

TRATADO SOBRE A LUZ, onde são explicadas as causas daquilo que lhe acontece na reflexão e na refração e particularmente na estranha refração do cristal da Islândia \*

(1678)

CHRISTIAAN HUYGENS

[\* 2] Prefácio \*\*

Escrevi este Tratado durante minha estada na França, há doze anos. Comuniquei-o no ano de 1678 aos sábios que então compunham a Academia Real de Ciências, à qual tive a honra de ser chamado pelo Rei. Muitos desses membros, que ainda vivem, poderão lembrar-se de ter estado presentes quando dele fiz leitura e, melhor do que os outros, aqueles dentre eles que se aplicavam particularmente ao estudo das Matemáticas. Destes, não posso citar senão os célebres senhores Cassini, Romer e De la Hire. Embora desde então eu tenha corrigido e alterado muitas passagens, as cópias que dele fiz naquela época poderiam servir de provas de que nada lhe adicionei, a não ser pelas conjecturas relativas à formação do Cristal da Islândia e uma nova observação sobre a refração do Cristal de Rocha<sup>1</sup>. Desejei expor essas particularidades para informar desde que época tenho meditado sobre as coisas [\* 2, verso] que publico agora e não para tirar o mérito daqueles que, sem haver visto nada do que escrevi, possam se ter encontrado tratando de assuntos semelhantes — como efetivamente ocorreu com dois excelentes geométricos, os senhores Newton e Leibniz, com relação ao problema da forma dos vidros para concentrar os raios, quando uma das superfícies é dada.

\* Nota Editorial: Tradução do livro originalmente publicado sob o título: *Traité de la lumiere. Où sont expliquées les causes de ce qui luy arrive dans la reflexion, et dans la refraction. Et particulièrement dans l'etrange refraction du cristal d'Islande*. Par Monsieur Christiaan Huygens, Seigneur de Zeelhem. A Leide, chez Pierre van der Aa, Marchand Libraire, MDCCXC. Utilizou-se para a tradução uma reimpressão em facsimile (London, Dawsons of Pall Mall, 1966). A tradução é de Roberto de A. Martins. A tradução foi revista por Lillian Al-Chueyr Pereira Martins. Todas as notas de rodapé são do tradutor.

\*\* Os números entre colchetes indicam a paginação do texto original. No Prefácio, as páginas ímpares são numeradas \* 2 e \* 3 e as outras não possuem numeração (sendo aqui indicadas por \*verso e \*verso), a paginação começa, de modo normal, no primeiro capítulo do livro.

<sup>1</sup> A correspondência de Huygens atesta a época em que o *Tratado* foi escrito. Em sua correspondência com Leibniz, em carta datada de 22/11/1679 (onze anos antes da publicação do *Tratado*) Huygens conta que tem trabalhado sobre o cristal da Islândia, não tendo ainda conseguido explicar uma de suas propriedades, e que deseja imprimir durante o inverno seguinte sua obra. Cf. LEIBNIZ, G. W. *Mathematische Schriften*, ed. C. I. Gerhardt. Hildesheim, Georg Olms, 1971. V. 2, carta VI, p. 27.

*Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, Suplemento 4: 1-99, 1986.

Pode-se perguntar por que demorei tanto a divulgar esta obra. A razão é que eu a escrevi muito negligientemente no idioma em que ela está [Francês], com a intenção de traduzi-la em Latim, assim fazendo com o intuito de obter mais atenção para essas coisas. Além disso propus-me apresentá-la juntamente com um outro tratado de dióptrica, onde explico os efeitos dos telescópios e o restante que pertence a essa ciência. Mas havendo passado o prazer da novidade, adiei o tempo de execução desse propósito, e nem sei quando poderia chegar ao fim, sendo freqüentemente distraído, seja por afazeres, seja por algum novo estudo. Considerando isso, julguei finalmente que mais valia fazer esse escrito aparecer tal qual está, do que fazê-lo correr o risco de permanecer perdido, esperando ainda mais.

Aqui serão vistas demonstrações de tipos que [\* 3] não produzem tanta certeza quanto as da Geometria, e que mesmo diferem muito delas, pois enquanto os geométricos provam suas proposições por princípios certos e incontestáveis, aqui os princípios são verificados pelas conclusões que deles se tiram; a natureza das coisas não permite que isso seja feito de outra forma. É possível no entanto chegar assim a um grau de verossimilhança que freqüentemente nada fica devendo à evidência total. Tal ocorre quando as coisas demonstradas a partir desses princípios assumidos correspondem perfeitamente aos fenômenos que foram observados pela experiência — sobretudo quando são em grande número, e ainda principalmente quando são imaginados e previstos fenômenos novos, que devem seguir-se das hipóteses empregadas, e quando se descobre que nisso o efeito corresponde à nossa expectativa<sup>2</sup>. Se todas essas provas de verossimilhança forem encontradas naquilo que me propus tratar, como me parece que se encontram, isso deve ser uma grande confirmação do sucesso de minha pesquisa, e dificilmente poderia ocorrer que as coisas não fôssem aproximadamente como as represento. Desejo portanto acreditar que aqueles que gostam de conhecer as causas e que sabem admirar a maravilha da luz encontrarão alguma satisfação nessas diversas especulações que [\* 3, verso] se referem a ela, e na nova explicação de sua propriedade notável, que é o principal fundamento da construção de nossos olhos e dessas grandes invenções que tanto estendem seu uso. Espero também que existam aqueles que, seguindo esse início, entrarão nesse assunto mais profundamente do que fui capaz, pois falta muito para ele ser esgotado. Isso aparece nos lugares que indiquei, onde deixo as dificuldades sem resolução; e ainda mais pelas coisas que nem mesmo toquei, como os corpos brilhantes de vários tipos, e tudo o que se refere às cores — campo em que ninguém até agora pôde se vangloriar de

<sup>2</sup> O método empregado por Huygens, e que difere muito do seguido mais tarde por Newton em sua Óptica, tem grande semelhança com a abordagem de Descartes, o qual, aliás, fortemente influenciou o jovem Huygens. Sobre a metodologia cartesiana no estudo de fenômenos naturais, ver: DESCARTES, R. *Principia Philosophiæ*, ed. C. Adams e P. Tannery. Paris, J. Vrin, 1965 (*Oeuvres de Descartes*, v. 9-1), III, §43.

haver obtido sucesso<sup>3</sup>. Resta enfim muito a pesquisar em relação à natureza da luz, que não pretendo haver descoberto, e ficarei muito devedor àquele que possa suplementar aquilo que aqui me falta de conhecimento.

La Haye, 8 de janeiro de 1690.

<sup>3</sup> A teoria das cores possui uma longa história que não pode ser descrita aqui (ver, por exemplo, CROMBIE, A. C. *Robert Grosseteste and the origins of experimental science, 1100-1700*. Oxford, Clarendon, 1953). Na época em que Huygens escrevia seu *Traçado*, estava em evidência a teoria exposta por Hooke em sua *Micrographia* (1667), que era de tipo ondulatório, tentando proporcionar uma confusa explicação sobre as cores, baseada na forma dos pulsos luminosos. Pouco depois, Newton publicou sua teoria das cores em uma série de artigos (*Philosophical Transactions* 6: 3075-87, 1672; 7: 5014-8, 1672; 8: 6108-11, 1673; 9: 698-705, 1676) que produziram reações irritadas de Hooke e controvérsias com vários autores, inclusive o próprio Huygens (*Philosophical Transactions* 8: 6086-7, 1673). Todos atacaram e defenderam-se como puderam, mas o resultado final não foi o esclarecimento da natureza das cores, e sim um certo desânimo, que, entre outros efeitos, afetou Newton do estudo da Física por vários anos. Por ter participado da discussão esperava-se de Huygens que apresentasse em seu *Traçado* uma teoria das cores, e essa esperança é expressa por Leibniz a Huygens, em uma carta de 11-21/7/1690, à qual Huygens responde em 24/8/1690: "Nada falei sobre as cores em meu *Traçado sobre a Luz*, achando esse assunto muito difícil, sobretudo por causa de tantas maneiras diferentes pelas quais as cores são produzidas. O Sr. Newton, que vi no verão passado na Inglaterra, prometeu algo sobre isso, e me comunicou algumas experiências muito belas das que havia feito". LEIBNIZ, *Mathematische Schriften* (nota 2), v. 2, cartas XIII e XIV, p. 41. Veja-se também BLAY, M. Christiaan Huygens et les phénomènes de la couleur. *Revue d'Histoire des Sciences* 37(2): 127-50, 1984.

