

DA ILHA DO PRÍNCIPE AOS CONFINS DO UNIVERSO¹

Paulo Crawford²

Do princípio da relatividade à relatividade geral

Embora a teoria da relatividade restrita (TRR) tenha permitido estender a relatividade do movimento às leis do electromagnetismo, e a partir daí Einstein tenha formulado um Princípio da Relatividade que estabelece uma equivalência entre os observadores inerciais (com velocidade constante) para todas as leis físicas, a nova teoria não era compatível com a lei de Newton da gravitação. Segundo esta lei, se a distribuição de matéria mudasse numa certa região do espaço, o campo gravítico correspondente mudaria instantaneamente em qualquer outra parte do universo. A ser verdade, isso implicaria a possibilidade de enviar sinais instantâneos e exigiria um tempo absoluto, em contradição com a TRR. Einstein estava ciente deste problema quando, no Outono de 1907, Johannes Stark lhe pediu para contribuir com um artigo de revisão sobre o princípio da relatividade para o seu *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*. Por essa altura, Einstein começava a ficar

¹ Capítulo do livro *As Fronteiras do Universo*, a ser publicado pela Gradiva.

² Centro de Astronomia e Astrofísica e Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

insatisfeito com a limitação da relatividade aos movimentos inerciais e ansiava por alargá-la aos observadores acelerados. Nessa época, ainda trabalhava na Repartição de Patentes de Berna, teve “o pensamento mais feliz” da sua vida, como revelou ao seu colega e amigo Michele Besso. A igualdade entre a massa inercial, responsável pela inércia dos corpos, e a massa gravitacional, que transmite a força da gravidade, só poderia ser indicação de uma conexão íntima entre inércia e gravidade. Um astronauta numa nave espacial fechada não é capaz de distinguir se está em repouso num campo gravítico ou se está acelerado no espaço livre. A esta relação entre movimento acelerado e gravidade, Einstein chamou “princípio da equivalência”.

Mais tarde haveria de descrever esse momento prodigioso na sua lição na Universidade de Quioto em 1922: “De repente, um pensamento assaltou-me: se uma pessoa cai em queda livre não sente o seu próprio peso. Fiquei abismado. Este simples pensamento provocou-me uma profunda impressão. Impeliu-me para uma nova teoria da gravitação.” Com base neste princípio acreditou que seria capaz de construir uma teoria para substituir a teoria da gravidade de Newton, e ligou imediatamente o problema da gravidade ao problema da generalização da relatividade a todos os observadores. 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 só volta a pensar nestes problemas em 1911, já como professor catedrático de Física Teórica na Universidade de Praga.

Tanto o espaço ordinário (euclidiano) como o espaço-tempo da relatividade restrita são espaços planos. Ao procurar compatibilizar a interacção gravítica com as ideias da relatividade restrita, Einstein é levado, ao fim de uma luta intelectual intensa, a renunciar ao espaço-tempo plano. Na presença de um campo gravítico é necessário incluir todos os tipos de movimentos e não só os movimentos uniformes. Como generalizar o princípio da relatividade a todos os observadores de um campo gravítico? Sigamos o pensamento de Einstein. A interacção gravítica tem uma natureza única entre todas as forças: a queda dos corpos é independente da sua massa ou da sua

