

100 Anos de Lentes Gravitacionais

Ismael Tereno¹

¹ Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Edifício C8, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal
Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Tapada da Ajuda, 1349-018 Lisboa, Portugal
tereno@fc.ul.pt

Resumo

As observações astronómicas do eclipse de 29 de maio de 1919, de que se celebra o centenário, marcam a primeira observação do fenómeno de lentes gravitacionais. Desde então muitos avanços ocorreram quer na compreensão do fenómeno quer nas observações dos seus mais variados efeitos. As lentes gravitacionais são hoje em dia uma ferramenta poderosa e muito actual, com aplicações em todas as escalas astrofísicas, desde a detecção de exoplanetas, passando pela detecção directa de matéria escura e medição da massa de enxames de galáxias, até à determinação das propriedades da energia escura.

1783-1919: A ideia da deflexão da luz

Lentes gravitacionais é o nome que se dá ao fenómeno de deflexão de ondas electromagnéticas em campos gravíticos [1]. O princípio de equivalência entre gravidade e inércia permite compreender que a trajectória de uma partícula num campo gravítico seja independente da sua massa. Isto conduziu em finais do século XVIII à ideia de que também a luz (assumindo que poderia ser tratada como partícula) seria deflectida num campo gravítico. John Michell (1783), e também Laplace, mencionaram essa possibilidade e associaram-na ao que hoje chamamos de buraco negro, a possibilidade de deflexão extrema quando a velocidade de escape iguala a velocidade da luz. A primeira publicação conhecida do ângulo de deflexão de um raio luminoso ao passar no limbo do Sol é a de Soldner (1801), que calcula um valor de 0,85 segundos de arco, se bem que a demonstração mais correcta seja a de Cavendish na mesma época [2]. Mais de 100 anos mais tarde, em 1911, Einstein refaz o cálculo, agora no contexto da relatividade restrita. Introduzindo o princípio de equivalência na métrica de Minkowski, esta passa a incluir um factor perturbativo, Ψ , que é equivalente a um potencial gravítico,

$$ds^2 = - (1 + 2\Psi) dt^2 + dx^2. \quad (1)$$

Este potencial está associado à distribuição de matéria e determina também a deflexão da luz, permi-

tindo calcular um desvio no limbo do Sol de 0,87 segundos de arco. Mais tarde, em 1915, já no contexto da relatividade geral, Einstein repete o cálculo, mas agora a gravidade é também representada pela curvatura do espaço-tempo, o que introduz um novo factor perturbativo, Φ , na parte espacial da métrica

$$ds^2 = - (1 + 2\Psi) dt^2 + (1 + 2\Phi) dx^2. \quad (2)$$

A deflexão da luz, estando associada a geodésicas nulas, é determinada pela soma dos dois potenciais (que são idênticos em relatividade geral), enquanto que a distribuição da matéria continua a estar associada a apenas um deles (através da equação de Poisson). Sendo os dois potenciais idênticos, o cálculo da deflexão ganha um factor de dois e a previsão para a deflexão no limbo do Sol passa a ser de 1,75 segundos de arco. Estamos assim na situação ideal em que duas teorias (Newton e relatividade geral) dão duas previsões distintas para um mesmo fenómeno, possibilitando a sua distinção por meio de teste experimental. Mas como é possível observar a deflexão da luz emitida por uma estrela mais distante quando a sua trajectória passa junto ao Sol? Com efeito, nessa ocasião a estrela terá de estar numa posição no céu muito próxima do Sol, e portanto ofuscada por este. A solução é observar durante um eclipse total do Sol. O eclipse de 1919 fornecia boas condições para a observação, pois o Sol encontrava-se na direcção do enxame estelar aberto das Híades, que forneceria muitas fontes passíveis de sofrerem deflexão. A Royal Society preparou então uma expedição para observar o eclipse em dois pontos diferentes, a ilha de Príncipe, em território português, e Sobral no Ceará, Brasil. O objetivo, expresso no artigo original [3], era o de distinguir entre três cenários possíveis: gravitação de Newton, relatividade geral e a não ocorrência de deflexão. A expedição, como relatado em número anterior da Gazeta de Física [4], teve o apoio logístico do Observatório Astronómico de Lisboa (OAL), encontrando-se no arquivo do OAL a correspondência trocada com Eddington, bem como cópias de placas fotográficas utilizadas na análise por ele oferecidas ao OAL. Após comparação com a posição das estrelas em observações feitas algumas semanas mais tarde, os resultados finais de $1",6 \pm 0",30$ (Príncipe) e $1",9 \pm 0",12$ (Sobral) comprovaram a teoria da relatividade geral. Este resultado teve um grande impacto mas teve também os seus detractores, no entanto reanálises posteriores dos dados, bem

