
A CRÔNICA DA ÓTICA CLÁSSICA*

José Maria Filardo Bassalo
Depto de Física – UFPA
Belém – PA

Com este trabalho iniciamos a Crônica da Ótica Clássica. Nesta primeira parte, que vai de 800 a.C. a 1665 d.C., procuramos mostrar, basicamente, o desenvolvimento da Ótica Geométrica, que é, na literatura usual, a parte da Ótica que estuda os fenômenos luminosos relacionados com a formação de imagens em espelhos e lentes. Começamos com as primeiras idéias dos gregos antigos sobre a natureza da luz e paramos em 1665 d.C., ano em que apareceram os primeiros registros de fenômenos luminosos tais como a interferência e a difração, cujas explicações fazem parte da Ótica Física, ainda segundo a classificação didática da Ótica Clássica.

A luz sempre foi objeto de interesse por parte do Homem, desde que tomou consciência de que a noite era ausência da luz do Sol, assim como quando percebeu a existência de pontos brilhantes no céu escuro. Por outro lado então, logo que dominou o fogo, o Homem percebeu que havia uma relação entre a luz e o fogo, já que ambos aquecem e iluminam. No entanto, como a luz parecia um fenômeno muito misterioso, as primeiras civilizações atribuíam sua origem aos Deuses de sua adoração. Assim, para os antigos Egípcios, a luz é Maât, filha de Rá, o Deus Sol, conforme nos fala Jean Rosmorduc em De Tales a Einstein. Já para os antigos Hebreus, foi DEUS quem a fez, como se pode ver no livro do Gênesis. Contudo, é com os antigos Gregos que a luz passa a ter uma realidade objetiva, ao perceberem que algo deveria existir no espaço compreendido entre os nossos olhos e os objetos que vemos. Porém, havia uma questão básica: a luz vem dos objetos que vemos ou sai de nossos olhos para os mesmos? Para Homero, poeta grego que viveu no século IX ou VIII a.C., a luz provinha dos olhos (Rosmorduc, op. cit.). Já para o filósofo grego Pitágoras(c.580 – c.500), segundo Banesh Hoffmannem L'Etrange Histoire des

* Este trabalho recebeu ajuda do CNPq e da PROPESP/UFPA

Quanta⁽³⁾ são os olhos que recebem os raios luminosos emitidos por objetos luminosos, tais como: astros, chamas, pirilampos, etc., ou resvalados por objetos não-luminosos. (Essa idéia também foi defendida pelo filósofo grego Epícuro de Samos (341-270)⁽⁵⁾.)

Como os partidários da hipótese dos raios visuais⁽⁶⁾ (isto é, partículas luminosas emitidas pelos olhos) tinham dificuldade em explicar por que não vemos no escuro, e tendo em vista a hipótese razoável dos pitagóricos sobre a visão dos corpos, então o filósofo grego Platão (c.428 - c.348) formulou sua hipótese sobre tão delicada questão. Segundo Platão (Cf. Hoffmann, op. cit.), a visão de um objeto era devido a três jatos de partículas: um partindo dos olhos, um segundo proveniente do objeto percebido e um terceiro vindo das fontes iluminadoras (Sol, lâmpada, etc.). Assim, um feixe de raios luminosos parte dos olhos até o objeto observado, lá se combina com os raios emitidos pela fonte iluminadora, retornando então aos olhos, dando-lhes a sensação de visão. Ainda para Platão, a luz era considerada um “fogo divino”, segundo nos fala John Strong em Concepts of Classical Optics⁽⁷⁾. A dúvida sobre a natureza da visão, assim como a origem da luz, só foram definitivamente esclarecidas pelo físico e matemático iraquiano Abu- ‘Ali Al-Hasan Ibn Al-Haytham (Al-Hazen) (c.965-1038) ao reconhecer que a fonte dos raios luminosos está no Sol ou em qualquer outro objeto luminoso, e que a visão se deve tão somente à reflexão desses raios para os olhos que estão contemplando determinado objeto, segundo Jacob Bronowski ressalta em seu A Escalada do Homem⁽⁸⁾.

Muito embora prevalecesse o caráter corpuscular da luz entre os filósofos da antiguidade, no entanto, nem todos os seus pensadores partilhavam dessa teoria. Por exemplo, o filósofo grego Aristóteles (384-322) defendia a hipótese de que a luz era devido a uma atividade em um determinado meio, podendo, dessa forma, tal idéia ser considerada como a antecessora da teoria ondulatória (Cf. Rosmorduc, op. cit.; Strong, op. cit.). (De acordo com Joseph Needham em La Science Chinoise et l’Occident⁽⁹⁾, os físicos chineses da Dinastia Qin (221-207) também defendiam a hipótese ondulatória da luz.) Contudo, para Aristóteles, a velocidade da luz era infinita, contrária à hipótese defendida pelo filósofo grego Empédocles de Agragas, atual Agrigento (c.490 - c.430), que a considerava finita, como podemos ver em Morris Kline, Mathematical Thought from Ancient to Modern Times⁽¹⁰⁾. Aliás, apesar deste filósofo ser partidário da teoria corpuscular da luz, pois considerava o fluxo luminoso como o fluxo contínuo de um rio, parece que ele era uma das únicas vozes da antiguidade a defen-

der a finitude da velocidade da luz. (Esta hipótese seria novamente defendida por Al-Hazen, somente no século IX de nossa era.)

Os estudos de Aristóteles sobre a luz não se limitaram aos mencionados acima, já que seus conhecimentos sobre o som levaram-no a afirmar que as cores mais agradáveis deveriam obedecer às mesmas relações numéricas pitagóricas para determinados sons. (É provável que ele também tivesse conhecimento da lei da reflexão da luz, conforme comenta Carl B. Boyer em seu A History of Mathematics⁽¹¹⁾.) Por outro lado o preceptor de Alexandre, o Grande, parece haver sido um dos primeiros filósofos a tentar uma explicação para o arco-íris, ao afirmar que o mesmo era devido a gotículas de água contidas na atmosfera que refletiam a luz do Sol e causavam a variação da cor. Observou ainda Aristóteles que a reflexão da luz do Sol pelas nuvens ocorria para um ângulo determinado, dando surgimento portanto tal reflexão a um cone circular de “raios de arco-íris”. Assim, conforme afirma Herch Moisés Nussenzveig em seu artigo The Theory of the Rainbow⁽¹²⁾, Aristóteles, além de explicar corretamente a forma circular do arco-íris, percebeu que sua localização no espaço dependia do ângulo entre a direção dos raios solares incidentes e a dos raios refletidos pelas nuvens até os olhos do observador. No entanto, somente em 1266 é que o filósofo e monge franciscano inglês Roger Bacon (1214 – 1292) mediu pela primeira vez tal ângulo: $\cong 42$. Aliás, Bacon achava que o arco-íris era devido a pequenas imagens do Sol desvanecidas em inúmeras gotas d'água, e suas cores como sendo um fenômeno subjetivo produzido pelo olho. Além do mais, pensava ainda Bacon que o arco-íris só deveria ter cinco cores, porque o número cinco é ideal para promover uma variação das qualidades, conforme nos dizem John Losee em Introdução Histórica à Filosofia da Ciência⁽¹³⁾ e A. Kistner em História de la Física⁽¹⁴⁾.