constituição. Isto sugere que a gravidade não é realmente uma força, mas uma propriedade geométrica do espaço(-tempo). É aqui que surge a ideia revolucionária de Einstein: os observadores em queda livre num campo gravítico identificam-se com os observadores inerciais da TRR no que diz respeito às suas observações locais. Mas, ao contrário da relatividade restrita, dois observadores em queda livre não mantêm uma velocidade uniforme entre si devido aos efeitos não locais do campo gravítico. Realmente, dois corpos em queda livre à superfície da Terra não descrevem trajectórias exactamente paralelas, pois essas trajectórias convergem para o centro de massa da Terra, embora, a uma escala local, as trajectórias sejam quase paralelas, quando observadas num pequeno intervalo de tempo. Para justificar estas diferenças, Einstein identifica a gravidade com uma modificação em relação à geometria euclidiana: a gravitação produz uma curvatura no espaço-tempo. As trajectórias dos corpos em queda livre serão as geodésicas deste espaço-tempo curvo. Claro que agora as geodésicas já não são linhas rectas, como eram no espaço plano, mas sim as linhas “mais direitas” que o espaço-tempo curvo admite. Por exemplo, na superfície de uma esfera as geodésicas são os círculos máximos: os meridianos e o equador. É interessante seguir o caminho que levou Einstein à consideração das geometrias não euclidianas. Em particular, examinou a situação de um observador num disco a rodar em torno de um eixo que passa pelo centro. Apelando ao Princípio da Equivalência (PE), pensou que o observador em rotação com o disco podia considerar-se em repouso e atribuir a força centrífuga devida à aceleração centrípeta à existência de um campo gravitacional centrífugo. Formulou em seguida a questão: qual a razão entre o perímetro do disco e o seu raio para um observador ligado ao disco e para um outro observador próximo em repouso, que vê o disco a rodar? O observador em repouso dará a resposta da geometria euclidiana e dirá que é 2π ; mas o observador em rotação, para quem as régua colocadas ao longo da circunferência do disco estão contraídas no sentido do movimento, dirá que a razão é maior do que 2π , visto que o raio do disco fica inalterado e são necessárias mais régua para perfazer o perímetro do disco. Isto significa que,

para esse observador, a geometria espacial do disco a rodar não é euclidiana. Einstein é assim levado a pensar que para um observador num campo gravitacional, de acordo com o PE, a geometria espacial também não deverá, em geral, ser euclidiana. A análise deste problema deve ter contribuído decisivamente para a ideia de representar a gravidade pela curvatura do espaço-tempo.

Ao voltar a Zurique em 1912, como professor de Física Teórica na Politécnica, Einstein mergulha profundamente no estudo das geometrias dos espaços curvos (riemannianos) com a ajuda do seu antigo colega, agora director da faculdade, Marcel Grossmann. Em 1913, Einstein e Grossmann escrevem um artigo no qual avançam esta ideia simples: o que nós pensamos serem as forças gravíticas não é outra coisa senão a expressão da curvatura do espaço-tempo. Mas Einstein e Grossmann não conseguiram encontrar as verdadeiras equações que relacionam a curvatura do espaço-tempo com a massa-energia que nele existe. Einstein continua a trabalhar neste problema quando vai para a Universidade de Berlim, em 1914, a convite de Max Planck. Ao descrever o campo gravítico através da curvatura do espaço-tempo, a Teoria da Relatividade Geral (TRG) transforma o espaço-tempo de um palco passivo, onde os acontecimentos físicos decorrem, num participante activo na dinâmica do cosmos. Finalmente, em Novembro de 1915, Einstein chega às equações do campo gravítico e mostra como a partir delas se pode explicar o avanço do periélio de Mercúrio.

Do desfazer de um mito à importância de uma observação astronómica

Os dez anos seguintes foram anos de recepção, afirmação e sucesso da teoria. Em 1918 surgiram os primeiros dois livros dedicados à TRG, um em Londres, por Arthur S. Eddington (1882-1944), e outro em Berlim, por Herman Weyl (1855-1955). A 29 de Maio de 1919, o encurvamento dos raios luminosos rasando o Sol foi medido na ilha do Príncipe e no Sobral (Brasil) durante um

