

MUSEU DE ASTRONOMIA E CIÊNCIAS AFINS

O E C L I P S E D E S O B R A L

ORGANIZAÇÃO
ANELISE PACHECO
JOÃO DOS ANJOS

“A QUESTÃO QUE MINHA MENTE FORMULOU FOI RESPONDIDA PELO RADIANTE CÉU DO BRASIL”

ALBERT EINSTEIN

O ECLIPSE DE SOBRAL

ORGANIZAÇÃO
ANELISE PACHECO
JOÃO DOS ANJOS

2021

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Henrique Morize
Bibliotecária Reg. CRB7-4466

E19 O Eclipse de Sobral [recurso eletrônico] / [organizado por]
Anelise Pacheco e João dos Anjos. - Rio de Janeiro :
MAST, 2021 .
Formato digital.
Modo de acesso [https://www.gov.br/mcti/pt-br/rede-
mcti/mast/imagens/publicacoes/2021/livro-eclipse-
sobral-digital.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/rede-mcti/mast/imagens/publicacoes/2021/livro-eclipse-sobral-digital.pdf)
ISBN: 9786599348334

1. Astronomia Sobral (CE) - Observações - História. 2.
Relatividade (Física). 3. Observatório Nacional (Brasil). I.
Pacheco, Anelise. II. Anjos, João dos. III. Museu de
Astronomia e Ciências Afins.

CDU: 520

SUMÁRIO

A EFEMÉRIDE DE SOBRAL Anelise Pacheco João dos Anjos	3
OS ANTECESSORES Luiz Alberto Oliveira	7
AS EXPEDIÇÕES Oscar T. Matsuura	49
A RELATIVIDADE Martin Makler	157

MARTIN MAKLER

A RELATIVIDADE

O IMPACTO DA
RELATIVIDADE GERAL:
DO DESVIO DA LUZ
ÀS DESCOBERTAS DO
SÉCULO 21

A comprovação do desvio da luz, conforme a previsão de Albert Einstein, tornou a teoria da relatividade geral amplamente aceita na comunidade científica. Muito além de uma teoria da Gravitação, a Relatividade Geral revolucionou o conceito de espaço e de tempo, já intimamente conectados desde a Relatividade Especial, formulada uma década antes, em 1905, também por Einstein. O espaço com suas três dimensões (“altura, comprimento, largura”), juntamente com o tempo, unidimensional (uma reta), já tinha passado a formar uma entidade de quatro dimensões, o chamado espaço-tempo.

Fac-símile do *Illustrated London News*, de 22 de novembro de 1919, que contém um infográfico da observação do eclipse solar realizada pelos astrônomos Crommelin e Davidson em Sobral. No painel circular a explicação do fenômeno: a mudança de posição aparente de algumas estrelas do aglomerado das Hyades que estariam no campo visual do Sol no momento do maior contato do eclipse, devido à curvatura induzida pela presença do astro no campo. A apresentação dos resultados da missão foi em 6 de novembro em uma solene reunião da *Royal Society of London* e da *Royal Astronomical Society*.
 Fonte: Acervo fotográfico do MAST

DRAWN BY W. D. ROBINSON, FROM MATERIAL SUPPLIED BY DR. CROMMELIN.



THE CURVATURE OF LIGHT: EVIDENCE FROM BRITISH OBSERVERS' PHOTOGRAPHS AT THE ECLIPSE OF THE SUN.

The results obtained by the British expeditions to observe the total eclipse of the sun last May verified Professor Einstein's theory that light is subject to gravitation. Writing in our issue of November 15, Dr. A. C. Crommelin, one of the British observers, said: "The eclipse was specially favorable for the purpose, there being no fewer than twelve fairly bright stars near the limb of the sun. The process of observation consisted in taking photographs of these stars during totality, and comparing them with other plates of the same region taken when the sun was not in the neighbourhood. Thus if the starlight is bent by the sun's attraction, the stars in the eclipse plates would seem to be pushed outward compared with those on the other plates. . . . The second Sobral camera and the one used at Principe agree in supporting Einstein's theory. . . . It is of profound philosophical interest. Straight lines in Einstein's space cannot exist; they are parts of gigantic curves. . . . The light is bent as the field of force is curved."

Experiência imersiva na linguagem da teoria da relatividade de Einstein, disposta na terceira sala da exposição *O Eclipse*.

São mostradas algumas relações matemáticas ligadas à teoria da relatividade restrita (TRR) e geral (TGR) de Einstein.

A quantidade G mostrada com sub-índices na forma de letras gregas é conhecida como tensor de Einstein, representa uma matriz de funções com significado geométrico, relacionada à curvatura do espaço-tempo. A quantidade T representa o conteúdo de matéria-energia.

A célebre equação

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

pode ser lida como: "a matéria diz ao espaço como se curvar".

Fonte: Acervo de imagens do MAST

$$E = mc^2$$

$$R = \frac{D}{2} R + D\Lambda = \frac{8\pi G T}{c^4}$$

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$R^\alpha - \frac{1}{2} R g^{\alpha\beta} + \Lambda g^{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4 \mu_0} (F^\alpha \psi F_\psi^\beta - \dots)$$

$$= \frac{D}{2} R + D = \frac{8\pi G T}{c^4}$$

$$mc \frac{dt}{d\tau} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\det(g) = \frac{1}{M} \epsilon^{\alpha\beta\gamma\delta} \epsilon_{\alpha\beta\gamma\delta} g_{\alpha\kappa} g_{\beta\lambda} g_{\gamma\mu} g_{\delta\nu}$$

