

TERCEIRA PARTE

AS ONDAS LUMINOSAS

A família das ondas elétricas

A estação emissora estava em alvoroço. Um novo inventor obtivera permissão para experimentar um novo tipo de válvulas emissoras que, no dizer d'êlé, deviam permitir qualquer alteração do comprimento das ondas. E lá estava o homem, diante do quadro de manobra; a lâmpada vermelha de verificação reluziu e voltou a apagar-se. O engenheiro, com um gesto rápido, resolutamente puxou a alavanca do interruptor.

A emissora começou a irradiar. Lentamente de maneira quase imperceptível, o inventor imprimiu ao condensador um movimento de rotação. O comprimento de onda decresceu. Era, a princípio quinhentos e setenta e cinco metros; passou a cem e a trinta. Bem o notaram, na América, os amadores de ondas curtas. Inaugurara-se — calcularam êles — uma nova transmissora que não conheciam.

Mas o inventor não se deu por satisfeito. Trezentos mil quiloherthes acusava o freqüencímetro para o qual êle se curvava, com a expressão de quem concentra tôdas as faculdades no ouvido.

Onda de um metro de comprimento. Outrem já a conseguira. Aí, porém, intervinha o novo dispositivo. O operador continuou a girar, sem interrupção, a manivela, o botão negro e lustroso de ebonite: dez centímetros, um centímetro, um milímetro. E o comprimento de onda ia diminuindo.

O maquinista, já grisalho, coçou a cabeça. Sentia-se estranho, inútil no ambiente familiar. Desconfiado, inquieto, saiu para o pátio e deitou um olhar perscrutador à antena. Seria a contrariedade a causa do calor que êle sentia? O bom homem limpou a testa suada. De fato, fazia calor; mas em março, na Europa, essa temperatura não podia ser normal. Não havia dúvida: era a antena que irradiava um calor intolerável.

— Olá! — bradou para cima o velho técnico. — Tome cuidado! Está forçando o emissor.

Através da vidraça, porém, o engenheiro limitou-se a menear a cabeça. A onda media então um décimo de milímetro.



Esses raios denominam-se “radiação térmica”. Os nervos da nossa epiderme reagem ás ondas eletromagnéticas desse comprimento. Os raios térmicos são ondas elétricas de cem a um μ ($m\mu$, a letra grega com que se convencionou designar um milésimo de milímetro). Uma estufa é um emissor elétrico! E o operador continuava a girar o botão, um pouquinho somente. A antena se ia tornando incandescente. Mal se notava, mas com certeza devia estar ardendo. Entre sete e oito décimos-milésimos de milímetros a radiação térmica se foi a pouco e pouco tornando visível. 0,6 μ : a antena despedia um clarão avermelhado; um fanal poderoso flamejou sobre a cidade, enchendo as casas de reflexos sangrentos. A torre de emissão fulgurava. A luz escarlate desmaiou, passou ao alaranjado, ao amarelo, ao verde, ao azul, ao violeta e afinal se desvaneceu. Nesse momento, o operador acabava de registrar um comprimento de onda de 0,72 μ a 1,397 μ . As ondas elétricas dessa amplitude são visíveis. Damos-lhe o nome de “luz”.

Continuando a irradiação, teríamos os raios ultravioletas da lâmpada de mercúrio e por fim os raios Röntgen. E, se o operador se lembrasse deveras de os lançar no espaço, êles trespassariam os moradores da vizinhança. Caso então o rapanhase, num instantâneo, o fotógrafo dalguma revista, vê-los-íamos percorrer as ruas, como esqueletos desgarrados.

Pouco resta a dizer sobre a radiação. Mencionaremos apenas os raios “gama” que despedem os elementos radioativos, e a radiação cósmica, fecho da série, com um comprimento de onda inferior a um bilionésimo de milímetro.

O físico põe aqui ponto final. Fêz desfilar tôda a família das ondas eletromagnéticas. Tôdas são da mesma natureza; diferem apenas no comprimento. — E os nossos olhos nada mais são do que um receptor — diz de si para si o engenheiro — um receptor de rádio, limitado ao domínio ridiculamente restrito das ondas de 0,7 a 0,4 μ de comprimento. Qualquer tipo popular de aparelho de rádio tem, atualmente, um alcance muito mais amplo. Entretanto, contentamo-nos com a estreiteza do nosso campo visual.

— Ainda assim — prossegue o engenheiro, no seu solilóquio — é pena que os olhos humanos estejam adstritos a êsse domínio resumido. Caso contrário, quanto mais depressa haveria progredido a pesquisa científica, quanto mais cedo teria ela reconhecido a analogia da luz com o eletromagnetismo, quantos rodeios ter-nos-ia poupado.

Mas, de improviso, o cientista lembra-se do velho conhecido que ainda nessa manhã, tentou dar-lhe uma facada de cinco marcos. O nosso engenheiro alegou não os ter. Se, porém, o amigo tivesse raios Röntgen nas pupilas, não lhe passaria despercebido o almejado disco de prata no bôlso esquerdo das calças do seu interlocutor.

— Nada! É bom que os olhos humanos não distingam além do 0,4 μ ! — conclue o engenheiro.

Infelizmente ainda não existem inventores do tipo do que ocupa o princípio dêste capítulo. As rádio emissoras dotadas de aparelhamento mais aperfeiçoado não logram levar o comprimento de onda abaixo de alguns centímetros. Mas a sra. L. Arkadiewna já conseguiu positivamente, com centelhas de partículas metálicas, gerar no petróleo ondas elétricas que se poderiam chamar ondas térmicas, de 0,2 milímetros de comprimento, preenchendo assim um vácuo aberto há muito. Talvez... talvez que um dia, seja uma realidade o jovem sábio que cedeu o lugar ao velho maquinista, despedindo-se com um cumprimento cortês.

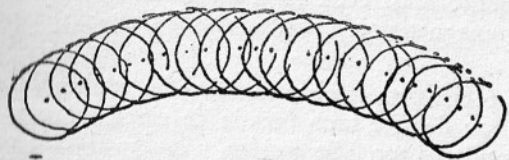
Sabemos hoje que a luz é uma oscilação eletromagnética, uma oscilação do éter, um movimento ondulatório cujo comprimento de onda varia entre 0,7 e 0,4 μ . A teoria da eletricidade familiarizou-se com o éter que é a sede do campo eletromagnético.

Mas em 1650, quando Huygens desenvolveu pela primeira vez a teoria ondulatória da luz, nada se sabia acêrca do campo elétrico. Já então não se ignorava, é certo, que o Sol brilha no firmamento e a luz nos vem através do espaço. Não se podia prescindir da hipótese da existência dum meio em que as ondas se pudessem propagar, isto é, um éter luminoso que devia encher o próprio vácuo.

Indubitavelmente há nisso uma dificuldade de índole teórica uma dificuldade evitada pela teoria da luz devida a Newton. No dizer dêste, um corpo luminoso irradia corpúsculos luminosos; a luz seria pois, de natureza atômica, um raio luminoso constaria duma corrente de átomos luminosos, como a corrente elétrica se compõe de électrons — concepção que, embora atraente, não se podia manter por muito tempo. Preferimos a hipótese de Huygens.

A pedra que, caindo no tanque, vai quebrar a serenidade do espelho liso das águas, agita a princípio um único ponto. Huygens parte daí, para explanar com êxito o seu conceito. Perturba-se, pois,

um ponto da superfície líquida, e, como êle não existe isolado, em "splendid isolation", no espaço, mas confina com as partículas líquidas circunstantes, a perturbação propaga-se. (Des. 76)



socego, divulga no círculo dos conhecidos, para desabafar e recobrar assim o equilíbrio moral, a zona do tanque agitado pela pedra oscila e se torna ponto de partida duma pequena ondulação circular. Combinando os seus efeitos, as novas e secundárias oscilações circulares geram a ondulação vasta e cada vez mais dilatada que se estende a tôda a superfície do tanque. Eis, como vemos, um fenômeno de efeito próximo.

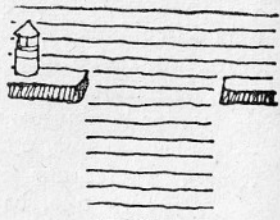
Exatamente assim explica Huygens as ondas luminosas: todo ponto afetado por uma excitação luminosa entra a oscilar, torna-se ponto de partida duma pequena onda esférica, comunica a oscilação aos pontos adjacentes e volta à imobilidade.

Forma-se uma frente ondulatória reta, mergulhando n'água uma régua, isto é perturbando simultaneamente vários pontos. Mas podemos também imaginar a onda retilínea como seção dum grande círculo. Dizemos que a Friedrichstrasse de Berlim é retilínea; ela representa, no entanto, um pequeno trecho dum grande círculo que rodeia o globo terrestre.

As ondas do oceano rolam para a praia em longa frente reta. Com o mesmo ritmo, em sentido análogo, percorrem o imenso azul dos mares e vão quebrar na areia alvacenta. Iguamente em linha reta e com idêntico andamento, a luz atravessa o espaço. Supondo que as vagas se arrojem com êsse ritmo para um molhe em que se lhes depare uma brecha, e por esta passem livremente, veremos "um raio de ondas. Aos lados da abertura, porém, as águas se aquietam; ficam à "sombra do molhe".

Como acabamos de ver, não há propriamente raios luminosos; êstes são uma ficção, uma invenção dos homens, sobretudo dos teóricos. O que há são feixes de ondas mais ou menos delgados. Acentuemo-lo com energia: fisicamente reais são apenas as frentes de ondas: é a elas que aludiremos, quando falarmos de raios luminosos e por isto entendemos feixes de ondas bastante espessos.

Não há quem não tenha observado a propagação retilínea da luz. Se o sol penetrar num ambiente enfumaçado, percebem-se nitida-



mente as faixas luminosas largas e retas em que dansam os corpúsculos de pó e da fumaça. Quando o sol rompe um denso véu de nuvens, os seus raios descem à Terra em feixes perfeitamente distintos. Sabemos, desde a infância, que a luz se propaga em linha reta. Habitua-mos-nos de tal modo a crer que a pessoa que vemos diante de nós deve estar na nossa frente e não por exemplo, à nossa direita, que nós mesmos, europeus cultos — sem falar dos negros da África — teríamos uma triste desilusão, se um feiticeiro mudasse um dia esta ordem de coisas.

Imagens reflexas

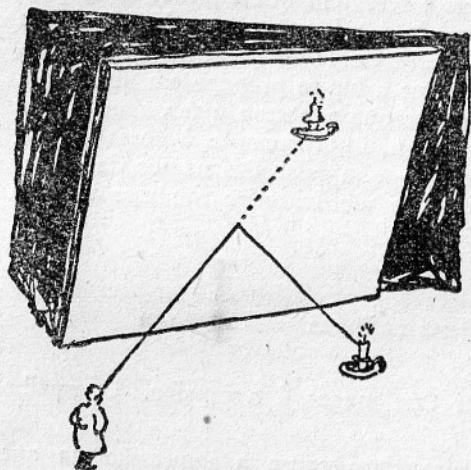
Não custa, aliás, arranjar êsse mago: é o espelho. O espelho desvia os raios luminosos.