## Tabela dos assuntos contidos nesse tratado

<i>Capítulo I — Sobre os raios que se propagam diretamente</i>	
Que a luz é produzida por certo movimento. . . . .	12
Que nenhum corpo passa do objeto luminoso até nossos olhos. . . . .	12
Que a luz se propaga esféricamente e de modo semelhante ao som. . . . .	12
Que a luz gasta tempo para se propagar. . . . .	13
Experiência que parece provar que ela se propaga instantaneamente. . . . .	13
Experiência que prova que ela gasta tempo. . . . .	15
Quão maior é sua velocidade em relação ao som. . . . .	16
Em qué a emanação da luz difere da do som. . . . .	16
Que não é o mesmo meio que serve a uma e ao outro. . . . .	17
Como se propaga o som. . . . .	17
Como se propaga a luz. . . . .	18
Observação particular sobre a propagação da luz. . . . .	22
Por que os raios se propagam em linha reta. . . . .	23
Como a luz, proveniente de diversos lugares, se entrecruza sem impedimento. . . . .	24
<i>Capítulo II — Sobre a reflexão</i>	
Demonstração da igualdade dos ângulos de incidência e de reflexão. . . . .	25
Por que o raio incidente e o refletido estão em um mesmo plano, perpendicular à superfície refletora. . . . .	27
Que não é necessário que a superfície refletora seja perfeitamente contínua, para produzir a igualdade dos ângulos de incidência e de reflexão. . . . .	28
<i>Capítulo III — Sobre a refração</i>	
Que os corpos podem ser transparentes sem que nenhuma matéria passe através deles. . . . .	29
Prova que a matéria etérea passa através dos corpos diáfanos. . . . .	29
Como essa matéria que os atravessa os torna diáfanos. . . . .	30
Que os corpos aparentemente mais sólidos são de uma constituição muito rarefeita. . . . .	30
Que a luz se propaga mais lentamente no interior da água e do vidro do que no ar. . . . .	30
Tercera hipótese para explicar a transparência e a redução de velocidade aí sofrida pela luz. . . . .	31
Sobre aquilo que pode tornar opacos os corpos. . . . .	31
Demonstração de por qué a refração observa a proporção conhecida dos senos. . . . .	32

Por que o raio incidente e o desviado se produzem reciprocamente. . . . .	36
Por que a reflexão interior de um prisma triangular de vidro se torna subitamente mais forte quando a luz não pode mais atravessá-lo. . . . .	37
Que os corpos que produzem maior refração fazem também a mais forte reflexão. . . . .	37
Demonstração de um teorema do Sr. de Fermat. . . . .	37
<i>Capítulo IV — Sobre a refração no ar</i>	
Que as emanações da luz no ar não são esféricas. . . . .	42
Como por isso alguns objetos parecem mais elevados do que o são. . . . .	42
Como o Sol pode aparecer sobre o horizonte, antes de se haver elevado. . . . .	43
Que os raios de luz se tornam curvos no ar da atmosfera e que efeitos são produzidos por isso. . . . .	44
<i>Capítulo V — Sobre a estranha refração do cristal da Islândia</i>	
Que esse cristal também cresce em outros países. . . . .	47
Quem sobre ele escreveu primeiro. . . . .	47
Descrição do cristal da Islândia: sua matéria, forma e propriedades. . . . .	47
Que ele possui duas refrações diferentes. . . . .	49
Que o raio perpendicular à superfície sofre aí refração e que raios inclinados à superfície passam sem refração. . . . .	49
Observação das refrações desse cristal. . . . .	50
Que há uma refração regular e uma irregular. . . . .	50
O modo de medir as duas refrações do cristal da Islândia. . . . .	50
Propriedade notável da refração irregular. . . . .	52
Hipótese para explicar a dupla refração. . . . .	53
Que o cristal de rocha também tem uma dupla refração. . . . .	54
Hipótese de emanações de luz, no interior do cristal da Islândia, sob forma de esférico, para a refração irregular. . . . .	54
Como um raio perpendicular pode sofrer refração. . . . .	54
Como a posição e a forma das emanações esféricas nesse cristal podem ser definidas. . . . .	56
Explicação da refração irregular por essas emanações esféricas. . . . .	57
Modo fácil de encontrar a refração irregular de cada raio incidente. . . . .	59
Demonstração do raio oblíquo que passa pelo cristal sem ser desviado. . . . .	61
Outras irregularidades da refração explicadas. . . . .	63
Que um objeto colocado sob o cristal parece duplo, com duas imagens de diferentes alturas. . . . .	65
Por que a altura aparente de uma dessas imagens muda, ao mudar a posição dos olhos acima do cristal. . . . .	69

Sobre diferentes cortes desse cristal que produzem ainda outras refrações e confirmam toda essa teoria. . . . .	71
Modo particular de polir suas superfícies, depois que ele foi cortado. . . . .	72
Surpreendente fenômeno sobre os raios que passam por dois pedaços separados, cuja causa não é explicada. . . . .	73
Conjetura verossímil sobre a composição interior do cristal da Islândia e sobre a forma de suas partículas. . . . .	75
Provas para confirmar essa conjetura. . . . .	77
Cálculos que foram assumidos nesse capítulo. . . . .	78
<i>Capítulo VI — Sobre as figuras dos corpos diáfanos que servem para a reflexão e a refração</i>	
Regra geral e fácil para encontrar essas figuras. . . . .	83
Invenção das ovas do Sr. Des Cartes para a Dióptrica . . . . .	84
Como ele foi capaz de encontrar essas linhas. . . . .	88
Modo de encontrar a superfície de um vidro para a refração perfeita, quando a outra superfície é dada. . . . .	90
Nota sobre o que ocorre aos raios na refração de uma superfície esférica. . . . .	95
Nota sobre a linha curva que se forma na reflexão de um espelho côncavo esférico. . . . .	99

## [1] Capítulo I

## Sobre os raios que se propagam diretamente

Como acontece em todas as ciências nas quais a geometria é aplicada à matéria, as demonstrações relativas à Óptica são fundamentadas sobre verdades tiradas da experiência — tais como a de que os raios de luz se propagam em linha reta; que os ângulos de reflexão e de incidência são iguais; e que nas refrações o raio se desvia de acordo com a regra dos senos (agora tão conhecida) e que não é menos certa do que as precedentes.

