
A DEFLEXÃO DA LUZ PELA GRAVIDADE E O ECLIPSE DE 1919*

Arden Zylbersztajn
Depto. de Física – UFSC
Florianópolis – SC

I. Introdução

Em sua edição de agosto de 1988, o Caderno Catarinense de Ensino de Física publicou um artigo enviado pelo Centro Franco-Brasileiro de Documentação Técnica Científica (CENDOTEC) a respeito da recente observação, feita por uma equipe de astrônomos franceses, de um “anel de Einstein”⁽¹⁾. Trata-se de um fenômeno no qual um aglomerado de galáxias, alinhado entre a Terra e uma fonte luminosa muito distante, atua como uma lente gravitacional ao curvar os raios provenientes da fonte luminosa (no caso, outra galáxia). O efeito é causado pela deflexão de raios luminosos por campos gravitacionais, uma das previsões da Teoria da Relatividade Geral. Essa deflexão, para o caso da luz proveniente de estrelas e passando pela proximidade do Sol (ver figura), foi observada pela primeira vez durante um eclipse solar em 1919.

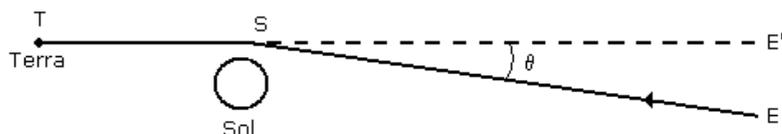
Referindo-se às observações realizadas em 1919, o artigo do CENDOTEC afirma que:

“Essa consequência das equações de Einstein foi confirmada no dia 29 de maio de 1919, durante um memorável eclipse total que o próprio Eddington, famoso astrônomo da época, veio observar na região de Sobral, no Ceará. Por um extraordinário golpe de sorte, nesse dia o Sol encontrava-se no magnífico aglomerado das Híadas, na constelação de Touro. Segundo Einstein, as estrelas mais próximas ao disco solar deveriam aparecer na abóbada celeste ligeiramente deslocadas, devido à curvatura da sua luz pelo astro: o cálculo supunha um desvio de aproximadamente 1,8 segundos de arco.

* Com auxílio parcial do CNPq.

E o desvio medido foi exatamente esse!” (Ref. 1, p. 98-99)

Na citação acima, existem duas incorreções do ponto de vista histórico. Na verdade, Arthur Eddington não fez parte da equipe que veio observar o eclipse em Sobral, e sim de uma outra, que se encontrava na África com a mesma finalidade; e o desvio medido não foi “exatamente” aquele calculado por Einstein.



EST- Raio de luz proveniente de uma estrela distante que sofre uma deflexão devido ao campo gravitacional do Sol.

TSE¹- Direção aparente da estrela vista da Terra.

O desenho está fora de escala, com a deflexão θ exagerada para melhor visualização.

Se o fato de Eddington não ter vindo ao Brasil naquela oportunidade, e um detalhe de menor importância no que diz respeito à história da Teoria da Relatividade Geral, a afirmativa de que o desvio medido, no eclipse de 1919, foi exatamente 1,8 segundos de arco merece reparos mais enfáticos. Não se trata do valor numérico em si (Einstein preferia aproximá-lo para 1,7”), mas da palavra “exatamente”, que transmite uma idéia de certeza e de precisão experimental, o que não corresponde ao que efetivamente ocorreu.

Aproveitando a necessidade de retificar os pontos acima mencionados, este artigo apresenta algumas informações históricas a respeito desse episódio da Física Moderna.

II. A deflexão da luz pela gravidade

A possibilidade de que a luz pudesse sofrer um desvio de sua trajetória retilínea pela ação à distância de corpos já havia sido sugerida por Newton em seu tratado sobre óptica, publicado em 1704. Ao concluir a Parte I do Livro III, Newton propõe algumas questões para novas pesquisas a serem realizadas por outros

cientistas. Na primeira delas, a possibilidade de deflexão é explicitamente colocada:

“Não atuam os corpos sobre a luz à distância, e por sua ação curvam os seus raios; e não é esta ação (caeteris paribus) maior à menor distância?” (Ref. 2, p. 516)

Possíveis efeitos da gravidade sobre a luz foram considerados, independentemente, pelo reverendo John Michell, um criativo astrônomo amador britânico, e pelo matemático e astrônomo francês Laplace. Ambos especularam a idéia de que um corpo suficientemente denso e massivo poderia impedir a propagação da luz por ele emitida, o que constitui uma curiosa antecipação dos “buracos negros” da moderna astrofísica⁽³⁾.

