

A um passo da Física Quântica



Conselho Editorial da LF Editorial

Amílcar Pinto Martins - Universidade Aberta de Portugal

Arthur Belford Powell - Rutgers University, Newark, USA

Carlos Aldemir Farias da Silva - Universidade Federal do Pará

Emmánuel Lizcano Fernandes - UNED, Madri

Iran Abreu Mendes - Universidade Federal do Pará

José D'Assunção Barros - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Luis Radford - Universidade Laurentienne, Canadá

Manoel de Campos Almeida - Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Maria Aparecida Viggiani Bicudo - Universidade Estadual Paulista - UNESP/Rio Claro

Maria da Conceição Xavier de Almeida - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Maria do Socorro de Sousa - Universidade Federal do Ceará

Maria Luisa Oliveras - Universidade de Granada, Espanha

Maria Marly de Oliveira - Universidade Federal Rural de Pernambuco

Raquel Gonçalves-Maia - Universidade de Lisboa

Teresa Vergani - Universidade Aberta de Portugal

Mauro Melchiades Doria
Universidade Federal do Rio de Janeiro

A um passo da Física Quântica



2025

Copyright © 2025 o autor
1ª Edição

Direção editorial: Victor Pereira Marinho e José Roberto Marinho

Revisão: Carlos Puig

Ilustrações e capa: Tiago Feitosa

Projeto gráfico e diagramação: Fabrício Ribeiro

Edição revisada segundo o Novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Doria, Mauro Melchiades
A um passo da física quântica / Mauro Melchiades Doria. – 1. ed. – São Paulo: LF Editorial, 2025.

Bibliografia.
ISBN 978-65-5563-661-1

1. Física - História 2. Física quântica 3. Teoria quântica - História I. Título.

25-307452.0

CDD-539.09

Índices para catálogo sistemático:
1. Física quântica: História 539.09

Maria Alice Ferreira - Bibliotecária - CRB-8/7964

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida
sejam quais forem os meios empregados sem a permissão da Editora.
Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107
da Lei Nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998



EDITORIAL

LF Editorial

www.livrariadafisica.com.br

www.lfeditorial.com.br

(11) 2648-6666 | Loja do Instituto de Física da USP

(11) 3936-3413 | Editora

*Se a teoria quântica não lhe chocou profundamente é
porque você ainda não a entendeu.*

Niels Bohr (1885-1962)

Dedicado aos meus filhos, Gaio Mario e Amanda.

Sumário

Prólogo	11
1 A descoberta das propriedades da luz	15
1.1 O arco-íris e a lei esquecida por 600 anos.....	16
1.2 Lentes, telescópios e os gênios também erram.....	26
1.3 Músico da banda descobre luz invisível	40
1.4 Apaixonado pela bateria descobre luz invisível	49
1.5 Pupilo desafia mestre e descobre o mora luminis.....	56
1.6 Os comprimentos de onda no Éter luminífero	65
1.7 A pedra dos vikings e os lados da luz.....	81
2 Os primeiros sinais da Física Quântica	91
2.1 Enriqueceu com a platina e descobriu uma luz quântica	92
2.2 O órfão que via linhas escuras no Sol	103
2.3 O templo em queda no qual uma vez Newton cultuou.....	114
2.4 A luz é a sombra de Deus	125
2.5 A fotografia revela o invisível.....	133
2.6 O código de barras dos elementos	142
3 Os novos elementos e o retorno a Aristóteles.....	153
3.1 O eterno eclipse de 1868	154
3.2 O retorno de Aristóteles e quem sabe dos alquimistas.....	173
3.3 A luz revela novos elementos químicos.....	186
3.4 As terras raras e um herói francês no Brasil.....	194
4 O mundo quântico do calor radiante	211
4.1 A lei das trocas.....	212
4.2 Professor subversivo descobre a polarização do calor	221
4.3 A premonição do corpo negro	236
4.4 A regeneração Termodinâmica das almas	249
4.5 Duvidou do átomo mas descobriu a Física Quântica	258
4.6 O Sol é um corpo negro	273
5 Do cosmos ao átomo.....	285
5.1 A estrela que ressuscita	286
5.2 A empregada doméstica que descobria astros	300

