

Considerações históricas e físicas sobre a aberração da luz estelar

Historical and physical considerations on the stellar aberration

Carlos H. Coimbra-Araújo^{*1}, Arthur W.B. Bergold¹

¹Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharias e Exatas, 85950-000, Palotina, PR, Brasil.

Recebido em 08 de julho de 2024. Revisado em 01 de novembro de 2024. Aceito em 25 de novembro de 2024.

No presente artigo é introduzido, de forma didática e simplificada, o conceito de aberração da luz estelar em astronomia a partir de uma perspectiva histórica e física. As investigações sobre esse fenômeno, desde sua descoberta por James Bradley, abriram o caminho para uma compreensão mais profunda sobre o universo mas, principalmente, a respeito da natureza fundamental da própria luz. Do ponto de vista do contexto histórico em que se localizam as descobertas sobre a aberração da luz estelar desde Aristóteles, mas de forma muito mais intensa após o trabalho de Copérnico, os astrônomos dos séculos XVII e XVIII precisavam de evidências empíricas para confirmar o movimento orbital da Terra em torno do Sol. As observações de Bradley na tentativa de obter o deslocamento paralático das estrelas – a mudança na posição de uma estrela durante um período de seis meses – desempenharam um papel crucial nessa direção. De fato, nesse processo ele acabou por descobrir o fenômeno da aberração, um deslocamento anômalo da luz estelar que ele atribuiu à translação da Terra. Essa descoberta foi fundamental no processo histórico de descarte da ideia de que o Sol gira em torno da Terra (o sistema geocêntrico). No presente trabalho, após a contextualização histórica, apresentamos a conceituação qualitativa do fenômeno da aberração e aprofundamos seu entendimento a partir de uma perspectiva quantitativa.

Palavras-chave: Aberração da luz estelar, paralaxe, velocidade da luz, James Bradley, sistema heliocêntrico.

In this article, the concept of aberration of the light in astronomy is introduced in a didactic and simplified way, from a historical and physical perspective. The understanding of this phenomenon, since its discovery by James Bradley, has opened the way to a deeper understanding about the universe, but mainly about the fundamental nature of light itself. From the point of view of the historical context in which the discoveries about the aberration of starlight are located, after the work of Copernicus, astronomers of the 17th and 18th centuries needed empirical evidence to confirm the orbital motion of the Earth around the Sun. Bradley's observations in an attempt to obtain the parallactic displacement of stars – the change in the position of a star over a period of six months – played a crucial role in this direction. In fact, in this process, he ended up discovering the phenomenon of aberration, an anomalous displacement of stellar light that he attributed to the translation of the Earth. This discovery was fundamental in the historical process of discarding the idea that the Sun revolves around the Earth (a.k.a. the geocentric system). After a qualitative conceptualization of the phenomenon, we present some lines about the history of its discovery in the 18th century and then, right after, deepen its understanding from a quantitative perspective.

Keywords: Aberration of stellar light, parallax, James Bradley, speed of light, heliocentrism.

1. Introdução

É bem conhecido, a partir dos livros de física básica, que quando dois referenciais estão em movimento relativo entre si, com velocidades não nulas e constantes, ocorre que a velocidade – tanto em intensidade quanto em direção – de uma certa partícula medida pelo primeiro referencial normalmente difere daquela medida pelo segundo referencial. Esse fenômeno pode ser percebido no dia a dia, por exemplo, quando um observador em repouso vê a chuva caindo verticalmente, mas um veículo em movimento observa a chuva inclinada. Também é fenômeno que ocorre na astronomia, decorrente da

velocidade de translação da Terra ao redor do Sol com relação à velocidade de um raio de luz provindo de uma dada fonte astronômica observada. O efeito combinado da velocidade da luz, proveniente da estrela, e a velocidade de translação da Terra cria um leve deslocamento angular do objeto da ordem de arcosssegundos. Esse fenômeno, denominado “aberração”, será esmiuçado nas próximas seções, tanto no aspecto de sua historicidade, quanto a partir de uma discussão geométrica, qualitativa e quantitativa.

O presente artigo se concentrará no tema da aberração anual, isto é, a aberração da luz estelar levando somente em consideração o movimento anual da Terra ao redor do Sol. Ele está assim organizado: a Seção 2 apresenta um breve resumo do desenvolvimento da Astrometria; a

*Endereço de correspondência: carlos.coimbra@ufpr.br

Seção 3 se dedica a desenvolver as noções qualitativas que relacionam a aberração ao movimento da Terra ao redor do Sol; a Seção 4 apresenta as contribuições de antecessores de Bradley que, estando muito próximos da descoberta da aberração contribuíram para o sucesso de Bradley; a Seção 5 se dedica a algumas considerações quantitativas da aberração da luz a partir da perspectiva tanto da relatividade galileana quanto da relatividade restrita; na Seção 6 apresentamos algumas conclusões finais.

2. Breve História da Astrometria

A Astrometria, junto com a Mecânica Celeste e a Astrofísica, compõem o campo de conhecimento da Astronomia. A nossa compreensão do Universo, de sua estrutura e dimensões é construída a partir das informações obtidas de observações de posição, tamanho, brilho e de suas variações no tempo e no espaço. Um dos exemplos mais marcantes desse fato é o argumento apresentado por Aristóteles (384–322 a.C.) de que, como não se consegue observar a paralaxe das estrelas, a Terra deve estar parada e todos os demais astros movem-se ao seu redor. Assim, se estabelece o referencial, a Terra, a partir do qual todos os movimentos podem ser percebidos e analisados. Desde então, muitos tentaram verificar ou refutar o argumento de Aristóteles tentando detectar desvios paraláticos em relação a um possível referencial das estrelas distantes, seguindo a concepção diagramática apresentada na Fig. 1.

Quase três séculos antes de Aristóteles, Tales de Mileto já havia determinado que o tamanho angular do Sol equivalia aproximadamente ao da Lua. Porém, para estimar valores absolutos de tamanhos e distâncias era necessário ter uma referência inicial com a qual comparar as relações obtidas geometricamente a partir das observações. Já se havia proposto utilizar o raio do planeta Terra ou o raio de sua órbita como padrão de medida. Mas, antes era necessário estimar estas

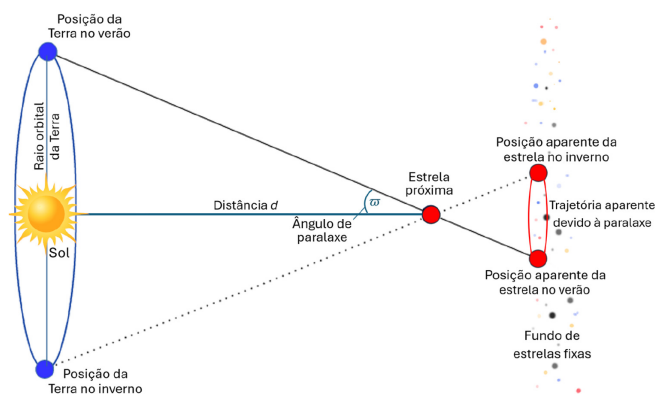


Figura 1: Se a Terra se move, a percepção da posição de corpos celestes deve depender da distância que estes se encontram do nosso planeta. Quanto mais próximo o astro, maior será a perturbação angular conhecida como paralaxe.

dimensões, para então extrapolá-las para os objetos mais distantes.

Aristarco de Samos, por volta de 240 a.C., de forma bastante engenhosa, estimou que o diâmetro da Lua era 2,8 vezes menor do que o da Terra [1]. Este valor é cerca de 25% menor do que o aceito atualmente. Como já era conhecido, a partir do método das proporções de Tales, que a distância da Lua à Terra era 110 vezes maior que o diâmetro lunar, era possível estimar um valor de 31 diâmetros terrestres para essa distância.

Na mesma época, Eratóstenes estimou o valor do raio terrestre em 252 mil estádios. A exatidão dessa medida é questionável, pois essa unidade de medida era definida de forma dúbia e imprecisa. De qualquer forma, a essas alturas, já era possível comparar o tamanho da Lua com o tamanho de objetos na superfície terrestre.

Aristarco continuou seus trabalhos de astrometria, comparando a distância da Terra ao Sol com a distância da Terra à Lua durante uma quadratura entre a Lua e o Sol. Devido à imprecisão do método e dos equipamentos disponíveis, Aristarco estimou que o Sol se encontrava cerca de 19 vezes mais distante da Terra do que a Lua [2]. As medidas atuais indicam que a distância ao Sol é 390 vezes maior do que a da Lua.

A grande inexatidão dessa medida se deve ao fato de ele ter medido um ângulo próximo de 90° sem ter um instrumento suficientemente preciso para isso. A medida exigia o cálculo do que hoje chamamos de tangente do ângulo. Um erro de 1 ou 2° no cálculo da tangente de pequenos ângulos introduz um pequeno erro no resultado, mas um erro de 1 ou 2° no cálculo da tangente de ângulos próximos a 90° acarreta grande imprecisão (Fig. 2). Isso se deve ao fato de que o gráfico da tangente apresenta uma linha quase horizontal próximo de 0° e quase vertical próximo de 90° . Pode-se perceber isso comparando a variação da tangente de 1 a 3° ($\text{tg } 3^\circ - \text{tg } 1^\circ = 0,052 - 0,017 = 0,035$) com a variação da tangente de 87 a 89° ($\text{tg } 89^\circ - \text{tg } 87^\circ = 57,3 - 19,1 = 38,2$). Neste exemplo, uma incerteza de 2° pode produzir uma inexatidão mais de mil vezes maior próximo a 90° do que próximo a 0° . Essa discussão ilustra o grau de dificuldade encontrado ao se tentar controlar as imprecisões e incertezas das medidas astrométricas.