Um espelho suficientemente claro causa a impressão de que a imagem refletida seja um corpo concreto e esteja atrás da superfície de vidro estanhado. Tanto assim que a procuramos diante de nós, na direção donde vem os raios luminosos; e o selvagem desconfiado rodeia uma ou duas vêzes o espelho, antes de se convencer de que êle não esconde coisa alguma.

A teoria ondulatória de Huygens explica prontamente as leis da reflexão da luz, isto é, o princípio notório de que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. Aliás, Newton as explicou em termos ainda mais singelos. Reflexão significa, neste caso, ressalto, ricochete das partículas luminosas, ao incidirem na superfície sólida dum espelho. Quem quer que haja manuseado uma bola de borracha, sabe que uma esfera elástica é refletida simetricamente.

A teoria ondulatória esclarece também a razão por que duas pessoas se podem ver simultaneamente num espelho, ou por que neste se formam várias imagens ao mesmo tempo. Anos atrás, irrompeu um dia, com tôda a seriedade, num periódico de Berlim, um debate para definir a posição das imagens reflexas. "Que é o que aparece no espelho?" — era o quesito. — "A minha imagem, a tua, a da sala, ou tôdas contemporaneamente?"

Os autores dessa polêmica eram não só pouco versados em física, mas também um tanto parvos, apegados demais a conceitos elementares. É possível provocar ondas encapeladas numa tina; vê-las-famos então refletidas, rechaçadas das orlas do recipiente. Mas verificaríamos também que muitas ondas se podem cortar e inserir umas nas outras, sem se perturbarem minimamente. Se confundirmos, por exemplo, os feixes verdes e vermelho de dois projetores, mal se tornam a separar, os dois raios luminosos apresen-



tam o colorido primitivo, sem a menor alteração. O primeiro conserva-se tão verde quanto antes, e nada resta nêle do vermelho. A luz não desbota.

O mesmo se observa, em relação às imagens reflexas. Convergem, naturalmente, ao mesmo tempo, para um espelho, inúmeros raios luminosos. Mas assim é na Terra tôda. Se eu olhar daqui para a feira, além daquela rua, cruzam-se contemporaneamente, naquele trecho do

espaço tantas e tão diversas ondas luminosas, que será impossível formar sequer uma idéia do estado do éter naquele sítio. Imagine-se um oceano varrido simultaneamente por ciclones vindos de todos os pontos do horizonte.

Mas, como dissemos, as ondas e a luz não desbotam, e todo raio luminoso isolado ressurge, são e salvo. Poderíamos ter a tentação de perguntar por que nada notamos dessa exuberância, por que, apesar dêsse estado de anarquia do éter, percebemos imagens nítidas. Não custa responder: é que vemos apenas os raios luminosos que incidem nas nossas pupilas. Todos os demais não existem para nós. Eu e vós nunca poderemos enxergar o mesmo feixe de luz.

E por que não reflete pròpriamente a luz uma superfície opaca, um tapête ou uma tábua, por exemplo? Sim, êles a refletem, tornam a enviá-la aos nossos olhos; do contrário, nem os proderíamos ver. Mas refletem a luz em todos os sentidos, produzindo uma reflexão vaga, dispersa, "difusa". Não é uma transgressão da lei que rege êsse fenômeno?

Naturalmente, a reflexão é sempre simétrica; não há exceção a esta regra. Contudo, uma prancha, uma tapeçaria, um tapête não são planos, em sentido óptico. Tal qual na superfície da Terra, na dêles também abundam os vales, as montanhas, os sulcos, acidentes ínfimos para a nossa escala usual, mas colossais em comparação aos poucos décimos milésimos de milímetros duma onda luminosa. Logo, cada parte dum amplo feixe de luz incide num ponto diferente da superfície da mesa que a reflete de maneira relativa, sempre — é claro — rigorosamente de acôrdo com as leis da reflexão.

Nos espelhos, após a reflexão, o feixe de luz conserva a primitiva rigidez. Assemelha-se a uma coluna de soldados ou de mari-

nheiros, atravessando em formação irrepreensível, as ruas principais de uma cidade. Quem não lhes cortar diretamente o percurso nem os percebe. A reflexão difusa abala a disciplina. Admitamos que a superfície da mesa brade a ordem: "Dispersar"! A rígida fileira de indivíduos fardados dissolve-se; os seus componentes espalham-se pela cidade inteira que só então começa a notar-lhes a presença. Aplainando a mesa, tirando-lhe as desigualdades, pulindo-a com uma camada de cera, ela brilhará como um espelho e, a partir daí, refletirá devéras como "plano óptico", isto é, como uma lâmina de vidro.

Deixemos, porém, o pulimento da mesa e regozijemo-nos de que haja na Terra tão poucos objetos refletoras. Sem a reflexão difusa, o mundo seria triste, monótono, incolor. Não veríamos coisa alguma. Efetivamente, não vemos o espelho; o que enxergamos nêle, por seu intermédio, é a fonte de luz", o objeto colocado a distância conveniente, por exemplo: o amigo ou o chapêu novo. Para as experiências ópticas mais requintadas, há espelhos ou prismas de fabrico especial, de vidro selecionado, absolutamente isento de lacunas, esfriado meses e anos, para prevenir a tensão. Êsse vidro é ópticamente vácuo, isto é, incolor e invisível. Num mundo de espelhos, oscilaríamos entre o pleno esplendor e as trevas mais negras, vendo se tanto o Sol, as estrêlas ou os lampiões, as únicas fontes primárias de luz. Quem poderia viver assim? Seria intolerável!

Refração

A reflexão é a primeira aventura com que se pode defrontar o raio luminoso, na sua viagem pelo mundo. Há outra, porém: a refração. Uma vara, um lápis, mergulhados parcialmente n'água, dir-se-iam quebrados. Logo ponderamos nós, a luz não sai livremente da água para o ar; acontece-lhe alguma coisa.

Não admirará aos homens dos nossos dias que haja um incidente na divisória dos dois elementos; a fronteira é sempre uma zona especial, um tanto instável na física exatamente como na vida.

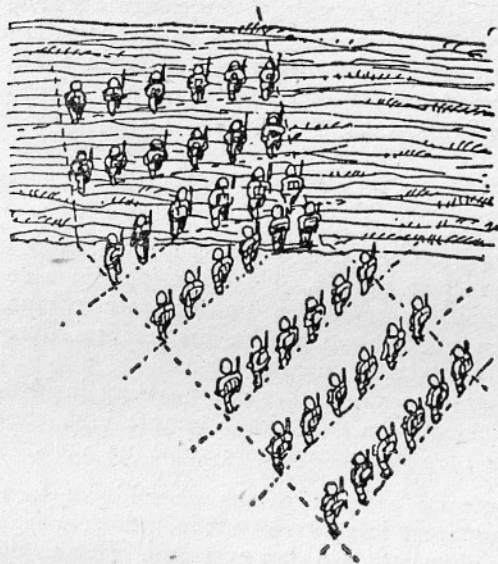


Retomemos a nossa coluna de soldado; façamos-os formarem impecavelmente e passarem obliquamente dum prado a um restolhal. Neste, êles marcharão mais devagar do que no prado; em consequência, o soldado da ala direita, depois os seus vizinhos se atrasarão um pouco, alterarão afinal a linha da marcha. No limite dos dois terrenos, a coluna sofre um desvio. Eis porque o lápis, a vara nos parecem quebrados. Os olhos iludem-nos persistindo em ver em linha reta alguma coisa que não está nessa direção.

Os olhos são órgãos rotineiros. Se nos defrontássemos mais vezes com planos refrangentes, não sucumbiríamos talvez a essa ilusão. O indivíduo habituado a infância, a ver lápis aparentemente quebrados e a se poder persuadir imediatamente do contrário, pelo sentido do tato, acabaria considerando-os perfeitamente retos. Disporia doutro mundo.

Resumindo, diremos: na passagem dum meio menos denso a outro meio mais denso, a luz quebra-se, desvia-se aproximando-se do prumo de incidência. Quanto mais pronunciado fôr o desvio, tanto maior será o "índice de refração" da substância.

Resta explicar a expressão "mais denso". Ela significa — está visto — "ópticamente mais denso", mais espesso para a luz. Substâncias pouco consistentes na acepção usual podem ser — ópticamente falando — muito densas, ter um índice elevado de refração. Dois corpos dotados de idêntico índice de refração não se diferenciam ópticamente. Se deitarmos um diamante numa vasilha com sulfato de carbono, a pedra desaparecerá, ficará invisível. Os dois corpos têm o mesmo índice de refração.



Mas acabamos de afirmar uma coisa que, em boa consciência, não poderíamos sustentar. Deixamos de mencionar a "absorção". Todos os corpos trazem, "absorvem", um pouco de luz — uns, mais; outros menos. Quanto maior fôr o "coeficiente de absorção" tanto mais elevada será a percentagem de luz absorvida. Não o devemos esquecer. Uma pessoa com o mesmo índice de refração e o mesmo coeficiente de absorção que o ar seria invisível

vel; no banho, porém, logo o descobriríamos.

Espremamos, como um limão, o exemplo da coluna de soldados em marcha; tiremos-lhe, até a última gota, as noções físicas — especialmente esta: num restolhal anda-se mais devagar do que num prado. E a luz penetra mais lentamente numa substância de índice de refração maior. O índice de refração nada mais é do que a relação das velocidades da luz nos dois meios limítrofes.

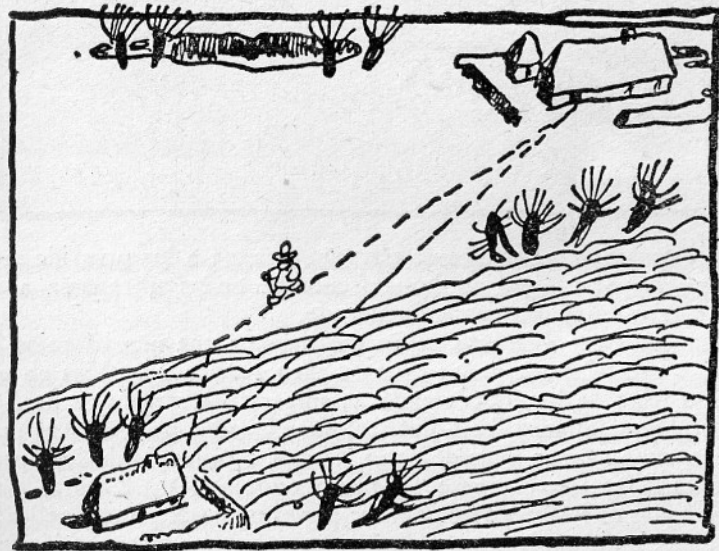
O andamento mais vagaroso deriva de que, no meio mais denso, a luz dá passos mais curtos. O seu comprimento de onda se abrevia; não que ela oscile mais lentamente pois a frequência da luz, o seu número de oscilação, não varia em tôda a sua existência; é uma qualidade mais intrínseca, mais essencial e característica do que o comprimento de onda.

Por motivos históricos, êste sempre ocupou o primeiro plano. Lembremo-nos disto, quando ouvirmos futuramente a locução "comprimento de onda".

Tempo é dinheiro

Há, para a luz, um princípio geral, por assim dizer, um imperativo categórico.