A idéia aristotélica sobre o arco-íris prevaleceu até a segunda metade do século XIII, quando então o físico persa Ibn Marud Al-Schirazi a complementou, afirmando que tal fenômeno era devido à dupla refração e reflexão dos raios solares nas tais gotículas d'água, referidas por Aristóteles (Cf. Kistner, op.cit.). Idéia semelhante a essa foi apresentada em 1304, pelo monge alemão Teodorico de Freiberg, ao postular a hipótese de que o arco-íris era resultado de uma combinação de refração e de reflexão da luz solar por gotículas de chuvas individuais, e não coletivamente, como considerava Aristóteles. A fim de verificar tal hipótese, Teodorico encheu esferas cristalinas ocas com água e as colocou no trajeto de raios solares. (Segundo Kline (op. cit.), o cientista polonês Witelo (c.1225-c.1275) havia feito uma experiência análoga a essa de Teodorico.) Com

essa experiência, Teodorico conseguiu reproduzir tanto o arco-íris primário quanto o secundário. Ele demonstrou ainda que os arco-íris secundários tinham invertida a ordem de suas cores em relação à do primário e que o ângulo entre os raios incidente e emergente dos raios secundários era maior que onze graus em relação aos primários, observação essa que concordava com os arco-íris naturais observados. Com isso, Teodorico explicava a chamada “região escura de Alexandre”, região situada entre os dois arco-íris, e que havia sido pela primeira vez descrita pelo filósofo grego Alexandre de Afrodísias, por volta de 200 a.C.. Em seu livro Optics⁽¹⁵⁾, publicado em 1704, o físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727) relata que as experiências análogas a essa de Teodorico foram também realizadas por Antonius de Dominis, Arcebispo de Spalato, por volta de 1591, e pelo filósofo e matemático francês René Descartes (1596-1650), em 1637, sendo que este as descreveu em seu Météores, suplemento de seu famoso Discours sur la Methode.

Apesar da explicação de Teodorico para o arco-íris, três questões continuavam sem resposta: o porquê do ângulo de visão do arco-íris, a razão de suas cores, e a presença dos arcos supranumerários (estes constituídos de uma série de bandas fracas, rósea e verde, e localizados logo abaixo do arco-íris primário). A primeira dessas questões foi respondida por Descartes, graças à redescoberta da lei da refração da luz, em 1637. Em seu La Dioptrique, suplemento ao seu Discours, Descartes utiliza essa lei para explicar o ângulo de visão do arco-íris. Apesar dos romanos dos primeiros anos da era cristã haverem encontrado uma relação entre as cores do arco-íris e as vistas nas margens de vidros iluminados pela luz solar⁽¹⁶⁾, conforme Jun’ichi Osada descreve em seu Evolução das Idéias da Física⁽¹⁷⁾, foi Newton quem deu a primeira explicação racional de tais cores, após o estudo sobre a dispersão da luz branca do Sol nos prismas, estudo esse realizado em 1666. A explicação dos arcos supranumerários teve que esperar as experiências sobre a interferência da luz realizadas pelo físico e médico inglês Thomas Young (1773-1829), a partir de 1801⁽¹⁸⁾. Assim, o próprio Young explicou a presença daqueles raios como sendo devidos à interferência dos raios espalhados pelas gotículas de água da chuva.

Um novo aspecto do fenômeno do arco-íris, isto é, que suas cores são quase completamente polarizadas, só foi possível ser explicado após a descoberta da polarização da luz. Ao examinar, com um cristal de espato-da-islândia, a luz do Sol refletida por uma janela do Palácio de Luxemburgo, o físico francês Étienne-Louis Malus (1775-1812), em 1808,

observou que a mesma era plano-polarizada (Cf. Strong, op.cit.). Logo depois, em 1811⁽¹⁹⁾, o físico escocês Sir David Brewster (1781-1868) mostrou, empiricamente, que a polarização por reflexão da luz ao incidir em uma superfície transparente só ocorre quando a tangente trigonométrica do ângulo de incidência dessa luz for igual ao índice de refração do meio transparente considerado. Pois bem, a polarização das cores do arco-íris decorre do fato de o ângulo de incidência interno da luz solar na gotícula de água ser muito próximo ao ângulo de Brewster. Desse modo, ficou completa a explicação qualitativa do fenômeno arco-íris. Restaria, contudo, a explicação quantitativa, matemática, a qual foi paulatinamente sendo construída por todo o século passado e começo deste século. Tal explicação baseia-se, fundamentalmente, no estudo do espalhamento da luz solar pelas gotículas de água da chuva. Apesar de toda essa explicação quantitativa do arco-íris, este é ainda hoje objeto de estudo como se pode ver no artigo de Nussenzveig, já por nós referido. Cremos haver sido oportuna a digressão que acabamos de fazer sobre o fenômeno do arco-íris, pois ela mostrou que a história de sua explicação confunde-se com a própria história da Ótica, objeto desta crônica, à qual agora retornamos.

Para compreendermos o fenômeno da luz, não é necessário apenas entendermos o mecanismo da visão ou de reconhecermos sua origem não divina, necessitamos conhecer ainda outros aspectos desse fenômeno físico. Por exemplo, precisamos saber qual sua natureza, sua velocidade, as leis que governam sua relação com os objetos que ela ilumina, se ela pesa, enfim, uma série de informações que ajudarão o entendimento desse importante ramo da Física. Assim, independentemente do estudo da visão, os gregos antigos preocuparam-se, também, com os aspectos acima mencionados. Ora, se tanto a luz quanto o fogo aquecem e iluminam, era natural que eles procurassem uma relação entre os dois. Daí que, na busca dos elementos fundamentais da Natureza, os filósofos pré-socráticos acreditavam que a água (Tales de Mileto (624-546)), o ar (Anaximenes de Mileto (c.570-c.500)), a terra (Xenófanes de Cólofon (c.570-c.460)), e o fogo (Heráclito de Éfeso (c.540-C.480)), isoladamente, ou em conjunto (Empédocles), ou mesmo combinados (Aristóteles), seriam responsáveis por todas as demais coisas até então conhecidas⁽²⁰⁾. Portanto, ao estudarem a natureza do fogo, estavam também estudando a natureza da luz. Por exemplo, Platão no Timaeus admitia que a partícula de fogo, portanto a da luz, era de forma tetraédrica⁽²¹⁾. Por outro lado, para os filósofos antigos, defensores da idéia de que as coisas são formadas por átomos situados no vazio, entre os quais se destacam, os gregos Demócrito de Abdera (c.470-c.380) e Leu-

cipo de Mileto (c.460-c.370) (este, por sinal o cunhador do termo átomo) e o romano Tito Lucrécio Caro (c.95-c.55), admitiam que o átomo de fogo e, conseqüentemente, o da luz, eram esféricos.

Apesar da concepção pluralista de Universo prevalecer por alguns séculos, em virtude da autoridade de Aristóteles que a defendia, a concepção “monista” – todas as coisas são feitas de uma única matéria primitiva - foi retomada pelo erudito inglês Robert Grosseteste (c.1175-1253) ao formular a hipótese de que a luz era a substância primordial do Universo, segundo nos conta Isaac Asimov, em seu Os Gênios da Humanidade⁽²²⁾. No entanto, a questão sobre a natureza da luz permanecia ainda em debate: era ela corpuscular, conforme a concepção dos pitagóricos-platonistas, ou tratava-se de uma “atividade” do meio, como queriam os aristotélicos? Esse conflito permaneceu de caráter filosófico até o século XVII, quando então o debate se tornou realmente científico através dos trabalhos de Descartes, Fermat e Newton, baseados na hipótese corpuscular, e de Huygens, este apoiado na hipótese ondulatória, conforme veremos no decorrer desta Crônica.

