



100 anos depois

EXPOSIÇÃO

16 MAIO - 8 SETEMBRO 2019

MUSEU NACIONAL DE HISTÓRIA NATURAL
E DA CIÊNCIA

Número especial dedicado à exposição
E3 - Einstein Eddington e o Eclipse

Editores: AUGUSTO FITAS, PAULO CRAWFORD
e JOSÉ SANDE LEMOS

Índice

I Editorial

- artigo geral
4 **O eclipse de 29 de maio de 1919 e a teoria da relatividade.** Um Encontro Improvável
Ana Simões
- artigo geral
8 **Einstein e Eddington** antes e depois do Eclipse total do Sol de 1919
Paulo Crawford
- artigo geral
13 **Henrique Morize** e a astronomia no Brasil
António Augusto Passos Videira
- artigo geral
17 **Frederico Oom** e a promoção da **Astronomia em Portugal**
Luís Miguel Carolino
- artigo geral
21 **Em Busca do Sol:** expedições astronômicas para observação de eclipses totais do Sol no Brasil (1858-1919)
Christine Helena Barboza
- artigo geral
26 **Eclipses totais do Sol em Portugal:** de 1900 a 1919
Luís Tirapicos
- artigo geral
30 **A pedra fundamental de um legado no Príncipe,** 100 anos depois
Joana Latas
- artigo geral
32 **O Eclipse Solar de 1919** e as atividades comemorativas no Brasil
Ildeu de Castro Moreira
- artigo geral
36 **Einstein e Eddington** e as consequências da relatividade geral: Buracos negros e ondas gravitacionais
José P. S. Lemos, Carlos A. R. Herdeiro, Vítor Cardoso
- artigo geral
43 **100 Anos** de Lentes Gravitacionais
Ismael Tereno
- artigo geral
47 **O Universo Dinâmico**
A visão Cosmológica
José Pedro Mimoso, Nelson J. Nunes
- artigo geral
52 **Artigos sobre Teoria da Relatividade e Eclipses** publicados na Gazeta de Física
Augusto Fitas

Ficha Técnica

Estatuto Editorial

<http://www.spf.pt/gazeta/editorial>

Propriedade | Sede | Redacção

Sociedade Portuguesa de Física
Av. da República, 45 – 3º Esq.
1050-187 Lisboa
Telefone: 217 993 665

Director

Bernardo Almeida

Editores convidados

Augusto Fitas, Paulo Crawford e José Sande Lemos

Editores

Filipe Moura
Francisco Macedo
Nuno Peres
Olivier Pellegrino

Secretariado

Maria José Couceiro - mjose@spf.pt

Comissão Editorial

Conceição Abreu - Presidente da SPF
Gonçalo Figueira - Anterior Diretor Editorial
Teresa Peña - Anterior Diretor Editorial
Carlos Fiolhais - Anterior Diretor Editorial
Ana Luísa Silva - Física Atómica e Molecular
Ana Rita Figueira - Física Médica
Augusto Fitas - Grupo História da Física
Carlos Portela - Educação
Carlos Silva - Física dos Plasmas
Constança Providência - Física Nuclear
Joaquim Moreira - Física da Matéria Condensada
José Marques - Física Atómica e Molecular
Luís Matias - Geofísica, Oceanografia e Meteorologia
Manuel Marques - Óptica e Laser, Universidade do Nuno Castro - Física Partículas
Rui Agostinho - Astronomia e Astrofísica
Sofia Andringa - Física Partículas

Correspondentes

André Pereira - Delegação Norte
Fernando Amaro - Delegação Centro
José Marques - Delegação Sul e Ilhas

Design / Produção Gráfica

Fid'algo - Print Graphic Design Lda.
Rua da Nau Catrineta, nº 14, 2º Dto. | 1990-186 Lisboa

NIPC 501094628

Registo ICS 110856

ISSN 0396-3561

Depósito Legal 51419/91

Tiragem 5 000 Ex.

Publicação Trimestral

As opiniões dos autores não representam necessariamente posições da SPF.

Preço N.º Avulso 5,00€ (inclui I.V.A.)

Assinatura Anual 15,00€ (inclui I.V.A.)

Assinaturas Grátis aos Sócios da SPF.

Comemora-se no dia 29 de maio de 2019 o centenário das observações astronómicas efectuadas durante o eclipse solar, desse mesmo dia de há cem anos, e que confirmariam o valor de uma das conclusões da Teoria da Relatividade Geral, formulada por Albert Einstein três anos e meio antes: o desvio do raio luminoso provocado por um corpo de grande massa gravitacional. Exalta-se, na efeméride deste importante acontecimento científico, a confirmação de uma teoria que abrirá novas perspectivas sobre o conhecimento do Universo. Assinalar esta observação astronómica, a forma como foi alcançada e as suas consequências, enquanto marco determinante na marcha do conhecimento científico, é o propósito da edição deste número especial da *Gazeta de Física*.

Dois anos antes, em 1917, Frederico Oom escrevia, num artigo sobre a qualidade de observação do futuro eclipse na Ilha do Príncipe, “(...) é provável que essa formosa ilha seja escolhida, como estação adequada, por muitos dos astrónomos que a esses fenómenos especialmente consagram a sua atenção, e que não deixarão perder esta nova e relativamente rara oportunidade de utilizar os seus aparelhos e inventos já experimentados, ou de ensaiar outros novos.” As palavras são reveladoras do interesse efectivo na observação do fenómeno; não sabemos se o astrónomo do Observatório Astronómico de Lisboa se entusiasmava com as novas possibilidades de estudo astrofísico da coroa solar ou com o desvio de um raio luminoso pela massa gravitacional do Sol. Nesse ano de dezassete, com uma Europa mergulhada em guerra, Arthur Eddington tinha já começado a interessar-se pelos problemas levantados pela teoria de Einstein, e com o apoio de Frank Dyson, o astrónomo real, em março desse ano alertara os astrónomos ingleses para a potencial importância do eclipse de dezanove. Talvez por aqui se tenha iniciado o desenho das expedições para um olhar fotográfico e longínquo do futuro ofuscamento do Sol a 29 de maio de 1919.

E é sobre o contexto deste encontro entre os trabalhos do professor de Cambridge e o de Berlim (ambos opositores à carnificina desencadeada pelos impérios europeus) que versa o texto, ***O eclipse de 29 de maio de 1919 e a teoria da relatividade. Um Encontro Improvável***, destacam-se os esforços do segundo em cativar os astrónomos para uma observação crucial, o que é contado em ***Einstein e Eddington, antes e depois do Eclipse total do Sol de 1919***.

As observações ocorrerão na cidade de Sobral no Ceará (Brasil) e na Ilha do Príncipe (território africano sob administração colonial portuguesa). Da prática da observação astronómica e astrofísica dos eclipses nos dois países dão conta os artigos, ***Observações de eclipses solares totais no Brasil e Eclipses totais do Sol em Portugal: de 1900 a 1919***. Enquanto actores de primeiro plano na construção e formação da astronomia no Brasil e em Portugal, desenha-se percurso científico de dois astrónomos: ***Morize e a promoção da astronomia em Brasil*** e ***F. Oom e a promoção da astronomia em Portugal***, o primeiro acompanhará a expedição inglesa no Sobral, o segundo não se deslocará à Ilha do Príncipe, mas assegurará o acolhimento adequado à expedição de Eddington. São estes dois territórios de língua portuguesa que foram o palco deste importante acontecimento científico e que agora fazem desta efeméride uma bandeira importante da afirmação da sua cultura científica, é o que se descreve em ***A pedra fundamental de um legado no Príncipe, 100 anos depois*** e ***O Eclipse Solar de 1919 e as atividades comemorativas no Brasil***.

Todos estes resultados observacionais de que neste ano se cumpre a efeméride secular foram publicamente interpretados numa reunião conjunta da *Royal Astronomical Society* e da *Royal Society* no dia 6 de novembro de 1919, presidida pelo o descobridor do electrão e criador do primeiro modelo atómico da matéria, J. J. Thompson, confirmando os resultados previstos pela Teoria da Relatividade Geral, isto é, apelando à aceitação da própria teoria. E, na manhã seguinte, o diário londrino THE TIMES proclamava: ***Revolução na Ciência - Nova Teoria do Universo - As Ideias Newtonianas derrubadas***.

Entre a formulação da Teoria e a sua confirmação medeiam três anos e meio, entre esta última e os dias de hoje há um intervalo de cem anos. O tempo necessário para assistir à marcha do conhecimento científico entre o desvio do raio luminoso de uma estrela de 1,74 *segundo de arco* até ao mergulho desse mesmo raio num poço imenso ou, o que é equivalente, à captação da luz de um estrela por um buraco negro (o que foi agora fotografado pelo EHT, *Event Horizon Telescope*), assunto tratado em ***Einstein e Eddington e as consequências da relatividade geral: Buracos negros e ondas gravitacionais***. O desvio do raio luminoso determinado em 1919 é um fenómeno semelhante (a outra escala) à realidade quotidiana vista pelas lentes dos óculos comuns de um qualquer observador, é o que se pode apelar de uma lente gravitacional, instrumento fundamental na observação, detecção e estudo dos corpos distantes do Universo, tema que é glosado em ***100 anos de Lentes Gravitacionais***. A Relatividade Geral ou uma nova teoria da Gravitação teria que interessar o seu autor na reflexão de uma nova concepção do Universo, e foi o que fez ao concebê-lo inicialmente como estático, igual e fiel a si próprio no espaço e no tempo. Contudo, as descobertas astronómicas feitas ainda na primeira metade do século XX mostraram que o comportamento do Universo era bem outro: expandia-se e, contrariamente à visão estática, mostrava-se dinâmico. Se a nova teoria explicava a precessão do periélio da órbita de Mercúrio, os avanços da instrumentação e observação permitem-lhe hoje, e agora, estar apta a dar novas respostas a uma visão geral do Cosmos, é o que se expõe n' ***O Universo dinâmico***.

Por um feliz acaso, o dia 6 de novembro de 1919, dia do veredicto da *Royal Society* sobre o desvio do raio luminoso provocado por um corpo de grande massa gravitacional, acontecimento premonitório das grandes descobertas que estão a acontecer, foi também o dia do nascimento da poeta Sophia de Mello Breyner Andreson que escreveu,

***Sinto que hoje novamente embarco
Para as grandes aventuras,
Passam no ar palavras obscuras
E o meu desejo canta - por isso marco
Nos meus sentidos a imagem desta hora.***

Uma última nota: um agradecimento muito particular a todos os autores, e demais participantes neste número especial, pela disponibilidade manifestada em, num curto intervalo de tempo, apresentarem a sua colaboração.

Os editores

Augusto Fitas, Paulo Crawford, José Sande e Lemos.



Carta de Sir Arthur Eddington de 4 de maio de 1919, a partir do Príncipe, na expectativa de observação do eclipse que se avizinha e das suas consequências.

Rec^d
1919 Jun. 7

Rosa Sundry
Príncipe
May 4.

Dear Dr Gorn

We were very glad to receive your telegram in reply to my letter. We came out on the 'Portugal' arriving April 23.

We are being most kindly entertained by Mr Carneiro; and have everything we could possibly desire. Everyone has received us most kindly, and has given us every assistance. All we need now is a fine day for the eclipse.

This is a beautiful island, and besides making good progress with our work we are thoroughly enjoying our experiences.

With many thanks for your assistance and with kind regards,

Yours sincerely

A. Eddington

O eclipse de 29 de maio de 1919 e a teoria da relatividade. Um Encontro Improvável

Ana Simões¹

¹Centro Interuniversitário de História das Ciências e Tecnologia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

Resumo

Este artigo discute o encontro improvável entre o físico Albert Einstein (1879-1955) e o astrónomo Arthur Stanley Eddington (1882-1944) que conduziu à verificação do encurvamento dos raios luminosos ao passarem junto de grandes massas gravitacionais, como o Sol, previsto pela então recente teoria da relatividade geral (TRG) de Einstein. O teste foi realizado no decurso do eclipse solar total de 29 de maio de 1919, por duas expedições britânicas, no Sobral, Brasil e na ilha do Príncipe. O artigo analisa ainda os ingredientes religiosos da opção de Eddington e especula sobre os motivos que presidiram à divisão dos expedicionários pelos dois locais de observação.

Um eclipse singular

O eclipse solar total de 29 de maio de 1919 foi excepcional por vários motivos, científicos, políticos, sociais e até religiosos. Foi um eclipse longo (pouco mais de 5 minutos de totalidade); o Sol tinha como fundo a constelação Touro, na qual se situava o aglomerado das Híadas, rico em estrelas brilhantes; os preparativos iniciaram-se e decorreram num período de enorme distúrbio da ordem internacional, em plena Grande Guerra; e os locais previamente selecionados pelos especialistas situavam-se nos trópicos, em regiões longínquas e desconhecidas da maioria dos astrónomos – a cidade de Sobral, no Ceará, Brasil, e a ilha equatorial do Príncipe, situada no Golfo da Guiné na costa africana, então colónia portuguesa, actualmente parte da República de S. Tomé e Príncipe. Adicionalmente, duas equipas britânicas, e não uma, como seria de esperar dado o esforço material, científico e financeiro envolvido, acentuado pelo contexto bélico desfavorável, fizeram observações com propósitos astronómicos invulgares.

Expedições britânicas e relatividade

Entre as equipas de astrónomos, oriundas de três países – Reino Unido, Estados Unidos da América e Brasil – que observaram o eclipse de 29 de maio de 1919, as equipas britânicas tinham objectivos desconhecidos da maioria dos astrónomos. Então a observação de um eclipse solar total era realizada no contexto da astronomia de posição, em particular com o objectivo de determinar rigorosamente

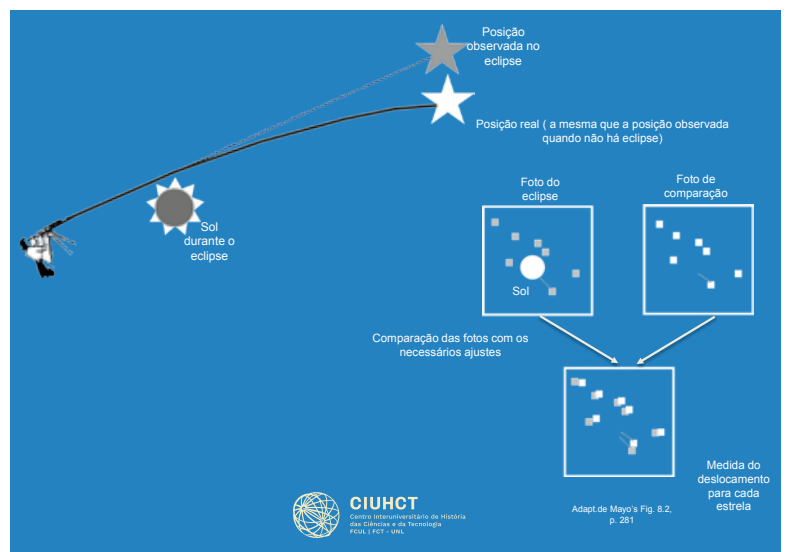


Fig. 1 - Diagrama que ilustra a medição do encurvamento da luz, por acção da gravidade, ao passar junto do Sol, de acordo com a previsão de Einstein. Esta medição fez-se por comparação de fotografias tiradas ao fundo de estrelas durante o eclipse solar total de 29 de maio de 1919, quando os raios luminosos que emitem sofrem encurvamento ao passarem junto do Sol e, meses mais tarde, quando o Sol não se encontra entre elas e o observador e, portanto, a trajectória dos raios luminosos já não sofre encurvamento. A comparação das fotografias tiradas nestas duas situações permite medir o desvio entre as posições reais das estrelas e as posições aparentes (registadas durante o eclipse quando existe encurvamento) e determinar se esse valor corresponde ao previsto por Einstein. Adaptação de Deborah G. Mayo, *Error and the growth of experimental knowledge*, 1996, p.278 e p.281 por José Avelãs Nunes

os segundos e terceiros contactos, que definem o intervalo em que a Lua tapa completamente o Sol, ou no da mais recente astrofísica, visando a observação da coroa solar e o esclarecimento da sua composição física e química ou, finalmente, nas observações de efeitos magnéticos atmosféricos inusitados associados à totalidade. Estes dois últimos eram os objectivos das equipas brasileira e americana, respectivamente. As equipas britânicas pretendiam verificar uma consequência astronómica insólita da teoria física recente da gravitação de Einstein, então conhecido de um círculo ainda restrito de cientistas. Chefiadas por Eddington, o jovem astrofísico de Cambridge, as equipas britânicas tinham dois observadores cada. A que se dirigiu à ilha do Príncipe,

incluía para além de Eddington o especialista em relojoaria e calculador Edwin Turner Cottingham (1869-1940) e a que se dirigiu a Sobral, incluía Charles Rundle Davidson (1875-1970) e Andrew Claude de la Cherois Crommelin (1865-1939), experientes astrónomos do Observatório Real de Greenwich.

A realização destas expedições ficou a dever-se à persistência e visão do astrónomo real britânico, Sir Frank Watson Dyson (1868-1939) que, auxiliado por Eddington, convenceu autoridades científicas e governamentais da sua importância. O valor do encurvamento (1,75 segundos de arco) previsto pela teoria final de Einstein, anunciada em 1915 e publicada em 1916, era duplo do baseado na teoria clássica de Newton, aceitando-se uma natureza corpuscular para a luz. Dyson apadrinhou esta iniciativa apesar de estar em risco que Newton, o expoente da ciência britânica, viesse a ser destronado por um físico de um país com o qual o Reino Unido estava em guerra, num palco excepcionalmente mortífero decorrente do uso inovador de gás mostarda produzido pela ciência alemã.



Fig. 2 - O astrofísico A.S. Eddington. Créditos: Smithsonian Institution@Flickr Commons

Um encontro improvável

Se o astrónomo Eddington não é conhecido do público leigo, Einstein é, há muito, um dos cientistas mais famosos do mundo, várias vezes capa de revistas, tal como a *Time*, e amiúde escolhido como personalidade do século XX. Contudo, na altura do eclipse de 1919, Einstein não gozava ainda do protagonismo que adquiriu precisamente após o anúncio dos resultados das expedições britânicas, a 6 de novembro, numa reunião conjunta das prestigiadas *Royal Society of London* e *Royal Astronomical Society*. Assim, o leitor de hoje não pode transportar para o passado o seu conhecimento da importância, e até da celebridade, destes dois cientistas e deve questionar-se sobre as razões do interesse do jovem Eddington pela teoria da relatividade de Einstein, ao ponto de se envolver na organização de duas

expedições aos trópicos numa altura em que a comunidade científica britânica, em que se incluíam as grandes figuras da física de Cambridge, reagia tímida ou negativamente à teoria da relatividade, e em que as observações de eclipses solares tinham fundamentalmente objetivos astrofísicos. Como sempre acontece no domínio da história, a explicação envolve uma confluência de vários factores, neste caso de cariz tanto astronómico como religioso, apimentados por algumas contingências felizes.

No enalço da generalização da teoria da relatividade restrita (TRR), Einstein, que trabalhava nela desde 1907, percebeu que qualquer teoria que acomodasse a gravitação devia prever um facto astronómico surpreendente – o encurvamento dos raios luminosos rasantes a grandes massas gravitacionais – e fê-lo logo em 1911, anos antes de chegar à formulação final, altura em que acrescentou à previsão do encurvamento, outras duas previsões astronómicas. Entre elas encontrava-se a explicação da anomalia do movimento de Mercúrio, já conhecida desde meados do século XIX. Com efeito, o retumbante sucesso do astrónomo francês Urban Le Verrier (1811-1877) em prever a existência de Neptuno, o primeiro planeta transurânico a ser identificado através das perturbações causadas no movimento de Urano, levou-o a conjecturar sobre a existência de Vulcano, um pequeno planeta situado entre o Sol e Mercúrio, que seria responsável pelas irregularidades da órbita de Mercúrio. Contudo, se a confirmação da existência de Neptuno constituiu um retumbante sucesso da teoria da gravitação newtoniana, já a busca de Vulcano se revelou um enorme fracasso.

Entre os astrónomos que tentaram detectar Vulcano, por ocasião da ocorrência de eclipses solares totais, encontrava-se o astrónomo americano Charles Dillon Perrine (1867-1951), a partir de 1909 director do Observatório de Córdoba, na Argentina. Foi através do astrónomo Erwin Finlay Freundlich (1885-1964), amigo de Einstein e um dos poucos conhecedores das previsões astronómicas da TRG desde 1911, ao ponto de as tentar testar, que Perrine ouviu falar na possibilidade desta explicar a precessão de Mercúrio. Atribuiu-lhe imediatamente enorme crédito e dispôs-se a liderar a primeira expedição para testar o encurvamento, durante o eclipse solar total de 10 de outubro de 1912, na localidade de Cristina, Brasil. Freundlich voltou a desafiar Perrine, em 1914, por ocasião de mais um eclipse solar. Por indisponibilidade de Perrine, foi o próprio Freundlich que chefiou a expedição à Crimeia, apoiada financeiramente por Einstein.

O tempo enublado e chuvoso foi o responsável pelo fracasso da observação do eclipse solar de 1912, pela equipa liderada por Perrine. Mas a este grande contratempo juntou-se uma coincidência feliz. No Rio de Janeiro, Perrine tinha-se encontrado com Eddington, que integrava a expedição britânica que ia fazer observações em Passa Quatro, junto da equipa brasileira. Este encontro fortuito, relatado em carta à mãe, de 26 de setembro, pode estar na origem do primeiro contacto de Eddington com a previsão do encurvamento da TRG.

Quanto ao envolvimento de Eddington com a TRR, conhecida no meio estudioso de Cambridge, imerso nas questões do éter e, por isso, pouco sensível a ela, sabemos que no início de 1915, ainda antes de Einstein completar a TRG, Eddington

publicou um artigo em que denotava familiaridade com a TRR e referia ainda a previsão do encurvamento obtida no contexto das tentativas da sua generalização. Era então Plumian Professor of Astronomy and Experimental Philosophy e director do Observatório de Cambridge, e aliava a uma enorme perícia astronómica observacional um grande domínio da física e da matemática, raro na maioria dos astrónomos. Tinha já passado pelo Observatório Real de Greenwich, no qual tinha trabalhado sob a supervisão de Dyson.

O estímulo científico final ficou a dever-se ao contacto do astrónomo de Leiden, Willelm de Sitter (1872-1934), que fazia parte de um número restrito de cientistas holandeses que acompanhavam os trabalhos de Einstein. Impedido de participar na reunião da *British Association for the Advancement of Science* que teria lugar em finais de 1916, em Newcastle, uma “restricted area” por causa da guerra, de Sitter enviou a Eddington um artigo em três partes no qual Eddington baseou a comunicação que apresentou nesta reunião. A leitura do artigo original de Einstein sobre a TRG, que Eddington também fez por intermédio de de Sitter, levou-o a reconhecer rapidamente a elegância, os fundamentos lógicos e o potencial da nova teoria e a apostar na sua disseminação não só no Reino Unido como também nos Estados Unidos da América. Pouco mais tarde, publicou um trabalho intitulado *Report on the Relativity Theory of Gravitation* (1918), o primeiro tratado sobre o tema em inglês, seguido de outro, *Space, Time and Gravitation. An Outline of the General Relativity Theory* (1920), dirigido a um público mais amplo e alvo de variadas edições.

O pacifismo de Eddington

É surpreendente notar que foram organizadas duas expedições para testar o encurvamento, quando a maioria dos cientistas e técnicos britânicos jovens estavam afastados dos seus locais de trabalho, a cumprir o serviço militar. Por um lado, Dyson apostou em duplicar a sua probabilidade de sucesso, dado o fiasco das expedições anteriores. Por outro lado, dos quatro expedicionários, três tinham idades compreendidas entre os quarenta e os cinquenta anos, sendo Eddington a excepção: quando a guerra começou, tinha pouco mais de trinta anos e corria sérios riscos de vir a ser convocado.

Eddington era um crente convicto, membro da *Society of Friends*, ou Quakers, uma denominação protestante pacifista e, portanto, objector de consciência por motivos religiosos.



Fig. 3 - Casa principal da Roça Sundy onde Eddington e Cottingham ficaram instalados e de onde fizeram as observações do eclipse. Créditos: Herdeiros de Jerónimo José Carneiro

Opção difícil de entender para a maioria dos seus concidadãos, que o podiam acusar de antipatriotismo. Este era um problema que tanto a elite académica de Cambridge como, mais tarde, o Astrónomo Real Dyson, que conhecia bem Eddington e admirava o seu trabalho, queriam evitar a todo o custo, pois seria não só prejudicial para Eddington como também para a astronomia britânica. Assim, com o início da guerra uma isenção do serviço militar para Eddington tinha sido negociada com o argumento de que dirigia o Observatório de Cambridge, um dos mais distintos observatórios britânicos, e que o seu trabalho tinha importância nacional. Mas à medida que a guerra avançou e a idade dos sucessivos recrutamentos foi crescendo, a probabilidade desta isenção ser revogada aumentou também. Foi neste ambiente pesado que Dyson conseguiu convencer as autoridades da importância da organização das expedições. E foi assim que, mais uma vez no passado das ciências, astronomia e religião deram as mãos, não porque argumentos religiosos sustentassem teses científicas, mas porque opções religiosas nortearam a planificação e a prossecução de actividades científicas.

Expedicionários e locais de observação

A decisão final sobre a divisão dos astrónomos pelos locais escolhidos é sempre assumida como um facto – Eddington e Cottingham deslocaram-se ao Príncipe e Cromellin e Davidson rumaram ao Sobral. Esta divisão não foi certamente fruto do acaso, pois todas as expedições eram planeadas com minúcia cirúrgica. Não havendo certezas sobre a escolha, podem adiantar-se justificações plausíveis. Este era um problema de escolha múltipla, pois todos os astrónomos eram experientes e tinham até prática de trabalho conjunto, como quando Davidson e Eddington partilharam o fracasso em Passa Quatro, em 1912.

Sendo Eddington o líder, era natural que escolhesse para si o local que oferecia mais dificuldades de acesso e o acompanhante que não era astrónomo. Com efeito, no Sobral, a equipa britânica teria a companhia de duas expedições, uma brasileira e outra americana. Ao Príncipe, não se deslocavam mais expedições nem haveria astrónomos a acompanhar os expedicionários. É provável que Eddington optasse, então, pelo Príncipe com o espírito de dedicação extrema e risco acrescido das missões que os Quakers organizavam por toda a Europa, ajudando as populações em sofrimento, independentemente da sua nacionalidade.

Adicionalmente, razões secundárias, de ordem religiosa, poderão ter reforçado, ou pelo menos facilitado, a decisão. Davidson e Cromellin eram ambos católicos praticantes, e este facto foi mencionado com satisfação pelos jornais brasileiros locais, como um factor de proximidade e partilha com a população local. Já no caso de Eddington, quem sabe se a sua opção religiosa o atraía para um local familiar a outros Quakers, da poderosa família Cadbury, que eram os

maiores compradores internacionais do cacau do Príncipe. Se esta ligação desempenhou algum papel, é difícil não suspeitar que estivesse a par da pressão exercida alguns anos antes pelos Cadbury sobre os produtores locais no sentido de assegurarem condições de trabalho condignas nas suas roças.

Estas questões não são compreensivelmente referidas na correspondência trocada entre Eddington e o Observatório Astronómico de Lisboa, respeitante à logística das viagens, embora todos os correspondentes tivessem presentes, com grande probabilidade, os conflitos que tinham oposto os impérios britânico e português quanto à questão do “cacau escravo” nas possessões portuguesas em África. Todos eles deviam partilhar a ideia ingénua da separação entre as esferas científica e política, uma construção tão útil para eclipsar ligações perigosas, no passado como no presente. Por outro lado, os comentários descontraídos que Eddington faz nas cartas enviadas à mãe são surpreendentes pela omissão, com breves referências ao recurso ao trabalho local na montagem da instalação observacional, e com grande destaque para os relatos de paisagens luxuriantes, passeios pela ilha, reuniões sociais, soirées e outros eventos. O mesmo aconteceu na publicação conjunta com Dyson e Davidson, de 1920, em que relata com minúcia as expedições e os seus resultados, e em que, mais uma vez, há uma breve referência ao recurso ao trabalho de nativos.

Considerações finais

Neste artigo, pretendi chamar a atenção para a rede de contactos que levou ao encontro improvável entre Einstein e Eddington, particularmente dificultado por diferenças disciplinares e a novidade das teorizações de Einstein, assim como pelos obstáculos de comunicação entre cientistas em tempo de guerra. Também ficou claro que entre as motivações de Eddington se encontravam razões de ordem religiosa. Finalmente, e apesar da falta de documentação de suporte, quis partilhar com o leitor as minhas congeminações sobre as razões que presidiram à divisão dos astrónomos pelos locais de observação.

Agradecimentos

Agradeço o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia, Portugal, no âmbito do projeto UID/HIS/00286/2019 e do projeto VISLIS - PTDC/IVC-HFC/3122/2014

Sugestões de Leitura:

Crelinsten, Jeffrey, *Einstein's jury. The race to test relativity*, Princeton University Press, Princeton (2006).

Nunes dos Santos, A.M., Christoffer Aurette, coords., *Eddington e Einstein*, Gradiva, Lisboa (1992).

Macedo, Marta, "Standard Cocoa. Transnational networks and technological regimes in West African Plantations," *Technology and Culture*, 57 (2016), 557-58.

Rodrigues, Joyce Mota. *Entre telescópios e potes de barro. O eclipse solar e as expedições em 1919/Sobral-CE*, Tese de Mestrado, Fortaleza (2012).

Stachel, John, "Eddington e Einstein" in *Einstein from B to Z*, Birkauer, Boston (2002).