O próximo avanço na astrometria foi obtido por Hiparco (190–120 a.C.) que determinou um ângulo de $58'$ para a paralaxe lunar em relação ao raio da Terra. Com base nesse valor pode-se estimar a distância da Lua em 59 raios terrestres, valor 2% menor do que o aceito hoje. A partir daí as medidas de paralaxe tornaram-se uma espécie de santo graal da astronomia e passou-se a determinar a paralaxe dos planetas do sistema solar. Mas a enorme distância das estrelas tornava extremamente difícil a tarefa de determinar suas distâncias a partir da paralaxe.

A ausência de paralaxe foi o maior argumento a favor do sistema geocêntrico proposto por Aristóteles e ajustado por Ptolomeu, mesmo após a revolução copernicana. Mais de dois milênios de buscas pela

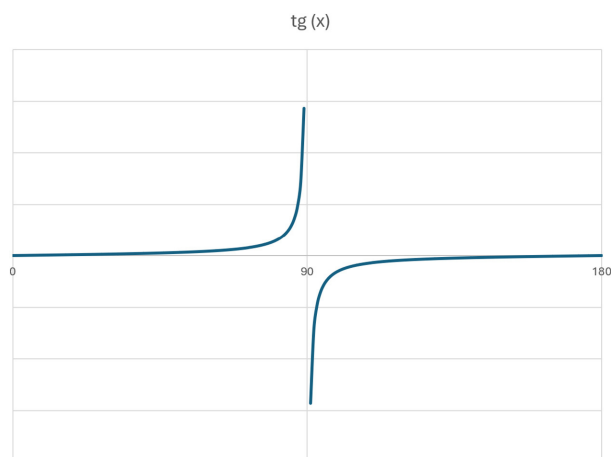


Figura 2: A inclinação quase vertical da linha da função tangente próximo a 90° faz com que pequenas incertezas na medida do ângulo produzam grandes incertezas na medida da tangente.

paralaxe estelar se passaram, até que em 1838, Bessel conseguiu pela primeira vez determinar a paralaxe de uma estrela. Mas, para que isso fosse feito foram necessárias as contribuições de inúmeros astrônomos desenvolvendo equipamentos cada vez mais sensíveis e precisos e procedimentos complexos que permitissem perceber e quantificar pequenas alterações na posição aparente das estrelas.

A última grande contribuição fundamental para que Bessel conseguisse medir a paralaxe foi dada por James Bradley. As descobertas de Bradley – aberração da luz e nutação – elevaram a astrometria a um novo patamar de precisão. A aberração da luz também ficou conhecida como aberração estelar, aberração anual ou simplesmente aberração.

Antes de Bradley, parece ter sido o astrônomo dinamarquês Ole Rømer o primeiro a desconfiar de que o movimento da Terra poderia alterar a percepção da posição de estrelas. Atualmente Rømer é mais conhecido na história da ciência por ser sido o primeiro a determinar experimentalmente um valor bem definido e finito da velocidade da luz [3]. Mas há outro aspecto histórico muito interessante da trajetória científica desse astrônomo. Em 1677 ele escreveu uma carta ao famoso filósofo natural holandês Christiaan Huygens indicando a possibilidade de que o movimento da Terra ao redor do Sol poderia causar um deslocamento aparente na posição de uma determinada estrela [4]. Ou seja, a translação da Terra produz mudanças na direção da trajetória do planeta ao longo do ano ao redor do Sol, essa alteração da velocidade da Terra combinada com a velocidade da luz da fonte estelar criaria a ilusão de que a estrela estava deslocada de sua posição original. Este é um fenômeno diferente da paralaxe, que é a mudança na posição da estrela quando a Terra está em duas posições diametralmente opostas em sua órbita ao redor do Sol. Obviamente essa consideração de Rømer

a Huygens mostra que os dois tinham uma concepção copernicana de sistema solar. E a proposta de Rømer parecia muito interessante, já que, se demonstrada a mudança na posição aparente de uma estrela em condições diferentes do esperado para o deslocamento paralático, possivelmente ficaria demonstrada também a validade do sistema heliocêntrico. Como veremos, esse conceito é essencialmente o que hoje denominamos “aberração anual da luz estelar”.

Em janeiro de 1729, um artigo escrito por James Bradley foi lido em duas reuniões da Royal Society de Londres. O artigo descrevia os métodos experimentais e os resultados da observação do que décadas antes fora previsto por Rømer. Bradley foi o primeiro a determinar observacionalmente a real existência do efeito da aberração estelar. Essa descoberta acabou sendo seminal para a ciência da astrometria. O artigo descrevia os resultados de um programa de observação que reproduzia os métodos experimentais propostos por Robert Hooke sobre paralaxe estelar. Bradley não conseguiu chegar aos deslocamentos paraláticos esperados, extremamente pequenos e só alcançados em experimentos mais refinados no século seguinte. No entanto, o deslocamento contraintuitivo da estrela Eltanin, na constelação Draco, levou Bradley a se debruçar no problema e criar seus próprios instrumentos astronômicos para melhorar a percepção do fenômeno. Após ampliar o número de estrelas em seu experimento, Bradley obteve resultados mais robustos, o que lhe permitiu propor uma nova hipótese para explicar as anomalias detectadas. Ele percebeu que essas anomalias demonstravam astronômica que, de fato, Copérnico estava correto em sua proposição do sistema heliocêntrico. E a previsão de Rømer sobre a interferência da translação anual da Terra ao redor do Sol sobre a observação das posições de estrelas foi confirmada. O termo “aberração estelar” veio de um astrônomo anticopernicano, Eustachio Manfredi, que tentou em vão negar que o fenômeno estava ligado ao movimento de translação da Terra ao redor do Sol. Nos anos que se seguiram à leitura do artigo de Bradley na Royal Society em 1729, a aberração anual foi amplamente aceita como evidência do movimento da Terra [5, 6].

A compreensão dessa aberração, ultrapassou as fronteiras da astrometria e também permitiu determinar com muito mais precisão o valor da velocidade da luz e, no século XX, ajudou a fomentar as discussões a respeito da relatividade. Mas, apesar de sua relevância, essa descoberta de Bradley costuma receber pouca ou nenhuma atenção nos livros didáticos e de divulgação científica.

2.1. Perturbações das medidas astrométricas

Segundo Pannekoek [7], Cassini e Newton começaram a resolver o problema da perturbação que a refração atmosférica produz na posição aparente dos astros. Mas a melhor solução ainda era estudar o comportamento

das estrelas próximas ao zênite, região menos afetada pela refração atmosférica. Hooke escolheu Eltanin, a estrela γ da constelação do dragão, próxima ao zênite, para acompanhar diariamente. Décadas depois, em 1723, Molyneux decidiu retomar as observações de Hooke, agora com equipamentos mais precisos. Devido a outras atribuições, Molineux teve que ser substituído por Bradley que acompanhou a variação da posição de Eltanin, entre outras estrelas, durante 20 anos.

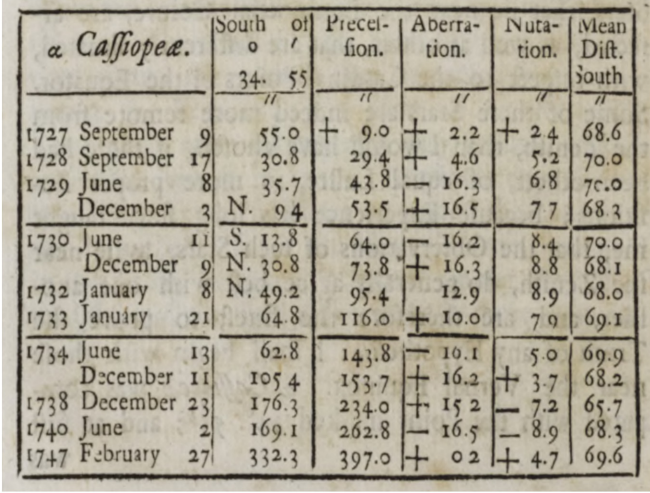
Suas palavras registradas em uma carta ao conde de Macclesfield [8] mostram a dura batalha que ele travou com as incertezas dos processos astronômicos de medição: “Quando estamos seguros de reduzir ao máximo os erros de observação e restringi-los dentro de certos limites por meio do aperfeiçoamento dos instrumentos utilizados, não precisamos hesitar ao atribuir mudanças aparentes que claramente excedem tais limites a outras causas”¹.

Atualmente, a astrometria absoluta exige um grande número de correções. Dentre elas, podem-se citar: precessão e nutação do eixo terrestre (esta última, também descrita por Bradley, pouco após a determinação da aberração da luz), deflexão relativística da luz, paralaxe diária, paralaxe anual, aberração anual, aberração diária e refração da atmosfera. Estas duas últimas não são incluídas nos catálogos publicados periodicamente porque dependem da posição do observador no globo terrestre.

Cada uma dessas perturbações exige algum procedimento e/ou equipamento que possibilite minimizar seus efeitos sobre a determinação da posição acurada dos astros. Isso não afeta diretamente as observações de um astrônomo amador ou os estudos de um astrofísico. Mas tornava o trabalho de um astrometrista bastante complexo e minucioso. A Fig. 3 mostra anotações de posições e correções astrométricas feitas por Bradley [8].