Paralelamente ao estudo da visão e da natureza da luz, os filósofos ocidentais da Antiguidade preocuparam-se, também, com as propriedades óticas das esferas de cristais e de vidro, bem como com as propriedades refletoras das superfícies espelhantes planas e curvas. (Espelhos planos e curvos foram também empregados pelos chineses que, juntamente com os gregos, adquiriram tais conhecimentos sobre os mesmos na Mesopotâmia, Índia ou Egito (Cf. Ditchburn, op.cit.)) O estudo sistemático desses fenômenos físicos eram reunidos em duas partes distintas: a Ótica que estudava a teoria geométrica da percepção visual do espaço e dos objetos nele situados; e a Catóptrica, que estudava principalmente a teoria dos espelhos e alguns fenômenos relacionados com a refração. (Por volta de 70 a.C., o filósofo grego Gêmino de Rodes acrescentaria àquela divisão a Cenografia que era a aplicação à Pintura, à Escultura e à Arquitetura de regras da Perspectiva (Cf. Rosmorduc, op.cit.)) Assim, parece haver sido o matemático grego Euclides (c.323-c.285) o primeiro a escrever dois tratados com aquelas duas primeiras denominações. No tratado denominado Ótica, Euclides estuda basicamente a visão de objetos de diversas formas, através de algumas definições e de 58 proposições, tendo como ponto de partida a hipótese de Platão sobre a visão. No tratado denominado Catóptrica, Euclides descreve o comportamento de raios luminosos refletidos por espelhos planos, côncavos e convexos, usando a mesma metodologia empregada em sua Ótica, ou seja, algumas definições e 31 proposições. Contudo, é na

Catóptrica que Euclides, admitindo trajetória retilínea para o raio luminoso e usando seus Elementos de Geometria, apresenta corretamente a Lei da reflexão da Luz: - “O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão”, lei essa, válida quer para espelhos planos, quer para espelhos esféricos. Descreve ainda na Catóptrica a possibilidade de tornar visível a um observador um anel colocado em um vaso transparente, bastando para tal derramar água no mesmo, conforme se pode ver em Kline (op.cit.) e W.T Sedgwick, H.W. Tyler e R.P. Bigelow, autores de História da Ciência⁽²³⁾.

O estudo da reflexão da luz por espelhos de diversas formas continuou a ser feito por filósofos e matemáticos da Grécia Antiga, principalmente o estudo relacionado com os espelhos que apresentam a propriedade de concentrar, em pontos determinados, raios luminosos paralelos incidentes, como ocorre com os espelhos esféricos e os parabolóides de revolução. Assim, quando tais espelhos são voltados para o Sol, o ponto de concentração - foco - fica bastante quente, daí tais espelhos terem recebido a denominação de espelhos incandescentes ou ustórios (“burning-mirrors”). O matemático e inventor grego, Arquimedes de Siracusa (c.287-c.212), em seu livro Catóptrica, hoje perdido, faz referência a tais espelhos, principalmente aos em forma de parabolóide de revolução e, mais ainda, provavelmente ele os teria construído em cobre e usado para incendiar os navios romanos que sitiaram sua Siracusa, no ano 214 a.C.⁽²⁴⁾. Tais espelhos também foram objetos de estudo por parte dos matemáticos gregos, Apolônio de Perga (c.261-c.190) e Diocles (f.c. final do século II a.C.), em livros com o mesmo nome, isto é, Espelhos Incandescentes. (O efeito incandescente de raios solares incidindo em espelhos esféricos foi novamente reconhecido na Renascença, por intermédio do filósofo e físico italiano Giambattista Della Porta (c.1535-1615)⁽²⁵⁾.) Apolônio, por seu lado, também faz referência aos espelhos elipsoidais, que apresentam a propriedade que todos os raios emanados de um de seus focos refletem-se no foco conjugado. (É oportuno lembrar que Apolônio foi um dos primeiros matemáticos a estudar, de maneira sistemática, as secções cônicas: elipse, parábola e hipérbole). Uma outra referência aos espelhos parabólicos foi feita pelo matemático grego Pappus de Alexandria (c.260 d.C -?) (Cf. Kline, op.cit.).

Durante alguns séculos, praticamente nada de novo foi acrescentado ao estudo da Ótica e da Catóptrica, além do que vimos anteriormente. Somente nos dois primeiros séculos de nossa era cristã é que alguns novos fenômenos ópticos foram registrados. Assim, parece ter sido Sêneca o primeiro a observar a decomposição espectral da luz solar nas

margens de vidros, conforme já referimos. Sêneca também chegou a observar que uma esfera de vidro cheia d'água poderia ser usada como vidro de aumento, segundo relata John B. Irwin em seu artigo Telescope, escrito para a Encyclopaedia Britannica⁽²⁶⁾. Por seu lado, o matemático e inventor grego Heron de Alexandria (c.20 d.C. - ?), em seu livro intitulado Catóptrica, explica a propagação retilínea da luz e formula, com base na lei da reflexão de Aristóteles e Euclides, o princípio de que o trajeto descrito por um raio luminoso é mínimo, segundo nos fala A. d'Abro em The Rise of the New Physics⁽²⁷⁾. Ainda nesse livro, Heron trata de espelhos côncavos e convexos, bem como de sua combinação. Parece ser ainda dele a observação de que se pode obter várias imagens de um objeto colocado entre dois espelhos planos formando um determinado ângulo. Apesar dessa observação, o caleidoscópio, que utiliza tal princípio, só foi inventado por Brewster em 1816 (Cf. Asimov, op.cit.). Heron, que era um grande inventor⁽²⁸⁾, não poderia deixar de usar princípios da ótica por ele conhecidos para inventar algum aparelho que utilizasse aqueles princípios. Assim é que, em seu livro Dioptra, descreve um instrumento de Agrimensura que era usado com os mesmos propósitos do moderno teodolito. Ainda nesse livro, existe um capítulo sobre Astronomia, no qual ele descreve um método gráfico para determinar a distância entre Alexandria e Roma, usando para tal a diferença de tempo ocorrida num eclipse lunar observado nas duas cidades⁽²⁹⁾. Com relação ao fenômeno da visão, Heron era partidário da teoria platônica.

