

Luz como Onda Eletromagnética

Questão: Qual é a natureza da luz?

1. Inferências Dedutivas, Indutivas e Abdutivas

Existem três tipos principais de inferência que são usadas na ciência. O primeiro deles é a *dedução*, que é muito usado em demonstrações matemáticas e lógicas. Uma inferência dedutiva é sempre “válida”, ou seja, se as premissas forem verdadeiras, então a conclusão é verdadeira. Um exemplo que segue a estrutura dos silogismos aristotélicos é o seguinte:

Toda onda consiste de uma perturbação em um meio contínuo.	
A luz é uma onda	(XVIII.1)
_____ (PORTANTO)	
A luz é uma perturbação em um meio contínuo.	

Podemos negar que a conclusão seja verdadeira, mas isso ocorre não porque o silogismo seja inválido, e sim porque uma de suas premissas é falsa. A dedução é considerada uma inferência “não-ampliativa”, pois ela não aumenta o conteúdo de nosso conhecimento. Em outras palavras, numa inferência dedutiva a informação contida na conclusão nunca é maior do que a informação contida nas premissas. Isso vale também para a relação entre a entrada e saída de um programa determinista de computador (a saída nunca tem mais informação do que a entrada; voltaremos a isso na seção XXV.3).

Na ciência, porém, o que se busca é ampliar nosso conhecimento. Assim, é preciso recorrer a outros tipos de inferência. Um tipo bastante simples é a *indução por enumeração*. Um exemplo clássico é o das cores dos cisnes. Suponha que possamos identificar um cisne por seus aspectos morfológicos, sem levar em conta sua cor. Noto então que um certo cisne que vejo em um lago da Inglaterra é branco. Percebo que os outros cisnes à sua volta também são. Vou à Islândia e constato que os cisnes lá são brancos; o mesmo ocorre na Patagônia (apesar de estes terem pescoço negro). Assim, concluo que “todos os cisnes são brancos”.

Neste caso de indução enumerativa, houve uma ampliação de conhecimento, pois uma coisa é afirmar que os quatrocentos cisnes que observei são brancos, outra coisa é afirmar que *todos* são brancos. Porém, justamente por ser uma inferência ampliativa, ela não é segura: mesmo que as premissas sejam verdadeiras, a conclusão pode ser falsa. De fato, no exemplo dos cisnes, os holandeses descobriram cisnes negros na Austrália Ocidental, em 1697.

A indução por enumeração tem um papel importante nos estágios iniciais de estudo de um fenômeno, e seu uso foi bastante divulgado por Francis Bacon, no séc. XVII, tendo sido analisada minuciosamente por John Stuart Mill (1843). Mas a formulação de hipóteses explicativas na ciência geralmente vai além da mera generalização de regularidades. Assim, o filósofo norte-americano Charles Peirce cunhou o termo *abdução* para designar este tipo de inferência, cujo papel já tinha sido reconhecido por Aristóteles.

Tomemos o seguinte exemplo, que se aproxima do raciocínio feito por Thomas Young em 1802:

(A) Toda onda que passa por um obstáculo sofre difração.	
(B) A luz sofre difração ao passar por um obstáculo.	(XVIII.2)

(C) A luz é uma onda.	

Esta inferência *não* é uma dedução válida. Ela tem a mesma forma que a seguinte inferência: “Toda vez que chove, minha grama molha; minha grama molhou; logo, choveu”. O problema com esta inferência é que a grama pode ter sido molhada por uma outra causa, como alguém tê-la regado. No entanto, apesar de a inferência ser inválida, ela resulta em um bom palpite sobre o que aconteceu: a conclusão pode muito bem ser verdadeira, e o mesmo ocorre com a inferência XVIII.2.

No caso da ciência, quando observamos um fenômeno diferente, o primeiro passo é buscar, por abdução, uma hipótese que explique o fenômeno. Mas outras hipóteses também podem explicar o fenômeno, e no caso de haver mais de uma hipótese explicativa, deve-se tentar montar um experimento crucial que “teste” as hipóteses, ou seja, um experimento para o qual as diferentes hipóteses levem a previsões diferentes. Na falta de um teste factível, podem-se discutir as diferentes hipóteses e fazer uma “inferência para a melhor explicação”.

