

Revista  
Brasileira de

# ASTRO NOMIA

Produzida pela Sociedade  
Astronômica Brasileira

Volume 4 | Número 15  
Ano 2022

## O telescópio espacial James Webb

Astroturismo ♦ Galáxias anãs ♦ Cosmologia em 21 cm



## Editorial

*Este número 15 da Revista Brasileira de Astronomia é especialmente dedicado ao telescópio espacial James Webb, cujas primeiras imagens científicas foram divulgadas no trimestre correspondente a esta edição. A divulgação das imagens ocorreu em uma transmissão ao vivo assistida por todo o planeta por dezenas de milhões de pessoas. Mas mesmo quem não se mobilizou para assistir essa transmissão ainda assim tomou ciência das incríveis imagens captadas pelo telescópio, distribuídas que foram por todos os meios de comunicação e mídias sociais. O alcance desse anúncio mostra que a ciência é capaz de cativar as massas, quando encontramos a forma correta para divulgar nossas descobertas.*

*O telescópio James Webb é tema do primeiro artigo da revista, de autoria de Catarina Aydar. Mas ele também surge indiretamente no artigo de Marco Grossi sobre as galáxias anãs, e no de Carlos Alexandre Wuensche, sobre a cosmologia feita com observações na linha de 21 cm. Isso é inevitável, pois a Astronomia doravante será modificada pelas novas observações que dele virão.*

*O quarto artigo que trazemos trata de uma nova modalidade de turismo, intrinsecamente ligada à preservação de biomas: o astroturismo, a busca por locais de céu escuro, livres de poluição luminosa, que possam oferecer uma qualidade de céu excepcional para a astrofotografia ou para a contemplação das estrelas, um exercício do qual viver nos grandes centros urbanos nos priva cada vez mais.*

*Estamos em período de eleições! Em breve saberemos quem será o próximo presidente do país. Que ele possa ser alguém que zele pela democracia, pela diversidade de ideias e concepções de vida, pelo meio ambiente, que invista na ciência e cultura e que promova a saúde e educação universais para nosso povo!*

*Helio Jaques Rocha Pinto  
Presidente da Sociedade Astronômica Brasileira*

### **Esquerda**

Conjunção entre a Lua e Júpiter, observada em 08 de outubro de 2022, em Igaracu do Tietê (SP). Os pontinhos próximos a Júpiter são seus satélites Calisto, Io e Europa (Crédito: Tiago Domezi).

### **Capa**

Netuno observado pela câmera de infravermelho próximo, NIRCam, do telescópio espacial James Webb (Crédito: Joseph DePasquale, NASA, ESA, CSA, STScI).

# Revista Brasileira de Astronomia

produzida pela  
Sociedade Astronômica Brasileira

**Conselho Editorial** Alan Alves Brito,  
Reinaldo Ramos de Carvalho, Lucimara  
Martins, Ramachrisna Teixeira,  
Thiago Signorini Gonçalves

**Editor** Helio J. Rocha-Pinto

**Equipe de colaboradores** Hélio Dotto  
Perottoni, Matheus Bernini Peron,  
Douglas Brambila dos Santos,  
Maria Luiza Ubaldo de Melo,  
David Dias Kappler de Souza

**Contato** secsab@sab-astro.org.br

**Para anunciar** Fale com Rosana no 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**

Daniela Pavani

**Secretária**

Maria Jaqueline Vasconcelos

**Tesoureiro**

Alex Cavalieri Carciofi

**Endereço**

Sociedade Astronômica Brasileira  
Rua do Matão, 1226  
05508-090 São Paulo – SP  
<http://www.sab-astro.org.br>

## 4 Telescópio espacial James Webb

*A divulgação dos primeiros dados do Telescópio Espacial James Webb promete inaugurar uma nova era dourada para a Astronomia, como nos conta Catarina Aydar.*

## 10 Um universo de galáxias anãs

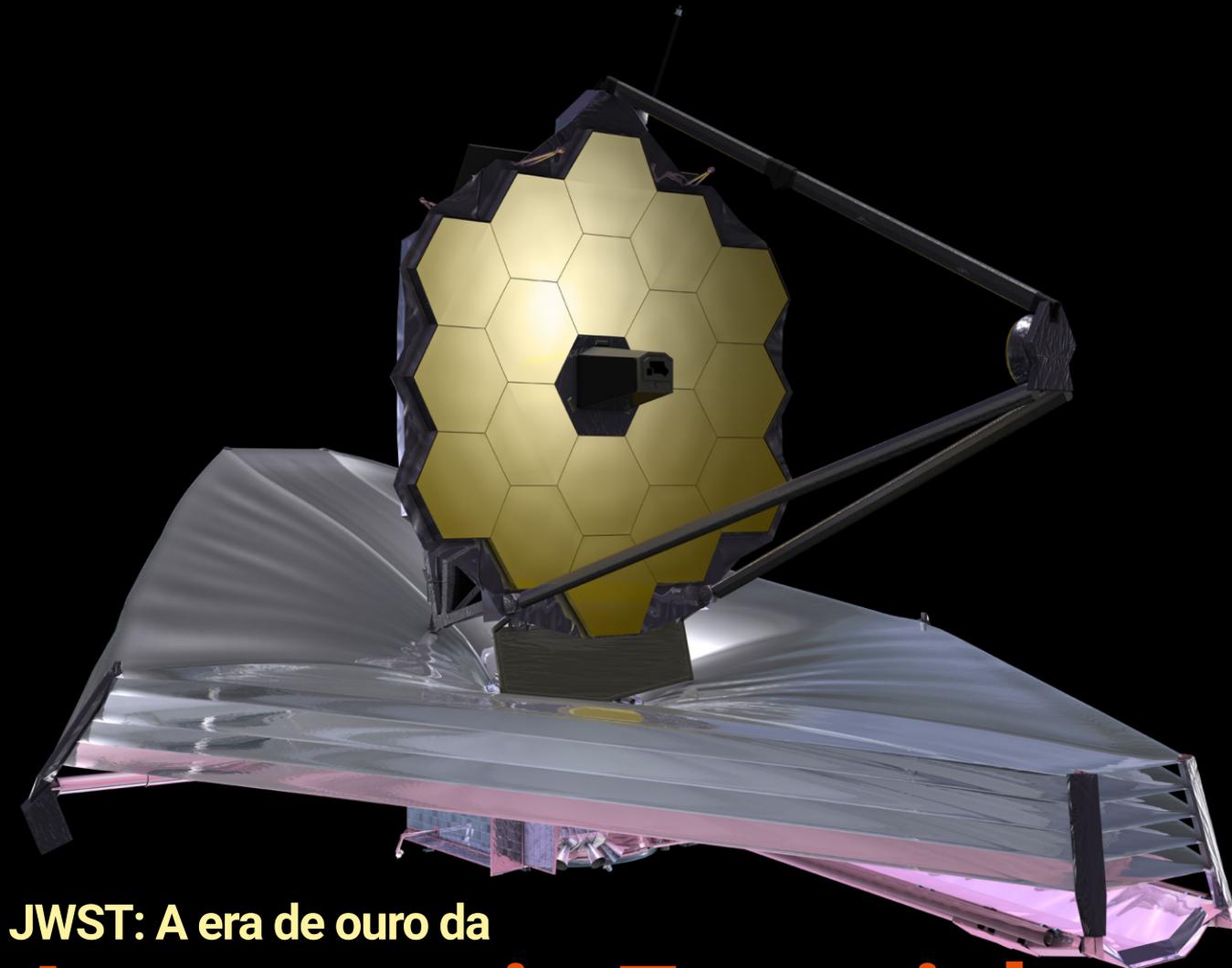
*Marco Grossi detalha a importância das galáxias anãs na construção do Universo e fundamenta a necessidade de estudá-las.*

## 19 Astroturismo

*Daniel Mello mostra como a Astronomia pode ser aliada a atividades de turismo autossustentável, atrelado à preocupação de preservação de ecossistemas e de céus escuros.*

## 28 Cosmologia na linha de 21 cm

*Carlos Alexandre Wuensche apresenta as principais ideias que fundamentam o uso da linha de 21 cm para estudar uma parte da história do Universo que até hoje não conhecemos.*



## JWST: A era de ouro da **Astronomia Espacial**

Planejado há 24 anos atrás, o telescópio espacial James Webb finalmente revela ao mundo suas primeiras imagens. E o assombro que elas geram compensa tanta espera!

**O** Telescópio Espacial James Webb (JWST, *James Webb Space Telescope*) é um marco para o início de uma nova era na Astronomia. Podemos dizer que é uma era de ouro, já que este elemento químico é um dos componentes do espelho de 6.5 metros de diâmetro que compõe tal instrumento — o maior espelho fora do planeta Terra até o momento. Quem vê as ima-

gens que esse telescópio é capaz de produzir pode ter um vislumbre de todas as descobertas que poderemos acessar, revelando detalhes do Universo que antes eram inacessíveis para a humanidade.

Este telescópio resulta de três décadas de trabalho e cerca de 10 bilhões de dólares investidos pelas NASA, Agência Espacial Europeia e Agência Espacial Cana-

dense. O aparato do tamanho de uma quadra de tênis foi enviado para orbitar o Sol juntamente com a Terra, a 1.5 milhão de quilômetros de distância do nosso planeta. Seu lançamento foi o presente de Natal de muitos astrônomos em 2021, quando ele foi enviado para o espaço dobrado feito um origami na ponta do foguete Ariane. Após um semestre de calibrações, o JWST está agora realizando suas primeiras observações científicas e espera-se que ele opere por 5 a 10 anos.

O JWST opera no infravermelho, uma frequência da luz que é mais vermelha do que o vermelho que seres humanos enxergam. Nossos corpos percebem esse tipo de radiação como calor, e temos aparelhos como óculos de visão noturna que detectam infravermelho. A atmosfera terrestre bloqueia parte da radiação infravermelha que vem do Sol e do espaço, de modo que ter um telescópio espacial nos permite acessar frequências que não são possíveis de detectar da superfície do nosso planeta. Essa frequência é muito importante para conseguirmos obter informações de ambientes com poeira, pois o infravermelho é capaz de atravessar os grãos de poeira de modo que podemos, assim, acessar informações que em outras frequências estariam sendo absorvidas e bloqueadas pelas nuvens interestelares.

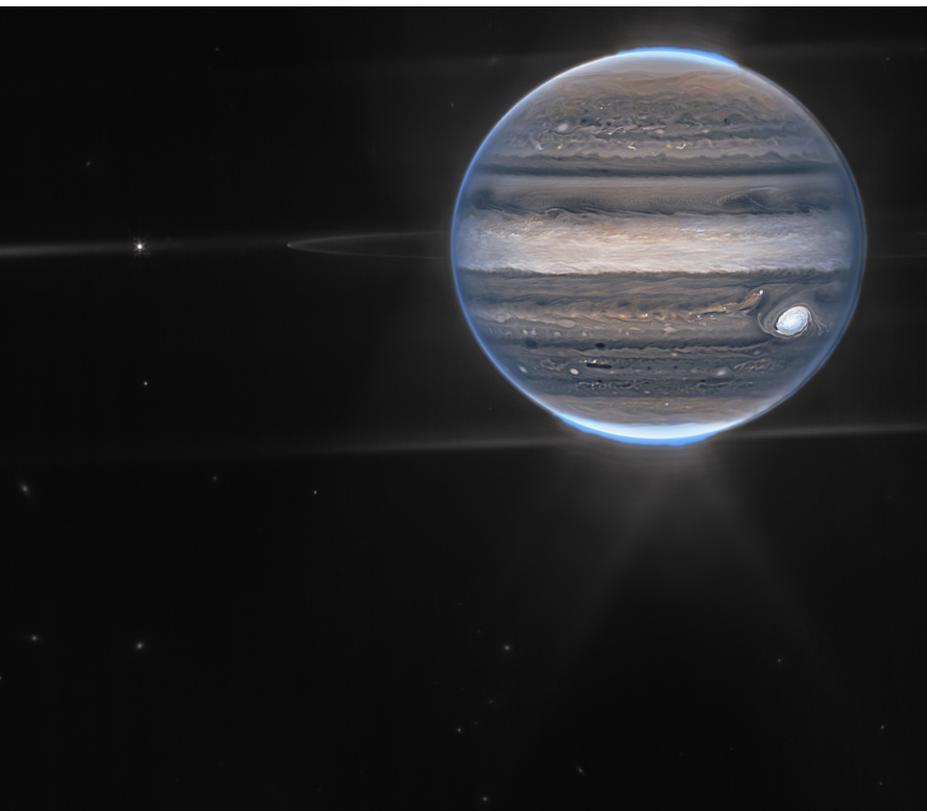
O infravermelho também nos

permite observar o passado do Universo. Quanto mais longe observamos, estamos obtendo informações mais do passado, pois a luz demora um tempo até percorrer essa grande distância. De acordo com o modelo cosmológico vigente, o Universo está em expansão, ou seja, o espaço está se esticando conforme o tempo passa. Assim, uma onda de luz azul que foi emitida nos primórdios do Universo vai sendo esticada conforme viaja pelo espaço que se expande, até chegar aos nossos detectores. Uma onda ser esticada significa que sua frequência diminui, ou seja, a cor vai ficando mais vermelha. Desse modo, se estamos operando com o infravermelho, teremos observações de objetos muito distantes que emitiram diversos tipos de radiação que se avermelharam até chegarem onde estamos.