Stanley, Matthew, *Practical Mystic: Religion, science and A.S. Eddington*, Chicago University Press, Chicago (2007).

Weszkalnys, Gisa. "Príncipe Eclipsed. Commemorating the confirmation of Einstein's Theory of General Relativity," *Anthropology Today* 25 (2009), 8-12.



Ana Simões é Professora de História das Ciências na Faculdade de Ciências, da Universidade de Lisboa, co-coordenadora do Centro Interuniversitário de História das Ciências e Tecnologia e presidente da European Society for the History of Science. As suas áreas de interesse científico incluem a história da química quântica e história das ciências em Portugal, com ênfase recente na história urbana das ciências e abordagens ao antropocénico na perspectiva da história das ciências.

Einstein e Eddington antes e depois do Eclipse total do Sol de 1919

Paulo Crawford¹

¹Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço, Universidade de Lisboa, Campo Grande, Ed. C8; 1749-016 Lisboa, Portugal

Resumo

Neste artigo, parte-se da aventura de Albert Einstein, no processo de retirar todas as conclusões do seu Princípio da Relatividade, passando pela equivalência entre massa inercial e massa gravitacional, e prosseguindo depois com a geometrização do campo gravitacional, visto como a curvatura do espaço-tempo. Neste processo, destaca-se o papel da comprovação experimental do encurvamento dos raios luminosos junto ao campo gravitacional do Sol, da responsabilidade do astrónomo inglês Arthur Stanley Eddington e dos astrónomos do Observatório de Greenwich, que contribuíram para o reconhecimento da Teoria da Relatividade Geral de Einstein.

Da Relatividade Restrita à Relatividade Geral

É sabido que Albert Einstein (1879-1955) iniciou a sua pesquisa com vista à construção de uma teoria relativista da gravitação em 1907. Nesse ano, Johannes Stark pediu a Einstein que contribuísse com um artigo de revisão sobre o princípio da relatividade para o seu *Jahrbuch*. “Princípio da relatividade”, era como Einstein designava inicialmente a sua teoria, hoje conhecida por “relatividade especial” ou “relatividade restrita”. E é nesse artigo de 1907 que Einstein publica pela primeira vez as suas reflexões sobre a relação entre o princípio da relatividade e a gravitação. Mas a partir de contribuições e comentários posteriores de Einstein, sabemos que esta não foi a sua primeira tentativa para obter uma teoria relativista da gravitação. Aparentemente, tentou pôr de pé uma teoria da gravitação compatível com a relatividade restrita, a partir de uma generalização óbvia da teoria de Newton, através de uma transformação da equação de Poisson para o potencial gravítico, com uma equação de d’Alembert. Porém, rapidamente se convenceu que uma tal teoria violava a equivalência entre massa inercial e massa gravitacional. Embora essa equivalência fosse conhecida há muito tempo, não parecia ter uma forte justificação no quadro da teoria newtoniana. Ora, Einstein estava cada vez mais convencido de que esta “coincidência” não era acidental e nela residia a chave da explicação mais fundamental da gravitação. Em concreto, para Einstein, a gravitação e a

inércia eram dois aspectos do mesmo fenómeno. E esta é uma ideia que o vai acompanhar durante os oito anos que conduzem à teoria da relatividade generalizada ou geral.

Ao longo do mês de novembro de 1915, em 4 quintas-feiras consecutivas, Einstein deu os últimos retoques na sua reinvenção radical do espaço e do tempo, reunindo-os num espaço-tempo curvo (pseudo-riemanniano) que se identifica com o próprio campo gravítico, a interação fundamental na descrição da dinâmica do Universo. Nascia a teoria da Relatividade Geral (TRG), a teoria da gravitação de Einstein!

Há uma diferença assinalável entre o espaço-tempo plano da relatividade restrita e o espaço-tempo curvo da relatividade geral. No primeiro caso, o espaço-tempo é fixo ou rígido, e caracterizado por um grupo de simetria que satisfaz as equações de Maxwell: o grupo de Lorentz restrito, que preserva também o sentido do tempo. Em suma, é um palco onde decorrem os acontecimentos físicos, mas sem qualquer intervenção da geometria.

Pelo contrário, na relatividade geral não há simetrias particulares a priori, e as equações de Einstein da relatividade geral satisfazem transformações gerais de coordenadas. E aqui, a geometria do espaço-tempo identifica-se com o próprio campo gravítico e é um actor fundamental, que participa na dinâmica das partículas e dos outros campos eventualmente presentes. Por sua vez, as várias soluções destas equações, para cada campo gravítico concreto, obtêm-se após a imposição de simetrias particulares, adaptadas a cada caso. Por exemplo, para o campo gravítico do Sol, as trajectórias dos vários planetas obtêm-se admitindo que o campo gravítico do Sol é um campo estático com simetria esférica. A solução resultante, obtida pelo astrónomo alemão Karl Schwarzschild em dezembro de 1915, descreve bastante bem as observações astronómicas para o sistema solar,

nomeadamente os avanços dos periélios dos vários planetas, e não só o do planeta Mercúrio, bem como o encurvamento dos raios luminosos da luz emitida pelas estrelas ao passar junto ao bordo do Sol. Em suma, as diferentes soluções das equações de Einstein obtêm-se impondo simetrias particulares, adaptadas a cada caso, como é, por exemplo, o caso de uma estrela colapsada num buraco negro e com simetria rotacional ou ainda o das várias soluções cosmológicas que procuram descrever um Universo em expansão.

Em resumo, poderemos dizer, seguindo a sugestão de John Stachel [1], que a tentativa de Einstein para construir uma teoria relativista da gravitação é como um drama clássico, isto é, está dividida em três actos: i) no primeiro acto, que tem lugar em 1907, convence-se que a sua primeira tentativa falha porque viola o princípio da equivalência; ii) no segundo, em 1912, conclui que qualquer generalização escalar da teoria de Newton não seria adequada. E admite então a necessidade de generalizar o espaço-tempo de Minkowski da relatividade restrita a um espaço-tempo curvo, e iii) no terceiro, após vários anos em que se convenceu que as equações do campo gravitacional não podiam ser geralmente covariantes, adopta, em novembro de 1915, equações de campo geralmente covariantes, e mostra que a solução esfericamente simétrica destas equações explica a conhecida anomalia da precessão da órbita de Mercúrio.

A Verificação Experimental da Relatividade Geral

Por vezes refere-se que Einstein parecia ser indiferente à verificação experimental das suas teorias. Conta-se, para confirmar essa atitude, que depois de Einstein mostrar, a uma estudante de doutoramento, o telegrama com a notícia dos resultados da observação do eclipse de 1919, esta perguntou-lhe como se sentiria se, pelo contrário, as observações comprovassem que a teoria era falsa, Einstein respondeu: “Lamentaria o nosso bom Deus. Em todo o caso, a teoria é correcta [2].” Mas é óbvio que a comprovação experimental da teoria da Relatividade Geral (RG) era muito importante para Einstein, e naquele momento estava seguro que a sua teoria era uma boa teoria da gravitação, melhor do que a teoria de Newton, que de resto mantinha o estatuto de uma primeira boa aproximação da sua teoria.

É claro que a teoria da RG difere bastante, nas suas previsões, da teoria de Newton, quando estão em causa velocidades próximas da velocidade da luz ou quando o campo gravitacional é particularmente intenso, pelo que Einstein reconhecia que a vizinhança do Sol era o local indicado para fazer alguns testes que sinalizassem as diferenças entre as duas teorias, e pudesse mostrar a relevância da RG face à teoria de Newton. Logo em 1907,

Einstein avançou com a proposta de dois testes: medir o desvio gravitacional para o vermelho das linhas espectrais da luz solar e detectar a deflexão da luz das estrelas ao rasar o bordo do Sol. Qualquer destes testes era particular-



Fig. 1 - Protuberância solar obtida por A. Eddington na ilha do Príncipe em 1919.

mente complicado de pôr em prática e o segundo exigia a observação de um eclipse total do Sol. Logo nessa altura, Einstein percebeu que o princípio da equivalência permitia estender algumas previsões da relatividade restrita ao estudo da gravitação. Se a presença num campo gravitacional era localmente equivalente a uma situação de movimento acelerado, então um observador longe do campo veria os relógios próximos do campo gravitacional a andar mais devagar. E, por sua vez, considerando o caso de um disco a rodar, Einstein chegou à conclusão que a aceleração e a gravidade distorcem as dimensões espaciais, pois é fácil mostrar que o perímetro da circunferência a dividir pelo diâmetro do disco, quando este roda com grande velocidade, é maior que π . Pensa-se que esta análise contribuiu para convencer Einstein que a teoria relativista da gravitação deve recorrer às geometrias de espaço-tempo curvo na presença de objectos de grande massa.

Muito depressa Einstein percebeu que não seria fácil interessar os astrónomos na comprovação da sua teoria. Na sua maioria, e pelo menos naquela altura, os astrónomos não estavam interessados em testar este efeito do encurvamento dos raios luminosos pelo Sol, cuja delicada verificação exigia a observação de um eclipse solar total e a determinação rigorosa da posição das estrelas localizadas próximas do bordo do Sol, para assim poder comparar a posição observada com a posição real das mesmas estrelas na ausência do Sol, obtida meses antes ou após o eclipse. Para já não referir o facto de, nessa época, muitos astrónomos continuarem a tentar observar, durante os eclipses solares, a presença de um planeta interior, a que chamavam Vulcano, para justificar a anomalia do avanço do periélio de Mercúrio no âmbito da teoria de Newton.

Já no seu artigo intitulado “Sobre a Influência da Gravitação na Propagação da Luz” [3], Einstein sugeria que a evidência do fenómeno poderia ser verificada pelos

astrónomos. No verão de 1911, Leo Pollak, um estudante da universidade alemã Karl Ferdinand, em Praga, onde Einstein era então professor, visitou o Observatório de Berlim, tendo-se aí encontrado com o jovem astrónomo Erwin Finlay Freundlich (1885-1964). Depois de ter obtido o seu doutoramento na Universidade de Göttingen, Freundlich tinha conseguido uma posição nesse observatório. Em conversa com Freundlich, Pollak descreveu as ideias de Einstein e conseguiu interessá-lo na questão da observação astronómica da deflexão da luz das estrelas pelo campo gravitacional do Sol. Após a visita de Pollak, Freundlich escreveu a Einstein e ofereceu-se para fazer medições da luz das estrelas ao passar junto ao planeta Júpiter, para verificar se era possível detectar a deflexão da luz pelo campo gravítico de Júpiter. É claro que essa deflexão era na altura praticamente impossível de medir, pois o ângulo de deflexão era da ordem de 0,02 segundos de arco! Einstein respondeu a Freundlich, agradecendo-lhe o seu interesse mas lamentando o facto de não haver um planeta, no sistema solar, maior que Júpiter. Os esforços de Freundlich continuaram, e Einstein por sua vez tomou a iniciativa de o visitar no Observatório de Berlim, na semana de 15 a 22 de abril de 1912. Durante essa visita, Einstein realizou algumas investigações que estão registadas num caderno de notas que permaneceram desconhecidas até serem reveladas num artigo de Jürgen Renn do Instituto Max Planck de História da Ciência, em Berlim [4].

Entre outros apontamentos, Einstein descreve nesse caderno uma descoberta espantosa que tinha acabado de fazer: o “efeito das lentes gravitacionais”, que ocorreria se a luz de uma estrela distante chegasse a um observador por intervenção de uma outra estrela mais próxima, ou de uma galáxia, como poderíamos admitir hoje. Note-se, que em 1912, ainda não havia provas concludentes da existência de galáxias exteriores à Via Láctea. Esse é um debate que vai ocupar os astrónomos até ao início dos anos 20 do século XX. O encurvamento da luz, que Einstein já tinha previsto em 1911, poderia aqui ocorrer de modo simétrico em torno do objecto que se interpõe entre a estrela distante e o observador. E, nessa situação, há um efeito de focagem da luz emitida pela estrela distante que é amplificada pela “lente gravitacional”, representada pelo objecto mais próximo, de modo que a estrela distante é observada como se estivesse mais perto. Hoje, os astrónomos usam este efeito para observar galáxias muito distantes. Embora isso implique depois um trabalho computacional delicado para separar a luz emitida do efeito produzido pela lente gravitacional.

Freundlich entra em acção: a Expedição à Crimeia

Um ano mais tarde, no princípio de setembro de 1913, Freundlich e sua noiva encontram-se com Einstein, na altura professor na Universidade de Zurique. Einstein tinha convidado Freundlich para acompanhá-lo a Frauenfeld, onde Einstein daria uma palestra sobre a teoria da relatividade. Daí viajaram até às margens do lago Constance, e mais tarde voltaram a Zurique. Durante todo esse tempo, Einstein foi discutindo com Freundlich os problemas da teoria e a forma de verificar as suas previsões.

A 8 de novembro de 1913, Einstein recebeu uma carta do professor W.W. Campbell do Observatório Lick, na Califórnia, a quem tinha solicitado fotografias de eclipses solares anteriores. Einstein enviou-as imediatamente para Freundlich verificar a existência de sinais do encurvamento da luz das estrelas na proximidade do Sol, mas essa análise foi inconcludente.

A 7 de dezembro desse mesmo ano, Einstein e Freundlich concordaram na data da próxima observação para verificar o encurvamento dos raios luminosos junto ao bordo do Sol, durante um eclipse total previsto para agosto de 1914 na Crimeia. Começaram imediatamente a preparar a expedição e a estudar os meios para a financiar, bem como a planificar a viagem até à Rússia e daí à Crimeia. Depois de ter ouvido Freundlich explicar como usar o equipamento escolhido, foi a altura de Einstein pedir ajuda a Planck para obter o apoio financeiro necessário para provar a sua teoria. Porém, apesar do interesse de Planck, a Academia Prussiana não estava muito disposta em alocar fundos para a expedição, e Einstein teve de recorrer a outra alternativa.

A 19 de julho de 1914, Freundlich e a sua equipa partiram para a Crimeia onde chegaram uma semana mais tarde. Porém, nem tiveram a oportunidade de fotografar o eclipse, que teve lugar a 21 de agosto, pois foram entretanto feitos prisioneiros na sequência do assassinato do herdeiro ao trono, o Arquiduque Franz Ferdinand e sua mulher, a 28 de junho, durante a visita à cidade de Sarajevo, e da declaração de guerra ocorrida após o ultimatum à Sérvia pelo imperador Austro-Húngaro, Franz Josef, e o apoio do kaiser alemão Wilhelm II. Davase início à I Guerra Mundial. Freundlich e os seus colegas foram considerados espões e todo o seu equipamento confiscado e só, muito mais tarde, devolvido. Para além da observação de eclipses, Freundlich também procurou, mais tarde, testar o deslocamento solar para o vermelho, mas sem qualquer sucesso.

Arthur Stanley Eddington

Einstein continuou a corresponder-se com Freundlich durante vários anos. Foi muitas vezes solicitado a ajudá-lo a encontrar um emprego ou a publicar um artigo científico. A 1 de março de 1919, Einstein escreveu a Freundlich contando-lhe que tinha acabado de ler um trabalho interessante, com uma exposição muito clara do astrofísico inglês Arthur Stanley Eddington (1882-1944). Muito provavelmente, o texto era o livro *Report on the Relativity Theory of Gravitation*, publicado em Londres, em 1918. Foi o primeiro livro sobre a teoria da relatividade (restrita e geral) publicado em língua inglesa e destinado a físicos e matemáticos. Ora, por essa altura, sem Einstein saber, Eddington estava prestes a embarcar numa viagem cujo

destino era uma ilha perto da costa equatorial de África, a ilha do Príncipe, na altura território colonial português, para observar um eclipse solar e tentar detectar o encurvamento dos raios luminosos junto ao bordo do Sol e assim comprovar a Teoria da Relatividade Geral.

Eddington foi um dos mais importantes cientistas no alvorecer da astrofísica, como novo tema científico, no início do século XX, em especial, pelo estudo da estrutura das estrelas e da explicação da sua estabilidade. Segundo Eddington, as estrelas não colapsam sob a atração gravítica da sua grande massa, devido à pressão da radiação provocada pela enorme quantidade de luz que é gerada no seu interior através da fusão termonuclear.

Eddington só tomou conhecimento da nova teoria da gravitação de Einstein em 1916, através de três artigos que lhe foram enviados pelo astrónomo holandês Willelm de Sitter (1872-1934), uma vez que por essa altura a Grã-Bretanha estava em guerra com a Alemanha e os jornais científicos alemães não chegavam às bibliotecas das universidades britânicas. Ao ler os artigos, Eddington foi rapidamente atraído pela sua lógica e estética matemática. Eddington discutiu as teorias de Einstein com o Astrónomo Real Britânico, Sir Frank Dyson (1869-1940), e juntos perceberam que um dos três testes experimentais, propostos por Einstein, não seria muito fácil de verificar pois exigia a observação das estrelas próximas do Sol durante um eclipse solar total. Mas Dyson observou que o eclipse do Sol de 1919 seria perfeito para verificar este teste, porque o Sol estaria no enxame das Híadas, um dos mais brilhantes enxames de estrelas na eclíptica. Na sequência destas constatações Dyson e Eddington começaram a fazer planos para montar uma expedição para testar a teoria de Einstein. Felizmente o armistício foi assinado a 11 de novembro de 1918, o que permitiu que as duas expedições, planeadas por Dyson e Eddington, chegassem aos seus destinos a tempo de montar os acampamentos e observar o eclipse do Sol.

Na sequência das observações levadas a cabo no Sobral, no Ceará, norte do Brasil, pelos astrónomos Andrew Crommelin (1865-1939) e Charles Rundle Davidson (1875-1970), e na ilha do Príncipe, hoje parte de S. Tomé e Príncipe, onde estiveram Edwin Turner Cottingham (1869-1940) e o próprio Eddington, foi possível testar uma das mais importantes previsões da teoria da gravitação de Einstein. Na sequência do resultado positivo dessas observações, Einstein passou a ser um dos cientistas mais famosos do mundo. É certo que Eddington foi também um dos cientistas mais importantes na afirmação da Astrofísica. Depois de ter escrito o livro já referido, Eddington escreveu um outro livro, a um nível acessível a um público mais alargado, o *Space, Time and Gravitation: An*

Outline of the General Theory of Relativity, publicado em 1920, no qual discute e apresenta o resultado das observações das duas equipas inglesas.

Após vários meses de análise dos dados, em Inglaterra, Dyson e Eddington confirmaram a previsão da teoria da gravitação de Einstein. Os resultados foram apresentados como um teste entre a teoria da gravitação de Newton e a Teoria da Relatividade Geral de Einstein. Com estas observações, ficou suficientemente claro que a teoria de Einstein passou no teste e a teoria de Newton falhou.

As notícias de que a teoria de Newton tinha falhado e sido ultrapassada pela teoria de Einstein, provocou uma grande comoção em muitos países. A situação era esta, a teoria de um alemão, Einstein, tinha ultrapassado a teoria do maior cientista inglês, Newton, num teste conduzido por um outro inglês. Eddington, pugnou para que este acontecimento contribuísse para uma reconciliação entre os dois países, após uma terrível guerra. Além disso, tanto Einstein como Eddington eram conhecidos pacifistas, que de uma forma ou de outra ambos se opunham à guerra. Sabia-se que Eddington era um Quaker, um membro da chamada Sociedade dos Amigos, uma denominação protestante pacifista. E Einstein era na altura visto como o único cientista alemão tolerado pela opinião pública mundial, pois não escondera a sua oposição à guerra, nomeadamente ao assinar um contra-manifesto que se opunha ao manifesto de cerca de 100 cientistas alemães de apoio à acção militar do seu país.

Assim, não admira que após a confirmação dos resultados positivos do eclipse de 29 de maio de 1919, apresentados por Dyson, Crommelin e Eddington, por esta ordem, numa reunião conjunta da *Royal Astronomical Society* e da *Royal Society*, de 6 de novembro de 1919, mais tarde publicados [5], e dirigida pelo patriarca da física Sir Joseph Thomson, praticamente só um respeitável físico, em fim de carreira, Sir Oliver Lodge, reagisse negativamente aos resultados apresentados, recusando-se a abandonar a teoria da gravitação de Newton, bem como o próprio conceito do referencial absoluto do éter e, por isso, também não aceitava a teoria da relatividade restrita. Note-se que Oliver Lodge era um físico respeitável e com contribuições importantes. Lodge foi a primeira pessoa a enviar uma mensagem de rádio, um ano antes de Marconi entrar em cena, num local assinalado por uma placa na Universidade de Oxford. Porém, Eddington explicou pacientemente que o peso dos resultados obtidos era avassalador, e a única previsão de Einstein que estava ainda por provar, o deslocamento para vermelho das riscas espectrais por acção do campo gravítico era uma outra história, para uma outra experiência.

Nesta descrição, não nos preocupámos em discutir os valores numéricos dos resultados obtidos pelas equipas do Sobral e do Príncipe, nem nos referimos às polémicas sobre o rigor das observações, que tiveram lugar mais tarde, especialmente no final dos anos 70 e princípio dos anos 80. Hoje essas questões estão bem esclarecidas. Quem tiver interesse em analisá-las poderá fazê-lo no seguinte artigo da *Gazeta de Física* [6] e suas referências.

À laia de conclusão

Em resumo, Einstein tinha razão: o espaço-tempo encurva na presença de um campo gravítico. Sir J.J. Thomson, que dirigiu os trabalhos da célebre reunião do *Joint Eclipse Meeting of the Royal Society*, há 100 anos atrás, resumiu a opinião que prevaleceu quando declarou:

“Este é o resultado mais importante obtido em conexão com a teoria da gravitação desde os tempos de Newton, e é adequado que seja anunciado num encontro da Real Sociedade que lhe esteve sempre tão intimamente ligada [...] - Se se confirmar que os raciocínios de Einstein se mantêm correctos e até agora têm sobrevivido a testes severos como o do perélio de Mercúrio e o presente eclipse - então este é um resultado que se pode considerar a maior conquista do pensamento humano. O ponto fraco da teoria é a grande dificuldade em representá-la. Parece que ninguém consegue compreender a nova lei da gravitação sem um conhecimento alargado da teoria dos invariantes e do cálculo das variações” [7].

Após esta importante citação do presidente da *Royal Society*, parece-me adequado acrescentar uma leitura actual, que traduz com maior clareza, como a comunidade dos relativistas incorporou a identificação entre o campo gravítico e a curvatura do espaço-tempo. Na relatividade, o espaço e o tempo estão interligados dando origem ao espaço-tempo. O campo gravitacional não está difundido pelo espaço: o campo gravitacional é o espaço-tempo! O “espaço”, no qual se movem os objectos, é parte do espaço-tempo; e o “campo gravitacional” que, nos raciocínios de Newton, transporta a força da gravidade através do espaço, na realidade identifica-se com o espaço-tempo, onde ocorrem os acontecimentos físicos. Este é o verdadeiro significado da teoria da relatividade geral, a teoria da gravitação de Einstein!

Referências:

1. John Stachel, *The First Two Acts, Einstein from 'B' to 'Z'*, p. 262, Birkhauser (2002).
2. Ilse Rosenthal-Schneider, *Reality and Scientific Truth* Wayne State University Press, p.74 (1980).
3. Albert Einstein, *Annalen der Physik* 35, p. 898-908 (1911).
4. Jürgen Renn, et al. *The Origin of Gravitational Lensing: A Postscript to Einstein's, Science*, p. 184 (1997).
5. 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).
6. Paulo Crawford & Ana Simões, “O eclipse de 29 de Maio de 1919”, *Gazeta de Física* 32 (2,3) p. 22-28 (2009).
7. *Joint Eclipse Meeting of the Royal Society, The Observatory* No. 545, p. 394 (1919).



Paulo Crawford, Professor Aposentado do Departamento de Física da FCUL, onde leccionou disciplinas de Relatividade e Cosmologia, entre outras. Em 1994, visitou S. Tomé e Príncipe, a convite da Fundação Gulbenkian, para fazer uma palestra acerca da importância do eclipse solar de 29 de maio de 1919 para a comprovação experimental da Relatividade Geral. Desde então passou a dedicar uma parte do seu tempo de investigação à história da génese da obra de Albert Einstein.

Eddington na Sundry para além de São Tomé e Príncipe

Joana Latas, NUCLIO – Núcleo Interativo de Astronomia

Exposições com ciclo de conferências:

E3: Einstein, Eddington, Eclipse | 16 de maio a 8 de setembro | Museu de História Natural e da Ciência da Universidade de Lisboa
(informação detalhada na contracapa deste número da Gazeta de Física)

3E: 3 Eclipses | 16 de maio a 30 de setembro | Museu da Ciência da Universidade de Coimbra

Esta exposição celebra três eclipses totais do Sol:

- 21 de agosto de 1914, cuja faixa de totalidade atravessava a Europa entre a Noruega e a Ucrânia, mobilizou a comunidade astronómica internacional. Este eclipse ficou marcado pelo início da primeira grande guerra. Da Universidade de Coimbra, Francisco Costa Lobo, preparou uma expedição portuguesa que viajou com intenção de observar o eclipse na Crimeia.

- 29 de maio de 1919, total na ilha do Príncipe (costa Oeste de África) e no Sobral (Brasil), onde foi observado e fotografado por um grupo de astrónomos liderados por Arthur Eddington numa expedição conjunta entre a *Royal Astronomical Society* e a *Royal Society*. As observações deste eclipse são um marco relevante para a visão que temos hoje do Universo pois permitiram finalmente, pela primeira vez, confirmar experimentalmente a Teoria da Relatividade Geral de Einstein.

- 3 de novembro de 2013, um novo eclipse solar total que foi visível na ilha do Príncipe. Foi uma oportunidade única para o Príncipe recuperar o evento científico de 1919 e ligá-lo à ciência moderna. O projecto ECLIPSE 2013: História e Ciência no Príncipe contou com dois objectivos principais: por um lado, promover e divulgar a Ciência; por outro, reafirmar o legado científico da ilha do Príncipe na História das Ciências.

Eventos relacionados:

16 de maio | 18h | Rómulo Centro Ciência Viva | palestra “A primeira fotografia de um buraco negro”, pelo astrofísico Hugo Messias (ALMA - Atacama Large Millimeter Array)

29 de maio | Museu da Ciência da Universidade de Coimbra | palestras e actividades hands-on para o público em geral, num programa ainda a divulgar em esundry.org.

Cafés-Ciência no Observatório Lago Alqueva (OLA)

O segundo sábado de cada mês (exceção julho, agosto e setembro) é assinalado no OLA com um café ciência. Até ao final de 2019 os cafés ciência serão relacionados com temas afins do E@S, sendo disponibilizados online posteriormente em esundry.org

10 x 10 “10 Temas 10 Países”

No dia 29 de cada mês (exceção fevereiro e maio) convidamos o público escolar a debater em conjunto com especialistas temas transversais de ciências, tais como: Reserva Mundial da Biosfera da UNESCO da ilha do Príncipe, Eclipses, Astronomia inclusiva, Ciência para o Desenvolvimento, Observação do céu do Greenwich, SKA, entre outros. Informação detalhada e inscrições em <https://tinyurl.com/10X10-EatS>

Gravity 2019

Em 2019 a *Global Science Opera* será dedicada ao tema gravidade. Dia 29 de maio será transmissão online da parte principal da história cocriada por alunos de escolas no Brasil, Portugal e São Tomé e Príncipe. No dia 20 de novembro, 14h CET, será a estreia da ópera já com a participação de muitos outros países.

Henrique Morize e a astronomia no Brasil

Antonio Augusto Passos Videira^{1,2}

¹ Departamento de Filosofia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro

² Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq

No Rio de Janeiro de 1910, em meio às obras de modernização e embelezamento pelas quais passava a cidade desde 1902, era inaugurada a Avenida Central, hoje Avenida Rio Branco, à época considerada o símbolo máximo da modernidade brasileira. Poucos metros acima, no morro do Castelo, localizava-se uma antiga e respeitada instituição dedicada à ciência, o Observatório Nacional. Naquele mesmo ano, uma janela do prédio setecentista que o abrigava caiu numa rua, quase causando um acidente de grandes proporções, já que a área – que reunia o núcleo urbano original da cidade – era densamente povoada. Esse “incidente fortuito”, segundo as palavras usadas pelo então diretor do observatório – Henrique Morize (1860-1930) – ao ministro responsável pela instituição, proporcionou o início da transferência da sua sede, finalizada uma década mais tarde. Além do início dos trabalhos pela escolha de um novo sítio para o observatório, o “incidente fortuito” também permitiu que Morize pleiteasse verbas para a renovação da sede então existente e que se faziam necessárias para receber as expedições estrangeiras, que iriam ao Brasil para observar o eclipse solar total de 1912, bem como para preparar a participação da equipe do Observatório Nacional. Neste artigo, descrevemos brevemente a vida e a obra desse cientista brasileiro, de origem francesa. Em particular, serão lembrados alguns eventos vividos por Morize em favor da astronomia.

Primeiros anos

Henrique Morize, ou Henri Charles Morize, seu nome de batismo, nasceu na cidade de Beaune, na Borgonha (França), região famosa pelos seus vinhos. Aliás, vinho era o ganha-pão da família Morize: o seu pai negociava esse produto; ao que parece, com resultados financeiros favoráveis. Com a guerra franco-prussiana de 1870, a situação dos Morize mudou, obrigando-os a tentar a sorte muito longe dali.