eclipse solar, graças ao zelo de Sir Arthur S. Eddington e do Astrónomo Real britânico Sir Frank Watson Dyson (1868-1939). As previsões da teoria de Einstein foram publicamente confirmadas no famoso encontro da Royal Society em Londres a 6 de Novembro de 1919, em reunião conjunta com a Royal Astronomical Society, sob a presidência do patriarca da física J.J. Thomson. No dia seguinte, no cabeçalho do jornal londrino *The Times* lia-se: “Revolução na Ciência/ Nova Teoria do Universo/ Ideias Newtonianas Abandonadas.” A Primeira Guerra Mundial tinha terminado. O mundo estava cansado e desiludido, e à procura de novos ideais. A teoria de Einstein, com as suas ideias bizarras sobre a curvatura do espaço(-tempo), captou a imaginação da opinião pública, embora muito poucas pessoas a compreendessem. Apareceram então inúmeros artigos de divulgação em jornais e em revistas filosóficas que entusiasmaram o público culto e tornaram a relatividade um tema de conversação obrigatório. O próprio Einstein escreveu um longo artigo no *The Times* em finais de 1919, procurando explicá-la aos leigos. Na capa da revista noticiosa *Berliner Illustrirte Zeitung* de 14 de Dezembro de 1919 a sua fotografia é publicada com a legenda: “Uma nova grande figura da história mundial.” Einstein torna-se então um pensador célebre em todo o mundo e a sua opinião é solicitada para os mais diversos assuntos. Os Estados Unidos recebem-no com pompa e circunstância em 1921, e o seu nome passa a ser pronunciado com reverência, acabando por se tornar sinónimo de génio. Nem todos, porém, aplaudiram o triunfo de Einstein. Alguns membros da comunidade científica, e outras pessoas impelidas por razões políticas, moveram uma guerra sem quartel, considerando a sua teoria totalmente incompreensível e inútil.

Voltemos a 1919 e às observações que em grande parte permitiram a aceitação da TRG pela comunidade científica como a melhor teoria da gravitação. A concretização dessa experiência, uma das mais importantes do século XX, ficou associada às expedições a dois locais remotos dos trópicos com a finalidade de observar o eclipse total do Sol de 29 de Maio de 1919.

Uma delas, liderada por Eddington, dirigiu-se à ilha do Príncipe, território na altura sob administração portuguesa. A outra, chefiada por Andrew Crommelin, rumou ao Sobral, no nordeste do Brasil. As expedições tinham por objectivo verificar o encurvamento dos raios luminosos no campo gravítico do Sol. Na altura, a preocupação dos astrónomos ingleses era decidir entre a teoria da gravitação de Isaac Newton e a nova teoria da gravidade de Albert Einstein. Qualquer dessas teorias previa que a luz proveniente de uma estrela, ao rasar o bordo do Sol, sofreria um ligeiro encurvamento, sendo a previsão da teoria de Einstein dupla da previsão feita com base na teoria de Newton.

A partir dos anos 70, foi difundida a ideia que as observações de 1919 não haviam constituído uma experiência decisiva. Por um lado, entre físicos e astrónomos, evidencia-se a falta de rigor das observações. Por outro, mais grave, num artigo de dois filósofos da ciência, John Earman e Clark Glymour, publicado em 1980, Eddington e seus colaboradores são acusados de eliminarem dados que favoreciam a previsão da teoria de Newton, insinuando que os dados de observação teriam sido interpretados abusivamente de modo a rejeitar essa teoria. Esta crítica apoia-se numa concepção de um Eddington antecipadamente favorável à teoria de Einstein por motivações pouco científicas. Talvez movido pela ânsia de contribuir para a reconciliação internacional após a I Guerra Mundial, Eddington teria sido levado a proclamar a vitória da teoria de um dos homens mais célebres da ciência alemã. Na realidade, as decisões mais importantes na análise dos dados foram tomadas por Dyson, como se veio a comprovar mais tarde. Aliás, Dyson podia ser considerado até certo ponto céptico em relação à teoria da relatividade, e não podia ser considerado um pacifista como Eddington. Efectivamente, a letra manuscrita de Dyson aparece nas notas da redução de dados do Sobral, em várias passagens importantes. E uma reanálise às chapas do Sobral levada a cabo em 1979 por uma equipa do Observatório de Greenwich, usando equipamento moderno para medir as posições das estrelas nas chapas e um *software* de redução de dados astrométricos, especialmente escrito com este objectivo, veio comprovar os resultados apresentados por Dyson, e mostrar que

a eliminação das chapas pela equipa de Dyson e Eddington não afectara as conclusões da observação do eclipse solar de 1919.

