

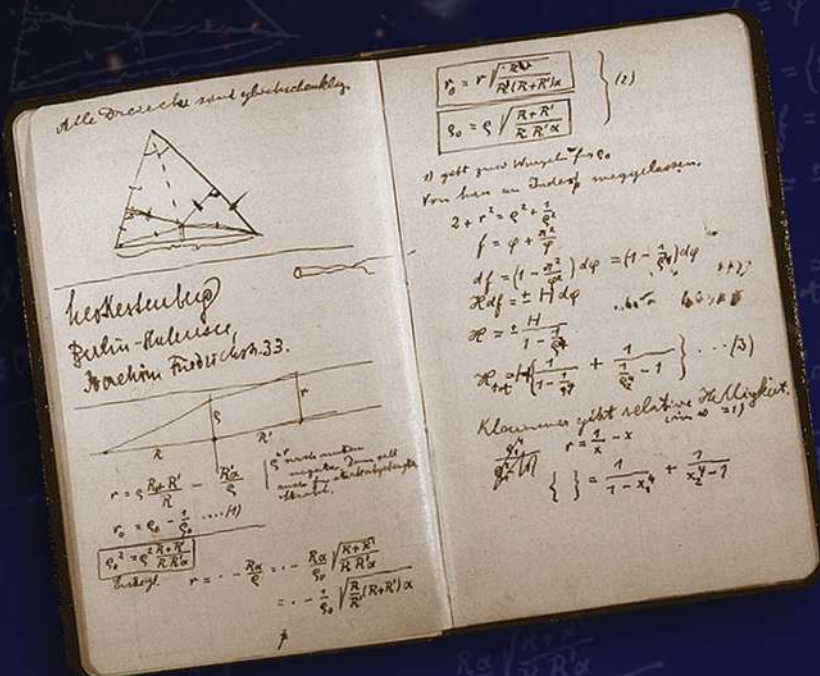
Uma das consequências mais espetaculares do desvio da luz pela gravidade é o fenômeno de lente gravitacional. Mais que uma curiosidade da teoria da relatividade geral, esse efeito proporciona um instrumento poderoso para a astrofísica e a cosmologia.

As lentes gravitacionais permitem enxergar alguns dos objetos mais distantes do cosmo, detectar a presença de matéria invisível, sondar a estrutura em grande escala do universo e até descobrir novos planetas.

Martín Makler

Instituto de Cosmologia, Relatividade e Astrofísica,
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (R)

o universo visto pelas lentes gravitacionais



Cadernos de Einstein com cálculos sobre o desvio da luz sofrido pela ação da gravidade, gerando imagens duplas




Figura 1. Os raios de luz que passam na proximidade da borda do Sol são defletidos pela gravidade desse astro, o que leva o observador a enxergar a estrela em posição diferente daquela que ela realmente ocupa no céu

Pode-se dizer que os fundamentos da área de lentes gravitacionais foram estabelecidos há exatos 90 anos, quando foi medida, pela primeira vez,

a deflexão da luz por um campo gravitacional. Como é comum na história da ciência, os caminhos das grandes descobertas são, por vezes, atribulados. Os primeiros cálculos conhecidos sobre o desvio da luz pela gravidade remontam ao século 18. Uma versão mais moderna deles foi feita, em 1911, pelo físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955), com base em ideias que quatro anos mais tarde fariam parte de sua teoria da gravitação, conhecida como relatividade geral.

Para comprovar esse desvio, Einstein sugeriu a astrônomos que se medisse a mudança na posição aparente de estrelas próximas à borda do Sol, o que teria que ser feito durante um eclipse solar total, quando as estrelas podem ser vistas perto desse astro. Nesse teste, a ideia é medir um ângulo extremamente pequeno, formado entre a posição aparente e real desse astro. O esquema da figura 1 mostra essa diferença.

Ao longo da década de 1910, ocorreram várias expedições com esse propósito. Uma delas já em 1912, em Cristina (MG). Mas uma forte chuva impediu a observação do eclipse. A ironia é que Einstein contou com boa dose de sorte na ocasião, pois seus cálculos para esse desvio estavam incorretos: davam o mesmo valor do desvio obtido com base na teoria da gravitação do físico inglês Isaac Newton (1642-1727).