$$R = \frac{D}{2} R + D\Lambda = \frac{8\pi G T}{c^4}$$

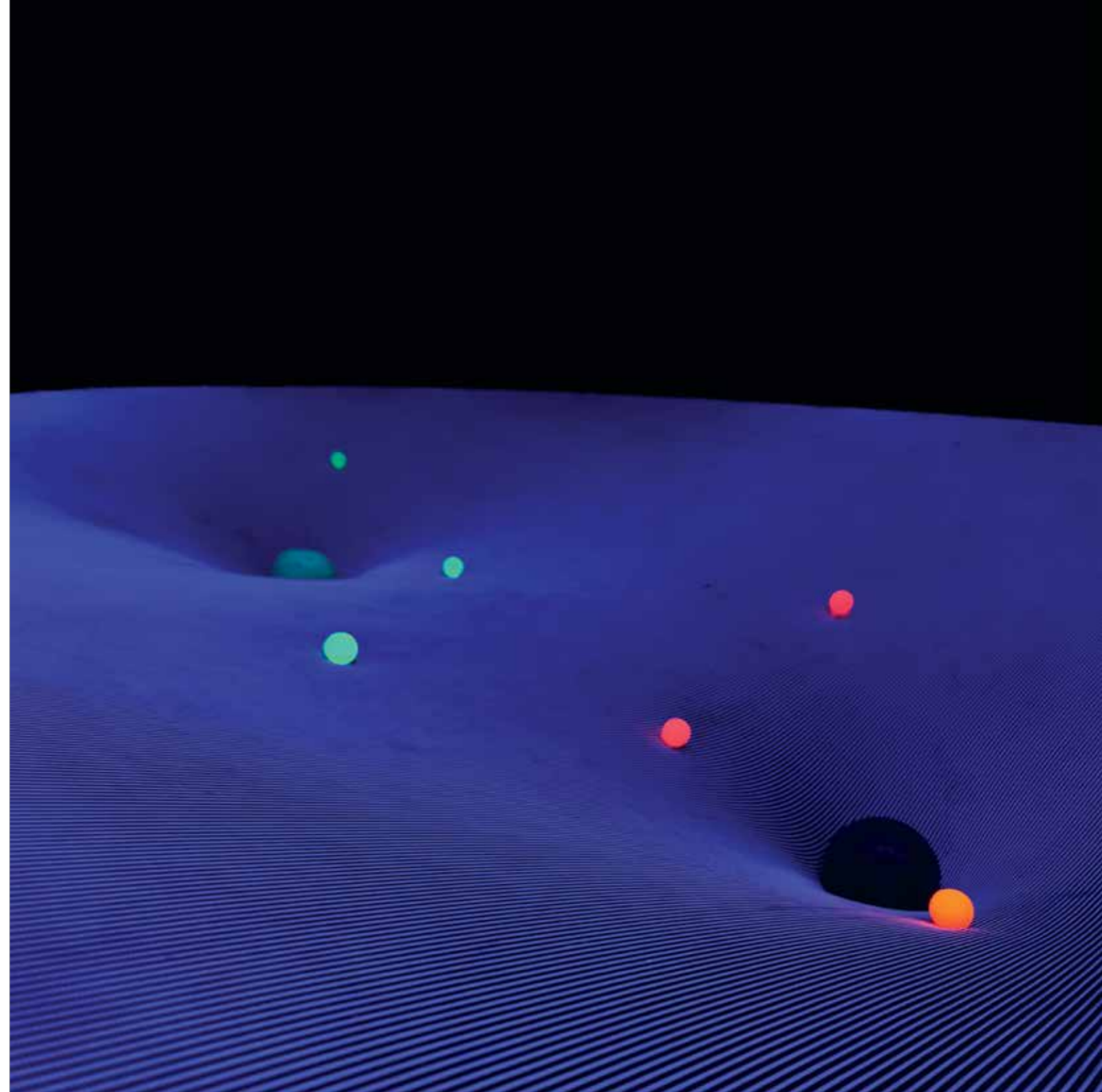
$$\frac{6\pi G}{c^4} (F^\alpha \psi F_\psi^\beta + \dots)$$

$$d\tau^2 = c^2 (1 - \frac{v^2}{c^2}) dt^2$$

A relatividade geral concedeu uma natureza dinâmica a esse espaço-tempo. Ou seja, mais do que uma arena onde ocorrem os acontecimentos, o espaço-tempo passa a ser uma entidade que se relaciona com a matéria, é modificada por ela e a ela modifica. Esse conceito de um espaço-tempo maleável às vezes é expresso como “tecido do espaço-tempo”.

Inclusive, é possível se fazer uma analogia visual entre o espaço curvo, reduzido a duas dimensões por simplicidade, com um tecido esticado. Sem nenhuma massa sobre ele o tecido fica plano e objetos leves que se deslocam sobre ele fazem trajetórias retas. Já se colocamos um objeto pesado sobre o tecido, ele se deforma. Bolinhas jogadas sobre ele farão trajetórias curvas, podendo inclusive fazer órbitas fechadas. Assim, o movimento de um corpo devido à gravitação é uma consequência direta da curvatura do espaço. Dito de outra forma, parafraseando o célebre físico John Wheeler: “A matéria diz ao espaço-tempo como se curvar e o espaço-tempo diz à matéria como se mover”.

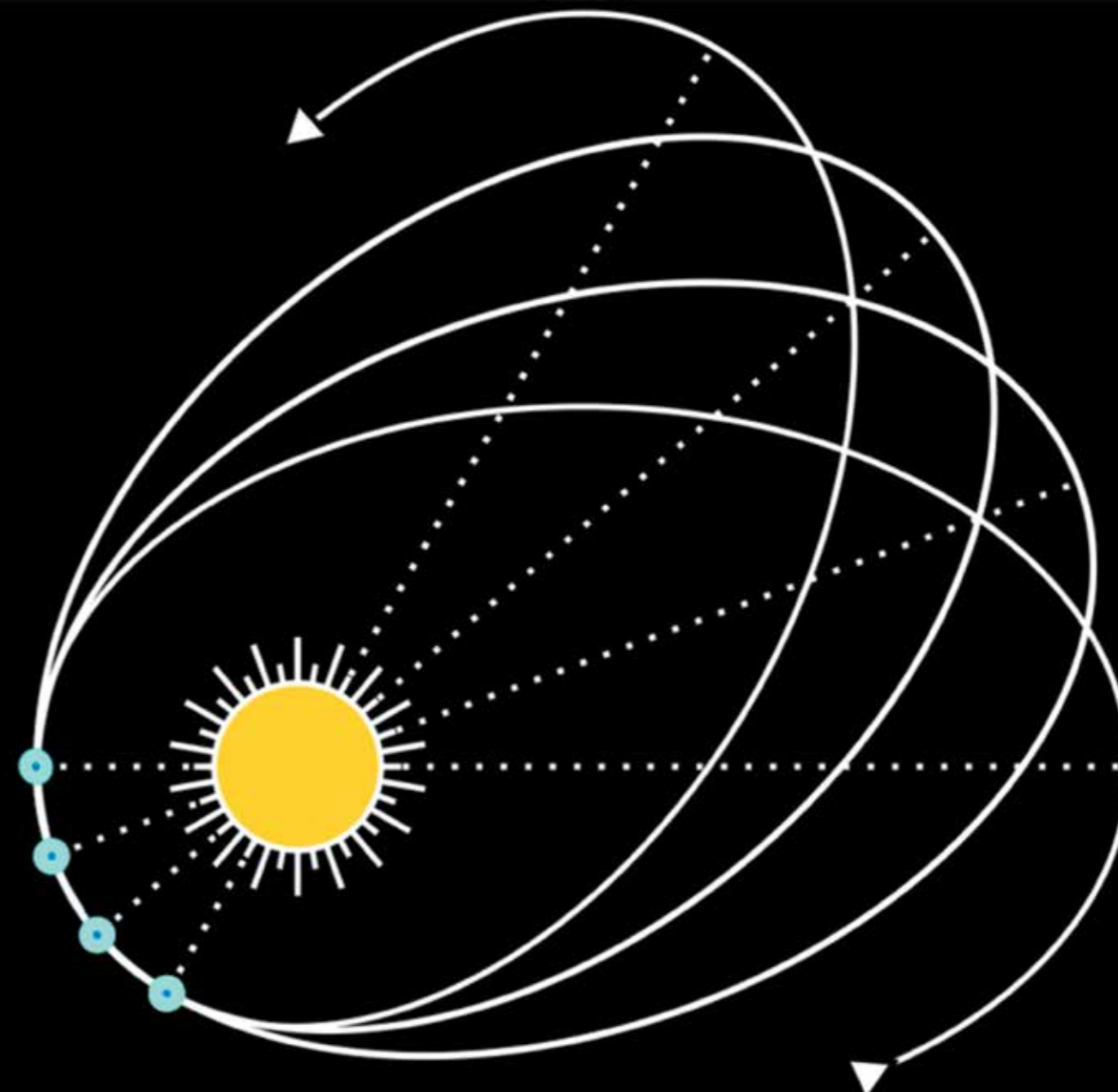
Bancada interativa sobre a curvatura do espaço-tempo, disposta na terceira sala da exposição *O Eclipse do MAST*. Uma membrana elástica é deformada pela massa central, o que obriga a que qualquer deslocamento no entorno da massa central seja determinado pela geometria deformada do tecido, em analogia com o que acontece com grandes concentrações de matéria como galáxias, estrelas e planetas: “o espaço-tempo diz à matéria como se mover”.
Fonte: Acervo de imagens do MAST



Além de modificar completamente o arcabouço conceitual e matemático da física, a teoria da Relatividade Geral previu diversos fenômenos totalmente novos, alguns com implicações práticas no nosso dia a dia e outros que só foram comprovados um século depois da formulação dessa teoria. Se bem a Relatividade Geral ajudou a inaugurar a nova física do século 20 e se consolidou durante esse século, podemos dizer que o século 21 é o século dessa teoria, pois é durante esse período que suas consequências mais fortes afluíram de forma mais contundente.