O JWST possui instrumentos fotométricos e espectroscópicos. Com a fotometria, ele é capaz de gerar imagens; isso é semelhante a tirar uma foto, porém detectando radiação infravermelha. Já a espectroscopia é uma técnica na qual a radiação observada é decomposta (como no experimento de Newton sobre a dispersão da luz ou na capa de um álbum do *Pink Floyd*, em que um prisma decompõe a luz branca nas cores do arco íris). Dessa maneira, obtemos informações sobre o ambiente através do qual aquela luz passou, como a composição química, a io-

#### Na página anterior

Imagem do Telescópio Espacial James Webb. Os hexágonos dourados compõem o espelho primário, que foca a luz no espelho secundário presas nas hastes em sua frente. Em seguida, a radiação entra nesse aparato no centro dos espelhos e é decomposta nos instrumentos que ficam atrás do espelho primário. As camadas semelhantes a um tecido na base do telescópio atuam como guarda Sol para impedir que o telescópio receba radiação da Terra e do Sol que atrapassem suas observações. Na base do telescópio espacial estão alguns sistemas de comando e a antena que permite a comunicação com cientistas na Terra (Crédito: NASA).



#### Acima

Júpiter observado pelo JWST. É possível identificar os anéis de Júpiter e também as auroras boreal e austral nos polos desse planeta (Crédito: NASA, ESA, CSA, Jupiter ERS Team, Judy Schmidt).

nização, a densidade, a temperatura, entre outras propriedades físicas.

Considerando as capacidades do JWST, algo que se deseja observar é o nascimento e a morte de estrelas. As estrelas nascem a partir do colapso de gás e poeira em nuvens interestelares chamadas de nebulosas. Assim, para entender melhor como surgiram as estrelas e seus sistemas planetários, é fundamental que consigamos observar o que está acontecendo dentro de nuvens de poeira. Esse é o caso de NGC 3324 na Nebulosa de Carina, o berçário de estrelas na capa desta revista, um dos cinco primeiros objetos a serem observados com o JWST.

Outro objeto observado nessa

primeira divulgação de resultados do JWST foi a Nebulosa Planetária Anel do Sul, que representa o fim da vida de uma estrela com massa semelhante à do Sol. Percebiam a definição que temos das estruturas filamentosares de poeira que foram ejetadas da estrela. Além disso, podemos ver que o objeto central na verdade é um sistema binário, com a estrela que está no fim de sua vida e uma outra estrela companheira. Na imagem apresentada na próxima página, temos nos painéis da esquerda e do centro duas imagens feitas pelo JWST com filtros diferentes e na imagem da direita temos a imagem desse mesmo objeto feita pelo telescópio espacial Hubble, que observa em frequências parecidas com as que seres humanos enxergam.

O estudo de exoplanetas tem chamado a atenção de cientistas e leigos por levantar a famosa questão: "*existe vida fora da Terra?*" Atualmente, conhecemos mais de 5 mil planetas fora do nosso Sistema Solar, e é importante caracterizá-los para investigar se detectamos bioassinaturas nesses outros planetas. O JWST é capaz de prover informações acerca da atmosfera desses planetas através da técnica da espectroscopia. Assim, é possível procurar por compostos químicos que nós associamos à vida como conhecemos no nosso planeta, como por exemplo metano e dióxido de carbono, que podem ser indícios da possibilidade



de haver vida em outros planetas. O primeiro exoplaneta observado pelo JWST foi WASP-96 b, que é um planeta gasoso gigante (similar a Júpiter) ao redor de uma estrela semelhante ao Sol, mas com uma distância menor que Mercúrio. Foi possível não apenas detectar a presença de água em vapor, como também determinar

mostram galáxias em interação — e também entender melhor como se deu a formação dessas galáxias quando o Universo era jovem. Assim, a primeira imagem revelada do JWST em 11 de julho de 2022 foi uma imagem de campo profundo. Isso significa que o JWST ficou apontando para uma pequena região escura do céu por

que esse vapor está distribuído em nuvens, e não uniformemente espalhado pela atmosfera.

Outro tópico de interesse para a astronomia é o estudo de galáxias. Com tamanho salto tecnológico dado, poderemos compreender com mais detalhes as galáxias próximas que já conhecemos — recomendo que procure as imagens geradas pelo JWST do Quinteto de Stephan e da galáxia da Roda da Carroça (*Cartwheel*), que

#### Acima e ao lado

Imagens da Nebulosa Planetária Anel do Sul obtidas com o JWST (acima) e com o telescópio espacial Hubble (esquerda). Essa nebulosa planetária é a consequência da morte de uma estrela com massa semelhante à massa do Sol.

Percebe-se como temos muito mais definição com as observações do JWST do que com as do Hubble. A imagem à esquerda é feita com radiação infravermelha média, a do centro com radiação infravermelha próxima e a da direita com radiação visível (Créditos: NASA).



#### Acima

Imagem de campo profundo observado pelo JWST. Os pontos com padrões de difração como cruzes são estrelas da nossa Galáxia. Todos os demais pontos nessa imagem são galáxias, com suas bilhões de estrelas, planetas e demais objetos astronômicos. No centro da imagem vemos auras circulares amareladas, que são galáxias elípticas em um aglomerado de galáxias muito massivo, gerando o efeito de lente gravitacional que se percebe pelos semiarcos ao redor desse aglomerado (Crédito: NASA).

muito tempo (10 horas no caso dessa imagem específica), para receber o máximo possível de radiação proveniente daquele espaço. Dessa maneira, a imagem acima mostra um aglomerado de galáxias (objetos circulares e elípticos amarelados no centro) que, por ser muito massivo, acaba gerando uma distorção no espaço-tempo, percebida pelos semiarcos que estão em volta do aglomerado. Esses arcos mostram galáxias que se situam atrás do aglomerado, cuja luz foi distorcida no caminho até nós. Percebam também que há inúmeras galáxias de fundo, de diversos tipos, cores e tamanhos! A partir dessa primeira imagem, astrônomos e astrônomas já estão fazendo diversos estudos, como por exemplo detectando e

caracterizando galáxias das primeiras centenas de milhões de anos do nosso Universo. Tais descobertas inclusive questionam se o modelo cosmológico vigente está realmente adequado para descrever o passado do Universo, agora que podemos observá-lo diretamente.

Com relação à participação brasileira nas observações do JWST, além de termos diversos astrônomos e astrônomas envolvidos como co-investigadores em projetos aceitos para o primeiro semestre de investigações científicas do telescópio, temos dois projetos cujos prin-

cipais investigadores estão associados a instituições brasileiras. Ambos os projetos envolvem o estudo de núcleos ativos de galáxias, ou seja, galáxias cujo buraco negro supermassivo central está ativamente capturando matéria. Um dos projetos é do professor Rogemar Riffel, da Universidade Federal de Santa Maria, no qual uma galáxia próxima será investigada em frequências inéditas do infravermelho, e será possível compreender melhor a relação entre o buraco negro supermassivo e os filamentos de poeira na região central dessa galáxia. O outro projeto, em que eu estou envolvida, é do professor Roderik Overzier, do Observatório Nacional. Nele, vamos caracterizar as duas radiogaláxias mais distantes

que se conhece até então. Tais objetos são núcleos ativos de galáxias que possuem emissão na frequência de rádio, que é associada a jatos gerados no processo de crescimento do buraco negro supermassivo. Queremos caracterizar tais objetos na juventude do Universo para compreender como esse tipo de galáxia evoluiu com o tempo, comparando com radiogaláxias mais próximas que já foram estudadas na literatura.

A maior surpresa que o JWST poderia nos trazer seria se não houvesse surpresa alguma nas descobertas e novidades que ele revelará. Com as cinco primeiras observações divulgadas, já podemos ter uma perspectiva de tudo o que a humanidade irá descobrir com a operação desse telescópio espacial. Poderemos ver através da poeira, caracterizar melhor tudo o que já conhecemos e nos direcionar para os confins do

Universo para conhecermos ainda mais sobre o que nos cerca. Apenas esses resultados preliminares já estão colocando em cheque a forma como compreendemos o início, a evolução e a composição do Universo! Toda a comunidade astronômica está mobilizada para trabalhar muito nas descobertas que o JWST fará, e isso também incentiva que outros telescópios de grande porte sejam projetados, construídos e lançados para operar em outras frequências. Assim, o JWST é um telescópio revolucionário que está apenas dando início à era de ouro da astronomia, permitindo que a humanidade enxergue o mais longe e com mais detalhes que jamais foi possível •

*Catarina Pasta Aydar*  
*catarina.aydar@gmail.com*  
*Inst. Max Planck de Fís. Extraterrestre*

#### **Abaixo**

Nebulosa NGC 3324. Esta estrutura de gás e poeira é um berçário de estrelas, e a radiação infravermelha permite que possamos estudar as estrelas que estão dentro dessas nuvens e os sistemas planetários que podem estar se formando (Crédito: JWST).



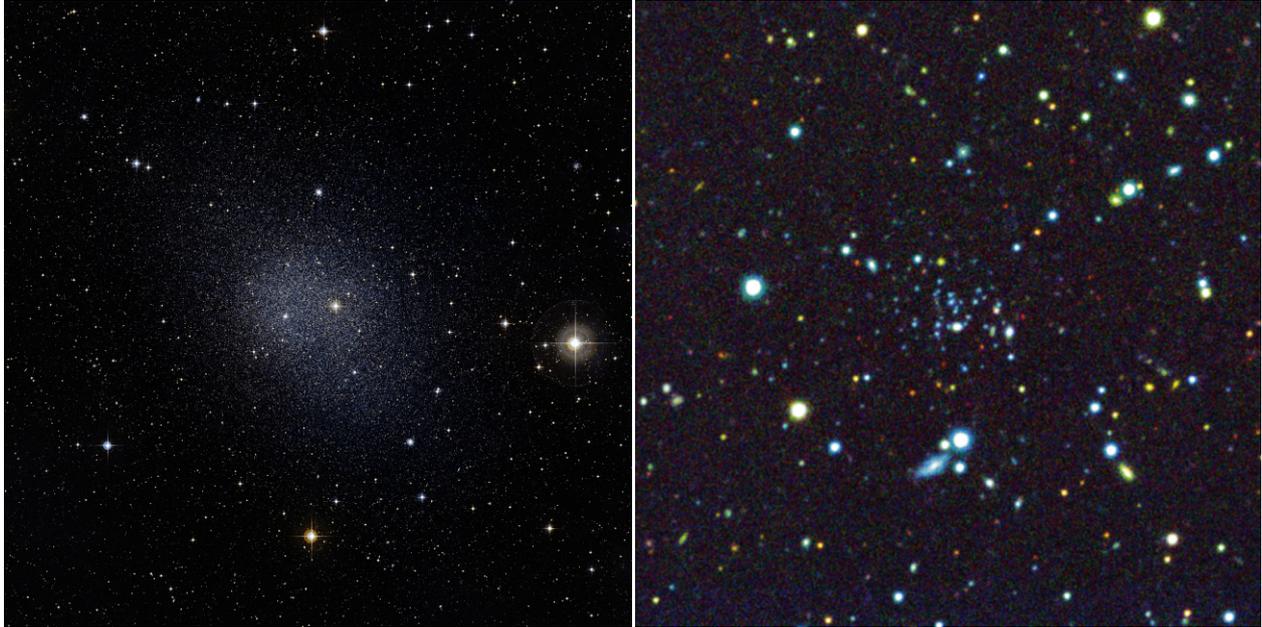
# Um Universo de galáxias anãs

Há muito mais galáxias anãs no Universo do que supõe nossa vã filosofia. E podemos aprender muita coisa com elas, pois devem ter sido os blocos de formação das galáxias maiores.

**G**aláxias anãs são definidas como sistemas estelares de pequeno tamanho intrínseco, e pequena luminosidade e massa em comparação com uma típica galáxia espiral como a Via Láctea. Em geral se admite como linha de separação entre galáxi-

as anãs e galáxias normais um limite em massa estelar que é aproximadamente abaixo de 1 bilhão de massas solares. Isto é, galáxias que tenham massa inferior a esse limite são consideradas anãs.

