

10. SECÇÃO LIVRE

A EVOLUÇÃO DA ÓPTICA

As primeiras hipóteses conhecidas sobre a natureza da luz foram propostas pelos filósofos gregos enquanto que os matemáticos gregos elaboraram uma espécie de optica geométrica.

Todavia só com Descartes (1596-1650) se fundou uma nova escola filosófica que permitiu uma concepção sobre a natureza da luz baseada nas suas ideias metafísicas.

No entanto, a optica só adquiriu uma base sólida, quando Galileu — Galilei (1564-1642), demonstrou o poder do método experimental, através do desenvolvimento da mecânica. — Enquanto que as leis da reflexão já eram conhecidas pelos gregos, as leis da refração só foram verificadas experimentalmente em 1621 por *W. Snell* (1591-1626). Descartes deu uma interpretação destas leis admitindo que a luz (teoria da emissão ou corpuscular), é constituída por particulas, que são emitidas com velocidades diferentes em corpos diferentes.

Deve-se a *Fermat* (1601-1665) o enunciado duma outra profunda formulação, segundo a qual «a natureza actua sempre pelo caminho mais curto»; segundo este princípio, a luz segue sempre um trajecto tal que atinge um alvo num mínimo de tempo. Introduzindo a hipótese de «resistências diferentes em corpos diferentes», deduziam-se a partir daquele princípio as leis da refração. Este princípio do «caminho mais curto da luz» foi de grande alcance filosófico em consequência do seu carácter teleológico, que foi considerado estranho às ciências naturais e deu origem a inúmeras discussões.

O primeiro fenómeno das interferências, «as cores das lâminas delgadas» hoje também conhecido por «anéis de Newton», foi descoberto independentemente por *Boyle* (1626-1691) e *Hooke* (1635-1703).

Hooke descobriu também o aparecimento de luz na sombra geométrica, isto é, a

«difracção da luz»; no entanto este fenómeno já tinha sido observado por *Grimaldi* (1618-1663). *Hooke* foi quem defendeu primeiramente a concepção de que a luz é produzida por oscilações rápidas, propagando-se instantaneamente; baseado nestas hipóteses tentou dar uma explicação para a refração e uma interpretação para as «cores». Mas a propriedade fundamental da luz corada só foi evidenciada, quando em 1666, *Isaac Newton* (1642-1727) descobriu a decomposição da luz branca através de um prisma e verificou que cada cor simples era caracterizada por uma determinada «refrangibilidade».

As dificuldades em que se encontrou a teoria ondulatória para explicar a propagação rectilínea da luz e a polarização (descoberta por *Huygens*), pareceram tão decisivas a *Newton*, que este optou pela teoria da emissão que desenvolveu. Nesta época fez-se a primeira determinação da velocidade da luz, realizada por *Römer* (1644-1710), a partir da observação dos eclipses dos satélites de Júpiter.

O verdadeiro fundador da teoria das ondulações foi *C. Huygens* (1629-1695), que considerava que a luz se propagava num meio especial que designou por «éter de luz»; enunciou então um princípio, denominado mais tarde por «princípio de Huygens», segundo o qual cada ponto do éter atingido pela excitação luminosa pode ser considerado como o centro de uma nova onda esférica; as ondas secundárias actuam de modo tal que a sua envolvente determina a frente de onda resultante. Por meio deste princípio, conseguiu deduzir as leis da reflexão e refração da luz e além disso interpretou a dupla refração de um cristal de espato, fenómeno descoberto por *Bartholinus* (1625-1698), fazendo a hipótese de que neste cristal, além de uma onda esférica, se propaga uma onda elipsoidal.

Huygens fez a descoberta fundamental da polarização, isto é, verificou que cada um dos

raios produzidos por refacção num cristal de espato, ao passar num segundo cristal se podia extinguir, rodando com o segundo cristal em torno da direcção de incidência.