A França passava na época por uma grave crise financeira e política. Havia pouco, terminara a guerra contra a Prússia, que tivera como resultado a derrota humilhante dos franceses, além da perda de territórios, como a Alsácia e a Lorena. Para a família Morize, a guerra significou a derrocada

financeira dos negócios do pai. A mãe de Morize morreria em 1865, e o pai, no início da década seguinte, deixando os filhos aos cuidados da cunhada e da sogra. Órfãos, os irmãos Morize deixaram sua cidade natal, seguindo para Paris. No entanto, não se demoraram nessa cidade, pois a tia de Morize, Cécile Henry, não conseguia arrecadar o suficiente para garantir o sustento da família.

Chegada dos Morize ao Rio de Janeiro (1875-1884)

A intenção da família Morize era instalar-se no Rio de Janeiro, corte do Império brasileiro e cidade mais importante do país, onde chegaram ao final do ano de 1874. No entanto, a chegada a essa cidade coincidiu com um surto de febre amarela, doença que a assolava periodicamente. Uma vez mais, a saída foi mudar; não de país, mas de cidade. Semanas depois, a família Morize desembarcava no porto de Santos, tomando o rumo de São Paulo, onde se instalou. Nessa cidade, madame Cécile fundou um colégio para moças que, apesar de desfrutar de relativo sucesso, não foi bem-sucedido financeiramente. Morize foi obrigado a trabalhar. Seu primeiro emprego foi como ajudante na livraria Garraux. Suas obrigações eram, durante o dia, desembrulhar pacotes de livros e arrumá-los. Após o fechamento, deveria varrer a livraria.

Sua próxima ocupação foi como ajudante de telegrafista na estrada de ferro do estado de São Paulo. Esse trabalho foi decisivo para o seu futuro. Nessa função conheceu o engenheiro Eduardo José de Moraes, que, interessado por aquele jovem que demonstrava vocação intelectual, aconselhou-o a tentar os exames de ingresso para a Faculdade de Direito, localizada no Largo São Francisco da capital paulista. Em 1880, após dois anos como ajudante de telegrafista, Morize prestou com sucesso os exames, ingressando naquela faculdade. É provável que o seu verdadeiro objetivo fosse a engenharia, mas até 1893 não existia uma escola politécnica em São Paulo. Morize permaneceu pouco tempo como estudante de direito. Em 1881 veio para o Rio de Janeiro, sendo admitido na Escola Politécnica do Largo de São Francisco, no centro da cidade.

Pouco se sabe da permanência de Morize na Escola Politécnica durante seu curso de Engenharia Industrial. Menos de dois anos após o início do curso, Morize o interrompeu por motivos de saúde, só retornando às aulas em 1883. Morize levou dez anos para se formar, concluindo o curso em 1890.

Outra razão que contribuiu para que Morize demorasse tanto a se formar foi o seu ingresso em 1884 no então

Imperial Observatório do Rio de Janeiro como aluno astrônomo. São desconhecidas as razões que levaram Morize a ingressar no observatório. É bem provável que o interesse pela astronomia tenha surgido nas leituras na livraria Garraux.

Morize no Observatório Nacional (1884-1898)

A primeira atividade de Morize no Imperial Observatório do Rio de Janeiro foi a pesquisa de cometas, mesma função que Luiz Cruls (1848-1908), então diretor da instituição, exerceu anos antes, em 1876, no início de sua atividade nessa instituição. Morize se ocupava também com o serviço meteorológico, a conservação e o funcionamento de aparelhos elétricos e, a partir de 1885, com a revisão e o aumento das tabelas de física e química para o anuário. Como se pode perceber dessa lista, foram muitas e diferentes as atividades que lá ele realizou.

Em 1886, Cruls, auxiliado por funcionários do Imperial Observatório, entre os quais Morize, iniciou a publicação da Revista do Observatório, dirigida ao público em geral e que tinha como preocupação aumentar o interesse pela ciência. Foi para essa revista que Morize escreveu seus primeiros artigos científicos. A revista era mensal e constava de dois ou três artigos por número, além de informes sobre os progressos da ciência, alcançados em outras partes do mundo, e resenhas bibliográficas. Essa iniciativa durou até dezembro de 1891, quando as necessidades da jovem República brasileira obrigaram Cruls a encerrar essa atividade. Não seria essa a única revista de divulgação científica com a qual Morize colaborou. Na década de 1920, ele escreveu para a Revista Rádio, publicando artigos sobre a telegrafia sem fios, sobre o modo de transmissão do sinal S. O. S. e sobre a origem dos terremotos, entre outros assuntos.

Até a Proclamação da República, Morize realizou tarefas consideradas normais para uma instituição astronômica e meteorológica. Em 1888, acompanhado de Julião de Oliveira Lacaille, determinou as posições geográficas das estações meteorológicas da Estrada de Ferro Pedro II, atual Central do Brasil. Ao mesmo tempo que atuava como engenheiro cartográfico, Morize trabalhava na redação de um texto, o "Esboço de Climatologia do Brasil", que fez parte do volume que o Brasil preparou para a Exposição Universal em Paris, em 1889, comemorativa do centenário da Revolução Francesa.

Após 15 de novembro de 1889, quando a monarquia foi abolida, a carreira de Morize sofreu uma significativa mudança de rumo, como, aliás, todo o observatório. Um exemplo: em 1909, o Observatório Astronômico do Rio de Janeiro, nome dado ao sucessor do Imperial Observatório, viu-se obrigado, por meio de um decreto, a criar uma rede de estações meteorológicas em todo o território nacional, o que consumiu energia e esforços de Morize e seus colaboradores.

Em junho de 1892, Cruls foi nomeado chefe da Comissão Exploratória do Planalto Central, criada para determinar a localização da futura capital federal. Nessa comissão, Morize voltou a realizar trabalhos de engenheiro, demarcando posições geográficas e fazendo trabalhos topográficos e

observações meteorológicas. Além de registrar posições de acidentes geográficos, ele aproveitou a oportunidade para tirar uma série de fotografias, de muito boa qualidade, sobre as populações e a região. Morize sempre teve um grande interesse por fotografia.

Ainda em Goiás, mas já em 1893, Morize foi convocado ao Rio de Janeiro para acompanhar uma expedição inglesa que observaria um eclipse solar parcial no Ceará. Nos últimos dias de 1896, Morize foi nomeado professor interino de física experimental da Escola Politécnica. Nesse mesmo mês assumiu, pela primeira vez, a direção interina do observatório, substituindo Cruls, que passou a sofrer de sérios problemas de saúde. A partir de então, Morize assumiu diversas vezes a diretoria do observatório.

Morize, cientista (1898-1908)

Em 1898, Morize consolidou definitivamente sua posição no meio acadêmico brasileiro, uma vez que, após concurso público, foi nomeado catedrático de física experimental e meteorologia da Escola Politécnica. Desde o início da década de 1890, ele vinha sendo nomeado para cargos importantes. Em 1891, passou a astrônomo do observatório e, cinco anos depois, como vimos, tornou-se substituto na Escola Politécnica.

Em 1901, incumbido interinamente da direção do observatório, Morize escreveu a seus superiores, relatando a péssima situação física do prédio. Como não adiantava apelar para o valor e a importância da astronomia ou da meteorologia como ciências puras, Morize recorreu aos serviços que forneciam dados reputados como importantes e úteis. No ofício que mandou para o ministério, Morize afirmou que, sem reformas urgentes, os serviços ligados à meteorologia e ao magnetismo ficariam comprometidos.

A argumentação de Morize mostra que, no início do século passado, o processo de afastamento da ciência pura do ambiente do Observatório Astronômico e da Escola Politécnica já estava determinado. Fato curioso, contudo, é que datam desse mesmo período os trabalhos de Morize que, muito possivelmente, melhor refletem seu interesse pela ciência pura. O primeiro deles, publicado em 1898, apresenta o conteúdo da tese com a qual concorreu à cátedra de física experimental. O segundo, publicado numa revista obscura, parece ter sido destinado ao público em geral. Os temas desses trabalhos estavam bem longe das preocupações utilitaristas do governo federal e das preocupações pecuniárias da população. O primeiro versava sobre os raios X, recentemente descobertos, e o segundo, sobre a astrofísica, ramo da astronomia com menos de um século de existência.

Ao mesmo tempo que propagava a causa da ciência pura, Morize continuava a fazer com que

o observatório astronômico funcionasse o mais razoavelmente possível. Em 1912, ele teve mais uma ocasião de intervir junto às autoridades para tentar mudar a sua sede. Nesse ano, aconteceria um eclipse solar que atrairia a atenção e o interesse dos principais observatórios do mundo. Como a duração do eclipse no Brasil seria boa – além de outras condições astronômicas igualmente favoráveis –, astrônomos estrangeiros escreveram a Morize, perguntando se o observatório poderia prestar as informações necessárias para que planejassem e organizassem suas expedições, e se ele poderia ajudá-los a se locomoverem até a zona do eclipse. Morize percebeu aí uma chance ímpar para conseguir algo em favor da instituição que dirigia havia quatro anos. Sem demora, escreveu ao ministro da Agricultura, solicitando uma verba extra para limpar o prédio do observatório e participar da observação do evento astronômico.

A verba foi concedida e vários observatórios, entre os quais os de Córdoba e La Plata (argentinos), bem como o *Bureau de Longitudes* da França e o de Greenwich (Inglaterra), além do próprio Observatório Nacional, partiram para a região de Passa Quatro, no sul de Minas Gerais [1].



Fig. 1 - Equipes brasileira, francesa e inglesa em Passa Quatro no ano de 1912. Eddington é o terceiro da direita para a esquerda na primeira fileira em pé. Morize está sentado com o chapéu em suas mãos.

Em 10 de outubro de 1912, contando com várias personalidades – entre elas o presidente da República, Marechal Hermes da Fonseca –, as equipes trabalharam febrilmente, ajustando seus aparelhos. No entanto, devido à chuva e às nuvens, o eclipse não foi observado, frustrando todas as expectativas.

Mais sorte tiveram Morize e os observadores ingleses (Crommelin e Davidson), que, sete anos depois, rumaram para Sobral no Ceará para observarem um outro eclipse solar total, que aconteceria em 29 de maio de 1919 [2]. Sobral foi escolhido após um minucioso estudo de escolha de sítio, conduzido por Morize e seus assistentes no Observatório Nacional. O principal ponto de interesse desse eclipse era a tentativa – desta vez,

bem-sucedida – de testar uma das previsões da teoria da relatividade geral de Albert Einstein. A equipe brasileira se dedicou a estudar a composição da coroa solar, não se



Fig. 2 - Equipes inglesa e brasileira em Sobral. Lélío Gama é o terceiro em pé da direita para a esquerda. Morize é o quinto. Os astrônomos ingleses estão de terno branco sentados com os respectivos chapéus em seus colos.

ocupando de questões relativas à comprovação empírica das ideias einsteinianas, apesar de reconhecer a sua importância. A relatividade era ainda uma novidade e sua introdução no Brasil aconteceria a partir de então, sem que Morize tivesse aí desempenhado algum papel. A equipe inglesa fez a verificação do efeito da curvatura dos raios da luz que passam perto de corpos massivos. Essa confirmação rendeu reputação mundial a Einstein [3].



Fig. 3 - Aspecto do acampamento das equipes em Sobral. Aí era o Jockey Club da cidade.

A década de 1910 deu ainda a Morize a oportunidade de discursar diante das mais altas autoridades do país, incluindo-se o presidente da República. Em 1913, no lançamento da pedra fundamental do novo edifício do Observatório Nacional, no bairro de São Cristóvão, Morize defendeu a tese de que a ciência pura, aquela que produz conhecimentos teóricos, ou seja, o que é perseguido e desenvolvido sem que haja por parte do cientista que o cria um compromisso com utilidades materiais e/ou práticas, é o mais alto e importante valor a que podem aspirar as nações.

A experiência como catedrático e diretor de uma instituição antiga e prestigiosa como o Observatório Nacional levou Morize a perceber com clareza que a única possibilidade para se mudar o ambiente científico no Brasil, fazendo valer a predominância da ciência pura, seria através da união de todos os cientistas e amigos da ciência. Era preciso, pois, criar uma associação que os defendesse. Em 1916, Morize, acompanhado de umas poucas dezenas de colegas, fundou a atual Academia Brasileira de Ciências.

Ao mesmo tempo que defendia a importância da ciência pura, Morize passou a discordar publicamente das ideias de Auguste Comte. Em ocasiões anteriores, ele o citou

como um defensor da importância da ciência pura, o que pode soar estranho, uma vez que o filósofo francês era contrário àquilo que ele chamava de especulações metafísicas, isto é, elaboração de teorias e modelos sem uma base empírica segura. Morize recorreu a Comte para se fazer ouvir por um público influenciado, ainda que de forma difusa, pelas ideias do criador do positivismo na França. Mas, na década de 1910, com as profundas transformações ocorridas no cenário científico internacional, que não teriam sido possíveis através de uma obediência estrita e cega a algumas das principais teses filosóficas positivistas, Morize se sentia em condições de criticar Comte, apresentando-o como alguém que não poderia ter contribuído para o desenvolvimento da ciência e, conseqüentemente, para o progresso material, cultural e econômico dos países.

Apesar de ser professor de física experimental na Escola Politécnica, Morize não fez discípulos que seguissem carreira nesta área; mesmo em astronomia, foram poucos aqueles que se decidiram por tentar uma vida profissional neste domínio. Entre as exceções formadas por Morize, pode ser mencionado o nome de Lélío I. Gama (1892-1981), que esteve em Sobral e, anos mais tarde, também viria a ser diretor do Observatório Nacional. Não havia condições para isso: faltava ambiente. A constituição de um ambiente foi uma das metas mais importantes para Morize, que a prosseguiu com tenacidade.

Conclusão

Por 46 anos, Morize trabalhou em duas instituições de ensino e pesquisa, ambas antigas e prestigiosas. Ao longo desse período, teve que – ou quis – realizar tarefas que nem sempre resultaram em artigos científicos. Nos anos em que atuou no Observatório Nacional, essa instituição sofreu sérias e profundas transformações, algumas causadas pelas instabilidades sociais e políticas que caracterizaram a Primeira República. É natural que a carreira e a produção científicas de Morize sofressem com essas mudanças, pois sua principal preocupação era salvaguardar a instituição. Como Cruls, Morize procurou sempre pautar suas decisões pela necessidade de evitar choques com seus superiores. O estilo de Morize era próximo ao de seu antecessor, procurando, sempre que possível, encontrar uma saída que não prejudicasse o observatório, reconhecendo como legítimas as necessidades e as demandas solicitadas pelos governos republicanos.

Essas demandas governamentais variaram com o tempo, levando Morize e os outros funcionários do observatório a mostrarem sobriedade, maleabilidade e competência para cumprirem as tarefas. Sobre Morize, o principal efeito concentrou-se sobre sua carreira científica, construída como que ao sabor dos ventos vindos de fora do observatório. Por muitos anos, Morize foi antes de tudo engenheiro e meteorologista, mais do que astrônomo ou físico.

Morize morreu em março de 1930, sem ter tempo para ver desaparecerem as dúvidas que o assolavam sobre a possibilidade de um dia a ciência pura se tornar realidade

no Brasil. Poucos meses depois, em outubro, Getúlio Vargas começava a governar o país, período durante o qual pôde promover algumas das reformas desejadas pela geração de Morize.



Antonio Augusto Passos Videira, doutor em Epistemologia e História das Ciências pela Universidade de PARIS VII (1992), é professor no departamento de Filosofia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, colaborador no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCTI e Pesquisador do CNPq. Atua nas áreas de filosofia da ciência, filosofia da natureza e história da ciência. Dirige a Coleção Clássicos da Ciência da Eduerj.

Frederico Oom e a promoção da Astronomia em Portugal

Luís Miguel Carolino¹, Ana Simões²

¹ Instituto Universitário de Lisboa (ISCTE-IUL), CIES

² Centro Interuniversitário de História das Ciências e Tecnologia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1749-016, Lisboa

Introdução

Poucos meses antes da célebre observação do eclipse total de 1919, na ilha do Príncipe e no Sobral, que confirmará a Teoria da Relatividade de Einstein, Arthur S. Eddington iniciou uma correspondência com o Observatório Astronómico de Lisboa, que foi decisiva na organização da expedição à ilha, então sob domínio português, situada próximo da linha do equador [1]. Embora endereçada ao diretor da instituição, o astrónomo César Augusto de Campos Rodrigues, a correspondência com Eddington e, conseqüentemente, a organização da toda a logística do lado português, ficou a cargo de Frederico Tomás Oom (1864-1930), subdiretor do Observatório Astronómico da Tapada, como a instituição era usualmente conhecida. Não era a primeira vez que Oom desempenhava este tipo de funções.

De entre os vários eclipses observados em Portugal, o eclipse total do Sol de 28 de maio de 1900 foi especial. Antes de mais, a Península Ibérica foi a única região da Europa onde este eclipse pôde ser observado na sua totalidade. Foi, assim, que um grupo de astrónomos, onde se incluíam alguns dos melhores e mais importantes da época, como o astrónomo real britânico William Christie, viajou para Portugal para observar o eclipse. Para Frederico Oom, esta foi uma ocasião única para fortalecer as relações com a comunidade internacional e simultaneamente projetar uma imagem do país de modernidade. Internamente, Oom explorou este evento científico até à exaustão. Se, por um lado, utilizou o capital adquirido com o apoio logístico às equipes estrangeiras para reclamar, junto dos poderes públicos, a importância da comunidade científica nacional, por outro lado, foi incansável na divulgação do eclipse e na popularização da ciência astronómica.

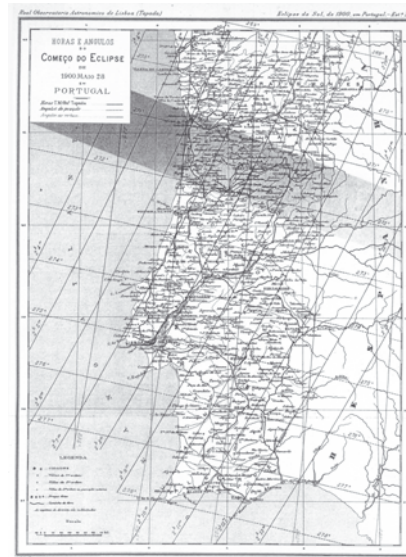


Fig. 1 - Representação da faixa de totalidade do eclipse de 1900 em território português (F. Oom, O Eclipse do Sol de 1900 Maio 28 em Portugal).

Frederico Tomás Oom e a relevância dos eclipses

Filho do primeiro diretor do Observatório, Frederico Tomás foi um astrónomo por direito próprio, com atividade científica regular, manifesta, entre outras, na publicação de artigos nas principais revistas da época como *The Observatory*, *Astronomische Nachrichten* e *Revue Scientifique* [2]. Contudo, Oom tinha a percepção clara de que, pela sua importância, a atividade científica deveria ultrapassar os limites físicos dos observatórios, laboratórios e das salas das universidades. O potencial transformador da ciência e da técnica na sociedade, economia e no próprio desenvolvimento da humanidade conferia uma importância ainda não devidamente reconhecida, a seu ver, à comunidade científica. Assim, se havia que fortalecer a comunidade dos homens de ciência e desenvolver o seu sentido de identidade, era, também, imperioso o seu reconhecimento externo pelos governos, instituições e organizações da sociedade civil. Daí que para Oom, como para muitos outros cientistas da transição do século XIX para o século XX, as atividades de organização e promoção da ciência caminhassem lado a

lado com a preocupação por difundir uma cultura científica por todos os setores da sociedade, incluindo os grupos mais distantes da educação escolarizada. Organização e popularização da ciência eram, deste modo, atividades que, para um cientista, deveriam ombrear com a própria investigação científica.

Os eclipses eram eventos únicos que permitiam unificar estas três dimensões da vida de um cientista. Oom não deixou escapar esses momentos decisivos para a ciência e, considerava ele, para a sociedade. Para a astronomia da época, a observação de eclipses constituía-se como um momento de importância decisiva. Por um lado, com a emergência da astrofísica, em finais do século XIX, os eclipses totais do Sol possibilitavam a observação, em condições excepcionais, da coroa e das proeminências solares e a análise da composição química da sua atmosfera. Por outro, no caso do eclipse solar de 29 de maio de 1919, este evento surgiu como a ocasião ideal para testar a eventual curvatura do espaço-tempo prevista pela teoria da relatividade geral de Einstein. Para a sociedade, os eclipses eram, ainda, ocasiões únicas que geravam interesse coletivo. Como escreveu o astrónomo inglês Georges F. Chambers, autor de inúmeras obras de divulgação astronómica, que viajou para Portugal para aqui observar o eclipse solar de 28 de maio de 1900, “reputa-se geralmente axiomática a indiferença e a ignorância do vulgo com respeito ao que se denominam ciências físicas. Mas o que é certo é que, quando há acontecimento de maior tomo, tal como uma enorme trovoadas, ou um terremoto, ou um cometa brilhante, ou um eclipse total, qualquer coisa que dê matéria às conversações gerais, o nosso amigo vulgo lá concede ao caso um pouquinho de preciosa atenção, enquanto fuma o seu cigarro ou engole o seu café” [3].



Fig. 2 - Frederico Oom (Arquivo do Observatório Astronómico de Lisboa).

Deveres de anfitrião. Aviso aos astrónomos

Consciente que se tratava de uma ocasião única, Frederico Oom colocou o seu plano em marcha quando faltava cerca de um ano para o eclipse do Sol de 28 de maio de 1900, observado na totalidade em Portugal. Antes de mais, havia que se inteirar não apenas do plano de observações em anteriores eclipses totais do Sol, mas, também, saber que condições os diferentes países haviam garantido às equi-

pas de astrónomos que se tinham deslocado aos seus territórios. Foi, assim, que Oom encetou uma intensa correspondência com os principais observatórios mundiais. Entre os destinatários das missivas enviadas por Oom encontram-se, por exemplo, o diretor do Observatório Astronómico de Tóquio, o diretor do observatório de Kodaokanal, no sul da Índia, ou, ainda, os diretores dos principais observatórios europeus, como Greenwich, Paris, Potsdam ou Madrid [4].

Com base nas informações recebidas dos seus colegas, Oom ficou a saber que as diferentes instituições tinham apoiado a vinda de equipas de astrónomos estrangeiras, disponibilizando-lhes informação sobre os eventuais locais de observação, sua acessibilidade e condições meteorológicas; isenção de taxas alfandegárias sobre os instrumentos de observação; facilidades na utilização da rede ferroviária existente; garantias de transmissão telegráfica do sinal horário; facilidades em encontrar alojamento; bem como, disponibilização de forças militares e policiais que garantissem a tranquilidade durante a observação e nos momentos que a precediam.

Munido destas informações, Oom concebeu um documento que tornava públicas as condições garantidas por Portugal às equipas de astrónomos internacionais que pretendessem observar o eclipse neste extremo da Europa: *Avis aux astronomes se rendant en Portugal pour la prochaine éclipse* [5]. Este documento datado de 2 de abril de 1900 e assinado por Campos Rodrigues, em nome do governo português, era, na verdade, a primeira ação visível de um comité nacional, instituído dois dias antes (em 31 de março), que era presidido por Mariano Cirilo de Carvalho, ex-professor de astronomia na Escola Politécnica de Lisboa e figura de largas ambições políticas na época, e incluía, para além de Frederico Oom, Campos Rodrigues, o professor na Escola Naval José Nunes da Mata e o astrónomo do OAL Artur Teixeira Bastos. Naturalmente, o dinamismo que fazia este comité funcionar era Frederico Oom. *Avis aux astronomes se rendant en Portugal* foi publicado nas principais revistas científicas de astronomia da época, como *Astronomische Nachrichten* e o *Bulletin Astronomique* [6].

Foi, assim, que um conjunto significativo de astrónomos estrangeiros rumaram a Portugal para observar o eclipse. O eclipse era observável na sua totalidade numa faixa que cruzava o país desde a região de Aveiro até à Serra da Estrela, na região da Beira Baixa. Entre os astrónomos profissionais, destacava-se a equipa do Observatório de Greenwich, constituída pelo astrónomo real William Christie e os seus assistentes C. Davidson e F. Dyson. Esta equipa observou o eclipse em Ovar. O seu programa de investigação consistiu basicamente na obtenção de fotografias em escalas diferentes da coroa solar e do *flash* espectral. A este grupo de astrónomos ingleses, juntou-se, ainda, Ernst Jost, do Observató-

rio de Heidelberg. Da Alemanha veio, também, G. Müller, do Observatório de Potsdam, que observou o eclipse em Viseu. Apesar de terem programas de investigação autónomos, ambos os astrónomos alemães concentraram a sua atenção na observação de Mercúrio.

Para além dos astrónomos profissionais, o norte do país recebeu, ainda, um número significativo de astrónomos amadores. Entre esses incluíam-se, para além do já mencionado Georges Chambers, J.J. Atkinson, Arthur Berry, W.B. Gibbs, F. Lys Smith e Augustin Morford. O programa de observação destes astrónomos variava desde a observação da coroa solar ou Mercúrio até à observação das “contas de Baily”, um fenómeno que resulta da luz solar ao atravessar os vales lunares [7]. Um número considerável destes astrónomos, após a observação do eclipse, aproveitou a oportunidade para viajar pelo país, centrando a sua atenção, não apenas nos monumentos históricos, mas, também, na riqueza da flora e fauna e alguns, como Gibbs, deixaram um registo das suas impressões de viagem [8].



Fig. 3 - A equipa do Observatório Real de Greenwich preparando a observação do eclipse solar de 1900 em Ovar (de frente encontra-se provavelmente William Christie) (Centro Português de Fotografia).

Afirmar o estatuto da comunidade científica

Uma vez em Portugal, os astrónomos estrangeiros receberam uma atenção especial por parte de Frederico Oom. Na verdade, esta atenção parece ter variado de acordo com o seu estatuto institucional. Assim, os astrónomos ingleses do Greenwich Royal Observatory foram contemplados não apenas com facilidades especiais de transporte e segurança, como, também, com um assistente e tradutor permanente. Mas os astrónomos amadores foram igualmente recebidos com toda a cortesia possível. Foi, assim, sem surpresa que após a expedição científica a Portugal, muitos astrónomos encaminharam para o OAL correspondência a agradecer a hospitalidade portuguesa [9]. Frederico Oom procurou também utilizar a ocasião

proporcionada pelo eclipse e a consequente presença em Portugal de alguns dos mais notáveis astrónomos da época para promover a visibilidade pública e reconhecimento institucional da comunidade de astrónomos junto dos poderes políticos. Assim, jornais de larga tiragem como o *Diário de Notícias* foram alimentados de forma sistemática com informação sobre a vinda, os locais de estadia e outras particularidades envolvendo os astrónomos profissionais e amadores que visitavam o país. Foi deste modo, por exemplo, que, no dia 20 de maio, o *Diário de Notícias* informou os seus leitores que a Madame von Prittwitz e Miss Grace Sawyer, respectivamente mãe e filha, tinham acabado de chegar a Ovar, onde tencionavam observar o eclipse [10]. Junto dos poderes políticos, a ação de maior impacto terá sido a promoção por parte de Oom da recepção que o rei D. Manuel II fez a William Christie [11]. Curiosamente Oom acabou por não poder observar o eclipse na sua totalidade pois, no dia 28 de maio, enquanto uma equipe do OAL, constituída por Campos Rodrigues, Teixeira Bastos, Guilherme Capelo e Viterbo Elias, se deslocou para a Serra da Estrela para aí observar o eclipse, Oom recebeu, na qualidade de sub-diretor do OAL, a rainha D. Amélia que, nesse dia, foi visitar o Observatório da Tapada [12].

Divulgação e novos públicos para a ciência

Frederico Oom estava empenhado não só em promover a astronomia e a comunidade astronómica junto dos poderes políticos como em demonstrar a importância da popularização da ciência para a sociedade. O eclipse total do Sol do dia 28 de maio de 1900 proporcionou-lhe uma ocasião ímpar para esse efeito.

Uma peça essencial na comunicação que estabeleceu com os variados setores da sociedade foi a publicação e a extensa divulgação de um livro que escreveu pensando justamente no público pouco familiarizado com o fenómeno dos eclipses e, de uma forma geral, com a ciência astronómica. Como se pode depreender da documentação de Oom preservada no Arquivo Histórico do OAL, Oom começou a trabalhar neste livro em 1899. Em início de 1900, o livro estava concluído, sendo publicado em abril desse ano pela Imprensa Nacional - mais um sinal de que era visto como algo de interesse público -, com o título *O Eclipse do Sol de 1900 Maio 28* em Portugal. Este livro, para além de uma introdução geral aos eclipses solares e fenómenos associados, informava o leitor acerca dos eclipses anteriores, da constituição física do Sol e das técnicas de estudo assentes na espectroscopia. Na segunda parte, Oom centrou-se, em particular, no eclipse desse ano, fornecendo aos seus leitores todas as informações necessárias para uma observação bem sucedida. Ao lerem-no, os leitores ficaram a saber que havia um vasto leque de observações possíveis, dependendo do nível de conhecimentos e do equipamento de cada um. Para Oom, todo o tipo de observação era importante; todas as observações contavam.

Para que a mensagem chegasse ao maior número de pessoas, Oom empenhou-se energeticamente na sua divulgação. Assim, o livro foi colocado à venda na Sociedade de Geografia de Lisboa, sendo provavelmente

possível encontrá-lo em outras livrarias de Lisboa e do Porto. Mas para um autor empenhado na popularização da ciência isso não era suficiente. Os registos pessoais de Oom revelam que ele teve o cuidado de enviar inúmeras cópias do livro para os principais jornais do país e para muitas pessoas influentes na sua região, para além, naturalmente, de o ter remetido para as principais instituições astronómicas nacionais e internacionais, como era prática corrente na comunidade científica.