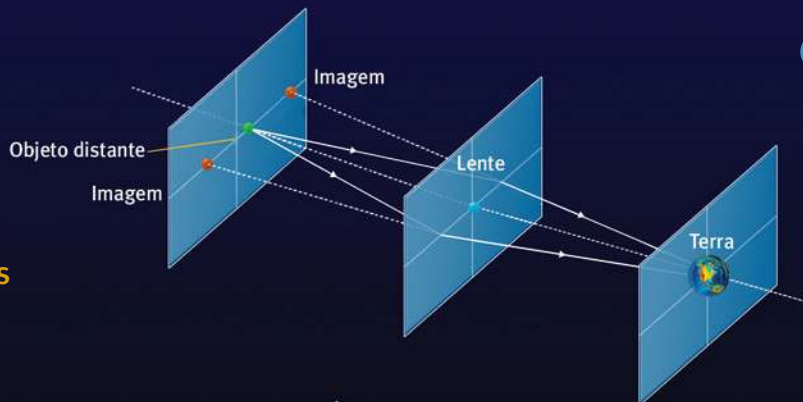
Outras tentativas não tiveram melhor sorte. Em 1914, os integrantes alemães de uma expedição internacional acabaram presos na Crimeia (Rússia), com seus equipamentos confiscados, devido à eclosão da Primeira Guerra Mundial, que colocou os dois países em lados opostos do conflito.

Em 1915, após completar a sua teoria da relatividade geral, Einstein recalculou o desvio da luz e obteve o valor correto, que é o dobro do valor obtido anteriormente, diferindo, portanto, da previsão newtoniana.

O desvio da luz por um campo gravitacional só acabou medido em 1919, quando equipes britânicas foram enviadas para a ilha de Príncipe, na África, e Sobral, no Ceará, para observar outro eclipse total do Sol. Na ilha da costa ocidental africana, o tempo ficou ruim. E, em Sobral, o Sol se abriu – para depois se escurecer –, e as fotografias do fenômeno obtidas em território brasileiro concordaram com a nova – e definitiva – previsão de Einstein.

Einstein tornou-se uma celebridade mundial. Sua teoria havia desbancado a de Newton, que reinava por cerca de dois séculos e meio.

Imagens duplas



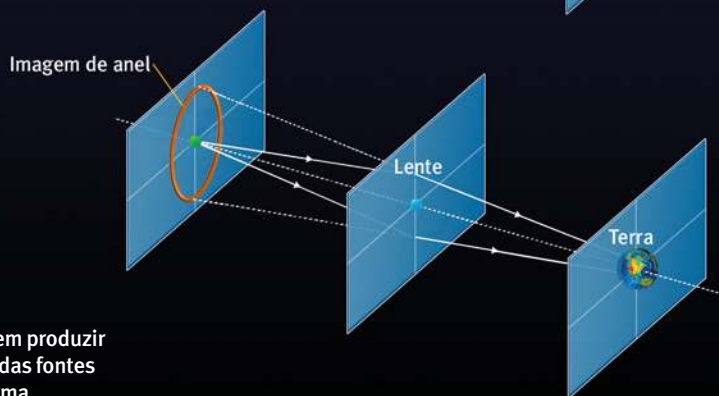
A



WALSH, GARSWELL E WERMANN (1979)

Imagem dupla do quasar QSO 0957+561 feita em 1979, considerada a primeira miragem gravitacional descoberta

Anéis



B



NASA/ESA/A. BOUDON AND S. KISTEN

Anéis de Chwolson-Einstein observados pelo telescópio espacial Hubble

Figura 2. As lentes gravitacionais podem produzir imagens múltiplas das fontes ou distorcer sua forma

MIRAGENS GRAVITACIONAIS

O desvio dos raios de luz pelo campo gravitacional é um fenômeno análogo àquele sofrido pela luz ao atravessar um meio material, como a água ou o vidro. Assim, a gravidade pode exercer sobre a luz efeito muito semelhante ao de uma lente, alterando a forma de objetos que estão atrás da lente. Esse fenômeno é chamado lente gravitacional.