As galáxias anãs têm uma ampla gama de propriedades e his-



tóricos de formação estelar. Algumas são extremamente pobres em gás, enquanto em outras a massa do gás é dominante em comparação com a massa das estrelas. São caracterizadas por terem um baixo conteúdo de metais (isto é, todos os elementos mais pesados do que o hélio); encontram-se ao redor de galáxias mais massivas como a Via Láctea, em grupos ou grandes aglomerados de galáxias, ou isoladas em regiões de baixa densidades de galáxias.

Existem vários tipos de galáxias anãs mas, em geral, podemos distingui-las em dois grandes grupos, em analogia com as galáxias mais massivas: anãs formadoras de estrelas e ricas em gás (denominadas de "tipo tardio"), e anãs pobres em gás sem formação estelar recente, onde as populações estelares têm idades acima de alguns bilhões de anos (anãs de "tipo precoce").

De acordo com as diversas mor-

fologias, luminosidades, tipo de populações estelares dominantes e conteúdo de gás, o grupo de anãs do tipo precoce pode ser subclasificado mais detalhadamente em galáxias anãs elípticas, anãs esferoidais e anãs ultrafracas, em ordem de luminosidade decrescente. Os tipos tardios incluem galáxias anãs irregulares e galáxias anãs compactas azuis que diferem por terem uma atividade de formação estelar recente mais suave (as primeiras) e mais violenta (as segundas). As anãs compactas azuis estão passando por um surto de formação estelar, mas é esperado que depois de um tempo elas retornem a uma fase mais quieta sem alterar radicalmente as suas propriedades.

Antes de 2004, a menor galáxia anã conhecida era Draco, com uma massa estelar de cerca  $5 \times 10^5 M_{\odot}$ . Desde então, galáxias ultrafracas até 1000 vezes menos lu-

*Exemplos de galáxias anãs de tipo precoce*

**Na página anterior**

A anã elíptica NGC 205  
(Crédito NOIRLab/NSF/Aura).

**Acima, canto esquerdo**

A galáxia anã esferoidal Fornax (Crédito: ESO: Digitised Sky Survey 2).

**Acima, canto direito**

Galáxia anã ultrafraca Indus 1 (Crédito: Koposov e Belukorov).



*Exemplos de galáxias anãs de tipo tardio*

**Acima, canto esquerdo**  
A galáxia anã irregular NGC 6822 (Crédito: Local Group Galaxies Survey Team/NOIRLab/NSF/AURA).

**Acima, canto direito**  
A galáxia anã azul compacta I Zw 18 (Crédito: NASA, ESA e A. Aloisi, STScI).

minosas do que Draco foram descobertas no halo da Via Láctea.

### O papel cosmológico das galáxias anãs

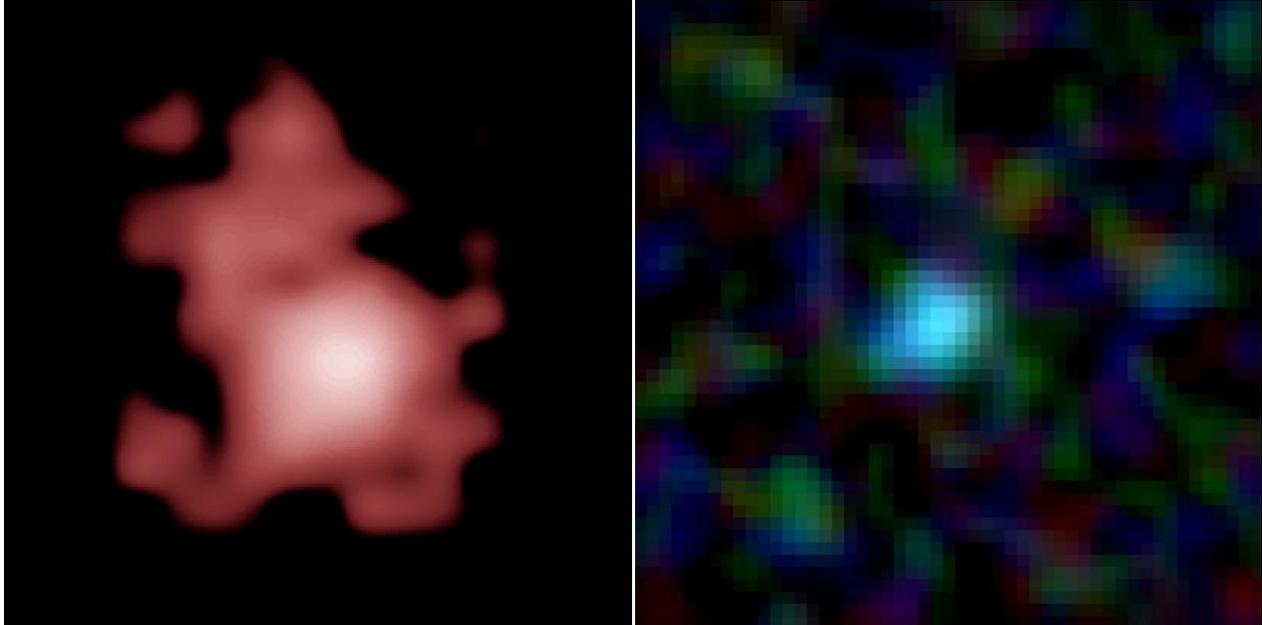
As galáxias anãs constituem a população dominante de galáxias, em termos numéricos, no Universo Local e distante. No cenário cosmológico padrão, elas desempenham um papel crucial na formação hierárquica de galáxias, uma vez que foram as primeiras galáxias a se formar e contribuir, por meio de fusões, para o crescimento de outras mais massivas. De acordo com o modelo cosmológico padrão, as primeiras galáxias que se formaram foram galáxias de baixa massa e metalicidade.

Espera-se que galáxias anãs próximas, ricas em gás e pobres em metais, sejam análogas às galáxias primitivas tanto por sua baixa metalicidade, quanto pela presença de intensos surtos de formação estelar. Galáxias com idades de al-

gumas centenas de milhões de anos após o Big Bang foram descobertas pela primeira vez graças ao telescópio Hubble e galáxias anãs ainda mais jovens estão sendo encontradas pelo telescópio James Webb depois de menos de um mês da divulgação de suas primeiras imagens científicas.

No entanto, devido à sua baixa luminosidade intrínseca, as investigações detalhadas desses objetos a grandes distâncias é extremamente complexa e desafia os limites de nossa capacidade de observação atual. Portanto é importante combinar as observações mais detalhadas de objetos análogos mais próximos com as das galáxias mais jovens e distantes para podermos entender melhor as suas propriedades e conseguir desvendar os mistérios das primeiras fases de evolução do Universo.

Por fim, acredita-se que as galáxias anãs abriguem uma grande componente de matéria cuja natureza não é muito compreen-



dida, chamada matéria escura. Em uma galáxia como a Via Láctea, esperamos que a matéria escura seja cerca de 10 vezes mais abundante do que a “matéria comum” chamada de matéria bariônica. As galáxias anãs pelo contrário, são fortemente dominadas pela matéria escura. A razão entre a massa de matéria escura e bariônica nestas galáxias é geralmente muito alta e, em alguns casos, pode chegar até 1000. Portanto, o estudo das galáxias anãs permite colocar restrições sobre as propriedades da matéria escura (como o seu perfil de densidade e sua concentração no centro das galáxias), ao fim de obter uma convergência entre os modelos teóricos e as observações dos efeitos gravitacionais da matéria escura sobre a matéria bariônica. Além disso, espera-se detectar sinais desta misteriosa componente de matéria em galáxias anãs, devido às

colisões entre partículas e antipartículas de matéria escura. A aniquilação poderia gerar fluxos de partículas e antipartículas e/ou fótons de alta energia. Mais especificamente os candidatos favoráveis seriam galáxias anãs esferoidais ao redor da Via Láctea, sendo mais próximas e mais dominadas pela matéria escura do que os outros tipos de galáxias anãs.

### A evolução de galáxias anãs em função do ambiente

Dentro de um volume de raio igual a 10 milhões de parsecs, centrado na Via Láctea, mais de 70% de todas as galáxias são anãs do tipo tardio. Devido à sua proximidade, elas oferecem a oportunidade única de investigar o processo de formação estelar no regime de baixa metalicidade e este tipo de análise pode ser executado em um nível de detalhe

#### Acima, canto esquerdo

GN-z11, a galáxia mais distante descoberta pelo telescópio Hubble. A galáxia tem uma idade de apenas 400 milhões de anos após o Big Bang (Crédito: NASA, ESA, Yale University, G. Brammer, P. van Dokkum, G. Illingworth).

#### Acima, canto direito

A galáxia de Maise, uma das candidatas a galáxia jovem detetada pelo telescópio James Webb. A galáxia tem uma idade estimada de cerca 250 milhões de anos (Credito: Steven Finkelstein, Micaela Bagley, Casey Papovich, CEERS Team).

que seria impossível a distâncias maiores. Sendo onipresentes no Universo Local, podem ser estudadas em diferentes ambientes, desde vazios cósmicos (vastas regiões subdensas com tamanhos de 10 a 25 milhões de parsecs e de forma aproximadamente esférica) a aglomerados ricos (estruturas com mais de 100 galáxias). O estudo de anãs isoladas nos permite entender o processo de evolução e acreção de massa sem que estes sejam afetados pela interação com outras galáxias. Em altas densidades de galáxias, elas podem fornecer uma chave para entender como os diferentes tipos de galáxias anãs podem emergir devido à interação com seus arredores.

Uma das correlações mais fundamentais entre as propriedades das galáxias no Universo local é a chamada relação morfologia-densidade: galáxias quiescentes de tipo precoce são preferencialmente encontradas em ambientes mais densos, enquanto galáxias formadoras de estrelas habitam regiões do Universo de menor densidade de galáxias.

Anãs de tipo precoce (como as anãs elípticas e esferoidais) representam a população dominante em aglomerados de galáxias e raramente são encontradas isoladas.

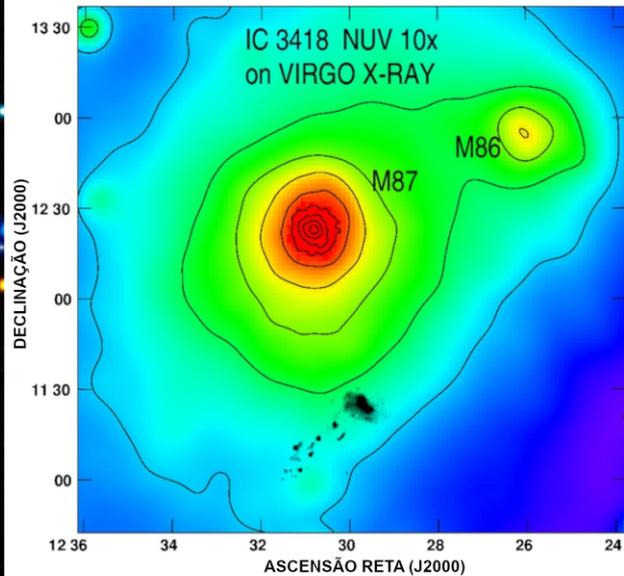
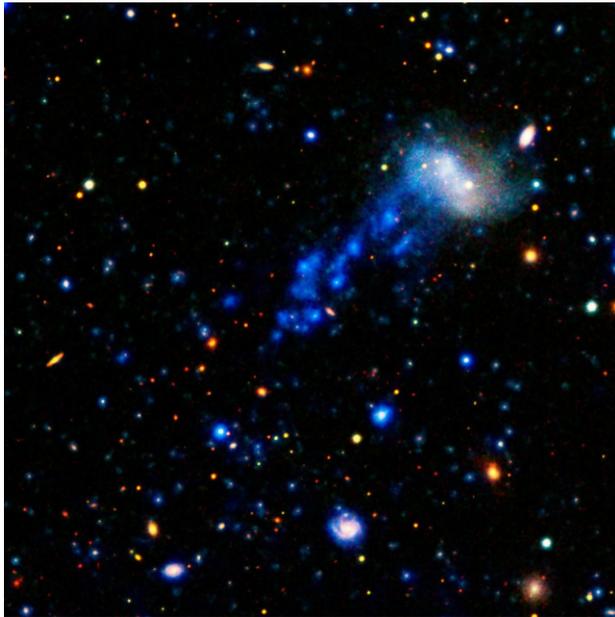
Espera-se que os efeitos ambientais na evolução das galáxias sejam mais fortes em anãs, por causa de seus menores potenciais gravitacionais e meio interesse-

lar menos densos.

A interação de uma galáxia anã com o gás quente difuso que envolve as galáxias em um aglomerado, ou a interação gravitacional com galáxias mais massivas, podem remover seu meio interestelar, extinguir o processo de formação de estrelas e modificar a sua morfologia.

Está bem estabelecido que galáxias de tipo tardio em aglomerados ricos tendem a ter uma menor concentração de gás do que suas homólogas mais isoladas e que existe uma anticorrelação entre a deficiência de hidrogênio atômico (H I) e a distância até o centro do aglomerado.