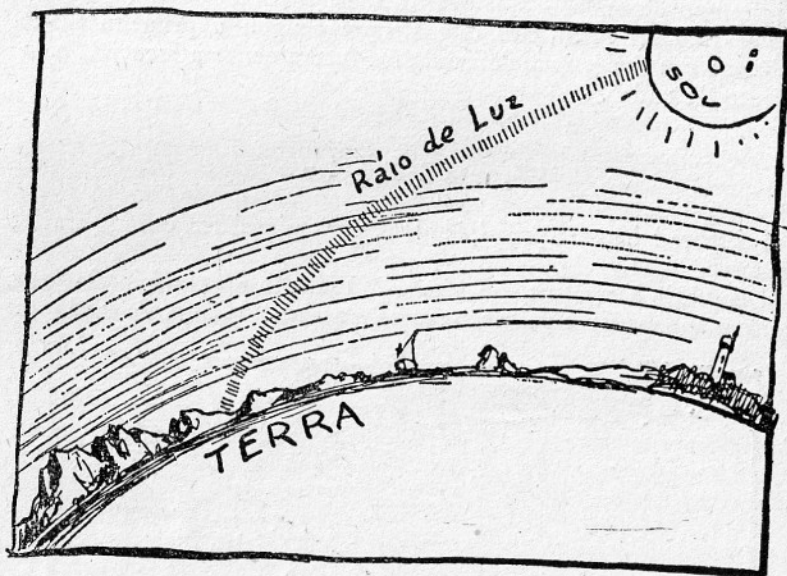
Descobriu-o Fermat, no século XVII. É o princípio do "raio luminoso apressado" e pode ser expresso assim: "Corre, de modo que



empregues, em qualquer empreendimento, o mínimo de tempo que se possa imaginar".

Esse princípio explica satisfatoriamente a refração da luz. Um homem, que tenha de ir correndo, dum prado a um ponto qualquer dum campo lavrado, anda a maior parte do percurso no primeiro e apenas um pequeno trecho no segundo. Em consequência, o caminho que o leva o mais depressa possível ao seu destino é uma linha quebrada.

Não se conhece ao certo a inteligência do raio luminoso comum, o que êle entende do imperativo categórico. Mas também não precisa meditar muito êsse princípio que é coisa absolutamente lógica: um raio luminoso desce do Sol à superfície terrestre, penetrando a atmosfera. Como, porém, as camadas mais baixas da atmosfera



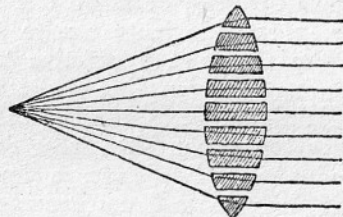
são mais densas, o seu índice de refração cresce e a luz progride mais devagar. A parte superior dum frente de ondas ultrapassa a inferior: o feixe luminoso desce, encurvado.

Nem pode ser diferente. Não esqueçamos que não há raios luminosos e sim feixes de ondas mais ou menos delgados. Mas ao que parece, o feixe de luz, obedecendo ao imperativo categórico de Fermat, demora-se quanto lhe é possível nas camadas atmosféricas mais elevadas, onde avança mais depressa. Logo, o princípio da luz apresada é também um corolário da teoria ondulatória. E basta para explicar todos os fenômenos da óptica; por exemplo: a própria reflexão. Além disto, mais tarde nos ajudará na consecução de conhecimentos devéras surpreendentes.

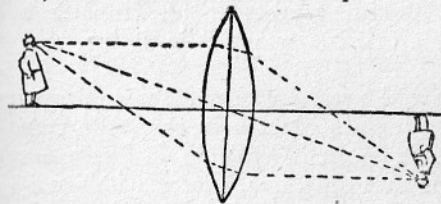
Um pouco de prática, depois de tanta teoria

As lentes operam como nô-lo mostra o desenho que segue. A figura dispensa outras palavras. A lente reúne num ponto — o foco — vários raios luminosos paralelos. Denominamo-la lente convergente biconvexa, porque ela consta de dois planos convexos.

Observando o desenho da esquerda para a direita, vemos a luz, que parte dum ponto luminoso, do foco, torna-se paralela, além da lente. A ilustração seguinte mostra o modo como uma lente forma a imagem dum objeto que não esteja a uma distância incalculável, o processo pelo qual os raios luminosos, partindo dum ponto, se reúnem além da lente. Esta, naturalmente, ignora que o indivíduo postado diante dela constitui um todo inseparável; construi, em consequência, imagens isoladas, coligindo raios luminosos de vários pontos: da cabeça, do peito, dos pés, e junta-os num plano: o "plano da imagem". É só graças à sua forma regular que todos os pontos da imagem surgem no mesmo plano e na ordem conveniente.



Essa lente esboça uma imagem verdadeira, "real", uma imagem que se pode ver na chapa fôska. Quanto mais a pessoa estiver próxima da lente, tanto mais recuará a imagem, aumentando em tamanho, — e tanto mais temos que afastar a chapa fôska da lente.



As lentes convergentes são honestas. Vêm agora as mentirosas: as lentes divergentes. Vimos aqui uma "bicôncava" e a sua maneira de disseminar no espaço os raios luminosos. Os nossos olhos

deixam-se iludir facilmente; juram com ingenuidade pueril que a luz se propaga em linha reta e prolongam no espírito os raios luminosos. Supõem uma imagem "virtual" — "possível" a chamamos nós — uma imagem que não existe e que, portanto, não se poderia ver na chapa fôska, mas que desprenderia feixes de luz exatamente como os obtém a lente.

Se um objeto se aproximar mais do que o admite a distância focal, a lente convergente pode também gerar uma imagem virtual. Formam-se, então, raios divergentes que os olhos interpretam, por sua vez, como raios dum imagem virtual. Assim opera a lupa.

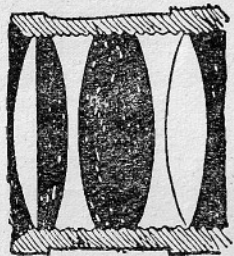
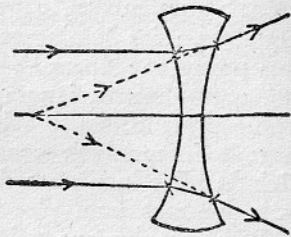
Os numerosos instrumentos ópticos baseiam-se todos neste princípio; a luneta astronômica, por exemplo, dá com o auxílio dum grande lente convergente: a objetiva, uma pequena imagem invertida dum ponto distante e que depois se nos mostra aumentada, através da lupa. O binóculo prismático age do mesmo modo; apenas como é munido de prismas, inverte antes a imagem e mostra-a já direita. Naturalmente, aqui temos só uma síntese muito simplificada da óptica.

Nas más lunetas, uma orla de colorido vivo, azul ou vermelho, rodeia a lente. É a "aberração cromática", e deriva de que a lente

não trata a luz azul como a luz vermelha. Evita-se esta imperfeição, empregando, em vez duma única lente, duas de forma e com sistência diversas, de modo que dessa junção resulte um efeito conjunto; a segunda lente corrige a divergência cromática da primeira. Isto chama-se a objetiva "acromática". Mas, por êsse meio, se elimina só a aberração cromática.

Há ainda outros defeitos; os fotógrafos bem os conhecem. Uma lente comum não reproduz com fidelidade; a imagem que ela dá dum ponto é um pequeno traço; o seu efeito não é "puntiforme", "astigmático". A lente faz por própria conta outra coisa: deforma, como um mau alto-falante desfigura a música. As aberrações são tanto mais graves, quanto maior fôr a lente e quanto mais luz ela precisa para ser inundada até a orla.

Aqui principia a tarefa do teórico; o trabalho de calcular sistemas de lentes, combinações de vidros ópticos cujos defeitos se compensem. Êsses conjuntos de lentes têm de ser "anastigmáticas", isto é produzir imagens puntiformes, devem reproduzir nitidamente a imagem até as orlas, deixar passar a máxima quantidade de luz, tendo a maior "abertura" possível.



Finalmente, é preciso que não sejam demasiado caras; cumpre obter bom resultado com um mínimo de lentes. O cálculo da forma das lentes é uma arte difícil, exercida habitualmente pelos mesmos profissionais, senhores de grande experiência nesse domínio especial. Depois as lentes devem ser lapidadas rigorosamente de acôrdo com o cálculo, trabalho que requer igualmente longa prática, pois ainda hoje os vidros ópticos recebem o último pulimento, em

contato com a ponta do dedo do lapidário.

Na "Sonnar", objetiva moderna e ultraluminosa, o sistema consta de sete lentes e tem uma luminosidade equivalente a 1:1,5 — isto é: cinco centímetros de diâmetro, por 7,5 de distância focal. Eis uma objetiva famosa, uma das primeiras e mais perfeitas "anastigmáticas": a "Tessar" de Zeiss, composta de quatro lentes. (Des. 86)

O olho contém uma lente adequada para desenhar na retina uma imagem real, reduzida e invertida, do mundo circunstante. Como é, então, que o vemos direito? Aí está uma pergunta freqüente... e errada. As ondas luminosas incidem na retina e transmitem a excitação nervosa ao cérebro, ao qual compete formar, de acôrdo com o sinal recebido, uma imagem do mundo exterior, como o telegrafista traduz em linguagem normal os pontos e linhas do aparelho Morse.

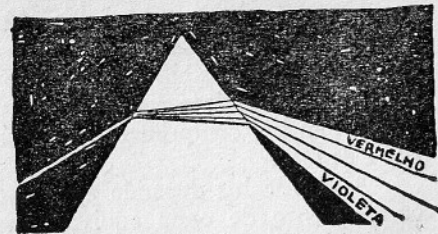
Ignora-se como o cérebro executa essa translação; sabemos, porém, que as crianças só muito lentamente se acostumam a ver. O tato, as sensações térmicas, todos os sentidos, em suma, colaboram nesse primeiro processo de "aprender a se orientar". Todos juntos fornecem afinal a imagem de como se nos afigura o mundo ambiente e da qual porém só nós sabemos alguma coisa. Nunca poderei dizer se a imagem que vós formais é igual à minha. O fato de empregarmos na sua descrição as mesmas palavras nada prova. E por que será invertida a imagem que nasce no cérebro? Não se deve dizer assim. Há um erro nesse modo de formular a questão. É supor que o cérebro tenha, por seu turno, um par de olhos e observe a imagem reduzida da sua retina.

Aliás, uma prova da capacidade do cérebro de se adaptar é a experiência do psicólogo americano, que colou no nariz um par de óculos com um prisma de inversão que lhe mostrava o mundo às avessas, porque destruía a colaboração tradicional dos sentidos. A princípio o cérebro se deixou iludir por essa estranha imagem do ambiente. Todo passo, todo gesto, exigia reflexão, raciocínio. Mas, ao cabo dalguns dias, o cérebro se acostumou e o observador não estranhava já o que o cercava. Tudo lhe parecia direito! Se desde o nascimento houvesse usado um par de óculos desse gênero jamais imaginaria que a sua imagem do mundo não fôsse normal. Quando, porém, retirou os óculos... quem lhe saberá descrever a surpresa? Mais uma vez, o psicólogo levou dias, reaprendendo, caindo, esbarrando, até que o cérebro se lhe acostumou de novo à normalidade.