Em resultado deste esforço, Oom recebeu no Observatório Astronómico da Tapada um número elevadíssimo de cartas, escritas por populares, reportando as observações feitas em todos os cantos do país, colocando questões sobre todo o tipo de matéria relacionada com os eclipses e materializando, assim, uma rede activa de divulgação de ciência que Oom se empenhou em criar [13].

A comoção coletiva que o eclipse de 1900 gerou foi tão grande, que o já mencionado astrónomo amador Chambers, ao chegar a Ovar, ficou verdadeiramente surpreendido com o entusiasmo revelado pelas massas portuguesas. Os seus preconceitos levavam-no a assumi-las completamente ignorantes, pelo que a emoção e participação massiva no evento o deixaram boquiaberto [14].

À laia de conclusão

O envolvimento de Frederico Oom na preparação do eclipse de 28 de maio de 1900 e o seu conseqüente aproveitamento exemplificam a centralidade, para Oom, da promoção da ciência e da divulgação de uma cultura científica enquanto partes integrantes do processo de construção do conhecimento. Pelo seu impacto na sociedade, pelas melhorias possibilitadas pelo desenvolvimento da ciência e da técnica e, conseqüentemente, pelo papel estrutural da educação científica, esta dimensão cívica da vida de um cientista deveria ombrear com a própria investigação científica. Para Frederico Oom, como para muitos cientistas do final da Monarquia e da Primeira República, organização, popularização e investigação eram três dimensões que se deveriam materializar na figura de um homem de ciência.

Agradecimentos

Luís Miguel Carolino agradece o apoio de da Fundação para a Ciência e Tecnologia, Portugal, no âmbito do projeto UID/SOC/03126/2019. Ana Simões agradece o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia, Portugal, no âmbito do projeto UID/HIS/00286/2019 e do projeto VISLIS - PTDC/IVC-HFC/3122/2014

Referências

- [1] Sobre a expedição de Eddington, sua organização e importância, veja-se E. Mota, P. Crawford e A. Simões, "Einstein in Portugal: Eddington's expedition to Principe and the reactions of Portuguese astronomers", *The British Journal for the History of Science* N° 42, pp. 245-273 (2009).
- [2] Uma descrição breve da vida e atividade científica de Oom pode encontrar-se em M. S. de Melo e Simas, "Elogio histórico do sócio efectivo Frederico Oom", *Boletim da Academia das Ciências de Lisboa*, 3 série, pp. 600-626 (1931).
- [3] George F. Chambers, *História dos Eclipses ... adaptada aos leitores portugueses* por Lopes d'Azevedo, Lisboa, Ferreira e Oliveira Limitada (1905), p. 5. Registe-se a curiosidade do texto original "whilst he is filling his pipe or mixing a whisky and soda" (*The Story of Eclipses*, Londres, 1902, p. 9) ter sido traduzido por "enquanto fuma o seu cigarro ou engole o seu café".

- [4] Arquivo Histórico do Observatório Astronómico de Lisboa, a partir daqui referido como AHOAL, C233.
- [5] Campos Rodrigues, *Avis aux astronomes se rendant en Portugal pour la prochaine éclipse*, Lisbonne (Tapada), *Observatoire royal*, 1900, avril 2, AHOAL A65.
- [6] *Astronomische Nachrichten* 152 (1900), pp. 207-208; *Bulletin Astronomique*, serie I, 17 (1900), p. 161.
- [7] Para maiores detalhes sobre os diferentes programas de investigação, veja-se Luis Miguel Carolino e Ana Simões, "The eclipse, the astronomer and his audience: Frederico Oom and the total solar eclipse of 28 May 1900 in Portugal", *Annals of Science* N° 69, pp. 223-226 (2012).
- [8] Walter Maunder (ed.), *The Total Solar Eclipse 1900. Report of the expeditions organized by the British Astronomical Association to observe the total solar eclipse of 1900, May 28*, Londres, Knowledge Office (1901), p. 28.
- [9] AHOAL, C233, Correspondência, Gibbs, 30 de Maio de 1900.
- [10] Registe-se que o AHOAL (C233) preserva o documento em que estas duas astrónomas amadoras solicitam ao Comité do eclipse os privilégios garantidos aos astrónomos estrangeiros que viessem observar o eclipse em Portugal. Esta documentação foi reunida e organizada por Frederico Oom.
- [11] W. H. M. Christie and F. W. Dyson, "Total Eclipse of the Sun, 1900, May 28. Preliminary Account of the Observations Made at Ovar, Portugal", *Proceedings of the Royal Society of London*, 67, p. 393 (1900).
- [12] AHOAL, [Livro de Visitas], DD 455, 28 de maio de 1900.
- [13] Essa correspondência pode ser consultada no AHOAL, C469 e A65.
- [14] George F. Chambers, *The Story of Eclipses simply told for General Readers*, Londres, p. 240 (1902). Como já foi mencionado na nota 1, este livro foi traduzido para português. Contudo, como provavelmente o tradutor usou a primeira edição publicada em 1899 - portanto, antes do eclipse - não traduziu as partes relativas à expedição a Portugal, introduzidas posteriormente por Chambers.



Luís Miguel Carolino é professor auxiliar no Instituto Universitário de Lisboa (ISCTE - IUL) e investigador integrado do CIES - IUL. Doutor em História, com tese na área de História da Ciência, pela Universidade de Évora (2001), desenvolveu atividade no Instituto e Museo di Storia della Scienza, Florença, no Museu de Astronomia e Ciências Afins, Rio de Janeiro, e no Museu da Ciência da Universidade de Lisboa, antes de ingressar no ISCTE-IUL em setembro de 2013.



Ana Simões, é Professora de História das Ciências na Faculdade de Ciências, da Universidade de Lisboa, co-coordenadora do Centro Interuniversitário de História das Ciências e Tecnologia e presidente da European Society for the History of Science. As suas áreas de interesse científico incluem a história da química quântica e história das ciências em Portugal, com ênfase recente na história urbana das ciências e abordagens ao antropocénico na perspectiva da história das ciências.

Em Busca do Sol: expedições astronômicas para observação de eclipses totais do Sol no Brasil (1858-1919)

Christina Helena Barboza¹

¹Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST), Rio de Janeiro

Assim como no caso das expedições naturalistas, ao longo do tempo houve uma grande variedade nas formas de organização, composição e financiamento de expedições astronômicas para a observação de eclipses totais do Sol. De modo geral, contudo, podemos afirmar que o final do século XIX e as primeiras décadas do século XX marcaram o apogeu dessa prática, em diversos países, inclusive no Brasil. Nesse período também ocorreu uma tendência à profissionalização e a um maior controle institucional dessas iniciativas, seus participantes, e da divulgação de seus resultados.

As expedições astronômicas no Império do Brasil

No Brasil, a instituição oficial na organização das expedições astronômicas para observação de eclipses totais do Sol foi o Imperial Observatório do Rio de Janeiro (IORJ) – após a proclamação da República renomeado Observatório Nacional (ON). O Observatório fora criado em 1827, logo após a independência, com o objetivo principal de fornecer o ensino prático em Astronomia aos alunos das Academias Militar e da Marinha. Note-se que foi apenas posteriormente, em torno de 1848, após sua instalação no morro do Castelo, que passou a exercer atividades rotineiras de observação astronômica e meteorológica. Em 1871, foi desligado das suas raízes militares, e passou a contar com um corpo permanente – embora enxuto – de profissionais civis. Até 1881, quando foi criado o Observatório da Escola Politécnica (hoje, Observatório do Valongo, ligado à Universidade Federal do Rio de Janeiro), era a única instituição no país devotada à Astronomia.

A primeira expedição do IORJ visando a observação de um eclipse total do Sol contou com forte apoio do governo imperial. O eclipse teve lugar em 7 de setembro de 1858, e o local escolhido para sua observação, dentro da faixa de totalidade, foi Paranaguá (Paraná). Os componentes eram o coronel Antônio Manuel de Mello (1802-1866), di-

retor da instituição, Cândido Batista de Oliveira (1801-1865), reconhecido professor aposentado de mecânica racional, quatro ajudantes, e Emmanuel Liais (1826-1900), astrônomo francês recém-chegado, que juntou-se ao grupo. Liais viajara para o Brasil com o objetivo de observar o eclipse, mas sem vínculo institucional algum, munido apenas de uma carta de recomendação. O governo colocou à disposição dos observadores dois navios de sua frota, junto com as respectivas tripulações, e ainda o Arsenal de Guerra, para que fosse providenciado todo o material necessário à montagem das estações provisórias.

Foram estabelecidas quatro estações em Paranaguá e suas cercanias, ficando o acampamento central instalado no jardim de uma residência particular, perto da praia, devido à dificuldade de transporte dos instrumentos. No dia do eclipse choveu de manhã, mas depois o céu clareou. No início do fenômeno foi dado um tiro de canhão. Explica-se: em 7 de setembro comemora-se a independência do Brasil. De fato, é possível afirmar que o governo reconhecia a importância científica do fenômeno, mas não perdeu do horizonte seu componente político, simbolizado no imponente aparato militar montado em torno da expedição.

A totalidade teve início às 11:00:24, e durou 1 min 12 s, menos do que o tempo previsto. O programa científico do Observatório consistia na determinação do instante dos contatos, e na observação da coroa, das protuberâncias e das manchas solares, descritas minuciosamente no Relatório da Comissão. Já os estudos de Liais foram mais conclusivos. O primeiro deles, feito com base na polarização da luz, levou-o a afirmar o pertencimento da coroa ao Sol. O segundo, deteve-se sobre o tal erro na previsão do eclipse. Segundo Liais, era necessária uma correção da longitude de Paranaguá, e um novo método para fazê-lo podia valer-se da fotografia.

De acordo com o Relatório, Liais teria tirado 15 fotografias durante o eclipse, das quais 12 resultaram “perfeitas”. O processo utilizado, descrito brevemente no texto, teria sido o colódio seco, de uso muito recente. (Oliveira et al., 1891a) No parecer elaborado para a Academia de Ciências de Paris a propósito dos resultados científicos da expedição brasileira, os astrônomos Hervé Faye (1814-1902) e Charles Delaunay (1816-1872) chegaram a afirmar que a obtenção dessas

fotografias era “o que há de mais singular, e a Comissão brasileira está perfeitamente no direito de apresentar o fato como novo”. (Faye, Delaunay, 1859)

Não obstante, os dois pareceristas avaliaram que as imagens apresentavam problemas, e mais, devido à antecipação imprevista do final da totalidade, a expedição não conseguira fotografar a coroa solar. Dois anos depois, no eclipse total do Sol de 18 de julho de 1860, visível na Espanha, Warren De la Rue (1815-1889) conseguiu obter as primeiras fotografias bem-sucedidas da totalidade, utilizando placas de vidro em colódio úmido. Talvez esse sucesso tenha constrangido Liais. O fato é que ele jamais divulgou suas fotografias, mas limitou-se a encomendar ao ilustrador Noël-Eugène Sotain uma gravura da coroa solar por ele vista no Brasil, publicada na obra “L’Espace Céleste”.

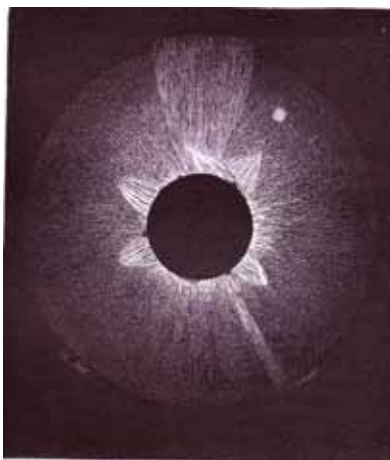


Fig. 1 - Eclipse do Sol de 7 de setembro de 1858, visível em Paranaguá, no sul do Brasil, em gravura publicada por Emmanuel Liais na obra “L’Espace Céleste” (Garnier-Frères, Paris, 1881).

Em 25 de abril de 1865, outro eclipse total do Sol foi visível no Brasil, igualmente no litoral sul. Nessa ocasião, o país estava imerso em tensas disputas nas fronteiras a sudoeste, as quais resultaram na Guerra do Paraguai, deflagrada alguns dias depois. Ainda assim, de acordo com a historiografia, o Observatório teria organizado uma expedição para a observação do fenômeno, em Camboriú (Santa Catarina). A duração da totalidade do eclipse era favorável, em torno de 5m, mas choveu na hora, e a expedição não deixou relatório científico. O mau tempo também prejudicou outros observadores, tais como o naturalista Guilherme Schuch de Capanema (1824-1908), o capitão de fragata José da Costa Azevedo (1825-1904), e o capitão-tenente João Soares Pinto.

Tamanho interesse na observação de um eclipse em plena guerra pode ser entendido pelo programa científico dos participantes até aqui citados, centrado na determinação dos instantes dos contatos. Essa preocupação ligava-se a alegação anterior de Liais, feita com base em suas observações do eclipse de 1858, de que era necessário corrigir também a longitude do IORJ. Com uma guerra em curso, o empenho dos brasileiros era sobretudo evitar que a exatidão do principal meridiano de referência para a demarcação das fronteiras do país fosse contestada, ainda mais por um estrangeiro. A chamada “questão do meridiano

absoluto” iria gerar uma controvérsia científica de décadas, a qual contribuiu para o desgaste político e o regresso de Liais à sua terra natal.

No eclipse de 1865, contudo, também foram realizadas no IORJ aquelas que são consideradas pela historiografia as primeiras observações astrofísicas no Brasil, por Camilo Ferreira Armond (1815-1882), o Barão de Prados. O Rio de Janeiro estava no limite da faixa de totalidade do eclipse; de qualquer modo, por causa do tempo nublado, o último contato foi o único observado por ele, às 11:54. Em seu relato, publicado pela Academia de Ciências de Paris, o Barão basicamente descreve os aspectos dos discos do Sol e da Lua, e as variações de luminosidade e de temperatura. Como Liais em 1858, aprofunda-se um pouco mais apenas na confirmação da origem solar da coroa, segundo ele rapidamente vislumbrada.

Circulação de homens e ideias nas expedições astronômicas no início da República

Por ocasião do eclipse de 16 de abril de 1893, visível no Ceará, o Observatório – já então Nacional – estava às voltas com a turbulência política, econômica e social que marcou os primeiros anos da República no Brasil. Luiz Cruls (1848-1908) era seu diretor desde o período final do Império, e foi mantido durante essa fase difícil – fato considerado essencial para a sobrevivência da instituição.

Entre junho de 1892 e fevereiro de 1893, Cruls esteve à frente da “Comissão Exploradora do Planalto Central do Brasil”, criada com o objetivo de determinar e demarcar o território onde deveria ser erguida a nova capital do país, prevista na primeira Constituição da República. Logo após, dedicou-se a redigir o Relatório da Comissão. Por isso, não pode participar da expedição do Observatório para observação do eclipse, tendo designado para tanto o astrônomo Henrique Morize (1860-1930) e o engenheiro militar Alípio Gama (1863-1935), acompanhados de dois funcionários. Morize estabeleceu acampamento na foz do rio São Gonçalo, entre Fortaleza e Paracuru, onde ficaram os astrônomos ingleses. A totalidade teve início às 11:40, e duração de 4 min 43 s. De acordo com o telegrama de Morize ao Observatório, o eclipse teria sido “observado [em] medíocres condições”; talvez por isso, ele não tenha publicado relatório algum. (Barboza, 2010)

A essa altura, Morize já era um praticante entusiasta da fotografia. Durante a Comissão do Planalto Central, produziu dezenas de fotografias, nem todas publicadas junto com o Relatório de Cruls. Isso nos autoriza a afirmar que algumas imagens características da paisagem do Ceará – também inéditas –, as quais encontram-se misturadas aos originais daquela coleção de fotografias, são de sua autoria, e foram feitas à mesma época, durante a expedição para observação do eclipse de 1893.



Fig. 2 - Paisagem do Ceará, com destaque para as dunas e as palmeiras de carnaúba, típicas do semiárido e símbolo do estado, em fotografia de Henrique Morize obtida durante a expedição para observação de eclipse de 16 de abril de 1893. (Fonte: Biblioteca de Obras Raras do Observatório Nacional)

A expedição inglesa acampada em Paracuru era formada por Albert Taylor (1865-1930) e William Shackleton (1871-1921), e tinha o objetivo de fotografar a coroa solar utilizando uma câmera prismática. Outra expedição, com objetivo semelhante, foi enviada à costa oeste da África, para evitar o risco do mau tempo prejudicar o programa de observações. No seu Relatório, Shackleton descreve detalhadamente a instabilidade do tempo nos dias anteriores ao eclipse, mas afirma que no momento da totalidade o céu permaneceu aberto, o que permitiu-lhe obter uma sequência de 24 fotografias. (Lockyer, 1897)

Não obstante, as condições logísticas encontradas no Brasil teriam sido bem precárias. O desembarque da bagagem na praia, no local mais próximo ao escolhido para a observação, teve que ser feito em jangadas, e depois, seu transporte até Paracuru, em carros de boi. Além disso, de acordo com o relato de Shackleton, a única ajuda na construção dos abrigos e instalação dos instrumentos teria sido prestada pelo engenheiro de uma firma inglesa, que também serviu-lhe de intérprete. Pelo seu relato, depreende-se que não houve contato algum com as autoridades brasileiras previamente à realização da expedição.

Já para a observação do eclipse de 10 de outubro de 1912, visível na região centro-sul do Brasil, os ingleses buscaram o apoio das autoridades brasileiras e de Morize, diretor do ON desde 1908. Na verdade, desde o início do século XX, o intercâmbio de informações sobre os preparativos, programas e resultados das expedições para observação de eclipses solares tornou-se prática comum, através das redes de instituições científicas existentes.

Seis expedições estrangeiras vieram ao Brasil observar o eclipse de 1912, cuja totalidade estava prevista para as 10:15, com duração de 1 m 55 s. Por sugestão de Morize, a expedição oficial inglesa, formada por Charles Davidson (1875-

1970), Arthur Eddington (1882-1944) e John Atkinson (1844-1924) – astrônomo amador –, instalou-se na cidade de Passa Quatro (Minas Gerais), local escolhido pela expedição do ON. Outro astrônomo amador inglês, James Worthington, viajou por conta própria, e juntou-se ao grupo já no Brasil. Na mesma cidade instalou-se também a expedição francesa, constituída por Milan Stefanik (1880-1919) e um ajudante.



Fig. 3 - Membros das expedições inglesa, francesa e brasileira encarregadas da observação do eclipse de 10 de outubro de 1912, reunidos em Passa Quatro. Da esquerda para a direita, em pé: Domingos da Costa, Mário de Souza, Olyntho de Aguirre (auxiliar dos ingleses), Cap. Antônio Ferreira da Silva (voluntário), Henrique Morize, Marc Ferrez e Jaromir Kralicek (auxiliar de Stefanik); sentados: Charles Davidson, John Atkinson, Arthur Eddington e Milan Stefanik. (Fonte: Biblioteca de Obras Raras do ON)

Além de situar-se na faixa de totalidade, a cidade de Passa Quatro possuía a vantagem estratégica de ser acessível desde o Rio de Janeiro através de estrada de ferro – fator levado em conta por Morize e demais astrônomos. Como conforto adicional, foi colocado um vagão à disposição das equipes, para leva-las até o local dos acampamentos, em uma fazenda. (Caffarelli, 1980) Na cidade, todos permaneceram hospedados no mesmo hotel, o Hotel Pensão, situado no alto de uma colina, em um “prédio de construção recente, elegantíssimo, com o aspecto de uma casa suíça”.

As outras três expedições estrangeiras instalaram-se em cidades menores, também servidas por ferrovias. Na cidade mineira de Cristina ficaram a expedição chilena e uma das expedições argentinas, organizada pelo Observatório de Córdoba. A expedição do Observatório Nacional do Chile era chefiada por seu diretor, Friedrich Ristenpart (1868-1913), e integrada por três profissionais da instituição, aos quais juntaram-se os alemães Walter Knoche (1881-1945) e Jakob Laub (1882-1962), este último professor de Física na Universidade de La Plata. Entre 1907 e 1909, quando Laub ainda trabalhava na Alemanha e Albert Einstein no escritório de patentes na Suíça, os dois publicaram alguns artigos em coautoria. Assim, em 1912, Laub não só era defensor da teoria da relatividade especial, como possuía um conhecimento profundo sobre seu desenvolvimento. (Pyenson, 1985)

Já o Observatório de Córdoba era dirigido por Charles

Perrine (1863-1951), um dos maiores especialistas na observação de eclipses do Sol. Devido a essa experiência, Perrine foi instado por Erwin Freundlich (1885-1964), colaborador de Einstein na Universidade de Berlim, onde este último se instalara após deixar a Suíça, a fotografar o eclipse no Brasil com o objetivo de medir o desvio da luz de estrelas próximas ao limbo do Sol, e assim verificar a teoria da relatividade (especial). Para realizar essa experiência pioneira, Perrine viajou ao Brasil com duas lentes objetivas de 75 mm de diâmetro, emprestadas por William Campbell (1862-1938), diretor do Observatório de Lick, e uma equipe de três auxiliares.

A outra expedição argentina foi organizada pelo Observatório de La Plata, e contou com a participação de seu diretor, William Hussey (1862-1926), dois assistentes e um engenheiro brasileiro, como ajudante e intérprete. Seu acampamento foi instalado na cidade de Alfenas (São Paulo).

O Brasil participou dos esforços para a observação do eclipse de 1912 com várias expedições. O recém-criado Observatório de São Paulo enviou uma equipe para a cidade de Cruzeiro (São Paulo), composta pelo seu diretor e três funcionários. Seu principal objetivo era efetuar observações meteorológicas. O próprio ON, além de ter aberto ao público as portas de sua sede, no morro do Castelo, também organizou uma expedição secundária, enviada a Silveiras (São Paulo). Quase às vésperas do eclipse, o Ministério da Marinha e a Diretoria dos Telégrafos ainda organizaram uma expedição mista, cujo objetivo era verificar a influência deste fenômeno sobre a propagação das ondas de rádio.

A expedição oficial do ON era chefiada por Morize, e formada pelos astrônomos Domingos Fernandes da Costa (1882-1956), Mário Rodrigues de Souza (1889-1973), Alix Corrêa de Lemos (1877-1957), e Gualter de Macedo Soares, assistente. A eles juntaram-se dois voluntários e um fotógrafo, Augusto Soucasseaux. Morize aproveitara a ocasião para pedir ao governo recursos extraordinários, empregados na aquisição de instrumentos novos e na modernização de antigos. Os dois principais foram uma luneta fotográfica de Mailhat, de 8 m de distância focal, conjugada a um celostato do mesmo fabricante, e um fotoheliógrafo de Steinheil, portátil, com 10cm de abertura. Como choveu no dia do eclipse, os instrumentos não foram utilizados. Na verdade, apenas Knoche e Laub, cujos objetivos consistiam na realização de observações meteorológicas e medições de eletricidade atmosférica, publicaram os resultados de seu trabalho.

A rede de contatos de Morize com astrônomos e sociedades científicas estrangeiras foi mais uma vez acionada no planejamento das observações do eclipse de 29 de maio de 1919. Atendendo a uma solicitação de Perrine, feita em meados de 1917, Morize empenhou-se na coleta de dados meteorológicos de localidades na região nordeste do Brasil onde a totalidade seria visível. Com os resultados, preparou um longo Relatório contendo também informações sobre os sistemas de transporte, hospedagem, e a população e hábitos locais. No início de 1918, extratos desse documento foram enviados à Royal Astronomical Society, e sua íntegra foi publicada na revista "L'Astronomie", da Sociedade Astronômica da França. (Morize, 1919) Foi Morize quem indicou

Sobral como a localidade no Brasil que reunia as melhores condições para receber as expedições.

As duas expedições inglesas então organizadas, formadas respectivamente por Davidson e Andrew Crommelin (1865-1939), e Eddington e Edwin Cottingham (1869-1940), partiram juntas no dia 8 de março, a primeira rumo ao Brasil, a outra rumo à Ilha do Príncipe, na costa oeste da África. Davidson e Crommelin chegaram no Brasil, em Belém (Pará), com bastante antecedência, no dia 23 de março; assim, aproveitaram o tempo "livre" para visitar Manaus e Belém e conhecer a floresta amazônica. (Crommelin, 1919) Eles só chegaram em Sobral no dia 30 de abril, e, de acordo com o relato de Crommelin, ali encontraram tudo preparado.

A expedição brasileira enviada a Sobral era constituída por Morize, os veteranos Costa e Theophilo Lee (1873-1926) (auxiliar dos ingleses em 1912), o astrônomo Allyrio de Mattos (1889-1975), o matemático Lelio Gama (1892-1981), um meteorologista, mecânico e carpinteiro. Entre os equipamentos levados a campo pelos brasileiros constavam a luneta Mailhat e a luneta de Steinheil, além de três espectrógrafos. Os instrumentos foram instalados, sob tendas, na Praça do Patrocínio, e ficaram a cargo, respectivamente, de Mattos, Morize, e a dupla Costa e Lee.

De acordo com o Relatório de Morize, foram tiradas diversas fotografias do espectro da coroa solar, com o objetivo de verificar a presença de elementos químicos; nenhuma delas, contudo, com a nitidez necessária. (Morize, 1920) Já na obtenção de imagens diretas da coroa durante a totalidade os brasileiros foram melhor sucedidos. A despeito de ter enfrentado vários problemas com a Steinheil por ele utilizada, Morize conseguiu cinco fotografias, sendo duas avaliadas como "boas". Mattos obteve sete fotografias, dentre oito programadas, com tempos de exposição diferentes. Em duas delas, tomadas com curta exposição, ainda registrou uma bela protuberância solar.



Fig. 4 - Negativo de vidro da coroa solar, obtido por Allyrio de Mattos com a luneta de Mailhat. (Fonte: Biblioteca de Obras Raras do ON)

Considerações finais

Entre as décadas de 1850 e 1940, em diversos países, as histórias da Astronomia, dos processos fotográficos, e da organização de expedições para a observação de eclipses totais do Sol estiveram profundamente entremeadas. (Pang, 2002) Mesmo o experimento considerado crucial na verificação da teoria da relatividade foi realizado durante um eclipse solar, e valeu-se de fotografias de estrelas. No Brasil não foi diferente. Desde 1858 até o famoso eclipse de Sobral, com maior ou menor apoio dos governos, o Observatório Imperial/Nacional enviou expedições para a observação do fenômeno. Em todas elas, houve uma preocupação em aplicar a fotografia. Assim como os Relatórios científicos, esses negativos de vidro constituem fontes inesgotáveis para os estudos de astrônomos, físicos, e historiadores das ciências.

Referências

Barboza, C. H. "Ciência e natureza nas expedições astronômicas para o Brasil (1850-1920)". Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas, v. 5, n. 2, p. 273-294. (2010)

Crommelin, A. C. D. "The eclipse expedition to Sobral". The Observatory, London, v. 42, n. 544, p. 368-371. (1919)

Dyson, F.; Eddington, A.; Davidson, C. "A determination of the deflection of light by the Sun's gravitational field, from observations made at the Total Eclipse of May 29, 1919". Philosophical Transactions of the Royal Society of London, v. 220, p. 291-333. (1920)

Eddington, A. S.; Davidson, C. "Total Eclipse of the Sun, 1912 October 10; Report on an expedition to Passa Quatro, Minas Geraes, Brazil". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, London, v. 73, p. 386-390. (1912)

Eisenstaedt, J.; Videira, A. A. P. "A Relatividade Geral verificada: o eclipse de Sobral de 29/05/1919". In: Moreira, I. C.; Videira, A. A. P. (Orgs.) Einstein e o Brasil. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, p. 77-99. (1995)

Faye, H.; Delaunay, C. "Rapport sur un Mémoire adressé par M. Liais à l'occasion de l'éclipse totale du 7 septembre 1858". Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences, t. 48, p. 159-174. (1859)

Morize, H. "Resultados obtidos pela Comissão Brasileira do eclipse de 29/05/1919". Revista de Ciências, v. 4, n. 3, p. 65-81. (1920)

Morize, H. "L'Éclipse totale de Soleil du 29 Mai 1919". L'Astronomie, v. 33, Fev. 1919, p. 49-52. (1919)

Mourão, R. R. F. "Einstein: de Sobral para o mundo". Sobral: UVA. (2003)

Oliveira, C. B.; Mello, A. M.; Liais, E.; Nunes, F. D.; Baraúna, B. S.; Galvão, R. E. G.; Coelho Junior, J. F. "Eclipse total do Sol em 7 de setembro de 1858". Revista do Observatório, Rio de Janeiro, v. 6, n. 9, p. 131-134. (1891a)

Pang, A. S-K. "Empire and the Sun: Victorian Solar Eclipse Expeditions". Stanford: Stanford University Press. (2002)

Pyenson, L. "Cultural imperialism and exact sciences; German expansion overseas (1900 - 1930)". New York: Peter Lang Publishing. (1985)



Christina Helena Barboza, possui doutorado em História Social pela Universidade de São Paulo (2002). É pesquisadora em História das Ciências no Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST), e professora na Pós-Graduação em Preservação de Acervos de Ciência e Tecnologia dessa instituição. Suas pesquisas concentram-se em temáticas pertinentes à história do Observatório Nacional, abrangendo suas diferentes práticas científicas, com especial atenção para as expedições astronômicas. Foi presidente da Sociedade Brasileira de História da Ciência (SBHC).

Livros e Multimídia

O Eclipse de Einstein - Entre Lisboa, Londres, Sobral e o Príncipe



Integrado nas comemorações do centenário do eclipse de 29 de maio de 1919 este livro, editado pelo Clube do Colecionador dos Correios, centra a sua narrativa nos acontecimentos históricos que levaram à primeira confirmação da relatividade geral de Albert Einstein,

através de um programa de observações dedicadas. Como é habitual nesta colecção, o livro inclui a edição filatélica alusiva ao tema. As duas expedições britânicas, organizadas à ilha do Príncipe – na época sob administração portuguesa – e a Sobral, no Brasil, seriam bem-sucedidas e a divulgação dos resultados, em novembro de 1919, tornaria a figura de Einstein conhecida em todo o mundo.