A abdução, que é uma inferência ampliativa, pode ser considerada uma inferência inversa à dedução, pois ela busca uma hipótese explicativa a partir da qual um fenômeno observado pode ser deduzido. No exemplo acima (inferência XVIII.2), a inferência dedutiva inversa é:

(A) Toda onda que passa por um obstáculo sofre difração.

(C) A luz é uma onda.

(XVIII.3)

(B) A luz sofre difração ao passar por um obstáculo.

Voltemos agora à inferência dedutiva XVIII.1. Seria possível se chegar a uma conclusão sobre a existência do “éter luminífero” (o meio contínuo no qual a luz se propagaria) de maneira dedutiva? Qualquer formulação de hipótese é ampliativa, e sabemos que a dedução não é ampliativa. O problema com a inferência XVIII.1 é que a primeira premissa não corresponde rigorosamente ao grau de conhecimento que se tinha no século XIX. Uma formulação mais precisa desta premissa seria: “Todas as ondas conhecidas – nos líquidos, nos sólidos, nos gases – são uma perturbação em um meio contínuo”. Por *analogia*, supôs-se então que a luz também seja uma onda em um meio contínuo. Porém, uma criança com um ioiô luminoso pedalando uma bicicleta no escuro também gera um fenômeno ondulatório (macroscópico), sem a presença de um meio contínuo (apesar de o ioiô oscilar continuamente na vertical e a bicicleta se mover continuamente na horizontal).

A analogia é a principal estratégia “heurística” da ciência, ou seja, é a principal estratégia para se formularem hipóteses explicativas, ou para se preverem fenômenos novos que não sejam dedutíveis das teorias atuais. A analogia é assim a principal estratégia para se formularem abduções. Na seção XX.3 veremos o uso que Maxwell fez da analogia.

2. Teoria Corpuscular da Luz: Falsa mas Didática

A teoria corpuscular da luz desenvolvida por Isaac Newton veio a ser chamada de “teoria da emissão”. Ela foi definitivamente abandonada após os experimentos independentes de Foucault e Fizeau, em 1850, que mostraram que a velocidade da luz é maior no ar do que na água (veremos porque a teoria da emissão negava isso). A teoria da emissão possui valor didático, apesar de falsa, como veremos. Por isso, Maxwell escreveu: “ainda a achamos útil

para a solução de certos problemas, nos quais a empregamos sem perigo, como um método artificial”.¹⁴³

Para explicar a refração, Newton supôs que um corpúsculo de luz sofre atração por parte das partículas do meio na qual propaga, por exemplo o ar (Fig. XVIII.1). Como tal atração é igual em todas as direções, a força resultante é nula, e a luz se propaga a velocidade constante. Em um meio mais denso, como a água, as forças de atração com as partículas do meio seriam mais intensas, mas sendo iguais em todas as direções, a velocidade do corpúsculo também seria constante. Quando, porém, o corpúsculo se encontra na fronteira entre os dois meios, a força atrativa do meio mais denso geraria uma aceleração no sentido do meio mais denso, e isso resultaria na refração da luz. Além disso, fica claro porque a teoria newtoniana prevê que a velocidade do corpúsculo é maior no meio mais denso.

Dessa maneira, fica fácil lembrar a direção em que a refração ocorre, na passagem entre dois meios: o corpúsculo de luz seria atraído no sentido do meio mais denso. Assim, fica fácil entender por que o Sol, ao ser visto no poente, na verdade já se pôs por trás do horizonte: sua luz “se dobra para dentro”, ao adentrar a atmosfera (Fig. XVIII.2).