Quando, no séc. XX, se passou a fazer uso de seqüências de registros fotográficos para comparar as posições relativas das estrelas de uma pequena porção do céu que cabia no campo de visão dos telescópios, a astrometria relativa tornou-se muito mais prática, eficiente e confiável do que os procedimentos de medida de posição absoluta. Isso porque as maiores perturbações acima mencionadas afetam de forma praticamente igual todas as estrelas registradas em uma chapa fotográfica de uma pequena região angular do céu. Nessas condições, o efeito muito menor da paralaxe pode ser observado mais facilmente, bastando fotografar as regiões celestes com resolução suficiente para perceber as variações cíclicas da posição relativa de uma estrela. Para a determinação do desvio paralático por meio desse procedimento, torna-se desnecessário grande precisão na determinação das coordenadas astronômicas da estrela em análise.

Os catálogos publicados com as localizações “exatas” das estrelas são elaborados a partir da posição média de cada uma delas, tomada ao longo de um ano.



α Cassiopeæ.	South	of	Prece-	Aberra-	Nuta-	Mean
	o	'	ssion.	tion.	tion.	Diff.
	34	55				South
1727 September 9	55.0		+ 9.0	+ 2.2	+ 2.4	68.6
1728 September 17	30.8		29.4	+ 4.6	5.2	70.0
1729 June 8	35.7		43.8	- 16.3	6.8	70.0
December 3	N. 9.4		53.5	+ 16.5	7.7	68.3
1730 June 11	S. 13.8		64.0	- 16.2	8.4	70.0
December 9	N. 30.8		73.8	+ 16.3	8.8	68.1
1732 January 8	N. 49.2		95.4	- 12.9	8.9	68.0
1733 January 21	64.8		116.0	+ 10.0	7.9	69.1
1734 June 13	62.8		143.8	- 10.1	5.0	69.9
December 11	105.4		153.7	+ 16.2	+ 3.7	68.2
1738 December 23	176.3		234.0	+ 15.2	- 7.2	65.7
1740 June 2	169.1		262.8	- 16.5	- 8.9	68.3
1747 February 27	332.3		397.0	+ 0.2	+ 4.7	69.6

Figura 3: Trecho de carta de Bradley [8] mostrando como ele anotava as correções das perturbações astrométricas.

Como quase todas as perturbações que afetam a posição aparente de um astro apresentam ciclo anual ou diário, o cômputo da média ao longo do ano, na maioria das situações, dispensa a realização de correções para determinar a posição aparente precisa do astro em um instante ou local específico.

Um exemplo de situação em que essas correções são indispensáveis foi o eclipse de 1919, em que era essencial determinar com a maior exatidão possível a posição aparente as estrelas para comparar as predições baseadas no modelo newtoniano da gravitação universal com as predições baseadas na relatividade geral de Einstein. A partir daquela observação, incluiu-se a correção para a deflexão relativística da luz.

Atualmente, os maiores avanços na astrometria são obtidos por meio de imagens astrofotográficas registradas por telescópios espaciais que não sofrem o efeito da refração da atmosfera terrestre. Todas as demais correções já mencionadas têm que ser efetuadas, além das correções relacionadas ao movimento do telescópio em órbita ao redor da Terra. A Fig. 4 apresenta a história do avanço obtido na precisão das medidas angulares da astrometria.

3. Paralaxe e Aberração Estelar

Conforme mencionado, o desvio angular causado pela paralaxe faz com que uma estrela pareça descrever uma elipse ao longo do ano, como mostrado na Fig.1. Caso esta estrela esteja no polo da eclíptica, a simetria do movimento da Terra em relação ao eixo da eclíptica fará desta elipse uma circunferência. Caso a estrela esteja no plano da eclíptica, esta elipse se achatará em um segmento de reta. De qualquer forma, a metade do semi-eixo maior da elipse é a medida da paralaxe. A amplitude da paralaxe ϖ que depende da distância da estrela ao sol

¹ Tradução livre dos autores

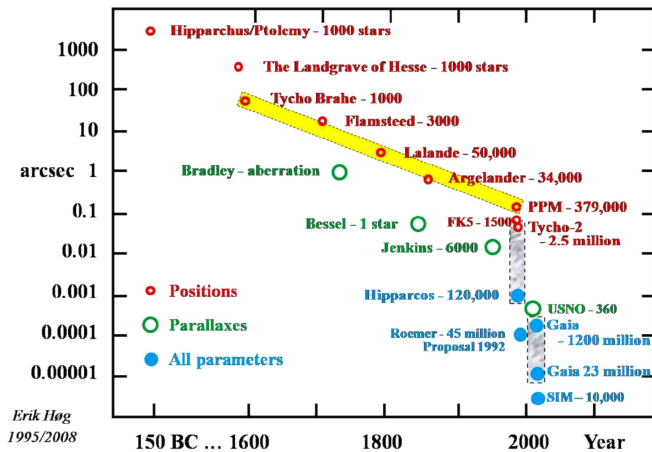


Figura 4: Avanço da exatidão nas medidas astrométricas com o tempo [9].

d e do raio da órbita terrestre R_{orb} pode ser expressa por

$$\varpi = \arctg \frac{R_{orb}}{d} \quad (1)$$

Hoje sabemos que o maior valor de paralaxe estelar encontrado é o de Próxima Centauri e vale $0,762''$. Este valor indica que ela se encontra a 4,3 anos-luz da Terra.

De modo semelhante à paralaxe, a aberração estelar, também faz com que uma estrela descreva uma elipse ao longo do ano e a relação com a posição da estrela em relação à eclíptica é idêntica à da paralaxe. Mas a amplitude do desvio angular devido à aberração estelar $\hat{a}$ não depende da distância da estrela. Para uma estrela no zênite, depende apenas da relação entre a velocidade da luz c e a velocidade orbital da Terra v_{orb} , para uma estrela no zênite pode ser expressa² por

$$\hat{a} = \arctg \frac{v_{orb}}{c} \quad (2)$$

e vale $20,5''$. Este valor é quase 30 vezes maior que o da maior paralaxe observável.

Por ter um comportamento muito parecido com a tão buscada paralaxe, os primeiros astrônomos que perceberam uma variação anual de mais de $10''$ na posição das estrelas, dentre os quais podem-se citar Hooke, Picard e Flamsteed [7], pensaram ter finalmente verificado a paralaxe estelar, mas rapidamente perceberam que havia uma defasagem entre o ciclo observado e o ciclo previsto para a paralaxe. O desvio máximo era observado quando se esperava ausência de desvio, ou o desvio apontava para uma direção diferente do esperado.

Isso levou Bradley a propor que o desvio observado era devido à velocidade orbital da Terra e não à sua posição orbital. Esse desvio na posição aparente das estrelas causado pela variação anual da direção da velocidade orbital da Terra é que ficou conhecido como aberração anual.

Variação da Posição e da Velocidade em um MHS

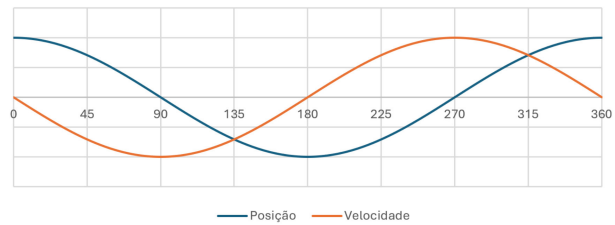


Figura 5: Defasagem de 90° entre velocidade e posição [9].

Esta defasagem entre paralaxe e aberração pode ser facilmente explicada pelo fato de que a paralaxe depende da posição da Terra em sua órbita, enquanto a aberração depende da velocidade orbital. Em um movimento oscilatório, a posição está sempre 90° defasada em relação à velocidade. A Fig. 5 ilustra isso.

Vale ressaltar que o fenômeno da paralaxe estelar não só havia sido previsto teoricamente como vinha sendo perseguido pelos astrônomos há milênios. Já o fenômeno da aberração estelar que é dezenas de vezes mais intenso era desconhecido, inesperado e foi percebido, quantificado, analisado e então explicado *a posteriori*. A aberração desempenhou um papel crucial no desenvolvimento de teorias relacionadas à luz, ao eletromagnetismo e, em última análise, à relatividade especial. Isso motivou as teorias de arrasto do éter propostas por Augustin Fresnel e G. G. Stokes no século XIX. A teoria do eletromagnetismo do éter de Hendrik Lorentz (1892) também abordou a aberração. A teoria da relatividade especial de Albert Einstein (1905) forneceu uma explicação mais abrangente para a aberração, incorporando-a num quadro mais amplo [10, 11].

3.1. Sobre a performance do telescópio em movimento

Quando se buscam referências sobre a aberração da luz, encontram-se ilustrações como a da Fig. 6 que indica os ângulos, posições e velocidades envolvidas. Frequentemente, essas ilustrações são comparadas com a imagem de uma pessoa parada sob a chuva e outra correndo e percebendo a inclinação das gotas caindo. Essa comparação apresenta o benefício de trazer conceitos da astronomia em contato com coisas do cotidiano. Mas corre-se o risco de apresentar o fenômeno de forma incompleta ou simplificada demais, podendo induzir o leitor a imaginar que, de alguma forma, a luz sofre alguma mudança de direção ao entrar no tubo do telescópio. Uma ilustração como essa possibilita a análise estática da geometria da aberração, mas não favorece a percepção e dos movimentos que originam o fenômeno e seus efeitos sobre a trajetória da luz no interior do telescópio.