como novas medições, comprovaram os resultados [5]. Para além do grande sucesso no estabelecimento da teoria, as observações tiveram o importante efeito secundário de abrir um novo campo na astrofísica: as lentes gravitacionais.

1920 - 1962: Novos efeitos de Lentes Gravitacionais

O termo “lentes gravitacionais” é referido pela primeira vez num comentário de Oliver Lodge na revista *Nature*, na sequência dos resultados de Eddington [2]. O comentário é de certa forma negativo, dizendo que o campo gravítico do Sol não actua como uma lente, pois não tem uma distância focal. De facto, esta é uma característica fundamental das lentes gravitacionais, que contrariamente às lentes ópticas (tanto convergentes como divergentes) não definem um ponto focal, pois num feixe de raios de luz o que passa mais próximo do centro é o que é mais deflectido. Esta propriedade cria uma deflexão diferencial que produz imagens distorcidas de fontes extensas. O fenómeno das lentes gravitacionais é independente da luminosidade ou composição da lente e também não envolve emissão nem absorção de fotões, nem alterações na frequência. Estas duas últimas propriedades implicam a conservação de brilho, o que significa que se houver um efeito de aumento do tamanho da imagem, será acompanhado de um aumento de fluxo. Isto provoca um efeito de magnificação sem perda de resolução, que permite a utilização das lentes gravitacionais como telescópios naturais. Além da magnificação e distorção de imagens, outros efeitos observáveis são a alteração de posição e as imagens múltiplas.

Alguns destes efeitos, nomeadamente a possibilidade de imagens múltiplas e da magnificação tinham já em 1912 sido previstos por Einstein em registos num seu caderno de notas nunca publicados e só encontrados nos anos 1990 [6] ainda sem o famoso factor de dois. Nas décadas de 1920 e 1930, houve algumas publicações de novos efeitos de lentes gravitacionais, por vários autores, entre os quais Chwolson, Eddington, e F. Link [2]. Em 1936, Einstein publicou também, se bem que com relutância, os cálculos correctos para magnificação e a previsão de um novo efeito: o anel de Einstein, num artigo [7] que ironicamente é considerado o artigo fundador das lentes gravitacionais. Ironicamente, pois é um artigo pessimista, declarando que os efeitos não seriam observáveis, dado que os deslocamentos e magnificações previstos eram muito pequenos. No entanto chega ao resultado surpreendente de que a magnificação aumenta com a distância ao observador. Esta propriedade é na realidade o facto responsável pelo grande contributo que as lentes gravitacionais vieram a dar à astrofísica extragaláctica e à cosmologia. Essa possibilidade foi desde logo apontada em 1937 por Zwicky [8].

O fenómeno das lentes gravitacionais acontece num sistema composto de fonte, lente e observador e depende da derivada do campo gravítico da lente na direcção transversal ao da direcção de propagação da luz, (ou seja, da distribuição de massa da lente projectada no seu plano), das distâncias fonte-lente-observador e do alinhamento entre estes. As relações trigonométricas nesse sistema permitem escrever a equação da lente para uma fonte pontual situada em β (na aproximação de pequenas deflexões) como