Um dos primeiros testes da Teoria da Relatividade Geral, proposto pelo próprio Einstein em 1915, mostrava sucesso ao calcular o avanço angular do periélio de Mercúrio (pontos azuis da figura), descoberto por Le Verrier em 1859. Einstein consegue calcular com sua teoria a contribuição que faltava para explicar o valor de 43" (segundos de arco) por século que era observado. Em consequência, o fenômeno pode ser entendido considerando a deformação espaço-temporal causada pela massa do Sol, levando em conta seu efeito no movimento do planeta mais próximo da estrela.

Fonte: https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Precess%C3%A3o_do_peri%C3%A9lio.svg

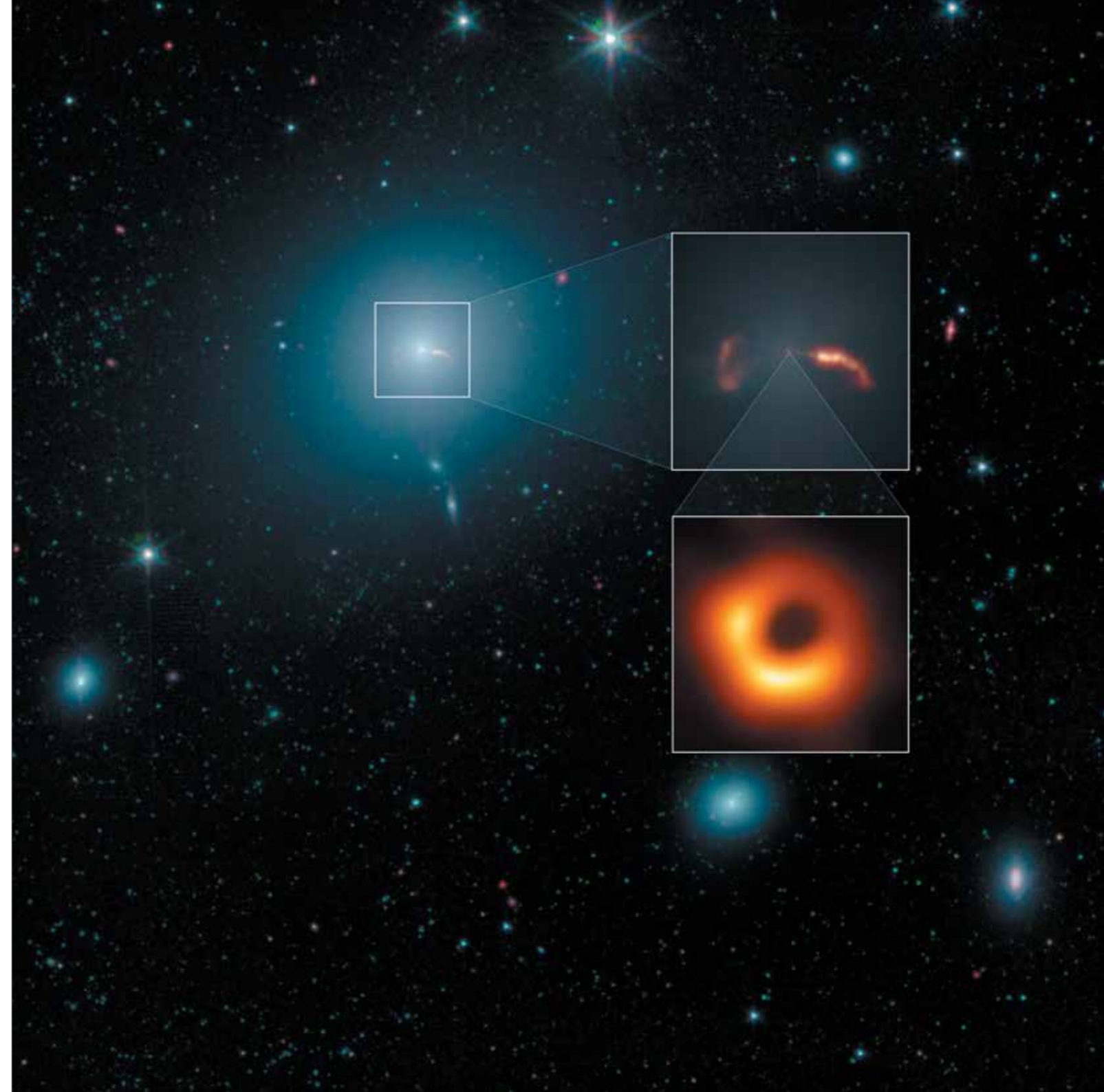


Talvez a consequência mais chocante da teoria da gravitação de Einstein seja a previsão, obtida no ano seguinte à sua formulação, da existência dos buracos negros. Durante muito tempo pensou-se que esses objetos fossem apenas uma curiosidade, uma abstração matemática dessa teoria e que talvez apontassem até uma limitação da sua validade. O buraco negro não é apenas um objeto do qual nem a luz nem nada pode sair, mas é um lugar onde o espaço-tempo se comporta de forma diferente de qualquer concepção intuitiva nossa.

Embora esquisitos e misteriosos, esses objetos foram sendo aceitos devido a diversas observações astronômicas que mostram evidências indiretas para sua existência. Além disso, os modelos físicos da evolução estelar preveem que os buracos negros sejam o estágio final da vida de estrelas com massa muito elevada. Existiriam ainda buracos negros com massas com cerca de milhões a bilhões de vezes a massa do Sol, os chamados buracos negros supermassivos. Estes residiriam no centro de grande parte das galáxias.

Uma das evidências mais diretas para a existência dos buracos negros é o aparecimento de um “anel de luz” ao seu redor, devido exatamente à deflexão da luz por seu campo gravitacional. Cem anos após o eclipse de Sobral, em 10 de abril de 2019, foi divulgada a primeira imagem desse anel, obtida através da combinação da informação de radiotelescópios espalhados pelo globo terrestre. Trata-se do buraco negro supermassivo no centro da galáxia elíptica conhecida como M87 e essa imagem ficou conhecida como a primeira “foto” de um buraco negro.