Para construir um argumento que nos conduz à expressão matemática da aberração da luz, vamos fazer

² A demonstração formal é discutida mais adiante.

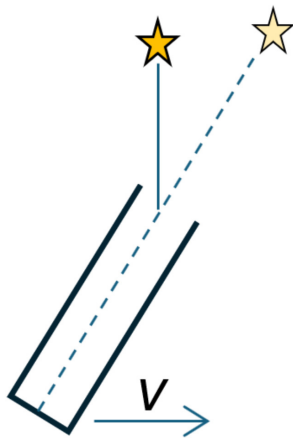


Figura 6: Ilustração visual comum do fenômeno da aberração da luz que não favorece estabelecer relações entre os movimentos do telescópio e da luz.

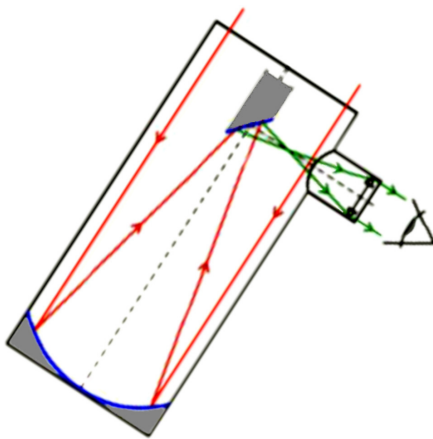


Figura 7: Funcionamento de um telescópio refletor newtoniano.

uso de um telescópio refletor newtoniano³ como o da Fig. 7. Este telescópio apresenta um tubo aberto na extremidade voltada para os astros a serem observados. Na outra extremidade, fechada, se encontra um espelho côncavo que reflete os raios que entraram pelo tubo em direção ao espelho secundário que se encontra no centro do tubo próximo à abertura. O espelho secundário reflete novamente os raios de luz redirecionando-os para a lente ocular que direciona os raios para a pupila do observador.

Vamos supor um telescópio refletor newtoniano com um tubo muito estreito que coleta apenas uma partícula de luz de cada vez. Vamos supor também que o espelho secundário seja transparente aos raios que entram no tubo. A cada instante, o tubo coleta essa partícula proveniente de um raio de luz diferente.

Para fins de ilustração (Fig. 8), em vez de considerar o tubo muito fino, vamos considerar o raio de luz, muito largo. Cada cor representa um raio de luz. Para

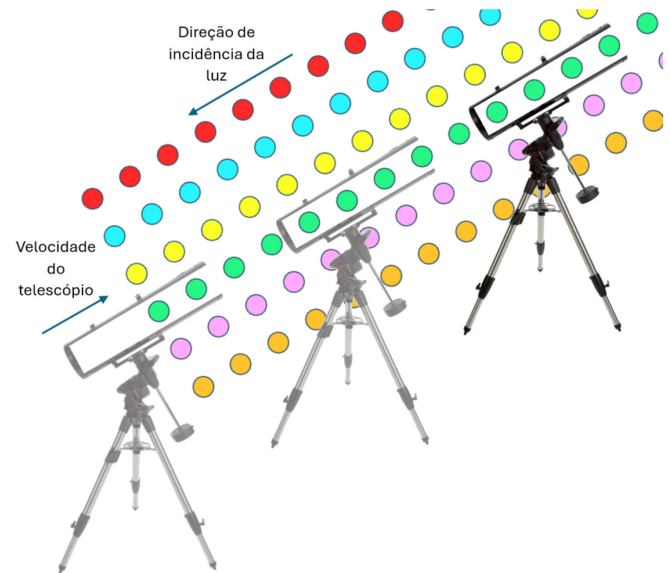


Figura 8: Três momentos de um telescópio se deslocando na direção do raio de luz.

a situação em que o telescópio está parado ou se deslocando na direção do raio de luz, o tubo do telescópio coleta apenas um único raio de luz. Aqui representamos os raios de luz como uma fileira de bolinhas coloridas não para aludir à teoria corpuscular da luz, embora fosse a compreensão que Bradley tinha, mas para reforçar que, a cada instante, o tubo do telescópio vai coletando diferentes frações de raios de luz. Com essa representação é possível atentar para as frentes de onda e como o telescópio em movimento vai coletando a cada instante diferentes porções de diferentes raios de luz.

Na Fig. 9, está representado o telescópio se deslocando com uma grande velocidade. Pode-se perceber como o telescópio ao longo de seu deslocamento vai “colhendo” novos raios de luz a cada instante. Esses raios de luz vão se deslocando ao longo de sua fileira ao mesmo tempo em que o tubo do telescópio vai avançando horizontalmente, de forma que os raios coletados na abertura do tubo chegam ao espelho no fundo sem terem sofrido qualquer mudança de direção. Até aqui, temos o mesmo conceito apresentado pela narrativa das gotas de chuva com alguém correndo segurando um tubo aberto.

Mas, se temos um telescópio refletor que está permitindo a observação da estrela em uma posição diferente de sua posição real, é porque os raios de luz refletidos pelo espelho principal serão posteriormente interceptados pelo espelho secundário e redirecionados para a ocular. A Fig. 10 ilustra como o telescópio e o raio de luz se deslocam após a reflexão no espelho primário até que o raio seja interceptado novamente pelo espelho secundário. Vamos considerar a situação mais simples de uma estrela posicionada no zênite emitindo raios que incidem verticalmente no telescópio em movimento.

O deslocamento do raio de luz refletido, o deslocamento do telescópio e o seu comprimento formam um

³ Obviamente o argumento também é válido para qualquer outro tipo de telescópio.

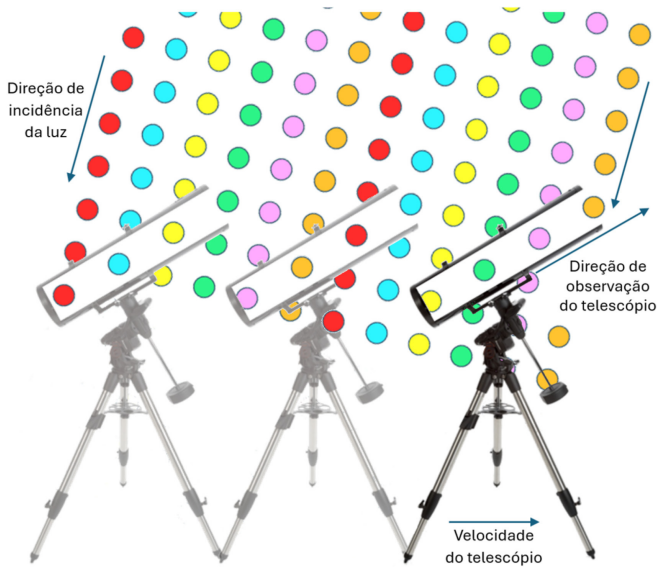


Figura 9: Um telescópio com velocidade vai coletando a cada instante, frações de raios de luz diferentes.

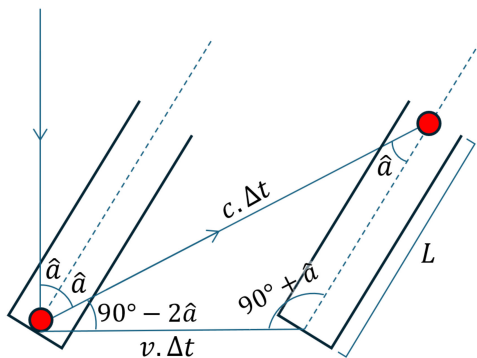


Figura 10: Trajetória percorrida pelo raio refletido no espelho primário que é direcionado para a abertura do telescópio enquanto ambos se deslocam.

triângulo. Ao aplicar a lei dos senos, considerando a velocidade do telescópio v , a velocidade da luz c , o intervalo de tempo decorrido entre as duas reflexões Δt , o comprimento do tubo do telescópio L e o desvio angular devido à aberração da luz $\hat{\alpha}$, obtém-se:

$$\frac{v \cdot \Delta t}{\sin \hat{\alpha}} = \frac{c \cdot \Delta t}{\sin(90^\circ + \hat{\alpha})} = \frac{L}{\sin(90^\circ - 2\hat{\alpha})} \quad (3)$$

Tomando os dois primeiros membros da igualdade e sabendo que $\sin(90^\circ + \hat{\alpha}) = \cos \hat{\alpha}$, chega-se à expressão do desvio angular devido à aberração da luz

$$\hat{\alpha} = \arctg \frac{v}{c} \quad (4)$$

Quando consideramos o movimento das estrelas no céu ao longo de um ano, devemos levar em conta que isso ocorre devido ao movimento de translação da Terra combinado com a inclinação do eixo terrestre. Nesse caso, o Sol será o referencial a partir do qual obtemos

a velocidade de translação da Terra através do espaço. Ao se observar uma estrela no céu, a olho nu ou com um telescópio, ela é vista não em sua posição real, mas em sua posição aparente. E isso ocorre, de fato, devido ao movimento de translação da Terra ao redor do Sol, cuja velocidade média é de 29,78 km/s [12]. O efeito combinado da velocidade da luz, proveniente da estrela, e a velocidade de translação da Terra cria o leve deslocamento, previsto por Rømer e observado por Bradley, na posição da estrela em relação à sua posição original.