O fenômeno da refração, isto é, o desvio sofrido pela luz ao atravessar uma superfície de separação entre dois meios de propriedades óticas diferentes, foi estudado pelo astrônomo grego Cláudio Ptolomeu (85-165). Em seu livro Ótica, ele descreve a refração da luz solar e das estrelas ao atravessar a atmosfera terrestre. Pela primeira vez é feita uma tentativa de estudar analiticamente tal fenômeno através de uma tabela na qual são registrados os ângulos de incidência e de refração de raios luminosos que atravessam superfícies de separação entre ar-água, ar-vidro e água-vidro, ângulos esses medidos por um aparelho bem simples que o próprio Ptolomeu inventara. Ao examinar essa tabela, o formulador do modelo geocêntrico planetário observou que, quando esses ângulos são pequenos, a relação entre os mesmos permanece constante (Cf. Strong, op.cit., Osada, op.cit.). No entanto, para ângulos maiores, ele formulou uma lei do tipo $r = ai + bi^2$ (r = ângulo de refração; i = ângulo de incidência; a e b são constantes). Apesar de Ptolomeu, em seu famoso Almagest, haver registrado uma tabela de cordas de arcos (ainda não existia o concei-

to de seno!), ele não chegou à expressão correta da lei dos senos da refração, porque, segundo Boyer (op.cit.), talvez ele tenha sofrido influência das fórmulas pitagóricas para números poligonais, cujas segundas diferenças obedecem a uma lei quadrática. Ainda para Boyer, durante os primeiros 1500 anos de existência da Trigonometria (esta fora fundada pelo astrônomo grego Hiparco de Nicéia (c. 190-c.120), por volta do ano 140 a.C.), ela foi empregada quase que exclusivamente na Astronomia e na Geometria, sendo que somente a partir do século XVII é que ela foi aplicada na Ótica e em outros ramos da Física. Ainda em sua Ótica, Ptolomeu trata de espelhos, defende a visão binocular e a idéia platônica sobre a natureza de tal visão.

Novas contribuições ao estudo da Ótica só apareceram na Idade Média, e desta vez no Oriente Médio⁽³⁰⁾, através dos trabalhos de Al-Hazen. Em seu livro Kitab Al-Manazer (Tesouro da Ótica), escrito por volta de 1038, além de uma explicação correta sobre a visão dos corpos, conforme salientamos anteriormente, ele completou a lei da reflexão da luz ao afirmar que o raio incidente, o raio refletido e a normal estão no mesmo plano. Apesar de muito esforço e experimentação sobre a refração, Al-Hazen não conseguiu formular corretamente sua lei, porém, corrigiu as tabelas de refração de Ptolomeu. Ao estudar a estrutura do olho, principalmente o cristalino, mostrou então que o poder de ampliação de uma lente era devido à sua curvatura, e não a uma propriedade intrínseca à sua composição. Al-Hazen construiu ainda um sistema de lentes e discutiu propriedades de espelhos esféricos e parabólicos, principalmente a determinação de seus focos, determinação essa que ficou conhecida como o “problema de Al-Hazen” (cf. Boyer, op. cit.). Ao tentar determinar o foco dos espelhos esféricos, descobriu a aberração de esfericidade, isto é, a indefinição do foco de tais espelhos quando um feixe de raios luminosos paralelos, incidentes nos mesmos, for de grande abertura angular. (Isto não acontece com os espelhos parabólicos, já que os raios luminosos incidentes são refletidos e focalizados em um mesmo ponto, independentemente da distância daqueles raios ao eixo do espelho. É por essa razão que os espelhos parabólicos são empregados em telescópios, holofotes e faróis de carro, pois que, uma pequena fonte luminosa, colocada no foco objeto do espelho, produz um feixe refletido paralelo de luz.) É ainda de Al-Hazen a observação de que há um aparente aumento da Lua quando próxima do horizonte, e que o crepúsculo solar permanece até mesmo quando o Sol está cerca de 19° abaixo do horizonte. Tais fenômenos decorrem da refração da luz na atmosfera terrestre, observou ainda Al-Hazen (cf. Boyer, op.cit.). Deve-se

ainda a esse sábio árabe a obtenção de imagens em câmaras escuras, bem como a redescoberta da lei do trajeto mínimo da luz de Heron, segundo registra George F. Kneller em A Ciência como Atividade Humana⁽³¹⁾. No entanto, somente na metade do século XVII é que o matemático francês Pierre Fermat (1601-1665), ao estender tal lei à Natureza e tomá-la como um “princípio de mínima ação” universal, a utiliza para demonstrar matematicamente as leis da reflexão e da refração da luz, como veremos mais adiante.

A tradução latina da obra de Al-Hazen exerceu grande influência sobre os filósofos ocidentais da Idade Média. Assim é que Robert Grosseteste, ao tomar contacto com ela, chegou a fazer experiências com lentes e espelhos. No entanto, como o Tesouro da Ótica é uma obra de conteúdo puramente geométrico, sem conter qualquer reflexão sobre a natureza da luz, Grosseteste retoma a concepção platônica sobre a mesma, isto é, segundo a qual a luz é criação de Deus desde o Primeiro Dia, e a toma como a substância primordial do Universo, conforme já salientamos, e com isso promove a integração entre a Ótica e a Teologia. Essa integração prossegue com seu discípulo Roger Bacon quando afirma, em seu livro Opus Majus, publicado em 1267, que um raio luminoso atingindo o olho “diretamente e perpendicularmente” é a imagem perfeita da graça. Ao lermos a Bíblia, prossegue Bacon, além de descobrirmos os princípios espirituais temos de perceber também, através da visão, como a sabedoria divina se manifesta no mundo visível (Cf: Pierre Thuillier, Espace et Perspective au Quattrocento⁽³²⁾). Bacon também se interessou pelo estudo da Ótica Geométrica, chegando a construir lentes e a sugerir seu emprego em espetáculos teatrais. Ao afirmar que, através de lentes, o Sol, a Lua e as estrelas poderiam aparecer mais perto de nós, Bacon torna-se o precursor do telescópio (Cf. Irwin, op.cit.). Além de sua explicação para o arco-íris, anteriormente já por nós mencionada, Bacon admitia que a luz necessita de um certo tempo para se propagar. É oportuno salientar que a Ótica Geométrica também foi objeto de estudo por parte de um contemporâneo de Bacon, que foi John Peckham(? -1292), Arcebispo de Canterbury.

Durante a Idade Média, o estudo da Ótica Geométrica esteve intimamente ligado ao da Perspectiva, pois esta, antes de conhecer sua primeira teorização por parte dos pintores e arquitetos do Quattrocento (nas primeiras décadas do século XV), era designada como a “Ciência da Ótica” (Cf. Pierre Thuillier, op. cit.). Assim é que vários livros que traziam como título a palavra Perspectiva tratavam também da Ótica Geométrica. Por exemplo, Witelo, em seu livro Perspectiva - um tratado fundamentado em

Ptolomeu e Al-Hazen - escrito por volta de 1274, além de apresentar uma primeira percepção do espaço, descreve também suas experiências relacionadas com a dispersão da luz branca em um prisma hexagonal e em esferas de vidro cheias d'água, com as quais abordou o problema das cores do arco-íris. A Ótica, através da Perspectiva, também foi objeto de estudo por parte de Biaggio de Parma, no livro Quaestiones Perspectivae, escrito por volta de 1390, e por parte do matemático florentino Paolo Toscanelli (1397-1482), em seu livro Della Prospettiva, de 1420 (Cf. Thuillier, op.cit.).

Muito embora os espelhos ustórios ou incandescentes fossem conhecidos na Grécia Antiga e vários trabalhos sobre as propriedades das lentes houvessem aparecido depois disso, conforme vimos até aqui, o emprego de lentes para corrigir a visão, isto é, seu emprego como óculos só ocorreu no final da Idade Média, entre 1280 e 1289, no vale do rio Arno, na Itália. No entanto, eles eram muito grosseiros, dando imagens deformadas dos objetos, pois as técnicas de polimento de vidro ainda não eram muito apuradas naquela época (Cf. Sedgwick, Tyler e Bigelow, op. cit.; Rosmorduc, op. cit.).