Imagem de galáxia elíptica M87, localizada a 55 milhões de anos-luz da Terra. Na maior ampliação da região central da galáxia é possível ver o chamado “anel de luz”, uma imagem reconstituída pelo projeto Event Horizon Telescope, que é considerada a primeira imagem de um buraco negro. As observações feitas em 2017, contando com 8 radiotelescópios distribuídos ao redor do mundo, usaram a técnica de interferometria de longa linha de base, o que permitiu reproduzir a capacidade de um telescópio cuja abertura seria praticamente do tamanho da Terra. O buraco negro do núcleo de M87 tem uma massa de 6,5 bilhões de massas solares e possui rotação. Fonte: https://photojournal.jpl.nasa.gov/figures/PIA23122_fig2.jpg



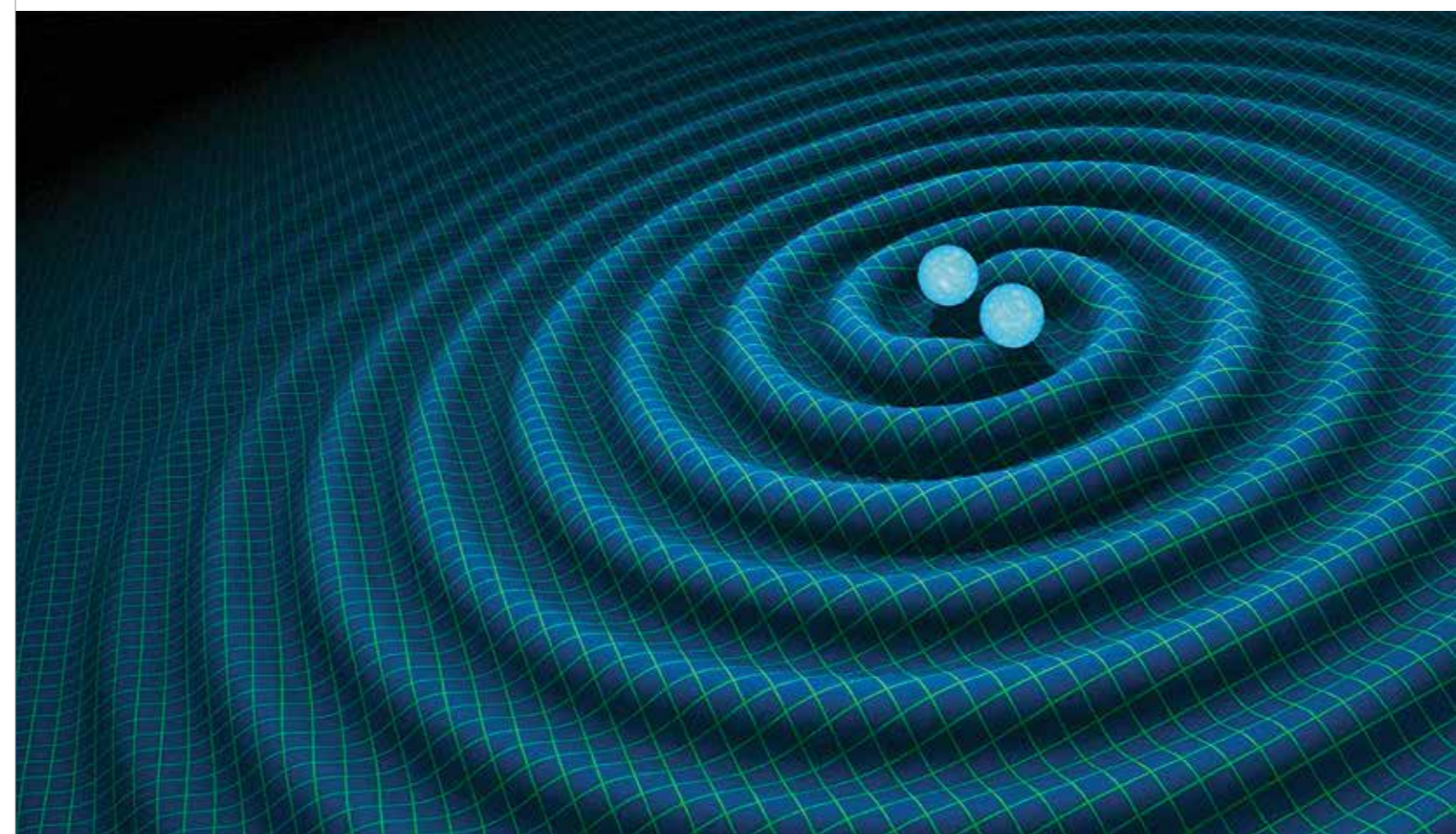
Outra previsão emblemática e peculiar da Relatividade Geral é

a existência das ondas gravitacionais. Essas ondas se assemelham às ondas se propagando na superfície da água ou em um tecido, porém é o próprio espaço-tempo que oscila! Einstein mesmo chegou a duvidar de sua existência e foram necessários cem anos após a Relatividade Geral até que elas fossem descobertas. As ondas gravitacionais são geradas por eventos muito energéticos no Universo, como, por exemplo, a colisão de buracos negros. As oscilações do espaço-tempo são tão tênues, que ao chegar na Terra provocam uma ínfima variação de tamanho das coisas, em cerca de uma parte em mil trilhões de trilhões!

Concepção artística da interação entre dois objetos compactos distantes, gerando um padrão ondulatório no espaço-tempo.

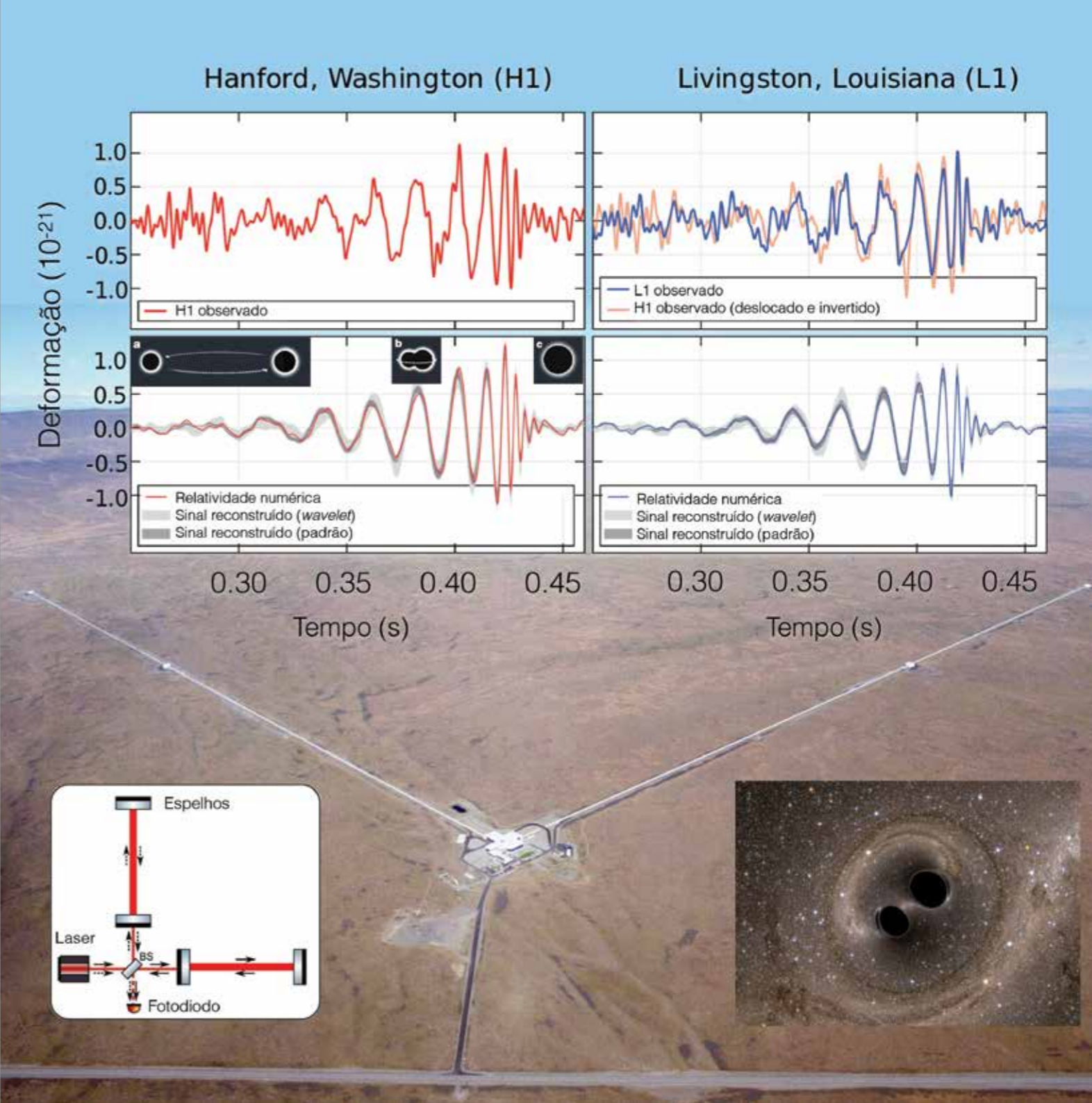
Essas ondas são previstas na teoria de relatividade geral e foram detectadas pela primeira vez em 2015.