4. O Desenvolvimento da Ideia da Aberração da Luz

Como visto, o fenômeno de desvio da luz estelar, também conhecido como aberração da luz estelar, foi primeiramente identificado pelo astrônomo britânico James Bradley em 1727 e publicado em 1729 [5, 6, 13]. No entanto, há relatos anteriores de observações que indicavam a presença do fenômeno, mas ainda não havia um núcleo de conhecimento teórico e prático estruturado sobre o qual construir sua compreensão. É interessante frisar que a teoria heliocêntrica copernicana do Sistema Solar começou a receber suas primeiras confirmações observacionais a partir das investigações de Galileu e Tycho Brahe e dos cálculos matemáticos de Kepler e Newton. Já em 1573, Thomas Digges sugeriu que o deslocamento paralático das estrelas deveria ocorrer de acordo com o modelo heliocêntrico e, conseqüentemente, se a paralaxe estelar pudesse ser observada, ajudaria a confirmar tal teoria. Alguns astrônomos chegaram a anunciar a determinação dessas paralaxes, mas Tycho Brahe e Giovanni Battista Riccioli concluíram que o que se aclamava ser paralaxes na verdade eram erros instrumentais ou de interpretação. No entanto, em 1680, Jean Picard, na sua *Voyage d'Uranibourg*, afirmou, como resultado de observações de dez anos, que Polaris, a Estrela Polar, exibia variações na sua posição no valor de 40'' anualmente. Alguns astrônomos tentaram explicar isso por meio da paralaxe, mas essas tentativas falharam porque o movimento era diferente daquele que a paralaxe produziria. John Flamsteed, a partir de medições feitas em 1689 e nos anos seguintes com seu quadrante, concluiu de forma semelhante que a declinação de Polaris era menor em julho do que em setembro. Robert Hooke, em 1674, publicou suas observações de γ Draconis, uma estrela de magnitude 2^m. Em suas conclusões, ele afirmou que essa estrela estava 23'' mais ao norte em julho do que em outubro.

Em 1676, ao cronometrar os eclipses da lua de Júpiter, Io, o astrônomo dinamarquês Ole Rømer estimou que a luz levaria cerca de 22 minutos para percorrer uma distância igual ao diâmetro da órbita da Terra em torno do Sol. Usando valores atuais para as órbitas, isso implicaria uma velocidade da luz de 226.663 km/s, 24,4% inferior ao valor real de 299.792 km/s. Essa foi a

primeira estimativa histórica de um valor experimental para a velocidade da luz. Em seus cálculos, Rømer usou a ideia de que o tempo aparente entre os eclipses seria maior enquanto a Terra se afastasse de Júpiter e menor à medida que se aproximasse. A teoria de Rømer acabou se tornando controversa, já que ele nunca conseguiu convencer o diretor do Observatório de Paris, Giovanni Domenico Cassini, a aceitá-la plenamente. No entanto, rapidamente ganhou apoio entre outros filósofos naturais do período, como Christiaan Huygens e Isaac Newton. Só foi finalmente confirmada quase duas décadas após a morte de Rømer, com a explicação, em 1729, da aberração estelar pelo astrônomo inglês James Bradley. Além desse feito relacionado à aberração da luz, numa carta a Huygens de 1677, Rømer chegou a mencionar o deslocamento da posição aparente de uma estrela devido ao movimento da Terra [4] sem, no entanto, explicar completamente o fenômeno.

Coube a James Bradley juntar as peças do quebra-cabeça e apresentar ao mundo científico a ideia da aberração. Bradley foi educado no Balliol College de Oxford, onde recebeu seu bacharelado em 1714. Seu tio, o reverendo James Pound, astrônomo e membro da Royal Society, foi uma espécie de tutor científico de Bradley, apresentando o sobrinho ao famoso e influente astrônomo Edmond Halley. A essa altura as observações e produção científica de Bradley já se encontravam suficientemente amadurecidas a ponto de torná-lo membro da Royal Society em 1718, aos 25 anos de idade, graças à recomendação de Halley. Bradley chegou a ocupar alguns cargos na igreja, mas renunciou quando foi nomeado para a cátedra Saviliana de astronomia em Oxford, em 1721, dedicando-se integralmente à ciência astronômica [5]. Além disso, em 1742, Bradley assumiu o posto de Astrônomo Real, tendo sido o terceiro Astrônomo Real da história britânica. Nesse período de sua vida fez descobertas significativas relacionadas à nutação do eixo da Terra.

A partir de 1725, tanto Bradley quanto Samuel Molyneux iniciaram um programa de estudos sobre a paralaxe estelar. O objetivo era entender o processo geométrico bem como demonstrar observacionalmente se ela existia ou não [14]. Basicamente, se a Terra se desloca em torno do Sol, efeitos visíveis disso deveriam ser detectados. O movimento da Terra ao redor do Sol criaria variações angulares na observação de uma determinada estrela em diferentes épocas do ano. Um dos primeiros a apontar a importância disso foi Thomas Digges, em 1573 [15]. A partir dessa época, alguns astrônomos tentaram, sem sucesso, encontrar paralaxes estelares. No entanto, em 1672, Jean Richer, Jean-Félix Picard, Ole Christensen Rømer e Giovanni Domenico Cassini estimaram, com relativa precisão, a paralaxe de Marte como $15''$ [16]. Em 1680, após dez anos de observações, o astrônomo francês Jean Picard conseguiu obter variações anuais de $40''$ na posição da estrela polar, mas sem chegar à interpretação clara se isso era devido a efeitos de paralaxe.

Em 1727, após vários meses de observação, Bradley mediu variações na posição de uma determinada estrela, como veremos no presente artigo. No entanto, a direção dessa variação não era a esperada. A explicação, elaborada pelo próprio Bradley, era a de que a velocidade da Terra interferia nas medições. Esse efeito foi mais tarde apelidado de “aberração” [5, 14]. Bradley também atribuiu o fenômeno à velocidade finita da luz em relação ao movimento da Terra em sua órbita ao redor do Sol. A teoria de Bradley permitiu-lhe fazer uma das primeiras medições da velocidade da luz. No entanto, mais adiante, a sua explicação entrou em conflito com as teorias da luz do século XIX, levando a novas investigações sobre a aberração.

Em janeiro de 1729, um artigo escrito por Bradley foi lido em duas reuniões da Royal Society. No artigo, havia a descrição do movimento anômalo acima descrito. O experimento de Bradley teve início como uma tentativa de se repetir a metodologia elaborada por Robert Hooke relacionada à paralaxe estelar. O experimento foi originalmente montado por James Pound, Samuel Molyneux e George Graham na residência de Molyneux na cidade de Kew. Mas depois foi continuado na casa de Pound em Essex. Com a morte prematura e repentina de Pound, seu sobrinho James Bradley o substituiu no experimento. Bradley, Graham e Molyneux deram curso aos trabalhos. Basicamente eles observaram um comportamento bastante contra-intuitivo e inesperado na paralaxe da estrela γ Draconis (também conhecida por Eltanin). A paralaxe estelar esperada deveria vir como um pequeno movimento cíclico anual da posição aparente da estrela. No entanto, não foi isso que aconteceu. Os cálculos mostraram que se tivesse havido algum movimento apreciável devido à paralaxe, então a estrela deveria ter alcançado sua posição aparente mais ao sul em dezembro, e sua posição aparente mais ao norte em junho. O que Bradley encontrou, em vez disso, foi um movimento aparente que atingiu seu ponto mais ao sul em março e seu ponto mais ao norte em setembro; e isso não poderia ser explicado pela paralaxe. Após a erradicação de qualquer suspeita de erro instrumental ou sistêmico, Bradley, Graham e Molyneux abandonaram a tentativa de medir a paralaxe anual daquela estrela, dando início a novas conjecturas. Uma nutação anual foi proposta. Sem o conhecimento de Bradley e Graham, Molyneux chegou a procurar Newton explanando prematuramente suas hipóteses, alegando que a “nutação” observada negava a própria física newtoniana. No entanto, após a observação de uma estrela de controle, a 35 Camelopardalis, a conjectura da nutação foi abandonada.

Há uma história, provavelmente apócrifa, de que Bradley encontrou a solução para o problema enquanto estava em um barco à vela no rio Tâmsa. Nessa lenda, a solução teria surgido quando ele analisou os movimentos de uma bandeira no mastro do barco em relação à velocidade do vento e ao movimento do barco. Sendo ou

não apócrifa, sabe-se que a conclusão de Bradley sobre as anomalias na paralaxe de γ Draconis tem relação com o movimento do planeta Terra ao redor do Sol e em relação à estrela. Para chegar a essa conclusão, Bradley construiu seu próprio instrumento de medida e realizou observações individuais de muitas outras estrelas para determinar os parâmetros do fenômeno. Bradley, um defensor incontestado da teoria corpuscular da luz, explicou o fenômeno descrevendo que as partículas de luz de uma estrela fixa tinham que entrar na lente frontal de um telescópio e passar pelo telescópio até a ocular enquanto o telescópio estava se movendo com a Terra. Por isso, seria preciso inclinar o telescópio na direção do movimento terrestre para ver corretamente a estrela através da ocular. O ângulo de inclinação permitiria que a parte posterior do telescópio ficasse corretamente alinhada atrás de sua parte anterior para que as partículas de luz viajassem diretamente através do cilindro do telescópio sem atingir as laterais. Bradley nominou o ângulo que prescreve a diferença entre a posição observada da estrela fixa e a posição real no instante da observação como ângulo de aberração.