Em 1783, o reverendo Michell encaminhou ao seu grande amigo, Henry Cavendish, um artigo contendo essas idéias, seguindo-se daí uma correspondência entre ambos sobre o assunto. Cavendish interessou-se pela questão, visto que, em seus escritos, foi encontrada uma anotação isolada contendo uma expressão para o cálculo do desvio sofrido por um raio luminoso por efeito da atração gravitacional de um corpo. Esse resultado não foi publicado por Cavendish e os detalhes da sua dedução são desconhecidos⁽⁴⁾.

As especulações de Laplace foram apresentadas, em 1796, no seu “Exposition du Systéme du Monde” e serviram de motivação para o astrônomo alemão Johann Georg von Soldner que, em 1801, calculou a deflexão sofrida pela luz proveniente de uma estrela devido à atração do Sol. Em seu cálculo von Soldner utilizou os princípios da teoria newtoniana da gravitação tratando a luz como um feixe de partículas se movendo em um campo gravitacional e cuja massa não precisava ser conhecida devido à igualdade entre a massa inercial e gravitacional. O valor dessa “deflexão newtoniana”, calculada por von Soldner, para um raio luminoso passando junto à superfície do Sol, é de 0,87” (oitenta e sete segundos de arco)^(3,5,6).

O trabalho de von Soldner foi publicado em uma revista de astronomia alemã, caindo no esquecimento sem maiores repercussões na época, até ser descoberto e divulgado, em 1921, por Philipp Lenard⁽⁷⁾.

III. Einstein e os efeitos da gravitação na propagação da luz

Em um artigo, publicado no ano de 1911, Einstein deduziu uma expressão para o cálculo da deflexão sofrida por um raio de luz passando por um corpo celeste⁽⁸⁾:

$$\theta = \frac{2GM}{c^2 R},$$

na qual G é a constante gravitacional, M a massa do corpo, R a distância do raio ao centro do corpo, e c a velocidade da luz. Aplicada ao caso particular de um raio passando pela periferia do Sol, a expressão produz o mesmo valor obtido por von Soldner. A explicação para isso é que, se por um lado, no artigo de 1911, Einstein se utiliza de resultados relativísticos como a relação massa-energia e a variação no período de um relógio quando submetido a um potencial gravitacional não constante, por outro, a lei de força gravitacional empregada é a de Newton e o espaço é euclidiano. Pode-se dizer que o tratamento dado ao caso da deflexão da luz é quasi-clássico, o que, de certa forma, se reflete na própria simplicidade da sua formulação matemática. É possível que já em 1911 Einstein tivesse consciência das limitações da formulação apresentada, visto que, na introdução do artigo, afirma que irá submeter “[...] apenas algumas poucas reflexões elementares [...]”.

De qualquer modo, nos anos subseqüentes, Einstein irá dedicar-se (em colaboração com seu amigo dos tempos de estudante, o matemático Marcel Grossmann) à elaboração de uma nova teoria do campo gravitacional, apresentada, como parte da sua Teoria da Relatividade Geral, em 1916⁽⁹⁾. Trata-se agora de uma teoria matematicamente complexa (o cálculo tensorial é utilizado), que apresenta uma ruptura com os conceitos clássicos de espaço e tempo ainda mais radical do que a Teoria da Relatividade Restrita de 1905. Segundo a Teoria Geral, na presença de um campo gravitacional, a propagação da luz deixa de obedecer aos axiomas da geometria euclidiana devido à modificação geométrica do espaço (“curvatura”).

De acordo com a nova teoria, a deflexão é dada por:

$$\theta = \frac{4GM}{c^2 R}$$

que, para o caso da luz de uma estrela distante passando pela periferia solar, produz uma deflexão de 1,74”, ou seja, o dobro da “deflexão newtoniana” calculada por von Soldner em 1801, e do valor obtido pelo próprio Einstein em 1911. Em uma exposição simplificada de suas idéias, publicada em 1920, Einstein atribui metade dessa deflexão ao efeito do campo newtoniano de atração do Sol e a outra metade à curvatura do espaço causada pela presença do Sol⁽¹⁰⁾.