Newton também achava que os corpúsculos de luz vermelha viajavam mais rapidamente do que os de luz azul, pois seu ângulo de refração é menor. Hoje em dia sabe-se que luzes de diferentes cores viajam à mesma velocidade no vácuo, e que a energia associada à detecção da luz azul é maior do que a da vermelha (ao contrário do que afirmava Newton).

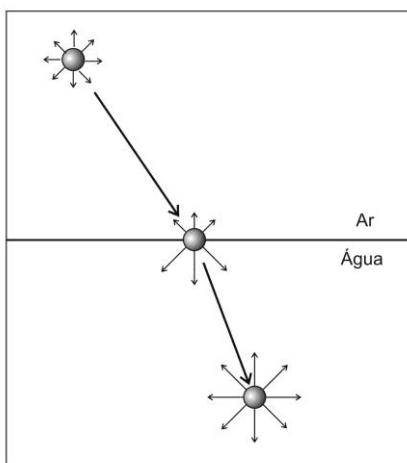
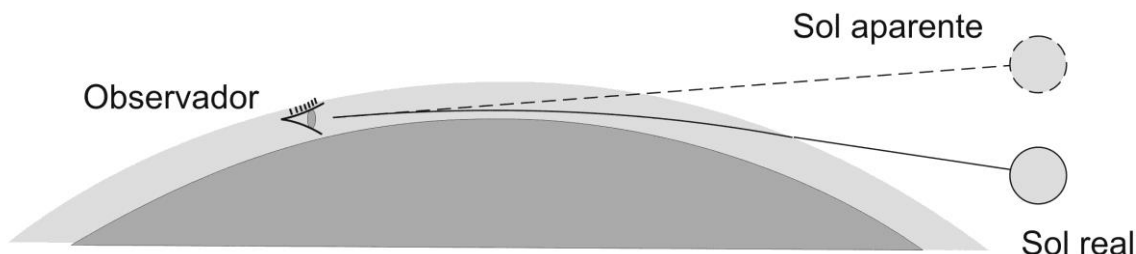


Figura XVIII.1 (ao lado). O modelo corpuscular da luz, de Newton, explica a refração a partir de forças de atração nos diferentes meios. A regra prática, então, é que a luz se dobra no sentido do meio mais denso.

Figura XVIII.2 (abaixo). Uma aplicação da regra da refração envolve estimar a posição do Sol quando ele se põe. O raio de luz que sai do Sol e chega ao nosso olho se dobra no sentido da atmosfera, mais densa que o espaço sideral. Como exercício, pode-se perguntar qual cor é vista por último.



¹⁴³ MAXWELL, J.C. ([1855] 1890), “On Faraday’s lines of force”, in *Scientific papers*, vol. I, Cambridge U. Press, pp. 155-229. Citação da p. 156, constante também da tradução da seção introdutória feita para nosso curso.

3. Natureza Ondulatória da Luz

Nas primeiras décadas do séc. XIX, Thomas Young e Augustin Fresnel descobriram que a luz é uma onda transversal. Young realizou o célebre experimento das duas fendas, percebeu um padrão de claros e escuros, e abduziu que uma propagação ondulatória explicaria o padrão de interferência (Fig. XVIII.3). Fresnel & Arago (1816) observaram que se a luz de cada fenda estivesse polarizada de maneira oposta, a interferência desaparecia. Isso indicava que a luz consistia de uma oscilação transversal (ou de uma combinação de transversal e longitudinal), ideia a que Young havia chegado dois anos antes. Para sustentar tal onda transversal, passou-se a supor que a luz se propaga em um ténue meio elástico rígido, chamado “éter” (concepção só abandonada após o surgimento da teoria da relatividade restrita). Com a teoria de Maxwell, surgiu o retrato da luz como ondas elétricas e magnéticas transversais (no Cap. XX discutiremos melhor tais entidades), como na Fig. XVIII.4.