Bradley elaborou a hipótese de que a direção e a velocidade da Terra em sua órbita, combinadas com uma velocidade consistente da luz vinda da estrela, poderiam causar as aparentes mudanças na posição estelar que ele observou. Ele descobriu que isso se ajustava bem às observações e também forneceu uma estimativa para a velocidade da luz. Além disso, mostrou que a paralaxe estelar, caso existisse, com extremos em junho e dezembro, era pequena demais para ser medida com a precisão disponível. Depois de apresentar seus resultados em Londres em 1929, ele chegou a lançar um desafio aos anti-copernicanos para que oferecessem uma explicação em termos geostáticos ao fenômeno observado. Um desses astrônomos, Eustachio Manfredi, examinou detalhadamente o fenômeno das “aberrações”, sendo o termo cunhado por ele. Foi Bradley quem primeiro aplicou o termo ao movimento recém-descoberto e dentro de pouco tempo a “aberração” estava a ser aplicada pelos astrônomos como parâmetro a ser levado em conta em suas observações. A aberração anual foi amplamente aceita como evidência da aparente ligeira mudança nas posições das estrelas causada pelo movimento anual da Terra. De fato, essa descoberta forneceu a primeira evidência direta da revolução da Terra em torno do Sol. Nas palavras do próprio Bradley [17], “a aberração da luz se originou a partir do movimento progressivo da luz e do movimento anual da Terra em sua órbita. (...) se a luz fosse propagada no tempo, o lugar aparente de um objeto fixo não seria o mesmo quando o olho está em repouso, como quando ele está se movendo em qualquer outra direção, além daquela da linha passando pelo olho e pelo objeto; e que quando o olho está se movendo em direções diferentes, o lugar aparente do objeto seria diferente.”

A partir da mudança no deslocamento de várias estrelas é que Bradley conseguiu descobrir a aberração

estelar experimentalmente [14, 15, 18, 19]. Como o deslocamento real não pode ser observado, e sim mudanças nesse deslocamento, não é possível encontrar explicitamente a velocidade de translação da Terra, que é a causa base do fenômeno de aberração. Assim, em 1766, Roger Boscovich propôs um experimento a ser realizado com um telescópio cheio de água [15, 20]. Como a óptica ondulatória prevê que a velocidade da luz muda em meios diferentes, esperava-se uma alteração no ângulo de aberração caso fosse feito um experimento com um telescópio preenchido com água. No entanto, o experimento de Martin Hoek, de 1869, apresentou resultados nulos sobre o tema: não há modificação do ângulo de aberração para o referido telescópio preenchido com água [20]. A única teoria que conseguiu explicar esse resultado nulo à época foi a teoria ondulatória de Fresnel, de 1818 [21]. Como a teoria se baseava na existência do éter luminífero como substância de referência para se medir a velocidade da Terra, isso levou a comunidade de físicos da época a, de fato, encarar a existência do éter como explicação razoável para fenômenos de óptica ondulatória [15, 22]. O experimento de Michelson e Morley, de 1887, no entanto, foi incompatível com a teoria de Fresnel, o que proporcionou novos caminhos a partir de 1905 com a teoria da relatividade restrita de Einstein [20, 22, 23].

4.1. A aberração da luz de estrelas distantes e o movimento da Terra

Na astronomia, a aberração ocorre quando os objetos celestes parecem mover-se ligeiramente de suas posições originais devido à velocidade do observador terrestre. Assim, a aberração implica que os objetos aparentem descrever um ângulo na direção do movimento do observador, em comparação a quando o observador está imóvel. O movimento aparente é causado pela velocidade finita da luz e pelo movimento relativo entre o observador e o objeto. Por exemplo, à medida que a Terra orbita o Sol, a posição aparente de uma estrela muda ao longo de um ano, resultando num deslocamento angular máximo de aproximadamente 20 segundos de arco em ascensão reta ou declinação. Esse é exatamente o que se denomina “fenômeno de aberração anual”, também conhecido como aberração astronômica, aberração estelar ou aberração de velocidade. Em suma, vem da percepção de que objetos celestes (como estrelas) pareçam deslocados de suas posições verdadeiras devido à velocidade do observador. O movimento aparente das estrelas resulta do movimento da Terra em torno do Sol. À medida que a Terra orbita, a velocidade do observador muda, levando a uma variação periódica na posição aparente das estrelas [18].

Inicialmente, como visto, Bradley estava procurando por uma pequena mudança na posição da estrela, conhecida como paralaxe (Fig. 11). Como a trajetória da Terra ao redor do Sol é aproximadamente circular, um observador perceberá que uma dada estrela está

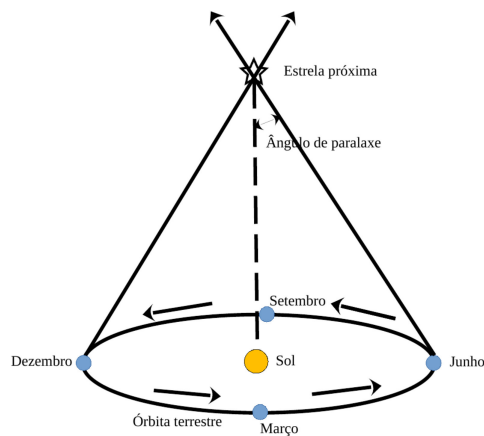


Figura 11: Mudança esperada na posição de uma estrela dentro do período de um ano devido à paralaxe. A estrela testada por Bradley, Eltanin, na constelação de Draco, tem uma variação em sua posição de cerca de 0,0056 graus, diferente da variação angular esperada caso a causa fosse a paralaxe.

deslocada em uma determinada direção. No entanto, seis meses depois, devido à mudança na direção do movimento da Terra, o observador perceberá uma mudança no deslocamento da luz daquela mesma estrela, neste último caso, na direção oposta à da direção inicial, isto é, a paralaxe. A aberração difere da paralaxe: a paralaxe depende da distância do observador, enquanto a aberração não. A estrela testada por Bradley, Eltanin, na constelação de Draco, tem uma variação em sua posição de cerca de 0,0056 graus, diferente da variação angular esperada caso a causa fosse a paralaxe. Bradley raciocinou que a mudança observada na posição da estrela, a aberração estelar, ocorria devido ao movimento da Terra ao redor do Sol. Bradley acreditava que a luz consistia em pequenas partículas que viajavam a uma velocidade finita. O movimento relativo da Terra em relação a essas partículas de luz teria efeito parecido àquele em que gotas de chuva parecem cair na diagonal em relação a um objeto em movimento. À medida que a Terra gira em sua órbita, a direção em que ela se move muda continuamente e, portanto, o deslocamento da estrela, em relação à sua posição média, também muda continuamente (Fig. 12). A explicação de Bradley não apenas demonstrou observacionalmente que a Terra gira em torno do Sol. Bradley também foi capaz de calcular o valor da velocidade da luz a partir disso. Nesse caso, ele mostrou que o ângulo máximo θ , no qual qualquer estrela é deslocada de sua posição média, é dado por $\theta = u/c$, onde u é a velocidade da Terra ao redor do Sol e c a velocidade da luz. A partir do ângulo de aberração observado (que mostraremos como se obter na próxima Seção), Bradley foi capaz de estimar a velocidade da luz em 301.000 km/s, valor muito próximo à estimativa atual. A Tabela 1 apresenta alguns aspectos que diferenciam o fenômeno da aberração estelar do fenômeno da paralaxe. O deslocamento real da luz das estrelas

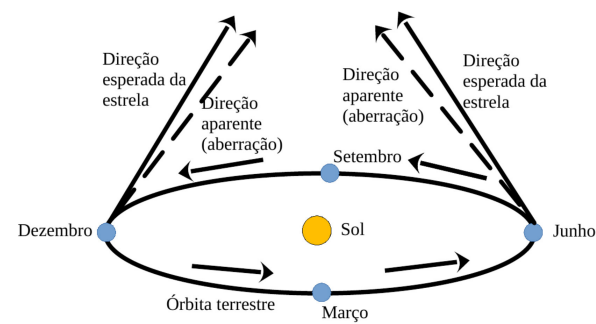


Figura 12: Efeito do movimento terrestre, em sua órbita ao redor do Sol, para criar a direção aparente de uma determinada estrela. Na figura, a abertura angular relacionada à aberração estelar está exagerada com o intuito de ilustrar o fenômeno. Bradley concluiu que a mudança na posição da estrela, que ficou conhecida como aberração estelar, era devido ao movimento da Terra em torno do Sol.

Tabela 1: Diferenças entre aberração estelar e paralaxe.