$$D_f \theta = D_f \beta + D_{f_l} \alpha. \quad (3)$$

Daqui se vê que medindo a posição aparente na imagem (θ) e conhecendo a posição original (β), se pode constanger a massa da lente (que determina o campo gravítico contido no campo de deflexão α) de forma degenerada com as distâncias envolvidas no sistema. Inversamente, se a massa da lente for conhecida e o campo gravítico calculado teoricamente, as observações permitem estimar o campo gravítico e compará-lo com o cálculo teórico, testando assim a teoria da gravitação. No caso de fontes extensas, há uma equação da lente para cada ponto da imagem, o que dá lugar a uma matriz de transformação entre a fonte e a imagem, passando os observáveis a ser quantidades de deformação como a convergência, cisalhamento, rotação, ou flexão. Como se vê, os observáveis são deslocamentos de posições ou distorções de formas. Como é então possível detectar a variação se não conhecemos as posições ou formas originais? O caso da deflexão pelo Sol é um caso único em que foi possível “retirar a lente do caminho” para observar a posição original e a modificada. Esta dificuldade, juntamente com a necessidade de avanços tecnológicos que permitissem observar sistemas extragalácticos, foram algumas das razões para a estagnação desta área durante três décadas.

1963 - 1999: O renascimento das Lentes Gravitacionais

A primeira detecção de um quasar em 1963 por M. Schmidt [9] apresentou o candidato ideal para fonte de lentes gravitacionais: um objecto muito distante, luminoso e compacto. Na mesma época a teoria moderna de lentes gravitacionais foi formulada de forma independente por vários autores (por exemplo [10]) focando fenómenos distintos. No entanto passaram ainda vários anos até à primeira descoberta de um sistema de lentes gravitacionais, feita em 1979 [11]. Tratou-se da imagem dupla de um quasar a *redshift* $z=1,40$, alinhado com uma galáxia lente a $z=0,36$. A separação entre as duas imagens era de $5'',7$. Actualmente conhecem-se cerca de 200 sistemas múltiplos de quasars, dos quais cerca de 45 têm três ou mais imagens múltiplas, descobertos tanto no óptico e infravermelho como no rádio. Este número tem aumentado rapidamente nos últimos anos com a aplicação de métodos de aprendizagem automática em catálogos da missão espacial Gaia [12]. Poucos anos depois, em 1986, detectou-se o primeiro sistema de lentes gravitacionais com uma fonte extensa em que a lente era um enxame de galáxias. A complexidade da lente actuando sobre a luz de várias galáxias de fundo produz imagens espectaculares que podem ter centenas de elementos, como arcos gigantes (imagens altamente distorcidas das galáxias fonte) dispostos tangencialmente ao longo de um anel de Einstein, e pequenos arcos. Só com análise espectroscópica foi possível confirmar que as estranhas formas eram imagens de uma galáxia a $z=0,724$ distorcidas pelo enxame Abell 370 a *redshift* $z=0,374$ [13].

Estes são apenas dois dos vários tipos de lentes gra-

vitacionais existentes. Os diversos tipos distinguem-se pelas características da fonte (compacta ou extensa), da lente (compacta, extensa ou difusa) e da escala (as distâncias envolvidas no sistema). Os efeitos classificam-se ainda em fortes e fracos, conforme ocorram em zonas da imagem onde o campo de deflexão seja forte ou fraco. Consideremos de seguida os principais tipos e suas aplicações [14].

Fonte compacta: É o caso observado no eclipse do Sol (estrela-estrela) e o do sistema quasar-galáxia e produz efeitos fortes. Quanto ocorrem imagens múltiplas, as suas posições dão informação suficiente para determinar a deflexão e a massa da lente, sem ser necessário conhecer a posição da fonte. Estas observações permitem determinar não só a massa total da galáxia lente mas também a distribuição espacial da sua massa, nomeadamente o perfil de densidade do seu halo de matéria escura. Se o potencial gravítico variar ao longo da direcção de propagação (e não apenas na direcção ortogonal), então as imagens múltiplas formam-se em instantes diferentes. Este “atraso no tempo” pode ser detectado em imagens de quasares variáveis e pode ser da ordem de dezenas de dias. A sua medição permite estudar a geometria do espaço-tempo, nomeadamente determinar a constante de Hubble. Além dos desvios espaciais, as imagens múltiplas têm também fluxos diferentes do fluxo original (há uma magnificação). Em sistemas de pequenas escala (estrela-estrela) não se conseguem resolver as potenciais imagens múltiplas. Nesses casos de efeito forte em pequena escala (chamados microlentes), a magnificação é o único observável. Naturalmente, que a variação de fluxo não é conhecida se não se conhecer o fluxo original da fonte, no entanto este efeito é útil em sistemas temporários. Por exemplo quando uma estrela próxima passa em frente a uma estrela mais distante, formando temporariamente um sistema de lente gravitacional, há uma magnificação da estrela fonte. Este método é utilizado para detectar objectos difíceis de ver directamente como anãs brancas, buracos negros, ou planetas.