A melhora na técnica de polimento de vidros, ocorrida durante a Renascença, permitiu que se estabelecesse a profissão de fabricante de óculos. E foram justamente esses profissionais que inventaram os instrumentos ópticos, instrumentos esses que estenderam o emprego da visão: microscópio e telescópio. O microscópio composto foi inventado pelo holandês Hans Jessen, auxiliado por seu filho Zacharias (1580-c.1638), em 1590. Tal instrumento era um dispositivo bastante primário constituído por uma lente côncava e uma convexa, de pequeno poder de aumento. Um dispositivo semelhante a esse, ou seja, duas lentes colocadas em linha foi utilizado pelo fabricante de óculos, o holandês Hans Lippershey(c.1570-c.1619) , em 1608, para observar um cata-vento de uma torre distante, e com ele perceber então que o cata-vento lhe parecia ampliado, segundo o relato de Tony Osman em Eureka!⁽³³⁾. Como decorrência desse fato, Lippershey construiu vários desses dispositivos, posteriormente denominados de telescópio, como veremos a seguir, e vendeu-os ao governo holandês, já que este estava particularmente interessado em utilizá-los para fins militares⁽³⁴⁾.

O uso científico desses dois instrumentos ópticos deve-se, contudo, ao astrônomo e físico italiano Galileu Galilei (1564-1642). Ao ouvir falar do instrumento holandês, Galileu compreendeu o seu mecanismo e, em meados de 1609, construiu seu próprio telescópio⁽³⁵⁾, constituído

de duas lentes de óculos (uma convergente e uma divergente), montadas em dois tubos corrediços de chumbo, e com um aumento equivalente a três diâmetros. Percebendo a importância de tal dispositivo⁽³⁶⁾, Galileu passou a polir suas próprias lentes, conseguindo com isso construir telescópios cada vez mais potentes, sendo que o maior que conseguiu construir tinha um diâmetro em torno de 4,4 cm e um poder de aumento de 33 diâmetros. Com tais instrumentos, Galileu fez, no mesmo ano de 1610, uma série de descobertas astronômicas, entre as quais se destacam: as montanhas e crateras da Lua, os satélites de Júpiter, o fato de que a Via Láctea é constituída de uma miríade de estrelas, as fases de Vênus, o caráter distinto de Saturno e as manchas solares⁽³⁷⁾.

Com relação ao microscópio, Galileu foi o primeiro a fazer com ele uma observação científica. Conforme nos fala Cortes Pla em seu livro Galileo Galilei⁽³⁸⁾, por volta de 1612, Galileu utilizou um telescópio às avessas para descrever o olho complexo de um inseto, bem como para descrever a textura das folhas. Maravilhado com o que acabara de ver, chegou a oferecer um microscópio a seu amigo, o Príncipe Cesi, para que este visse milhares de coisas curiosas e, também, verificasse como “a pulga é horrível” (cf. Pla, op.cit.). Não obstante o gênio de Galileu, escaparam-lhe, contudo, as duas grandes descobertas da visão microscópica ocorridas no século XVII: a célula (1665) e a bactéria (1683)⁽³⁹⁾.

Ainda na Renascença há novas contribuições ao estudo da Ótica Geométrica. Por exemplo, o físico italiano, o abade Francesco Maurolycus(1494-1575), parece ter sido o primeiro a mostrar que a luz se desloca paralelamente ao atravessar uma lâmina de faces também paralelas. Por seu lado, Della Porta, na segunda edição de sua obra Magia Naturalis(1589) já por nós referida, além da explicação e descrição do telescópio, descreve ainda a maneira de se obter imagens em uma câmara escura (comparada por ele ao olho humano), bem como apresenta as primeiras idéias do estereoscópio. Ao realizar experiências com espelhos côncavos, descobriu Della Porta que o foco desses espelhos tinha a propriedade de inverter a imagem, isto é, enquanto objetos colocados entre o foco e o espelho apresentavam imagens virtuais e diretas, as mesmas se tornariam reais e invertidas quando os objetos fossem colocados além do foco. Isso o levou a denominar o foco de um espelho côncavo de “ponto de inversão” (Cf. Kistner, op. cit.).

Apesar de Della Porta haver feito estudos teóricos do telescópio, seu completo entendimento só foi conseguido pelo astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630), já que tal instrumento carecia de

uma teoria ótica para responder às críticas que os adversários de Galileu faziam às suas observações telescópicas. Tais observações eram consideradas como ilusões óticas, uma vez que o sábio italiano não possuía uma teoria ótica do telescópio com a qual pudesse explicar o que via com o mesmo. Assim é que em agosto de 1610, usando um telescópio emprestado pelo Duque Ernesto de Colônia, Kepler escreveu em poucas semanas um tratado no qual fundou uma nova ciência: Dióptrica, ciência da refração das lentes. Seu Dioptrice é um livro comparado aos Elemento de Geometria de Euclides, pois através de definições, axiomas, problemas e proposições (num total de 141), Kepler desenvolve toda a teoria ótica instrumental. Por exemplo, ele descreve um telescópio no qual usa duas lentes convexas, em vez de uma côncava e uma convexa, como utilizara Galileu. Esse dispositivo de Kepler foi posteriormente chamado de telescópio Kepleriano. Nesse livro, Kepler descreve ainda um microscópio composto bem como a maneira de determinar o foco de um espelho parabólico. Estudou matematicamente a refração sem, contudo, chegar corretamente à sua lei; esta ocorreu ainda na primeira metade do século XVII através dos trabalhos de Harriot, Snell e Descartes, já por nós mencionados e aos quais voltaremos logo mais adiante.

O interesse de Kepler pelo estudo da ótica já havia sido manifestado desde 1604, por ocasião de seu Suplemento a Witelo, no qual explica o princípio da câmara escura, o funcionamento dos óculos para míopes e presbitas, e expõe sua teoria de que a visão decorre do estímulo da retina que é tingida com os raios coloridos do mundo visível, e depois transmitida ao cérebro por uma corrente mental. Mais tarde, através de seu estudo teórico das lentes, Kepler completaria sua teoria pioneira da visão afirmando que os raios luminosos provenientes de objetos visíveis, após refratarem-se nas “lentes” dos olhos, projetam-se em forma invertida na retina. Ainda em seu livro de 1604, Kepler afirma que a intensidade da luz varia com o inverso do quadrado da distância e, com isso, pode ser considerado o precursor da fotometria⁽⁴⁰⁾. Para explicar as cores, Kepler supõe que as mesmas dependem da densidade e da transparência dos objetos. Sobre a refração achava Kepler que a mesma se deve à maior resistência dos meios densos. É oportuno salientar que Kepler era aristotélico na medida em que defendia a idéia incorreta sobre a infinitude da velocidade da luz (Cf. Koestler, op. cit.; Sedgwick, Tyler e Bigelow, op. cit.).