	Aberração estelar	Paralaxe estelar
Causa	Mudança na direção do movimento terrestre à medida em que orbita o Sol	Mudança na posição da Terra à medida em que orbita o Sol
Detecção	Bradley, 1927	Bessel, 1838
Varia com distância?	Não	Varia inversamente com a distância. (Objetos mais próximos: maiores paralaxes)
Máx. variação angular	$\sim 21''$	$\sim 0,8''$

devido à aberração não pode ser observado diretamente. Entretanto, as mudanças nesse deslocamento, sim. O movimento da estrela deve ser considerado? Levando em conta que a aberração ocorre devido ao atraso entre a emissão e a observação da luz estelar, pode-se entender por que na prática apenas o movimento da Terra importa e não o movimento da estrela. Na verdade, os livros didáticos geralmente discutem a aberração considerando apenas o movimento do telescópio, ignorando a questão do que acontece se o movimento da estrela for levado em conta. Inicialmente, considere uma estrela que está se movendo a uma velocidade constante. Esse movimento causará o fenômeno da aberração da luz daquela estrela. No entanto, como os observatórios terrestres não têm como medir a atual posição real da estrela – já que nenhuma informação sobre a estrela pode viajar para a Terra mais rápido do que c – então o movimento da estrela acaba não trazendo consequências observáveis. O que se faz de maneira mais prática e que acaba por subentender a velocidade da estrela no processo, é levar em conta a velocidade de translação

da Terra em relação à estrela. Caso a estrela seja considerada fixa, por ser muito distante, a velocidade relativa em relação à estrela coincide com a própria velocidade de translação da Terra em torno do Sol.

Em suma, o quadro que se apresenta aqui é o de uma estrela que emitiu luz no passado e que formará a imagem observada no presente. O atraso de tempo entre o emitido e o observado é devido à velocidade finita da luz. Assim, a aberração estelar surge como consequência não só do movimento relativo da Terra em relação à estrela, mas também como consequência direta da finitude da velocidade da luz! Dessa forma, não haveria aberração estelar se a velocidade da luz fosse infinita e a luz da estrela formasse uma imagem sem atraso. Embora a posição aparente da estrela seja relativamente fácil de considerar como uma imagem instantânea, determinar a posição verdadeira da estrela no instante presente do tempo requer levar em consideração uma série de fenômenos físicos significativos, incluindo a velocidade relativa da Terra, a posição do observador, a hora exata do dia e a refração da atmosfera.

Considerando o movimento da Terra, podemos estimar sua velocidade de translação em torno do Sol a partir da relação $v = 2\pi (1 \text{ UA})/(1 \text{ ano}) \approx 30 \text{ km/s}$, onde UA é a unidade astronômica padrão, estimada em 149.597.870.700 m. Por simplicidade, suponha uma estrela em repouso no céu em relação ao Sol, localizada perpendicularmente ao plano da eclíptica. Considere que em alguns meses do ano, a Terra viaja à esquerda ao redor do Sol. Nessas ocasiões, os telescópios terrestres devem se inclinar $20,5''$ para a esquerda da posição real de uma estrela para poder visualizá-la corretamente (como explicado na próxima Seção). Vinte segundos de arco é algo realmente muito pequeno, mas pode ser mensurável. Equivale aproximadamente ao ângulo subtendido por uma moeda a uma distância de 200 m.⁴ Seis meses depois, quando a Terra está viajando à direita ao redor do Sol, deve-se inclinar o telescópio $20,5''$ para a direita da posição real da estrela. Dessa forma, haverá uma variação anual detectável na orientação angular do telescópio. Essa orientação não deve ser confundida com paralaxe [24], que normalmente é mascarada porque tem uma amplitude muito menor e uma fase diferente do que a aberração. Na prática, a aberração é detectada via a assimetria em relação ao movimento da estrela e da Terra. Não porque o efeito em si seja conceitualmente assimétrico, mas porque sua observação experimental requer tal falta de simetria. Isto é, a aberração estelar resulta de uma transformação entre os referenciais de dois observadores diferentes, neste caso a Terra em dois pontos diferentes de sua órbita.

Para sumarizar a importância da aberração como fenômeno astronômico divisor de águas na história científica, podemos enumerar pelo menos quatro aplicações

fundamentais para o fenômeno. Uma primeira, conforme visto, é que a aberração estelar é a mais antiga prova direta do movimento da Terra em torno do Sol. Uma segunda aplicação remete ao fato que as medições de Bradley do desvio angular observado em segundos de arco para oito estrelas em 1727 concordam com os valores modernos no limite de 1% e deram o valor mais preciso para a velocidade da luz obtida até aquele momento. Em terceiro lugar, o acordo entre experimento e teoria para a aberração estelar estabeleceu que se houvesse um éter, a Terra teria que estar se movendo em relação a ele. Obviamente isso vai diretamente contra o resultado nulo do experimento de Michelson-Morley, feito mais de um século depois de Bradley. Uma quarta aplicação: a aberração estelar continua a ser usada ainda hoje como um método preciso para determinar a velocidade orbital da Terra em relação ao Sol. A aberração adicional devido à rotação da Terra em seu eixo também é mensurável, e o satélite europeu GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics), usando a aberração estelar e outros métodos complementares, consegue medir, com precisão suficiente, a órbita do nosso sistema solar em torno do centro da nossa galáxia [25].

5. Aspectos Quantitativos

O fenômeno detectado por Bradley, o da aberração, implica no fato de que ao se apontar um telescópio para uma dada estrela, tem-se que inclinar levemente sua lente para identificar a posição “correta” da estrela. O fenômeno tem origem no movimento de translação da Terra em relação à posição da estrela. As transformações de Galileu e Lorentz podem ser usadas para explicar quantitativamente a aberração estelar devido ao movimento translacional da Terra (vide o Apêndice 1 no material suplementar). A Fig. 13 apresenta um panorama pictórico simplificado do fenômeno.

A seguir, os ângulos de aberração são calculados por meio das Transformações de Galileu e por meio das Transformações de Lorentz, numa perspectiva da relatividade restrita. Para esse propósito, a estrela da

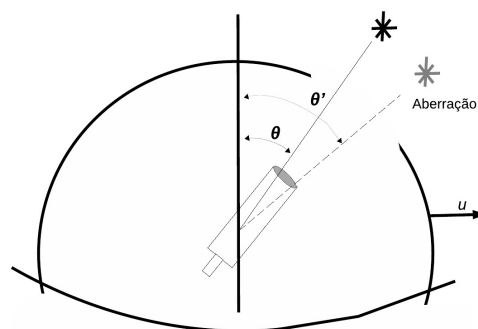


Figura 13: Diagrama pictórico para o fenômeno da aberração estelar.

⁴ Registre-se aqui a singularidade do telescópio de Bradley de 1727, que podia medir resoluções angulares de até um quarto de segundo de arco [14].

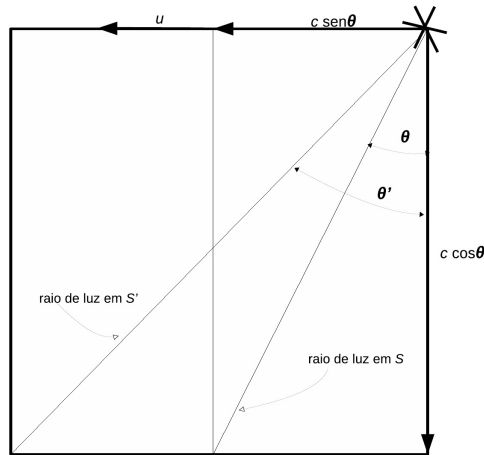


Figura 14: Diagrama de composição vetorial da velocidade de um raio de luz.

Fig. 13 está fixada no sistema de referência S e o sistema de referência da Terra é o sistema S' . Então um raio de luz emitido pela estrela a partir de um ângulo θ em S será percebido em S' como um ângulo maior θ' . Para as análises a seguir, para o sistema de referência S pode-se usar a composição de velocidades da Fig. 14, que resulta em

$$v_x = -c \sin \theta, \quad (5)$$

$$v_y = -c \cos \theta. \quad (6)$$

5.1. A partir das Transformações de Galileu

A partir da composição vetorial apresentada na Fig. 14 e das equações (5) e (6) para o referencial S , então as componentes de velocidade do raio de luz no referencial S' , a partir das Transformações de Galileu, são

$$\begin{aligned} v'_x &= v_x - u = -c \sin \theta - u, \\ v'_y &= v_y = -c \cos \theta. \end{aligned} \quad (7)$$

Em S , de fato, a velocidade da luz do raio é obtida a partir de $c = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ e, em S' ,

$$c' = \sqrt{v'^2_x + v'^2_y}. \quad (8)$$

À luz das Transformações de Galileu, substituindo (7) em (8) e, após alguma álgebra, a velocidade da luz do raio em S' é:

$$c' = \sqrt{c^2 + 2uc \sin \theta + u^2} > c. \quad (9)$$

O que indica que a aberração da luz numa perspectiva galileana implica que a velocidade da luz c' no sistema de referência S' é maior do que a velocidade da luz c no sistema de referência S .

A direção θ' , devido à aberração, é obtida calculando-se a quantidade

$$\tan \theta' = \frac{v'_x}{v'_y} = \frac{c \sin \theta + u}{c \cos \theta},$$

e o ângulo de aberração estelar segundo as Transformações de Galileu é

$$\tan \theta' = \tan \theta + \frac{u}{c \cos \theta}. \quad (10)$$

Claramente, θ' é maior que θ . Dessa forma, o observador em S' deve inclinar um pouco mais o telescópio para frente para obter uma imagem sem aberração.

5.2. Incluindo correções da relatividade restrita

Hoje, a explicação geralmente aceita da aberração estelar é dada a partir da teoria da relatividade especial de Einstein. Na relatividade especial, não há espaço absoluto nem movimento absoluto. À medida que a Terra se move ao redor do Sol em sua órbita quase circular, estamos observando uma estrela em diferentes referenciais, nos quais a direção relativa do movimento da Terra quando medida em relação à estrela é diferente. Usando as equações da relatividade especial, a estrela tem uma posição diferente quando transformamos suas coordenadas de um referencial para outro.