No entanto, Huygens não conseguiu a interpretação deste fenómeno, admitindo a *transversalidade* dos raios, tendo-a conseguido Newton em 1717. Este, por seu lado, viu nesta hipótese um obstáculo invencível para a admissão da teoria ondulatória, visto que nessa época só se concebia a existências de ondas longitudinais.

A negação da teoria ondulatória por uma autoridade como Newton, fez com que fosse posta de parte quase durante 100 anos. No entanto, encontrou sempre partidários isolados, como o grande matemático *Euler* (1707-1783).

Só no começo do século XIX se produziram as descobertas decisivas, que conduziram à supremacia da teoria ondulatória. O primeiro passo foi o estabelecimento do princípio da interferência em 1801 por *Young* (1773-1829) e a explicação baseada no referido princípio, das cores das lâminas delgadas. No entanto, as teorias de *Young*, de carácter qualitativo, não conseguiram impor-se totalmente.

Nessa época, *Malus* (1775-1812), descobriu a polarização da luz por reflexão. Numa tarde do ano de 1808, observou, através de um cristal de espato, a imagem do Sol numa janela e verificou que as duas imagens produzidas por dupla refacção, variavam de intensidade, quando se rodava o cristal em torno da direcção de incidência. No entanto, *Malus* renunciou fazer a interpretação do fenómeno, julgando que as teorias existentes não o podiam explicar.

A teoria da emissão fora entretanto desenvolvida por *Laplace* (1749-1827) e por *Biot* (1774-1862). Os seus partidários propuseram, como assunto do grande prémio da Academia de Paris para 1818, o problema da difracção, na esperança de conseguirem o último triunfo da teoria da emissão.

No entanto a sua esperança não se realizou, pois que a tese de *Fresnel* (1788-1827), pré-

miada a-pesar de todas as resistências, baseava-se na teoria ondulatória e constituiu o primeiro de uma série de trabalhos que fizeram abandonar a teoria corpuscular dentro de poucos anos. A tese baseava-se no conjunto do princípio de Huygens das ondas elementares, e do princípio da interferência de *Young*. Por meio da sua tese, *Fresnel* explicava não só o princípio da propagação rectilínea da luz, mas ainda pequenos desvios conhecidos como fenómenos de difracção. Estudou a difracção produzida por bordos rectilíneos, por pequenas aberturas e por «alvos»; foi especialmente impressionante, a confirmação experimental da previsão teórica de que no ponto médio da sombra de um pequeno disco circular devia aparecer uma mancha luminosa.

No mesmo ano (1818), *Fresnel* investigou o importante problema da influência do movimento da Terra na propagação da luz; a questão que se punha era averiguar se a luz proveniente das estrelas se comportava da mesma maneira do que a luz proveniente de uma origem terrestre.

Arago (1786-1833) demonstrou experimentalmente que (abstraido o fenómeno da aberracção) não se encontrava nenhuma diferença e, baseando-se neste facto, *Fresnel* desenvolveu a sua teoria do arrastamento parcial do éter através da matéria; esta teoria só pode ser confirmada em 1831. por *Fizeau* (1819-1896), realizando experiências directas. Juntamente com *Arago*, *Fresnel* investigou a interferência da luz polarizada e verificou, em 1816, que dois feixes polarizados perpendicularmente não interferiam. Este facto era incompatível com a hipótese das ondas longitudinais, que até então era considerada óbvia. *Young*, conhecedor da descoberta de *Arago*, encontrou em 1817 a solução do problema: «a hipótese das oscilações transversais». *Fresnel* compreendeu imediatamente o alcance desta hipótese, donde tirou várias consequências, que procurou fundamentar por meio de uma teoria dinâmica. *Fresnel* admitiu que o éter devia ser análogo a um corpo fixo; partindo das leis da propagação da luz nos cristais, procurou deduzir as propriedades do

«éter da luz». O esclarecimento dessas leis e a sua redução a algumas simples hipóteses quanto à forma das ondas elementares é uma das maiores obras primas das investigações sobre a natureza.