A maior parte daqueles que escreveram sobre as diferentes partes da Óptica contentaram-se com pressupor essas verdades. Mas alguns mais curiosos quiseram pesquisar sua origem e as suas causas, considerando-as elas próprias como efeitos admiráveis da natureza. Assim propuseram coisas engenhosas, mas não de tal tipo que os mais inteligentes não desejem explicações ainda mais satisfatórias. Quero propor aqui o que meditei sobre esse assunto, para contribuir tanto quanto posso ao esclarecimento dessa parte da Ciência Natural, que com razão é considerada uma das mais difíceis. Reconheço que devo muito àqueles que primeiramente começaram a dissipar a escuridão obscuridade em que [2] estavam envoltas essas coisas e a dar esperança de que elas pudessem ser explicadas por razões inteligíveis. Mas também me espanto, por outro lado, pois esses mesmos quiseram freqüentemente fazer certos raciocínios pouco evidentes passarem por muito seguros e demonstrativos. Não se encontra pessoa nenhuma que tenha ainda explicado de forma provável esses fenômenos primeiros e mais notáveis da luz, a saber: por que ela somente se propaga seguindo linhas retas e como os raios visuais, provindo de uma infinidade de lugares, cruzam-se sem em nada atrapalharem-se uns aos outros.

Tentarei portanto nesse livro, por princípios aceitos na Filosofia atual, dar razões mais claras e verossímeis — primeiramente, dessas propriedades da luz que se propaga diretamente; em segundo lugar, daquela que é refletida pelo encontro com outros corpos. Depois explicarei os sintomas dos raios que se diz sofrerem refração passando por corpos diáfanos de diferentes espécies — onde também tratarei dos efeitos da refração no ar, levando em conta as diferentes densidades da atmosfera.

Depois examinarei as causas da estranha refração de certo cristal que é trazido da Islândia. E, em último lugar, tratarei das diferentes formas de corpos transparentes e refletores pelas quais os raios são reunidos em um ponto, ou desviados de diferentes maneiras. Aí se verá com que facilidade se encontram, segundo nossa nova teoria, não apenas as elipses, hipérbolas e outras linhas curvas que o Sr. Des Cartes\*\*\* sutilmente inventou para esse fim, mas também aquelas que devem dar forma à superfície de um vidro, quando a outra superfície é dada — seja ela esférica, plana ou de qualquer forma.

\*\*\* Mantivemos a grafia que Huygens dá aos nomes de pessoas em sua obra. Descartes realmente se grafava des Cartes, ou, em latim, Cartesius (e não Descartius).

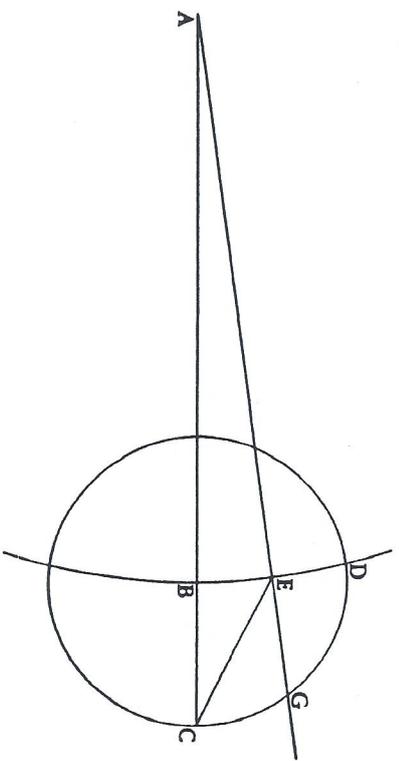
Não se pode duvidar que a luz consista no movimento de certa matéria. Se considerarmos a sua [3] produção, encontraremos que na Terra são principalmente o fogo e a chama que a geram e eles contêm sem dúvida corpos que têm um movimento muito rápido, já que dissolvem e fundem muitos outros corpos, dos mais sólidos<sup>4</sup>. Se considerarmos seus efeitos, veremos que, quando a luz é concentrada, como por espelhos côncavos, ela tem a virtude de queimar como o fogo, ou seja, ela separa as partes dos corpos. Isso certamente é um sinal de movimento, pelo menos na verdadeira Filosofia, na qual se concebe a causa de todos os efeitos naturais por razões da Mecânica — e isso deve ser feito, a menos que se renuncie a toda esperança de jamais compreender coisa alguma na Física, em minha opinião<sup>5</sup>.

Segundo essa Filosofia, considera-se certo que a sensação da visão é excitada pela impressão de algum movimento de uma matéria que age sobre os nervos no fundo de nossos olhos e essa é ainda uma outra razão para se crer que a luz consiste em um movimento da matéria que se encontra entre nós e os corpos luminosos.

Além disso, quando se considera a extrema velocidade com que a luz se espalha por todos os lados e que, quando vem de diferentes lugares, mesmo totalmente opostos, [os raios luminosos] se atravessam uns aos outros sem se atrapalharem, compreende-se que, quando vemos um objeto luminoso, isso não poderia ocorrer pelo transporte de uma matéria que venha do objeto até nós, como uma flecha ou bala atravessa o ar; pois certamente isso repugna bastante a essas duas propriedades da luz e principalmente à última. Ela se espalha portanto de uma outra maneira e o que nos pode conduzir a compreendê-la é nosso conhecimento da propagação do som no ar.

Sabemos que, por meio do ar, que é um corpo invisível e impalpável, o som se propaga em toda a volta do lugar onde foi produzido, por um movimento que passa sucessivamente de uma [4] parte do ar a outra. A propagação desse movimento se faz com igual velocidade para todos os lados e devem se formar como superfícies esféricas que crescem sempre e que chegam a atingir nossas orelhas. Ora, não há dúvida de que a luz também não venha do corpo luminoso até nós por algum movimento impresso à matéria que está entre os dois — pois já vimos que isso não pode ocorrer pelo transporte de um corpo que passe de um até o outro. Se a luz gasta tempo para essa passagem — o que vamos examinar agora — seguir-se-á que esse movimento impresso à matéria é sucessivo e que, conseqüentemente, ele se espalha, assim como o som, por superfícies e por ondas esféricas. Eu as chamo "ondas" por semelhança àquelas que vemos formarem-se na água quando aí se joga uma pedra e que representam uma propagação

sucessiva circular — embora proveniente de uma outra causa e somente em uma superfície plana<sup>6</sup>.  
 Para ver se a propagação da luz se faz no tempo, consideremos primeiramente se há experiências que possam nos convencer do contrário. Aquelas que se podem fazer aqui na Terra, com fogos colocados a grandes distâncias, provam que a luz não gasta um tempo sensível para percorrer tais distâncias; mas pode-se dizer com razão que elas [as distâncias] são muito pequenas, e que não se pode concluir senão que a passagem da luz é extremamente rápida. O Sr. Des Cartes, que era de opinião que ela era instantânea, fundamentava-se, com razão, sobre uma experiência muito melhor, tirada dos eclipses da Lua. No entanto, como mostrei, ela não é de forma alguma convincente. Eu propô-la-ei de um modo um pouco diferente do que o dele, para fazer compreender melhor toda sua consequência.



Seja *A* a posição do Sol e *BD* uma parte da órbita ou caminho[5] anual da Terra. *ABC* é uma linha reta que suponho cruzar o caminho da Lua (representado pelo círculo *CD*) no ponto *C*.

Ora, se a luz exige tempo (uma hora, por exemplo) para atravessar o espaço entre a Terra e a Lua, seguir-se-á que, quando a Terra chegar a *B*, a sombra ou interrupção da luz que ela produz não terá ainda chegado ao ponto *C*, mas apenas chegará aí depois de uma hora. Será, portanto, uma hora depois que a Terra esteve em *B*, que a Lua, chegando em *C*, será obscurecida. Esse obscurecimento ou interrupção da luz

4 A associação entre calor e movimento das partículas já era então aceita por quase todos, principalmente por influência da obra de Bacon. A fonte de Huygens para essas idéias foi provavelmente os *Principia Philosophiae* de Descartes (nota 3), III, §21.