Para encontrar o ângulo de aberração nesse caso, a partir da composição vetorial apresentada na Fig. 14 e das equações (5) e (6) para o referencial S , então as componentes de velocidade do raio de luz no referencial S' , a partir das Transformações de Lorentz, são

$$\begin{aligned} v'_x &= \frac{v_x - u}{1 - \frac{uv_x}{c^2}} = -\frac{c \sin \theta + u}{1 + \frac{u \sin \theta}{c}}, \\ v'_y &= \frac{v_y}{\gamma \left(1 - \frac{uv_x}{c^2}\right)} = -\frac{c \cos \theta}{\gamma \left(1 + \frac{u \sin \theta}{c}\right)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Nesse caso específico, a equação (8), após alguma álgebra, usando-se o fator de Lorentz $\gamma = (1 - u^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$, confirma o princípio da relatividade especial de que a velocidade da luz é invariante sob transformações de Lorentz, sendo a mesma para qualquer referencial inercial, i.e.,

$$c' = \sqrt{v'^2_x + v'^2_y} = c. \quad (12)$$

Assim, usando (11), o ângulo θ' que ocorre devido à aberração da luz estelar vem de

$$\tan \theta' = \frac{v'_y}{v'_x} = \gamma \frac{c \sin \theta + u}{c \cos \theta}, \quad (13)$$

ou

$$\tan \theta' = \frac{1}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \left(\tan \theta + \frac{u}{c \cos \theta} \right), \quad (14)$$

onde $\gamma = (1 - u^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$ é o fator de Lorentz.

Aqui também, claramente, θ' é maior que θ . Dessa forma, o observador em S' deve inclinar um pouco mais o telescópio para frente para obter uma imagem sem aberração. No limite não-relativístico ($u \ll c$, i.e., $\gamma \rightarrow 1$), a equação (14) tende àquela obtida na Seção 5.1, i.e. a equação (10).

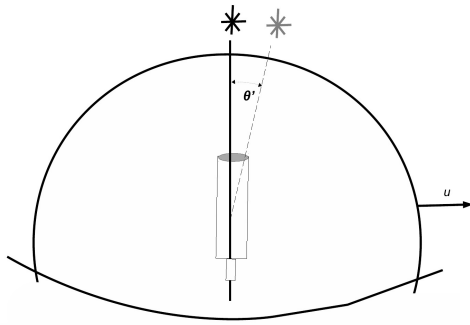


Figura 15: Exemplo: correção angular θ' a partir de uma estrela fixa observada a partir do zênite $\theta = 0$.

5.3. Exemplo

Sabendo-se que a Terra desenvolve uma velocidade média de 29,78 km/s ao redor do Sol [12] e supondo que essa seja a velocidade do planeta em relação às estrelas fixas, então a relação u/c neste caso fica

$$\frac{u}{c} = \frac{29,78}{2,99 \times 10^5} = 9,96 \times 10^{-5}.$$

Nesse caso, o fator de Lorentz γ tem valor

$$\gamma \approx \frac{1}{\sqrt{1 - 10^{-8}}} = 1,000000005. \quad (15)$$

Assumindo que uma dada estrela deveria estar no zênite, segundo seu sistema de referência, então, $\theta = 0$ (vide Fig. 15). Neste caso, o ângulo θ' a ser obtido com correções relativísticas é

$$\begin{aligned} \theta' &= \arctg \left\{ \gamma \left(\tg \theta + \frac{u}{c \cos \theta} \right) \right\} \Big|_{\theta=0} \\ &= \arctg \left(\gamma \frac{u}{c} \right) \approx \arctg(1,000000005 \times 9,96 \times 10^{-5}) \\ &= 20,54''. \end{aligned} \quad (16)$$

Dessa forma, o ângulo da aberração anual de uma dada estrela, isto é, a diferença angular esperada na posição da estrela, considerado o movimento de translação anual da Terra, e atribuindo-se também correções relativísticas à aberração, tem o valor específico de 20,54 segundos de arco.

6. Considerações Finais

James Bradley, como a maioria dos astrônomos anteriores a ele procurava detectar o desvio paralático das estrelas. Nisso ele não foi bem sucedido, embora tenha aberto o caminho para que Bessel, 110 anos depois, o fizesse. Mas o trabalho de James Bradley sobre a aberração acabou confirmando a teoria heliocêntrica proposta por Copérnico e influenciou significativamente a nossa compreensão da luz e abriu caminho para teorias inovadoras em física. A aberração luminosa desempenhou um papel crucial no desenvolvimento de

teorias científicas. Os astrônomos observaram-na pela primeira vez no final de 1600, enquanto procuravam a paralaxe estelar para confirmar o modelo heliocêntrico do Sistema Solar. A explicação de James Bradley em 1727, baseada na velocidade finita da luz em relação ao movimento da Terra, levou a uma das primeiras medições da velocidade da luz. No entanto, as teorias da luz do século XIX desafiaram a explicação de Bradley, e a aberração motivou mais pesquisas sobre a natureza da luz e do eletromagnetismo. Por exemplo, uma dessas pesquisas foi aquela relacionada à tentativa de buscar mudanças no ângulo de aberração devido ao possível arraste pelo *éter luminífero*, meio material no qual a luz viajava, segundo a hipótese corrente. Usando um telescópio cheio de água, em 1871, o astrônomo inglês George Airy procurou por uma mudança na aberração estelar através da água refratária devido à hipótese de arrasto do éter. Primeiramente, o ângulo de aberração $\theta = v/c$ deve variar com a velocidade da luz c . Na teoria das ondas, a velocidade da luz depende do meio pelo qual a luz está passando. A luz viaja mais lentamente no ar do que no vácuo, mas a diferença é pequena. Em um meio mais denso, a desaceleração da luz é mais significativa. Nenhuma mudança no ângulo de aberração foi detectada, ou seja, o experimento não confirmava nem um éter estacionário nem em movimento. Nem conseguiu demonstrar se a própria Terra estava estacionária ou em movimento através do éter. Outro experimento determinante foi, sem dúvida, o de interferometria de Michaelson-Morley. A velocidade da luz é uma constante quando medida em relação ao suposto éter luminífero. Para explicar os resultados de um experimento histórico chamado experimento de Michelson-Morley, foi proposto que o éter era arrastado pelo movimento da Terra quando girava em torno do Sol, ou seja, o movimento relativo da Terra contra o éter de fundo é zero. Entretanto, se esse fosse o caso, a aberração estelar não existiria. Em última análise, contribuiu para o desenvolvimento da teoria da relatividade especial de Albert Einstein em 1905. Capítulos inteiros são dedicados ao tópico da aberração estelar em livros sobre astronomia e relatividade especial. O tópico poderia ser vinculado a uma discussão introdutória sobre velocidade relativa, astronomia histórica ou relatividade especial.

Agradecimentos

C.H.C.-A. gentilmente agradece o apoio financeiro do NAPI “Fenômenos Extremos do Universo” da Fundação Araucária.

Material suplementar

O seguinte material suplementar está disponível online: Apêndice 1 – Tratamento via relatividade.

Referências

- [1] A. Samos, *Sobre os tamanhos e as distâncias do Sol e da Lua* (Santiago, 2016).
- [2] L.V. Freitas e R.M. Santucci, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **43**, e20210062 (2021).
- [3] C. Huygens, *Treatise on Light* (University of Chicago Press, Chicago, 2005).
- [4] E.T. Whittaker, *A history of the theories of aether and electricity from the age of Descartes to the close of the nineteenth century* (Hodges, Figgis & Co., Dublin, 1910).
- [5] J. Fisher, *The British Journal for the History of Science* **43**, 19 (2010).
- [6] A. Gualandi e F. Bonoli, *Journal for the History of Astronomy* **40**, 155 (2009).
- [7] A. Pannekoek, *A History of Astronomy* (Interscience, New York, 1961).
- [8] J. Bradley, *Philosophical Transactions* **45**, 1 (1748).
- [9] E. Høg, arxiv.org/pdf/1104.4554 (2011).
- [10] T.E. Phipps, *Am. J. Phys* **57**, 549 (1989).
- [11] P. Marmet, *Physics Essays*, **9**, 96 (1996).
- [12] D.R. Williams, *Earth Fact Sheet*, disponível em: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>, acessado em 24/04/2023.
- [13] W.H. McCrea, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* **4**, 41 (1963).
- [14] A.B. Stewart, *Scientific American* **210**, 100 (1964).
- [15] R. de Andrade Martins, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **29**, 52 (2012).
- [16] K.S. Oliveira Filho e M.F.O. Saraiva, *Astronomia & Astrofísica* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2017).
- [17] J. Bradley, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* **35**, 637 (1728).
- [18] M. Williams, *Notes and records of the Royal Society of London* **37**, 83 (1982).
- [19] C.E. Mungan, *The Physics Teacher* **57**, 483 (2019).
- [20] K.M. Pedersen, *Centaurus* **24**, 335 (1980).
- [21] A. Fresnel, *Annales de Chimie et de Physique* **9**, 57 (1818).
- [22] R.S. Menezes Júnior e F.S. Lordêlo, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **41**, e20180208 (2019).
- [23] A.A. Michelson e E.W. Morley, *American Journal of Science* **34**, 203 (1887).
- [24] T.K. Timberlake, *Physics Teaching* **51**, 478 (2013).
- [25] Z. Malkin, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **445**, 845 (2014).