Hamilton, a quem o desenvolvimento da óptica tanto deve, chamou a atenção para uma importante consequência da construção de Fresnel: a chamada «refracção cónica», cuja existência em breve foi demonstrada por *Lloyd*.

Fresnel deu também a primeira indicação para a explicação da difusão das cores (dispersão) aproveitando-se da estrutura molecular dos corpos, ideia que foi mais tarde desenvolvida por *Cauchy*. Considerações dinâmicas sobre o mecanismo das vibrações do éter, conduziram Fresnel à dedução da lei sobre a intensidade de polarização da luz por reflexão e refracção.

O trabalho de Fresnel colocou a teoria ondulatória numa base tão segura, que pareceu quase um empreendimento supérfluo a realização da experiência crucial proposta por *Arago*; esta experiência foi levada a cabo por *Fizeau* em 1850 e *Foucault* (1819-1868). Com efeito, a teoria corpuscular explicava a refracção como uma atracção das partículas luminosas na superfície de separação de dois meios, atracção essa realizada do meio menos refrangente para o meio mais refrangente, donde resultava uma velocidade mais elevada neste meio; a teoria ondulatória, pelo contrário, exigia uma velocidade menor nos meios mais refrangentes. A medição directa (*Foucault*) da velocidade da luz no ar e na água, decidiu nitidamente a favor da aceitação da teoria ondulatória.

Os decénios seguintes foram consagrados ao aperfeiçoamento da doutrina das oscilações elásticas do éter. O primeiro passo consistiu na elaboração de uma teoria da elasticidade dos corpos sólidos.

Navier (1785-1836), desenvolveu uma teoria, admitindo que os corpos eram constituídos por um grande número de partículas actuando umas sobre as outras segundo forças centrais. No aperfeiçoamento desta teoria

participaram ainda *Cauchy* (1781-1840), *Green* (1793-1811), etc. Hoje já não se justifica a descrição pormenorizada da teoria referida e das dificuldades que os seus defensores tiveram que vencer; com efeito estas dificuldades provinham de se pretender explicar os fenómenos ópticos, mecanicamente.

Uma das primeiras objecções que se puseram contra a concepção do éter como «corpo sólido» foi a seguinte: como seria possível conceber que, através de tal meio, os planetas se pudessem mover, com as suas elevadas velocidades, sem resistência notável? *Stokes* (1819-1903), julgou poder remover esta dificuldade com a afirmação de que estas velocidades planetárias eram extraordinariamente pequenas em relação às velocidades das partículas do éter. Hoje estas discussões parecem completamente inúteis, visto que já não se reconhece a necessidade de apresentar imagens mecânicas para todos os fenómenos da natureza.

Um primeiro passo contra a concepção do éter elástico foi realizado por *Cullagh*, que imaginou um meio com propriedades que os corpos vulgares não possuem. Com efeito, enquanto que estes armazenavam energia, no caso de haver uma deformação, mas não a armazenavam no caso de haver apenas rotações, com o éter de *Cullagh* dava-se precisamente o contrário.

As leis de propagação das ondas num tal meio, mostravam uma profunda semelhança com as equações de *Maxwell* das ondas electromagnéticas, que hoje servem de base fundamental à óptica.

A pesar de todas as dificuldades manteve-se muito tempo a teoria do éter elástico, e todos os físicos importantes do século dezanove contribuíram para ela. Além dos já citados, indicamos *Lord Kelvin* (1824-1908), *Neumann* (1832-1925), *Lord Rayleigh* (1824-1919), *Kirchhoff* (1824-1887).