5.3 A profecia certa de Nostradamus.....	314
5.4 A música das esferas desce ao átomo	319
5.5 A descoberta serendípica do professor de meninas	333
5.6 O tamanho do átomo é uma piada de carnaval.....	345
6 A grande conjunção quântica.....	367
6.1 Alguém acredita em Einstein?	368
6.2 A Física Quântica é uma ordem revolucionária.....	382
6.3 Nasce a Tabela Periódica e jaz em Galípoli um prêmio Nobel	396
6.4 Esta tese é um lixo, mas vou pensar nela.....	410
Epílogo	425
Lista de Figuras	429
Lista de Tabelas	433
Índice de nomes.....	435
Referências	443

Prólogo

Nosso tema é o óbvio. Acho mesmo que os cientistas trabalham é com o óbvio. O negócio deles – nosso negócio – é lidar com o óbvio. Aparentemente, Deus é muito treteiro, faz as coisas de forma tão recôndita e disfarçada que se precisa desta categoria de gente – os cientistas – para ir tirando os véus, desvendando, a fim de revelar a obviedade do óbvio. O ruim desse procedimento é que parece um jogo sem fim. De fato, só conseguimos desmascarar uma obviedade para descobrir outras, mais óbvias ainda.

Darcy Ribeiro (1922-1997)

Na construção de uma obra, o tempo que mais conta não é o da execução, mas o da gestação. Não se deve menosprezar esse tempo, embora nada de concreto se alcance nele. Ele não é um tempo vazio, muito pelo contrário, é quando se desenvolve a vontade de se atingir um objetivo e se faz uma travessia por um território de incertezas e conflitos. Antes de se partir para uma ação definitiva e decidida é preciso refletir, amadurecer e passar pelas dúvidas naturais e necessárias do tempo de gestação. É comum gestações se iniciarem sem que se tenha plena consciência delas. Esse tempo, que antecede o nascimento, é sem dúvida um dos mais bonitos da existência, pois nele se deposita a esperança e a crença de uma aurora prestes a surgir.

Segundo o livro de Gênesis da Bíblia, Deus fez o Universo em sete dias. No primeiro criou o céu e a terra, no último criou o homem e no seguinte, o sétimo, descansou do árduo trabalho que executou nos dias anteriores (Gênesis 1:3-25). A Bíblia nos dá a impressão de que Deus, por estar muito seguro do que queria, nada disse a respeito do tempo que antecedeu a criação. Gostaríamos de saber mais sobre os anseios e desejos de Deus neste projeto do Universo. Nos sentiríamos mais próximos Dele se soubéssemos que Ele, como nós, padece das angústias e da ansiedade sofridas no tempo que antecede o nascimento. Seria bonito ler, na Bíblia, algo como, quando Deus se deu conta do que queria, o Universo foi rapidamente construído.

Entre os que criticam a descrição bíblica, está o escritor português José Saramago (1922-2010) que se queixa da impressão deixada por Deus que parece que nada fazia antes da criação do Universo. De fato, do jeito que está escrita, a Bíblia parece evitar o porquê e o para quê da criação do Universo. Saramago conclui que isto não faz nenhum sentido (Saramago, 2009). Fica a pergunta, se o tempo gasto na construção do Universo se limitou a seis dias, qual deve ter sido o tempo que Deus levou gestando a vontade de construí-lo?

Aqui começa a nossa estória a respeito da Física Quântica (Heelan, 1965), cujo nascimento oficial, segundo historiadores (Aitchison; MacManus & Snyder, 2004) se deu por obra de dois físicos, Werner von Heisenberg (1901-1976) e Erwin Schrödinger (1887-1961) que, em julho de 1925 e janeiro de 1926 publicaram seus artigos científicos, *Reinterpretação Quanto-Mecânica das Relações Cinemática e Mecânica* (Heisenberg, 1925) e *Quantização como um Problema de Autovalor* (Schrödinger, 1926), respectivamente.