No Sobral, a equipa liderada por Crommelin dispunha de dois instrumentos mas, tendo falhado o principal, um telescópio astrográfico de 8 polegadas, ficou reduzida a um instrumento de recurso com lentes de 4 polegadas. O defeito do instrumento principal traduziu-se numa perda do foco durante o eclipse, por aquecimento do coleostato, segundo parece, o que fez que as chapas apresentassem imagens borratadas que tornavam muito difícil calcular correctamente o seu deslocamento relativamente às posições nas chapas de comparação tiradas em Greenwich e Oxford, com o instrumento focado. Tudo leva a crer que foi Dyson que decidiu ignorar os resultados das placas astrográficas ($0,93''$) que efectivamente favoreciam, numa primeira análise, a previsão newtoniana. Já depois da célebre comunicação na sessão conjunta, Dyson voltou a reanalisar as chapas tiradas pelo astrográfico e obteve um novo valor para a deflexão, $1,52''$ (sem indicação do erro), o que já é muito próximo da previsão de Einstein. Muito mais tarde, a equipa referida do Observatório de Greenwich obteve uma deflexão de $1,55'' \pm 0,34''$. É pois legítimo concluir que não existe qualquer fundamento para admitir que um preconceito pessoal tenha desempenhado um papel censurável na análise dos dados do eclipse. Pelo contrário, existem boas razões para acreditar que houve extremo cuidado na análise dos dados decorrentes das observações realizadas no Príncipe e no Sobral pelos astrónomos britânicos, incluindo Eddington, e que estas se revelaram coerentes com a TRG de Einstein. Hoje pode afirmar-se com segurança que a suspeita de má prática científica amplamente difundida entre cientistas e público leigo não tem qualquer fundamento.

Os astrónomos portugueses e a recepção da teoria da relatividade

Numa sessão do 20º congresso anual da Associação Sul-Africana para o Progresso das Ciências, em Julho de 1922, o Presidente da Secção A

(Astronomia, Meteorologia e Matemática), astrónomo Manuel Peres (1888-1968), na época director do Observatório Campos Rodrigues em Moçambique e mais tarde director do Observatório Astronómico de Lisboa (OAL), ao discursar sobre o que a ciência deve à astronomia, declarava: “[...] Como sabem, a principal confirmação dos pontos de vista de Einstein depende de observações astronómicas. [...] Portanto, no caminho do seu desenvolvimento, a física chega a uma bifurcação; espera que a astronomia possa dizer qual dos dois caminhos deve seguir.” Estas declarações foram feitas pouco antes do eclipse total do Sol de 1922, que levou várias equipas de astrónomos à Austrália, na tentativa de confirmarem os resultados obtidos por Eddington em 1919.

Manuel Peres tentou acompanhar a expedição inglesa de 1919 ao Príncipe, mas sem êxito, pois não conseguiu ultrapassar uma série de questões burocráticas, em grande parte relacionadas com dificuldades inerentes ao estado de guerra (I Grande Guerra) durante uma grande parte do período que antecedeu a expedição ao Príncipe, mas também devidas à instabilidade do regime político em Portugal nessa época. O mesmo não sucedeu com a expedição ao Sobral, no Brasil, na qual um grupo de astrónomos brasileiros, chefiados por H. Morize (1860-1930), do Observatório do Rio de Janeiro, acompanhou os ingleses e realizou observações de física solar. Tinham, pois, objectivos distintos dos da equipa britânica, com a qual mal contactaram por obstáculos linguísticos. O contraste entre as reacções dos astrónomos brasileiros e portugueses não pode, por isso, ser justificado pelas razões habitualmente referidas na literatura que, da constatação da ausência de portugueses, inferem o seu desinteresse por estas questões.