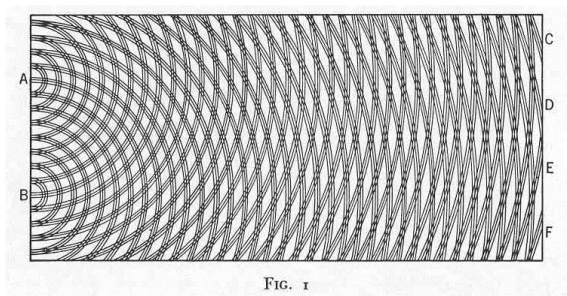


Figura XVIII.3: Desenho feito por Young para representar a propagação ondulatória da luz no experimento das duas fendas.

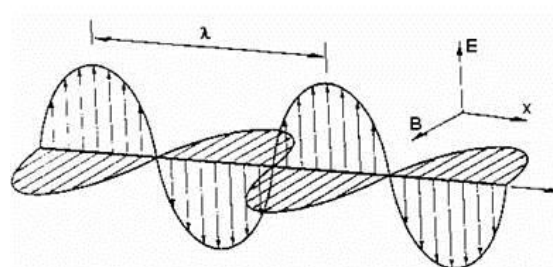


Fig. XVIII.4: Campos elétrico e magnético em uma onda de luz polarizada movendo-se para a direita.¹⁴⁴

A interferência destrutiva, que faz com que apareçam faixas escuras no padrão observado por Young, é um fenômeno curioso, pois envolve duas entidades que se cancelam.

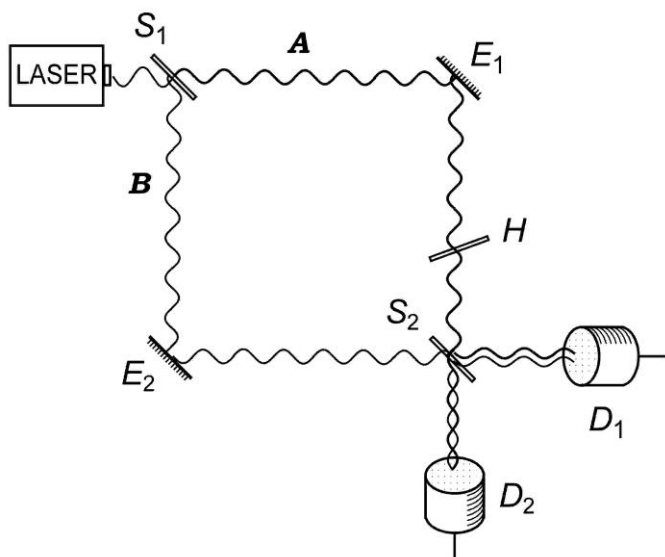


Fig. XVIII.5: Interferômetro de Mach-Zehnder.

Isso pode ser examinado em um interferômetro de Mach-Zehnder, que aparece na figura ao lado. Um feixe de luz coerente é dividido em um espelho semi-refletor S_1 , e os dois componentes propagam pelos caminhos A e B. O feixe A, ao chegar no semi-espelho S_2 , divide-se em duas partes, uma rumando para o detector D_1 e outro para D_2 . O mesmo acontece para o feixe B. Ajustando-se a lâmina H , pode-se impor superposição destrutiva em D_2 .

Se bloquearmos o caminho A, aparecerá luz em D_2 . Se então retirarmos o bloqueio (adicionando luz ao componente vindo de B), nada é detectado em D_2 . Isso é

¹⁴⁴ As Figs. XVIII.3 e 4 foram obtidas da internet, mas se encontram também na história da óptica de: PARK, D. (1997), *The fire within the eye*, Princeton U. Press, pp. 250, 285. A Fig. XVIII.5 é retirada de PESSOA JR., O. (2003), *Conceitos de física quântica*, vol. 1, Livraria da Física, São Paulo, p. 10.

curioso! Se A e B fossem o escoamento de um fluido, um bloqueio no caminho A nunca *aumentaria* o fluido chegando em D_2 . Mas no caso da luz, é algo análogo a isso que acontece!