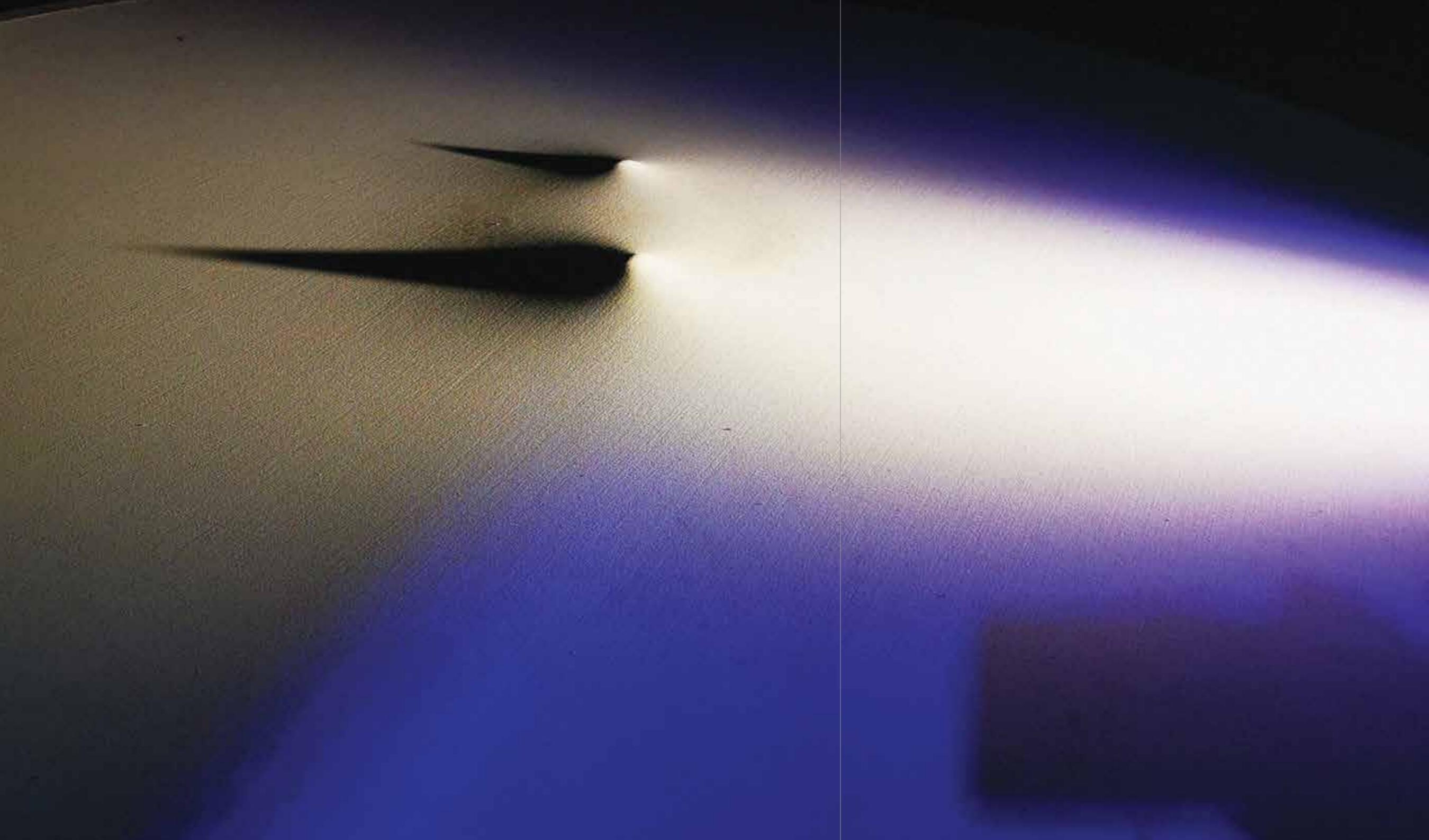
Fonte: NASA
[<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/nsf-s-ligo-has-detected-gravitational-waves>]



A primeira onda gravitacional foi descoberta em 14 de setembro de 2015 pelo observatório *LIGO* (sigla para *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*, <https://www.ligo.caltech.edu/>). O *LIGO* possui espelhos com separação de 4km entre eles e mede oscilações equivalentes a um milésimo do tamanho de um próton nesse tamanho, provavelmente a medida mais precisa já feita. A descoberta das ondas gravitacionais reforçou a validade da teoria da Relatividade Geral e, de quebra, comprovou a existência dos buracos negros, já que esse primeiro evento correspondeu à fusão de dois buracos negros que orbitavam um ao outro. Essa medida abriu uma janela inteiramente nova para nosso conhecimento do Universo, já que pela primeira vez na história da humanidade conseguimos captar informações transmitidas pela própria oscilação do espaço-tempo. O *LIGO* passou a detectar dezenas de colisões de buracos negros e a ele se juntou outro observatório de ondas gravitacionais, o projeto *Virgo* (<https://www.virgo-gw.eu/>). Em 17 agosto de 2017 foi detectada por esses observatórios, pela primeira vez, uma onda gerada pela colisão de duas estrelas de nêutrons, objetos extremamente compactos que também são um dos possíveis estágios finais da vida das estrelas.

Primeira detecção de uma onda gravitacional. As ínfimas deformações no espaço causadas pela onda gravitacional são detectadas por um interferômetro (ilustração abaixo à esquerda), fornecendo o padrão temporal mostrado nos gráficos. As medidas realizadas com dois interferômetros (H1 e L1), separados de 3.000 Km, mostram um padrão semelhante, conforme previsto pela teoria da relatividade geral nas fases da coalescência de dois buracos negros: (a) espiralamento, (b) fusão e (c) toque final. A figura abaixo à direita é uma ilustração artística dos buracos negros em fusão, na frente de um fundo de estrelas. A imagem de fundo mostra uma vista aérea do interferômetro do LIGO situado em Hanford. Créditos: Abbott et al., LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, Physical Review Letters, Caltech, MIT, NSF, SXS, Gräf et al.]