Qualquer massa pode ser uma lente gravitacional. Até mesmo você, leitor, neste instante, está desviando os raios de luz que passam nas proximidades de seu corpo e agindo como uma lente! O problema é que só é possível detectar algum efeito quando a massa e as distâncias (entre a fonte emissora de luz, a lente e o observador) são suficientemente grandes. Os objetos mais ‘leves’ detectados por seu efeito de lente gravitacional são planetas – mas eles estão a milhares de anos-luz da Terra (cada ano-luz equivale a 9,5 trilhões de km).

As lentes gravitacionais, diferentemente das usuais (como as de óculos, lunetas etc.), podem produzir imagens múltiplas das fontes e/ou distorcer sua forma, dando origem aos chamados arcos gravitacionais. Tanto arcos quanto imagens múltiplas são denominados ‘miragens gravitacionais’.

Já em 1912, Einstein percebeu que a deflexão da luz causada por uma estrela daria origem a imagens duplas (figura 2A) de uma estrela mais distante. Percebeu também que essas imagens seriam magnificadas (ou

seja, seu brilho aparente seria aumentado). Mas essas ideias não foram publicadas na época.

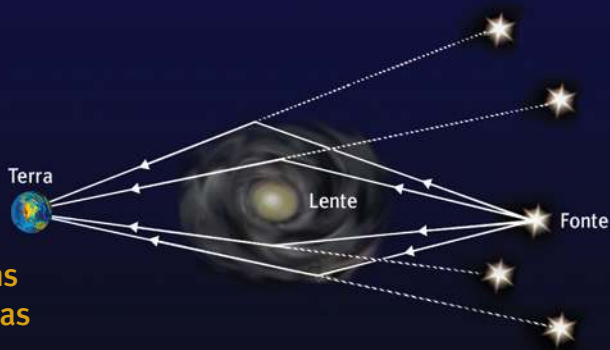
O primeiro artigo sobre o efeito de lente gravitacional foi do físico russo Orest Chwolson (1852-1934), em 1924. Além da ‘estrela dupla fictícia’, Chwolson previu que o alinhamento perfeito entre fonte, lente e observador daria origem a uma imagem com forma de anel em volta da lente (figura 2B).

Einstein só publicou o primeiro artigo sobre lentes gravitacionais em 1936, prevendo as imagens duplas e a magnificação das imagens, bem como a possibilidade de o fenômeno formar anéis (hoje, anéis de Chwolson-Einstein). Curiosamente, Einstein parecia desconhecer o trabalho de Chwolson – embora este tivesse sido publicado na mesma página da revista em que havia saído outro de seus artigos.

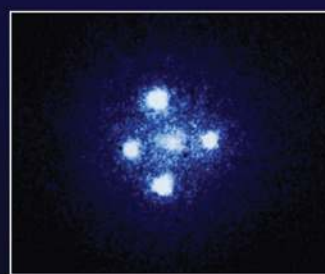
DIFERENTES VISÕES

Se uma estrela pode fazer o papel de lente gravitacional, então por que não vemos no céu uma série de imagens duplas de outras estrelas que estejam atrás da primeira? Uma primeira resposta: porque, para que o efeito de lente seja detectável, é preciso, como foi dito, um alinhamento quase perfeito entre a fonte, a lente e o observador (ou seja, entre a estrela mais distante, a mais próxima e a Terra), o que é extremamente improvável. Em seu artigo de 1936, Einstein concluiu: “obviamente, não há muita esperança de se observar esse fenômeno diretamente”.

Imagens Múltiplas



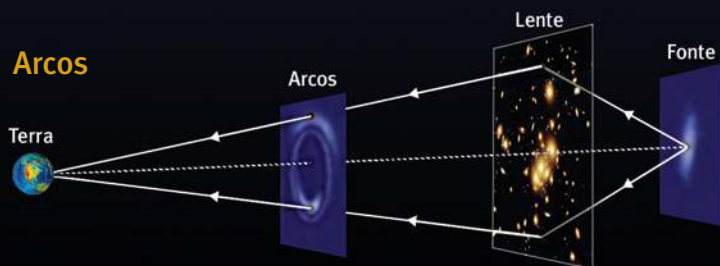
C



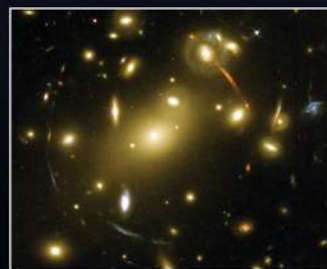
Cruz de Einstein formada por várias imagens de quasar