Nesta situação de interferência destrutiva no trecho entre S_2 e D_2 , o que existe neste trecho? Duas entidades que se cancelam, ou simplesmente nada (ou melhor, o vácuo)? Notemos que as “entidades” que se superpõem são *amplitudes* de ondas, e não sua intensidade ou energia (que são calculadas a partir do módulo quadrado da amplitude resultante em cada ponto).

4. Ondas eletromagnéticas

A radiação eletromagnética medida varre um espectro de frequências de 26 ordens de grandezas (de 1 Hz a 100 Yotahertz), da qual a luz visível forma uma pequena parte. Lembrando que $\lambda \cdot f = c$ (comprimento de onda vezes frequência é a velocidade da luz) e que a energia associada a um fóton é $E = hf$ (energia igual à constante de Planck vezes a frequência), temos na Fig. XVII.6 a faixa de todas as frequências já medidas.

A frequência mais baixa já medida é o modo fundamental da ressonância de Schumann, de 7,8 Hz, que ocorre na cavidade entre a superfície da Terra e a ionosfera, em um modo que circunda a Terra, cuja circunferência é $4 \cdot 10^7$ m. Estas ondas são geradas por raios.

No outro extremo, o fóton de raio gama de maior energia já medida corresponde à erupção de raios gama (*gamma ray burst*) ocorrida em 27 de abril de 2013, e chamada “GRB 130427A”. Ela foi detectada no observatório espacial Fermi, vindo de uma fonte a 3,6 bilhões de anos luz, na constelação de Leão.

5. Princípio de Huygens-Fresnel

Na seção XV.3 discutimos o princípio de Fermat, que estipula que, entre dois pontos, a luz segue o caminho que minimiza o tempo de percurso. Veremos agora como este princípio pode ser derivado a partir da concepção de que a luz tem natureza ondulatória. Nosso ponto

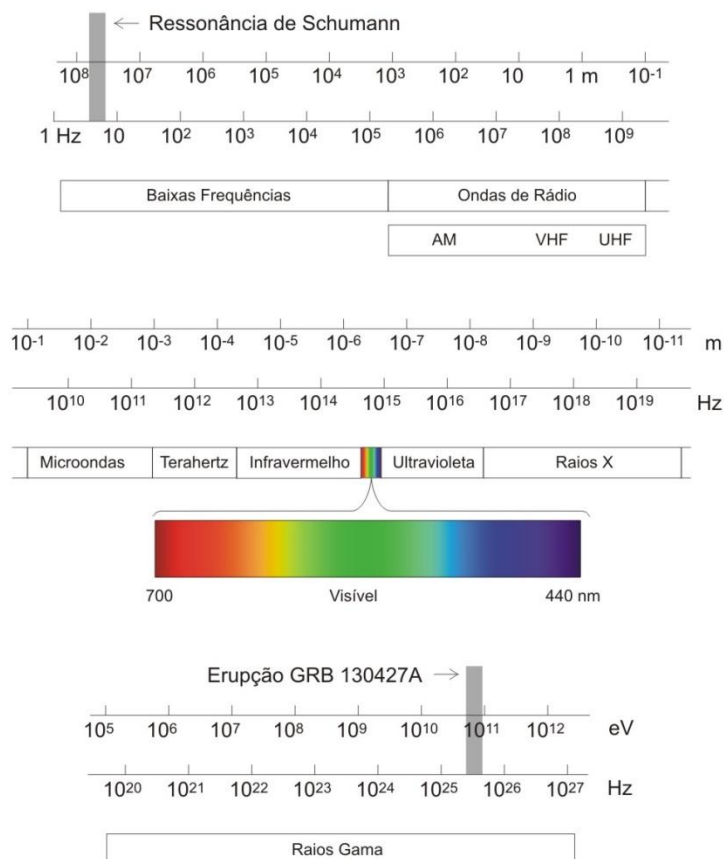


Figura XVIII.6. Espectro de radiação eletromagnética.

de partida é o princípio formulado por Huygens¹⁴⁵ em 1678, dentro de sua concepção de que a luz seria um pulso em um meio material constituído de minúsculas esferas elásticas, o “2º elemento” de Descartes (seção X.5). Da mesma maneira que uma bola de bilhar, movendo-se no sentido $+x$, ao atingir um grupo de bolas encostadas as faz saírem em todas as direções (todas com um componente positivo na direção x), a luz que sai da origem O e atinge um ponto A (suposto no eixo z) gerará um pulso semi-esférico, que ruma *em todas as direções* (de componente x positivo), a partir de A . Isso pode ser ilustrado pela passagem de uma frente de onda por uma fenda única e pontual (Fig. XVIII.7), o que gera uma onda esférica.