Foi muito debatido se isso também se aplica aos outros componentes do meio interestelar como o gás molecular e poeira, que geralmente são mais concentrados no centro das galáxias do que o H I. Galáxias espirais e anãs no aglomerado de Virgem mostram que o hidrogênio atômico de baixa densidade é preferencialmente removido da periferia destas galáxias e que as espirais e anãs pobres em gás também possuem discos de poeira significativamente menos estendidos do que as ricas em gás. Um exemplo dos efeitos dramáticos de um ambiente denso na transformação de galáxias anãs é dado por IC 3418, um anã deficiente em gás no aglomerado de Virgem. A galáxia está a cerca de 300 mil parsecs em projeção da elíptica massiva M 87



no centro do aglomerado. Todo o gás foi retirado da sua estrutura e a formação estelar encontra-se completamente extinta no disco desta galáxia. Ela apenas mostra uma cauda de regiões de formação estelar originadas do gás despejado pela interação com o gás quente do meio intraglomerado, um efeito chamado pressão de araste.

### A distribuição de metais em galáxias anãs formadoras de estrelas

As galáxias anãs formadoras de estrelas (SFDG) são sistemas de baixa massa, ricos em H I, com baixa concentração de metal e conteúdo de poeira. Elas costumam ser encontradas isoladas ou em ambientes de baixa densidade.

A abundância de *metais* é um traçador fundamental do processo evolutivo de uma galáxia. O conteúdo de elementos mais pe-

sados que o hélio depende de muitos fatores como a taxa de formação de estrelas e a fração de massa de gás, mas também reflete a interação entre a ejeção de gás quimicamente enriquecido, provocada pelo ventos estelares e explosões de supernovas, e a acreção de gás do meio intergaláctico.

Galáxias de baixa luminosidade e baixa massa são menos evoluídas quimicamente do que galáxias mais massivas, presumivelmente devido à formação estelar menos eficiente e a maior perda de metais durante eventos de supernovas e ventos estelares.

A metalicidade de uma galáxia pode ser estudada em termos da abundância de oxigênio no meio interestrelar. Uma galáxia é definida de baixa metalicidade se tiver uma abundância de oxigênio menor que um décimo da metalicidade solar.

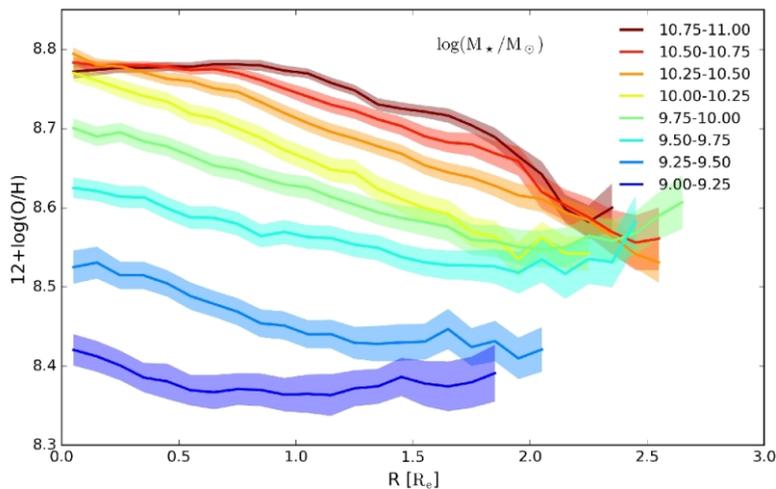
O regime de baixa massa e bai-

#### Acima, canto esquerdo

A galáxia anã IC 3418 no aglomerado da Virgem. A combinação de imagens no ultravioleta e no óptico mostra a presença de regiões de formação estelar fora do disco da galáxia originadas do gás tirado da galáxia devido à interação com o meio intraglomerado (Crédito: NASA/JPL-Caltech).

#### Acima, canto direito

A posição de IC 3418 em relação à galáxia elíptica massiva M 87, localizada no centro do aglomerado. Os contornos indicam a densidade do meio intraglomerado (Crédito: Jeffrey Kenney).



**Acima**

A forma do gradiente de metalicidade (medido através da abundância do oxigênio) para galáxias com massas entre 1 e 100 bilhões de massas solares, obtida pelo levantamento MaNGA (Crédito: Marco Grossi).

xa metalicidade ainda é relativamente pouco estudado nas populações galácticas. O progresso na identificação de novos sistemas pobres em metais tem sido relativamente lento, devido ao seu baixo brilho. Identificar essas galáxias fracas requer que elas estejam relativamente próximas, ou que contenham estrelas jovens e brilhantes devido a um episódio de formação estelar recente.

Observações de galáxias de baixa metalicidade são importantes por diversas razões: as propriedades do meio interestelar das SFDGs atuais são uma reminiscência daquelas das galáxias primitivas. A sua grande presença no Universo local proporciona a oportunidade de estudar o processo de formação estelar em um meio interestelar pobre em metais. Devido à sua proximidade, esse tipo de análise pode ser realizado em um nível de detalhamento que seria impossível em desvios para o vermelho mais altos.

Estrelas jovens formadas nas primeiras galáxias de baixa massa e baixa metalicidade são considerados os principais contribuintes para a reionização do meio intergaláctico, uma fase que durou entre 500 milhões e um bilhão de anos após o Big Bang. As contrapartes locais desses sistemas são candidatos promissores para estudos sobre vazamento de radiação ionizante de estrelas massivas e o seu efeito no meio intergaláctico circundante.

As galáxias anãs de tipo tardio representam o estado inicial de todas as galáxias anãs. Por exemplo, estudos de vazios mais próximos (a distâncias < 20 Mpc) revelaram uma população de anãs muito pobres em metais (mais de 20 vezes menor que o valor solar), ricas em gás, que não parecem seguir as relações usuais de escala de galáxias, como a relação massa-metalicidade. Essas galáxias provavelmente estão acretaando gás pobre em metal do meio intergaláctico, um mecanismo que se espera que seja muito eficiente no início do Universo. Assim, procurando por este tipo de objetos podemos inferir informações preciosas sobre a evolução das galáxias pobres em metais e como as galáxias adquirem massa em alto desvio para o vermelho.

As linhas de emissão associadas ao gás ionizado em regiões de formação estelar estão ligadas aos eventos de formação estelar mais recentes e têm sido usadas há mui-

to tempo para investigar os padrões de abundância de metais na fase gasosa do meio interestelar e a sua evolução nas galáxias.

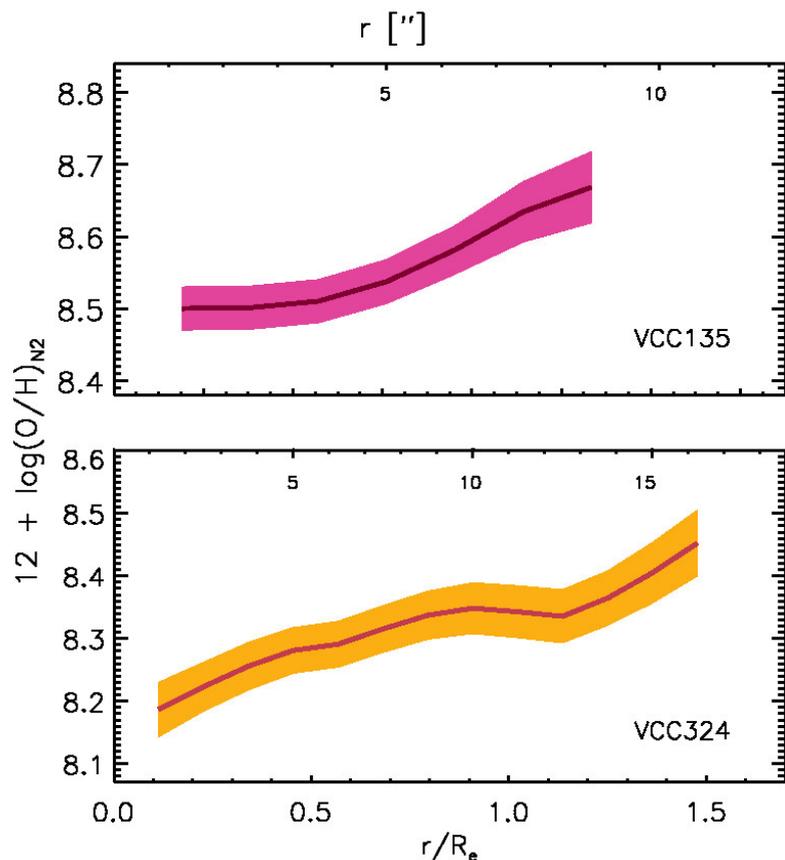
Nesse contexto, o advento de levantamentos espectroscópicos de unidades de campo integral (IFU), como CALIFA (*Calar Alto Legacy Integral Field Area*), ou MaNGA (*Mapping Nearby Galaxies at APO*) entre outras, tornaram possível derivar a distribuição espacial de metais para grandes amostras de galáxias, usando linhas nebulares. A análise da distribuição radial de elementos pesados em galáxias é de particular interesse porque nos permite entender o processo de acreção de gás e sua variação radial ao longo do disco estelar, e os mecanismos que regulam o transporte de metais do interior ao exterior do disco.

Estudando uma amostra de galáxias do levantamento MaNGA, mostramos que os gradientes de metalicidade do gás de sistemas com formação estelar dependem da massa estelar: a abundância de metais diminui com o raio em galáxias massivas — quanto maior a massa, mais íngreme é o gradiente — enquanto as galáxias anãs exibem um conteúdo de metal aproximadamente constante ao longo de seus discos.

No entanto, em alguns casos as anãs podem apresentar gradientes de metalicidade positivos, nos quais a abundância de metais aumenta do centro até às bordas do disco, ao contrário do que é encon-

trado em galáxias espirais massivas. Recentemente, descobrimos duas galáxias anãs no aglomerado de Virgem com essas tendências. Gradientes de metalicidade positivos foram observados apenas em poucas galáxias muito isoladas, ou em sistemas mais distantes. Acredita-se que eles estejam associados à acreção de gás pobre em metal do meio intergaláctico, um mecanismo que seria menos provável de ocorrer em um ambiente de alta densidade como o aglomerado da Virgem. O fluxo de gás pobre em metal para as regiões centrais das anãs poderia portanto estar relacionado a um evento recente de fusão com

**Abaixo**  
A forma de gradiente de metalicidade (medido através da abundância do oxigênio) para duas galáxias anãs no aglomerado da Virgem. As galáxias apresentam uma variação de metalicidade que aumenta com a distância ao centro, contrariamente ao observado na amostra MaNGA (Crédito: Marco Grossi).



uma companheira rica em gás. As fusões de galáxias são eficazes na condução de gás pobre em metal da periferia para a região central, causando a inversão do gradiente de metalicidade e estimulando a atividade de formação estelar.

### A revolução da próxima década

O telescópio James Webb transformará a nossa visão do Universo primitivo pois nos permitirá sondar épocas muito além das quais já foram alcançadas pelo telescópio Hubble e, assim permitirá uma melhor compreensão de como os primeiros objetos luminosos — as primeiras estrelas e as primeiras galáxias — se formaram no início do Universo.

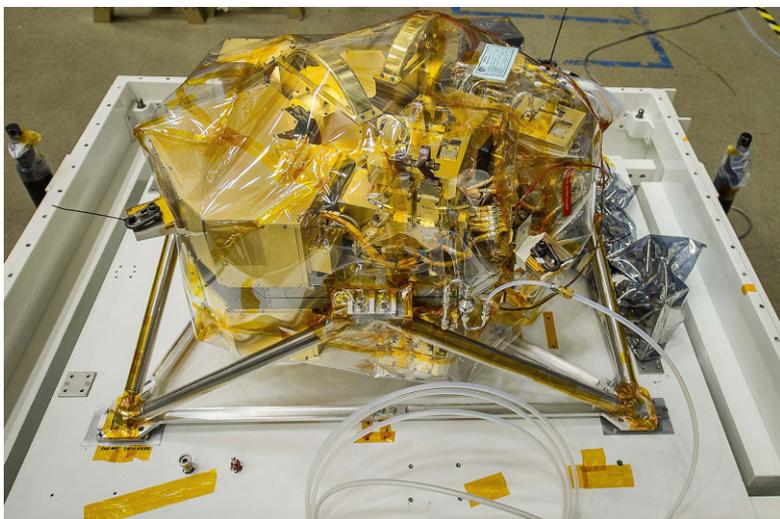
Bang — que já formaram pelo menos algumas centenas de milhões de massas solares em estrelas .

Ao mesmo tempo, os levantamentos óticos em grande escala da próxima geração permitirão empurrar a descoberta de galáxias anãs de baixa luminosidade até às fronteiras do Volume Local (10 milhões de parsecs), e permitirão aumentar a amostra de galáxias anãs próximas com uma vasta gama de massas e morfologias, evoluindo em ambientes diferentes, até ao regime 'ultrafraco' •

*Marco Grossi*  
*Univ. Fed. do Rio de Janeiro*  
*grossi@astro.ufrj.br*

#### Abaixo

A câmera infravermelha do telescópio JWST, conhecida como NIRCam, no Centro de Voo Espacial Goddard, antes da sua instalação no telescópio espacial (Crédito: NASA).