NASA, ESA, E STSC

Arcos



D



Aglomerado de Abell 2218 com diversos arcos gravitacionais

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

Em 1937, o astrônomo suíço Fritz Zwicky (1898-1974) publicou um trabalho no qual estudava o efeito de lentes gravitacionais de galáxias por galáxias e por aglomerados de galáxias. Como as massas e as distâncias envolvidas eram muito maiores, os efeitos de imagem múltipla poderiam ser observados diretamente.

Zwicky previu que as lentes poderiam ser utilizadas em três aplicações: i) para ver objetos distantes, agindo como ‘telescópios gravitacionais’; ii) para medir a massa de galáxias e aglomerados; iii) para testar a relatividade geral por meio da deflexão da luz. Ele concluiu: “A probabilidade de que galáxias agindo como lentes gravitacionais sejam encontradas torna-se praticamente uma certeza.”

MICRO E MACRO

O efeito de lente é tanto maior quanto maiores forem a massa da lente e as distâncias entre ela, a fonte e o observador. O efeito é máximo se a distância do observador até a lente é aproximadamente igual àquela da lente até a fonte – ou seja, se a lente está ‘no meio’ do caminho. Se dois desses três elementos estiverem próximos, o efeito é nulo.

Se a massa da lente é pequena (uma estrela, por exemplo) e a distância dela até a fonte for ‘curta’ (dentro dos limites da Via Láctea, por exemplo), o efeito causa uma separação angular entre as imagens da ordem de um microssegundo de arco (para

se ter uma ideia, isso equivale a dividir um ângulo de apenas um grau em um bilhão de partes iguais!). Essa separação não pode ser detectada nem mesmo com as mais avançadas tecnologias atuais – isso também responde à nossa pergunta sobre por que não vemos estrelas duplas fictícias no céu.

No entanto, mesmo sem ver as imagens duplas, podemos detectar o efeito de aumento do brilho. Em seu movimento pela galáxia, se houver um alinhamento quase perfeito entre observador, lente e fonte, esta última pode ser magnificada centenas de vezes. Esse é o efeito de microlentes gravitacionais.

Fenômeno semelhante ocorre para quasares distantes que sofrem o efeito de magnificação por estrelas em outras galáxias. Nesses casos, a separação angular típica é de milissegundos de arco, mas novamente o efeito pode ser detectado pela variação do brilho do quasar.

Agora, se as lentes são galáxias ou aglomerados de galáxias (que têm massas um bilhão ou até um trilhão de vezes maiores que as do Sol), é possível detectar a separação das imagens, os arcos ou os anéis. Esse é o chamado efeito de macrolente gravitacional.

Como a lente não é mais um objeto pontual, ela pode gerar mais de duas imagens – muitas vezes, são visíveis quatro imagens (figura 2C). Também podem ser gerados arcos (figura 2D). E, se a lente for quase esférica e o alinhamento entre observador, lente e fonte for quase perfeito, anéis de Chwolson-Einstein podem ser formados.

FORTE E FRACO

Os efeitos de macro e microlentes gravitacionais são ditos fortes, porque produzem grandes magnificações, fortes distorções ou imagens múltiplas. Isso significa que, na prática, podem ser detectados para uma única fonte. Fenômenos fortes de lente gravitacional são raros, pois requerem que observador, fonte e objeto estejam não só muito separados uns dos outros, mas quase perfeitamente alinhados.

Por sua vez, o efeito fraco de lente gravitacional causa apenas leves distorções e uma pequena variação no brilho das fontes. Uma galáxia, por exemplo, teria sua aparência levemente rodada e seu tamanho ligeiramente aumentado. Como o tamanho e a orientação de cada galáxia não são conhecidos *a priori*, não é possível medir esse efeito para uma única fonte, sendo preciso observar grande número delas para se detectar esse efeito na média.