Em particular, é abordado nesta obra o papel dos astrônomos, das autoridades e de várias figuras locais, quer em Portugal continental e no Príncipe, quer no Brasil, no necessário apoio técnico e logístico, crucial no sucesso das expedições inglesas.

Os autores, Nuno Crato e Luís Tirapicos, começam por explicar o contexto histórico e científico e os objetivos e técnicas envolvidas na observação do eclipse de 1919. Prosseguem com a descrição detalhada dos preparativos e da execução das expedições à ilha do Príncipe e a Sobral. Por fim, são discutidas as reações aos resultados obtidos pelos astrônomos britânicos e posteriores confirmações experimentais da relatividade generalizada, incluindo a primeira detecção de ondas gravitacionais em setembro de 2015.

Nuno Crato e Luís Tirapicos
Lisboa: CTT, 2019.
200 pp.
ISBN: 978-972-8968-98-4

Eclipses totais do Sol em Portugal: de 1900 a 1919

Luís Tirapicos¹

¹Centro Interuniversitário de História das Ciências e da Tecnologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa

ltirapicos@gmail.com

Resumo

No início do século XX, registaram-se vários eclipses totais do Sol em Portugal, ou muito próximo dos seus limites territoriais. Neste artigo discutirei a participação de astrónomos portugueses e estrangeiros nas observações que, na época, representavam a única janela para o estudo da coroa, das protuberâncias e de outros aspectos da emergente física solar. Com o apoio das autoridades portuguesas, estas equipas aproveitaram igualmente o fenómeno para estabelecer relações entre si, incluindo colaborações com astrónomos amadores.

Introdução

Na segunda metade do século XIX, a melhoria dos sistemas de transportes e o crescente apoio logístico proporcionado por autoridades locais ou coloniais, fizeram das expedições aos eclipses totais do Sol um dos principais empreendimentos da investigação astronómica. O interesse pelos eclipses solares foi incrementado pelo surgimento de novas técnicas de observação e registo, como a fotografia e a espectroscopia, que permitiram o estudo da física e química do Sol [1].

A península Ibérica marcou indelevelmente a história das observações do astro-rei uma vez que foi em Rivabellosa (Miranda de Ebro, Espanha), no eclipse de 18 de julho de 1860, que foram obtidas as primeiras fotografias da coroa solar. O autor da façanha foi o astrónomo amador britânico Warren de la Rue (1815-1889). De facto, diversos desenvolvimentos técnicos que deram origem ao surgimento da astrofísica foram arriscados e protagonizados por astrónomos amadores, vários deles com fortuna e alguma formação científica [2,3]. Contudo, no eclipse de julho de 1860 estiveram também presentes astrónomos profissionais, como aconteceu com a delegação portuguesa onde se destacava o astrónomo da Observatório da Universidade de Coimbra Rodrigo de Sousa Pinto (1811-1893) [4].

Porém, a partir do início do século XX as condições e meios técnicos envolvidos no estudo da física solar, e em particular os instrumentos e técnicas usadas nas expedições aos eclipses totais, ficaram fora do alcance dos astrónomos amadores. Assim, o estudo da coroa, das protuberâncias, da composição química e da ligação do ciclo solar à actividade magnética na Terra foi levado a cabo essencial-

mente por equipas profissionais e desenvolvido num contexto institucional.

O Eclipse total de 28 de maio de 1900

No quadro do tradicional interesse dos jesuítas pela astronomia – além de realizarem observações nos seus colégios – diversas expedições foram organizadas pelos inicianos portugueses em finais do século XIX e inícios do século XX. Os mais antigos registos de observações de eclipses, neste período, datam da década de 1890 e são respeitantes ao Colégio de São Francisco, em Setúbal [5]. O eclipse do Sol de 28 de maio de 1900, cuja faixa de totalidade atravessou o centro norte de Portugal continental (ver figura 1), representava mais uma oportunidade

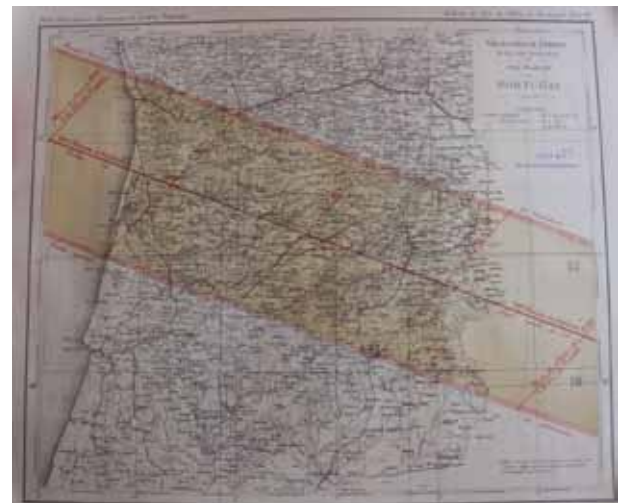


Fig. 1 - Mapa da trajetória da sombra da Lua, em Portugal continental, no eclipse total do Sol de 28 de maio de 1900. Foi executado por Frederico Oom, do Real Observatório Astronómico de Lisboa.

de realizar observações e os professores jesuítas e alguns dos seus alunos não a perderam. Docentes do colégio de São Fiel (Louriçal do Campo) organizaram uma expedição a Benespera e Capinha e divulgaram os resultados num pequeno opúsculo, publicado no final daquele ano [6]. A partir dos contactos e pedidos de aconselhamento realizados para a preparação e análise das fotografias deste

eclipse, iniciaram correspondência e uma profícua colaboração com Frederico Tomás Oom (1864-1930), do Real Observatório Astronómico de Lisboa. Por sua vez, Oom aproveitou o eclipse de 1900 para iniciar uma rede de correspondência com diversos astrónomos amadores, além de se empenhar na popularização da astronomia para um público mais vasto [7].

Em 30 de agosto de 1905, registou-se um novo eclipse total na Península Ibérica mas desta feita sem atingir o território português. Os jesuítas dos colégios de São Fiel e de Campolide (Lisboa) juntaram-se em expedição conjunta para observar o fenómeno em Espanha. Montaram as suas estações em Tortosa, Palencia e Burgos, aproveitando a presença de outros padres da Companhia ou a existência de um observatório jesuíta – caso do Observatório del Ebro, em Tortosa. O grupo do Colégio de Campolide, liderado por Oliveira Pinto, estacionou no Observatório, em Tortosa, enquanto o grupo de São Fiel, liderado por Joaquim da Silva Tavares (1866-1932) e por Valério Cordeiro (1877-1940), deslocou-se para Palencia. Em Burgos – um dos principais pontos de encontro para astrónomos de várias nações – ficou um grupo formado por um professor de cada colégio e por dois alunos de Campolide: José Adriano Pequito Rebelo (1892-1983) e Simeão Pinto de Mesquita de Magalhães (1889-1989) [8,9].

Embora inicialmente a expedição conjunta de São Fiel e Campolide se tivesse configurado como uma visita de estudo, com evidentes fins pedagógicos, cedo se transformou numa tentativa de contribuir com observações úteis para a ciência. Aparentemente, a experiência e a confiança adquirida no eclipse 1900 permitiam agora pensar num programa mais ambicioso. Um espectroscópio foi mandado construir de propósito na casa Calmels, em Paris, com o fim de registar fotograficamente o espectro da coroa solar. O fim expresso era o de "...comprovar por este processo objectivo a existência da risca verde" [8]. Apesar de a experiência não ter sido bem-sucedida ficou patente o esforço de aproximação aos programas profissionais da época.

Nesta expedição, os estudantes participaram diligentemente nas observações. Pinto Mesquita ficou responsável por fotografar o eclipse, enquanto Pequito Rebelo desenhou a coroa solar. Frederico Oom apreciou particularmente o desenho de Pequito Rebelo, esboço que seria dado à estampa na publicação dos jesuítas portugueses (ver figura 2). Como relata Rebelo no referido opúsculo, de modo a não adulterar o registo, não fez qualquer retoque posterior aos breves instantes de que dispôs para delinear o que via em redor do disco solar.

No eclipse de 28 de maio de 1900, foi ainda notória a presença em Portugal de uma expedição do Observatório de Greenwich que integrava o astrónomo real de Inglaterra William Christie (1845-1922) e os seus assistentes Franck Dyson (1868-1939) – que ocu-



Fig. 2 - Desenho da coroa solar feito em Burgos (Espanha) por Pequito Rebelo, um aluno de 13 anos do colégio jesuíta de Campolide, durante o eclipse total de 30 de agosto de 1905.

paria o cargo de astrónomo real a partir de 1910 – e Charles Davidson (1875-1970). O contingente britânico era, sem dúvida, o mais numeroso mas também se deslocaram ao norte do país peritos alemães e até duas astrónomas amadoras americanas [7]. Os observadores estrangeiros gozaram de facilidades especiais concedidas pelo governo português, tendo-lhes sido dispensado o exame alfandegário das bagagens e equipamentos, oferecido transporte ferroviário durante a sua estadia, acompanhamento de forças de segurança e até tendas de campanha (ver caixa).

A equipa de Greenwich ficou instalada em Ovar, onde a totalidade durou 84 segundos e meio, e realizou observações fotográficas e espectroscópicas [10,11]. Algumas placas fotográficas, quadradas e com cerca de 37 cm de lado, registaram detalhes das proeminências solares e da estrutura interna da coroa enquanto outras mostravam uma larga extensão desta última. Por corresponder a um período de mínimo na actividade cíclica do Sol a coroa apresentou-se neste eclipse menos brilhante e com menos raios e estrutura que em eclipses anteriores. Porém, a utilização de uma "câmara dupla" permitiu a Franck Dyson registar partes da coroa solar que não eram visíveis a olho nu.

Também uma importante delegação da Associação Astronómica Britânica, que reunia astrónomos amadores e profissionais, ocupou postos de observação em Ovar (em terra e ao largo, num navio inglês) e em Estarreja. Realizaram sobretudo observações visuais com pequenos instrumentos e o desenho foi o meio de registo mais utilizado [12].

UM ASTRÓNOMO REAL EM PORTUGAL

O astrónomo amador inglês e prolífico autor de obras de astronomia George Chambers (1841-1915) descreveu no livro *Historia dos Eclipses* [13] a expedição a Portugal para observar o eclipse total de 1900. Segue-se o seu relato dos acontecimentos:

Em maio de 1900 fomos a Portugal ver um eclipse total do Sol, na qualidade de membros da Associação Astronómica Britânica. Das nossas experiências

diremos que foram idênticas às que já tinham feito e às que hão-de fazer expedições semelhantes. Dos incidentes da digressão alguns contaremos porque podem servir para dar ideia do que passam os astrónomos quando percorrem o globo na faina de observar eclipses. (...) Pesando os prós e os contras que ofereciam os lugares de onde poderia observa-se o eclipse, optámos por Ovar, vila situada a umas vinte milhas [32 km] a sul do Porto. Antes de sairmos de Inglaterra, haviam-nos chegado às mãos exemplares de uma circular enviada pelo observatório Real de Lisboa aos astrónomos ingleses, com o fim de prevenir os que visitassem Portugal, por ocasião do eclipse, não só que não sofreriam incómodos na alfândega, mas também de que teriam passagem gratuita nos caminhos-de-ferro, protecção das forças militares e da polícia, e que lhes seriam fornecidas barracas de campanha, no caso de precisarem destes abrigos. Quem desejasse aproveitar-se dos mencionados privilégios deveria munir-se de um atestado passado por alguma corporação astronómica inglesa, que lhe autenticasse a identidade, e faze-lo visar pelo cônsul português em Londres.

O nosso quartel-general foi estabelecido no Porto. Quando chegou a ocasião de partirmos para Ovar, ficámos bastante surpreendidos por ver o interesse que despertava o eclipse na gente do povo português, que não supúnhamos muito estudiosa. Pois interessou-se imenso antes do fenómeno, durante ele e depois. Pode avaliar-se a animação popular pelo facto de que circularam comboios cheios de excursionistas não só de Lisboa para Ovar e Porto, viagem directa e curta, mas de Lisboa para Viseu, cidade que também ficava na linha central, numa região montanhosa, a 200 milhas [322 km] de distância da capital, sendo muito demorada e fastidiosa a viagem até lá.

Tanto nós como os nossos companheiros já antes de sair de Inglaterra estávamos na tenção de tomar alojamento no Porto, de onde iríamos de dia para Ovar, que distava três milhas [5 km] da linha central. Foram portanto desnecessárias as barracas e apenas aceitámos a refeição, que só alguns dos nossos tomaram, e a protecção da força pública. Esta regalia tinha sido pouco apreciada no começo, mas quando chegámos a Ovar e vimos os milhares e milhares de homens e mulheres do povo que nos esperavam, achámos excelente ideia o terem-nos posto à disposição a força armada para manter a ordem nas ruas e impedir que a multidão invadissem os lugares que nos eram concedidos para ali montarmos os nossos instrumentos e realizar as observações. (...) Os grupos de estrangeiros que fizeram observações em Ovar representavam a Inglaterra e a Alemanha. Os Ingleses eram o Astrónomo Real e alguns ajudantes do observatório de Greenwich e diversos membros da Associação Astronómica Britânica. O grupo de Greenwich tomou uma casa em Ovar e foi para lá alguns dias antes do eclipse porque tinha que fazer importantes preparativos; mas

o grupo da Associação Astronómica ia lá só de dia, por empregar apenas câmaras fotográficas e telescópios portáteis. Foi acompanhado e auxiliado materialmente por Mr. William Tait, bem conhecido negociante inglês estabelecido no Porto, o qual, embora não fosse astrónomo, fez algumas observações interessantíssimas a respeito da influência que teve o eclipse nas plantas e nos animais.

O eclipse híbrido de 17 de abril de 1912

O eclipse solar de 17 de abril de 1912 também trouxe a Portugal diversas equipas internacionais, que foram brindadas com um céu limpo. Deslocaram-se ao norte do país expedições da Rússia, Inglaterra e França. Pierre Salet (1875-1936), do Observatório de Paris, foi um dos astrónomos que viajou para Ovar. Mas as condições favoráveis, como documentou a imprensa da época, nomeadamente a Ilustração Portuguesa, permitiram também a um grande número de populares a fruição do eclipse, recorrendo por vezes a filtros caseiros feitos de vidro fumado (figura 3).



Fig. 3 - Página da Ilustração Portuguesa (29/4/1912), que documenta a presença de equipas internacionais de astrónomos e o interesse das populações no eclipse de 1912. Em baixo, astrónomos portugueses, franceses e russos reunidos no acampamento dos últimos.

Tratava-se de um eclipse híbrido, isto é, previa-se que fosse simultaneamente total e anular, embora alguns cálculos apontassem para a ocorrência de um eclipse anular. De facto, o eclipse foi total na parte central da faixa percorrida pela sombra da Lua – na península Ibérica – e anular nos extremos dessa faixa.

O astrónomo português da Universidade de Coimbra Francisco da Costa Lobo (1864-1945), um dos pioneiros da astrofísica em Portugal, registou o fenómeno em Ovar, com um grupo de alunos da Universidade de Coimbra, utilizando a nova tecnologia da cinematografia. Este foi, aliás, o primeiro eclipse filmado extensivamente, com câmaras a registarem o fenómeno em Portugal, Espanha, França, Bélgica e

Alemanha [1]. A partir da análise do filme, Costa Lobo chegou à conclusão que os polos da Lua são ligeiramente achatados. A teoria não foi aceite na época pela comunidade internacional que considerou que a hipótese do subtil achatamento se devia às irregularidades do relevo lunar. Todavia, medições realizadas em 2009 pelo satélite japonês Kaguya (Selene) confirmaram o achatamento dos polos da Lua dentro dos parâmetros avançados por Costa Lobo, há mais de um século [1].

Quem esteve também presente em Ovar foi o astrónomo russo da Academia Imperial de S. Petersburgo, e especialista em eclipses, N. Donitch. Tendo travado conhecimento com Costa Lobo em Ovar, Donitch convidou o astrónomo coimbrão a organizar uma expedição à Crimeia para observar o eclipse de 21 de agosto de 1914. Costa Lobo reuniu os apoios necessários, e preparou todo o equipamento, incluindo a sua câmara cinematográfica [14]. Já se encontrava em Berlim quando teve início a aguardada guerra (Primeira Guerra Mundial) pelo que foi forçado a regressar a Portugal e viu malogradas as observações planeadas ao longo de vários meses.

Erwin Finlay Freundlich (1885-1964), do Observatório de Berlin e William Wallace Campbell (1862-1938), do Observatório Lick nos Estados Unidos, organizaram igualmente expedições à Rússia para observar o eclipse de 21 de agosto de 1914 com o objectivo de testar a teoria da relatividade geral de Albert Einstein (1879-1955). Freundlich foi feito prisioneiro no início de agosto, com os restantes membros da expedição, apanhados pelo eclodir da Guerra e pela desconfiança dos militares russos, que suspeitaram dos instrumentos pensando tratar-se de equipamento de espionagem. Em resultado dos infelizes acontecimentos, o material foi confiscado e a equipa alemã só seria libertada, no início de setembro, a troco de prisioneiros russos capturados em iguais circunstâncias. A expedição de Campbell falhou devido ao mau tempo e a sua instrumentação foi levada para o sul da Rússia. Devido às dificuldades de transporte durante a guerra, Campbell só retomaria os instrumentos no final do conflito – o que dificultou novas tentativas dos astrónomos do Observatório Lick para medir a deflecção da luz das estrelas durante um eclipse solar, nomeadamente numa observação na costa ocidental dos Estados Unidos, em 1918, na qual Campbell teve de improvisar a instrumentação utilizada, mas sem sucesso.

A 3 de fevereiro de 1916, a faixa de totalidade passou a norte do arquipélago dos Açores e o Observatório Astronómico de Lisboa editou uma pequena publicação dando a conhecer as circunstâncias do fenómeno. No entanto, talvez porque o eclipse ocorreu no inverno e teria de ser observado no mar não são conhecidas observações relevantes.

Finalmente, em maio de 1919, duas expedições britânicas foram bem-sucedidas na medição do

encurvamento da luz das estrelas no campo gravitacional do Sol, confirmando os valores previstos pela teoria da relatividade geral de Einstein. Uma das estações, onde se encontravam Arthur Eddington (1882-1944) e Edwin Cottingham (1869-1940), ficou instalada na ilha do Príncipe, então sob administração portuguesa. Como aconteceu com expedições anteriores também Eddington e Cottingham contaram com o imprescindível apoio local – no seu caso os principais actores foram os astrónomos de Lisboa, as autoridades portuguesas e os agricultores do Príncipe [15].

Referências

1. V. Bonifácio, I. Malaquias, J. Fernandes, "The first astronomical hypotheses based on cinematographical observations: Costa Lobo's 1912 evidence for polar flattening of the Moon", *Journal of Astronomical History and Heritage* 13:2, pp. 159-168 (2010).
2. J. Lankford, "The Impact of photography in astronomy", in *Astrophysics and twentieth-century astronomy to 1950*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 16-39 (1984).
3. J. Lankford, "Amateurs and Astrophysics: A Neglected Aspect in the Development of a Scientific Specialty", *Social Studies of Science* 11:3, pp. 275-303 (1981).
4. R. R. de Sousa Pinto, "Eclipse Solar de 18 de Julho de 1860 - Memória apresentada ao Ex.mo Ministro do Reino pela Comissão Portuguesa", *Imprensa da Universidade, Coimbra* (1860).
5. F. M. Romeiras, "Os Colégios dos jesuítas e o ensino da física em Portugal (1858-1910)", *Gazeta de Física* 40:1, pp. 2-9 (2017).
6. "Eclipse do Sol de 28 de Maio de 1900. Observações dos Professores do Collegio de São Fiel", *La Bécarre, Lisboa*, (1900).
7. L. Carolino, A. Simões, "The eclipse, the astronomer and his audience: Frederico Oom and the total solar eclipse of 28 May 1900 in Portugal", *Annals of Science* 69:2, pp. 215-238 (2012).
8. L. G. Cabral, "O eclipse total do Sol no dia 30 de Agosto de 1905: Observações feitas pelas comissões das Academias Scientificas dos Collegios de S. Fiel e Campolide", *La Bécarre, Lisboa*, (1905).
9. F. Romeiras, H. Leitão, "Jesuítas e Ciência em Portugal, III - As expedições científicas e a observação dos eclipses solares de 1900 e 1905", *Brotéria* 174, pp. 213-227 (2012).
10. "The Recent Solar Eclipse", *Science*, 12:289, pp. 76-77 (1900).
11. F. Dyson, "Determinations of Wave-Length from Spectra obtained at the Total Solar Eclipses of 1900, 1901, and 1905", *Memoirs of the Royal Astronomical Society*, 57, pp. 403-453 (1908).
12. E. W. Maunder (ed.), "The Total Solar Eclipse 1900 - Report of the expeditions organised by the British Astronomical Association to observe the total solar eclipse of 1900, May 28", "Knowledge" Office, Londres (1901).
13. G. F. Chambers, L. D'Azevedo (adapt.), "Historia dos Eclipses", *Ferreira & Oliveira, Lisboa* (1905).
14. C. Lobo, "O Eclipse de 21 de Agosto de 1914", *Imprensa da Universidade, Coimbra* (1914).
15. N. Crato, L. Tirapicos, "O Eclipse de Einstein - Entre Lisboa, Londres, Sobral e o Príncipe", *CTT, Lisboa* (2019).



Luís Tirapicos, é investigador do Centro Interuniversitário de História das Ciências e da Tecnologia, na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Os seus principais interesses científicos são a história da astronomia, a arqueoastronomia e a cultura material da ciência. Sendo um dos autores da obra colectiva *Biographical Encyclopedia of Astronomers* (Springer, 2014)

recebeu em 2017 o Donald E. Osterbrock Book Prize de astronomia histórica, atribuído pela American Astronomical Society.

A pedra fundamental de um legado no Príncipe, 100 anos depois

Joana Latas¹

¹NUCLIO - Núcleo Interativo de Astronomia | Coordenadora E@S | Largo dos Topázios, 48, 3º Frente 2785-817 São Domingos de Rana
joana.latas@nuclio.pt

Em 2019, comemoram-se 100 anos da confirmação experimental da Teoria da Relatividade Geral para a qual foram determinantes os registos efetuados durante o eclipse solar total de 29 de maio de 1919. A ilha do Príncipe acolheu uma expedição para a observação desse eclipse que resultou de uma organização conjunta da *Royal Astronomical Society* e da *Royal Society* e que foi liderada pelo astrónomo Arthur Eddington. O outro local escolhido pelos astrónomos britânicos foi o Sobral, no Brasil. Estas observações foram um marco relevante para a História da Ciência e para a Ciência.

Eddington na Sundry: 100 anos depois (E@S) resulta de uma vontade comum de diversas e conceituadas instituições, portuguesas e santomenses, com uma história de colaboração com o Governo da Região Autónoma do Príncipe, em celebrar o centenário das observações históricas do eclipse de 1919, promovendo iniciativas à escala global, mas tendo igualmente como propósito ser a pedra fundamental para criar um legado histórico e científico em São Tomé e Príncipe, em particular na Roça Sundry.

Neste sentido foi desenvolvido, de forma concertada, um programa científico e um programa educacional orientados por quatro vetores: Ciência, História da Ciência, Ensino das Ciências e Divulgação da Ciência. Cada vetor está orientado para um público-alvo específico, nomeada e respetivamente: comunidade científica e historiadores da ciência, nacionais e internacionais, comunidade escolar e toda a população.

A organização do E@S está a cargo do Governo de São Tomé e Príncipe; Governo da Região Autónoma do Príncipe; Universidade de São Tomé e Príncipe; Observatório Geofísico e Astronómico da Universidade de Coimbra, Museu da Ciência da Universidade de Coimbra; Núcleo Interativo de Astronomia (NUCLIO); Escola Portuguesa de São Tomé e Príncipe; Plataforma de Ciência Aberta de Figueira de Castelo Rodrigo e *Portuguese Language Office of Astronomy for Development* (PLOAD).

A estas instituições juntaram-se, na organização de atividades específicas da programação E@S, o Centro de Astrofísica e Gravitação da Universidade de Lisboa (CENTRA), o Centro Interuniversitário de História das Ciências e da Tecnologia, o projeto internacional *Global Science Opera* e a Agência Nacio-

nal de Cultura Científica e Tecnológica Ciência Viva.

As iniciativas estão a ser apoiadas pela: HBD – Príncipe, um investimento privado de projetos de desenvolvimento turístico sustentável, a União Astronómica Internacional através das iniciativas enquadradas no seu centenário - IAU100, a Fundação Calouste Gulbenkian, o Banco Internacional de São Tomé e Príncipe, a DELTA cafés e a BP.

A Comunidade dos Países de Língua Portuguesa – CPLP, a *Royal Astronomical Society* e o *Galileo Teacher Training Program* - GTTP endossam o projeto.

O E@S tem o privilégio de contar com o Alto Patrocínio concedido pelo Presidente da República Portuguesa, Marcelo Rebelo de Sousa, bem como do Presidente da República Democrática de São Tomé e Príncipe Evaristo do Espírito Santo Carvalho.

Atualmente estão envolvidos cerca de três dezenas de parceiros numa celebração tão meritosa quanto a causa o exige segundo uma programação de qualidade de quão abrangente e diversificada quanto possível.



Fig. 1 - O logótipo Eddington@Sundy remete para o centenário e a deflexão da luz, mas relaciona também os elementos Terra, Céu e Mar alusivo à complementaridade das diferentes Ciências. O nome do Eddington é destacado como o líder das expedições britânicas e a referência à Sundry surge como um dos palcos onde decorreram essas observações do eclipse solar total de 1919, mas principalmente para se reconhecer a ilha do Príncipe como embrião desta iniciativa internacional.

Tendo como pano de fundo a criação de um legado na ilha do Príncipe que vá ao passado buscar uma parte da história da qual os principenses se apropriem e façam dela sua cultura, mas que também seja uma rampa de lançamento para promoção do desenvolvimento local, foi desenvolvido o conceito do **Espaço Ciência Sundry**. O primeiro legado junto ao local das

observações de Eddington, a Roça Sundy, irá enaltecer o que há de genuíno na Sundy focando, em particular, a feliz coincidência deste local ter feito parte da faixa de totalidade do eclipse solar de 1919 e simultaneamente ter sido um dos destinos escolhidos pelos britânicos para efetuarem observações que tiveram um enorme impacto na(s) (História da) Ciência. Por outro lado, constituirá uma referência de divulgação científica sobre esta temática em particular, um recurso para a Educação, nomeadamente o Ensino das Ciências, e uma atração turística na ilha. Por tudo isto será um espaço único! Todo este conceito começou a ganhar contornos por estar alinhado com o plano de desenvolvimento estratégico da ilha do Príncipe, já por si coerente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável definidos pelas Nações Unidas. No dia 29 de maio, a inauguração deste local assinalará a consolidação de projetos e iniciativas desenvolvidas na ilha do Príncipe neste âmbito [1], mas também o início de mais uma caminhada que se quer longa e sustentável de forma a eternizar todo um património que ficará melhor guardado se partilhado com e cuidado por Tod@s.



Fig. 2 - A Roça Sundy acarreta consigo histórias e memórias deste e de outros tempos que serão representadas no Espaço Ciência Sundy, conjugadas com uma vertente de divulgação científica orientada pelo mote das observações históricas e científicas decorridas naquele local em maio de 1919, num espaço que se pretende que sirva a Educação e, simultaneamente, promova o turismo científico na ilha. (crédito fotográfico: Maique Madeira).



Fig. 3- A participação de alunos de escolas do Príncipe e de São Tomé na Global Science Opera em colaboração com alunos brasileiros de Campos e Sobral é apenas um exemplo entre outras iniciativas à escala global que o E@S está a desenvolver. A criação da história na temática **Gravity** e os preparativos para a performance a ser apresentada a 29 de maio de 2019 começaram já em janeiro deste ano. (crédito fotográfico: Janne Robberstad).

E@S celebra as observações do Eclipse solar total de 1919, realizadas pelos astrónomos britânicos liderados por Eddington na ilha do Príncipe e Sobral, que validaram a Teoria da Relatividade Geral de Einstein. Neste sentido, Einstein, Eddington e o Eclipse surgem como o denominador comum que enquadra as dinâmicas multilaterais estabelecidas entre a ilha do Príncipe e a escala global.

Einstein, Eddington e o Eclipse são também as 3 personagens que dão corpo à exposição E3, e, por sua vez, são 3 Eclipses solares totais de 1914, 1919 e 2013 que serão o foco da exposição 3E. Em Portugal ambas as exposições, E3 e 3E, serão inauguradas, respetivamente em Lisboa e Coimbra, no dia do Cientista, 16 de maio, data para a qual se prevê o lançamento de uma emissão de selos conjunta entre Portugal e São Tomé e Príncipe e alusiva ao centenário em causa. As exposições serão acompanhadas de ciclo de conferência e outras iniciativas pontuais que serão divulgadas na página de Internet.

No Príncipe, no final de maio, a plataforma internacional continua a estar presente nos painéis e palestras e outras ações de divulgação, formação de professores e o destaque para conferência científica que conta com a presença de conceituados relativistas. As atividades online como os e-cafés ciência, o 10x10, programa de intercâmbio virtual, ou o concurso escolar, Eddington e o peso da luz, têm permitido diversificar e internacionalizar os públicos-alvo.