Côres

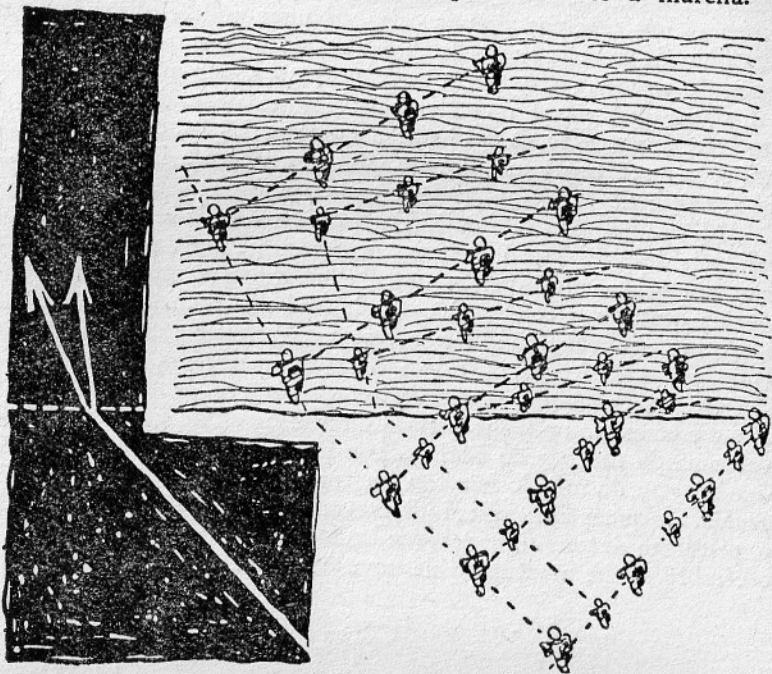
Há, na Inglaterra, o singular ofício de provar o chá. Os que o exercem são pessoas dotadas dum paladar tão apurado, que, numa mistura de chás distinguem sem custo as qualidades que o compõem. Na óptica, o trabalho correspondente àquela profissão chama-se espectroscopia. Os seus técnicos diferenciam os comprimentos de onda, as espécies de luz que se conjugam num raio luminoso. O fundador dessa corporação foi Newton, que analisou a luz solar.

A luz solar é branca. Não vos parece muito simples? Como pode o branco, a cor mais singela, ser composta? Mas Newton atravessou no percurso dos raios solares de vidro de três faces e viu com surpresa a luz branca decompor-se numa fita colorida. A luz branca não é unitária, mas formada dos raios multico-



res, dos tons bem conhecidos do arco-íris, do vermelho até o violeta. A côr que menos se desvia é o vermelho; a que mais se desvia, a violeta. Como se explica isto?

Voltamos à nossa coluna de soldados para a entremear de recrutas, rapazolas novos, franzinos, pouco afeitos à marcha. No



prado, todos andam à mesma velocidade, sendo que os recrutas têm que fazer passos mais rápidos. Passando, porém, ao restolhal começam a sentir o cansaço e se vão atrasando. Mais se acentua, portanto o desvio involuntário. Daí em diante, os novatos marcham valentemente porém... noutra direção. (Des. 88) No limite dos dois terrenos o sentido da marcha dos recrutas sofreu um desvio mais pronunciado do que o dos veteranos. Passos mais curtos — ondas mais curtas, se nos reportarmos à luz. A refração da luz de ondas curtas é, pois, mais acentuada do que a da luz de ondas longas. A refração proporciona a possibilidade de decompor a luz, segundo os seus comprimentos de onda e a conclusão que daí tiramos é simples: luz vermelha tem um comprimento de onda superior ao da luz violeta. Assim é de fato.

A côr da luz depende apenas do comprimento de onda. Côr e comprimento de onda equivalem-se; apenas, a côr é um conceito qualitativo, intuitivo, um acidente. O comprimento de onda, pelo

contrário, é uma grandeza exata, fisicamente mensurável. Sempre que, seja onde fôr no universo, uma oscilação duma amplitude de $0,42\mu$ nos ferir a retina, o nosso cérebro registrará a impressão "violeta". Se esbarrarmos com uma oscilação eletromagnética do comprimento de $0,65\mu$, nós a denominaremos "vermelha", porque assim a vêem os nossos olhos.

Pouco importa a origem dessa oscilação, que ela provenha do Sol poente, duma lâmpada de câmara escura ou duma antena poderosa. No nosso íntimo não se indaga donde vem a onda, mas exclusivamente se ela tem a medida, isto é, o comprimento prescrito. Essa idéia extraordinária nos vem de Huygens. Só ela converteu o desenvolvimento da espectroscopia em ciência exata.

"Quando puderes medir, calcular um fenômeno — disse lord Kelvin — saberás alguma coisa a respeito dêle. Do contrário, o teu saber será casual, insuficiente!"

O conhecimento de que as diferentes côres são apenas interpretações psicológicas de diferentes comprimentos de onda foi decisivo e permitiu o cálculo. A luz branca é uma amálgama extravagante de vários comprimentos de onda e, inversamente, a mescla dos tons do arco-íris dá aos nossos olhos a "luz branca". Tal é o efeito do disco de Newton, em cujo plano, à guisa de fatias de torta, estão pintadas as sete côres; girando rapidamente o disco, a impressão dos setores isolados se desvanece, confunde-se num plano uniformemente branco.

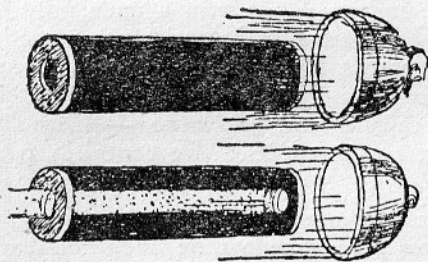
Por que o mundo é colorido, multicolor? Isso também depende do comprimento das ondas luminosas. Uma colcha verde, uma gravura variegada, uma maçã vermelha, tôdas guardam em si o seu qualificativo. As moléculas da maçã absorvem fundamentalmente a luz que nelas incidir e só despedem luz vermelha, só ondas de $0,65\mu$. Haja nelas o que houver, essas moléculas repetem eternamente o mesmo tom: vermelho, vermelho, vermelho. Tôda a riqueza do colorido é brilho emprestado. Se introduzirmos a maçã vermelha na câmara escura, iluminada por um clarão vermelho, ela continuará a ser vermelha naturalmente. Mas ali a colcha verde parecerá preta. É claro: ela está acostumada a irradiar luz verde, a absorver a luz vermelha, a azul, a amarela, numa palavra: todos os outros matizes. E na câmara escura guarda o seu qualificativo; cala-se, desconcertada. Podemos iluminá-la com a côr que quisermos; enquanto a fonte luminosa não contiver o verde, a colcha não nos parecerá verde. Brilho emprestado; nada mais!

A prática apresenta em verdade aspectos ainda mais confusos. Na sua maior parte, os corpos não são rigorosamente monocromáticos, não absorvem tudo o que não lhes quadrar. Juntamente com

o verde, a colcha admite reflexos vermelhos, amarelos e azuis. Nunca se nos deparam cores fisicamente puras; o que vemos, são misturas de coloridos.

Por que é azul o Céu?

A resposta é: desde que o mundo existe, ninguém viu jamais um raio luminoso de lado.



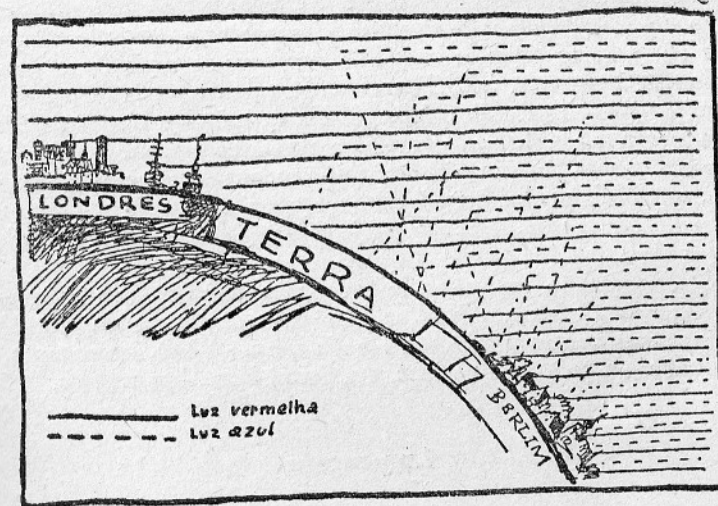
Se projetarmos luz num recipiente de vidro, donde se haja extraído o ar e toda a poeira, visto de lado o recipiente parecerá preto. Diremos então que está ópticamente vazio. Ainda que o inundasse o feixe luminoso do possante projetor dum milhão de velas, nada enxergaríamos, assim como não percebemos de fora se a corrente elétrica está ou não fluindo nos cabos de alta tensão. Soprando no recipiente de vidro a fumaça do cigarro, veremos delinearem-se nitidamente no fundo escuro as esferas de luz, brancas e esplendentes. Topando com os inúmeros pulvísculos e as partículas de fumaça, a luz desvia-se, dispersa-se; e essa luz esparsa fere-nos os olhos; nós a vemos. Eis a razão por que, de dia, há luz na Terra. A luz desviada, reflexa difusamente de toda a parte e que, em suma, deriva do Sol, espalha-se, vagando no espaço inteiro.

Sabemos como se opera a propagação do movimento ondulatório num tanque liso. Se, porém, a superfície do tanque não fosse lisa, parelha e sim pontuada de pedras, de recifes? É óbvio que nesse caso, as ondas, desviadas, dispersas pelos obstáculos, não correriam imperturbavelmente em linha reta. E nós veríamos que essa dispersão depende em alto grau da relação entre o obstáculo e o comprimento de onda.

Uma caixa de fósforo, numa tina, revolve e dispersa as pequenas ondulações do líquido contido nesse recipiente. Imaginemos a mesma caixinha, flutuando na ressaca do golfo de Biscaia; deixar-se-iam perturbar por ela as gigantescas vagas que ali rolam? Quanto mais comprida for a onda luminosa, tanto menos será perturbada e desviada. A atmosfera abrange material perturbador, em quantidade apreciável: pulvísculos, gotas d'água, fumaça, todos os corpúsculos solares que adejam, em rápidos ziguezagues, no sol oblíquo da tarde. E todos afastam a luz do seu caminho direto, desviam-na para os nossos olhos, fazem-na visível. Eis por que vemos um raio luminoso, quando lhe soprarmos no caminho a fumaça do cigarro.

Mas o ar absolutamente isento de pó não refrange a luz? Também o faz. As suas moléculas têm consistência suficiente para a refratar, desde que ela tenha um comprimento de ondas apropriado, isto é, quando for azul ou violeta. A molécula do ar refrange a luz azul; na luz vermelha, o desvio é imperceptível. (Des. 90).

Um céu lunar, um céu sem atmosfera, é negro, absolutamente escuro e incolor. Mas o ar desvia; uma parte da própria luz solar que se destina a Londres, justamente a azul, de ondas curtas, é



enviada aos olhos dos berlinenses. À medida que nos elevamos nas montanhas a atmosfera se torna mais e mais pura e transparente, diminui a quantidade de luz azul refrata. Mas, durante uma tormenta, quando o ar está sobrecarregado de gotas d'água, de vapores e de pó, isto é, de partículas volumosas, desviam-se a luz azul outros tons de ondas mais longas: o verde, o amarelo, o vermelho. O resultado é uma mescla turva e pardacenta.