A ERA DAS DESCOBERTAS

A primeira miragem gravitacional foi descoberta por acaso em 1979. A partir daí, as lentes gravitacionais colecionaram descobertas: arcos gravitacionais; anéis de Chwolson-Einstein; efeito de microlente em quasares; distorção fraca de lentes por aglomerados de galáxias; microlente de estrelas por objetos da nossa galáxia; efeito de lentes pela estrutura em grande escala do universo; descoberta de planetas extrassolares por

meio do efeito de microlente... A lista hoje é vasta, e voltaremos a falar um pouco sobre alguns de seus itens.

Nas três últimas décadas, vivemos a ‘era das descobertas’ com lentes gravitacionais, que passaram a ser usadas para sondar o universo.

Mas o que proporcionou essa sequência de descobertas e suas posteriores aplicações? Além do interesse científico, foram fundamentais avanços tecnológicos. Telescópios de grande porte situados em locais com excelentes condições atmosféricas têm sido capazes de detectar fenômenos de baixo brilho, distorções sutis e estruturas pequenas, características determinantes, por exemplo, para a detecção de arcos. A captação das imagens é feita na forma digital com altíssima eficiência – esse mesmo tipo de tecnologia, os chamados CCDs, está hoje embutido nas câmaras fotográficas digitais.

Outro aspecto importante: o complexo tratamento computacional da imagem para corrigir todos os efeitos relativos à atmosfera e aos causados pelos próprios instrumentos, algo fundamental para a detecção da sutil distorção causada pelo efeito fraco de lente gravitacional. A análise computadorizada também permite avaliar com precisão o brilho de centenas de milhões de estrelas na busca do efeito de microlente – algo impensável na época em que Einstein apresentou sua conclusão pessimista!

APLICAÇÕES DE INTERESSE

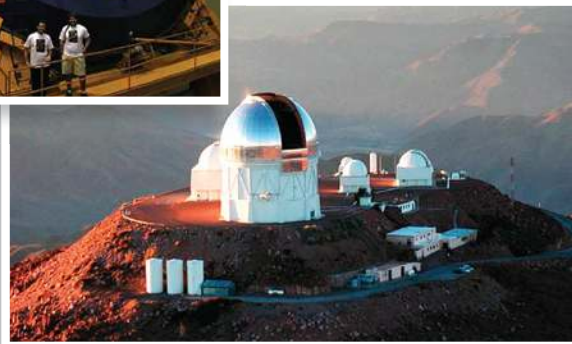
Por depender apenas da gravitação, o efeito de lente gravitacional é ideal para ‘pesar’ objetos astronômicos, independentemente de seu conteúdo luminoso. Por exemplo, a combinação entre observações da matéria visível e do efeito de lente gravitacional em galáxias e aglomerados fornece uma das evidências mais fortes sobre a presença de matéria escura, componente de natureza ainda misteriosa e responsável por um quarto da composição do universo – o restante do universo é formado por matéria ‘normal’ (5%) e energia escura (70%), esta última igualmente enigmática.

Outras aplicações das lentes gravitacionais: i) ao estudar propriedades das lentes, conseguimos determinar a estrutura de galáxias e aglomerados, algo fundamental para compreender a formação e a evolução desses objetos ao longo de história cósmica; ii) ao investigarmos as propriedades de fontes muito distantes, graças ao efeito de ‘telescópio gravitacional’, podemos entender a evolução das galáxias – por sinal, a observação de algumas das galáxias mais remotas conhecidas ocorreu devido à magnificação causada pelas lentes; iii) ao sondarmos a estrutura do universo em grandes escalas – por meio do efeito



FOTO LUCAS WERNICK

Figura 3. Abaixo, o Observatório Interamericano do Cerro Tololo (Chile). Ao lado, cúpula maior abriga o telescópio Blanco, com espelho de 4 m de diâmetro. Esse equipamento, instalado nos Andes, será utilizado pelo projeto Dark Energy Survey para mapear o céu, levando à descoberta de arcos gravitacionais



TIM ABBOTT/CIN

SIMULAÇÃO E BUSCA DE ARCOS

O autor é membro do projeto Dark Energy Survey (DES) por meio do grupo DES-Brazil. Com Elizabeth Buckley-Geer, do Laboratório Nacional Fermi (Estados Unidos), coordena o Grupo de Estudos de Efeito Forte de Lente Gravitacional do DES. Na área de lentes, o DES-Brazil desenvolve infraestrutura computacional para modelar, simular, identificar e caracterizar arcos gravitacionais em imagens. O grupo é responsável pelas simulações de arcos gravitacionais no DES.