A programação E@S começou com mais de um ano de antecedência e até final de abril de 2019 decorreram mais de 40 ações, maioritariamente nas ilhas do Príncipe e de São Tomé e em Portugal. Em maio a programação intensificar-se-á, tendo o seu auge entre 25 e 31 de maio, mas as iniciativas continuarão a decorrer durante o ano de 2019. Novembro assinalará um outro ponto forte, em particular o dia 6, dia do anúncio público dos resultados da análise das placas das expedições do eclipse de 1919. 100 anos depois Inglaterra volta aqui a ter o papel de anfitriã e o E@S terá muito gosto em colaborar.

O E@S continua a aguardar que muitos mais se juntem a esta iniciativa.

Website: esundy.org

Contacto geral: eddingtوناتsundy@gmail.com

Contacto média: media.esundy@gmail.com

1 <https://tinyurl.com/E-S-AIA2009>
<https://tinyurl.com/E-S-E2013HCP>
<https://tinyurl.com/E-S-PTE2013>



Joana Latas, Professora de Matemática com experiência na Guiné-Bissau, São Tomé e Príncipe e Portugal, ao nível do 2º e 3º ciclos do Ensino Básico, Ensino Secundário e Ensino Superior. Atualmente está envolvida em projetos de Educação e de Divulgação Científica enquanto membro do NUCLIO. Internacionalmente participa em redes colaborativas nas áreas da (Educação) Matemática, co-coordena o *Grupo Lusófono de Astronomia para o Desenvolvimento* da União Astronómica Internacional e coordena a organização do *EddingtonatSundy: 100 anos depois*.

O Eclipse Solar de 1919 e as atividades comemorativas no Brasil

Ildeu de Castro Moreira¹

¹ Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro

O eclipse de 1919 e seu impacto na ciência

Neste ano comemora-se em todo o mundo o centenário das observações astronômicas realizadas durante o eclipse solar de 29 de maio de 1919. As medidas da deflexão da luz das estrelas na borda do Sol, decorrentes destas observações, constituíram uma evidência muito forte para a confirmação e a aceitação da Teoria da Relatividade Geral de Einstein. Essa teoria alterou profundamente a visão da humanidade sobre o Universo. Ela suplantou a teoria gravitacional que Newton havia formulado cerca de dois séculos antes e foi um acontecimento de extraordinária importância na ciência. As observações decisivas foram feitas por astrônomos britânicos em Sobral (Ceará, Brasil) e na Ilha do Príncipe (África Ocidental), então pertencente a Portugal.

Isaac Newton propusera, no final do século XVII, que a luz seria constituída de partículas muito pequenas e que essas poderiam sofrer atração gravitacional. Em seu livro Ótica, de 1704, inquirira na Questão 1: “Os corpos não agem sobre a luz à distância e, por sua ação, defletem seus raios; e esta ação (caeteris paribus) não é mais forte a uma distância menor?” [1] Afinado com este modelo corpuscular da luz, Henry Cavendish previu, em 1784, o encurvamento do raio luminoso proveniente de uma estrela, quando ele passasse próximo do Sol. Nos primeiros anos do século XIX, Johann Georg von Soldner calculou cuidadosamente o valor desse ângulo de deflexão: $2GM/rc^2$, onde G é a constante gravitacional, M é a massa do Sol, r é a distância de aproximação máxima do raio luminoso em relação ao centro do Sol, e c é a velocidade da luz [2]. Ele estimou que o ângulo seria de aproximadamente $0,87''$ (segundos de arco), um valor extremamente pequeno. Na época não havia possibilidade experimental desse ângulo ser medido e a questão desapareceu das publicações científicas por mais de um século, ainda mais com a predominância do modelo ondulatório da luz no século XIX.

Em 1911, analisando a possível influência da gravitação na propagação de luz, Einstein deduziu a mesma expressão de Soldner, sem conhecê-la e levando em conta seu Princípio da Equivalência [3]. Ele propôs aos astrônomos que este ângulo poderia ser medido em um eclipse solar total, por meio de fotografias de estrelas cuja luz passasse na borda do Sol comparadas com fotos das mesmas estrelas quando

o Sol não estivesse mais na frente delas. Uma expedição astronômica argentina, dirigida por Charles Dillon Perrine, tentou medir essa deflexão da luz das estrelas, em 1912. As observações, durante um eclipse solar total, seriam feitas em Cristina, em Minas Gerais (Brasil); mas choveu todo o tempo e nada foi medido. É interessante destacar que possivelmente foi nessa ocasião que Arthur Eddington, importante astrônomo britânico que teria papel fundamental na organização das expedições para observar o eclipse de 1919 e na análise de seus resultados, tomou conhecimento, por meio de seu contato com Perrine, da previsão de Einstein sobre a deflexão da luz das estrelas pelo Sol. Ele e Charles Davidson, que iria depois para Sobral durante o eclipse de 1919, estiveram também em Minas Gerais para a observação do eclipse de 1912. Outras tentativas para medir a deflexão da luz das estrelas pelo Sol, e igualmente frustradas, foram feitas em outros eclipses: em 1914 na Crimeia, em 1916 na Venezuela e, em 1918, nos EUA.

Em 1915, Einstein construiu uma teoria que permitia incluir a gravitação dentro do âmbito das ideias da relatividade [4]. Ele chegou à sua Teoria da Relatividade Geral baseado na ideia de que a gravitação resulta da alteração da geometria do espaço-tempo pela presença da matéria. A matéria diz ao espaço-tempo como se curvar e a geometria do espaço-tempo diz à matéria como ele deve se mover. A partir dessa teoria previu que a luz das estrelas, ao seguir a trajetória mais curta neste espaço-tempo curvo, sofreria uma deflexão nas vizinhanças do Sol por um valor que seria o dobro do previsto na teoria newtoniana, ou seja o ângulo de deflexão deveria ser aproximadamente $1,74''$.

Desde 1917, os britânicos começaram a se preparar para observar o eclipse solar que aconteceria em 29 de maio de 1919 e testar a previsão de Einstein. Para isso, organizaram duas expedições para regiões nas quais o eclipse seria total: uma, com Arthur Eddington e Edwin Cottingham, para a Ilha do Príncipe, e outra, com Charles Davidson e Andrew

Crommelin, para Sobral. A escolha de Sobral como ponto de observação no Brasil foi feita por Henrique Morize, diretor do Observatório Nacional do Rio de Janeiro. Ele também ficou encarregado de providenciar a infraestrutura para as expedições estrangeiras que viriam para Sobral.

Em Sobral, no dia 29 de maio de 1919, apesar do tempo inicialmente nublado, as condições ficaram boas na hora do eclipse, que ocorreu às 08:56 e durou cerca de 5 minutos. As 17 fotografias tiradas com o uso do telescópio com maior diâmetro tiveram um problema de foco e não ficaram boas. Sete chapas, provenientes de um telescópio com lente de 4 polegadas, foram consideradas muito boas; sete estrelas apareciam nelas. Já na Ilha do Príncipe o tempo esteve chuvoso e poucas fotografias foram tiradas; delas só duas puderam ser aproveitadas, e levaram a resultados mais incertos que os de Sobral.

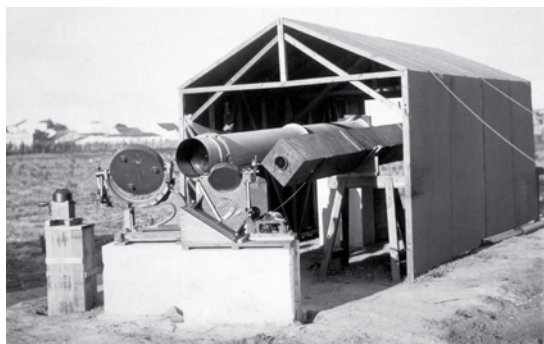


Fig. 1 - Instrumentos utilizados, em Sobral, pela expedição britânica para observação do eclipse solar de 1919.

A comissão brasileira em Sobral, liderada por Henrique Morize, fez observações sobre a corona solar durante o eclipse. Medidas do magnetismo terrestre e de eletricidade atmosférica foram feitas pelos norte-americanos Daniel Wise e Andrew Thomson. Os astrônomos estrangeiros ficaram muito agradecidos pela recepção e apoio que receberam da comissão brasileira, das autoridades e da população de Sobral.

Em 6 de novembro de 1919, após um estudo minucioso das chapas fotográficas, os astrônomos Frank Dyson, Eddington e Davidson expuseram publicamente os resultados das observações de Sobral e da Ilha do Príncipe. As medidas feitas em Sobral deram o valor aproximado de $1,98''$ para o ângulo de deflexão da luz; um valor um pouco menor, $1,61''$, e com incerteza maior, havia sido medido nas chapas da Ilha do Príncipe. Eles concluíram: "Resumindo os resultados das duas expedições, o maior peso deve ser atribuído aos obtidos com a lente de 4 polegadas em Sobral. Da superioridade das imagens e da escala maior das fotografias, reconheceu-se que estas seriam as mais confiáveis" [5]. O resultado final levou a um ângulo próximo, dentro da margem de erro, daquele previsto pela Teoria da Relatividade

Geral: "ambos [os resultados] apontam para a deflexão total da teoria da relatividade geral de Einstein, os resultados de Sobral definitivamente, e os resultados do Príncipe talvez com alguma incerteza." [6]. Einstein tinha razão!

Nos dias seguintes, jornais de todo o mundo estamparam em manchetes que ocorrera uma revolução na ciência: a teoria de Einstein suplantara a de Newton. Este acontecimento fez com que Einstein, um cientista até então conhecido apenas por colegas físicos, se tornasse o cientista mais famoso do século XX e o mais conhecido de todos os tempos.

Em 1979, uma revisão das placas fotográficas originais de Sobral, mais cuidadosa e com métodos mais precisos e atualizados, permitiu comprovar que as deduções feitas em 1919 estavam corretas e possibilitou também uma correção e o aproveitamento das medidas realizadas a partir das fotografias do astrógrafo de 8 polegadas, que haviam sido desconsideradas em 1919 por causa de sua qualidade duvidosa [7]. Os resultados delas decorrentes estão também compatíveis, dentro da margem de erro, com as previsões da teoria de Einstein.

Muitas observações posteriores, em especial na radioastronomia, confirmaram as previsões de Einstein. A descoberta das lentes gravitacionais transformou essa deflexão em uma ferramenta importante para a astronomia e a cosmologia estudar galáxias e outros corpos celestes. Ela é usada também para inferir a presença de matéria escura no espaço. A Teoria da Relatividade Geral é a teoria atualmente aceita e amplamente usada para descrever o Universo. Recentemente, quase um século depois do eclipse de 1919, outra de suas extraordinárias previsões foi comprovada: a existência de ondas gravitacionais. Neste ano, a fantástica imagem de um gigantesco buraco-negro ocupou as páginas dos jornais e os noticiários de todo o mundo, confirmando a existência desse tipo de estrutura no Universo, que foi também antevista dentro do âmbito da Teoria da Relatividade Geral.



Fig. 2 - Membros das equipes brasileira e britânica para a observação do eclipse solar de 1919 em Sobral.

As comemorações do eclipse de 2019 no Brasil

Para comemorar o centenário do eclipse de 1919, com

ênfase nas observações feitas em Sobral, entidades científicas e instituições de pesquisa brasileiras se articularam, em 2018, para a organização de atividades comemorativas em Sobral e em outras cidades do país. Foi criada uma comissão nacional, com representantes da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, Academia Brasileira de Ciências, Sociedade Brasileira de Física, Sociedade Astronômica Brasileira, Sociedade Brasileira de História da Ciência, Observatório Nacional e Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST), para colaborar com as autoridades e instituições de ensino e pesquisa de Sobral e do Ceará na organização destas atividades. Uma comissão local foi estabelecida no Ceará com representantes do Estado e do município de Sobral, da SBPC regional, da fundação de apoio à pesquisa do Ceará (FUNCAP), das universidades locais e do instituto federal, do Museu do Eclipse, da Seara da Ciência (Fortaleza), do Planetário Rubens de Azevedo e do Planetário de Sobral. Um calendário de atividades foi estabelecido com atividades que se iniciaram em 2018 e se estenderão por todo o ano de 2019.



Fig. 3 - Acampamento da expedição brasileira na Praça do Patrocínio em Sobral.

No dia 29 de maio de 2018, foi lançado em Sobral, por decisão do prefeito do município, o *Ano Municipal da Ciência*, com uma exposição de fotos e jornais e uma peça de teatro sobre o eclipse de 1919, na Praça do Patrocínio, local onde ficou sediado o acampamento da expedição brasileira em 1919. Foi também reinaugurado o Planetário de Sobral. Ao longo de 2018, muitas atividades preparatórias foram realizadas em diversas cidades, como palestras e mesas-redondas sobre o eclipse (Sobral, Fortaleza, Rio de Janeiro, Brasília, São Paulo e Campina Grande), exposições de fotos (Maceió) e simpósio sobre astrofísica (Fortaleza). Cursos sobre astronomia foram ministrados, em Sobral e Fortaleza, para estudantes da rede pública de ensino. Ainda em 2018 foi criada uma página no Facebook: <https://www.facebook.com/CentenariodoEclipsedeSobral/>.

Em Sobral, a prefeitura da cidade preparou uma agenda para cada estudante das escolas públicas locais contendo muitas informações e imagens sobre o eclipse de 1919. Um folder sobre os acontecimentos foi produzido pelas comissões organizadoras e distribuído em eventos no Ceará e em

outros pontos do Brasil. Diversas revistas de ensino ou de divulgação estão preparando números especiais sobre o eclipse: Revista Brasileira de Ensino de Física, Ciência e Cultura, revista Conexões e Revista Brasileira de Astronomia.

Em Sobral, foi inaugurada recentemente uma escultura de Einstein, moldada em argila e fundida em bronze, e em tamanho natural, inspirada em uma famosa foto na qual aparece sentado em uma pedra à beira do lago Saranac (Nova York). Ela foi encomendada pela Prefeitura e criada pelo premiado artista brasileiro Murilo Sá Toledo, autor de dezenas de obras dispostas em praças e parques de diversas cidades brasileiras. Ela está hoje colocada em um parque público às margens do rio Acaraú, e atrai o interesse de muitas pessoas, em particular jovens, que desejam tirar um foto ao lado da estátua do grande cientista. Um Monumento da Luz, em homenagem ao centenário do eclipse, resultado de um concurso patrocinado pela Prefeitura de Sobral, com o apoio do Instituto de Arquitetos do Brasil, será inaugurado em 2019. A equipa vencedora foi coordenada pelo arquiteto e urbanista Nonato Veloso, e era composta também pelos arquitetos Cláudio Sá e Matheus Carvalho, e pelo engenheiro civil Alex Fernandes.

Dentro da programação do centenário do eclipse, Sobral sediou em seu Centro de Convenções, de 27 a 30 de março de 2019, a Reunião Regional da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), com o tema “Educação Básica de Qualidade: currículo, carreira e gestão escolar”. No primeiro dia do evento, ocorreu ao longo de todo o dia o seminário “Sob o sol de Sobral - Uma janela para o Cosmos”, com palestras sobre a deflexão da luz pela ação gravitacional, a astronomia no Ceará, astrofísica das estrelas, cosmologia, buracos negros, ondas gravitacionais e educação e divulgação da astronomia no Brasil. Entre os palestrantes estava o astrofísico e historiador da ciência irlandês Daniel Kennefick, hoje professor na Universidade de Arkansas, que é um especialista na história da Relatividade Geral de Einstein, em particular das ondas gravitacionais. Ele fez a concorrida palestra *No shadow of a doubt: The 1919 eclipse that confirmed Einstein's theory of relativity, que é também o título de seu livro, que será lançado proximoamente pela Princeton University Press.*

Entre os dias 13 de maio e 15 de junho, ocorre uma exposição sobre o eclipse de 1919 dentro dos corredores do Congresso Nacional em Brasília, organizada pela SBPC em parceria com os governos do Estado do Ceará, a Prefeitura de Sobral e o Observatório Nacional. As mesmas instituições produzirão uma exposição itinerante, sobre o mesmo tema, que deverá circular por diversas cidades cearenses e brasileiras ao longo de 2019. Uma outra exposição sobre o eclipse está sendo organizada, no Rio de Janeiro, pelo Observatório Nacional e pelo Museu

de Astronomia e Ciências Afins (MAST), local onde ficará exposta.

Diversas atividades comemorativas estão marcadas para o período no entorno do dia 29 de maio de 2019, dia do centenário do eclipse. Estudantes de escolas municipais de Sobral estão participando, juntamente com alunos de escolas portuguesas e de São Tomé e Príncipe, de um projeto educativo em comemoração do centenário do eclipse de 1919, que é organizado pela associação “Ciência Viva” de Portugal. Os estudantes que produzirem os trabalhos mais significativos serão convidados a participar virtual ou presencialmente de sessões em Sobral (Brasil), São Tomé e Príncipe e possivelmente no encontro de Ciência 2019 em Lisboa.

Nos dias que antecedem o 29 de maio, vários eventos ocorrerão em Sobral. Entre os dias 16 e 19 de abril, acontecerá a *III Escola de Física Teórica do Ceará – 100 anos do Eclipse que iluminou a ciência*, evento promovido pela Universidade Estadual do Ceará e pela Universidade Federal do Ceará em Pacoti (Ceará). Nos dias 23 a 25 de maio, será comemorado o Dia da Física – *Sobral e a Relatividade: 100 anos da confirmação da curvatura da luz pela gravidade*, organizado pelo Instituto Federal do Ceará. O simpósio Relatividade Geral: passado presente e futuro, organizado pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, apoiado por outras instituições locais, acontecerá em Sobral no dia 27 de maio.

O evento mais amplo, o Encontro Internacional sobre o Centenário do Eclipse de Sobral acontecerá entre os dias 28 e 30 de maio, no Centro de Convenções de Sobral, organizado pelas comissões nacional e local. No dia 29 de maio, uma comemoração simultânea e conectada pela internet ocorrerá em Sobral e na Ilha do Príncipe com a presença de autoridades dos governos de Portugal, Ilha do Príncipe e do Brasil. Nesta ocasião, será lançado um selo dos Correios brasileiros comemorativo do centenário do eclipse. No mesmo dia, será apresentada uma ópera elaborada por estudantes de Sobral, de Campos dos Goytacazes (RJ), da Ilha do Príncipe e da Noruega dentro do evento *The Global Science Opera (GSO) 2019* [<http://globalscienceopera.com/>]. Neste dia, deverão ser exibidos em Sobral o celostato e a lente do telescópio de 4 polegadas, utilizados em 1919 para produzir as placas fotográficas decisivas para a medida do ângulo de deflexão da luz das estrelas durante o eclipse solar.

Em seu conhecido livro *Modern Times: Uma História do Mundo da década de 1920 a 1980*, o escritor britânico Paul Johnson inicia o primeiro capítulo do livro com a frase: “O mundo moderno começou em 29 de maio de 1919 quando fotografias de um eclipse solar na Ilha do Príncipe, na África Ocidental, e em Sobral, no Brasil, confirmaram a veracidade de uma nova teoria do universo.” [8]. O próprio Einstein atestou o significado do eclipse de 1919

para a aceitação de sua Teoria da Relatividade Geral. Quando esteve no Brasil, em 1925, fez declarações aos jornais do Rio de Janeiro sobre a importância desse eclipse para a comprovação de sua teoria. Escreveu, então, a seguinte frase: “O problema concebido pelo meu cérebro incumbiu-se de resolvê-lo o luminoso céu do Brasil.” [9].

Referências

1. Newton, Isaac. Opticks: or, a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light. London: Royal Society, 1704.
2. Soldner, J. Ueber die Ablenkung eines Lichtstrahls von seiner geradlinigen Bewegung, durch die Attraktion eines Weltkörpers, an welchem er nahe vorbei geht. Berliner Astronomisches Jahrbuch, 161-172, 1804.
3. Einstein, A. Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. Annalen der Physik 35, 898-908, 1911.
4. Einstein, A. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. Annalen der Physik 49, 769-822, 1916.
5. Dyson, F. W., Eddington, A. S and Davidson, C. “A Determination of the Deflection of Light by the Sun’s Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919”. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. CCXX-A 579: 291-333, 1920.
6. Ibidem.
7. Kennefick, D. Testing relativity from the 1919 eclipse - a question of bias. Physics Today 62, 3, 37-42, 2009
8. Johnson, P. Modern times : the world from the twenties to the nineties. New York : Harper Perennial, 1991.
9. Moreira, I.C. e Videira, A.A.P. (orgs.) Einstein e o Brasil. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, 1995.



Ildeu de Castro Moreira, é professor do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Atua também em história da ciência e comunicação pública da ciência. Foi editor da Ciência Hoje, diretor do Departamento de Popularização da CT e coordenador da Semana Nacional de CT. Recebeu o Prêmio José Reis de Divulgação Científica do CNPq. Foi membro de conselhos de várias sociedades e instituições científicas. É presidente da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC).

Einstein e Eddington e as consequências da relatividade geral: Buracos negros e ondas gravitacionais

José P. S. Lemos¹, Carlos A. R. Herdeiro¹, Vítor Cardoso¹

¹Centro de Astrofísica e Gravitação - CENTRA, Departamento de Física, Instituto Superior Técnico - IST, Universidade de Lisboa - UL, Avenida Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal

¹joselemos@ist.utl.pt, carlosherdeiro@tecnico.ulisboa.pt, vitor.cardoso@tecnico.ulisboa.pt

Resumo

Nas celebrações dos 100 anos das observações da deflexão da luz em 29 de maio de 1919, devido à curvatura do espaço-tempo provocada pelo Sol, por Eddington na Ilha do Príncipe e colaboradores em Sobral, Brasil, durante um eclipse total, que confirmaram a teoria da relatividade geral de Einstein, focamos os principais pontos da teoria, seus testes e aplicações, e concentramo-nos em algumas das suas consequências maiores. A saber, buracos negros, o objeto por excelência da relatividade geral, e ondas gravitacionais, a sonda gravitacional para o universo distante. Apontamos ainda problemas em aberto.

1. Relatividade geral

1.1 Relatividade geral: a nova noção de espaço, tempo e matéria

Einstein atuou em muitas áreas da física: física estatística, eletrodinâmica, física do estado sólido, mecânica quântica, relatividade restrita, relatividade geral, teorias de unificação, fundamentos da mecânica quântica e princípios filosóficos da física. A grande criação é sem dúvida a teoria geral da relatividade. Max Born, um dos fundadores da mecânica quântica, escreveu em 1955: “A gênese da relatividade geral afigurou-se-me à época, e ainda o faz, o maior feito do pensamento humano sobre a natureza, a mais extraordinária combinação de penetração filosófica, intuição física e mestria matemática”. Dirac, célebre por ter descoberto o positrão, afirmou em 1968: “A relatividade geral é talvez a maior criação científica que alguma vez se fez”. A relatividade geral aparece da necessidade de juntar a gravitação Newtoniana com a teoria da relatividade restrita. Vejamos primeiro algumas noções destas duas teorias.

A gravitação Newtoniana está baseada nas três leis da mecânica de Newton que regem o movimento de partículas e na lei de força da gravitação universal. A segunda das três leis da mecânica de Newton diz qual a aceleração que uma partícula com uma certa massa inercial sofre quando sujeita a uma força. Por outro lado, a lei de força da gravi-

tação universal afirma que duas massas atraem-se com uma força que é proporcional às suas massas gravitacionais e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. A força da gravitação de Newton é uma força que atua instantaneamente. A teoria teve um enorme sucesso na explicação da trajetória dos planetas em volta do Sol, na explicação das marés da Terra, e é usada para descrever a trajetória de satélites entre muitas outras aplicações.

A relatividade restrita ficou formulada em 1905 e nasceu para compatibilizar a mecânica Newtoniana com o eletromagnetismo de Maxwell, uma teoria que descreve o campo eletromagnético. A teoria mostrou que existem ondas eletromagnéticas que se propagam à velocidade da luz tendo-se inferido de imediato que a luz é um fenómeno eletromagnético. Propriedades importantes da teoria de Maxwell não se conformavam com a mecânica Newtoniana. Para partículas em movimento com velocidades próximas às da velocidade luz, e para a própria luz, outra mecânica e outra noção de espaço e tempo eram necessárias. Einstein postulou então que a física é a mesma para qualquer observador inercial, não importa a velocidade com que este se mova, e em particular, a velocidade da luz é a mesma para todos esses observadores, deduzindo que a velocidade da luz é a velocidade máxima possível para objetos físicos e que espaço e tempo não são mais conceitos absolutos, são conceitos relativos ao observador. Pouco depois, em 1907, Minkowski, um matemático alemão, mostrou que a relatividade restrita podia ser entendida dentro do conceito unificado de espaço-tempo, dando expressão lógica e matemática final à teoria. Propôs que o espaço-tempo era um entidade única e definiu a noção de intervalo espaço-temporal generalizando a fórmula de distância de Pitágoras.

Construiu também diagramas espaço-temporais, muito úteis para visualizar a trajetória de partículas. A relatividade restrita tem aplicações em inúmeras áreas da física. O mundo das partículas elementares é relativista. O paradoxo dos gêmeos é uma realidade: muões gêmeos idênticos em aceleradores de partículas morrem mais cedo ou mais tarde conforme estão parados ou em movimento, respetivamente. Enquanto um muão dá a volta ao acelerador ileso à chegada ao ponto de partida, o seu irmão gémeo parado à partida já decaiu há muito num eletrão.

Como, por um lado, a relatividade restrita mostra que a velocidade máxima de propagação é a velocidade da luz e por outro a lei da força gravitacional de Newton propaga-se instantaneamente, ficou claro que a gravitação Newtoniana tinha de ser enquadrada numa teoria relativista. Assim, apoiado nessas duas teorias, Einstein formulou uma nova teoria, que ele mesmo chamou de teoria geral da relatividade, ou simplesmente relatividade geral. É uma teoria baseada em princípios: princípio de equivalência, princípio da relatividade geral, princípio da covariância, princípio do acoplamento mínimo e princípio da correspondência. O mais importante que serviu de guia até à formulação final foi o princípio de equivalência.

Um facto experimental, aparentemente trivial, chamou a atenção de Einstein: a igualdade entre massa gravitacional e massa inercial. Esta igualdade implica que todos os objetos, independentemente do tamanho e composição, quando colocados num campo gravitacional caem com a mesma aceleração, facto que já tinha sido detetado por Galileu e Newton. Einstein chamou a esse facto o princípio de equivalência. Em última análise este princípio leva a que localmente gravitação e inércia sejam a mesma coisa. De facto, sendo massa inercial e massa gravitacional a mesma coisa, advém que inércia e gravidade fundem-se localmente.

Numa região local em que existe gravidade, podemos, pelo princípio de equivalência e por uma escolha apropriada de referencial, anular a gravitação localmente e tornar o espaço-tempo plano localmente. A gravidade pode ser anulada localmente, mas não globalmente. Um campo gravitacional que varia de um ponto para o outro não pode ser anulado em todos os pontos. Numa região sem gravitação e sem acelerações as partículas seguem linhas retas, as geodésicas do espaço-tempo plano da relatividade restrita. Numa região sem gravitação e com acelerações, as partículas seguem linhas curvas ainda no espaço-tempo plano da relatividade restrita. Numa região com gravitação as partículas seguem linhas curvas, as geodésicas de um espaço-tempo curvo. Einstein propôs por isso que gravitação é uma manifestação do espaço-tempo ser curvo.

Relatividade geral é assim uma teoria geométrica do espaço-tempo. A teoria baseia-se na geometria Riemanniana que por sua vez assenta numa métrica que mede distâncias no espaço-tempo, numa conexão que diz como vetores devem ser transportados paralelamente e que é função da métrica, e na curvatura que é uma função da conexão e por isso da métrica. Num paralelo com a gravitação Newtoniana, temos que a métrica é o potencial gravitacional, a conexão é a força gravitacional e a curvatura é a força de maré. Relatividade geral geometriza a gravitação. Na equação de Einstein o espaço-tempo diz à matéria como se mover e a matéria diz ao espaço-tempo como se curvar.

1.2 Testes e consequências maiores da relatividade geral

Uma só experiência, a saber, a igualdade da massa inercial e gravitacional levou Einstein ao princípio de equivalência que por sua vez o guiou até à criação da relatividade geral. A teoria foi comprovada por vários testes experimentais e observacionais, tem aplicações tecnológicas, e trouxe consequências novas e da maior relevância para o nosso conhecimento sobre o universo. Vejamos estes pontos.

O desvio para o vermelho da luz ao escalar um campo gravitacional foi previsto por Einstein em 1907 e confirmado em 1960 por Pound e Rebka. É um teste ao princípio de equivalência e à relatividade geral. Outro teste que a teoria passou de imediato foi o da precessão do periélio do Mercúrio na sua trajetória à volta do Sol. A relatividade geral fornece os 43 segundos de arco por século que faltavam à gravitação Newtoniana. A teoria prevê também que a curvatura do espaço-tempo deflete os raios de luz quando passam pelo Sol. É um efeito de lente gravitacional. Esta previsão foi confirmada pelas célebres expedições ao Príncipe liderada por Eddington e a Sobral, Brasil, no eclipse de 29 de maio de 1919, data cujos cem anos celebramos agora, ver <https://science.esundy.tecnico.ulisboa.pt/en/>. As observações forneceram resultados compatíveis com os 1.75 segundos de arco de desvio previstos pela teoria. Outro teste ainda é o atraso no eco de radar enviado para um planeta que foi proposto e testado por Shapiro em 1964 e que confirma a teoria.