O princípio de Huygens foi aperfeiçoado por Fresnel, que incorporou a noções de superposição construtiva e destrutiva. Com a teoria da eletrodinâmica quântica, que é a teoria quântica de campos relativísticos desenvolvida por Tomonaga, Schwinger, Feynman e Dyson ao final da 2ª Guerra Mundial (e que incorporou a noção de um vácuo quântico polarizável, que afeta os valores de carga elétrica e massa das partículas elementares), o princípio de Huygens-Fresnel foi generalizado, em especial como o princípio da “soma sobre histórias” de Richard Feynman.

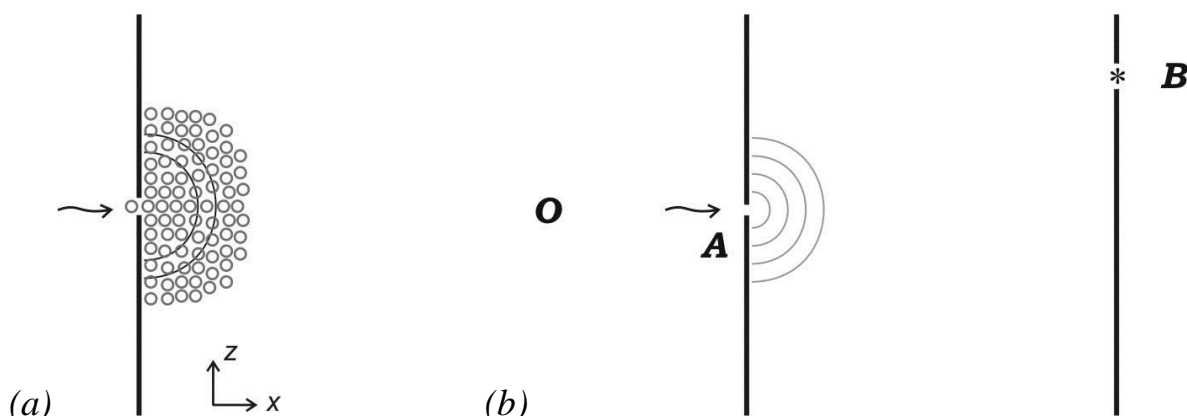


Figura XVIII.7: (a) Modelo de Huygens para a luz, concebida como um pulso em um meio de partículas. (b) Visão moderna da difração de onda eletromagnética por uma fenda única e pontual A , gerando uma onda esférica. Com a Física Quântica, descobriu-se que sua detecção se dá por meio de fótons, como em B , conforme veremos na seção XIX.1.

Consideremos a instrutiva explicação de Feynman¹⁴⁶ sobre o fenômeno simples da reflexão em um espelho (Fig. XVIII.8). A luz gerada em O é representada como um trem de onda contínuo que reflete em R e incide no olho do sujeito S . No entanto, a amplitude de onda gerada em O é na verdade uma onda esférica, que é absorvida em todos os pontos do espelho, e reemitida como onda esférica em cada um desses pontos! Interessam-nos os raios de luz que chegam em S , e especificamente como os diversos componentes de luz irão se superpor (construtiva e destrutivamente) em S . Para verificar isso, Feynman sugere que imaginemos a fase de cada onda contínuo que chega em S como um “relógio” que aponta num ângulo entre 0 e 2π (um “fator”), desenhado no ponto de reflexão do raio. A soma das amplitudes de mesmo módulo pode ser acompanhada somando-se as flechinhas de cada relógio. Olhando

¹⁴⁵ HUYGENS, C. (1986), *Tratado sobre a luz*, tradução comentada de R.A. Martins, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, Suplemento 4. Ver pp. 18-24. Comunicado em 1678, o texto só foi publicado em 1690.