Segundo alguns historiadores da Ciência, é no século XVII que o estudo da ótica assume caráter científico com a demonstração correta da Lei da refração da luz. Essa lei havia sido experimentalmente descoberta

por Harriot e, independentemente, por Snell (1621), porém sem terem tornado público tal feito, conforme já tivemos oportunidade de relatar. Um primeiro tratamento matemático dessa lei foi feito por Descartes, em 1637, em La Dioptrique, escrito como suplemento ao seu famoso Discours. Nesse trabalho, Descartes mostra que são os senos⁽⁴¹⁾ e não os ângulos da incidência e de refração que permanecem constantes quando a luz atravessa a superfície de separação de dois meios transparentes. (Segundo Born e Wolf (op. cit.), Descartes provavelmente era conhecedor do trabalho de Snell, porém não fez nenhuma referência a ele naquele suplemento,).

Ao estudar a refração da luz através de meios transparentes, Descartes utiliza a teoria corpuscular da luz e conclui que a velocidade da mesma é maior nos meios mais refringentes, isto é, mais densos⁽⁴²⁾. Ainda em La Dioptrique, após descrever a visão através do olho, Descartes abordou o problema de projetar lentes para telescópios, microscópios, e outros instrumentos ópticos porque acreditava na importância desses instrumentos para a Ótica e Biologia. No entanto, desde a Antiguidade era sabido que as lentes esféricas apresentavam problemas de focagem. Por exemplo, objetos distantes não produziam imagens pontuais, isto é, o foco-imagem da lente esférica não é bem definido. Por outro lado, objetos colocados no foco-objeto dessa lente não produzem raios emergentes paralelos. Apesar de Kepler haver sugerido que qualquer secção cônica⁽⁴³⁾ resolveria essa questão, foi Descartes quem encontrou a solução para a mesma. Descartes atacou o problema mais geral de encontrar qual a superfície que, separando dois meios, faria com que os raios luminosos partindo de um mesmo ponto, e após se refratarem nesta superfície, convergiriam para um outro ponto bem determinado. Descobriu então Descartes que a curva que gera tal superfície é uma oval, hoje conhecida como oval de Descartes. Essa curva e suas propriedades refratantes foram discutidas então por Descartes, quer em seu La Dioptrique, quer no Livro II de La Geometrie⁽⁴⁴⁾, escrito em 1637, como terceiro suplemento ao seu Discours. (A definição moderna dessa oval é a seguinte: lugar geométrico dos pontos M que satisfazem à condição $FM \pm n F'M = 2a$ - onde F e F' são pontos fixos (focos), 2a é um número real maior do que FF', e n é qualquer número real. Se n=1, a curva torna-se uma elipse (Cf. Kline, op. cit.).).

O descobridor da Geometria Analítica⁽⁴⁵⁾ preocupou-se também com a natureza da luz, havendo então formulado uma teoria idealista segundo a qual a luz era essencialmente uma pressão que se transmitia através de um meio perfeitamente elástico: o éter⁽⁴⁶⁾ - que enche todo o espaço. Ele atribuía a diversidade das cores a movimentos rotatórios das

partículas luminosas com diferentes velocidades através desse meio (Cf. Born e Wolf, Op. Cit.; Magie, op. cit.). Convém ressaltar que Descartes utilizou seu estudo da refração para explicar o fenômeno do arco-íris, no trabalho Les Météores, escrito também em 1637 como suplemento ao seu Discours, conforme já tivemos a oportunidade de falar neste trabalho.

A lei da refração da luz recebeu uma outra demonstração por intermédio de Fermat. Em 1657, ele anunciara em uma carta a Cureau de La Chambre o seu famoso princípio do tempo mínimo: - “A natureza sempre escolhe os menores caminhos” (Cf. Born e Wolf, op.cit.). De acordo com este princípio, observou Fermat, a luz leva sempre o menor tempo para seguir a sua trajetória. Conforme vimos anteriormente, esse princípio já havia sido utilizado por Heron e depois por Al-Hazen na descrição da lei da reflexão da luz. Contudo, foi Fermat quem o utilizou para demonstrar a lei da refração da luz, em 1661 (Cf. Kline, op. cit.). Para chegar a essa lei, Fermat teve que formular a hipótese de que as “resistências” (inverso da velocidade da luz) dos meios mais densos eram maiores que as dos meios menos densos⁽⁴⁷⁾, em frontal desacordo com o ponto de vista de Descartes que afirmava exatamente o contrário, isto é, a velocidade da luz é maior nos meios mais densos. A hipótese de Fermat foi confirmada pelo físico e astrônomo holandês Christiaan Huygens (1629-1695) no famoso Traité de la Lumière publicado em Paris, em 1678, ao demonstrar, por intermédio de sua teoria ondulatória da luz, que a relação entre os senos dos ângulos de incidência (i) e de refração (r) é igual à relação entre as velocidades da luz nos meios de incidência (v_1) e de refração (v_2), ou seja: $\text{sen } i / \text{sen } r = v_1 / v_2$ ⁽⁴⁸⁾. Apesar dessa demonstração de Fermat⁽⁴⁹⁾, a comunidade científica internacional só começou a aceitar a hipótese de Huygens a partir da formulação matemática da teoria ondulatória da luz realizada pelo físico francês Augustin-Jean Fresnel (1788-1827), formulação essa iniciada em torno de 1814, e posteriormente com a experiência do físico francês Jean-Bernard-Léon-Foucault (1819-1868) realizada em 1850, na qual mostrou que a velocidade da luz na água é menor do que no ar, confirmando portanto a hipótese de Fermat. (Os trabalhos de Huygens, de Fresnel e de Foucault serão objeto de estudo na segunda parte desta Crônica da Ótica.).

Com a demonstração da lei da refração da luz por Fermat, em 1661, encerramos a primeira parte da Crônica da Ótica Clássica, parte essa que se relaciona, basicamente, com o que hoje os livros didáticos sobre ótica denominam de Ótica Geométrica e que trata dos fenômenos ópticos para cuja explicação é suficiente o conceito de raio luminoso, tais como aqueles fenômenos que envolvem a formação de imagens em espelhos

e lentes. A outra parte da classificação didática da ótica, a Ótica Física, relaciona-se com fenômenos ópticos que necessitam do conceito de onda luminosa para poderem ser explicados. Tais fenômenos começaram a ser registrados a partir de 1665. Os físicos ingleses Robert Boyle (1627-1691) e Robert Hooke descobriram, independentemente, os primeiros fenômenos de interferência, ao observarem cores em películas delgadas⁽⁵⁰⁾. Em sua Micrographia (1665), Hooke fala também na presença de luz na sombra geométrica de um objeto. No entanto, esse fenômeno de difração da luz já havia sido observado anteriormente pelo físico italiano Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) porém os resultados de suas experiências só foram publicados no livro. Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride, editado em 1665, após sua morte. O terceiro fenômeno luminoso que caracteriza a Ótica Física é o fenômeno da polarização, e foi descoberto por Huygens (1678), ao tentar interpretar o fenômeno da dupla-refração que o médico dinamarquês Erasmus Bartholinus(1628-1698) havia observado em 1669 (Cf. Born e Wolf, op. cit.). O desenvolvimento da Ótica Física será objeto da segunda parte desta Crônica da Ótica Clássica.