A pessoa que desperdiça os seus haveres não tarda a empobrecer; dissipando, despreocupada e pródigoamente o seu azul, a luz deixa em breve de ser branca. Quando o caminho através da atmosfera é bastante extenso, quando à tarde o Sol declina, vêm-nos apenas raios amarelos e arroxeados, de constituição mais robusta e de ondas longas. O azul perder-se no caminho. Daí o colorido opulento do fim do dia. As auréolas em torno da Lua e do Sol, os parélios acidentais, os halos das terras árticas têm a mesma causa: a refração da luz solar pelas partículas perturbadoras. E a técnica sabe por que provê de vidros amarelos os fanais de automóvel, para a

cerração: a luz amarela, de onda relativamente longa, não é desviada e repelida pelos corpúsculos do nevoeiro tão facilmente como a luz branca usual, que contém muito azul.

A microscopia moderna utiliza a dispersão da luz com um artifício elegante. Só poderíamos ver objetos de dimensões iguais pelo menos ao comprimento da onda luminosa: poucos décimos milésimos do milímetro. Graças ao progresso da feitura das lentes e da iluminação, a técnica hodierna da microscopia atingiu êsse limite traçado pela natureza; mas bom número de objetos ainda menores pode dispersar consideravelmente a luz. O ultramicroscópio de Siedentopf e de Zsigmondy vale-se dessa circunstância. Já não se projeta como outrora, na objetiva, um raio luminoso, o mais forte possível; ilumina-se, pelo contrário, lateralmente com um clarão muito vivo o campo visual, lançando o feixe de luz em sentido transversal, diante da objetiva. Olhando por ela, a princípio não se vê nada: trevas absolutas — “iluminação do campo escuro” é como se denomina o processo. Mal, porém introduzimos a solução a analisar, brotam de súbito faíscas fortes, semelhantes à cintilação dum céu estrelado: os objetos da experiência.

Distinguem-se assim partículas do tamanho dum décimo do comprimento de onda. Não se lhes pode, em verdade, reconhecer a forma; são pontos luminosos e nada mais. Vê-se, no entanto, que ali há alguma coisa, o que já é, em geral, bem significativo.

Luz escura

“Korff inventou a lanterna noctígena, a lâmpada que, com um simples giro converte em negra noite o dia mais esplendente.”

MORGENSTERN

A nossa pesquisa do destino da luz levou-nos forçosamente muito longe, até as menores ondas luminosas. Se supusermos que, nesse domínio das pequenas dimensões, se nos deparem as maravilhas e surpresas mais variadas, não sofreremos desenganos. A fórmula mais resumida que se encontrou para isso é: Luz + Luz = Escuridão.

“O senhor Fresnel é um feiticeiro” escreveu em 1820 o grande físico francês Poisson, adversário resoluto da “absurda teoria ondulatória da luz”. “Ele alega poder vê-lo em ângulo. Tem tão boa vista que, se o colocarmos à sombra dum anteparo impenetrável, continuará a enxergar a luz”.

Poisson admirava-se de que homens dignos de serem acatados, como o talentoso Fresnel, pudessem adotar uma teoria capaz de levar a consequência tão absurdas. Os homens dão crédito a tudo!

O senhor Poisson tinha certa dose de razão e era físico muito

consciencioso, para que a sua asserção não fôsse fundada. É notório que, em certa medida, as ondulações da água podem rodear um pequeno obstáculo. Por que o não farão as ondulações da luz? Mas aqui reproduzimos a imagem fotográfica da sombra dum pequeno anteparo: no centro há luz! Na verdade, sem o premeditar, Poisson fundara a teoria ondulatória. Pouco após o seu ataque, descobriu-se justamente a “sombra clara” dum pequeno anteparo.

A “sombra clara” e a “luz escura”... não é difícil tê-las à disposição. Se furarmos com uma agulha o quebra-luz da lâmpada, o orifício resultante será uma fonte luminosa puntiforme. Praticando outro orifício numa fôlha de papelão e olhando através dêle para a fonte luminosa circular, vê-la-emos sob um aspecto absolutamente diverso: aumentada, desmaiada na orla, cercada dum franja colorida ou de anéis negros.

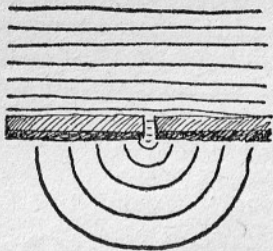
Por outro lado, rasgando uma fenda num cartão ou numa fôlha de papel prateado e olhando por ela o ponto luminoso, veremos em sentido transversal uma faixa de luz cambiante, de listras coloridas, claras ou escuras conforme o caso. Um fenômeno luminoso muitas e muitas vezes mais largo do que o próprio talho. As listras negras ocupam o centro, o lugar onde propriamente deveria haver luz. E é na zona que teria de ser escura, na sombra aos lados da fresta, que se vislumbra claridade. Com um pouco de perseverança, poder-se-iam verificar inúmeros exemplos desses fenômenos de “difração”: onde quer que haja interstícios sutis, cortes pelos quais a luz se possa esgueirar. E sempre serão feitos das ondas! Recordamos a larga frente de ondas, escoando-se pela brecha do molhe. Se houver apenas uma fresta estreita igual ao comprimento de onda, as ondulações propagam-se visivelmente, através da passagem, para todos os lados; a “imagem” da brecha parece tanto mais aumentada e in-



Figuras de difração

distinta quanto menor fôr a abertura. É bem como se por ela atirássemos uma pedra à água, gerando então os conhecidos círculos concêntricos. A fenda estreita converte-se, neste caso, em centro ondulatório secundário. Podemos, a qualquer hora, fazer esta experiência numa tina.



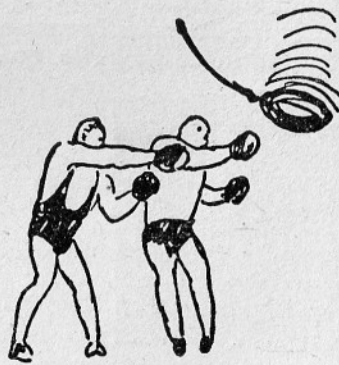


Logo, a luz não é tão inofensiva como sempre a julgamos. Não basta a simples imagem do “raio luminoso”, logo que os aparelhos se aproximem do comprimento de onda, mal a fenda ou o orifício se tornam suficientemente pequenos.

Há quase trezentos anos, o jesuíta Grimaldi observou êsses primeiros fenômenos de difração, verificando que em certas condições pode reinar luz em plena sombra e que, não raro, a luz somada à luz dá a escuridão. Grimaldi não o entendeu absolutamente; não acreditava no movimento ondulatório, assim como todo o mundo naquela época. Dominava êsse tempo, com um prestígio ilimitado e despótico, um único nome poderoso: Newton. Êsse gênio constrangia irresistivelmente os outros pesquisadores a seguir-lhe o raciocínio. Todos pensavam como êle; deviam pensar assim, não podiam formar outros conceitos. Um titã impunha ao mundo a sua ciência. As experiências de Grimaldi equivaliam à prova mais luminosa contra a teoria corpuscular de Newton — para Huygens que sustentava desesperadamente, mas de balde, uma luta desigual com o semideus. E as experiências de Grimaldi foram abandonadas. Passar-se-iam cento e cinqüenta anos antes que o mundo se libertasse dos laços com que o prendera a mente sublime de Newton, mesmo depois de mergulhar no silêncio da morte. Fresnel, na França, Tomaz Young, na Inglaterra, concorreram para o triunfo da teoria ondulatória; e o primeiro, jovem, despreocupado, concebeu a primeira demonstração de interferência.

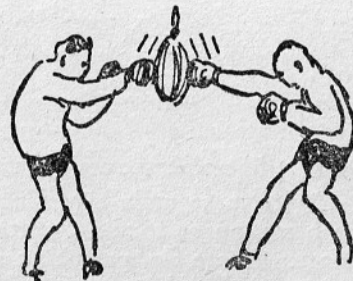
Poderão neutralizar-se os feixes de projéteis de duas armas automáticas — esta imagem corresponde à teoria corpuscular de Newton — disparados na mesma direção? Não; só se fortaleceriam mutuamente. Mas duas séries de ondas, correndo paralelas e uma ao lado da outra podem perturbar-se reciprocamente ou sofrer, como se diz, interferência, caso uma delas “errar o passo”. Admitamos que uma ondulação levante o navio, no mesmo instante em que a segunda procura abaixá-lo. Resultado: a embarcação permanece imóvel.

Um *boxeur* adentra-se com o “punchingball” que se balança regularmente dum a outro lado, sempre empurrado no ritmo exato pelo punho do gigante — como oscila a partícula do éter, impelida constantemente ao mesmo compasso por uma onda eletromagnética.



Se introduzirmos um segundo *boxeur*, tudo dependerá do seu temperamento. Não duvidamos de que, sozinho, êle também treinasse com a bola ao mesmo compasso, dum lado a outro. Se fôr um homem cordato entrará no jôgo no momento oportuno e a bola, impelida pela dupla energia, voará transpondo o duplo espaço dum a outro extremo no andamento primitivo. Duas ondas luminosas da mesma amplitude iluminam duplamente. Nada de extraordinário? Coisa natural? Entretanto, que sucederá se um dos *boxeurs* não houver almoçado bem ou se, por qualquer motivo, não tolera o companheiro? Êle errará o salto, baterá a esfera exatamente com a mesma violência e a mesma rapidez que o outro, mas em sentido oposto.

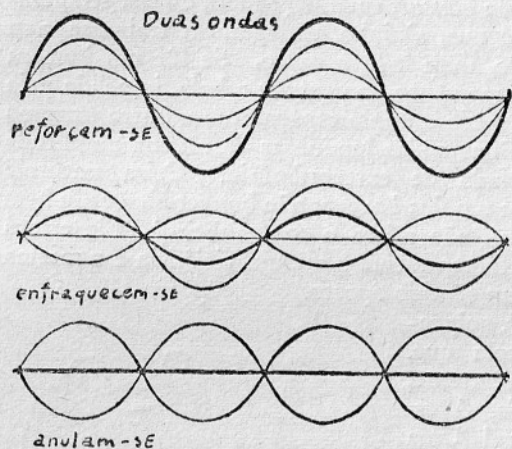
E ambos, de mau humor, golpearão compassadamente abola que, atormentada, trêmula, impotente, ficará retida entre os dois. A esfera de couro se imobilizará! Uma partícula de éter, em que duas ondas luminosas iguais, mas de ritmo contrário, oscilem de modo que a crista duma corresponda ao vale da outra ficará igualmente imóvel. Ali dominará a escuridão. Duas ondas luminosas podem extinguir-se mutuamente. Luz + Luz = Escuridão. Eis o que descobriram Young e Fresnel. Pronunciava-se a sentença, a favor de Huygens, contra Newton. E os dois cientistas averiguaram mais do que isso: a luz é uma ondulação “transversal”.