5 Observe-se aqui a defesa do reducionismo mecanicista.

6 A idéia de que a luz se espalha por superfícies esféricas remonta a Ibn al-Haitam (século XI), e era bem conhecida: SARTON, G. The tradition of the *Optics* of Ibn al-Haitam. *Isis* 29: 403-6, 1938. Hooke, na *Micrographia*, também interpreta a luz como pulsos que formam esferas em meios homogêneos e compara essas ondas com as que se formam quando se lança uma pedra à água. Sobre a evolução das idéias a respeito da teoria ondulatória da luz, veja-se: SHAPIRO, A. E. Kinematic optics: a study of the wave theory of light in the 17th century. *Archives for History of exact Sciences* 11: 188-207, 1973.

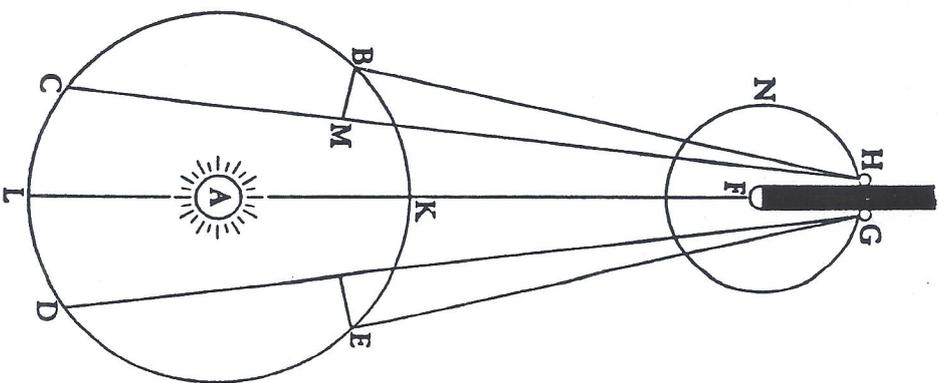
não chegará à Terra senão uma outra hora depois. Suponhamos que nessas duas horas ela [a Terra] tenha chegado a *E*. Estando portanto a Terra em *E*, ver-se-á a Lua eclipsada em *C*, de onde ela partiu uma hora antes, e ver-se-á ao mesmo tempo o Sol em *A*. Pois, estando [o Sol] imóvel — como suponho, com Copérnico — e como a luz se propaga por linhas retas, ele deve sempre parecer onde está<sup>7</sup>. Mas sempre se observou, dizem, que a Lua eclipsada aparece no lugar da eclíptica oposto ao Sol; e no entanto ela aqui apareceria atrás desse lugar, sob um ângulo *GEC*, que completa com *AEC* dois ângulos retos. Isso é portanto contrário à [6] experiência, pois o ângulo *GEC* seria muito sensível, cerca de 33 graus. Pois, de acordo com nosso cálculo, que está no Tratado sobre as causas dos fenômenos de Saturno, a distância *BA* entre a Terra e o Sol é cerca de doze mil diâmetros terrestres, e portanto quatrocentas vezes maior do que a distância da Lua (*BC*), que é de 30 diâmetros. Portanto, o ângulo *ECB* será aproximadamente quatrocentas vezes maior do que *BAE*, que é de cinco minutos — ou seja, o caminho percorrido pela Terra em sua órbita durante duas horas — e assim o ângulo *BCE* é de quase 33 graus, assim como o ângulo *CEG*, que o ultrapassa por cinco minutos.

Mas deve-se notar que nesse raciocínio colocou-se uma velocidade da luz que lhe exige uma hora para fazer o trajeto daqui à Lua. Se supusermos que para isso não é necessário senão um minuto de tempo, então o ângulo *CEG* não será senão de 33 minutos, e se não fossem necessários senão dez segundos de tempo, esse ângulo não seria senão de seis minutos. Portanto, não é fácil perceber pelas observações de eclipses que o movimento da luz seja instantâneo, nem se pode concluí-lo de coisa nenhuma, conseqüentemente.

E verdade que isso leva a supor uma estranha velocidade, que seria cem mil vezes maior do que a do som. Pois o som, segundo o que observei, percorre cerca de 180 toesas no tempo de um segundo ou de um batimento arterial. Mas essa suposição não deve parecer ter nada de impossível, pois não se trata do transporte de um corpo com tal velocidade, mas de um movimento sucessivo que passa de uns aos outros. Meditando sobre essas coisas, não senti dificuldade em supor que a emanção da luz se fazia no tempo, vendo que assim todos os fenômenos podiam ser explicados, e que seguindo a opinião contrária tudo era incompreensível. Pois sempre me pareceu — e a muitos outros, como a mim — que mesmo o Sr. Des Cartes, que teve o propósito de tratar inteligentemente [7] todos os assuntos da Física, e que certamente obteve maior sucesso nisso do que qualquer pessoa antes dele, nada disse sobre a luz e suas propriedades que não esteja cheio de dificuldades, ou que não seja até incompreensível.

<sup>7</sup> Não se conhecia, na época, a aberração da luz. Este efeito produz uma alteração da posição aparente de uma fonte luminosa quando ela ou o observador estão em movimento (o efeito é uma função da velocidade relativa). Embora o Sol fosse considerado por Huygens como estando em repouso, ele não é visto em sua posição "real", pois há um movimento da Terra em relação ao Sol. Este efeito se soma ao efeito calculado por Huygens. Sobre a história da descoberta desse efeito, ver: STEWART, A. B. The discovery of stellar aberration. *Scientific american* 210(3): 100-8, 1969.

Mas aquilo que emprego apenas como uma hipótese recebeu há pouco tempo uma aparência de verdade estabelecida, pela engenhosa demonstração do Sr. Romer que vou descrever aqui, esperando que ele próprio forneça tudo o que deve servir para confirmá-la. Ela se baseia, como a precedente, em observações celestes, e prova não apenas que a luz gasta tempo para sua passagem, mas também mostra quanto tempo ela emprega, e que a velocidade é pelo menos seis vezes maior do que a que acabei de dizer. Para isso ele se serve dos eclipses sofridos pelos pequenos planetas que giram em torno de Júpiter, e que freqüentemente entram em sua sombra. Eis seu raciocínio. Seja



*A* o Sol, *BDE* a órbita anual da Terra, *F* Júpiter, *GN* a órbita do mais próximo de seus satélites (pois este é mais adequado a esta pesquisa do que qualquer dos outros três, por causa da velocidade de sua revolução). Seja *G* esse satélite entrando na sombra de Júpiter, e *H* o mesmo saindo da sombra.

Suponhamos que, estando a Terra em  $B$ , algum tempo antes da última quadratura, viu-se o citado satélite sair da sombra. Se a Terra permanecesse nesse mesmo lugar, dever-se-ia ver novamente uma emergência semelhante após 42 horas [8] e meia, pois esse é o tempo no qual ele faz a volta à sua órbita e retorna à oposição ao Sol. E se a Terra permanecesse sempre em  $B$  durante 30 revoluções desse satélite, por exemplo, ela o veria ainda sair da sombra após 30 vezes 42 horas e meia. Mas, durante esse tempo, a Terra transportou-se para  $C$ , afastando-se mais de Júpiter.

Se a luz emprega tempo para sua passagem, a iluminação do pequeno planeta será percebida mais tarde em  $C$  do que o teria sido em  $B$ , e deve-se adicionar o tempo de 30 vezes 42 horas e meia àquele gasto pela luz para atravessar o espaço  $MC$ , diferença entre os espaços  $CH$  e  $BH$ . Da mesma forma, quando a Terra chegar a  $E$  depois de  $D$ , próxima à outra quadratura, aproximando-se de Júpiter, as imersões do satélite  $G$  na sombra devem ser observadas antes em  $E$  do que elas teriam aparecido se a Terra tivesse permanecido em  $D$ .