A relatividade geral tem também aplicações tecnológicas. É notável que para que o GPS funcione é preciso levar em conta a relatividade geral. É a primeira aplicação tecnológica da teoria. Para calcular a posição de um objeto com a precisão de um metro os relógios dos satélites têm de medir tempo com precisão de uma parte em 10^{13} . Mas os efeitos da relatividade restrita e da relatividade geral nos relógios devido a estes estarem em satélites movendo-se em relação à Terra e num campo gravitacional com intensidade menor do que o da superfície da Terra, respetivamente, necessitam de ser levados em conta. Esses efeitos são de 1 parte em 10^{10} , e se não fossem corrigidos o GPS seria inútil. Esta é uma utilização prática que certamente não foi pensada quando a teoria foi criada. Outra aplicação é a medição das variações da profundidade da neve em Marte com precisões extraordinárias de 10 cm usando dados de prospeção laser via satélites orbitando o planeta que

necessitam do mesmo tipo de correções.

As consequências maiores e inovadoras da relatividade geral são buracos negros, ondas gravitacionais, cosmologia e teorias de unificação. Buracos negros são os objetos por excelência da relatividade geral, são constituídos por gravitação pura. A sua principal característica é conterem um horizonte de eventos, para além do qual nada pode ser observado por um observador externo. Foram preditos em 1939 pelos físicos americanos Oppenheimer e Snyder. Ondas gravitacionais são geradas por massas aceleradas e em interação. Foram finalmente detetadas pela primeira vez em 14 de setembro de 2015. Falaremos de buracos negros e ondas gravitacionais em mais detalhe. A cosmologia como ciência física, e não metafísica, foi criada com o advento da relatividade geral. O primeiro modelo cosmológico dentro da teoria foi concebido por Einstein em 1917. Neste modelo o universo é estático e o espaço é uma três-esfera. Esta geometria mostrou pela primeira vez que o universo podia ser finito mas ilimitado, sem borda. Na década seguinte, o físico russo Alexander Friedmann e o físico belga Georges Lemaître propuseram, independentemente, modelos para um universo em expansão, que após confirmação em 1929 pelas observações de Hubble no telescópio de Monte Wilson, vigoram até hoje em formas mais sofisticadas. As teorias de unificação começaram a ser consideradas após o advento da relatividade geral. A teoria da relatividade geral é uma teoria do campo gravitacional, que surge como geometria curva do espaço-tempo. Outro campo fundamental em física é o campo eletromagnético descrito pelas equações de Maxwell. A junção desses dois campos fundamentais numa só teoria fundamental forneceria a unificação da física. Einstein e Eddington foram alguns dos físicos que tentaram essa unificação na década de 1920 e nas décadas posteriores. Sabemos hoje que mais campos existem, como o campo nuclear forte e o campo nuclear fraco, e possivelmente existem outros, e a ideia de uma teoria unificada para todos os campos persiste, seja através de teorias alternativas da gravitação que incluem a relatividade geral com novos campos adicionais, seja através da difícil quantização do campo gravitacional num quadro conjunto com todas as interações.

2. Buracos negros

2.1 Regiões aprisionadas

A confirmação, pelas observações de Eddington, de que a trajetória da luz é ligeiramente encurvada pela curvatura do espaço-tempo, ou numa linguagem Newtoniana pela interação gravitacional do Sol, origina a questão do quão forte este efeito se pode tornar na vizinhança de uma estrela ou de um corpo astrofísico. Para aumentar a magnitude deste efeito de lente gravitacional o Sol deverá ser substituído por um corpo mais compacto e o raio de luz deverá passar tão tangente quanto possível a esse corpo.

Os corpos mais compactos previstos pela relatividade geral são os buracos negros. Buracos negros não são, em rigor, corpos materiais; são regiões aprisionadas do espaço-tempo. Uma partícula material ou um raio de luz que caia na região aprisionada não consegue dela emer-

gir. A região aprisionada está perpetuamente em colapso, onde o futuro é sempre mais para o seu interior e onde finalmente ocorre uma singularidade em que o próprio espaço-tempo é destruído.

A fronteira da região aprisionada de um buraco negro chama-se horizonte de eventos. Em qualquer ponto exterior ao horizonte de eventos de um buraco negro é possível emitir um raio de luz de modo a que esse raio de luz escape à atração gravitacional do buraco negro, chegando a pontos arbitrariamente longínquos.

2.2 Esfera de fotões

Contudo, se lançarmos raios de luz na direção de um buraco negro, a zona de captura é mais extensa do que a região aprisionada. Isto é, existe uma vizinhança do horizonte de eventos, que, caso o raio de luz visite essa zona, será inexoravelmente capturado pelo buraco negro, acabando por cair na região aprisionada.

Para os buracos negros mais simples, sem rotação, o limiar dessa zona de captura de raios de luz é chamado de esfera de fotões, ou esfera fotónica. Estes buracos negros são denominados de Schwarzschild, em homenagem ao astrónomo, físico e matemático alemão, Karl Schwarzschild, que descobriu e publicou a correspondente solução matemática das equações da relatividade geral ainda em 1916.

A esfera de fotões é uma superfície imaterial exterior ao horizonte de eventos. Fotões que começam precisamente tangentes a essa esfera mantêm-se sempre nela, a trajetória sendo um círculo chamado anel de luz. Ou seja, o efeito de lente gravitacional é tão forte que a trajetória dos raios de luz se fecha sobre si mesma, traçando uma curva fechada. Os fotões orbitam em redor do buraco negro. Contudo, estas trajetórias são instáveis e uma pequena perturbação levará o fotão a cair na direção do horizonte de eventos ou a escapar para longe do buraco negro, conforme a direção da perturbação.

A esfera de fotões é a assinatura mais significativa do forte efeito de lente gravitacional originado pelo buraco negro. As suas consequências fenomenológicas são múltiplas. Por exemplo, se imaginarmos uma fonte de luz como pano de fundo, colocando o buraco negro entre essa fonte de luz e o observador, ver-se-ia uma zona negra. Esta zona negra chama-se a sombra de um buraco negro. Como analogia, podemos imaginar a sombra da Lua vista durante um eclipse solar. Contudo, enquanto que esta sombra da Lua é a silhueta da superfície da Lua, a sombra de um buraco negro é a silhueta da esfera de fotões, e não do horizonte de eventos. A luz de fontes longínquas consegue sondar a geometria do espaço-tempo apenas até à esfera de fotões.

A sombra de um buraco negro de Schwarzschild

é sempre um disco circular. Os buracos negros astrofísicos, no entanto, têm em geral momento angular e são descritos matematicamente por uma outra solução das equações da relatividade geral, descoberta pelo físico-matemático neozelandês Roy Kerr em 1963. Estes buracos negros são denominados por buracos negros de Kerr.

O buraco negro de Kerr é caracterizado pela sua massa e momento angular, um parâmetro que descreve a sua rotação. Quando o momento angular é nulo, torna-se um buraco negro de Schwarzschild. Mas a rotação não nula origina diferenças fundamentais e fenomenológicas. Em particular o horizonte de eventos deixa de ser uma superfície com simetria esférica. Pode ser imaginado como um esferoide, ou seja, uma esfera achatada, em vez de uma esfera redonda, mantendo ainda assim uma simetria entre hemisfério norte e sul e um equador bem definido. Este comportamento está de acordo com o efeito intuitivo da rotação num corpo elástico, como por exemplo, na Terra.

O limiar da zona de captura de raios de luz do buraco negro de Kerr, ganha também novos contornos e não é, habitualmente, designada por esfera de fotões. Para compreender o conceito correspondente, comecemos por imaginar as trajetórias de raios de luz no plano equatorial do buraco negro de Kerr no limiar de captura dos raios de luz. Estas órbitas são circulares, anéis de luz, mas dependem do sentido de rotação do raio de luz. Em particular, o círculo é menor se o raio de luz orbitar no mesmo sentido da rotação do buraco negro.

Fora do plano equatorial, existem também fotões que orbitam o buraco negro, mas as suas órbitas não estão confinadas a um plano. A rotação do buraco negro arrasta consigo o espaço tempo, fazendo precessar o plano inicial da órbita não equatorial. Consequentemente, o raio de luz varre uma secção esférica entre latitudes mínima e máxima, simétricas. Estas são as órbitas fotónicas esféricas de Kerr. Existe um contínuo destas órbitas que interpolam entre os dois anéis de luz, ver Fig. 1. Começando no anel de luz exterior, em contra-rotação relativamente ao buraco negro, existem órbitas esféricas que varrem, sucessivamente, intervalos cada vez maiores de latitude até uma órbita particular que varre toda a esfera e tem momento angular nulo. A partir daí um outro conjunto de órbitas, desta vez em co-rotação com o buraco negro, varrem intervalos de latitude cada vez menores até degenerarem no anel de luz menor em co-rotação.

As órbitas fotónicas esféricas de Kerr, incluindo os anéis de luz, definem o limiar de captura dos raios de luz e como tal a sombra do buraco negro de Kerr, que deixa de ser, em geral, um disco perfeitamente circular e passa a depender da rotação do buraco

negro e do ângulo de observação, relativamente ao plano equatorial. Por exemplo, visto do plano equatorial, um buraco negro com vetor de momento angular para cima apresenta uma sombra que varia de um disco perfeito, quando a rotação do buraco negro é nula, até à forma da letra D quando a rotação é máxima, como foi calculado pela primeira vez pelo físico norte-americano James Bardeen em 1973.

Invertendo a lógica, ao observarmos a sombra de um buraco negro astrofísico podemos saber, em princípio, o quão rapidamente o buraco negro roda. Ou até testar se o buraco negro é de Kerr ou algo inesperado, que poderia revelar nova física. Este tipo de observação não é uma miragem. Foi levada a cabo pelo Event Horizon Telescope, uma colaboração internacional de oito radiotelescópios distribuídos pelo planeta. Em abril deste ano, a colaboração anunciou que tinha apontado para o buraco negro supermassivo localizado no centro da galáxia M87, o qual tem uma massa de 6 mil milhões de vezes a massa do Sol, um horizonte de eventos com aproximadamente o tamanho do sistema solar e está em rotação, e mostrou a imagem inédita e espetacular da sombra de um buraco negro iluminado por matéria incandescente à sua volta. Estes resultados de 2019 confirmam as previsões teóricas e numéricas da relatividade geral e assim, 100 anos depois da observação do efeito de lente gravitacional fraco por Eddington, estamos a observar o efeito de lente gravitacional forte devido a um buraco negro.

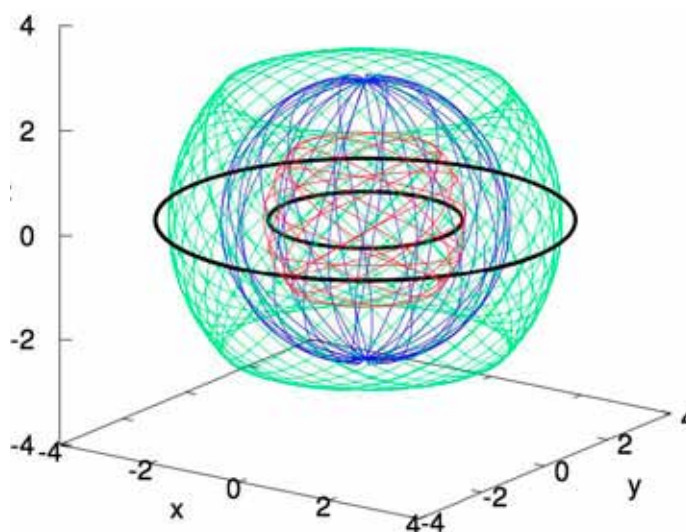


Fig. 1 - Os dois anéis de luz e algumas órbitas fotónicas esféricas em Kerr. O maior anel de luz está em contra-rotação com o buraco negro, o menor está em co-rotação. A órbita esférica verde está em contra-rotação, a órbita esférica vermelha está em co-rotação. A órbita azul é a órbita com momento angular nulo.

2.3 Onde estão os buracos negros?

Buracos negros foram descobertos por Oppenheimer e Snyder num trabalho teórico notável de 1939. As décadas subsequentes tiveram desenvolvimentos teóricos impressionantes liderados pelo físico norte-americano John Wheeler e pelos físicos ingleses Roger Penrose e Stephen Hawking. Observacionalmente o progresso também foi intenso. Estima-se que da ordem de dez milhões de buracos negros de algumas massas solares cada habitem a nossa galáxia. Além disso as observações indicam que todas as

galáxias, ou quase todas, contêm um buraco negro supermassivo central. Uma nova população de buracos negros com massas de algumas dezenas de massas solares foi recentemente detetada através de ondas gravitacionais. Especula-se que existam mini buracos negros ou ainda buracos negros elementares, isto é, buracos negros como partículas elementares da gravitação. Estes ainda não foram observados nem detetados.

3. Ondas gravitacionais

3.1 Distorções no espaço-tempo

O que acontece quando uma estrela ou um buraco negro é acelerado, ou quando duas estrelas ou dois buracos negros colidem? Se usarmos o princípio da relatividade restrita de que existe uma velocidade máxima de propagação de informação, concluímos que a gravidade também tem que se propagar com uma velocidade finita. Assim, quando uma estrela é acelerada, a gravidade fica para trás e leva um tempo a ajustar-se. As equações da relatividade geral mostram que as equações que governam esse ajustamento são semelhantes às equações de Maxwell para as ondas electromagnéticas e segundo a teoria da relatividade geral, estas ondas viajam exatamente à velocidade da luz. Tais ondas são chamadas ondas gravitacionais. Ondas gravitacionais são forças de maré que se propagam, ou, na linguagem geométrica, ondas gravitacionais são perturbações ou ondulações do espaço-tempo curvo que viajam à velocidade da luz. Foram previstas por Einstein em 1916. Ele calculou a fórmula da geração de ondas gravitacionais, só percebendo que uma configuração de quadrupolo variável no tempo as geraria num trabalho de 1918. Finalmente Eddington em 1922 forneceu a fórmula definitiva correcta com o fator $\frac{1}{2}$ que faltava à fórmula anterior de Einstein. A manipulação da matemática das ondas gravitacionais é difícil, a interpretação física dos resultados exige conhecimento e perspicácia. Havia cálculos que forneciam haver ondas que se propagavam com velocidades superiores à da luz, o que levou Eddington a mostrar que essas ondas são meros ziguezagues do sistema de coordenadas e que a “única velocidade relevante para estes é a velocidade do pensamento”, frase que ficou famosa, demonstrando de seguida que ondas gravitacionais reais se propagam à velocidade da luz. A teoria foi posteriormente desenvolvida por muitos, designadamente pelo físico inglês Herman Bondi na década de 1960 e pelo físico norte-americano Kip Thorne na década de 1970 e nas décadas seguintes. Vamos supor que ondas gravitacionais sejam geradas por dois buracos negros orbitando em torno um do outro, em algum lugar no universo. Essas ondas propagam-se pelo cosmos, à velocidade da luz e de alguma forma são detetadas na Terra. O painel de cima da Fig. 2 mostra, em unidades arbitrárias, a amplitude e frequência da onda gravitacional detetada em função do tempo. A amplitude da onda está directamente relacionada com a distorção do espaço-tempo, medida em relação à referência que é o espaço-tempo plano de Minkowski. A amplitude da onda também pode ser interpretada como a magnitude da força de maré num dado ponto, em função do tempo. A amplitude depende da distância que a onda viajou, ela

é inversamente proporcional à distância viajada. A frequência da onda é igual ao dobro da frequência orbital.

Como o esquema da Fig. 2 mostra, a frequência aumenta com o tempo. A razão é muito simples: as ondas gravitacionais transportam energia, portanto os dois buracos negros estão continuamente a perder energia. A única possibilidade para conservar a energia total é que eles se aproximem, isto é, a sua frequência aumenta, à medida que o tempo passa. Por outras palavras, a emissão de ondas gravitacionais consegue estimular a colisão entre buracos negros. Como podemos ver, a partir de um certo tempo a onda gravitacional atinge um máximo, correspondente à colisão entre os dois buracos, e depois decai rapidamente no tempo: os buracos negros colidiram e produziram um único buraco negro, maior, que, depois de estabilizar, não emite mais nada. O diagrama da distância entre os buracos negros geradores da onda nas diferentes fases orbitais está representado no painel de baixo da Fig 2.

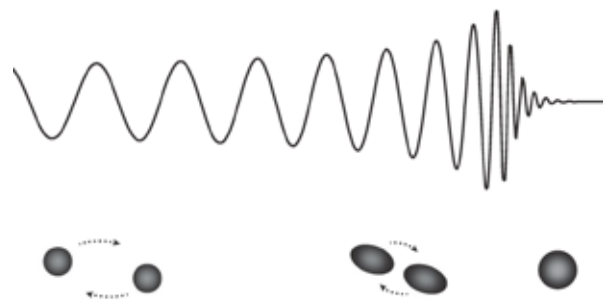


Fig. 2 - Painel de cima: Forma da amplitude da onda detetada em função do tempo devido à colisão de dois buracos negros em órbita. A forma também fornece a frequência da onda. Painel de Baixo: visualização do processo físico, colisão de dois buracos negros, que origina a forma da onda.

3.2 A detecção de ondas gravitacionais

O efeito do aumento da frequência orbital em dois corpos em órbita devido à emissão de ondas gravitacionais é visível nalguns sistemas. Dois físicos americanos, Russell Hulse e Joseph Taylor observaram em 1974 um pulsar binário chamado PSR B1913+16. Este sistema é constituído por duas estrelas de neutrões em órbita em torno do seu centro de massa, tem um período de cerca de 7 horas, e o raio orbital é da ordem do diâmetro do Sol. É um sistema relativista. Estes físicos estudaram a órbita ao longo de vários anos, e mostraram que o período orbital estava a diminuir, a cada ano diminuía cerca de 76 microsegundos, o raio orbital diminui cerca de 3 metros, isto em perfeita concordância com a previsão da relatividade geral. Era a primeira vez que ondas gravitacionais eram detetadas, apesar de indiretamente. Hulse e Taylor foram galardoados com o prémio Nobel por esta descoberta em 1993.

Como é que podemos melhorar o que Hulse e

Taylor fizeram, e medir uma onda diretamente, através da interação com a matéria? Sendo a onda uma força de maré que viaja, a detecção de ondas gravitacionais segue os princípios das forças de maré, ou seja, procura-se o movimento relativo entre duas partículas à passagem da onda, com a amplitude e frequência da onda, ver Fig. 2, dando uma indicação da força relativa sofrida pelas duas partículas. Por exemplo, a onda emitida pelo sistema binário de buracos negros tem uma amplitude que decresce com a distância viajada e quando ela passa no sistema solar, a distância entre a Terra e o Sol, que para este efeito podem ser consideradas partículas, vai sofrer pequenas alterações, descritas pela Fig. 2. Ao chegar ao sistema solar a amplitude da onda é muito pequena: a distância entre a Terra e o Sol sofre uma variação no máximo de um milésimo da espessura de um cabelo humano.

Apesar de parecer impossível, Joseph Weber iniciou a busca por ondas gravitacionais a partir dos anos 1960. Este projeto iria durar meio século e envolver milhares de cientistas até acabar. O esquema, uma barra de alumínio cujo comprimento variava se fosse atingido por uma onda gravitacional, não conseguiu nunca detectar tais ondas, mas foi um importante precursor dos detectores mais avançados atuais como o LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*). Os detectores LIGO originais estão montados nos estados americanos de Louisiana e Washington. O princípio de funcionamento do LIGO é simples: consiste em dois espelhos pendurados na extremidade de dois braços perpendiculares ao longo dos quais circula um feixe laser. Quando uma onda gravitacional ténue mas de amplitude apropriada chega à Terra, o comprimento dos braços varia infimamente. Este comprimento é medido usando as propriedades de interferência do feixe laser após serem refletidos pelos espelhos. Os espelhos são aqui as partículas que se mexem à passagem da onda. Medindo a forma como o comprimento dos braços varia, conseguimos saber de onde veio e quais as propriedades das fontes que geraram a onda. Na prática, foram precisas décadas de esforços teóricos e tecnológicos, naquela que foi uma das mais complexas e demoradas buscas por uma previsão teórica. A Terra treme constantemente, o laser exerce uma pressão sobre os espelhos, e tudo isto com muitos outros fatores causa ruído que impedia uma observação limpa das ondas gravitacionais.

3.3 GW150914 e o futuro

A busca foi uma história de sucesso. Em 14 setembro de 2015, o cientista de serviço olhou para o ecrã e viu que os espelhos se estavam a mover precisamente como na Fig. 2! Este evento, batizado com a data em que foi observado, foi a primeira observação dum sistema binário de buracos negros

em colisão, cada um com cerca de 30 massas solares, e a uma distância cosmológica de 1200 milhões de anos-luz.

Esta detecção direta foi agraciada com o Nobel da Física de 2017, para Ray Weiss, o experimentalista que mostrou como é que se consegue vencer a maior parte do ruído, Kip Thorne, o teórico por trás da detecção, e Barry Barish o organizador da comunidade de centenas de físicos.

Entretanto, o LIGO e o detetor europeu Virgo situado em Pisa viram posteriormente mais nove eventos de buracos negros em colisão além de outra espetacular colisão de duas estrelas de neutrões também observada em todas as frequências de radiação eletromagnética. Estão agora a decorrer observações adicionais com novos eventos detetados e é esperado que se vejam uma ou mais colisões por semana quando os instrumentos estiverem a operar em pleno.

Devido ao ruído sísmico contínuo da Terra, é difícil fazer observações em frequências abaixo de 10 Hz. Ora estas frequências são precisamente aquelas que esperamos que sejam geradas por buracos negros supermassivos, como os que existem nos centros das galáxias. Para resolver este problema, a Agência Espacial Europeia vai colocar o detetor LISA (*Laser Interferometer Space Antena*) no espaço. Sabemos também que o universo primordial gerou ondas gravitacionais através de pequenas perturbações. A teoria inflacionária para o universo numa fase inicial faz previsões precisas para o espectro dessas ondas gravitacionais. É possível que o detetor LISA capte essas ondas, fazendo assim avançar de forma extraordinária o nosso conhecimento do universo.

4. Conclusões

Desde a elaboração da relatividade geral de Einstein em 1915 e a sua confirmação pela deflexão da luz no eclipse solar por Eddington e colaboradores em 1919, assistimos a um desenvolvimento permanente e a descobertas extraordinárias. Buracos negros foram preditos em 1939 e confirmados por observações em todo o espectro eletromagnético em décadas subsequentes. Sabemos hoje que todas as galáxias, ou quase todas, contêm um buraco negro central. Em 2015 confirmámos definitivamente a existência de ondas gravitacionais. Estas ondas detetadas provêm de um sistema binário de buracos negros a distâncias cosmológicas, os quais em órbita recíproca colidem gerando uma quantidade enorme de energia na forma de radiação gravitacional que passa pela Terra como uma onda infimamente ténue.

Mas ainda há muito, muito mais, por fazer e por entender: Quando, onde e como é que os buracos negros nasceram? Como é que eles crescem? Qual a sua influência no desenvolvimento das galáxias? Os buracos negros que observamos são mesmo os previstos pela teoria de Einstein? É de esperar que a observação precisa de buracos negros nos traga novidades. O que é a matéria escura e como é que interage com o modelo padrão de partículas? A única interação que sabemos que a matéria escura tem é gravitacional. É possível ver os efeitos de matéria escura com ondas gravitacionais?

A teoria da relatividade geral não pode ser a palavra final. O interior de buracos negros é singular e nessa singularidade o próprio espaço-tempo é destruído. Como pode-

mos observar o interior de um buraco negro? Do que é feita uma singularidade? Ainda não temos resposta, mas a ciência tem-nos sempre surpreendido com aquilo que pensávamos estar para além das nossas possibilidades.

Créditos das figuras:

A Figura 1 foi retirada de *Physical Review D* 96, 024039 (2017).

A Figura 2 é uma representação do evento GW150914 detetado pelo LIGO, ver *Physical Review Letters* 116, 061102 (2016)



José Pizarro de Sande e Lemos, nasceu em 1957 em Lisboa. Foi aluno do Colégio São João de Brito e do Liceu Camões em Lisboa e do Colégio São Vicente no Rio de Janeiro. Obteve o Mestrado em Física em 1982 pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e o PhD em Astrofísica e Gravitação em 1987 pela Universidade de Cambridge. Trabalhou no Observatório

Nacional do Rio de Janeiro de 1988 a 1996 onde foi Investigador Titular. Realizou a Agregação em 1996 no Instituto Superior Técnico no qual é Professor Catedrático no Departamento de Física e presidente do Centro de Astrofísica e Gravitação (CENTRA). É membro fundador e o atual presidente da assembleia geral da Sociedade Portuguesa de Relatividade e Gravitação. O cerne da sua investigação é em física e astrofísica de buracos negros. Tem mais de 150 trabalhos publicados em revistas internacionais na área de astrofísica relativista, gravitação, buracos negros, ondas gravitacionais, cosmologia e física fundamental com um total de 6000 citações. Obteve distinction no famoso exame Part III of the Mathematical Tripos de Cambridge e foi eleito Senior Scholar do Trinity College. Recebeu o prémio UTL/Santander de 2009, atribuído ao professor e investigador da Universidade de Lisboa que se destacou na respetiva área pelo número e pelo impacto dos trabalhos que publicou em revistas científicas de circulação internacional e foi galardoado com o prémio vitalício de Outstanding Referee da American Physical Society em 2010 pela qualidade dos seus pareceres. É organizador da conferência científica *From Einstein and Eddington to LIGO: 100 years of gravitational light deflection* no Príncipe, em maio de 2019, em comemoração dos 100 anos do eclipse solar histórico, <https://science.esundy.tecnico.ulisboa.pt/en/>.



Carlos Alberto Ruivo Herdeiro, é doutorado em Física Teórica pela Universidade de Cambridge, em Inglaterra. “Trabalhou na Universidade de Stanford (EUA), Porto, Aveiro e é atualmente Professor Associado com Agregação no Departamento de Física do Instituto Superior Técnico e investigador no Centro Multidisciplinar de Astrofísica (CENTRA). O seu principal foco de investigação é a física-matemática e astrofísica de buracos negros. É membro fundador, e presidente em exercício, da Sociedade Portuguesa de Relatividade e Gravitação.



Vitor Cardoso, é Professor Catedrático e Investigador no Departamento de Física do Instituto Superior Técnico, onde lidera o Grupo de Gravitação (GRIT) do CENTRA. É Scientific Associate no CERN e Visiting Professor na Universidade de Amsterdão. Os seus interesses de investigação incidem sobre gravitação, em particular ondas gravitacionais e buracos negros. É autor de um livro e de cerca de 200 artigos publicados em revistas internacionais. Foi-lhe atribuído o Prémio “Excelência no Ensino,” pelo Técnico em 2018 e a sua investigação foi distinguida duas vezes pelo *European Research Council*. Em 2015 foi agraciado pelo Presidente da República com a Ordem de Santiago D’Espada. Neste momento, é líder de um consórcio internacional de mais de 30 países, que se dedica ao estudo de ondas gravitacionais e buracos negros.

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 constrear 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. Bradač, 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. Rirschnner, 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.

O Universo Dinâmico

A visão Cosmológica

José Pedro Mimoso¹, Nelson J. Nunes²

¹Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

²Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço

Resumo

Neste texto abordamos a forma como a teoria da Relatividade Geral (RG) introduziu não só uma nova concepção da gravitação, ao passar a ser interpretada como a curvatura do espaço-tempo, mas também como esta descrição implicou que as leis da Física passassem literalmente a ter um carácter universal. Resumimos aqui as etapas essenciais da aplicação da teoria de Einstein ao Universo como um todo, decorridos agora 102 anos desde que esse exercício foi tentado pela primeira vez. Procuramos partilhar a ideia de que a gravitação das grandes escalas e as teorias quânticas das pequenas, concorrem para o nosso atual entendimento do Universo. Queremos deixar claro que este programa da cosmologia moderna se foi robustecendo durante este século, alicerçando-se em observações cosmológicas cada vez mais precisas.

1. Da Relatividade Geral à expansão do Universo

Quando Einstein introduziu a teoria da Relatividade Geral (RG) a gravitação foi surpreendentemente reinterpretada como a curvatura do espaço-tempo, tal como se comprovou nas observações da ilha de Príncipe de que agora se comemora o 1.º centenário. Porém, mais inesperada ainda, foi a constatação de que o Universo está sujeito às leis da Física e que não é apenas o cenário onde elas se aplicam.

As famosas equações de Einstein da RG (ver os outros textos deste número da Gazeta de Física) revelam-nos que a curvatura do espaço-tempo é determinada pela distribuição de matéria e energia. Assim, Einstein apercebeu-se logo em 1917 [1], que se tornava possível, para não dizer tentador, refletir sobre a maneira como se poderia descrever o campo de gravitação criado pelas aglomerações de estrelas à nossa volta.

Recorde-se que nesta época a Via Láctea era essencialmente tudo o que preenchia o nosso Universo e que só em 1924 Edwin Hubble mostraria que as inúmeras nebulosas que se observavam eram, na sua esmagadora maioria, outras galáxias como a

nossa e independentes desta. Einstein estava preocupado com a caracterização do campo gravitacional a grandes distâncias das concentrações de massa, onde deveria ser fraco. Nesse limite espacial do Universo, a gravitação Newtoniana deveria ser recuperada, mas Einstein debatia-se com a instabilidade da configuração definida pela aglomeração espacialmente limitada da matéria. Era extremamente difícil definir condições adequadas para o campo gravitacional nas fronteiras desse Universo.