Há realmente dois casos de movimento ondulatório: transversal, como as ondulações da água — esta oscila, de cima para baixo e as suas ondas correm perpendiculares a êste movimento, sôbre a superfície líquida; ou longitudinal na direção do movimento. Assim é o som. As partículas do éter oscilam da direita para a esquerda, no sentido do som. A condensação e a rarefação do ar sucedem-se. Oscilam longitudinalmente as mãos que em longa cadeia, num incêndio, passam um balde ou que entregam as telhas ao telhador.

De que natureza é a ondulação da luz? Longitudinal, seria lícito crer, já que só nos corpos sólidos elásticos se podem originar ondas transversais. Nos gases, as ondas são exclusivamente longitudinais, visto que há ausência quase completa de atração dos átomos e só repulsão, quando aquêles se aproximam demais.

Acaso o éter não é um gás? Um corpo infinitamente leve e fluido, distribuído em todo o espaço? Assim parece. Entretanto Fresnel pronuncia-se a favor das ondas transversais, embora contra vontade. Já então, previa os obstáculos.



Sabéis, ali, que o nosso *boxeur*, ao “punching-ball” é “polarizado linearmente”? Não estou gracejando; é bem como digo. E êle esmura continuamente a esfera ao mesmo compasso, numa direção constante. A bola oscila, sem cessar, num plano: sempre paralela à parede norte-sul. Eis o que significa um *boxeur* (polarizado linearmente”. Polarizado: o-

rientado; linearmente: em linha reta).

Agora, a segunda experiência de Fresnel. E o segundo lutador, com o mesmo ar sombrio, volta à atividade; mas desta vez não se posta em frente do parceiro e sim ao lado dêle, adotando a direção leste-oeste. Também está polarizado linearmente — é claro! — porém, noutro sentido: perpendicularmente ao primeiro.

Há necessidade de perguntar o que acontece? A bola apanha golpes de dois lados e desvia-se, lesta, em duas direções, à maior distância possível. E’ fácil dizer como se move: torna a depender do momento do ataque. Se os dois a baterem ao mesmo tempo, ela se desviará obliquamente. Lembremo-nos do exemplo teatro-botequim-cinema, do capítulo “O campo”. A bola de couro oscilará em linha reta, mas de través entre os dois lutadores: polarizada linearmente. Se fôr pessoa educada, o segundo lutador aproveitará, para o seu golpe, a pausa do outro. E a bola voará, com regularidade, num movimento de rotação, descrevendo uma bela circunferência: polarizada circularmente. Se as coisas correrem doutro modo, a esfera não andarà à roda, nem direita. Seguirá uma trajetória intermédia, uma curva alongada, uma elipse: polarizada elipticamente.

Nunca, porém — não o esqueçamos — nunca a bola ou a partícula de éter poderão imobilizar-se nestas condições. Dois raios de luz polarizados perpendicularmente um ao outro, não se extinguem — nesse caso, não se dá interferência.

Eis o que a experiência evidenciou a Fresnel. Uma oscilação longitudinal não se comportaria dessa maneira. Daí a conclusão pouco agradável: a luz é vibração transversal; logo, o éter-luz é um corpo sólido; um corpo sólido, infinitamente sutil que penetra todos os corpos do universo. Não admira que Young e Fresnel não gostassem

muito das conseqüências da sua teoria. E, quando ouvimos falar dos mecanismos estranhos, de parafusos e de rodas dentadas, de piões remoinhosos e de substâncias espumosas, de que se valem os físicos para fabricarem uma amostra aproveitável de éter, estremecemos, à idéia dêsse *sabbat* de bruxos e quase desesperamos da sensatez da física.

Graças a Deus, não nos devemos atormentar com os escrúpulos de Young. Sabemos há muito que a luz não é uma ondulação elástica e sim uma oscilação elétrica. Para que, então, êsses cuidados, essa preocupação com o éter? Não nos faltarão outros.

Resta explicar por que, antes de Fresnel, nenhum cientista descobrira interferências aproveitáveis. É muito simples: ninguém pensara em fixar os *boxeurs*. Em verdade, a luz natural sempre é polarizada linearmente; o vector elétrico oscila numa direção, num plano. Mas o verdadeiro *boxeur* não treina sempre em sentido norte-sul; anda em redor da sala, pula de vez em quando, com saltos curtos e elásticos, noutra direção, a esmo, irregularmente. É o que faz o raio luminoso; êle varia o seu sentido de polarização, sem método, milhares, talvez milhões de vêzes num segundo. De fato, se refletirmos em que a freqüência da luz visível está entre quatrocentos e setecentos e cinquenta bilhões de oscilações por segundo — o que corresponde justamente ao comprimento de onda de 0,7 a 0,4 μ — nesses milhões de mudanças de orientação por segundo cabem, em qualquer direção, milhões e bilhões de oscilações luminosas. Em todos êstes cálculos, cumpre não esquecer que:

$$\text{Freqüência} + \text{Comprimento de onda} = \text{Velocidade da luz:} \\ 300.000 \text{ quilômetros por segundo.}$$

É óbvio que, com um *boxeur* tão descomedido, não se podem tentar experiências regulares de interferência — a não ser que o seu adversário saltite como êle à roda da sala, sempre ao mesmo compasso, como se fôsse parte dêle. E, habitualmente, os lutadores procedem assim, são e permanecem polarizados linearmente, sempre na mesma direção, opondo-se constantemente um ao outro.

Percebe-se que dois raios luminosos comuns não permitem demonstrações de interferência, salvo se cuidarmos de fixar os planos de polarização dos dois feixes de luz — pelo menos relativamente, como a posição dos dois lutadores. Tal é o caso dum orifício ou duma fresta. Aos dois lados da fenda, formam-se ondas esféricas de Huygens; entretanto — fato mais significativo — provocadas por um único raio de luz, têm ambas o mesmo plano de polarização. Logo, pode haver interferência; e do efeito conjunto dessas ondas resulta a imagem das linhas claras e escuras que percorre a fresta.

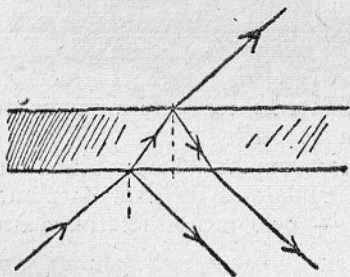
E’ mérito de Fresnel haver percebido tôda a importância da polarização. Nas suas primeiras experiências de interferência artificial,

famosa experiência do espelho, êle applicou o mesmo princípio. De-compôs um raio de luz em duas partes, refletiu-o e fêz interferirem as duas metades — sempre com o mesmo plano de polarização!

Ainda hoje, tôdas as demonstrações de interferências baseiam-se nesse artifício, isto é — digamo-lo mais uma vez — em serem relativamente fixos os planos de polarização: em estarem os dois *boxeurs* constantemente um diante do outro.

A noite, no bonde, assistimos com freqüência à superposição de dois mundos: o exterior, concreto e luminoso, além da vidraça do postigo; e o interno, desmaiado, quimérico: a nossa própria imagem no vidro do carro.

Uma vidraça não é um espelho perfeito; reflete apenas quatro por cento da luz que nela incidir perpendicularmente; os noventa e seis por cento restantes passam através do vidro. Na verdade, quanto mais oblíqua fôr a luz tanto menos penetrará e tanto maior será a percentagem refletida. Todavia, sempre que esbarra numa superfície de vidro, o raio luminoso se decompõe; uma parte reflete-se; a outra penetra e refrange-se, de acôrdo com as leis da refração. Uma fração da luz refrata é refletida pela face posterior do vidro; assim se originam pròpriamente duas imagens que também se observam nos maus espelhos. Num espelho perfeito, a imagem regular, que se forma no plano prateado, é clara, de maneira que absorve a outra. Mas as duas imagens podem interferir, e isso ocorre sobretudo quando o vidro fôr bastante delgado. Depende pois da espessura do vidro — e do comprimento de onda — que as duas imagens se reforcem ou se extingam. Em determinado grau de espessura, o azul se esvai e subsiste o vermelho; noutra grossura, o azul é o feliz sobrevivente, e o vermelho desaparece. O vidro delgado adquire o colorido das fôlhas translúcidas.



Talvez que, até agora, o caso da interferência pareça árido, teórico; é, no entanto bem concreto. A sutil camada oleosa, que se forma no asfalto molhado pela chuva, a película das bolhas de sabão devem a sua côr irisada à interferência. E, quando contemplo a lâmpada através das pálpebras quase cerradas divertindo-me com o halo que a rodeia, assisto a outro fenômeno

de interferência, provocado pela refração da luz nas pestanas.

Afirma-se geralmente que os discos de gramofone são pretos. Sustentamos o contrário e pretendemos prová-lo. Inúmeros sulcos, vizinhos um do outro, riscam a superfície do disco. Se, acima dela, olharmos de viés para a luz, veremos a rodela preta enfeitar-se de todos os tons do arco-íris.

Qualquer pessoa o poderá verificar.

Interrogado sôbre essa exuberância de coloridos, o físico murmura:

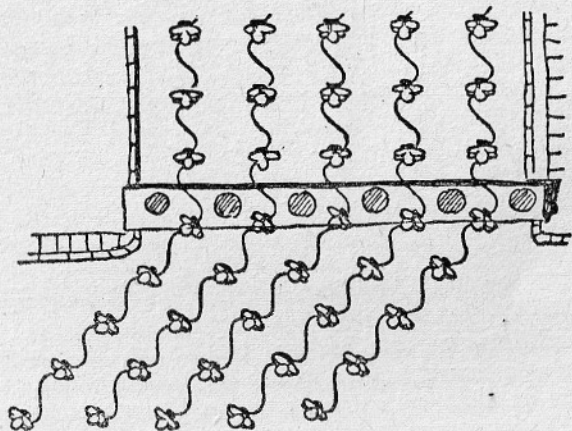
— Interferência. O disco é uma grade...

E despede-se.

Que é, em física, uma grade?

Grades

A porta de Brandenburgo, em Berlim, tem cinco aberturas. Vem diretamente do castelo um cortejo de guardas: em cada fileira, cinco homens de aspecto marcial, e cada ala enfia por uma das aberturas.



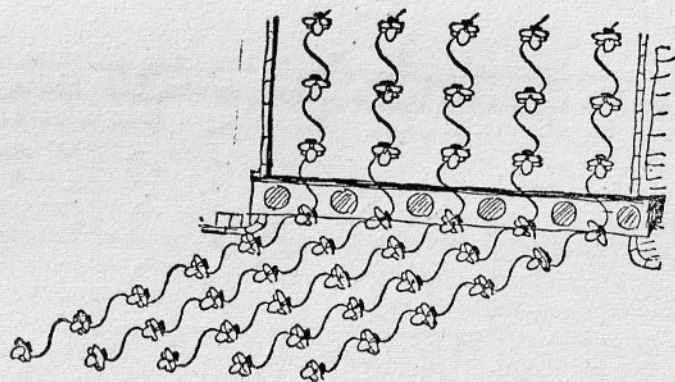
Além da porta, naturalmente a ordem não se altera. As filas continuam a avançar, severamente alinhadas.

Admitamos, porém, que, por qualquer motivo, os soldados julguem conveniente desviar-se um pouco da direção retilínea, e vejamos o efeito dessa resolução.