¹⁴⁶ FEYNMAN, R.P. (2002), *QED: A estranha teoria da luz e da matéria*, trad. A.M.O. Baptista, Gradiva, Lisboa, pp. 55-79 (orig. em inglês: 1985). A Fig. XVIII.6 é baseada em figura da p. 62.

para os relógios da figura, vê-se que fora da região central eles oscilam rapidamente, o que indica que essas amplitudes são mutuamente destrutivas! A única contribuição significativa para a luz medida em S vem da reflexão que ocorre no centro do espelho (em R), que segue a lei usual da reflexão, e que corresponde ao *tempo mínimo* de percurso. Desta forma, a concepção de Fermat recebe uma justificação com base no princípio de Huygens-Fresnel.

Feynman aplica essas ideias a outros sistemas ópticos simples. Uma lente simples é um dispositivo que torna os caminhos ópticos (dos raios que atingem a lente e chegam no observador S) iguais (ou seja, suas fases relativas são nulas) (Fig. XVIII.9). Uma grade de difração pode ser obtida a partir da Fig. XVIII.8 cobrindo-se o espelho com ranhuras ou finas faixas de material não refletor. Nas regiões em que a periodicidade das ranhuras é igual à periodicidade dos fasores, ocorrerá superposição construtiva dos raios que chegam a S , e assim fica claro que pode ocorrer reflexão fora do ponto médio entre O e S .

É interessante notar que o princípio de Huygens-Fresnel só vale para espaços com um número ímpar de dimensões. Em duas dimensões, como na superfície de um lago, uma onda circular gera ondas secundárias, ao contrário do que ocorre com um clarão de luz em três dimensões, que é observado apenas uma vez.¹⁴⁷