Goradas que foram as suas expectativas relativamente à participação na expedição, Manuel Peres veio a tornar-se um adepto das ideias relativistas. Entre 1922 e 1923, escreveu um opúsculo no qual discute a relatividade restrita, segundo se depreende de manuscritos encontrados no Arquivo do OAL, que apesar da insistência de Oom, nunca será publicado. Opondo o

tempo metafísico newtoniano ao tempo físico einsteiniano, o seu texto introdutório reflecte as preocupações do director de um observatório colonial, construído e equipado na tradição do OAL, que foi o primeiro observatório português a transmitir a hora solar local, medida pela pêndula do observatório, por telegrafia sem fios, para o relógio público do porto. Assim, foi a prática de astronomia posicional associada ao Serviço da Hora que norteou o interesse de Peres pela TRR.

Até aos finais dos anos 20 do século XX, dois outros astrónomos, tal como Peres associados ao OAL, participaram na apropriação da teoria da relatividade em Portugal. Foram eles A. Ramos da Costa (1875-1939) e M. S. Melo e Simas (1870-1934). Ramos da Costa publicou, em 1921 e 1923, dois pequenos livros sobre a teoria da relatividade. Neles, contrasta a física newtoniana e a einsteiniana, discute os fundamentos da relatividade restrita e geral e defende a adopção da física einsteiniana com base em critérios de conveniência. Mais uma vez, o seu interesse por estas questões decorreu da sua associação ao Serviço da Hora, estando a seu cargo a transmissão horária no porto de Lisboa. E não será coincidência que no mesmo ano em que publicou o seu primeiro livro sobre relatividade tenha publicado também o *Tratado Prático de Cronometria*, em que dedicava um capítulo inteiro à medida do tempo. Nestes livros definia o tempo operacionalmente: “Na superfície terrestre o tempo é transmitido por telegrafia sem fios de tal forma que o tempo corresponde à passagem de um sinal hertziano pelas estações cujos relógios se pretendem sincronizar.” O seu proselitismo em prol da relatividade traduziu-se ainda por um artigo apresentado em 1924 num congresso internacional de matemática em Toronto no qual fazia uma apologia da reorientação do ensino da matemática norteado pela nova teoria.

Finalmente, é chegado o momento de destacar o papel de um astrónomo do OAL a que já nos referimos, Manuel Soares de Melo e Simas, como alguém que integrou na sua prática científica a teoria da relatividade. Na altura da expedição, Melo e Simas encontrava-se em França a participar na Grande Guerra. Esteve associado ao Observatório Astronómico da Tapada

desde 1911, tornando-se seu subdirector em 1931. Paralelamente, foi deputado em 1906 e, já durante a República, militou no Partido Unionista. Em 1923 foi ministro da Instrução do Governo de Ginestal Machado, que duraria apenas um mês (entre 15 de Novembro e 18 de Dezembro). Não admira que tenha comungado dos ideais da Primeira República, com a sua ênfase no positivismo e cientismo, tendo sido um convicto divulgador da ciência. Pouco antes da expedição para reconfirmação do encurvamento, durante o eclipse solar de Setembro de 1922 observável na Austrália, publicou um artigo sobre relatividade nos apêndices do Almanaque do OAL, em Julho de 1922, do qual destacamos afirmações que vão no sentido das de Peres:

O nome de um alemão atrai neste momento as nossas simpatias e a admiração ou curiosidade de todo o mundo culto e não culto. [...] é certo ser a Astronomia das ciências que mais tem a utilizar da teoria da Relatividade, fornecendo-lhe, em troca, as melhores das suas confirmações [...].