Lente extensa: O exemplo mais estudado de lente extensa é o enxame de galáxias. Na parte central da imagem estão os efeitos fortes, como os arcos gigantes tangenciais e imagens múltiplas. Longe de centro é o regime das lentes fracas em que se vêem imagens de galáxias fonte apenas ligeiramente distorcidas. As posições, fluxos e formas dos diversos elementos permitem constranger modelos complicados da distribuição de massa do enxame, incluindo perfil do halo de matéria escura com subestrutura, e a determinação da massa total do enxame. Um resultado famoso é o do enxame bala em 2006 [15], em que a observação dos efeitos de lentes gravitacionais de dois enxames que tinham colidido e “passado um pelo outro como uma bala”, levou à descoberta de que as suas concentrações de massa não estavam localizadas sobre o gás intra-enxame (detectado pela sua emissão em raio-X). Nesta altura sabia-se já há muito que a massa total dos enxames de galáxias era muito superior à

massa associada às suas galáxias e ao gás intra-enxame, mas este resultado, ao mostrar pela primeira vez que o essencial da massa estava localizado noutra região, fortaleceu a evidência para a matéria escura.

2000 - 2019: Lentes Gravitacionais cosmológicas

No século XXI, com o advento de grandes levantamentos do céu para estudos cosmológicos começou a ser possível detectar sistemas de lentes gravitacionais de muito baixa razão sinal-ruído, só possíveis de detectar de forma estatística. O primeiro destes casos foi o sistema galáxia-galáxia em que tanto a fonte como a lente são objectos extensos. A galáxia fonte sofre uma distorção fraca impossível de detectar individualmente. No entanto, adicionando o sinal de muitos pares, consegue-se calcular com melhor precisão a distorção média de todas as galáxias fonte em função da separação angular à respectiva galáxia lente. Consegue-se assim detectar de forma estatística um alinhamento tangencial das imagens das galáxias que diminui com a separação angular. Este resultados são utilizados para calcular as propriedades estatísticas da densidade de matéria escura em galáxias. Mas o sistema mais relevante para a cosmologia e que concentra actualmente grandes esforços quer no desenvolvimento teórico quer no observacional é o sistema da lente difusa. A lente difusa vai para além da lente extensa, consistindo na estrutura de grande escala do Universo, ou seja, em todas as inhomogeneidades ao longo da linha de visão entre a fonte e o observador. Estas inhomogeneidades são essencialmente a estrutura de grande escala de matéria escura. As fontes utilizadas são galáxias distantes distribuídas num grande ângulo sólido, ou até a radiação cósmica de fundo (CMB). O primeiro caso é conhecido como *cosmic shear*, ou seja cisalhamento cósmico porque o efeito principal sobre a fonte é o de uma fraca distorção de cisalhamento. O segundo caso é o das lentes gravitacionais CMB e provoca uma ligeira redistribuição das temperaturas da radiação de fundo no mapa do CMB observado.