Ora, por uma grande quantidade de observações, feitas durante dez anos consecutivos, descobriu-se que essas diferenças são muito consideráveis, de dez minutos e até mais, e concluiu-se que, para atravessar todo o diâmetro da órbita anual  $KL$ , que é o dobro da distância daqui ao Sol, a luz necessita de cerca de 22 minutos de tempo.<sup>9</sup> O movimento de Júpiter em sua órbita, enquanto a Terra passa de  $B$  para  $C$ , ou de  $D$  para  $E$ , está incluído nos cálculos. Mostra-se também que não se pode atribuir o retardamento dessas iluminações nem a antecipações dos eclipses, nem à irregularidade do movimento desse pequeno planeta, nem à sua excentricidade.

Se considerarmos a vasta extensão do diâmetro  $KL$ , que, segundo meus cálculos, é de uns 24 mil diâmetros da Terra, conheceremos a extrema velocidade da luz. Suponhamos que  $KL$  fosse apenas 22 mil desses diâmetros. Sendo [9] percorridos em 22 minutos, isso corresponde a mil diâmetros em um minuto, e 16 2/3 diâmetros em um segundo ou batimento arterial, que são mais de mil e cem vezes em mil toesas; pois o diâmetro da Terra contém 2.865 léguas das quais 25 constituem um grau, e cada légua é de 2.282 toesas, segundo a medida exata que o Sr. Picard realizou por ordem do Rei em 1669. Mas o som, como disse antes, não percorre senão 180 toesas no mesmo tempo de um segundo. Portanto, a velocidade da luz é mais de seiscentas mil vezes maior do que a do som — o que, no entanto, é completamente diferente de ser instantânea, pois existe aí a mesma diferença que há entre uma coisa finita e uma infinita. Como dessa maneira foi confirmado o movimento sucessivo da luz, segue-se, como já disse, que ele se propaga por ondas esféricas, assim como o movimento do som.

Embora ambos se pareçam nisso, diferem em muitas outras coisas, a saber: na primeira produção do movimento que os causa; na matéria em que o movimento se propaga; e na forma como ele se comunica. Sabe-se que a produção do som é feita pelo

súbito abalo de um corpo inteiro, ou de uma parte considerável, que agita todo o ar contíguo. Mas o movimento da luz deve nascer como de cada ponto do objeto luminoso, para permitir perceber todas as partes diferentes desse objeto, como se verá melhor em seguida. Creio que a melhor explicação para esse movimento é a suposição de que os corpos luminosos líquidos, como a chama — e aparentemente o Sol e as estrelas — são compostos por partículas que nadam em uma matéria muito mais sutil, que as agita com uma grande rapidez, e as faz chocarem-se contra as partículas do éter, que as cercam, e que são muito menores do que elas. Nos sólidos luminosos, como o carvão, ou metal incandescente, [deve-se supor] que esse mesmo [10] movimento é causado pela agitação violenta das partículas do metal ou da madeira, das quais as que estão na superfície também batem na matéria éterea. Além disso, a agitação das partículas que geram a luz deve ser muito mais rápida e brusca do que a que causa o som dos corpos, pois não vemos que o tremor de um corpo que soa seja capaz de fazer nascer a luz, assim como o movimento da mão no ar não é capaz de produzir som.

Se agora examinarmos qual pode ser essa matéria em que se propaga o movimento que vem dos corpos luminosos, e que chamo *etérea*<sup>9</sup>, ver-se-á que não é a mesma que serve para a propagação do som. Encontra-se pois que esta é o próprio ar que sentimos e que respiramos, e quando ele é retirado de um lugar, a outra matéria que serve à [propagação] da luz não deixa de ser encontrada aí. Isso é provado encerrando um corpo sonoro em um recipiente de vidro, do qual se tira depois o ar pela máquina que o Sr. Boyle nos forneceu, e com a qual ele fez tantas belas experiências. Fazendo-a, deve-se tomar o cuidado de colocar o corpo sonoro sobre algodão, ou sobre penas, de modo que ele não possa comunicar seus tremores ao recipiente de vidro que o encerra, nem à máquina (o que tinha sido negligenciado até aqui). Pois então, após haver evacuado todo o ar, não se ouve nenhum som do metal quando atingido<sup>10</sup>.

Ve-se aqui não apenas que nosso ar, que não penetra o vidro, é a matéria através de que se propaga o som, mas também que não é esse mesmo ar, mas uma outra matéria, na qual se propaga a luz; pois, tendo sido retirado o ar desse recipiente, a luz não deixa de atravessá-lo como antes.

<sup>9</sup> O éter, segundo Aristóteles, seria o quinto elemento, constituinte dos céus, inexistente no mundo sublunar. Posteriormente, principalmente pela influência de Descartes, começou-se a imaginar que a matéria que preenche os espaços celestes estaria também entremeadada às partículas materiais na Terra e em todas as partes. Ver *Principia Philosophiæ* (nota 3), II, §§ 16-20 e II, § 48. Como Descartes e quase todos os seus coetâneos, Huygens é também incapaz de imaginar um espaço vazio.

<sup>10</sup> De acordo com Lewons, "os membros da *Academia del Cimento*, em seus engenhosos experimentos pioneiros sobre o vácuo, foram com frequência enganados pela imperfeição de seus aparelhos. Concluíram que o ar nada tem a ver com a produção de sons, *evidentemente* porque seu vácuo não era suficientemente perfeito. Otto von Guericke caiu em um engano semelhante ao usar sua recém-construída bomba de ar, *inubitiavelmente* pela presença de ar suficientemente denso para transportar o som do sino" (meus grifos). Cf. JEVONS, W.S. *The principles of science*. New York, Dover, 1958, p. 432. A explicação de Lewons é falsa e a de Huygens é a correta. Por melhor que seja o vácuo (e o produzido por von Guericke já era suficientemente bom) o som pode se propagar pelas partes sólidas do aparelho, a menos que seja isolado através de um material não elástico, como o algodão.

<sup>8</sup> O tempo encontrado por Römer é excessivamente elevado. Medidas pouco posteriores, citadas por Newton, levaram a um tempo de 7 ou 8 minutos para que a luz percorra a distância média entre o Sol e a Terra. Medidas recentes indicam um tempo de 8 minutos e 19 segundos.

Esse último ponto é demonstrado ainda mais claramente pela [11] célebre experiência de Torricelli. Nela, o tubo de vidro de onde se retirou o mercúrio, permanecendo completamente vazio de ar, transmite a luz como quando havia ar. Isso prova que se encontra dentro desse tubo uma matéria diferente do ar, e que essa matéria deve haver penetrado o vidro, ou o mercúrio, ou ambos, que são impermeáveis ao ar. E quando, na mesma experiência, se coloca um pouco de água acima do mercúrio, conclui-se de modo semelhante que tal matéria atravessa o vidro, ou a água, ou ambos.

Quanto as diferentes maneiras pelas quais disse que se comunicam sucessivamente os movimentos do som e da luz, pode-se compreender como se passa o do som, quando se considera que o ar é de natureza tal que pode ser comprimido e reduzido a um espaço muito menor do que ocupa ordinariamente; e que, à medida que é comprimido, esforça-se por aumentar. Isso, juntamente com sua penetrabilidade, que mantém mesmo quando comprimido, parece provar que ele é feito de pequenos corpos que nadam e que são agitados muito velozmente na matéria etérea, composta por partes muito menores. Assim, a causa da propagação das ondas do som é o esforço que esses pequenos corpos que se entrecrocaram fazem para se expandir, quando estão um pouco mais próximos no circuito dessas ondas do que em outra parte.

Mas a extrema velocidade da luz, e outras propriedades que ela possui, não poderiam permitir uma tal propagação de movimento, e mostrarei aqui de que maneira concebo que ela deva ser feita. Para isso é preciso explicar a propriedade dos corpos duros de transmitirem o movimento uns aos outros.