IV. Observações da deflexão gravitacional

No seu artigo de 1911, Einstein já chamava a atenção para a possibilidade de se submeter a um teste a predição teórica da deflexão da luz por um campo gravitacional:

Como as estrelas fixas nas regiões do céu perto do Sol são visíveis durante eclipses totais do Sol, esta consequência da teoria pode ser comparada com a experiência. [...] Seria algo muito desejável que os astrônomos considerassem a questão aqui levantada. Pois, à parte de qualquer teoria, existe a questão da possibilidade de se detectar, com o equipamento disponível no presente, a influência de campos gravitacionais na propagação da luz. (Ref. 8, p. 139)

No período compreendido entre 1911 e 1919, ano em que, pela primeira vez, foi observada a deflexão de raios luminosos pelo campo gravitacional solar, poucas tentativas foram feitas nesse sentido e nenhuma delas foi bem sucedida. Além das dificuldades experimentais inerentes à detecção do efeito previsto (da ordem de grandeza de um segundo de arco, ou seja, 1/3600 de grau), deve-se considerar também a necessidade de serem satisfeitas condições astronômicas propícias (a ocorrência de um eclipse total do Sol quando esse se encontra visualmente próximo de estrelas suficientemente brilhantes para não serem ofuscadas pelo brilho remanescente da coroa solar). Acrescente-se a tudo isto a eclosão da Primeira Guerra Mundial (1914-1918), que colocou em conflito as nações cientificamente mais desenvolvidas da época, o que propiciou um quadro pouco favorável para a realização do tipo de pesquisa que se fazia necessária⁽¹¹⁾.

Em março de 1917, o Astrônomo Real britânico, Frank Dyson, chamou a atenção para o fato de que um eclipse, previsto para 29 de maio de 1919, forneceria as condições astronômicas ideais para as observações requeridas. Os planos para a observação desse eclipse pelos ingleses tiveram início em 1918, ainda em plena guerra, e até a última hora houve dúvidas sobre a sua concretização. Os fabricantes dos instrumentos, por exemplo, só iniciaram o seu trabalho após o armistício, declarado no final daquele ano^(12,13).

Dois expedições foram organizadas pelo Observatório de Greenwich, uma com destino à cidade de Sobral no Ceará e outra à Ilha de Príncipe, localizada no Golfo da Guiné (África Ocidental), localidades essas situadas na região de eclipse total. Eddington participou da expedição que se dirigiu à África (e não da que veio a Sobral, como afirma o artigo do CENDOTEC) e o seu relato dá uma idéia da expectativa que cercava as observações:

O grupo que esteve no Brasil contou com um clima perfeito durante o eclipse: devido a circunstâncias incidentais, as suas observações só puderam ser reduzidas vários meses mais tarde, mas no final elas forneceram confirmação mais conclusiva. Eu me encontrava em Príncipe. Lá, o dia do eclipse começou com chuva e céu encoberto, o que quase liquidou qualquer esperança. Pouco antes do eclipse tornar-se total, o Sol começou a aparecer com pouca intensidade, e nós procedemos conforme programado, esperando que as condições não fossem tão ruins quanto pareciam. As nuvens devem ter se tornado menos densas antes do fim da totalidade, porque, entre vários fracassos obtivemos duas chapas mostrando as imagens estelares desejadas. Estas foram comparadas com as chapas batidas do mesmo campo estelar sem a presença do Sol, de modo que a diferença indicava o deslocamento aparente das estrelas devido ao curvamento dos raios luminosos ao passarem perto do Sol.

Do modo como o problema se apresentava então para nós, havia três possibilidades. Poderia não haver deflexão alguma, ou seja, a luz não estaria sujeita à gravitação. Poderia acontecer uma “meia-deflexão”, significando que a luz estava sujeita à gravitação, como Newton havia sugerido, obedecendo à simples lei newtoniana. Ou poderia haver uma “deflexão completa”, confirmando a lei de Einstein ao invés da de Newton. Eu me recordo de Dyson explicando tudo isso ao meu acompanhante Cottingham, que imaginava que, quanto maior o resultado, mais excitante o mesmo seria. “O que irá significar se obtivermos o dobro da deflexão?” “Então”, respondeu Dyson, “Eddington ficará furioso, e você terá de regressar sozinho.”