O instrumento NIRCam, a câmera mais sensível a bordo do JWST, já está detetando as primeiras candidatas a galáxias muito jovens — com idades de cerca de 250 milhões de anos após o Big



---

# Astroturismo

## Resgatando o contato ancestral com o Cosmos

Uma nova modalidade de turismo está ganhando força entre os mais jovens, especialmente diante da possibilidade de realizar imagens do céu com seus aparelhos celulares.

**O** encanto da humanidade pela noite estrelada é tão antigo quanto ela própria. Foi com a ajuda da Astronomia que começamos a compreender melhor a natureza e a desenvolver habilidades práticas que culminaram com o aparecimento das primeiras ci-

vilizações. Entretanto, após a revolução industrial, nosso modo de vida urbano e o aumento da poluição luminosa nos afastou lentamente do contato com as estrelas. Neste começo de século, este contato parece estar se renovando. Pessoas do mundo todo têm viajado para os locais mais escuros

**Acima**

Sair da cidade e se hospedar em meio à natureza para encontrar novamente a Via Láctea, por exemplo, tem se tornado uma nova forma de turismo onde o motor principal é a busca por conhecimento e por novas experiências (Crédito: Daniel Mello e projeto Astroturismo nos Parques Brasileiros)

**Página Anterior**

A Via Láctea e o planeta Saturno com o famoso "coqueiro deitado", cartão postal da praia do Aventureiro, Ilha Grande/RJ. Natureza e Astronomia em um mesmo local (Crédito: Igor Borgo).

do planeta, longe das luzes das cidades, onde ainda é possível acompanhar a dança dos planetas, as constelações e todos os tesouros do Universo. O Astroturismo vem ganhando adeptos, tornando-se um segmento turístico particular, abrindo um novo campo de atuação para a carreira de Astronomia, contribuindo para a educação, a divulgação da ciência e alavancando uma economia sustentável com base na preservação ambiental.

O Astroturismo é um segmento relativamente recente que se compõe de atividades integradas focadas em ecoturismo, geoturismo, turismo de experiência e turismo científico, que utiliza destinos turísticos adequados para observação e contemplação dos astros. Essas atividades podem ocorrer em locais escuros longe das luzes das

cidades (astroturismo *dark sky*) ou a partir de observatórios astronômicos, planetários e museus de ciência com foco em Astronomia, mesmo em centros urbanos. Ao discutir as implicações da poluição luminosa para além do contexto astronômico, o Astroturismo se coloca também como um turismo de profunda preocupação com as questões ambientais. O risco da perda do céu estrelado tem colocado a preservação dos locais escuros em um contexto muito especial, atraindo turistas para locais que proporcionam cenários de rara beleza, tanto na Terra, quanto no firmamento: um lago, um acampamento em meio à floresta, um observatório em um deserto, uma hospedagem nas montanhas sobre a luz da Via Láctea. Encontrar estes locais tem sido um dos objetivos desta forma de tu-

rismo não convencional, que vem atraindo a atenção de pessoas em todo o mundo.

Como turismo de experiência, o astroturismo pode provocar efeitos marcantes, incluindo reflexões pessoais, relaxamento e impressões sensoriais significativas, provocadas pelo ambiente noturno e pelo contato com a noite estrelada. A associação entre o espaço geográfico (relevo, clima, bioma, cultura, etc.) e o espaço sideral na experiência turística é profundamente impactante quando pensamos que apenas o Astroturismo pode propiciar esta experiência. Cada vez mais as pessoas estão dispostas a viajar para desfrutar do Universo e o contato com a noite estrelada é o ponto de partida para essa grande descoberta, que nos leva novamente ao céu

noturno ancestral, cultuado e admirado por nossos antepassados.

### A preservação do céu estrelado

Atualmente, estima-se que 80% da população mundial não consiga mais ver a Via Láctea. Essa estatística é ainda maior para os países da Europa Ocidental e para os EUA, onde este número pode chegar a 99%. Nunca iluminamos tanto o nosso planeta como neste começo de século XXI, como atestam medidas *in situ* do brilho do céu e dados e imagens de satélite, que mostram nosso planeta visto do espaço durante a noite. Este efeito pode ser visto com o auxílio do *Atlas Mundial do Brilho do Céu Noturno*, produzido em 2016 por uma equipe de pesquisadores europeus. Além do im-

#### Abaixo

O Astroturismo tem se destacado como um tipo de turismo científico integrado, resgatando o contato ancestral da humanidade com o céu estrelado e proporcionando experiências para além do valor científico da Astronomia (Crédito: Daniel Mello e André Costa).



pacto astronômico e na economia, pesquisas têm indicado o impacto ambiental negativo da poluição luminosa. Alterações nos ciclos biológicos de plantas e animais, no equilíbrio ecológico e na saúde humana têm sido estudadas e comprovadas em anos recentes.

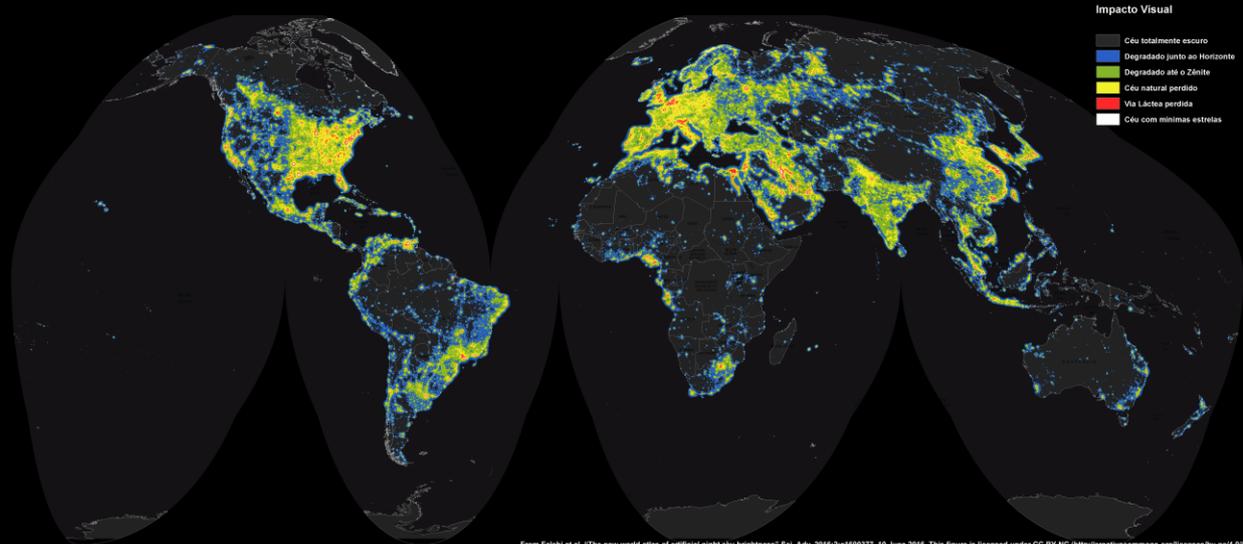
Existem hoje entidades internacionais que exercem atividades de conscientização sobre os riscos da poluição luminosa e de fomento para ações que viabilizem a preservação do céu escuro e do seu legado cultural. Entre elas estão a *International Union for Conservation of Nature* (IUCN), a *International Dark Sky Association* (IDA) e a *Fundación Starlight* (FS). As duas últimas têm como objetivos específicos o desenvolvimento de ações e projetos em todo o mundo para preservação das áreas, regiões e parques ao redor do globo que permitam com que a humanidade não se prive do contato

com a noite estrelada. No Brasil, em anos recentes, foram criadas organizações e grupos com o mesmo objetivo. Entre elas, destacamos a rede Céus Estrelados do Brasil (CEB), que congrega dezenas de profissionais de áreas diversas do conhecimento com intuito de conscientizar as pessoas sobre a poluição luminosa, dialogar com o poder público, propor legislação e normatização para o uso racional da iluminação artificial e promover o astroturismo em escala nacional.

Para o astroturismo, conhecer os locais com condições ideais de observação dos astros permite mapear os destinos adequados para a exploração do turismo astronômico, ou seja, localidades onde os efeitos da poluição luminosa são menores. Apenas as pessoas imersas nestes locais podem se dar conta do processo dramático ocasionado pelo uso excessivo de iluminação artificial, que

### Abaixo

O Atlas Mundial do Brilho de Céu Noturno mostra as regiões mais afetadas pela poluição luminosa em nosso planeta. Regiões brancas, vermelhas e amarelas possuem céus completamente degradados, enquanto que regiões verdes, azuis e escuras ainda possuem céus pouco alterados pelo excesso de iluminação artificial (Crédito: Falchi et al.).



Mapa de localização dos parques de observação do céu noturno no mundo



empobreceu e acinzentou o céu noturno das grandes cidades. O astroturismo é, dessa forma, um dos mais importantes aliados na luta contra a poluição luminosa, promovendo uma valorização destes locais que extrapola os interesses apenas da ciência e coloca a preservação dos céus escuros como parte do legado sociocultural, ambiental e econômico.

### Parques e reservas de céu escuro

Algumas das regiões mais indicadas no mundo para a prática do astroturismo incluem os parques, reservas e locais de conservação da natureza. Dados recentes da *International Dark Sky Association* e da *Fundación Starlight* mostram que a maioria das atividades de astroturismo é praticada nesses locais. Eles são conhecidos genericamente como Par-

ques de Céu Escuro (*Dark Sky Parks*) e começaram a ser criados a partir dos anos 1990. Esses locais têm sido certificados como ideais para o astroturismo *dark sky* pelas organizações IDA e FS, fazendo o uso dessa importante prerrogativa para atrair turistas durante todo o ano.

Os Parques de Céu Escuro internacionalmente certificados possuem excelentes condições de céu noturno (com ausência ou reduzida poluição luminosa), estrutura para recepção de visitantes, prezam pela preservação e educação ambiental, executam programas de conscientização e redução da poluição luminosa nas cidades em seus entornos e estimulam o astroturismo como forma de turismo sustentável. Segundo dados mais recentes da IDA, FS e da IUCN, há quase três centenas de *Dark Sky Parks* no mun-

**Acima**  
Mapa mundial das Reservas e Parques de Céu escuro construído a partir de dados da International Union for Conservation of Nature (IUCN).



#### Acima

Que tal pegar uma estrada para o deserto guiada pelo Cruzeiro do Sul? O

Atacama é um dos destinos mais procurados do mundo para o astroturismo, inserindo o Chile como o país de destaque da América Latina (Crédito: Igor Borgo).

do e este número vem crescendo consideravelmente nos últimos cinco anos.

### O astroturismo no mundo

Entre os países que exploram o astroturismo, os Estados Unidos da América têm papel de destaque. As atividades começaram ainda no século passado, a partir do trabalho de conscientização da preservação do céu escuro e das famosas *Star Parties*, realizadas em parques e reservas. O astroturismo tem hoje participação importante na economia do setor turístico, principalmente nos estados do meio-oeste. Os EUA possuem mais de cem *dark sky parks* certificados pela IDA.

Os portugueses têm a região de Alqueva como o primeiro destino astroturístico reconhecido na Europa pela FS, estabelecendo u-

ma rede de colaboradores no setor para propiciar atividades premiadas nos últimos anos. A Espanha, a partir de ações e programas pioneiros do Instituto Astrofísico das Canárias e de legislação que protege o céu escuro, teve suas atividades em astroturismo estabelecidas a partir do começo do século vigente. A Ásia também tem voltado suas atenções para os céus noturnos, adotando políticas para atrair turistas para observação do céu em países como Índia, Indonésia e Coreia do Sul. No continente africano, destacam-se a África do Sul e a Namíbia, por possuir um dos céus mais escuros do planeta em áreas de clima desértico e/ou semidesértico. Na Oceania, destaca-se a Austrália, cujo planejamento do setor turístico para os anos vindouros inclui o astroturismo em suas regiões desérticas.

Na América Latina, o Chile tem posição de protagonismo e um dos casos de maior sucesso no mundo. Impulsionado primeiramente pela instalação de observatórios profissionais a partir da década de 1960, o país passou a investir em astroturismo a partir do final dos anos 1990. As regiões de Atacama, Antofagasta e Coquimbo, que ocupam extensas áreas desampadas, desérticas e elevadas ao norte do país, estão entre as melhores do mundo para a observação astronômica. Além da presença de diversos observatórios profissionais de ponta, há de-

zenas de observatórios didáticos, além de centros astronômicos, agências e empresas que atuam na rota do astroturismo em diversas regiões do país.