Tomando-se um grande número de bolas de igual tamanho, feitas de alguma matéria muito dura, e colocando-as em linha [12] reta, de modo que se toquem, descobre-se que, batendo com uma bola semelhante contra a primeira delas, o movimento passa quase instantaneamente à última, que se separa da fila, sem que se perceba que as outras se tenham movido. E também aquela que bateu [na primeira] permanece imóvel como elas. Aí se vê uma passagem de um movimento com uma velocidade muito grande, e que se torna ainda maior quando a matéria das bolas é ainda mais dura.

Mas note-se que esse progresso do movimento não é instantâneo, mas sucessivo, e que assim ele necessita tempo. Pois se o movimento (ou, se preferirmos, a tendência ao movimento) não passasse sucessivamente por todas essas bolas, elas o adquiririam todas ao mesmo tempo, e portanto todas elas avançariam juntas — o que não ocorre.

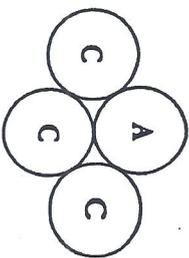
E a última que deixa a fila e adquire a velocidade daquela que foi lançada. Além disso, há experiências mostrando que todos esses corpos considerados mais duros, como o aço temperado, o vidro e a ágata, são comprimidos, e dobram-se de alguma forma, não somente quando estão sob a forma de barras, mas também quando estão sob a forma de bolas ou outra qualquer. Isso quer dizer que eles entram dentro de si próprios no lugar onde são atingidos e voltam rapidamente à sua forma inicial. Descobri pois que atingindo com uma bola de vidro ou de ágata um pedaço grande e bem espesso do mesmo material, que tinha a superfície plana e um pouco embaçada pelo alento ou de outra forma, ai ficavam marcas redondas, maiores ou menores, conforme o golpe fosse forte ou fraco. Isso mostra que essas matérias cedem em seu encontro, e se restituem, sendo para isso necessário que elas gastem tempo.

Ora, para aplicar esse tipo de movimento áquilo que produz a luz, nada impede que imaginemos que as [13] partículas do éter sejam de uma matéria tão próxima da dureza

perfeita e de uma recuperação tão rápida quanto quisermos. Não é necessário para isso examinar aqui a causa dessa dureza, nem a da recuperação, cuja consideração nos levaria muito longe de nosso assunto. Dizei no entanto que se pode conceber que essas partículas de éter, apesar de seu pequeno tamanho, são ainda compostas de outras partes, e sua elasticidade consiste no movimento muito rápido de uma matéria sutil, que as atravessa de todos os lados, e obriga sua estrutura a se dispor de modo que force a esse fluido a passagem mais aberta e fácil possível. Isso está de acordo com a razão que o Sr. Des Cartes fornece para a elasticidade, exceto que não suponho poros em forma de canais ocos e redondos, como ele. E não se deve imaginar que haja aí nada de impossível ou de absurdo; pelo contrário, é muito plausível que a natureza, para operar tantos efeitos maravilhosos, sirva-se dessa progressão infinita de diferentes tamanhos de corpúsculos e de diferentes graus de velocidade.

Mesmo se ignorássemos a verdadeira causa da elasticidade, veríamos que há muitos corpos que possuem essa propriedade; e, assim, nada há de estranho em supô-la também em pequenos corpos invisíveis como os do éter. Se tentássemos encontrar alguma outra maneira pela qual o movimento da luz se comunicasse sucessivamente, não seria encontrada nenhuma que melhor conviesse do que a elasticidade à propagação uniforme, que parece ser necessária; pois, se o movimento se tornasse mais lento à medida que se distribuisse entre mais matéria, afastando-se da fonte de luz, ele não poderia conservar essa grande velocidade a grandes distâncias. Mas, supondo a elasticidade na matéria etérea, suas partículas terão a propriedade de restituir-se igualmente depressa, seja quando forem empurradas fortemente ou fracamente. Assim, o progresso da luz [14] continuará sempre com uma velocidade igual.

Deve-se também saber que, embora as partículas do éter não estejam alinhadas em retas, como em nossa fila de bolas, mas confusamente, de modo que uma toque várias outras, isso não impede que elas transportem seu movimento e que elas o pro-



paguem sempre para a frente. Sobre isso deve-se notar uma lei do movimento que vale para essa propagação, e que é verificada pela experiência. Quando uma bola como A,

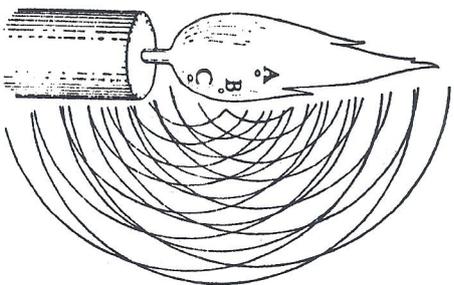
aqui, toca várias outras bolas CCC, se ela é atingida por uma outra bola B, de modo que ela pressione todas as CCC que toca, ela lhes transmite todo seu movimento e após isso permanece imóvel, como também a bola B. Mesmo sem supor que as partículas éterias sejam de forma esférica (pois não vejo necessidade de supô-las assim) compreende-se que essa propriedade da impulsão não deixa de contribuir à propagação do movimento.

A igualdade de tamanho parece ser mais necessária, pois do contrário deveria haver alguma reflexão de movimento para trás quando passasse de uma partícula menor a uma maior, segundo as regras da percussão que publiquei alguns anos atrás.

Ver-se-á mais adiante, no entanto, que não precisamos supor essa igualdade para a propagação da luz, mas apenas para torná-la mais fácil e mais forte. Não é também contrário às aparências que as partículas do éter tenham sido criadas iguais para produzir um efeito tão considerável quanto o da luz, pelo menos nessa vasta extensão que está além da região dos vapores, que não parece servir senão para transmitir [15] a luz do Sol e dos astros.

Mostrei, portanto, de que modo se pode conceber que a luz se propague progressivamente por ondas esféricas, e como é possível que essa propagação se faça com uma velocidade tão grande quanto a que as experiências e as observações celestes exigem. Deve-se ainda notar que, mesmo se as partículas do éter forem supostas como estando em um movimento contínuo (pois há muitas razões para isso), a propagação sucessiva das ondas não será impedida por isso, pois não consiste no transporte dessas partes, mas apenas em um pequeno deslocamento, que elas não podem impedir-se de comunicar às que as cercam, apesar de todo movimento que as agite e faça mudarem de lugar entre si.

Mas deve-se considerar ainda mais particularmente a origem dessas ondas e a maneira como elas se propagam. Primeiramente, segue-se daquilo que foi dito sobre a



produção da luz, que cada pequeno lugar de um corpo luminoso, como o Sol, uma vela ou um carvão ardente, gera ondas cujo centro é esse lugar. Assim, na chama de uma vela, sendo distinguidos os pontos A, B e C, os círculos concêntricos descritos em torno de cada um desses pontos representam as ondas que deles provêm. E deve-se conceber o mesmo em torno de cada ponto da superfície e de uma parte interna dessa chama.

Como as percussões no centro dessas ondas não possuem uma sequência regular, também não se deve imaginar que as ondas sigam umas às outras por distâncias iguais: se essas distâncias o parecem nessa figura, é mais para [16] indicar o progresso de uma mesma onda em tempos iguais, do que para representar várias [ondas] provenientes de um mesmo centro<sup>11</sup>.

