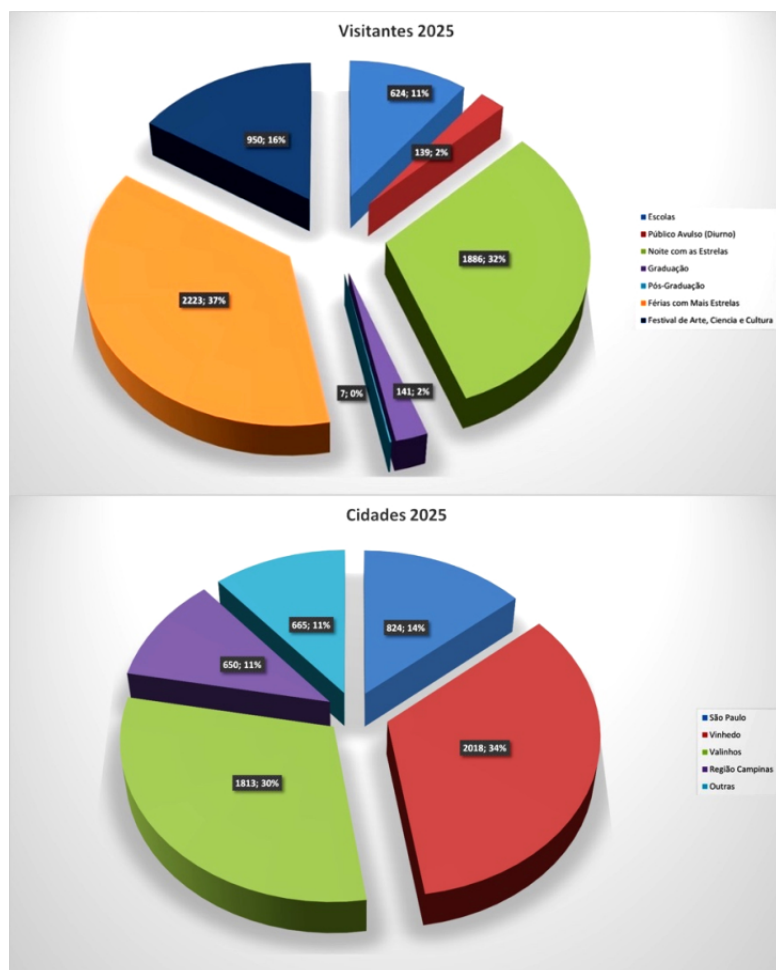
mas em muitas outras localidades mais distantes. Com esse evento, a visibilidade do Observatório cresceu significativamente, fazendo com que seja muito procurado tanto para essa quanto para outras atividades. O número de visitantes só não é maior por falta de condições materiais e hu-

Acima
Telescópios montados pelos alunos monitores para as atividades de observação durante o I Festival de Arte, Ciência e Cultura do OAM (Crédito: Henrique Pacini Vísipico).

Opere um telescópio de sua escola!

Apenas com uma conexão à internet, sua escola pode operar remotamente o telescópio Argus no Observatório Abrahão de Moraes

<http://telescopiosnaescola.pro.br/>



Acima

As várias “modalidades” de público visitante no OAM, bem como a origem desses visitantes, ao longo de 2025.

manas em recebê-los.

Naturalmente, tanto a regularidade quanto a longevidade de quase 20 anos desse projeto devem-se às bolsas obtidas junto à Pró-Reitoria de Cultura e Extensão da USP, além do apoio logístico e eventuais bolsas do próprio IAG.

Férias com mais Estrelas

As Férias com mais Estrelas é um evento esporádico que, aos poucos, vai alcançando uma certa regularidade. Teremos sua 9ª edição agora em 2026. Originou-se por iniciativa da segunda geração de monitores do Observatório,

prontamente abraçada por mim.

Esse evento, que ocorre ao longo de alguns dias e noites nas férias escolares de julho, substitui o “Noite com as Estrelas” desse mês. O formato tem sido alterado muito pouco ao longo das últimas edições. Em geral, são quatro dias e quatro noites de atividades com o público: oficinas, planetário (cedido pela OBA), palestras, observações noturnas e portas abertas no sábado durante o dia. Embora já tradicional, esse evento não tem sido realizado de forma necessariamente contínua.

Nesse caso, contamos com um número maior de monitores, bolsistas e voluntários, muitos oriundos de turmas anteriores.

Festival de Arte, Ciência e Cultura

Esse evento liderado pela Prof.^a Elysandra Figueredo Cypriano teve sua primeira edição em novembro de 2025 e também consiste em atividades diurnas e noturnas para o público em geral, mas com uma diversidade maior de atividades.

Outras atividades

Além desses eventos, o Observatório recebe várias excursões didáticas de alunos de graduação e de pós-graduação ao longo do ano. São alunos do IAG/USP, de outras unidades da USP e de outras universidades. Além disso, recebemos visitas diurnas frequentes previamente agendadas, majori-



Nesta página

Edifício que abrigava o telescópio Boller & Chivens de 600 mm, atualmente instalado no Laboratório Nacional de Astrofísica.

Nele ainda há um sismógrafo em operação
(Crédito: Morgan Camargo)



Acima

Alunos monitores apresentam o círculo meridiano do OAM durante a Noite com as Estrelas em 2024 (Crédito: Joara Cardoso).

tariamente de escolas da região.