Entretanto desenvolveu-se bastante a electricidade e o magnetismo e alcançou-se um ponto culminante com as descobertas de *Faraday* (1791-1867). A reunião de todas as experiências num sistema de equações mate-

máticas foi conseguida por *Maxwell* (1831-1879); e como consequência mais importante resultou a *possibilidade* da existência de ondas electromagnéticas, cuja velocidade se verificou ser igual à da luz; este resultado obteve-se a partir de medições puramente electricas realizadas por *Kohlrausch* (1809-1858) e *Weber* (1804-1890), o que conduziu *Maxwell* a afirmar que as ondas luminosas eram ondas electromagnéticas. A comprovação experimental directa da existência das ondas electromagnéticas, foi realizada em 1888 por *Hertz*. A pesar disso a teoria de *Maxwell* teve de travar uma longa luta até que dominou por completo. Como se sabe o espirito humano só difficilmente, e contra vontade, abandona ideias a que se já se habituou. Assim, o próprio *Maxwell* procurou concretizar os seus campos electromagnéticos por meio da mecânica, aspiração que ainda se manteve durante longo período. Só o tempo fez desaparecer a pouco e pouco este desejo de «imagens mecánicas»; hoje já não há dificuldade em imaginar os campos de *Maxwell* como «factos» não concretizáveis.

A teoria electromagnética conseguiu explicar, na sua essência, todos os fenómenos respeitantes à propagação da luz. Em contrapartida não explicava os processos de emissão e de absorção da luz, nos quais se deve considerar a inter-acção entre matéria e energia.

As leis destes processos são objecto da óptica moderna, e mesmo de toda a Física actual. O seu ponto de partida foi o estudo dos espectros: o primeiro passo foi devido a *Fraunhofers* (1787-1826) que observou linhas «escuras» no espectro do Sol, as quais devido às observações de *Bunsen* (1811-1899) e *Kirchhoff*, foram interpretadas como linhas de absorção.

Esta descoberta foi ao mesmo tempo a origem da análise espectral, que se baseia no conhecimento de que a cada elemento químico gasoso corresponde um espectro de linhas característico. A investigação destes espectros constituiu até aos nossos dias um objecto fundamental de estudo e o facto de utilizar métodos ópticos faz com que se considere

como fazendo parte da teoria da luz. No entanto, o estudo da maneira como a luz é produzida nos átomos ou de como é destruída, não pertence ao domínio da óptica pura, mas diz respeito à mecânica do átomo; as leis sobre as linhas espectrais revelam mais as particularidades das partículas emissoras do que as da própria luz.

A espectroscopia tem-se por isso desenvolvido cada vez mais num campo especial, que fornece as bases empíricas para a Física Atómica e Molecular.

Verificou-se que a mecânica clássica não bastava para a descrição dos processos atómicos e, em seu lugar, *Planck* deduziu e propôs a teoria quântica (1900). A sua aplicação à estrutura do átomo conduziu *Niels Bohr* a uma explicação sobre os espectros de riscas dos gases utilizando leis simples (1913). Daqui nasceu a actual mecânica quântica (*Heisenberg*, *De Broglie*, *Schrödinger*), por meio da qual se obteve uma notável informação acerca da estrutura dos átomos e moléculas e ainda sobre a natureza da luz. Com efeito, já na primeira versão dada por *Planck*, aparece uma afirmação diametralmente oposta às ideias clássicas, de que um sistema eléctrico a oscilar cede a sua energia, não continuamente, mas em valores finitos ou «quanta» cuja grandeza deve ser proporcional à frequência da luz e igual a $h\nu$. A absorção de energia far-se-ia também descontinuamente.

A chamada constante de *Planck* aqui introduzida ($h=6,55 \times 10^{-27}$ ergs) é a característica que distingue toda a nova Física da Física Clássica.