Não deve parecer inconcebível, por outro lado, que essa prodigiosa quantidade de ondas se atravessasse sem confusão e sem se apagarem umas às outras. É certo que uma mesma partícula de matéria pode servir a diversas ondas, provenientes de diferentes lados, ou mesmo de lados contrários — não apenas se ela for empurrada por golpes que se sigam proximamente uns aos outros, mas também por aqueles que atuem sobre ela no mesmo instante. Isso ocorre por causa do movimento que se propaga sucessivamente. Tal pode ser provado pela fila de bolas iguais, de matéria dura, de que se falou acima. Se lançarmos contra ela, ao mesmo tempo, dos dois lados opostos, bolas semelhantes A e D, ver-se-á que cada uma retorna com a mesma velocidade que tinha inicialmente, e toda a fila permanece em seu lugar, embora o movimento tenha passado por todo seu comprimento, de forma dupla. Se esses movimentos contrários se



encontram na bola B do meio, ou em alguma outra como C, ela deve se contrair e se recuperar dos dois lados e assim servir ao mesmo tempo para transmitir esses dois movimentos.

Mas o que pode inicialmente parecer muito estranho e até inacreditável é que ondulações produzidas por movimentos e corpúsculos tão pequenos possam se propagar a distâncias tão imensas, como por exemplo desde o Sol ou desde as estrelas até nós. Pois

<sup>11</sup>É muito importante notar que Huygens não imagina de modo nenhum que a luz seja constituída por ondas periódicas. Como Hooke antes dele, a imagem formada é a de *pulsos* (tomo usado por Hooke) independentes. A primeira proposta de uma teoria ondulatória das cores semelhante à moderna é de Newton, que, ao discutir possíveis interpretações das cores do espectro, analisa a possibilidade de um modelo ondulatório periódico, afirmando: "Se de alguma maneira essas [vibrações do éter] de diferentes grandezas forem separadas uma da outra, a maior [maior comprimento de onda, em nossa linguagem] gerará uma sensação de uma cor vermelha, e a menor ou mais curta de um violeta profundo, e as intermediárias de cores intermediárias; do mesmo modo que os corpos, de acordo com seus diferentes tamanhos, formas e movimentos, excitam no ar vibrações de diferentes grandezas, que, de acordo com essas grandezas, produzem vários tons no som". NEWTON, I. Mr. Isaac Newton answer to some considerations upon his doctrine of light and colors. *Philosophical Transactions* 7: 5084-103, 1672, p. 5088.

a força dessas ondas deve enfraquecer à medida que elas se afastam de sua origem, de modo que a ação de cada uma em particular se tornará sem dúvida incapaz de se fazer sentir por nossa visão. Mas esse espanto cessará considerando-se que a uma grande distância [17] do corpo luminoso uma infinidade de ondas, embora provenientes de diferentes pontos desse corpo, unificam-se de modo que sensivelmente compõem uma só onda, que consequentemente deve ter força suficiente para se fazer sentir. Assim esse número infinito de ondas que nascem no mesmo instante em todos os pontos de uma estrela fixa, talvez grande como o Sol, não formam sensivelmente mais do que uma só onda, que pode ter força suficiente para produzir uma impressão em nossos olhos. Além disso, de cada ponto luminoso podem provir muitos milhares de ondas ao menor tempo imaginável, pela frequente percussão dos corpúsculos, que atingem o éter nesses pontos, e isso também contribui para tornar sua ação mais sensível.

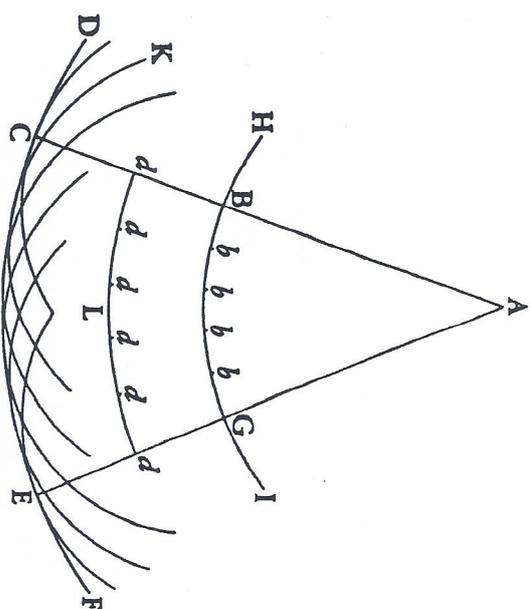
Deve-se ainda considerar na emanção dessas ondas que cada partícula de matéria atingida por uma onda não deve comunicar seu movimento apenas à partícula próxima que está na linha reta traçada do ponto luminoso; mas que ela também o comunica necessariamente a todas as outras que a tocam, e que se opõem a seu movimento. De modo que deve ocorrer que em torno de cada partícula se produz uma onda da qual essa partícula seja o centro. Assim, se *DCF* é uma onda emanada do ponto luminoso *A*, que é seu centro; a partícula *B*, uma das que estão compreendidas na esfera *DCF*, produzirá sua onda particular *KCL*, que tocará a onda *DCF* em *C*, no mesmo momento em que a onda principal, emanada do ponto *A*, tenha chegado [18] a *DCF*. É claro que a onda *KCL* tocará a onda *DCF* apenas no lugar *C*, que está na reta traçada por *A* e *B*. Da mesma forma as outras partículas compreendidas na esfera *DCF*, como *bb*, *dd*, etc., terão cada uma produzido sua onda. Mas cada uma dessas ondas não pode ser senão infinitamente fraca comparada à onda *DCF*, para cuja composição todas as outras contribuem pelas partes de suas superfícies que estão mais afastadas do centro *A*<sup>12</sup>.

Vê-se além disso que a onda *DCF* é determinada pela extremidade do movimento que saiu do ponto *A* em certo espaço de tempo, não havendo movimento além dessa onda, embora o haja no espaço por ela contido, ou seja, nas partes das ondas particulares que não toquem a esfera *DCF*. Não deve parecer que tudo isso é pesquisado com cuidado excessivo, nem com sutileza; pois ver-se-á posteriormente que todas as propriedades da luz e tudo o que refere à reflexão e à refração é explicado principalmente por esse meio. Isso é o que não era conhecido por aqueles que anteriormente começaram a considerar as ondas de luz, entre os quais estão o Sr. Hook em sua *Micrographia*, e o Pe. Pardies — que, em um tratado do qual me mostrou uma parte (e que não

<sup>12</sup> A teoria de Huygens apresentaria uma grande dificuldade para explicar, quantitativamente, as relações de intensidade de luz, tais como a lei do inverso do quadrado da distância ao centro, já proposta por Kepler em sua *Ad Vitellionem Paradiopomena* (1669). De fato, na visão de Huygens, a maior parte das ondas emitidas por cada ponto é "perdida", não contribuindo para a formação da onda principal, que não transporta portanto todo o movimento primariamente existente na onda. Para explicar-se corretamente as relações de intensidade por meio de uma teoria ondulatória é necessário introduzir a noção de interferência e associar a intensidade ao quadrado da amplitude.

conseguiu acabar, havendo morrido pouco depois), tentou provar por essas ondas os efeitos da reflexão e da refração. Mas faltava às suas demonstrações o principal fundamento, que consiste na observação que acabei de fazer; e, no restante, continha opiniões bem diferentes das minhas, como talvez se verá algum dia se seu escrito se conservou<sup>13</sup>.

Para chegar às propriedades da luz, notemos primeiramente que cada parte da onda deve se propagar de modo que as extremidades estejam sempre compreendidas entre as mesmas retas traçadas do ponto luminoso. Assim, a parte da onda [19] *BG*, que tem o ponto luminoso *A* por centro, se propagará no arco *CE*, terminado pelas retas *ABC*, *AGE*. Embora as ondas particulares produzidas pelas partículas compreendidas



pele espaço *CAE* se espalhem também fora desse espaço, elas só concorrem no mesmo instante para compor juntas uma onda que limite o movimento na circunferência *CE*, que é sua tangente comum.