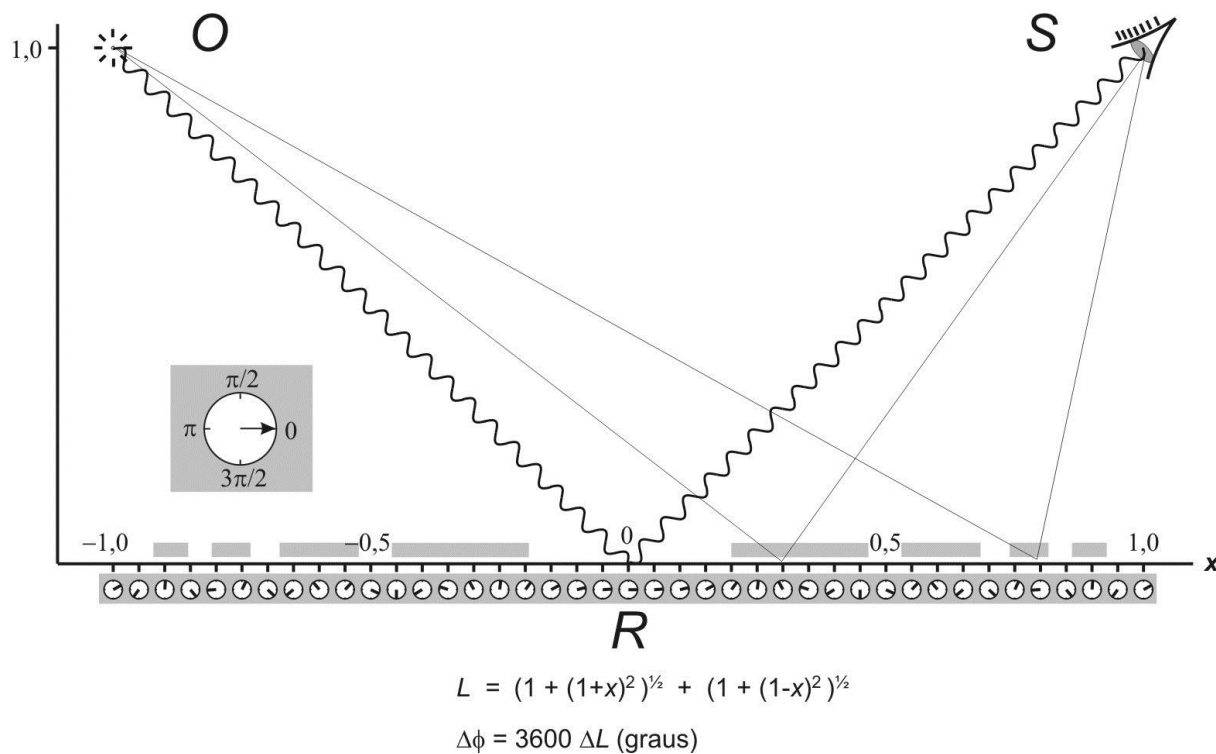


Fig. XVIII.8: Reflexão de luz originada em O , refletida no espelho, e observada em S . Como a luz é uma onda, ao sair de O ela cai em todo o espelho; por que não observamos reflexão de luz desses outros pontos? Diferentes trajetórias possíveis para o raio de luz levam a diferentes fases, indicadas pelos fasores abaixo do espelho. A superposição dos termos fora da região central R é destrutiva. Acima da abscissa, em cinza, estão indicadas as regiões que, se cobertas, levam à visualização das reflexões fora do ponto central R (como as reflexões de 2ª ordem etc., em uma grade de difração).

¹⁴⁷ Ver site anônimo de Kevin S. Brown, <http://www.mathpages.com/home/kmath242/kmath242.htm>

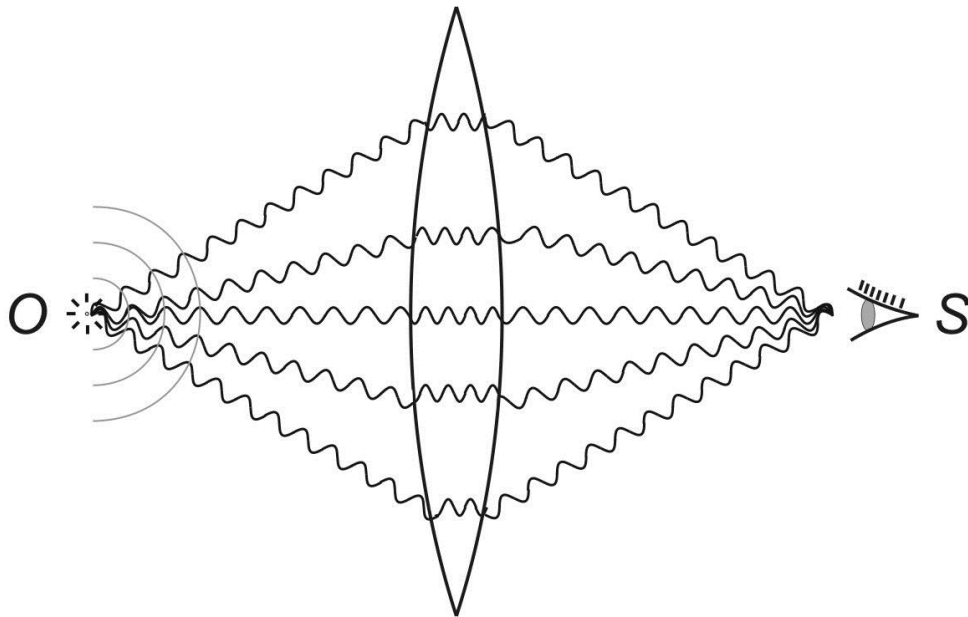


Figura XVIII.9. Uma lente convexa pode ser entendida como um dispositivo que faz com que todos os caminhos ópticos chegando ao observador S estejam com a mesma fase.