Foram feitos preparativos para medir as chapas no local, não somente por impaciência, mas por precaução contra acidentes na volta; assim uma das chapas boas foi examinada de imediato. A quantidade que procurávamos era grande no que diz respeito a medidas astronômicas, de modo que uma placa virtualmente decidiria a questão, mas, é claro, confirmação das outras seria buscada. Três dias após o eclipse, quando as últimas linhas dos cálculos foram atingidas, eu sabia que a teoria de Einstein tinha passado pelo teste, e que a nova perspectiva do

pensamento científico deveria prevalecer. Cottingham não teria de regressar sozinho. (Ref. 12, p. 141-142)

Essa avaliação preliminar de Eddington foi influenciada, decerto, não apenas pela sua intuição física, mas igualmente pelo seu desejo de ver confirmada a Teoria da Relatividade Geral, como o próprio cientista (que, entre os acadêmicos de renome, era o maior propagador das idéias de Einstein na Inglaterra) reconhece:

Os resultados desta placa deram um deslocamento definido, em boa concordância com a teoria de Einstein e em desacordo com a teoria Newtoniana. Apesar do material ser muito pobre, em comparação com o que se havia esperado, o autor (que deve-se admitir, não era totalmente imparcial) julgou-o convincente. (Ref. 13, p. 116)

Com a volta das equipes à Inglaterra, as chapas fotográficas foram tratadas com o rigor experimental necessário. Levando em conta as possíveis fontes de erros, os resultados finais (reduzidos para a borda do Sol) foram⁽¹³⁾:

Sobral $1,98'' \pm 0,12''$
Príncipe $1,61'' \pm 0,30''$.

Apesar dos resultados não serem “exatamente” os preditos por Einstein, como afirma o artigo do CENDOTEC, eles foram aceitos por Eddington e seus colaboradores como uma evidência bastante favorável à teoria de Einstein (que previa $1,74''$), e como uma refutação conclusiva da “deflexão newtoniana” ($0,87''$). Esses resultados foram expostos em uma reunião conjunta da Royal Society e da Royal Astronomical Society em 6 de novembro de 1919. A comunicação repercutiu não apenas no meio científico, mas também entre o público geral, através da cobertura da imprensa, dando a Einstein uma notoriedade até hoje não igualada por cientista algum^(3, 5, 14).

É importante chamar a atenção para o fato de que essas observações são de natureza extremamente delicada devido às reduzidas dimensões do efeito envolvido, e que os resultados finais dependem tanto das fontes de erro, que são consideradas formas como esses erros são tratados na fase de análise dos dados. Análises realizadas por outros pesquisadores, nas quais correções diferentes foram consideradas para os efeitos da difração atmosférica e aberração óptica nos telescópios, apresentaram resultados finais variando de $1,95'' \pm 0,09''$ até $2,16'' \pm 0,14''$ para os dados obtidos em Sobral^(15, 16). Além disso, observações de eclipses realizadas entre 1922 e 1952 em diferentes localidades apresentaram uma ampla dispersão, indicando as dificuldades inerentes a este tipo de medida⁽⁵⁾.

Mesmo em 1960 uma revisão, levando em conta as observações realizadas até 1959, apresentou a cautelosa conclusão de que, se por um lado todas as observações indicavam uma deflexão do tipo esperado, por outro lado não se podia afirmar, conclusivamente, que essa seria realmente a lei deduzida por Einstein em seu artigo de 1916⁽¹⁵⁾.

V. Considerações finais

Este artigo não foi escrito com a intenção de transmitir a idéia de que a Relatividade Geral seja uma teoria duvidosa. A maior parte dos físicos aceita os seus princípios fundamentais e, no caso da deflexão, existem hoje medidas mais precisas do que as que eram possíveis até a década de 50. Essas medidas envolvem a detecção, por meio de radiotelescópios, da radiação emitida por quasares e têm se revelado favoráveis à teoria^(3, 17).

É interessante registrar que Einstein, em nenhum momento, parece ter tido dúvidas sobre a validade da sua teoria, mesmo quando, durante quase 15 anos, as observações pareciam refutar uma outra predição da relatividade geral (o desvio gravitacional para o vermelho de linhas espectrais)⁽¹⁸⁾.

Com relação às observações do eclipse de 1919, um episódio relatado por Ilse-Rosenthal Schneider, que havia sido aluna de Einstein, fornece uma boa ilustração da confiança desse cientista em sua teoria:

De certa feita eu estava com Einstein para lermos um trabalho que continha várias objeções contra sua teoria... subitamente ele interrompeu a discussão do livro, apanhou um telegrama que se encontrava no parapeito da janela, e passando-o para mim disse, "Olhe, isto talvez irá interessá-la." Era o telegrama de Eddington com os resultados das medidas efetuadas pela expedição do eclipse. Quando eu expressava o meu contentamento pelo fato dos resultados coincidirem com seus cálculos, ele disse impassível, "Mas eu sabia que a teoria é correta"; e quando eu perguntei sobre o que teria acontecido caso a sua predição não houvesse sido confirmada, ele retrucou: "Então eu lamentaria pelo bom Deus, porque a teoria está certa. (Ref. 19, p. 236-237)