Para detectar o efeito de lentes fracas conhecido como *cosmic shear* é necessário medir a forma das galáxias fonte com grande precisão. Estas galáxias são muito pequenas na imagem (ocupando muito poucos pixels) e estão sujeitas a distorções produzidas pela própria óptica do instrumento e pela atmosfera. Após cuidadosas correcções tenta-se então detectar uma distorção de origem cosmológica. Esta distorção remanescente é muito pequena, da ordem de 1 %. Isto significa (dando um exemplo pouco realista) que uma galáxia que fosse originalmente circular ganharia uma ligeira elipticidade com excentricidade de apenas 0,01. Naturalmente que não se conhece a forma original das galáxias, de modo que para detectar a distorção se procuram correlações entre os alinhamentos das galáxias. Estando as galáxias aleatoriamente orientadas na origem, a detecção de qualquer alinhamento (após remoção dos contaminantes) é indicação da distorção gravitacional. Tal alinhamento foi detectado pela primeira vez no ano 2000 de forma independente por quatro equipas [16], que analisaram diferentes regiões do céu, todas elas relativamente vazias, ou seja, sem a presença de lentes extragalácticas óbvias como enxames de galáxias ou grandes galáxias a baixo *redshift*. Estes resultados são considerados a primeira detecção directa da estrutura cosmológica invisível de matéria escura. Desde então o fenómeno foi detectado várias vezes, em áreas do céu de

diferentes tamanhos e em diferentes comprimentos de onda, sendo as medições mais precisas e exactas as recentemente obtidas pelos rastreios KiDS [17] e DES [18], que observaram cerca de 1000 graus quadrados do céu.

A utilização de fontes a diferentes distâncias permite fazer o mapeamento da matéria escura em diferentes épocas, isto é, estudar a evolução temporal da estrutura do Universo. Esta evolução depende da expansão do Universo e em particular dos detalhes da sua aceleração (descoberta em 1999 através das famosas observações de supernovas [19]) que pode ser explicada pela presença de uma energia de natureza desconhecida: a energia escura. Além disso, como referimos na equação (2), o efeito de lentes gravitacionais depende da soma dos dois potenciais da métrica, enquanto que a distribuição de matéria está associada a apenas um deles. Deste modo, a combinação desses dois observáveis permite constranger separadamente os dois potenciais e testar a relatividade geral. O mapeamento da matéria escura em grande escala e a sua utilização para investigar a energia escura e para testar o comportamento da gravidade em escalas cosmológicas é o objectivo da missão espacial Euclid [20] do programa “Cosmic Vision” da agência espacial europeia. Esta missão, com lançamento previsto para 2022, está neste momento a ser preparada por um consórcio de mais de um milhão de pessoas. O telescópio espacial irá observar 15 000 graus quadrados do céu, ou seja todo o céu extragaláctico não contaminado pela nossa galáxia, no visível e no infravermelho próximo, prevendo-se a detecção de 2 000 000 000 de galáxias fonte com *redshifts* até $z=4$. O telescópio Euclid vai ainda combinar as observações de *cosmic shear* com as da distribuição das galáxias a grande escala, que vai também efectuar, para testar a relatividade geral. Como efeito colateral o rastreio Euclid vai ainda revolucionar o número de lentes gravitacionais conhecidas, estimando-se que o número de sistemas de lentes múltiplas conhecidas passará das actuais 200 para 200 000.

Conclusão

As lentes gravitacionais, presentes em todo o Universo, das menores às maiores escalas, voltam a estar na ordem do dia. Em 1919, há 100 anos atrás, a detecção do seu efeito mais simples testou a teoria da gravitação, permitindo comprovar a teoria da relatividade geral à escala do sistema solar. Em 2019, o consórcio Euclid prepara a detecção de um dos seus efeitos mais complexos para mais uma vez testar a teoria da gravitação, procurando indícios que comprovem ou conduzam a modificações da teoria da relatividade geral à escala cosmológica.