Também coordena o projeto Sogras (sigla, em inglês, para Levantamento de Arcos Gravitacionais com o Soar), que utiliza tempo destinado a pesquisadores brasileiros no telescópio Soar (Telescópio de Pesquisa Astrofísica do Hemisfério Sul) para buscar arcos em aglomerados de galáxias, e tem a participação de pesquisadores e alunos do Brasil e dos Estados Unidos.

fraco de lente, uma das formas mais 'limpas' e diretas para fazer isso –, obtemos informações fundamentais para a cosmologia, como a abundância de energia escura; iv) ao medirmos a defasagem temporal entre imagens múltiplas, é possível determinar a taxa de expansão do universo; v) ao buscarmos, por meio do efeito de microlente gravitacional, planetas menos massivos e mais distantes de suas estrelas do que aqueles detectados por métodos mais tradicionais, ajudamos na procura desses corpos com características semelhantes às da Terra.

DA TERRA AO ESPAÇO

Apesar da vasta lista de descobertas e de aplicações na cosmologia e astrofísica, os fenômenos de lentes gravitacionais são difíceis de serem observados e, em muitos casos, raros. Para aumentar o número conhecido de arcos e imagens múltiplas, bem como permitir o mapeamento da distribuição de matéria em grandes escalas no universo, é necessário fazer imagens de alta resolução de vastas áreas do céu.

Isso é precisamente o que será feito por grandes projetos observacionais que entrarão brevemente em operação.

Um dos objetivos da colaboração internacional Dark Energy Survey (DES) é o estudo das lentes gravitacionais. Formada por instituições norte-americanas e consórcios do Reino Unido, da Espanha e do Brasil, o DES mapeará uma vasta área (cerca de 1/8 de toda a esfera celeste) com um telescópio de espelho de 4m de diâmetro, situado na cordilheira dos Andes, no Chile (figura 3). Para isso, está sendo desenvolvida uma câmera extremamente sensível e de grande cobertura angular, com 500 megapixels (uma câmera fotográfica profissional de boa qualidade tem cerca de 20 megapixels).

O DES colherá seus primeiros dados científicos a partir de 2012. Com eles, milhares de arcos gravitacionais podem ser descobertos.

Em um futuro mais distante, o LSST (sigla em inglês para Grande Telescópio para Levantamentos Sinópticos), também no Chile, irá mapear uma área ainda maior e em mais profundidade que o DES. Espera-se que esse instrumento leve à descoberta de dezenas de milhares de arcos e quasares múltiplos – já há grupos brasileiros interessados em participar do projeto (figura 4).

A etapa seguinte é observar as lentes a partir do espaço. Até agora, os estudos mais detalhados foram feitos com o telescópio espacial Hubble, que, no entanto, tem área muito pequena para mapear a estrutura em grande escala e descobrir uma quantidade significativa de arcos. Futuras sondas espaciais dedicadas à cosmologia, como a JDEM (sigla, em inglês, para Missão Conjunta para a Energia Escura), da Nasa (agência espacial norte-americana), e o Euclid, da ESA (agência espacial europeia), prometem combinação sem precedentes entre área coberta e resolução angular, levando à descoberta de centenas de milhares de arcos.

Uma nova era começou: a das aplicações das lentes gravitacionais em quase todas as escalas astrofísicas. ■

Sugestões para leitura

EINSENSTAEDT, J.; VIDEIRA, A. A. P. 'A prova cearense das teorias de Einstein'. *Ciência Hoje*, v. 20, n. 115 (1995).

Na internet:

DES-Brazil (em português): <http://www.des-brazil.org/>
LSST (em inglês): http://www.lsst.org/lsst/public/dark_matter

Lentes gravitacionais (em inglês): <http://gravitationallensing.pbworks.com/>

Semana de Matéria e Energia Escura (em português): <http://www.des-brazil.org/semana/>

SOGRAS (em português e inglês): <http://www.icra.cbpf.br/sogras>

Figura 4. Concepção artística do telescópio LSST