Notas e Referências Bibliográficas

1. ROSMORDUC, J. De Tales a Einstein. Trad. José Carlos Fernandes. Lisboa, Caminho, 1983.
2. “E disse Deus: haja luz. E houve luz”. Moisés 1.3. Gênesis.
3. HOFFMANN, B. L’etrange historie des quanta. Éditions du Seuil. 1981.
4. Existe uma controvérsia em relação a essa hipótese de Pitágoras, já que, enquanto Hoffmann (op.cit.) afirma que esse filósofo grego era partidário da hipótese de que a visão era proveniente dos raios luminosos que chegam aos olhos, para ROBERT WILLIAM DITCHBURN (Encyclopaedia Britannica. Micropaedia, v. 10. The University of Chicago, 1978), Pitágoras defendia a hipótese contrária, isto é, a visão ocorre quando os raios luminosos partindo dos olhos atingem o objeto que está sendo observado.
5. DITCHBURN, R.W. (op.cit.)
6. A hipótese dos “raios visuais” foi pela primeira vez proposta pelo físico e matemático grego Archytas de Tarentum na primeira metade do século IV a.C.. Para o filósofo da ciência Max Jammer (The Philosophy of Quantum Mechanics, John Wiley & Sons, 1974), a teoria da visão através de “raios visuais” é a mais antiga teoria de variáveis ocultas, pois esta é indetectável por observação direta, mas é caracte-

rizada por propriedades matemáticas. Assim, os “raios visuais” eram caracterizados por sua trajetória geométrica retilínea, porém eram indetectáveis por observação direta.

7. STRONG, J. Concepts of classical optics. W.H. Freeman, 1958.
8. BRONOWSKI, J. A escalada do homem. Trad. Núbio Negrão. Brasília, Martins Fontes, Universidade de Brasília, 1979.
9. NEEDHAM, J. La science chinoise et l'occident. Trad. Eugene Simion, R. Dessureault e J.M. Rey. Editions du Seuil, 1973.
10. KLINE, M. Mathematical thought from ancient to modern times. Oxford University Press, 1972.
11. BOYER, C.B. A history of mathematics. John Wiley & Sons, 1968.
12. NUSSENZVEIG, H.M. The theory of rainbow. Sci. Am., 236(4): 116-27, 1977.
13. LOSEE, J. Introdução histórica à filosofia da ciência. In: O homem e a ciência. Trad. Borisas Cimblaris. São Paulo, Itatiaia, Universidade de São Paulo, 1979. v. 5.
14. KISTNER, A. Historia de la física. Trad. Rodrigo Gil. Labor, 1934.
15. NEWTON, I. Optics. Great book of the western world. Encyclopaedia britannica, University of Chicago. v. 34.
16. Parece haver sido o estadista e filósofo romano Lucius Annaeus Sêneca(4 a.C.-55 d.C.) o primeiro a observar a decomposição espectral da luz solar.
17. OSADA, J. Evolução das idéias da física. São Paulo, Edgard Blücher, 1972.
18. BORN, M. & WOLF, E. Principles of optics. Pergamon, 1970.
19. MICROPAEDIA. In: Encyclopaedia britannica. University of Chicago, 1978. v. 2.
20. Para um estudo da concepção dos gregos sobre a constituição da matéria ler nosso artigo - Do átomo filosófico de Leucipo ao átomo científico de Dalton. Rev. Ens. Fís., 2(2): 70-6, 1980 – e o artigo: ALMEIDA, E.S. Teoria atômica grega. Rev. Ens. Fís., 5(2): 53-9, 1983.
21. Platão admitia que os três elementos restantes se relacionam com os poliedros regulares pitagóricos, da seguinte maneira: água-icosaedro, ar-octaedro, e terra-hexaedro. Ainda para Platão, o quinto poliedro regular conhecido, o dodecaedro, simbolizava o Universo como um todo.
22. ASIMOV, I. Os gênios da humanidade. Trad. José Reis (Coord.). Bloch, 1974.

23. SEDGWICK, W.T., TYLER, H.W. & BIGELOW, R.P. História da ciência. Trad. Leonel Vallandro. Globo, 1950.
24. O pesquisador grego M.Sakkas construiu uma réplica da arma solar supostamente utilizada por Arquimedes, repetindo o feito deste.(Cf. Planeta, 24, Agosto de 1974.)
25. MICROPAEDIA. In: Encyclopaedia britannica. University of Chicago, 1978. v. 8.
26. IRWIN, J.B. Telescope. In: Encyclopaedia britannica. University of Chicago, 1978. v. 18.
27. D'ABRO, A. The rise of the new physics. Dover, 1952.
28. Entre as invenções de Heron encontra-se a célebre aleolípila, a precursora da máquina a vapor, que era um “brinquedo” constituído de uma esfera oca, na qual estavam presos dois tubos recurvados. Fervendo a água contida na esfera, o vapor formado ao escapar pelos tubos recurvados fazia a mesma girar. (Cf. MOURA, O.J.C. A termodinâmica e a revolução industrial. Departamento de Física da UFPa. Mimeo. 1981.)
29. MICROPAEDIA. In: Encyclopaedia britannica. University of Chicago, 1978. v. 5.
30. Segundo John Desmond Bernal (Historia Social de la Ciencia. Trad. Juan Ramón Capella. Ediciones Península, 1968), a enfermidade frequente dos olhos nos países desérticos e tropicais fez com que o ramo da medicina que mais se desenvolvesse na Idade Média fosse relacionado com os olhos, e conseqüentemente, isso fez com que se desenvolvesse, também a ótica da visão.
31. KNELLER, G.F. A ciência como atividade humana. Trad. Antonio José de Souza. Rio de Janeiro, Zahar, São Paulo, Universidade de São Paulo, 1980.
32. THUILLIER, P. Espace et perspective au quattrocento. La Recherche, 160(15): 1384-98, 1984.
33. OSMAN, T. Eureka! Trad. Manuel de Seabra. Labor do Brasil, 1975.
34. Existe muita controvérsia quanto à invenção do telescópio. A. Kistner (op.cit.) diz que Zacharias Jenssen teria imitado, em 1604, um telescópio italiano datado de 1590. (O físico e filósofo italiano Giambatista Della Porta (c.1535-1615), em sua obra Magia Naturalis, composta de 4 livros publicada em 1558, e reeditada em 1589 aumentada para 20 livros, chegou a descrever a visão binocular e o telescópio.) Por seu lado, Rosmorduc(op. cit.) atribui ao fabricante de óculos holandês Jacob Métius a invenção do mesmo. Contudo, para Irwin(op. cit.) e para Arthur Koestler (Os Sonâmbulos. Trad. Alberto

Denis. Instituição Brasileira de Difusão Cultural, 1961.), a invenção do telescópio é de autoria indefinida, pois, apesar de Lippershey haver construído vários deles em novembro de 1608, e vendido ao governo holandês, este, ao oferecer de presente ao Rei da França dois exemplares do telescópio de Lippershey, permitiu que em 1609 vários telescópios aparecessem para a venda em Paris, na Alemanha, em Londres e em várias cidades da Itália.