Na primeira fila: os cinco homens desembocam ao mesmo tempo das passagens correspondentes, executam uma conversão e continuam a marchar, com o mesmo ritmo. E o aspecto do cortejo? Nada majestoso. Já não se pode falar duma frente de marcha alinhada e parelha; e, à medida que os soldados se voltam para a esquerda, o desvio aumenta. Dum modo ou doutro, quebrou-se a regularidade. Pode o acaso fazer que ela seja mantida assim mesmo; não, de certo, na primeira fila, que ali o soldado da ala direita ultrapassou os demais. E' possível, porém, que após a conversão o primeiro homem da quinta fila à direita se encontre ao pé do segundo da quarta um tanto distanciado do seu cabo de fila. À esquerda,

precisamente ao lado dêsses dois, estarão o número três da terceira fila e o número quatro, da segunda e o cabo da esquerda da primeira fila fechará. Não há dúvida: a ordem primitiva alterou-se. Mas uma farda parece-se com a outra, e o transeúnte desprevenido, cruzando-se com o cortejo, admira-lhe, satisfeito, a organização impecável, convicto de que a marcha obedece à ordem mais rigorosa.

Como acabamos de ver, há direções em que se pode observar



êste fenômeno; o cortejo inteiro, continuando a avançar numa formação exata, se bem que diferente.

Mas verificaremos também que tais casos são exceções felizes. De ordinário, a marcha desorganiza-se. Ainda mais: a "ordem" dela depende da distância entre duas filas: Quanto menor a distância entre as filas em marcha, tanto menor tem que ser o ângulo.

A analogia é clara: um feixe luminoso incide numa série de "aberturas". Após a passagem, dilata-se em todos os sentidos — de acordo com a refração.

Entre essas direções, há algumas — só algumas, porém — pelas quais a luz continua a avançar com perfeita regularidade. Na maioria das outras, a ordem altera-se. Diz-se, neste caso, que persiste a ordem, quando através de todo o feixe luminoso, cada raio tem a mesma "fase de onda", isto é: todos a mesma crista e o mesmo vale, todos conjuntamente, zero — se porém um raio estiver na crista quando o seguinte estiver num vale, então os dois se anulam por interferência.

Depois de atravessar uma série de aberturas a luz só continuará a irradiar em poucas direções determinadas; nas direções intermediárias extingue-se por interferência. O sentido daquela irradiação depende da distância entre as filas, isto é do comprimento da onda luminosa. Na luz de ondas curtas, o ângulo é menor.

Em razão da sua grande sensibilidade cromática, a espectroscopia encontrou nas grades os auxiliares mais valiosos. Eles não constam, no entanto, de cinco aberturas como a porta de Brandenburgo e sim de milhares de fendas. Quanto mais numerosas forem as fendas, tanto melhor.

O fabrico dêsses instrumentos é, por si mesmo, um problema. O autor dos mais perfeitos, riscados com diamantes em espelhos metálicos, foi Rowland. Há no mundo apenas três dessas máquinas de dividir: uma em Baltimore, a segunda, em Londres; e a terceira, na Austrália.

Rowland construiu três instrumentos; o essencial é um parafuso perfeito, a "progressão" constante, exata e sem o mínimo movimento perdido. E êle conseguiu abrir vinte mil sulcos numa polegada, isto é, oitocentos riscos em cada milímetro duma faixa de catorze centímetros, riscos que, em razão dos interstícios deixados entre êles, não atingem a largura de 1μ , isto é, uma largura igual a um comprimento de onda. Uma grande grade de decifração, verdadeira tesouro, raridade científica, é tratada com o desvelo que se dispensa a uma criança, deitada num receptáculo especial de cimento armado protegida contra todo abalo e toda variação de temperatura, resguardada cuidadosamente de toda mudança de ar. Só as palavras "compartimento de grade", os espectroscopistas andam na ponta dos pés.

De resto, numerosos pássaros e borboletas não necessitam de Rowland e das suas grades. Nas suas asas observam-se sulcos finos e regulares, grades de pequenas dimensões que, feridas pela luz, apresentam graças à difração, um magnífico jôgo de cores cambiantes — cores de interferência.

Em 1912 o princípio da grade havia de ter uma aplicação prodigiosa, jamais imaginada. Coube ao professor von Lane obter êsse resultado grandioso. Presumia-se então que os raios Röntgen, já conhecidos, representassem uma radiação de ondas; era, contudo, impossível medir-lhes o comprimento. Os aparelhos mais finos de superfície riscada, as experiências científicas falhavam; as grades ópticas, com que se media a luz visível a um décimo-milésimo por cento, eram ineficazes. Os raios Röntgen, atravessavam a grade, desimpedidos e parelhos: nem o menor indício de difração. Rowland riscara vinte mil sulcos numa polegada de espelho metálico, o microscópio já não desvendava a estrutura da grade, já não a podia decompor. Mas, ainda assim, o instrumento era muito grande e grosseiro para os ultrassutis raios Röntgen, como o seriam as amplas aberturas da porta de Brandenburgo para as ondulações duma tina. O caso dir-se-ia desesperado. Parecia absolutamente impossível apurar mais a feitura das rêdes de difração, quando alguém descobriu enfim que essas rêdes já existiam... desde que existe a Terra.

Decompõe-se a luz como por um prisma! E o dispositivo denomina-se "grade de difração".

Max von Lane teve a idéia luminosa de aproveitar um cristal. Na estrutura do cristal de sal-gema os átomos se aglomeram com regularidade surpreendente e exaçação muito superior à dos nossos instrumentos mais perfeitos. Conhece-se a "constante da grade", a distância entre dois átomos; sabe-se que ela orça por vinte e quatro centésimos milionésimos do milímetro. E Lane enviou um raio Röntgen através dum cristal.

Cada átomo desviou a onda incidente e afastou-a da sua direção. Exatamente como numa grade óptica, houve linhas preponderantes em que as ondas isoladas se fortaleciam, dando um máximo de claridade, e outros pontos, entre elas, onde as ondas se extinguíam. Assim como, numa colunata entremeada de intervalos iguais numa floresta plantada com regularidade geométrica, só em determinados pontos se tem espaço livre para a visão, assim o cristal de sal-gema só em certas direções deixa penetrar a luz de Röntgen. Revelada a chapa, evidencia-se um sistema de pontos dispersos e dispostos simetricamente. Essa imagem insofismável de pontos de interferência — o diagrama de Lane — é um símbolo, ou melhor, uma cópia exata da estrutura cristalina. Quem se acostumou a examiná-la devidamente, isto é, quem dominar o conjunto matemático da teoria das grades, verá nessas manchas negras e singelas a imagem dos átomos no sal-gema.

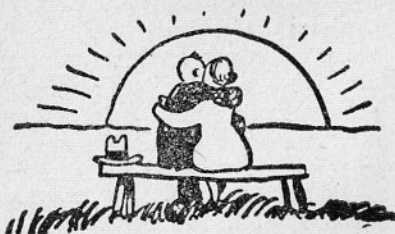
Ponto de partida admirável e que, dentro em pouco, nas mãos de Debye, de Scherrer e sobretudo por obra dos ingleses Bragg — pai e filho — se converteu em instrumento mágico. Esses cientistas desvendaram amplamente, em números exatos, a complexa microestrutura, a trama cristalina da matéria. Mediante o diagrama de Lane é possível determinar, com precisão duma análise química, a natureza duma combinação de corpos. Atualmente, a "prova interna da matéria" por meio dos raios de Röntgen já se insinuou até na prática industrial. Em muitas fábricas traspassam-se com a luz de Röntgen importantes obras metálicas. As caldeiras dos navios, os tubos de grandes dimensões e obras análogas mal se podem levar aos laboratórios. Não há muito, dispõe-se dum recurso: existem hoje laboratórios volantes que vão ao encontro do material, quando êste não pode chegar a êles, laboratórios providos do aparelhamento necessário: uma câmara e uma lâmpada Röntgen tão móvel, que se pode introduzir sem dificuldade no interior das caldeiras. Uma irradiação dalguns segundos e, revelada a chapa, aparecem nitidamente as fendas ocultas, as amolgaduras, as falhas invisíveis de estrutura molecular. Já não temos razão alguma para qualificar de insignificante ou de inútil a teoria da interferência.

Velocidade da luz

Quando, em pequeno, adquiri as primeiras noções de física, caí-me sob os olhos uma gravura que me agradou imensamente: um professor assistia, de relógio em punho, ao surgir do Sol, dizendo: "Está certo: o Sol nasce pontualmente". Mas será que o Sol nasce deveras pontualmente? Quando o vemos aparecer no horizonte, êle, de facto, estava ali há oito minutos e meio atrás, e quando êle se pôe no oeste, o vemos ainda, durante oito minutos e meio, apesar de êle já ter desaparecido. Admito que isto vos possa parecer um tanto inverossímil. Todavia é assim. A luz emprega, do Sul à Terra, oito minutos e meio.

E não é vagarosa. A antiguidade acreditava até que ela se propagasse instantaneamente. Um relâmpago ilumina simultaneamente a paisagem inteira, dizia-se. E êsse fato sugeria a idéia duma velocidade incalculável. Duvidando disso, como doutras coisas, Galileu empreendeu uma experiência: colocou à maior distância possível duas pessoas munidas de lanternas furta-fogo e ordenou que a primeira cobrisse a luz. Logo que o percebesse, a segunda lhe devia imitar o exemplo. Mas o resultado foi negativo: os dois assistentes pareciam apagar contemporaneamente as lanternas. Daí Galileu inferiu, com razão, apenas uma coisa: a velocidade da luz devia ser muito grande, maior do a que do som. As duas teorias da luz formuladas posteriormente — a de Huygens e a de Newton — presupunham a existência duma velocidade finita. E em 1675, Olavo Roemer teve a feliz idéia — ou melhor: a idéia lhe foi sugerida pela natureza — de repetir a experiência de Galileu em escala muito ampla, por assim dizer no universo. O planêta Júpiter havia de ser o homem da lanterna furta-fogo; um satélite de Júpiter, a fonte luminosa; quando êsse satélite entrasse na sombra daquele planêta a luz extinguir-se-ia. O eclipse do satélite seria um sinal de luz. Olavo Roemer não imaginava contratempos; calculara apenas o eclipse e verificava a pontualidade de Júpiter. Durante o verão, tudo coincidiu. Passado, porém, um semestre, no inverno, o cientista percebeu com espanto que Júpiter se atrasava. E o satélite entrou na zona de sombra nada menos de quinze minutos depois. Haveria êrro de cálculo.

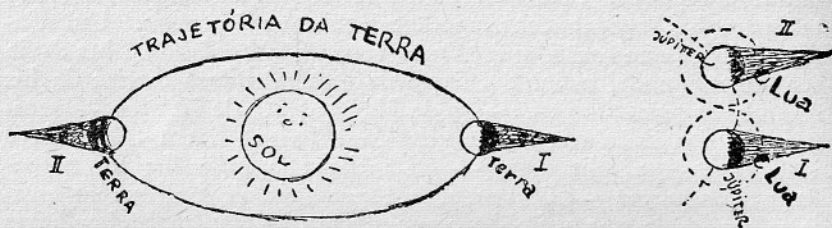
Comprovaram-se mais uma vez as tabelas. Voltara, entretanto, o verão e, como se nada houvesse ocorrido, Júpiter tornou com exaçação meticulosa a coincidir com os cálculos de Roemer; os sinais de luz chagavam no instante previsto, com uma pontualidade que encantava.