Referências

- [1] P. Schneider, J. Ehlers, E. E. Falco, “Gravitational Lenses”, Springer, New York (1999)
- [2] D. Valls-Gabaud, “The conceptual origins of gravitational lensing”, em “Albert Einstein Century International Conference”, AIP Conference Proceedings, vol. 861, p. 1163 (2006)
- [3] F.W. Dyson, A.S. Eddington, C. Davidson, “A determination of the deflection of light by the Sun’s gravitational field, from observations made at the total eclipse of May 29, 1919”, Phil. Trans. Roy. Soc., A220, 291 (1920)
- [4] P. Crawford, A. Simões, “O eclipse de 29 de Maio de 1919: A.S. Eddington e os astrónomos do Observatório da Tapada”, Gazeta de Física, vol. 32 nº 2/3, p. 22 (2009)
- [5] D. Kennefick, “Testing relativity from the 1919 eclipse – a question of bias”, Physics Today, 62, p. 37 (2009)

- [6] J. Renn, T. Sauer, J. Stachel, “The Origin of Gravitational Lensing: A Postscript to Einstein’s 1936 Science Paper”, Science, 275, p. 184 (1997)
- [7] A. Einstein, “Lens-like action of a star by the deviation of light in the gravitational field”, Science, 84, p. 506 (1936)
- [8] F. Zwicky, “On the Probability of Detecting Nebulae Which Act as Gravitational Lenses”, Phys. Rev. 51, p. 679 (1937)
- [9] M. Schmidt, “3C 273: A Star-Like Object with Large Red-Shift”, Nature, 197, p. 1040 (1963)
- [10] S. Refsdal, “The gravitational lens effect”, MNRAS, 128, p. 295 (1964)
- [11] D. Walsh, R. F. Carswell, R. J. Weymann, “0957 + 561 A, B - Twin quasistellar objects or gravitational lens”, Nature, 279, p. 381 (1979)
- [12] L. Delchambre, A. Krone-Martins, O. Wertz et al, “Gaia GRaL: Gaia DR2 Gravitational Lens Systems. III. A systematic blind search for new lensed systems”, A&A, 622, A165 (2019)
- [13] G. Soucail, Y. Mellier, B. Fort et al, “The giant arc in A 370 - Spectroscopic evidence for gravitational lensing from a source at $Z = 0.724$ ”, A&A, 191, L19 (1988)
- [14] S. Dodelson, “Gravitational Lensing”, CUP, Cambridge (2017)
- [15] D. Clowe, M. Bradac, A. H. Gonzalez et al, “A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter”, ApJ, 648, L109 (2006)
- [16] L. van Waerbeke, Y. Mellier, T. Erben et al, “Detection of correlated galaxy ellipticities from CFHT data: first evidence for gravitational lensing by large-scale structures”, A&A, 358, p.30 (2000); D. M. Wittman, J. A. Tyson, D. Kirkman, “Detection of weak gravitational lensing distortions of distant galaxies by cosmic dark matter at large scales”, Nature, 405, p.143 (2000); D. J. Bacon, A. R. Refregier, R. S. Ellis, “Detection of weak gravitational lensing by large-scale structure”, MNRAS, 318, p. 625 (2000); N. Kaiser, G. Wilson, G. A. Luppino, “Large-Scale Cosmic Shear Measurements” (<https://arxiv.org/abs/astro-ph/0003338>) (2000)
- [17] H. Hildebrandt, M. Viola, C. Heymans, “KiDS-450: cosmological parameter constraints from tomographic weak gravitational lensing”, MNRAS, 465, p. 1454 (2017)
- [18] T. M. C. Abbott, T. F. Eifler et al, “Dark Energy Survey year 1 results: Cosmological constraints from galaxy clustering and weak lensing”, Phys Rev D, 98, 043526 (2018)
- [19] S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber et al, “Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae”, ApJ, 517, p. 565 (1999); A. G. Riess, R. P. Rirschner, B. P. Schmidt, “BVRI Light Curves for 22 Type IA Supernovae”, Astronomical Journal, 117, p. 707 (1999)
- [20] R. Laureijs, J. Amiaux, S. Arduini et al, “Euclid Definition Study Report”, (<https://arxiv.org/abs/1110.3193>) (2011)



Ismael Tereno, é investigador no Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço e leciona na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Fez trabalho de doutoramento no Instituto de Astrofísica de Paris, numa das equipas que obteve a primeira detecção do efeito de lentes gravitacionais em sistemas cosmológicos. É atualmente um dos investigadores responsáveis em Portugal pela missão espacial Euclid.