Simulação da produção de ondas gravitacionais, disponível na terceira sala da exposição *O Eclipse*. Um tecido é esticado em uma bancada circular, sobre um par de objetos unidos por um eixo. Quando esse eixo gira, cria-se um padrão sobre o tecido que imita visualmente as distorções do espaço-tempo propagando-se em uma onda gravitacional.
Fonte: Acervo fotográfico do MAST

A consequência mais direta, e talvez mais bela, da deflexão da luz pela gravidade é a existência das lentes gravitacionais. A trajetória da luz vinda de objetos celestes distantes é desviada pelo campo gravitacional de objetos mais próximos. Assim, as imagens desses objetos distantes podem aparecer distorcidas. O mais surpreendente é que a luz pode percorrer caminhos totalmente distintos até chegar à Terra, aparentando, portanto, vir de pontos diferentes do céu. Esse fenômeno, também chamado de miragens gravitacionais, faz com que possamos ver várias imagens distintas de uma mesma fonte de luz.

Ilustração do efeito de lente gravitacional. A deflexão da luz pela gravidade distorce a forma de fontes de luz distantes, podendo gerar imagens em forma de arco ou até mesmo anéis (conhecidos como anéis de Einstein). Além disso, a luz pode percorrer trajetórias diferentes até chegar à Terra, levando à aparição de imagens múltiplas. Nesses casos o corpo que atua como lente gravitacional, distorcendo o espaço-tempo, é geralmente uma galáxia ou um aglomerado de galáxias. Crédito: Revista Ciência Hoje

The image contains two diagrams and two photographs illustrating gravitational lensing. The top diagram, titled 'Imagens Múltiplas', shows light from a 'Fonte' (source) being deflected by a 'Lente' (lens) galaxy, reaching Earth ('Terra') via multiple paths, creating multiple images of the source. The bottom diagram, titled 'Arcos', shows light from a 'Fonte' being deflected by a 'Lente' galaxy, creating 'Arcos' (arcs) of light. To the right, two photographs show real-world examples: the 'Cruz de Einstein' (Einstein Cross) and the 'Aglomerado de Abell 2218' (Abell 2218 cluster).

Imagens Múltiplas

Arcos

Cruz de Einstein formada por várias imagens de quasar

Aglomerado de Abell 2218 com diversos arcos gravitacionais

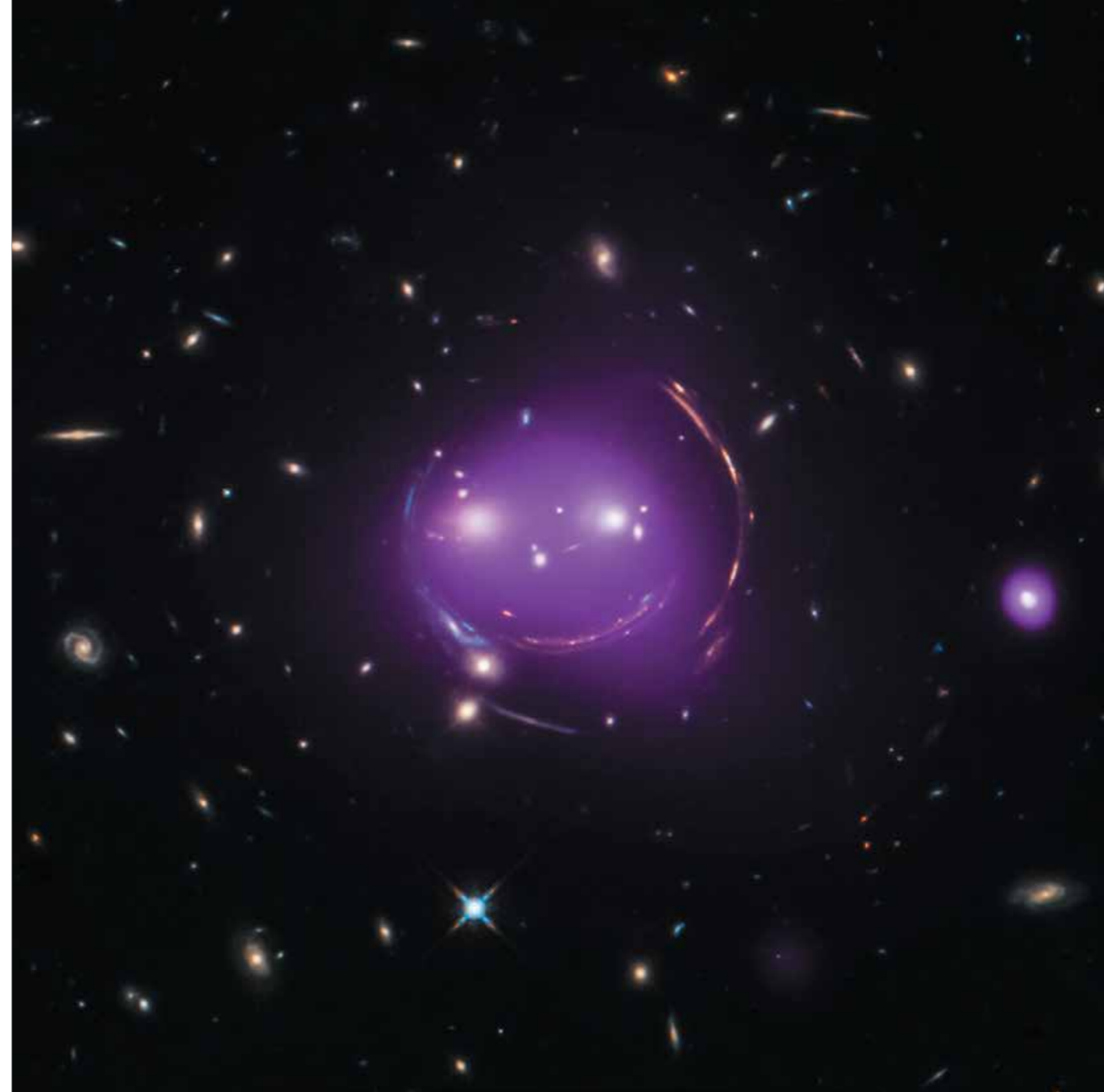
MAGA, ESA, E STSCI

ANDREW FRUCHTER (STSCI) ET AL., WPC2, HST, NASA

Além de distorcer e aumentar o tamanho das fontes de luz, o fenômeno de lente gravitacional também amplifica a luz desses objetos. O objeto que distorce o espaço-tempo, chamado de lente, pode ser uma galáxia distante ou até mesmo um planeta em nossa galáxia! E os objetos cujas imagens são distorcidas, as fontes de luz, podem ser galáxias e quasares distantes ou até mesmo estrelas de nossa galáxia. Além de sua beleza, o efeito de lente é extremamente útil para sondar o Universo e vem sendo cada vez mais utilizado ao longo deste século 21. A amplificação da luz de algumas estrelas ao longo do tempo permitiu descobrir dezenas de planetas fora de nosso Sistema Solar. Mas é além dos confins de nossa galáxia que esse efeito tem sido mais usado. A principal aplicação é determinar como a matéria se distribui no Universo, desde as galáxias até as maiores estruturas do Cosmos. Usando a forma das galáxias distorcidas e suas imagens múltiplas é possível determinar a quantidade de massa que age como lente.