E Roemer descobriu o erro: entre o verão e o inverno, não medeiam apenas seis meses; entre o verão e o inverno, há também a órbita terrestre!

As primeiras medidas haviam sido tomadas com Júpiter próximo da Terra. Após um semestre, esta e aquele planeta encontravam-se diametralmente opostos. A distância entre ambos se acrescentavam trezentos milhões de quilômetros. O atraso provinha, pois, do caminho mais extenso que a luz tinha que percorrer; e um cálculo muito simples deu como velocidade da luz trezentos mil quilômetros por segundo. Roemer divulgou os resultados da observação, mas a sua época não lhe quis dar ouvido.

Esse assunto ressurgiu só meio século depois, graças... a um pé de vento. O astrônomo Bradley atravessa o Tâmesa numa barca. Uma rajada impetuosa, arrebatando-lhe o chapéu, tirou-o das suas meditações. Não obstante o prejuízo, o sábio rompeu em brados de alegria; é que, nesse momento, concentrava a atenção na bandeirola da barca. A flâmula não oscilava em linha reta para trás, como nos momentos de calma nem lateralmente, no sentido do vento: seguia antes uma linha intermediária entre o rumo da embarcação e a direção do vento. Conhecemos hoje a resultante de duas forças, o pa-



ralelogramo das forças. Mas para Bradley era novidade e significava a solução do enigma que o empolgava: a aberração das estrelas fixas, observada por ele. Compreende-se bem que, se a luz necessita de algum tempo para atravessar a luneta e esta nesse tempo se desloca para a frente, com a Terra, o raio luminoso se atrasa um pouco e a imagem não aparece no centro, mas desviada para trás. E, como no espaço de um ano a Terra e a luneta descrevem uma circunferência completa, a estrela fixa também traça, no mesmo período, uma pequena circunferência, uma cópia fiel da órbita terrestre. À semelhança do caçador que, alvejando um animal bravo em fuga, desvia um tanto a linha de mira, Bradley devia visar com a sua luneta um ponto adiante. Conhecia-se a velocidade da Terra; calculou-se, em consequência, a velocidade da luz, obtendo o resultado de Roemer: trezentos mil quilômetros por segundo. E os incrédulos viram-se reduzidos ao silêncio.

Foi Fizeau o primeiro que teve a idéia audaz de determinar a velocidade da luz na própria Terra. O princípio da porta giratória: um

raio de luz, introduzido numa porta giratória — no caso de Fizeau, numa abertura duma roda dentada móvel — incide num espelho e volta, pela mesma abertura a uma pequena luneta onde brilha, como um ponto luminoso. O espelho colocou-se a dez e mais tarde a vinte e cinco quilômetros da fonte luminosa, dispondo-o no foco de uma segunda luneta. Foi obra magistral ajustá-lo com tal exatidão, que o raio luminoso regressasse pela mesma brecha; não é simples dirigir um feixe de luz de dez quilômetros de extensão, sem o erro dum milímetro.

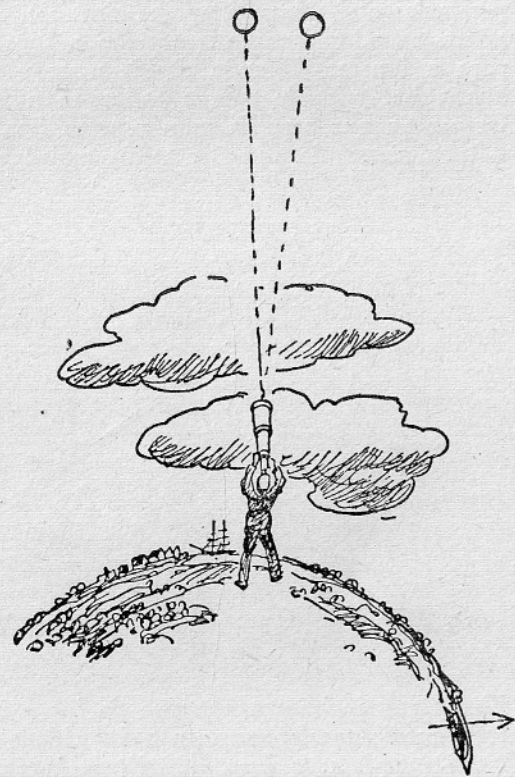
Aí começa propriamente a experiência de Fizeau. O ponto luminoso cintila na luneta; o operador manda girar a roda dentada. O mecanismo de relógio volve, mais e mais rápido. Dois, quatro, dez giros por segundo... e a luz continua a brilhar. O raio luminoso realiza a sua excursão de vinte quilômetros, numa fração de segundo e, na volta, encontra-se de novo diante da abertura.

“Continuemos” — disse Fizeau, pregando a vista ocular.

Onze, doze... Aos treze giros e dois décimos, ocorreu enfim o milagre esperado: a luz apagou-se subitamente na luneta por mais veloz que fôsse o raio luminoso, a roda dentada vencera-o. Voltando o feixe de luz vira-se ante a porta fechada — um dente cortara-lhe o caminho.

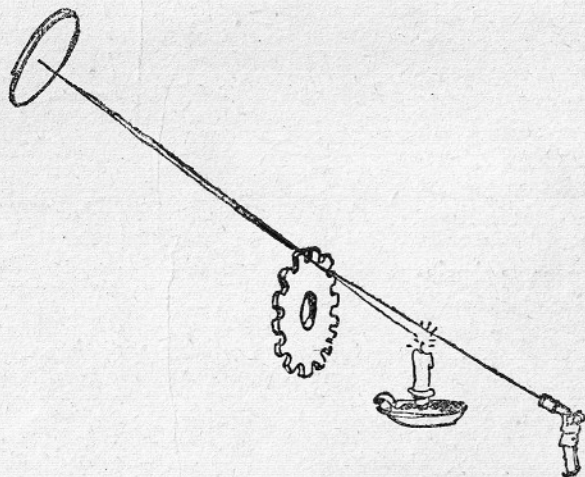
E a experiência proseguiu. A roda continuou a girar, com rapidez crescente. Aos vinte e seis giros e quatro décimos, o ponto luminoso tornou a luzir de improviso. O raio de luz saía então pela primeira abertura e regressava pelo vão seguinte.

Aí tendes um ponto luminoso que, apagando-se, acarretou claridade. Com uma roda dentada e um espelho, Fizeau medira na



Terra a velocidade das velocidades, a velocidade máxima do nosso universo.

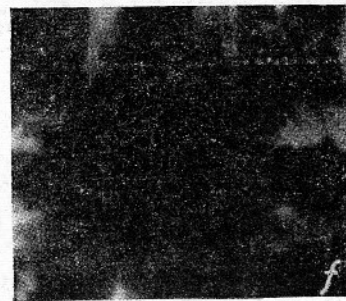
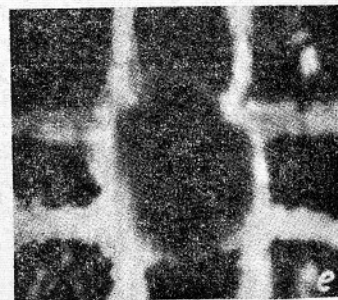
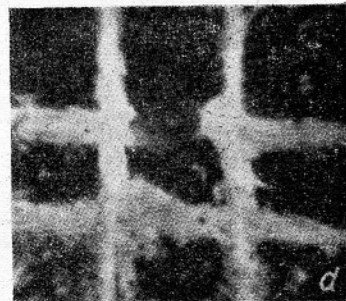
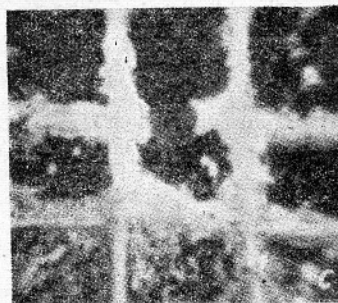
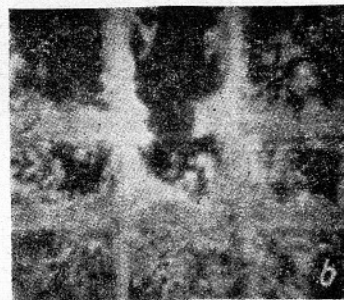
Mais tarde, em colaboração com Foucault, realizou outra experiência: o sistema do espelho giratório. A luz incide num espelho; pouco além, um segundo espelho a repele para o primeiro e daí para a luneta. Girando rapidamente o primeiro espelho, o raio, que volta, reincide nêle e reflete-se numa direção um tanto diferente da que seguiria num espelho fixo. Quanto mais rápido fôr o movimento de rotação, tanto maior será o desvio. Foucault e



Fizeau restringiram o percurso da luz a um espaço de poucos metros; mediram efetivamente a velocidade da luz no laboratório.

Denominou-se essa experiência "steeplechase à velocidade da luz". De fato, os dois físicos, a princípio colaboradores, separaram-se depois, por não poderem chegar a um acôrdo sôbre o propulsor do espelho — turbina ou mecanismo de relógio. E cada um se pôs a trabalhar separadamente, à própria maneira. Fizeau, porém, não teve sorte; dificuldades experimentais irrisórias, como um cano de zinco danificado, retardaram-lhe o êxito. Foucault pôde, assim, fazer com poucos dias de antecedência a comunicação decisiva à Academia Francesa.

Essa experiência repetiu-se inúmeras vêzes; na França, com o método da roda dentada; na Alemanha, por um processo eletro-óptico. Renovando continuamente a experiência do espelho giratório, Michelson levou-a, na América, ao grau máximo de perfeição. Um exército de geômetras, ao serviço do Estado, mediu conscienciosamente uma extensão de sessenta e cinco quilômetros entre dois picos. Apurou-se ao extremo a construção dos espelhos e



Fotografia obtida com o microscópio eletrônico. Destruição progressiva dum cátodo incandescente.

tudo o que se ligava a essa experiência. Introduziu-se a luz em tubos cheios d'água e de sulfêto de carbono, para lhe determinar a velocidade.

Foram experiências grandiosas, como as poderiam executar só a América e Michelson, o experimentador inexcelável. Mas, graças a elas, sabemos hoje o valor da velocidade da luz: duzentos e noventa e nove mil, setecentos e noventa e seis quilômetros por segundo.

Transcrevemos as próprias palavras de Michelson:

“A determinação da velocidade da luz é uma das tarefas mais empolgantes da física, quer pela sua grandeza quase inexprimível, quer pela exação escrupulosa com que essa velocidade pode ser medida.

A. A. MICHELSON”

Façamos uma pirraça ao grande físico? Não tomemos em consideração o seu resultado e continuemos a calcular com a conta redonda: trezentos mil quilômetros por segundo, embora “conscientes, no íntimo, da nossa falta”.

PAUL KARLSON

Nós e a Natureza

2.^a Edição

O ROMANCE DA FÍSICA

Tradução de

MARINA GUASPARI

Revisão Técnica de

Herbert Caro



EDITORA GLOBO

RIO DE JANEIRO — PÔRTO ALEGRE — SÃO PAULO