A natureza paradoxal e não intuitiva desta expressão de *Planck*, foi pouco a pouco compreendida com os trabalhos de *Einstein* e *Bohr*. *Einstein* foi levado pela teoria de *Planck* a «ressuscitar» a teoria da emissão da luz, mas com uma nova forma, admitindo que os «quanta» de energia de *Planck* existiam como partículas de luz reais, conhecidas também por «quanta» de luz ou fotões; conseguiu, por meio desta hipótese, explicar algumas propriedades descobertas posteriormente e inexplicáveis pela teoria das ondas, sobretudo

o conhecido efeito fotoelétrico e os factos fundamentais da fotoquímica. Neste grupo de fenómenos, a luz não actua como a teoria ondulatória indica, conferindo à partícula emitida uma energia proporcional à sua intensidade, mas actua como um projectil, sendo a energia, conferida a partículas secundárias, independente da intensidade e só dependente da frequência da luz.

O número das experiências, que provaram esta propriedade da luz tem aumentado de

ano para ano, e daqui resultou o reconhecimento da simultânea validade da teoria ondulatória e corpuscular; a primeira é assegurada experimentalmente pelos fenómenos de interferência, e a última pelos efeitos eléctricos da luz. Este facto paradoxal só foi explicado nos últimos anos pelo desenvolvimento da mecânica quântica.

Extrato da tradução do prefácio do livro *Optik von Max Born*.

Tradução de L. Salgueiro

IMPORTANCIA Y PORVENIR DE LOS ESTUDIOS SOBRE LA ESTRUCTURA DE LOS CRISTALES

Hace solo cuarenta años, el estudio de los cristales constituía una especialidad cultivada por escaso número de hombres de ciencia. Los mineralogistas empleaban la forma cristalina y las propiedades ópticas para caracterizar las especies mineralógicas, algunos químicos estudiaban las regularidades y las leyes de la cristalización y existían ciertos estudios sobre las propiedades físicas de la materia cristalizada. En lo referente a la estructura, los únicos conocimientos que se tenían eran puramente hipotéticos. La escuela francesa desde Haüy a Friedel había elaborado hipótesis ingeniosas y cómodas que daban cuenta de las regularidades de la forma de los cristales y algunos matemáticos (Schoenflies y Federow) habían estudiado las leyes de la distribución regular y periódica de los átomos en el espacio, pero sin que sus resultados tuviesen otro valor que el de meras teorías.

Esta situación, que colocaba a la cristalografía en el lugar de una ciencia de poca importancia general, ha cambiado radicalmente desde el momento a que se desarrollaron los métodos de análisis estructural basados en la difracción de los rayos X. Se vió entonces que no solo se podía llegar a un conocimiento muy preciso de la distribución de los átomos en los cristales, sino que las regularidades de estructura que son características de la estructura cristalina, se encuentran en la mayoría de los cuerpos sólidos.

Este descubrimiento ha dado una importancia considerable a la ciencia de los cristales que constituye ahora una disciplina independiente en plenitud de desarrollo y que ocupa una posición central con respecto a los estudios físicos, químicos y mineralógicos.

Los métodos de difracción de los rayos X, que constituyen actualmente la base de la cristalografía estructural, han permitido realizar casi, un viejo sueño de los hombres de ciencia: el poseer un microscopio que permitiese escudriñar el mundo de los átomos, base de nuestro universo material y soporte sobre el que tienen lugar todos los fenómenos que observamos. El fundamento de la deducción de las estructuras cristalinas por medio de los rayos X estriba en el hecho que los rayos X tienen una longitud de onda del orden de las distancias interatómicas y son difundidos por la materia proporcionalmente a la *densidad electrónica* existente en los diferentes puntos de un cuerpo. El razonamiento en el que se basa la deducción de la estructura de un cristal es en esencia muy sencillo:

La estructura cristalina es triplemente periódica y la densidad electrónica $f(xyz)$ en sus diferentes puntos puede ser por lo tanto representada por una serie de Fourier de la forma:

$$f(xyz) = \sum_h \sum_k \sum_c^{+\infty} A(hke) e^{w2\pi i \left(\frac{hx}{a} + \frac{ky}{b} + \frac{ez}{c} \right)}$$