O Observatório interage ainda com a população através do projeto “Telescópios na Escola”, no qual os interessados podem observar o céu através do telescópio Argus, operado remotamente. Também atendemos por telefone ou email respondendo perguntas.

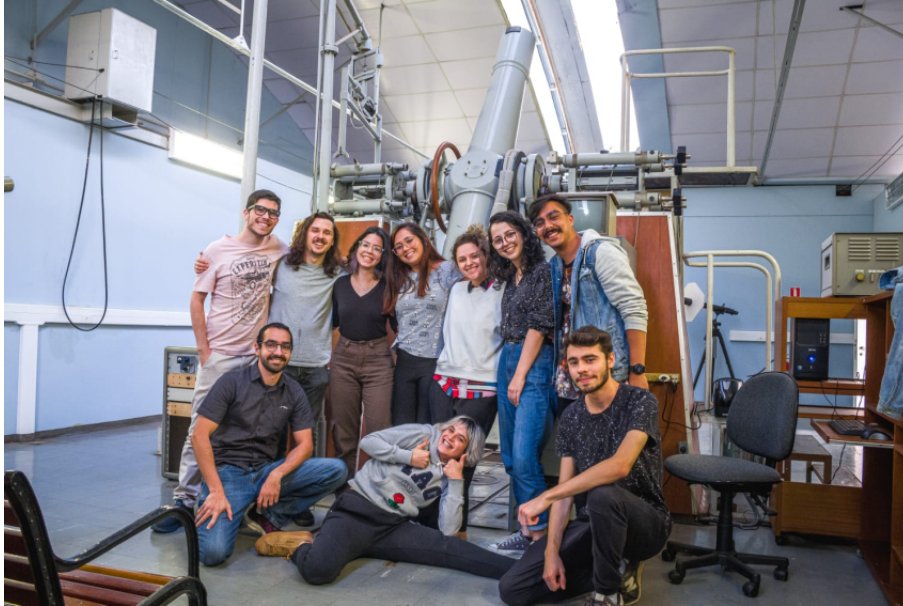
No passado, em algumas poucas ocasiões, infelizmente poucas, foi possível organizar cursos de formação de professores no Observatório. Além do estágio remu-

nerado para 20 professores em 1999 já citado, realizamos em 2019 o evento “Oficinas de Astronomia: A Evolução das Medidas de Distância e do Conhecimento Astronômico”, no âmbito do programa da Pró-Reitoria de Cultura e Extensão da USP “Aprender na Comunidade”. Participaram 40 professores, divididos em dois grupos.

Embora tenha sido um grande sucesso na avaliação dos participantes, essa experiência ainda não pode ser repetida. Nessa ocasião, contei com as colaborações inestimáveis do Prof. R. Boczeko, alunos e funcionários.

Todas essas atividades de interação com o público continuam e estão sendo reforçadas, agora com uma maior valorização e envolvimento de mais colegas. Essas atividades envolvem um grande número de estudantes de graduação e de pós-graduação bolsistas e voluntários. Desde o ano passado, 2025, também contam com a colaboração de alguns estudantes de graduação que em vez de bolsas receberam “créditos” para atuarem nas atividades extensionistas do OAM.

Atualmente, com esse maior envolvimento de vários colegas, temos algumas iniciativas no sentido da utilização dos instrumentos existentes no Observatório para fins de ensino. Essas iniciativas concentram-se principalmente no Departamento de Astronomia, mas também abrangem os

**Ao lado**

Equipe de Monitores do OAM durante a Noite com as Estrelas em 2022 (Crédito: Laís Borbolato Soares).

outros dois departamentos do IAG: Geofísica e Ciências Atmosféricas.

Um desses projetos, Do Telescópio à Descoberta: Método Científico através de Estrelas Variáveis, já iniciado em 2025 sob responsabilidade da Prof.^a Paula Rodrigues Teixeira Coelho, consiste na realização de observações remotas de estrelas variáveis por alunos do Ensino Médio, agrupados em turmas virtuais assistidas por dois alunos USP.

O Observatório como um todo e o círculo meridiano, em particular, constituem um patrimônio inestimável em uma das regiões mais ricas do país. Sua preservação passa, sem dúvida não somente pela conscientização de sua existência junto à população vizinha, mas também na própria Universidade.

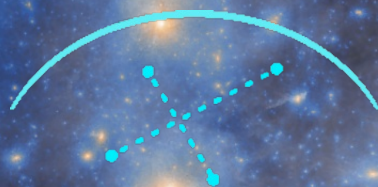
Com o envolvimento de um número crescente de colegas, como

está acontecendo neste momento, o futuro parece bastante promissor e traz muita esperança para a consolidação e ampliação das atividades do OAM e de sua presença no seio das comunidades da região. Sem dúvida, representa também uma coroação dos esforços de resistência ao longo de décadas, meus e de alguns colegas, alunos e funcionários •

Ramachrisna Teixeira
Universidade de São Paulo
rama.teixeira@iag.usp.br

Contracapa

Simulação da formação de um aglomerado de galáxias. A imagem mostra dois grandes halos de matéria escura, em laranja, conectados por uma tênua ponte de matéria escura, em azul. Os movimentos do gás em alta velocidade revelam fenômenos como pressão de arraste e desmonte mareal de galáxias satélites imersas nesse ambiente (Crédito: Simulação IllustrisTNG).



S.A.B.