VI. Notas e Referências Bibliográficas

1. CENDOTEC. Entre anéis e miragens, Einstein confirmado. **Cad. Cat. Ens. Fis.**, v. 5, n. 2, p. 98-100, 1989.
2. NEWTON, I. **Optics**. In: Great books of the western world. Chicago, Encyclopaedia britannica, 1952. v. 34.
3. WILL, C. M. **Einstein tinha razão?** Lisboa: Gradiva, 1989.
4. WILL, C. M. Henry Cavendish, Johann von Soldner, and the deflection of light. **Am. J. Phys.**, v. 56, n. 5, p. 413-415, 1988.
5. BERNSTEIN, J. **As idéias de Einstein**. São Paulo: Cultrix, 1975.
6. Para um cálculo simplificado da “deflexão newtoniana” ver: CURSO DE FÍSICA DE BERKELEY, Volume 1, Mecânica, pág. 413.
7. Lenard era um destacado membro da comunidade de físicos na Alemanha (havia recebido o premio Nobel em 1905) e um adepto da ideologia nazista. Juntamente com Johannes Stark (prêmio Nobel de Física em 1919), liderou um movimento visando “purificar” a ciência germânica da “contaminação” judaica. A Teoria da Relatividade veio a constituir-se no alvo principal do movimento, e o empenho de Lenard, em divulgar o artigo de von Soldner, pode ter tido outra motivação que não o interesse acadêmico no resgate histórico de um trabalho científico. Tratava-se, no caso, de sugerir uma precedência da “formulação ariana” de von Soldner sobre a “teoria judia” de Einstein (Ver Ref. 3 e 5).
8. EINSTEIN, A. On the effect of gravitation on the propagation of light. In: KILMISTER, C. W. **General theory of relativity**. Oxford: pergamon Press, 1973. (Originalmente publicado em 1911 no Annalen der Physik.)
9. EINSTEIN, A. The foundations of general relativity theory. In: KILMISTER, C.W. **General theory of relativity**. Oxford: pergamon Press, 1973. (Originalmente publicado em 1916 no Annalen der Physik.)
10. EINSTEIN, A. **Relativity, the special and the general theory**. London: Methuen, 1920.
11. Uma expedição argentina, que veio ao Brasil para observar o eclipse de outubro de 1912, tinha planos de tentar verificar a deflexão da luz, não o fazendo devido às

más condições climáticas. Em 1914, um grupo de astrônomos alemães, que se encontrava na Rússia para tentar observar o efeito durante o eclipse de 21 de agosto, foi feito prisioneiro por causa da eclosão da Primeira Guerra Mundial, e trocado algumas semanas depois por oficiais russos. Em 1918, uma tentativa de observar a deflexão durante o eclipse de junho, nos Estados Unidos, forneceu dados que foram considerados não conclusivos.(Obs.: A informação sobre o episódio de 1914 foi extraída da Ref. 5, sendo também mencionada em uma nota do revisor da Ref. 3. As tentativas de 1912 e 1918 foram citadas naquela nota do revisor, e nenhuma outra referência às mesmas foi encontrada pelo autor deste artigo.)

12. EDDINGTON, A. Forty years of astronomy. In: NEEDHAN, J., PAGEL, W. (Ed.) **Background to modern science**. Cambridge: Cambridge University Press, 1940.

13. EDDINGTON, A. **Space, time and gravitation**. Cambridge: Cambridge University Press, 1953.

14. ELTON, L. Einstein, general relativity, and the german press, 1919-1920. **Isis**, v. 77, p. 95-103, 1986.

15. von KLUBER, H. The determination of Einstein's light deflection in the gravitational field of the sun. In: BEER, A. (Ed.) **Vistas in astronomy**. London: Pergamon Press, 1960. v. 3.

16. ANDERSON, J. L. **Principles of relativity physics**. New York: Academic Press, 1967.

17. VLADIMIROV, Yu.; MITSKIÉVICH, N.; HORSKY, J. **Space time gravitation**. Moscou: Mir Publishers, 1987.

18. MARTINS, R. A. **A popperian evaluation of Einstein's theory-plus-method**. Manuscrito. v. 9, n. 2, p. 95-124, 1986.

19. HOLTON, G. Mach, Einstein, and the search for reality. In: HOLTON, G. **Thematic origins of scientific thought**. Massachusetts: Harvard University Press, 1980.