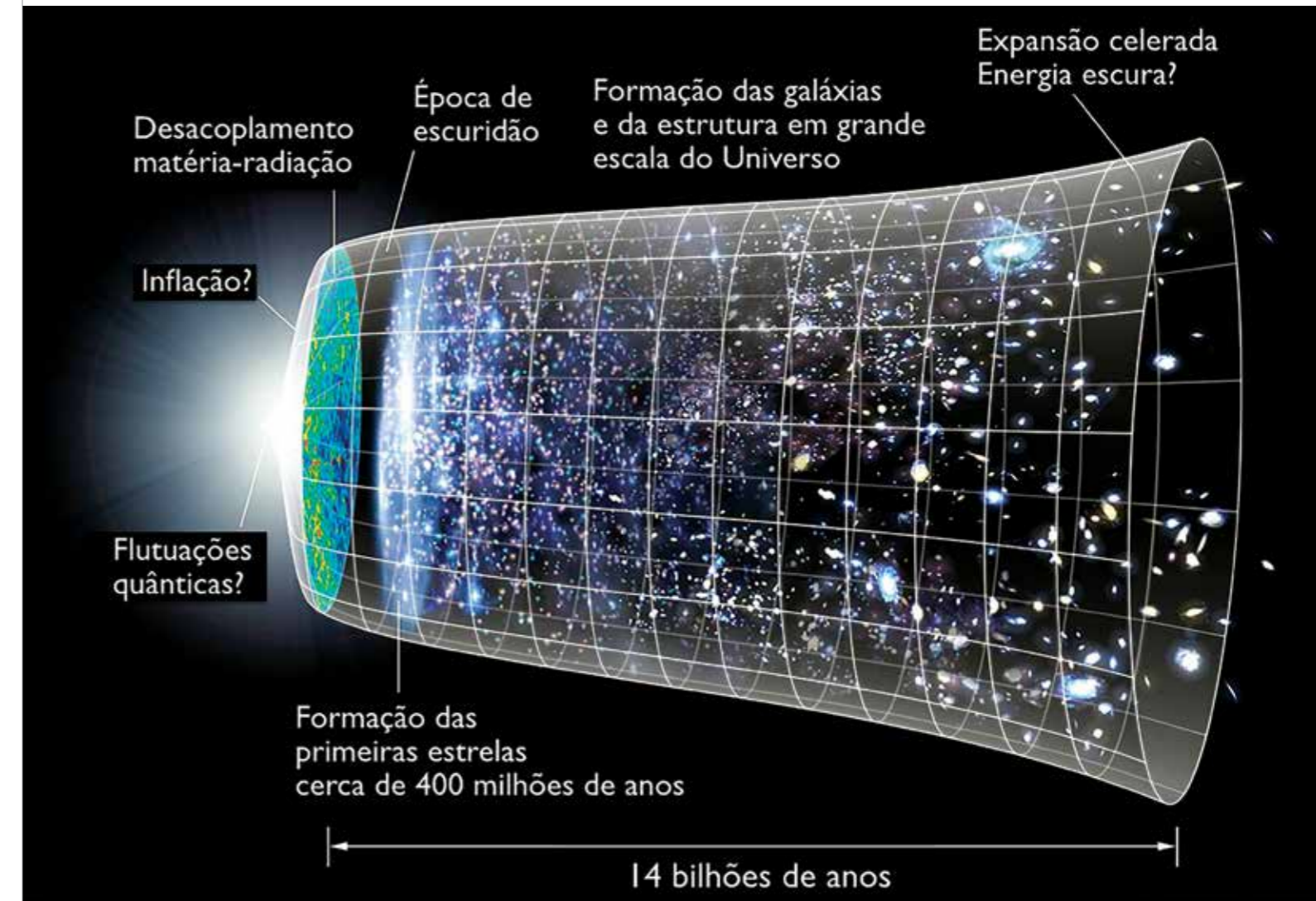
Todas as medidas atuais usando o efeito de lente gravitacional corroboram os resultados obtidos no século passado, de que cerca de 80% da matéria do Universo está sob a forma de matéria escura. Segundo os dados cosmológicos, essa matéria, além de completamente invisível, não pode ser composta pela partículas já conhecidas, como prótons, nêutrons e elétrons. Ela deveria consistir de partículas inteiramente novas ou senão estar na forma de buracos negros de massas muito distintas, produzidos em alguma fase primordial do Universo.

Imagem do grupo de galáxias conhecido como Gato de Cheshire (SDSS J103842.59+484917.7) obtida pelo telescópio espacial Hubble. Os objetos em forma arqueada são imagens de galáxias distantes produzidas pelo efeito de lente gravitacional graças à deflexão da luz pelo campo gravitacional do grupo. A parte difusa mostrada com cor roxa corresponde à imagem do mesmo sistema, mas feita em raios-x (ou seja, na região do espectro da luz correspondente aos raios-x), pelo satélite Chandra. Ela mostra que o grupo de galáxias é permeado por um gás extremamente quente e que representa a maior parte da matéria comum no grupo. Tanto o efeito de lente quanto a temperatura do gás evidenciam a presença nesse sistema de uma matéria ainda desconhecida, denominada matéria escura. Fonte: <https://chandra.harvard.edu/photo/2015/cheshirecat/> [crédito HST, Chandra, NASA, ESA]