### O astroturismo no Brasil

A extensão territorial brasileira, sua geodiversidade, belas paisagens atreladas a diferentes biomas, distribuições desiguais importantes de densidade demográfica e poluição luminosa reduzida na maior parte de seu território colocam o país com potencial inequívoco para o astroturismo. Embora ainda incipiente, o setor começa a ganhar projeção no país, principalmente nos últimos dois anos, com agências e profissionais do turismo e Astronomia atuando com foco específico no astroturismo.

Planetários, observatórios e museus de ciências tradicionalmente promovem a divulgação da Astronomia nos grandes centros urbanos e acabam tendo apelo importante frente à atividade turística, mesmo que o foco não seja específico e a maioria deles opere em regiões com alta poluição luminosa. Exemplos incluem o Observatório do Valongo da UFRJ (Rio de Janeiro), o Observatório Municipal Jean Nicolini (Campinas-SP), o Observatório da UFRGS (Porto Alegre-RS) e o Observatório Pico dos Dias (OPD), localizado na Serra da Mantiqueira, na cidade de Brasópolis-MG, referência da Astronomia profissional bra-



sileira. Todavia, outros já possuem suas atividades orientadas para o astroturismo como o Polo Astronômico do Parque Tecnológico de Itaipu (Foz do Iguaçu-PR) e a Fundação Centro de Estudos do Universo (Brotas-SP). Entre os planetários mais visitados, destacam-se o Planetário da Cidade do Rio de Janeiro, o Planetário Rubens de Azevedo (Fortaleza-CE) e o Planetário do Ibirapuera (São Paulo-SP).

Do ponto de vista das regiões mais indicadas para o astroturismo *dark sky*, o Brasil possui muitas regiões de céu escuro, conforme indica o *Atlas Mundial do Brilho do Céu Noturno*. Para encontrar os céus mais estrelados, áreas de clima mais seco e com maiores altitudes se destacam, por oferecerem uma melhor transparência do céu e menores volumes anuais de chuva e/ou nebulosi-

**Acima**  
Alto de Paraíso de Goiás, aos pés da Chapada dos Veadeiros, já é um destino procurado pelos amantes da Astronomia e Astrofotografia. Pousadas, acampamentos, chalés e cabanas com visão para as estrelas são apostas para o futuro astroturismo da região (Crédito: Igor Borgo).

**Abaixo**

O Parque Estadual do Desengano está localizado em uma das regiões mais escuras do Estado do Rio de Janeiro, tendo obtido a certificação internacional da IDA como o primeiro Dark Sky Park do país. Na imagem, a Via Láctea e suas inúmeras estrelas e nebulosas comprovam a qualidade do céu noturno do parque para o astroturismo (Crédito: Igor Borgo e projeto Astroturismo nos Parques Brasileiros).

dade. Neste quesito, podemos destacar as áreas de chapadas, serras, o semiárido e o planalto central brasileiro que incluem os biomas do Cerrado, Caatinga e, eventualmente, Mata Atlântica. Alguns municípios, localizados nestes locais privilegiados, têm projetado o investimento em astroturismo e deverão colher bons frutos no cenário futuro, contribuindo para o surgimento do astroturismo *dark sky* em nosso país. Entre eles podemos citar Santa Maria Madalena (RJ), Cunha (SP), Catas Altas (MG), Nova Friburgo (RJ) e Alto Paraíso de Goiás (GO), destino já consolidado para os amantes da Astronomia e Astrofotografia.



Em dezembro de 2021, o Brasil entrou para a lista dos 31 países na atualidade a possuir um *Dark Sky Park*, quando o Parque Estadual do Desengano, no Estado do

Rio de Janeiro, tornou-se o primeiro parque da América Latina a receber a certificação pela IDA. Esse feito certamente abre um caminho promissor para o astroturismo em escala nacional e coloca os parques e reservas do país como locais de destaque desse tipo de turismo. Além do referido parque, outros recentemente abriram as portas para atividades noturnas com foco no astroturismo. Exemplos incluem o Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros (Alto Paraíso de Goiás-GO), o Parque Nacional do Iguaçu (Foz do Iguaçu-PR), o Parque Nacional das Emas (Serranópolis-GO) e o Parque Estadual dos Três Picos (Nova Friburgo-RJ).

Embora o potencial brasileiro seja inegável, há desafios importantes para que o setor tenha sucesso no país. Entre eles, pode-se apontar a necessidade de estudos de viabilidade e incentivo do astroturismo nos parques e reservas, legislação e normas técnicas para uso correto e sustentável da iluminação artificial, política de proteção e certificação nacional dos locais de céu escuro, estruturação dos equipamentos e serviços turísticos e capacitação de profissionais de turismo, educação e ciência para atender a um público exigente e diferenciado.

Embora a prática turística possa sempre transcender de forma independente, faz-se imprescindível no astroturismo um profissional que possa conduzir a ativida-

de noturna de maneira adequada e que, de posse do conhecimento necessário, possa guiar o turista durante uma sessão de reconhecimento das constelações ou mesmo conduzir de forma correta uma observação astronômica utilizando telescópios e recursos de astrofotografia, por exemplo. Dessa forma, este segmento turístico também pode ser apontado como um novo nicho no mercado de trabalho em Astronomia, ainda muito pouco explorado pela carreira, mas que poderá ter apelo em breve, principalmente pela melhoria do setor de turismo no pós-pandemia da covid-19 e pela demanda que começa a surgir em escala nacional •

*Daniel R. C. Mello*  
*Univ. Fed. do Rio de Janeiro*  
*mello@ov.ufrj.br*

*Igor Borgo*  
*Univ. Fed. do Rio de Janeiro*

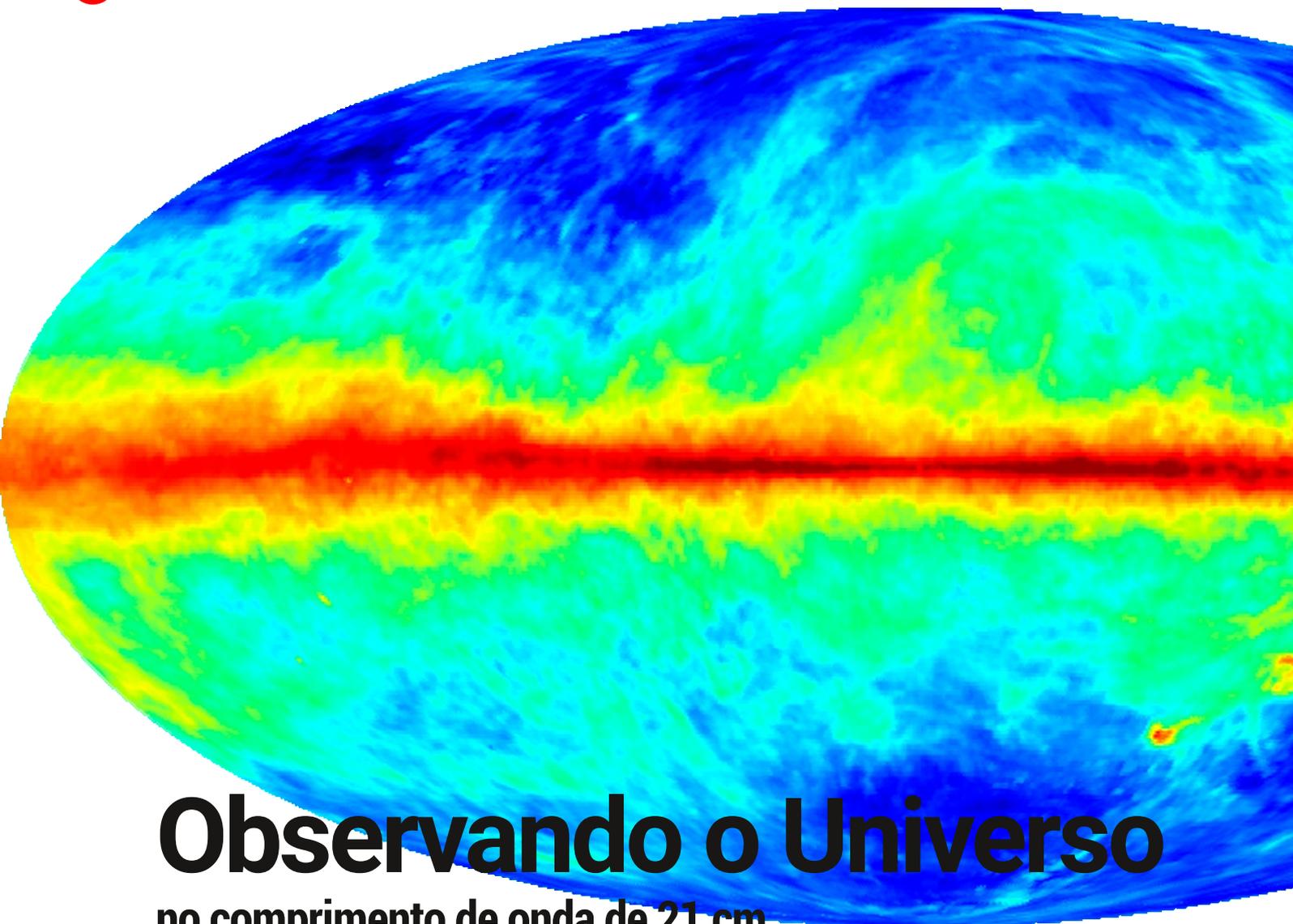
*Fabiola A. B. Gomes*  
*Agência Astrotrilhas*

*Ricardo G. Cesar*  
*Univ. Fed. do Rio de Janeiro*

*Ester de Pontes Silva*  
*Univ. Fed. Rural do Rio de Janeiro*

#### **Acima**

Céu estrelado no Parque Estadual dos Três Picos, Nova Friburgo, região serrana do estado do Rio de Janeiro. A Via Láctea, em todo o seu esplendor, cruza o céu e pode ser vista a olho nu nas noites de inverno (Crédito: Igor Borgo e projeto Astroturismo nos Parques Brasileiros).



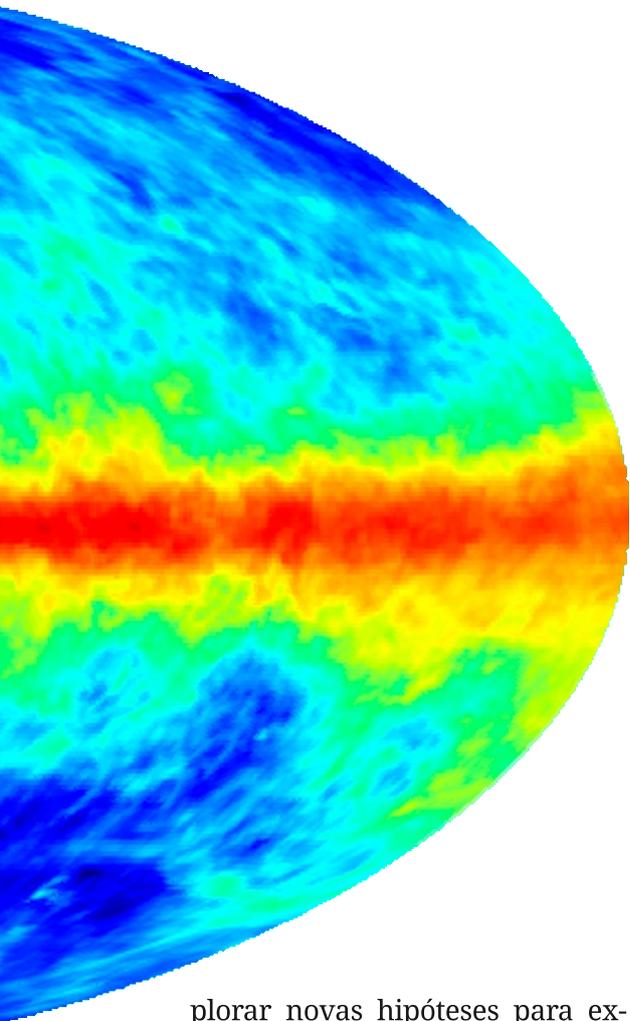
# Observando o Universo no comprimento de onda de 21 cm

Logo após o Big Bang, o universo deveria estar preenchido de nuvens de hidrogênio, mas ainda não havia estrelas para gerar fótons que cheguem até nós. Contudo, a existência de uma transição hiperfina do átomo de H pode nos permitir explorar essa parte da história do Universo.

**A**stronomia e a cosmologia no século XXI vivem um momento ímpar em sua história, com a disponibilidade de uma enorme quantidade de dados em diferentes bandas do espectro eletromagnético e uma extraordinária capacidade computacional para análise e mineração de dados, se compararmos com a infraestrutura disponível nos anos 90, por exemplo.