Poucos meses depois, promovia um ciclo de 13 conferências sobre a teoria da relatividade, que se iniciou em Novembro de 1922, em Lisboa na Universidade Livre, uma das criações da Primeira República. Estas palestras, proferidas aos domingos de manhã no espírito dos sermões laicos de Thomas Henry Huxley, contaram, segundo os jornais da época, com uma grande afluência de público. Pelo que sabemos é o único astrónomo português a tentar acomodar os novos conhecimentos na sua prática científica. Assim, numa comunicação de 1924 à Academia das Ciências de Lisboa, descreve como, a propósito de um pedido feito pela *Astronomische Nachrichten*, fez no OAL a observação da ocultação de uma estrela pelo planeta Júpiter, no dia 7 de Maio de 1923. E explica que:

O processo consistiu em determinar a posição relativa dos dois astros alguns minutos antes e depois da ocultação, por forma que, partindo da posição de um deles, se pudesse calcular a do outro para certo e determinado momento, obtendo-se assim não só uma série de verificações, difíceis de alcançar por outra forma,

mas ainda meios para deduzir os efeitos de qualquer influência na própria ocultação, quer provenientes da irradiação luminosa, quer da atmosfera do planeta, quer ainda de não se ter entrado no cálculo com a teoria da relatividade.

Mas é levado a concluir que embora os resultados revelassem “uma certa tendência no sentido apontado pela teoria da relatividade,” os outros efeitos em acção produziam desvios no mesmo sentido, funcionando como obstáculos à verificação da teoria.

Se Melo Simas é indiscutivelmente um caso singular de apropriação da TRG na sua prática científica no contexto português, não nos parece que, só por si, se deva destacar o teste astronómico que fez nem tão-pouco o seu resultado malogrado. Entender como o fez, porque o fez e motivado por que questões são interrogações pertinentes, algumas das quais continuam por esclarecer.

Em resumo, no que respeita à apropriação da relatividade em Portugal, a expedição ao Príncipe incentivou o interesse dos astrónomos portugueses que, como aconteceu em tantos outros países, acabaram por reagir simultaneamente à TRR e TRG. As suas reacções decorreram da sua prática científica, sendo a ligação à determinação da hora legal o que levou alguns deles a discutirem aspectos da TRR. Por outro, tendo vivido o ambiente político da Primeira República, responderam-lhe de forma criativa através de variadas actividades de divulgação científica, de palestras à publicação de livros.

Passados 90 anos sobre o eclipse de 1919, a comunidade científica comemorou em todo o mundo, no Ano Internacional da Astronomia, a observação astronómica crucial de 1919, que tanto contribuiu para o estabelecimento da TRG, a teoria da gravitação de Einstein.

Sugestões de Leitura

- Elsa Mota, Paulo Crawford e Ana Simões, “Einstein in Portugal: Eddington's expedition to Principe and the reactions of Portuguese astronomers (1917-1925)”, *British Journal of History of Science*, **42**(2), 245-273, June 2009.
- Daniel Kennefick, “Testing relativity from the 1919 eclipse – a question of bias”, *Physics Today*, **62**, 37-42 (2009).
- Elsa Mota, Ana Simões e Paulo Crawford, “Einstein entre nós: o primeiro teste da teoria da Relatividade Geral e o seu impacto na comunidade científica nacional”, in *Einstein entre nós. A recepção de Einstein em Portugal de 1905 a 1955*, pp. 43-58. Coordenação de Carlos Fiolhais. Coimbra, Imprensa da Universidade, 2005.
- Paulo Crawford e Ana Simões, “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 (2009).
- Matthew Stanley, *Practical Mystic*, Londres, The University of Chicago Press, 2007.
- Jeffrey Crelinsten, *Einstein's Jury: The Race to Test Relativity*, Princeton, NJ, Princeton University Press, 2006.