A solução que adoptou foi a de considerar um universo homogéneo em média, onde a tendência para o seu colapso fosse contrariada por uma modificação da equação Newtoniana de Poisson no limite do campo fraco. Para esse fim incluiu uma distribuição de matéria que produzisse um efeito repulsivo e que se opusesse dessa maneira ao colapso do Universo. Mas surgia novamente o problema da definição das condições fronteira que decorria de ter essa componente repulsiva por todo o lado, incluindo a fronteira do espaço onde não deveriam existir fontes do campo. Para evitar esta dificuldade, admitiu que o universo curvo seria espacialmente fechado sobre si próprio e portanto sem fronteira. Tudo isto se consubstanciou numa generalização das suas equações, incluindo agora um termo adicional envolvendo uma constante cosmológica que permitia um universo estático e com curvatura positiva.

Alguns meses depois, no mesmo ano de 1917, Willem de Sitter mostrava que um universo com uma constante cosmológica mas sem matéria, exibia desvios espectrais e não era afinal necessariamente estático. Isso suscitou o comentário irónico que o Universo de Einstein era “matéria sem movimento” e o de de Sitter “movimento sem matéria”.

Nos anos seguintes começou a ser aceite que o Universo tinha de ser de facto dinâmico. Primeiro pelo meteorologista russo (na época, soviético) Aleksander Friedmann que em 1922 retomou a hipótese de uma distribuição uniforme de matéria inerte (sem pressão) tal como no modelo concebido por Einstein, mas agora sem a constante cosmológica. Friedmann obteve soluções que descrevem um universo em expansão indefinida se o Universo for aberto ou plano. No caso de o universo ser fechado, este expandiria até uma dimensão máxima a que se seguiria o seu colapso. A mesma conclusão foi encontrada pouco tempo depois,

em 1927, pelo abade belga Georges Lemaître que foi, tudo indica, o primeiro a compreender em toda a sua dimensão as novidades físicas deste modelo para o Universo. Foi ele aliás quem mostrou que a solução estática obtida por Einstein era instável e que o seu universo estático se transmutaria num universo em expansão (ou em colapso) quando sujeito a uma ligeira perturbação.

O universo em expansão implicava que, no passado, ele tinha sido mais pequeno e, extrapolando até ao extremo, teria partido de uma inimaginável concentração de matéria inicial, que Lemaître, em 1931, designou por Átomo Primordial. Lemaître percebeu também que o fenómeno da instabilidade gravitacional poderia estar na origem da formação de concentrações localizadas de matéria que podiam ser assim relacionadas com as galáxias.

Entretanto, em 1929, o astrónomo norte-americano Edwin Hubble, que em 1924 tinha demonstrado a natureza extragaláctica das nebulosas, fazia a fantástica descoberta de que a maior parte dessas galáxias se estavam a afastar de nós de acordo com a lei

$$v = H d,$$

que nos revelava que as velocidades de recessão, v , eram proporcionais às distâncias, d , a que as galáxias estavam da nossa (Figura 1). Nesta relação, H é uma constante de proporcionalidade que veio a tornar-se conhecida por *constante de Hubble*. Seguindo o caminho iniciado anos antes por Vesto Slipher, Hubble tinha analisado a luz proveniente das galáxias cujas distâncias havia determinado e registou, caso a caso, as posições das riscas dos espectros característicos de elementos químicos nessas galáxias. A conclusão foi de que na larga maioria dos casos, as riscas estavam desviadas no sentido dos maiores comprimentos de onda, i.e., exibiam o que se designa de “desvio para o vermelho”, ou na expressão inglesa, “redshift”, e que esse era maior quanto maior fosse a distância à galáxia fonte.

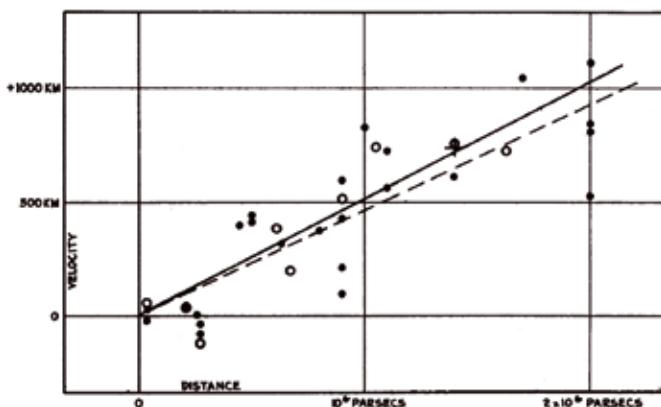


Fig. 1 - O diagrama de Hubble - Reproduzido de Hubble, E. P. (1929) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 15, 168 -173. [pmid:16577160](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16577160/)

A interpretação mais simples da lei de Hubble e que vinha ao encontro dos modelos de Friedmann e de Lemaître, era de que as fontes se estão a afastar de nós, numa manifestação do famoso efeito Doppler bem familiar em fenómenos sonoros. Admitindo que a nossa localização no universo não é especial e tomando as galáxias como marcos geodésicos do Universo, esta lei conduz à extrapolação de que a maior

parte das galáxias no Universo se afastam umas das outras e que este se expande como a superfície de um balão.

Curiosamente Lemaître tinha publicado essa mesma lei de recessão das galáxias dois anos antes de Hubble, em 1927, num artigo que por ter sido publicado em francês não teve impacto. Também não ajudou particularmente a circunstância de a tradução para inglês (impulsionada por Eddington) ter sido amputada da parte que referia essa lei, o que tem sido objeto de especulações sobre a acidentalidade e motivação para esse corte. Importa no entanto referir que Lemaître terá usado dados observacionais sobre os “redshifts” das galáxias cedidos por Slipher e por Hubble, o que pode explicar porque não reclamou na altura a sua quota parte na descoberta. Recentemente, em 2018, a União Astronómica Internacional (IAU) votou e aprovou a recomendação de que se passe a designar a lei de recessão das galáxias por lei de Hubble-Lemaître.

2. Da expansão ao Big-Bang

A ideia de um universo dinâmico e em expansão era tão inesperada e incrível que suscitou desconfiança na comunidade científica. Acrescia que se verificava a existência de uma debilidade importante. O inverso da constante H tem as dimensões de tempo o que por conseguinte serve de estimativa para a idade do Universo. Ora as medições realizadas por Hubble indicavam que $H \approx 500 \text{ Km /s Mpc}^{-1}$, o que significava que a idade do Universo seria da ordem de 2000 milhões de anos, valor inferior à idade geológica da Terra.

Verificou-se mais tarde que as razões para esta inconsistência tinham a ver com alguns erros sistemáticos nas observações de Hubble. Corrigindo esses aspectos e aliando uma melhoria dos métodos de medição das distâncias intergalácticas, Sandage e Mayall obtinham $H \approx 180 \text{ km /s Mpc}^{-1}$ em 1952 e nos anos sessenta os valores obtidos por vários grupos oscilavam já entre $H \approx 50 \text{ km /s Mpc}^{-1}$ e $H \approx 100 \text{ km /s Mpc}^{-1}$. Estes valores correspondem a idades do Universo da ordem da dezena de milhares de milhões de anos consistentes com as datações geológicas. Actualmente, o valor de H obtido por intermédio da missão Planck da agência ESA é de $H \approx 67,8 \text{ km /s Mpc}^{-1}$ ainda com uma incerteza de aproximadamente 2-3 %.

Tal como foi entendido por Lemaître, se recuarmos no tempo o Universo tem dimensões progressivamente mais pequenas, a densidade da energia da matéria é cada vez maior e, portanto, também aumenta a sua temperatura. Levando este processo conceptual até às suas últimas consequências, atinge-se uma situação extrema em que as leis da Física deixam de ser válidas e em que se torna necessária uma descrição quântica da gravitação de que ainda não dispomos. Esta fase designa-se por época de Planck e corresponde a temperaturas da ordem de

$T \approx 10^{32}$ K. Porém o mais importante é que ao nos aproximarmos desta fase primordial se torna claro que as leis quânticas da Física se tornam necessárias para entendermos o Universo. O Universo é não só gravítico, mas também regido pelas leis da Física Nuclear e de Partículas, comprovando pois de maneira enfática a afirmação que fizemos no início deste texto de que a partir do advento da teoria da RG as leis da Física passaram a reger a totalidade do Universo.

O primeiro físico a analisar esta questão cuidadosamente foi George Gamow que, logo em 1935, começou a estudar as reações nucleares que se produziriam quando a matéria no universo estivesse a temperaturas pelo menos tão elevadas como aquelas que se encontram no interior das estrelas. Esses seus estudos prosseguiram, depois da Segunda Guerra Mundial, em colaboração com Ralph Alpher e depois com Robert Herman. Deram-se conta que, se o universo fosse inicialmente um fluido constituído unicamente por protões, acabaria por dar origem à formação de átomos de hélio numa proporção por eles prevista de um átomo de hélio para oito de hidrogénio. Também previram que após milhares de milhões de anos, o banho térmico em que as reações se davam, arrefeceria até uma temperatura de 5 kelvins.

Esta radiação foi descoberta em 1965 em circunstâncias algo rocambolescas, já que foi detectada acidentalmente na sequência da tarefa de calibração de uma antena de um radio-telescópio da companhia BELL por Arno Penzias e Robert Wilson e foi capital para que vingasse a ideia de um universo dinâmico e em expansão. Esta radiação surgia como uma radiação de corpo negro com uma temperatura que em 1965 era estimada em cerca de 3 K e nenhum modelo alternativo para o universo a conseguia prever cabalmente (Penzias e Wilson receberam o prémio Nobel da Física em 1978 por esta descoberta).

O modelo do Universo em expansão, entretanto designado de forma depreciativa por Fred Hoyle como modelo do “Big-Bang”, propunha que quando o Universo arrefecesse até à temperatura de ionização dos átomos de hidrogénio deveria, no que se seguia, permitir que os núcleos desse elemento capturassem electrões e que o caminho livre médio dos fótons passasse a ser muito maior do que a distancia inter-atómica. Isso tornaria o Universo transparente, mas originaria também um banho de radiação térmica com uma temperatura de aproximadamente 3000 K. O elevado grau de isotropia da radiação detectada por Penzias e Wilson conferia credibilidade ao princípio cosmológico e indicavamos que inequivocamente, no passado, a matéria e radiação estiveram num elevadíssimo estado de equilíbrio térmico.

3. As sementes de estrutura

Em 1992 o satélite COBE fez uma descoberta adicional de extraordinária importância: a radiação cósmica de fundo contém, em proporções ínfimas, pequenas flutuações de temperatura (o termo é anisotropias) que são vestígios das condições anteriores à sua libertação. Os resultados não podiam ser mais satisfatórios para o modelo de Big-Bang. Não só as flutuações estavam lá, como as suas dimensões eram consistentes com os limites esperados, $\Delta T/T \sim 10^{-5}$. Se estas flutuações não existissem na radiação cósmica de fundo nesta gama de amplitudes, teríamos que procurar uma explicação alternativa rebuscada para o mecanismo de formação de galáxias e enxames de galáxias (George Smoot e John Mather receberam o Prémio Nobel da Física em 2006 por esta descoberta do COBE).

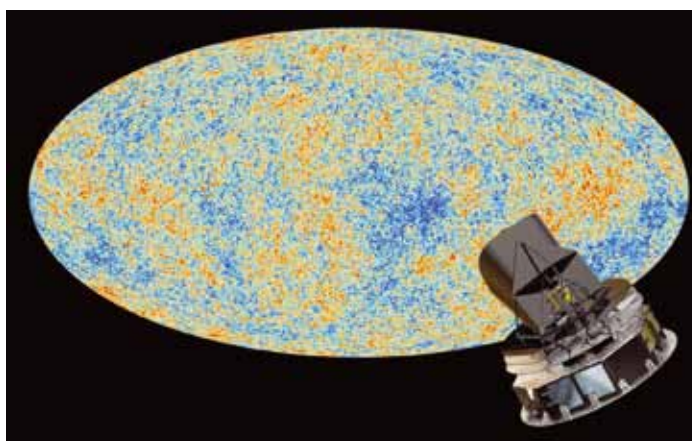


Fig. 2 - A radiação cósmica de fundo através dos olhos do satélite espacial Planck - Créditos ESA e colaboração do Planck - D. Ducros"

Tendo-se tornado aceite como o modelo cosmológico mais plausível, o modelo do Big-Bang suscitava ainda assim algumas questões importantes que, no final dos anos 70, foram expostas claramente por dois eminentes cosmólogos, Robert Dicke e James Peebles, no volume de comemoração do centenário do nascimento de Einstein. Não se percebia em particular porque é que a radiação de fundo é tão homogénea. Tendo a radiação sido libertada quando o universo tinha cerca de 300 000 anos, quaisquer zonas do céu distanciadas de mais do que o tamanho de 2 Luas no céu, deveriam estar causalmente separadas [2]. De facto, se o Universo tem uma idade finita, regiões mais espaçadas entre si do que 1° , não teriam tempo de interagir entre si, dado o carácter finito da velocidade de propagação da luz que limita o tempo de propagação das interações. Por outras palavras, a informação não pode viajar mais rápido do que a luz no vácuo.

A solução para todos estes problemas foi proposta nos dois anos que se seguiram ao artigo de Dicke and Peebles. Alan Guth propôs, em 1981, que um campo escalar, envolvido numa transição de fase de primeira ordem associada à plausível grande unificação das interações fundamentais no Universo primordial ficasse “preso” num mínimo não nulo do seu potencial e dessa forma induzisse o mesmo efeito repulsivo que uma constante cosmológica. Na prática, originaria uma pressão efectiva negativa e o universo expandiria aceleradamente, ao invés do que sucede quando as pres-

sões são positivas. Bastava que isso sucedesse durante um brevíssimo lapso de tempo (10^{-35} s), o suficiente para que o tamanho do universo aumentasse de um incrível factor de e^{60} vezes, para resolver todos os problemas enunciados por Dicke e Peebles.

Os cosmólogos deram-se rapidamente conta que este mecanismo tinha um atrativo adicional que era o de que, sendo o processo de natureza quântica, as correspondentes flutuações quânticas do campo escalar poderiam estar na origem das perturbações que estão, por sua vez, na base da formação de estrutura por instabilidade gravitacional. Ou seja, tornava-se possível relacionar a fase de expansão acelerada proposta por Guth com as flutuações da radiação de fundo e, subsequentemente, com a formação de estruturas. Este aspecto, de certa maneira, tornou-se num dos argumentos de maior peso na aceitação da existência da fase inflacionária na primeira fração de segundo do universo.

A ideia simples de explicar a formação de grandes concentrações de matéria, as galáxias ou os enxames de galáxias, como o resultado do colapso de excessos de densidade de matéria/energia relativamente à média é, na essência, a mesma que foi proposta por Lemaître. As sobre-densidades atraem a matéria à sua volta, agregando-a e formando concentrações maiores. Porém, no Universo em expansão o colapso das concentrações de matéria/energia torna-se mais difícil do que num universo estático. De facto, a expansão está permanentemente a contrariar esse colapso promovendo a separação e conseqüente diluição da matéria. Por outro lado, antes da libertação da radiação cósmica de fundo, quando o universo está ainda suficientemente quente para que a matéria e a radiação estejam unidas num plasma radiativo, os fótons estão também constantemente a transportar energia de um lado para outro contribuindo também efetivamente para homogeneizar a distribuição de matéria (a este propósito registre-se que existem cerca de 3 mil milhões de fótons por cada barião).

Só a partir da libertação da radiação de fundo é que o colapso passa a ter hipóteses de se iniciar e de ser bem sucedido porque a expansão do universo se torna mais lenta e porque a radiação deixa de ser bem sucedida no seu efeito uniformizador. No entanto, este mecanismo depende do balanço entre as amplitudes das flutuações de matéria/energia relativamente à densidade média do universo, da taxa de expansão, bem como da natureza das componentes materiais envolvidas no processo. De facto, verifica-se que o crescimento que os modelos prevêm para as sobre-densidades de matéria bariónica (neutrões e prótons) não é suficientemente rápido para poder criar, desde a libertação da radiação cósmica de fundo, a estrutura de galáxias e agregados de galáxias que se observa se só existir esse tipo de matéria. Nesta fase do processo a radiação deixa de desempenhar um papel relevante, uma vez que não se conseguem agregar os fótons. O mecanismo de instabilidade gravitacional só pode frutificar se existir alguma componente, para além da *matéria bariónica*, que estimule o colapso gravitacional, por um lado, amplificando as flutuações iniciais e, por outro lado, contribuindo para o seu crescimento. Trata-se de uma componente misteriosa de matéria que por só ser detectada pelos seus efeitos gravitacionais foi de-

signada como *matéria escura* e que corresponde a uma proporção cerca de 5 vezes maior do que a da *matéria bariónica*.

Note-se que estas inferências são consistentes com os argumentos, independentes delas, que decorrem da nucleosíntese primordial e da provável existência de uma fase inflacionária no Universo primitivo. A nucleosíntese dos elementos leves só é bem sucedida se a percentagem de matéria bariónica não ultrapassar 4 % da densidade total dos constituintes do Universo. A inflação favorece por seu turno que o universo seja espacialmente plano, de modo que 96 % do conteúdo do Universo é escuro.

4. A aceleração do Universo e outras questões

Entretanto nos anos 1990, os cosmólogos deram-se conta que as supernovas de uma determinada classe podiam ser usadas como indicadores de distância. De facto, libertam sempre aproximadamente a mesma quantidade de energia e exibem um processo de crescimento e decaimento da luminosidade com uma curva bem característica. Dado libertarem enormes quantidades de radiação, permitem estender as nossas medições de distâncias a escalas verdadeiramente cosmológicas (são facilmente detectáveis a distâncias superiores a 100 Mpc).

Este facto deu origem a uma verdadeira caça às supernovas. Em cada galáxia ocorre, em média, apenas uma supernova por século, mas existem tantas galáxias que foi possível criar uma rede de observações que estivesse permanentemente atenta ao maior número possível de galáxias e que desencadeasse um conjunto de procedimentos observacionais adequado à identificação do seu tipo e ao registo das suas características mais significativas. Este processo foi mesmo levado a um enorme nível de sofisticação tecnológica graças à evolução



Fig. 3 - imagem da Supernova 1994D (SN1994D) na galáxia NGC 4526 (SN 1994D é o ponto brilhante no canto inferior esquerdo) obtida pelo Telescópio Espacial Hubble - Créditos NASA/ESA"

dos telescópios e dos detectores, chegando até a ter uma ampla automatização.

Dois consórcios internacionais que desenvolveram este rastreio obtiveram resultados verdadeiramente notáveis. Descobriram que o universo parece estar em expansão acelerada e que tudo indica que é espacialmente plano com $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$ que sugere de novo que uma energia repulsiva do género da constante cosmológica sempre parece existir. Afinal Einstein não terá cometido um erro tão grande assim quando a introduziu, há cerca de 90 anos...! Saul Perlmutter, Brian Schmit e Adam Riess receberam o Prémio Nobel da Física em 2011 por esta descoberta [3].

Além disso, estes resultados são concordantes com os resultados da análise do espectro da radiação cósmica de fundo (realizadas por COBE e entretanto significativamente melhoradas pelas missões WMAP e Planck). No entanto, estes resultados também suscitam algumas perplexidades. Qual é a natureza e origem da energia repulsiva agora designada por *energia escura*? E, uma vez que se sabe que se a expansão do universo tiver começado a acelerar demasiado cedo isso compromete a formação das galáxias, porque é que o universo só começou a acelerar recentemente?

Existem assim importantes questões em aberto, nomeadamente, as que estão relacionadas com o esclarecimento da natureza das duas componentes de matéria/energia invisíveis. Serão mesmo necessárias ou devemos considerar extensões à RG dependentes da escala? Outras questões, mais especulativas, têm também suscitado muito interesse no âmbito do modelo do universo em expansão. Por exemplo, as questões relacionadas com o desenvolvimento de uma teoria que quantifique a gravitação e que, unindo-a com as outras interações fundamentais, seja capaz de nos explicar cabalmente o que se passou na época de Planck, na primeira fracção de segundo do universo. Ou também a possibilidade de as próprias leis da física evoluírem tal como o faz o Universo e, assim, não existirem constantes universais como a velocidade da luz no vazio ou a constante da gravitação de Newton.

Qualquer pequeno progresso que se possa realizar em qualquer uma destas questões será decerto um passo importante na Cosmologia, mas também, mais geralmente, na Física. A recente e extraordinária detecção de ondas gravitacionais feita pelo LIGO em 2015 (ver artigos neste número) para além de nos proporcionar uma maravilhosa confirmação da validade da RG, abre nesse sentido fundadas esperanças de que num futuro não muito afastado, i.e., nas próximas décadas, se possam detectar ondas gravitacionais de origem cosmológica que nos darão acesso directo ao Universo anterior à libertação da radiação cósmica de fundo e portanto ao Universo Primitivo.

Referências

- [1] Albert Einstein, "Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie", Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), Seite 142-152 (1917), Tradução Portuguesa: "Considerações cosmológicas sobre a Teoria da Relatividade Geral", em "O Princípio da Relatividade", pp. 225-241, Textos Fundamentais da Física Moderna, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa (1971).
- [2] José Pedro Mimoso, "Do Big Bang às Galáxias", Capítulo 3, em "O Código Secreto: A Descoberta dos Padrões da Natureza", Coord. Margarida Telo da Gama, pp. 81-108, nº 137 Coleção Ciência Aberta, Gradiva, Lisboa (2005)
- [3] Nelson J. Nunes, "O Prémio Nobel da Física 2011: Supernovas e a aceleração do Universo" em Nuclio . Portal do Astrónomo: <https://portaldoastronomo.org/2014/05/o-premio-nobel-da-fisica-de-2011-supernovas-e-a-aceleracao-do-universo/>



Nelson Nunes, é licenciado em Engenharia Física Tecnológica pelo Instituto Superior Técnico, e doutorado em Física pela Universidade de Sussex no Reino Unido. O Nelson foi investigador em Londres, Minnesota, Cambridge e Heidelberg. Em 1998 foi membro de uma das equipas que nesse ano descobriu que o Universo se encontra em expansão acelerada. Tem trabalhado na construção dos modelos teóricos que tentam explicar a natureza dessa aceleração. De momento é investigador no Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço e lecciona na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. É o director do Observatório do Lago Alqueva em Monsaraz.



José Pedro Mimoso, é doutorado em Astronomia e Astrofísica pela Universidade de Sussex, no Reino Unido (1994). Professor Associado no Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e investigador do Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço (IA), trabalha em Cosmologia e Astrofísica Relativista. Publicou algumas dezenas de artigos e é autor de um capítulo do livro de divulgação "O Código Secreto: À descoberta dos padrões da Natureza", editado pela Gradiva em 2005. É membro de várias sociedades científicas nacionais e internacionais, tendo sido membro da direcção *Sociedad Espanhola de Relatividad y Gravitación* até 2019. Foi distinguido como *Outstanding Referee* pela *American Physical Society* em 2017. É atualmente vice-presidente do Departamento de Física da FCUL.

Artigos sobre Teoria da Relatividade e Eclipses publicados na Gazeta de Física

Compilação de Augusto Fitas¹

¹Universidade de Évora

- Herdeiro, Carlos A. R. e Lemos, José P. Sande. 2018. O buraco negro cinquenta anos depois: A génese do nome. *Gazeta de Física*, 41(2): 2-7.
- Herdeiro, Carlos e Cunha, Pedro V. da. 2016. Sombras de buracos negros. *Gazeta de Física*, 39 (1/2): 68-74.
- Lopes, Ilídio. 2016. O estranho caso da Matéria Escura. *Gazeta de Física*, 39 (1/2): 68-74.
- Aguiar, Paulo e Crawford, Paulo. 2015. Os enigmas da expansão do Universo: discussão e análise dos conceitos e preconceitos de uma grande descoberta. *Gazeta de Física*, 38 (1): 2-10.
- Cardoso, Vítor, Brito, Richard e Pani, Paolo. 2015. Cem anos de Gravitação. *Gazeta de Física*, 38 (1): 11-17.
- Albuquerque, M. A e Peralta, L.. 2013. Como percebem os professores do ensino secundário os conceitos relativistas de massa e energia? *Gazeta de Física*, 35 (1): 24-28.
- Lemos, José P. Sande. 2011. Mira Fernandes e a introdução da teoria da relatividade geral em Portugal. *Gazeta de Física*, 34(2): 27-50.
- Crawford, Paulo e Simões, Ana. 2009. O eclipse de 29 de Maio de 1919 A.S. Eddington e os astrónomos do Observatório da Tapada. *Gazeta de Física*, 32 (2/3): 22-28.
- Krauss, Lawrence M. . 2007. O mistério da origem da energia escura. *Gazeta de Física*, 30 (3/4): 3-6.
- Simões, Ana. 2006. Einstein: O Homem e a época. *Gazeta de Física*, 29 (3): 4-7.
- Fiolhais, Carlos. 2006. Albert Einstein - novo século e nova física. *Gazeta de Física*, 29 (3): 7-9.
- Afonso, João. 2006. Em busca das galáxias perdidas. *Gazeta de Física*, 29 (3): 16-21.
- Herdeiro, Carlos. 2006. Uma breve história do universo: do big bang ao universo acelerado. *Gazeta de Física*, 29 (3): 22-26.
- Almeida, Guilherme de. 2005. Quando a lua oculta o sol. *Gazeta de Física*, 28 (4): 18-21.
- Bertolami, Orfeu e Páramos, Jorge. 2005. Einstein e a descrição unificada da natureza. *Gazeta de Física*, 28 (3): 4-10.
- Fitas, Augusto. 2004. A teoria da relatividade de em Portugal no período entre as guerras. *Gazeta de Física*, 27 (2): 4-9.
- Lemos, José P. Sande. 2002. Buracos negros e partículas de massa nula. *Gazeta de Física*, 25(4): 39-40.
- Lobo, Francisco e Crawford, Paulo. 1999. "Wormholes", túneis no espaço-tempo. *Gazeta de Física*, 22 (3): 4-10.
- Abreu, Rodrigo de. 1998. Estabelecimento da transformação de Lorentz recorrendo a um conceito de velocidade limite. *Gazeta de Física*, 21 (3): 9-14.
- Tereno, Ismael e Crawford, Paulo. 1998. Gravitação, inércia e o paradoxo da força centrífuga. *Gazeta de Física*, 21 (2): 6-13.
- Straumann, N. 1993. O Pulsar PSR 1913+16. *Gazeta de Física*, 16 (4): 11.
- Valadares, J. 1993. O Conceito físico de massa-II. *Gazeta de Física*, 16 (4): 13-19.
- Valadares, J. 1993. O Conceito físico de massa-I. *Gazeta de Física*, 16(1):9-14.
- Crawford do Nascimento, Paulo e Simões, A. Isabel. 1986. Tempo e Relatividade -II. *Gazeta de Física*, 9 (3): 49-56.
- Crawford do Nascimento, Paulo e Simões, A. Isabel. 1986. Tempo e Relatividade -I. *Gazeta de Física*, 9 (2): 36-40.
- Providência, J.. 1978. Introdução à relatividade restrita. *Gazeta de Física*, VI (1): 13-16.
- Machado, Frederico. 1972. Pulsações na gravitação universal. *Gazeta de Física*, V (5): 153-157
- Santos, Filipe Duarte. 1970. Apontamentos sobre teoria da Relatividade Restrita. *Gazeta de Física*, V (1): 30-34



Augusto Fitas é Professor (aposentado) de Física e de História e Filosofia da Ciência na Universidade de Évora, investigador do IHC-*cehñci* (UE). Na História e Filosofia da Ciência é autor - *O Princípio da Menor Acção: uma história de Fermat a Lagrange*; (em colaboração) *A Filosofia da Ciência no Portugal do século XX*, *Filosofia e História da Ciência no Portugal do século XX*, *Cartas entre Guido Beck e Cientistas Portugueses*.

CICLOS DE COLÓQUIOS



100 anos depois

E3@OAL - 21H30

17 de maio

ONDAS GRAVITACIONAIS. A SINFONIA CÓSMICA QUE ABALOU O MUNDO

Francisco Lobo

Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço,
Universidade de Lisboa

7 de junho

O LADO ESCURO DO ECLIPSE

Tiago Barreiro

Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço,
Universidade Lusófona

12 de julho

A ORIGEM DO TEMPO EM COSMOLOGIA. DE REGRESSO À MENSAGEM DE EINSTEIN

Paulo Crawford

Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço,
Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

6 de setembro

O LADO BRILHANTE DO UNIVERSO

José Afonso

Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço,
Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

A seguir às palestras, haverá visitas guiadas ao edifício do OAL bem como observações.

E3@CALEIDOSCÓPIO - 18H

23 de maio

EINSTEIN E EDDINGTON, ANTES E DEPOIS DO ECLIPSE DE 1919

Paulo Crawford

Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço,
Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

20 de junho

NO INTERIOR DO CONE DE SOMBRA. ECLIPSES DO SOL E DA LUA

Pedro Ré

MARE, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

27 de junho

ROÇAS DE S. TOMÉ E PRÍNCIPE COMO ESPAÇOS DE TECNO-CIÊNCIA

Marta Macedo

Instituto de Ciências Sociais, Universidade de Lisboa

4 de julho

ROÇA SUNDY DEPOIS DE EDDINGTON, 100 ANOS DE HISTÓRIA

Duarte Pape

Paralelo Zero

E3@SGL - 14.30H

29 de maio

SESSÃO COMEMORATIVA NA SOCIEDADE DE GEOGRAFIA DE LISBOA

Inclui três palestras e uma mostra do espólio da SGL relacionada com a efeméride.

Programa detalhado:

www.socgeografialisboa.pt e www.esundy.org

Coordenação: Ana Simões

Equipa: Ana Simões, Ana Eiró, Augusto Fitas, Joana Latas, João Retrê, José Afonso, José Avelãs Nunes, Luís Tirapicos, Paula Santos, Paulo Crawford, Pedro Ré

Consultadoria Científica: Luís Miguel Carolino, Pedro Raposo