Esta década traz também a primeira luz dos satélites James Webb Space Telescope e Euclid, do radiotelescópio *Square Kilometre Array Observatory* (SKAO), e dos telescópios *Dark Energy Spectroscopic Instrument* (DESI) e o Vera C. Rubin Observatory (antigo *Large Synoptic Survey Telescope* — LSST).

A combinação de dados de excelente qualidade com grande poder computacional permitirá ex-



teamento gravitacional fraco e a determinação da abundância de aglomerados de galáxias. Ao longo de mais de duas décadas, estas são consideradas as principais sondas para explorar o Universo no intervalo de desvio para o vermelho entre 0 e 20.

Cada um desses observáveis tem como alvo uma determinada classe de objetos astronômicos. Combinados, eles cobrem um grande intervalo de desvio para o vermelho e, conseqüentemente, permitem a confirmação da forma do espectro de potência da matéria ao longo de um grande volume no Universo, desde o regime linear, na época da radiação cósmica de fundo em micro-ondas até épocas mais recentes, com as perturbações de matéria já num regime não-linear.

plorar novas hipóteses para explicar a origem e a natureza do "Setor Escuro" do Universo, constituído de matéria escura e energia escura, e a validação da hipótese inflacionária para o modelo cosmológico padrão. Ambas as questões contemplam problemas conceituais da física de partículas e das teorias de unificação das interações fundamentais.

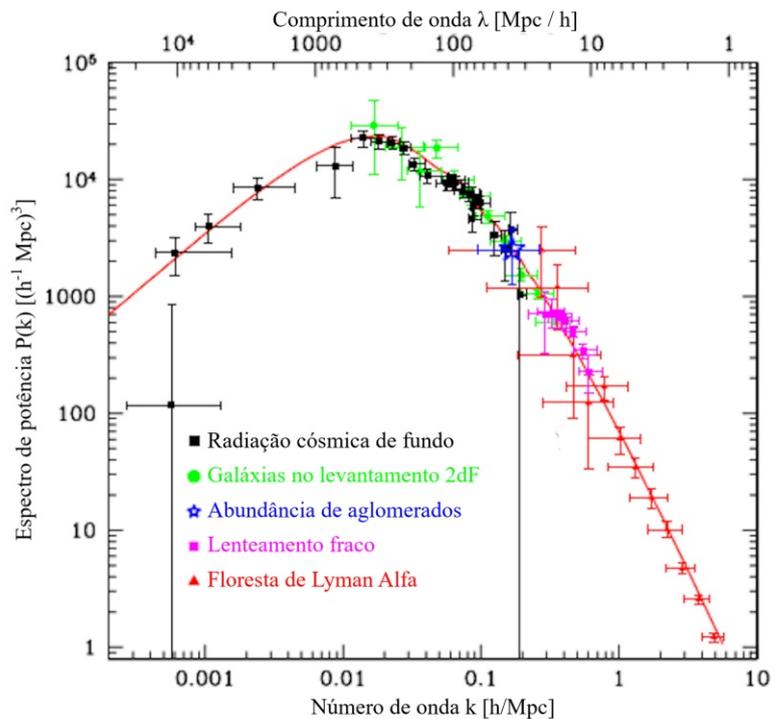
A aceleração da expansão do Universo, observada em 1998, provavelmente está ligada às propriedades da energia escura. Alguns observáveis adequados para o estudo da origem e propriedades dessa aceleração cósmica são as supernovas tipo Ia (SN Ia), as oscilações acústicas de bárions, o len-

**Página dupla**

Mapa da distribuição de HI na Via Láctea, obtido a partir da observação da linha de 21 cm no levantamento Leiden/Argentine/Bonn (Crédito: NASA / LAMBDA Archive Team)

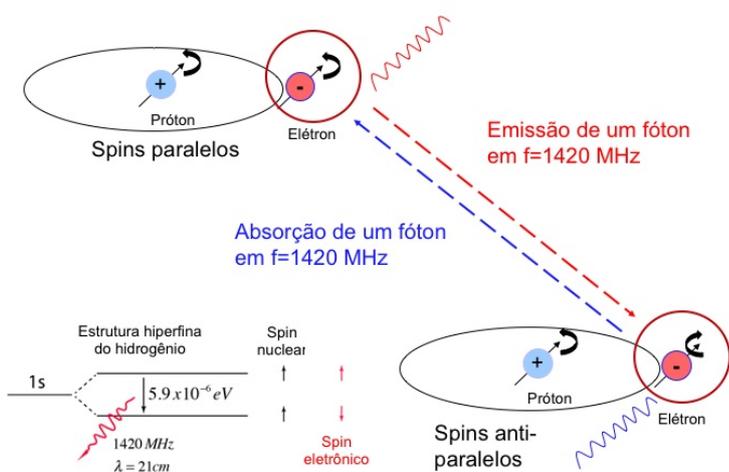
**Abaixo**

Espectro de potência da matéria superposto a medidas de alguns observáveis cosmológicos, ao longo da história do Universo. A curva vermelha é a previsão teórica; as medidas dos observáveis estão listadas na legenda (Adaptado M. Tegmark e M. Zaldarriaga).



**Abaixo**

Esquema da transição hiperfina do átomo de hidrogênio.



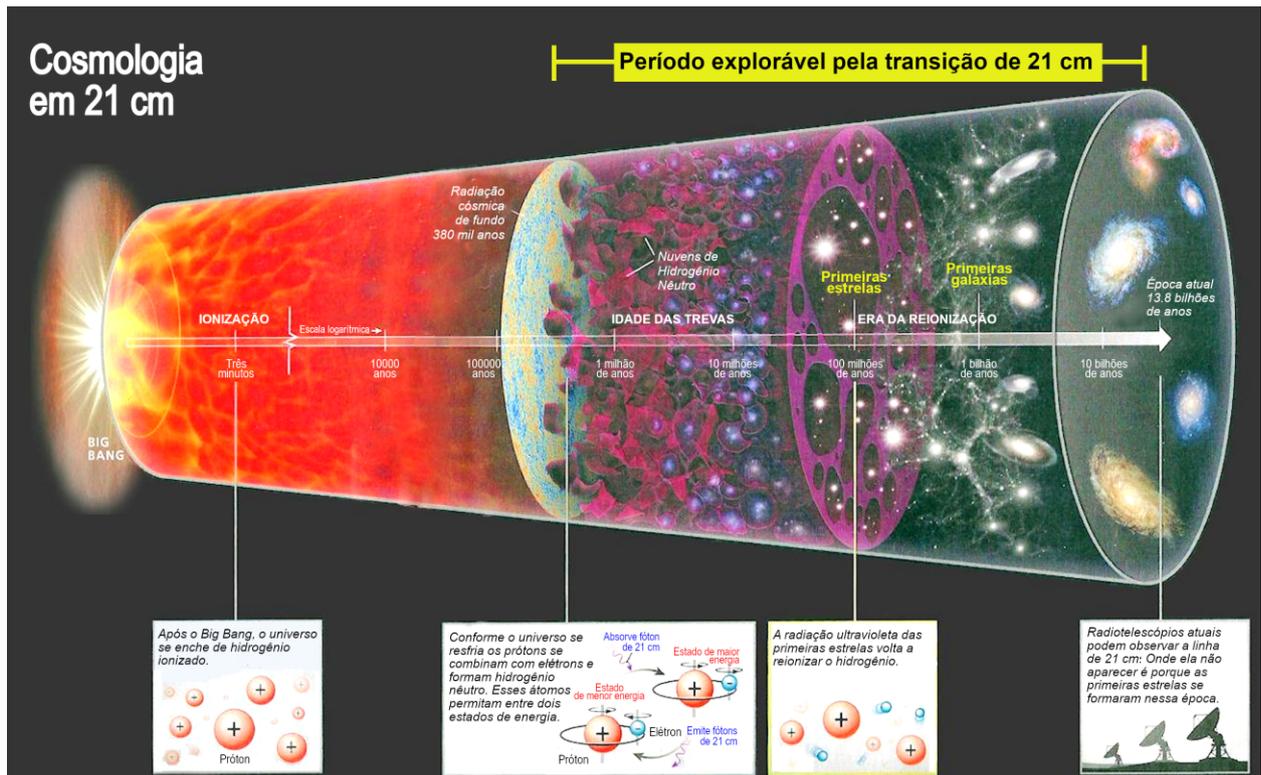
A distribuição e as propriedades de aglutinação do hidrogênio neutro (que os astrônomos denominam H I) ao longo de um grande volume cósmico podem ser inferidas do espectro de potência da matéria e usadas como um traçador da evolução do Universo. A emissão (ou absorção) no comprimento de onda de 21,1 cm corresponde à transição hiperfina do átomo de hidrogênio, medida com precisão de mais de 7 casas decimais, e equivale à frequência de 1420,4 MHz.

tribuição de H I em diferentes épocas. A combinação desses cortes produz um "cubo de dados", onde duas dimensões são a projeção do céu em coordenadas celestes e a terceira dimensão (radial ou "temporal") define o volume do Universo que está sendo estudado. Por simplicidade, sempre vamos nos referir à "linha de 21 cm", mesmo quando estivermos falando de medidas cosmológicas.

### Fundamentos da cosmologia de 21 cm

O Universo evoluiu a partir de um estado muito denso e quente, com matéria e radiação coexistindo com o processo de expansão. Nessa época, pequenas aglutinações na distribuição do fluido matéria-radiação, da ordem de 1 parte em 100000, já começaram a se aglutinar. Halos de matéria escura atraíam a matéria ao seu redor, devido à força gravitacional, mas a matéria normal (os "bárions") ainda permaneciam ligados à radiação, devido à interação entre fótons e elétrons livres causada por um efeito conhecido como espalhamento Thomson.

A temperatura do Universo decrescia à medida que ele se expandia. Quanto a temperatura atingiu valores inferiores a cerca de 3000 K, elétrons e prótons combinaram-se para formar H I e o Universo tornou-se transparente à radiação, pois não havia mais elétrons livres para alterar a tra-



jetória dos fótons. Isso ocorreu quando o Universo tinha cerca de 380 mil anos e dizemos, então, que os bárions e a radiação se desacoplaram. A partir desse momento, as perturbações de densidade puderam evoluir e entrar num regime não-linear, formando as primeiras estruturas do Universo, depois de cerca de 180 milhões de anos, correspondendo a um desvio para o vermelho de aproximadamente 20.

As primeiras estrelas formadas nessa época emitiam enorme quantidade de radiação ultravioleta, ionizando completamente suas vizinhanças, e fazendo com que essa época seja conhecida como Época da Reionização.

O período entre o desacoplamento e a reionização é conhecido co-

mo Idade das Trevas, uma vez que ainda não tinham sido formadas as primeiras estrelas e somente fótons com energia correspondente ao infravermelho e pequenos aglomerados de hidrogênio e hélio povoavam o Universo. Sua duração corresponde, aproximadamente, ao intervalo de desvio para

**Acima**  
Linha do tempo do Universo, no contexto da cosmologia de 21 cm. Os principais eventos estão marcados ao longo da seta no centro da figura. As referências ao estado do H encontram-se nas caixas na parte inferior. Fonte: adaptada de universe-review.ca

### Para saber mais

A linha de 21 cm corresponde a uma transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do hidrogênio. Esses dois estados são associados ao acoplamento entre o próton e o elétron. O estado de menor energia é aquele em que os spins do próton e do elétron estão antiparalelos. Pequenas colisões entre os átomos pode levar o elétron a ficar com spin paralelo ao do elétron. Quando esse elétron se desexcita, ele produz um fóton equivalente à linha de 21 cm.

Essa linha foi observada pela primeira vez em 1951 por Harold Ewen e Edward M. Purcell em Harvard.



#### Acima

Radiotelescópio Parkes, na Austrália. Devido ao largo comprimento de onda, a radiação de 21 cm precisa ser observada através de radiotelescópios (Crédito: CSIRO).

o vermelho entre 1100 (cerca de 380 mil anos) e 6 (cerca de 900 milhões de anos), quando a reionização do Universo terminou.