Daqui se vê a razão pela qual a luz não se espalha senão por linhas retas — a menos que seus raios sejam refletidos ou rompidos — de modo que ela não ilumina um objeto a não ser quando o caminho desde sua fonte até esse objeto está aberto segundo tais linhas. Caso, por exemplo, houver uma abertura *BG*, limitada por corpos *BH*, *GI*, a

<sup>13</sup> Para tentar explicar a refração, Hooke imaginava que a velocidade das ondas era maior nos meios refringentes, e que a frente de onda não mudava de direção ao passar de um meio para o outro. Por uma construção geométrica, mostrava que o raio luminoso devia se aproximar da perpendicular, ao passar para o meio refringente. Embora o argumento seja errado, não há dúvidas sobre sua influência no pensamento de Huygens. Ver ANDRADE, E.N. da C. Robert Hooke. *Proceedings of the royal Society* 201: 439-73, 1950. Ver também SHAPIRO (nota 8) e CROMBIE (nota 4).

onda de luz que sai do ponto  $A$  terminará sempre pelas retas  $AC$ ,  $AE$ , como acabamos de demonstrar. As partes das ondas particulares que se propagam fora do espaço  $ACE$  são fracas demais para aí produzir luz.

Ora, por menor que façamos a abertura  $BG$ , sempre haverá a mesma razão para fazer passar a luz entre linhas retas; pois essa abertura é sempre suficientemente grande para conter um grande número de partículas da matéria etérea, que são de um tamanho inconcebivelmente pequeno. Assim, parece que cada pequena parte da onda avançará necessariamente seguindo a linha reta que vem do ponto brilhante. E [20] é assim que se podem tomar os raios de luz como se fossem linhas retas.<sup>14</sup>

Parece ainda, pelo que foi notado em relação à fraqueza das ondas particulares, que não é necessário que todas as partículas do éter sejam iguais entre si, embora a igualdade seja mais própria à propagação do movimento. É verdade que a desigualdade fará com que uma partícula, empurrando uma outra maior, se esforce para recuar com uma parte de seu movimento, mas daí apenas serão geradas algumas ondas particulares para trás, para o ponto luminoso, incapazes de produzir luz — e não uma onda composta de muitas, como era  $CE$ .

Outra propriedade da luz — uma das mais maravilhosas — é que, quando [as ondas luminosas] vêm de diversos lados, ou mesmo de sentidos opostos, produzem seu efeito uma através da outra sem qualquer impedimento. Daí decorre também que por uma mesma abertura vários espectadores podem ver ao mesmo tempo objetos diferentes, e duas pessoas vêem no mesmo instante os olhos um do outro. Segundo o que foi explicado sobre a ação da luz, como suas ondas não se destroem, nem se interrompem umas às outras quando se cruzam, esses efeitos que acabei de citar são fáceis de conceber. Eles não o são de forma alguma, penso, segundo a opinião de Des Cartes, que faz a luz consistir em uma pressão contínua, que apenas produz uma tendência ao movimento.<sup>15</sup> Pois essa pressão não podendo agir ao mesmo tempo de dois lados opostos contra corpos que não possam alguma tendência a se aproximarem, é impossível compreender o que acabei de dizer sobre duas pessoas que vêem mutuamente seus olhos, ou como duas tochas possam iluminar uma a outra.<sup>16</sup> [21]

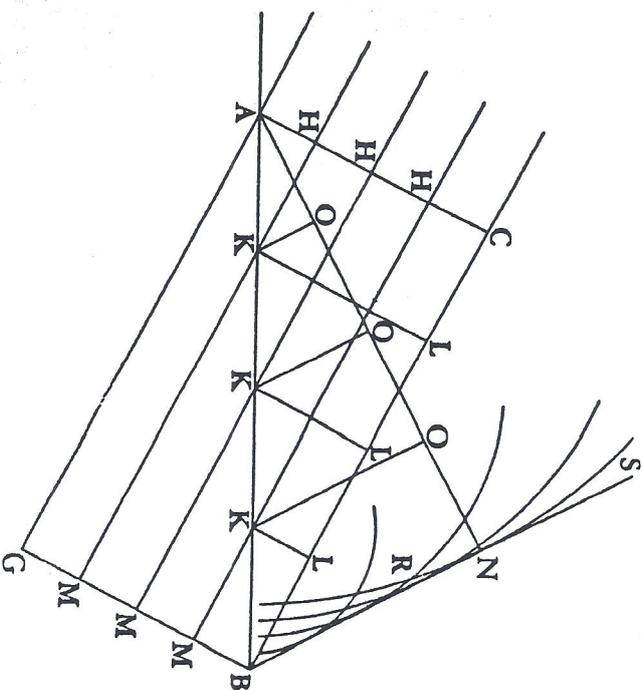
<sup>14</sup> A difração da luz era conhecida desde 1665, graças ao trabalho de Grimaldi: *Physico-mathesis de lumine, coloribus, et iride* (Bologna, 1665), onde recebe o nome moderno de "diffraction". Ao invés de citar esse fenômeno, e interpretá-lo ondulatoriamente, como parecia natural a qualquer físico moderno, Huygens procura provar que, apesar de sua natureza ondulatória, a luz caminha apenas em linha reta, ao encontrar um anteparo. Ainda mais curioso, para um teorido moderno, é notar que Newton, embora havendo realizado grande número de experiências sobre difração, utiliza como uma das evidências contrárias à teoria ondulatória da luz a inexistência de curvatura de luz ao passar por um obstáculo: NEWTON, Isaac. *Optics*. Chicago, Encyclopaedia Britannica, 1958 (*Great Books of the Western World*, vol. 34), livro III, Q. 28.

<sup>15</sup> Descartes compara a luz à pressão transmitida através do bastão de um cego, que lhe permite reconhecer os objetos: DESCARTES, *La Dioptrique*. Leyden, Jan Maire, 1637, p. 3. Reproduzido em DESCARTES, R. *Oeuvres de Descartes*, ed. C. Adams e P. Tannery, Paris, J. Vrin, 1965, V. 6, p. 84. Ver também DESCARTES, *Principia Philosophiae* (nota 3), III, § 55 e IV, § 28.

<sup>16</sup> O argumento de Huygens contra Descartes é muito fraco. Poder-se-ia imaginar que a pressão correspondente à luz é muito pequena (em conformidade com a experiência) e que pode ser produzida sem a manifestação de movimentos sensíveis. Por outro lado, a objeção de Newton (*Optics*, Q. 28 — ver nota 14) é muito mais forte: em um fluido (como o éter) as pressões se espalham por todos os lados e não podem atuar apenas em linha reta.

## Capítulo II Sobre a reflexão

Tendo explicado os efeitos das ondas de luz que se propagam em uma matéria homogênea, examinaremos em seguida o que lhes acontece ao encontrarem outros corpos. Mostraremos primeiramente como se explica a reflexão da luz por essas mesmas ondas, e por que ela conserva a igualdade dos ângulos. Seja uma superfície plana e polida, de algum metal, vidro ou outro corpo,  $AB$ , que inicialmente considerarei como



perfeitamente unida (reservar-me-ei a falar das desigualdades de que ela não pode estar isenta ao fim desta demonstração). Uma linha  $AC$ , inclinada em relação a  $AB$ , representa uma parte de uma onda de luz, cujo centro esteja tão longe que essa parte  $AC$  possa ser considerada como uma linha reta; pois considero tudo aqui como em um único plano, imaginando que o plano em que está essa figura corta a esfera da onda por seu centro, e o plano  $AB$  em ângulo reto — e é suficiente adverti-lo de uma vez por todas. [22]

O ponto  $C$  da onda  $AC$ , em um certo espaço de tempo, terá avançado até o plano  $AB$  no ponto  $B$ , segundo a reta  $CB$ , que se deve imaginar proveniente do centro