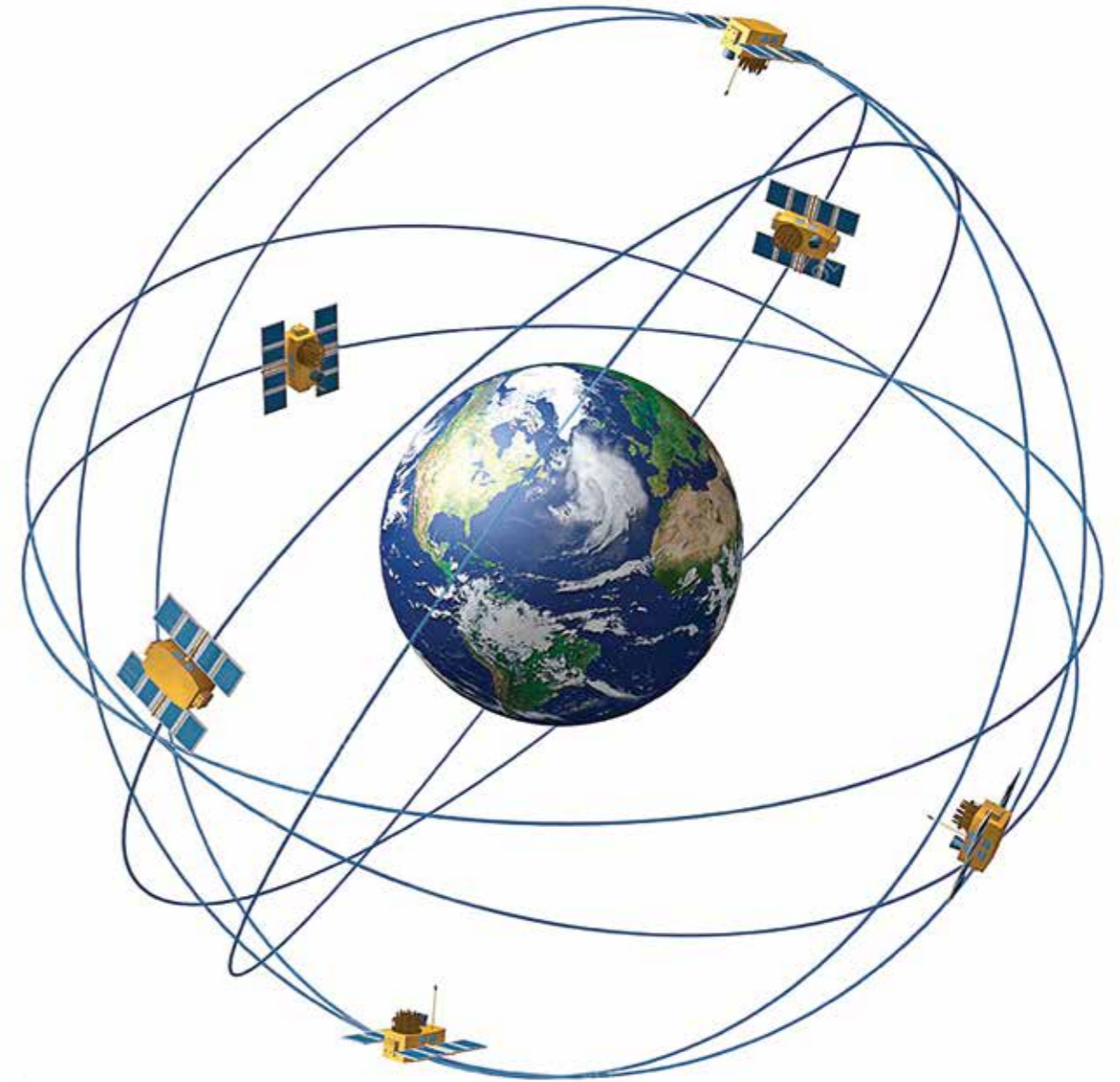
Não bastasse a presença da matéria escura, uma grande diversidade de dados astronômicos indica que a dinâmica do Universo deveria ser dominada por uma segunda componente desconhecida, denominada energia escura. A matéria e a energia escuras estão entre as maiores incógnitas do modelo cosmológico vigente. Elas apontam as limitações das teorias físicas atuais e indicam possíveis caminhos para uma nova física. Apesar dessas grandes incógnitas, é surpreendente que possamos elaborar um modelo físico do Universo, capaz de descrever sua história desde tempos remotos, há cerca de 14 bilhões de anos, até os tempos atuais e sua grande diversidade de estruturas. Essa conquista da espécie humana – que se consolidou durante o século 21 – tem, entre seus pilares, a teoria da Relatividade Geral.

Ilustração da história da expansão do Universo segundo o modelo cosmológico atual, fundamentado nas teorias de física fundamental – incluindo a relatividade geral de Einstein – e em um vasto conjunto de observações astronômicas. Há cerca de 14 bilhões de anos o Universo era extremamente denso e quente, além de opaco. Na medida em que se expande, o Cosmos passa por diversas fases, incluindo o desacoplamento matéria-radiação, quando a luz passa a se propagar livremente. Depois foram formadas as primeiras estrelas e foi sendo montada a estrutura em grande escala do Universo, ao mesmo tempo em que surgiam e evoluíam as galáxias. Atualmente a expansão passa por uma fase acelerada, cuja dinâmica é creditada à energia escura. Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Expansion_of_the_universe#/media/File:CMB_Timeline300_no_WMAP.jpg



Mas não é só para compreender a imensidão do Cosmos que a Relatividade Geral é importante. Na realidade, a maioria de nós anda com uma “maquina de relatividade geral” em nossos bolsos e nem nos damos conta. Para determinar nossa posição precisa na Terra, o sistema de GPS (de Global Positioning System) compara o tempo de chegada dos sinais de diferentes satélites até o nosso celular. As diferenças de tempo são ínfimas, mas a precisão é tanta que é necessário levar em conta os efeitos da Relatividade Geral. Segundo essa teoria, o passar do tempo é diferente para objetos em um campo gravitacional e em movimento. Ou seja, o tempo medido pelos satélites do GPS é diferente do medido por nossos relógios, pois aqueles estão em movimento em relação a nós e situados em uma altura muito diferente. Essa variação no tempo é imperceptível na escala humana, mas é absolutamente crucial para calcular nossa posição correta. Se ignorássemos os efeitos da Relatividade Geral, o GPS nos daria posições completamente erradas, com uma diferença de 10 Km em um único dia, e que seria cumulativa. Isso inviabilizaria a entrega e o transporte por aplicativos, o direcionamento correto de ambulâncias e forças de segurança, etc. Em resumo, o sistema de GPS só funciona, facilitando imensamente a nossa vida cotidiana, porque ele leva em conta corretamente os cálculos de teoria da Relatividade Geral de Einstein.

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) é uma ferramenta que tem trazido transformações inéditas. Concebido para uso militar, seu funcionamento requer da correção de efeitos relativistas. A grande velocidade dos satélites produziria um atraso no seu tempo em relação a nós de até 10 microsegundos por dia [$\mu\text{s}/\text{dia}$]. Como eles estão em órbita, o campo gravitacional neles é 25% inferior ao sentido na superfície da Terra. Isso produz um adiantamento de mais de 40 $\mu\text{s}/\text{dia}$, de acordo com a relatividade geral. Esses e outros efeitos da relatividade precisam ser levados em conta para permitir a localização acurada com o GPS. Fonte: <https://www.sciencephoto.com/media/1021903/view/gps-navigation-satellite-network>



Passados cem anos do primeiro teste da Relatividade Geral, essa teoria revolucionária se tornou um elemento central para a compreensão do nosso Universo e passou a fazer parte do cotidiano de grande parte da população mundial. Será que as equipes envolvidas nessa medida gloriosa do desvio da luz em 1919 tinham ideia da dimensão das implicações que viriam a ter os resultados que eles estavam a obter?

O sucesso da primeira comprovação da teoria da relatividade geral foi noticiado de maneira inédita na história. As mídias conseguiram popularizar a relevância do resultado, com uma narrativa “épica”. A figura de Einstein virou referência do cientista, com cabelos desarrumados e olhar profundo, se constituindo em um ícone pop. Hoje, mais do que antes, as consequências das ideias de Einstein estão inseridas na cotidianidade.
Fonte: Acervo fotográfico MAST



REALIZAÇÃO

MAST - Museu de Astronomia e Ciências Afins

Ministro de Estado de Ciência, Tecnologia e Inovações
Marcos Cesar Pontes

Secretário Executivo
Sergio Freitas de Almeida

Secretário-Executivo Adjunto
Carlos Alberto Flora Baptistucci

Subsecretário de Unidades Vinculadas
Paulo Maurício Jaborandy de Mattos Dourado

Diretor do Museu de Astronomia e Ciências Afins (substituto)
Marcus Granato

Organização
Anelise Pacheco
João dos Anjos

Direção de arte
Jair de Souza

Design
Jair de Souza
Natali Nabekura

Textos
Luiz Alberto Oliveira
Martin Makler
Oscar T. Matsuura

Edição e Revisão dos textos
Diana de Medeiros

Tratamento de imagem
Alan Remedio
Edilene Ferreira
Gustavo Mamede
Igor Salmito

Agradecimentos
Gisela Zingon
Vladimir Suarez



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



JUNHO DE 2021