35. O filósofo da Ciência, o norte-americano Stillman Bayant Drake (1910-) em seu livro Galileu (Trad. Maria Manuela Pecegueiro. Publicações Dom Quixote, 1981.) afirma que a palavra telescópio foi inventada em um banquete oferecido a Galileu pela Academia Linceana (Accademie dei Lincei) fundada em Roma, em 1603, “por quatro jovens chefiados pelo Príncipe Frederico Cesi”, banquete esse que lhe foi oferecido em virtude de sua eleição para aquela Academia. Essa história é conta da também por Koestler(op.cit.).
36. Inicialmente Galileu ofereceu seu telescópio à República de Veneza, pois esta como potência marítima poderia utilizá-lo na defesa de seus navios, já que com ele se poderia ver “velas e navios tão distantes que demorava duas horas antes que o distinguisse o olho nu” (...) “O Senado de Veneza, grato, dobrou imediatamente o salário de Galileu para mil escudos por ano, e tornou-lhe vitalícia a cátedra de Pádua (pertencente à República de Veneza). Não tardou que os fabricantes locais de óculos produzissem telescópios da mesma força, e os vendessem pelas ruas por poucos escudos” (Cf. Koestler, op. cit.). Galileu percebeu então que melhor seria utilizar o telescópio para olhar os céus, antes que sua reputação como “estrategista” militar caísse em desgraça perante o governo italiano.
37. As observações telescópicas de Galileu sobre a Lua, sobre os satélites de Júpiter e sobre a Via Láctea foram apresentadas no livro Mensageiro das Estrelas (Sidereus Nuncius) , publicado em 1610, que se constituiu em sua primeira publicação científica. Tais descobertas produziram reações violentas, já que colocavam em dúvida as afirmações de Aristóteles sobre a perfeita esfericidade da Lua e, também, sobre a idéia de que só a Terra poderia ter satélites. Em vista disso, filósofos e astrônomos aristotélicos declaravam que as observações de Galileu eram ilusões de ótica, ridicularizando-o e acusando-o de fraude. A única exceção foi a de Kepler, que o defendeu. Talvez por causa disso é que Galileu apresentou suas outras descobertas(a forma trigêmea de Saturno - a potência do telescópio de Galileu não conseguia resolver os anéis desse planeta - e as fases de

Vênus) em forma de anagramas, cuja solução dos mesmos tanto torturavam Kepler. Convém ressaltar que Galileu não foi o primeiro astrônomo a apontar o telescópio para o céu, e a fazer descobertas astronômicas. No verão de 1609, o astrônomo e matemático inglês Thomas Harriot (1560-1621) - célebre por haver introduzido os símbolos maior ($>$) e menor ($<$) na Matemática - fez observações telescópicas da Lua, com as quais organizou mapas da superfície lunar. Harriot observou, também, os satélites de Júpiter e as manchas solares. Ele descobriu ainda a lei da refração da luz antes do matemático holandês Willebrord Van Roijen Snell (1591-1626). (Este havia observado experimentalmente, em 1621, que a mudança do raio refratado em relação à direção do raio incidente era decorrente de uma lei do tipo seno.) No entanto, Harriot não publicou essas descobertas. Em vista disso, o mérito da descoberta das manchas solares é conferido ao astrônomo holandês Johannes Fabricius (1587-c.1615), pois publicou um livro no qual referia-se às mesmas, em 1611. É oportuno frisar que nesse mesmo ano o jesuíta alemão Christopher Scheiner também publicou um livro sobre as manchas solares. No entanto, diferentemente de Galileu, Scheiner usava vidros escuros em suas observações do Sol. Aliás, como se sabe, a cegueira de Galileu decorreu de suas observações solares (Cf. Koestler, op.cit.; Drake, op.cit.; Osman, op.cit.).

38. PLA, C. Galileo Galilei. Espasa-Calpe Argentina, 1946.

39. Utilizando um microscópio composto de várias lentes, porém de fraco poder de aumento, o físico inglês Robert Hooke (1635- 1703) fez várias observações microscópicas de insetos, plumas de aves e escamas de peixe. No entanto, a grande descoberta que marcou para sempre o seu nome na Biologia, ele a fez ao examinar a cortiça. Através de cortes delgados, Hooke observou que a estrutura da cortiça era constituída de unidades ocas, retangulares e regularmente alinhadas, as quais denominou células. As observações microscópicas de Hooke foram descritas em seu livro Micrographia, publicado em 1665. A outra grande descoberta da visão microscópica foi a realizada pelo microscopista holandês Anton Van Leeuwenhoek (1632-1723), que era um exímio construtor de lentes muito delicadas, bem finas e de pequena distância focal (algumas não chegavam a ultrapassar a cabeça de um alfinete). Assim, a partir de 1673, utilizando-se de uma montagem na qual uma única dessas lentes era utilizada para observar objetos iluminados por um espelho côncavo, isto é, através de um microscópio simples, Leeuwenhoek foi o primeiro cientista a desco-

- brir seres vivos unicelulares, hoje chamados de protozoários. Foi, também, o primeiro a descrever um espermatozóide. Contudo, a sua grande descoberta ocorreu em 1683, ocasião em que descreveu as primeiras bactérias.
40. Medições precisas da intensidade da luz das fontes luminosas e baseadas na Lei de Kepler foram realizadas pelo matemático, astrônomo, físico e filósofo suíço-alemão Johann Heinrich Lambert (1728-1777) - o primeiro a fazer a demonstração rigorosa da irracionalidade de π . Tais medidas levaram-no a estabelecer as leis fundamentais desse ramo da Física, e foram apresentadas em seu livro Photometria, publicado em 1760.
 41. Muito embora a palavra seno já fosse conhecida, já que ela foi introduzida por Robert de Chester no século XII (Cf. Boye op. cit.), Descartes não usou tal denominação em seu trabalho. Ao tratar da lei da refração, Descartes referia-se às semi-cordas do dobro dos ângulos de incidência e de refração.
 42. MAGIE, W.F. A source book in physics. McGraw-Hill, 1935.
 43. As secções cônicas eram conhecidas desde Apolônio de Perga, conforme já vimos.
 44. DESCARTES, R. The geometry. Great books of the western world. Trad. David Eugene. Enciclopaedia britannica, Smith & Marcia L. Latham. 1971. v. 31.
 45. Independentemente de Descartes e anterior a este, Fermat também contribuiu para o desenvolvimento da Geometria Analítica, em trabalhos realizados em 1629, nos quais procurou completar o trabalho de Apolônio de Perga, usando para isso as técnicas algébricas que o matemático e advogado francês François Viète (1540-1603) utilizara para resolver alguns problemas de Geometria. (Cf. Kline, op. cit.).
 46. Segundo André Ambrósio Abramczuk (O Mito da Ciência Moderna, Cortez Editora/Autores Associados, 1981), Descartes foi levado ao conceito de éter porque ele não admitia a idéia da força de ação à distância. Para ele, a interação de sistemas físicos só podia ocorrer por contacto.
 47. Ver um excelente estudo dessa demonstração de Fermat em Wolfgang Yourgrau e Stanley Mandesltam (Variational principles in dynamics and quantum theory. Dover, 1979).
 48. HUYGENS, C. Treatise on light. Great books of the western world. Trad. Silvanus P. Thompson. Enciclopaedia britannica. 1971.
 49. Mais ou menos por essa mesma época em que Huygens fez a demonstração da lei de refração da luz. O matemático e filósofo alemão Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) também a

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) também a demonstrou aplicando o cálculo diferencial (que ele havia desenvolvido em 1675) à condição de que “a dificuldade de caminho” do raio (comprimento de percurso vezes a resistência do meio) é mínima, conforme nos falam Losee (op. cit.) e Yvon Belaval (MACROPAEDIA. In: Encyclopaedia britannica. University of Chicago, 1978. v. 10).

50. O fenômeno da interferência em películas delgadas foi estudado por Newton. Daí por que a figura de interferência resultante é hoje conhecida como os “anéis de Newton”.