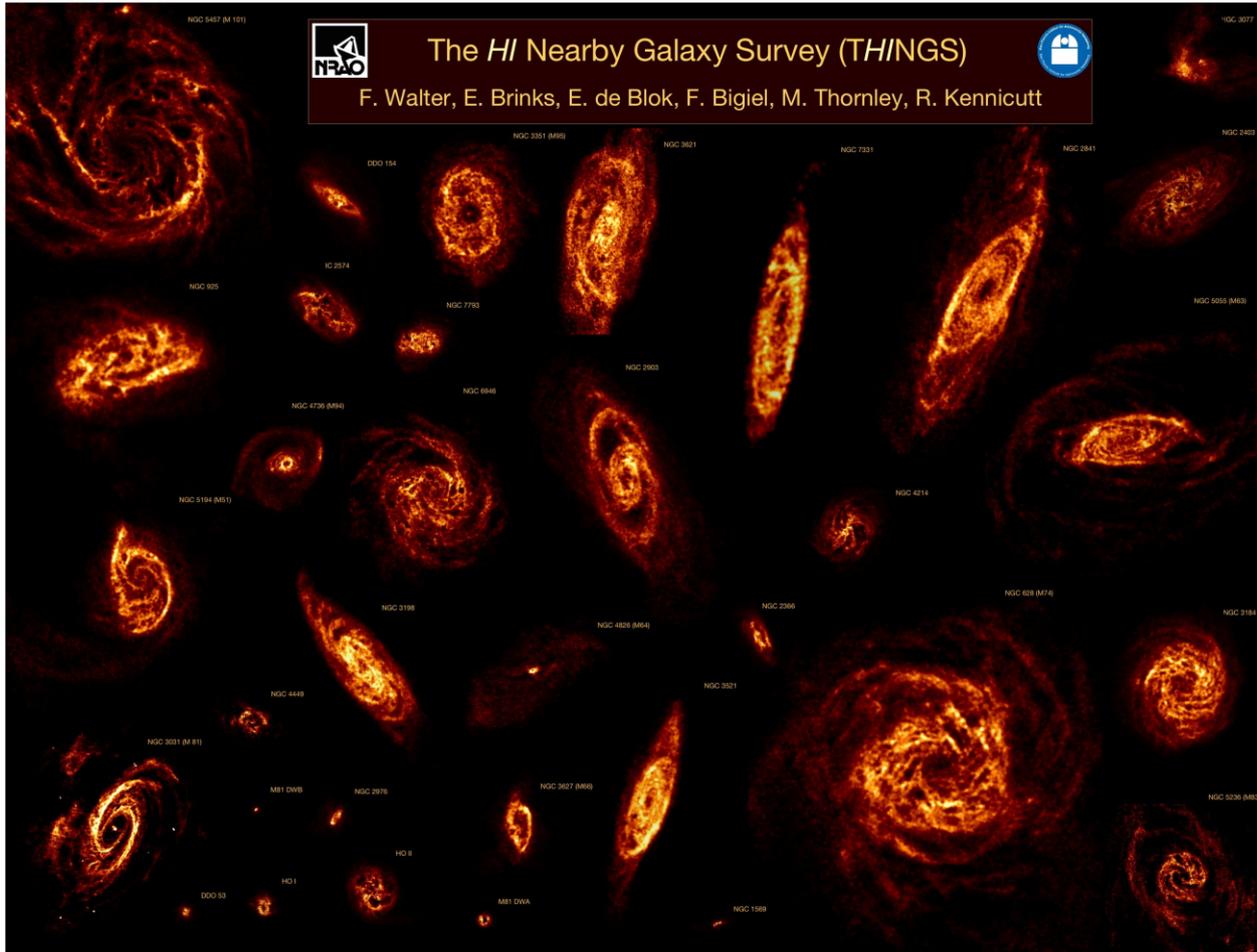
Da recombinação à reionização, o Universo encontrava-se num estado neutro, isto é, com os elementos não ionizados, e era constituído, essencialmente de H e He, na proporção de 75% para 25%, e traços de Li. A história da evolução da matéria e da transição da evolução das flutuações de densidade do regime linear para o não-linear pode ser traçada através da distribuição de H I, no intervalo de desvio para o vermelho

entre 20 e 6.

O estudo da Idade das Trevas possui várias motivações, entre elas o estudo do Universo quando as perturbações passaram do regime de colapso linear para não-linear; a possibilidade de encontrar estrelas muito antigas (as chamadas "estrelas de População III") e o estudo da influência dos primeiros objetos cósmicos ionizantes em suas vizinhanças.

A cosmologia de 21 cm é, provavelmente, nossa melhor aposta para estudar a Idade das Trevas e tais fenômenos numa época do Universo em que os objetos formados encontram-se tão distantes de nós que o sinal emitido é praticamente inacessível para os instrumentos existentes hoje. Mesmo na próxima década, somente instrumentos com o nível de tecnologia do *James Webb Space Telescope* talvez atinjam a sensibilidade para detectar sinais na faixa óptica ou infravermelha em desvios para o vermelho tão grandes, e cuja intensidade permita o estudo detalhado dos fenômenos de formação de estruturas que ocorreram no final da Idade das Trevas.

Apesar de ser o elemento mais abundante do Universo, a detecção de H I em distâncias extragalácticas e cosmológicas é uma tarefa bastante desafiadora, uma vez que a intensidade da transição hiperfina causada pela inversão do spin do elétron é extremamente fraca (cerca de  $5 \times 10^{-6}$  eV), comparada, por exemplo, com a ener-



gia de ionização do H ( $-13,6$  eV). Por outro lado, a frequência de emissão em  $1420,406$  MHz é muito bem determinada e corresponde ao comprimento de onda de  $21,106$  cm.

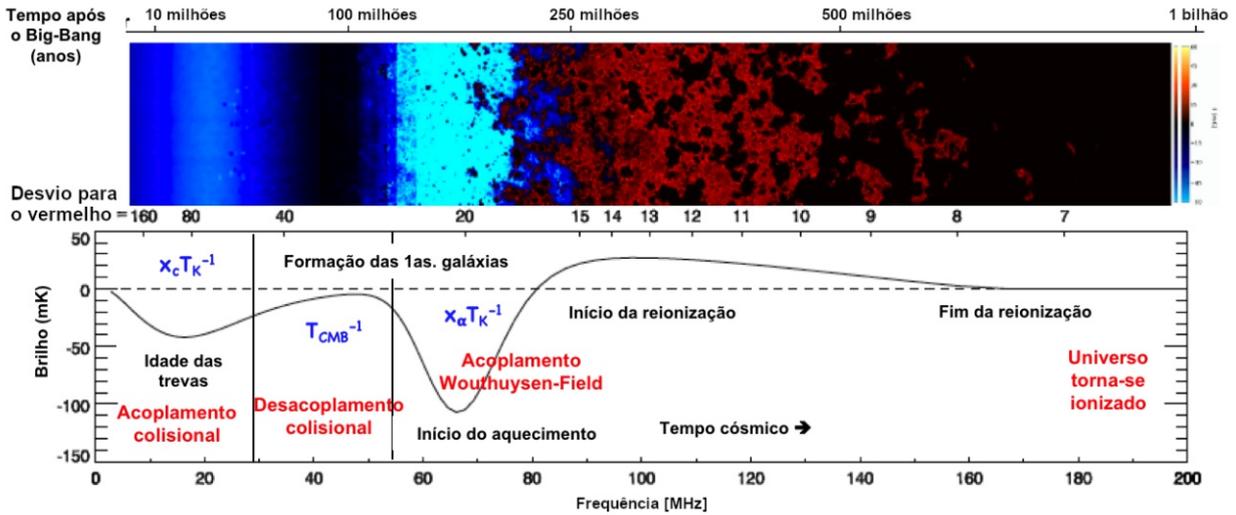
Como a probabilidade de um átomo de H emitir um fóton em  $21$  cm é extremamente baixa (uma emissão a cada  $10^{15}$  s ou  $30 \times 10^6$  anos), observá-lo deveria ser um evento extremamente raro. Entretanto, a grande abundância de átomos de H faz com que a intensidade do sinal seja claramente detectável. O mapeamento da forma espiral da Via Láctea, por exem-

plo, foi feito usando a emissão em  $21$  cm. Do ponto de vista cosmológico, a emissão em  $21$  cm deve ser observável mesmo em desvios para o vermelho maiores, pois a quantidade de H I disponível era maior do que no Universo mais recente, em que H I é encontrado somente em regiões de baixíssimas temperaturas, nas nuvens moleculares, ou nas bordas frias de objetos maiores, como aglomerados de galáxias.

A transição de  $21$  cm pode ser observada tanto em emissão quanto em absorção. Estes dois processos são governados pela interação

**Acima**

A linha de  $21$  cm é tradicionalmente usada para medir a presença de nuvens de hidrogênio neutro. Em galáxias espirais, isso permite evidenciar o padrão espiral na distribuição do gás. A imagem acima corresponde a um atlas de distribuição de H I em diversas galáxias. O tamanho relativo dessas galáxias na imagem é proporcional ao seu tamanho real (Crédito: Levantamento THINGS; NRAO/AUI/NSF).



**Acima**

Em cima: Representação do processo de ionização do meio intergaláctico em função do tempo cósmico. Na escala de cores, preto corresponde à ausência de flutuações, azul indica um meio intergaláctico frio e vermelho, um meio intergaláctico aquecido. Em baixo: Flutuação da temperatura de brilho nas diferentes épocas, com os efeitos físicos relevantes identificados. Para referência, o eixo  $x$  representa as frequências com desvio Doppler de observação do H I, permitindo uma associação direta entre o desvio para o vermelho e o tempo cósmico (Adaptada de J. R. Pritchard e A. Loeb).

entre o campo de radiação local e a distribuição da população de H I nos estados paralelo e antiparalelo.

O deslocamento Doppler devido às distâncias cosmológicas faz com que a frequência de 1420 MHz seja deslocada para valores mais baixos. Assim, a frequência observada pelos radiotelescópios que observam a distribuição de H I corresponde diretamente à informação sobre a velocidade e a distância (ou desvio para o vermelho) da fonte emissora.

Um radiotelescópio mede a temperatura de brilho de uma fonte. Essa temperatura é afetada não apenas pelo desvio para o vermelho da fonte, mas também por outros processos físicos. Estamos particularmente interessados nas flutuações da temperatura de brilho com respeito à radiação cósmica de fundo. Tais flutuações envolvem uma relação entre a fração de H I no Universo, o excesso de

densidade de bárions, o parâmetro de Hubble, e o gradiente de velocidade da distribuição de H I ao longo da linha de visada, entre outros.

Os processos físicos relevantes ocorrem sempre em contraponto à temperatura do campo da radiação cósmica de fundo, e são, essencialmente: a interação direta com a radiação cósmica de fundo (que produz, principalmente absorção, mas também emissão estimulada), o acoplamento colisional, principalmente entre átomos de H, mas também entre H e He, e o efeito do espalhamento por fótons Lyman  $\alpha$ , conhecido como acoplamento Wouthuysen-Field, quando a absorção e reemissão de fótons Lyman  $\alpha$  misturam os estados hiperfinos.

**Uma nova abordagem para a Cosmologia**

Apresentamos acima uma breve revisão da cosmologia de 21

cm, que relaciona os fundamentos teóricos da transição hiperfina do átomo de H com o universo primitivo. O formalismo utilizado nessa área é, essencialmente, o formalismo de transporte radiativo clássico com a adaptação para o contexto cosmológico. Adicionalmente, aspectos do mecanismo de transição do spin do elétron, da física de colisões de partículas e do acoplamento do campo de radiação com a matéria constituem o arcabouço teórico, extremamente robusto, utilizado na área.

Entre os vários alvos científicos que podem ser estudados com a análise da linha de 21 cm, estão o efeito da energia escura no processo da evolução das grandes estruturas em desvios para o vermelho  $\lesssim 0,5$ ; a história da evolução da aglutinação de matéria através da distribuição de H I; o mapeamento de oscilações acústicas de bárions via uma análise tomográfica ao longo da linha de visada e, talvez o mais interessante: o estudo do Universo durante a Idade das Trevas, mediante observação da transição de 21 cm em desvios para o vermelho  $> 20$ , antes da formação dos primeiros objetos. Essa é uma época na história do Universo que não é acessível de nenhuma outra forma a não ser por medidas da transição de 21 cm.

Esperamos ter despertado a curiosidade do leitor para uma área da cosmologia que vem crescendo significativamente na últi-

## Leia também

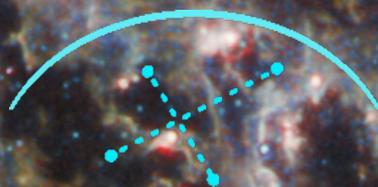
- M. Tegmark e M. Zaldarriaga, *Separating the early universe from the late universe: Cosmological parameter estimation beyond the black box*, *Physical Review D* 66 (10), 103508 (2002).
- J. R. Pritchard e A. Loeb, *21 cm cosmology in the 21st century*, *Reports on Progress in Physics*, 75 (8), 086901 (2012).
- S. R. Furlanetto, S. P. Oh e F. H. Briggs, *Cosmology at low frequencies: the 21 cm transition and the high-redshift universe*, *Physics Report*, 433 (4-6), 181 (2006).

ma década, sendo considerada uma área promissora para estudos nos próximos 10 anos por várias agências de fomento no mundo, incluindo a Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos •

*Carlos Alexandre Wuensche*  
*Inst. Nac. de Pesquisas Espaciais*  
*ca.wuensche@inpe.br*

### Contracapa

M 74, também conhecida como Galáxia Fantasma, observada pelo instrumento MIRI a bordo do telescópio espacial JWST. A imagem revela a distribuição do gás morno e da poeira ao longo da galáxia (Crédito: NASA/ESA/CSA, JWST).



S.A.B.