Porém, antes dessas duas publicações, muita coisa aconteceu. É o que se pretende aqui narrar, o tempo da gestação da Física Quântica desde quando apareceram os seus primeiros sinais e quem primeiro os percebeu. Será que foram interpretados corretamente? Os seus descobridores estavam cientes do que dali se desenvolveria? Para entender a gestação da Física Quântica temos que voltar o relógio e acompanhar os avanços científicos que começaram a despontar ao final do século 18, evoluíram no decorrer do século 19 para, finalmente, no início do século 20, aflorarem na sua plenitude.

Os primeiros sinais de uma gestação são de difícil interpretação, nunca são suficientes para se tirar conclusões definitivas. Apenas quando se olha para trás no tempo se vê que um novo conjunto de ideias estava tomando corpo. Pode-se fazer um paralelo entre a gestação da Física Quântica e um jogo de quebra-cabeças, onde cada peça agregada à mesa traz um novo visual sem que ainda se possa concluir qual imagem está se formando. As primeiras peças do quebra-cabeça foram postas na mesa pelos alquimistas e filósofos naturais, depois vieram outros, os investigadores, pesquisadores e cientistas. Porém, eram sempre o mesmo tipo de pessoas, aquelas curiosas em desvendar os segredos da Natureza.

O surgimento da Física Quântica também pode ser pensado como o desenvolvimento de uma grande teia em cujas conexões se encontram os filósofos naturais e suas contribuições científicas. A teia interliga seus trabalhos, locais e tempos de existências e transcende as suas próprias vidas. A proposta do presente livro é percorrer essa teia que levou ao surgimento da Física Quântica, das conexões mais fecundas até aquelas que se mostraram equivocadas. Expõe-se as dúvidas e incertezas desde o tempo em que não se sabia o que dali resultaria. Espera-se aqui contribuir para a compreensão geral do processo de germinação de ideias dentro do coletivo científico.

A gestação da Física Quântica passou despercebida por longo tempo, só se tornou evidente prestes ao seu nascimento. Foi só nos momentos finais, na sala de parto, que o significado de tudo feito anteriormente adquiriu sentido. Então, apenas quando as últimas peças do quebra-cabeça foram acrescentadas é que se vislumbrou a imagem final.

Para melhor acompanhar as etapas do desenvolvimento da Física Quântica, é preciso familiaridade com as palavras que foram incorporadas para explicá-la. Uma revolução traz consigo um novo dicionário, pois as palavras anteriores não são suficientes para se explicar os conceitos que estão aparecendo. A palavra “*Quântica*” tem origem no latim tardio, *quantum* cujo plural é *quanta*, com o significado geral de “quantia”, “pedaço”. Na língua portuguesa, temos palavras derivadas dela, como *quanto* e *quantidade*.

Pois bem, para a Física, *quântico* significa algo que tem valores determinados e fixos, como se fossem pacotes. Em outras palavras, o *quantum* é um pacote com uma quantidade bem-definida no seu interior. Diz-se que um sistema é quantizado quando os seus valores vêm em pacotes, ou seja, são valores discretos, o que quer dizer que podem ser contados, ou dito de outra forma, são enumeráveis. A palavra “*discreto*”, na Física, é usada como o oposto de *contínuo*. Por exemplo, na Física Quântica, a energia só toma valores discretos, ou seja, em pacotes, e não pode assumir um valor qualquer.

Do estudo da interação da luz absorvida e emitida pela matéria, nasce a Física Quântica. Estamos falando da matéria que compõe as velas, as lâmpadas, os gases e mesmo os astros celestes. Foi um longo processo até se descobrir que a luz que enxergamos e o calor que sentimos têm a mesma natureza, e que os átomos emitem e absorvem luz na forma de quanta, ou seja, pacotes com energia bem definida.

A palavra *espectroscopia* também é importante para entender o desenvolvimento da Física Quântica. A sua origem está na ligação entre os elementos químicos e a luz por eles emitida e absorvida. A palavra *espectro* vem do latim *spectrum* que quer dizer “aparição” ou “imagem” e é normalmente associada a uma figura incorpórea de alguém que não está vivo, ou seja, um fantasma. Na Física e na Química o *espectro* é a aparição de um elemento químico. De fato, como veremos, a luz emitida e absorvida por um elemento químico é única a ele e, assim, seu espectro o identifica. O espectro de um elemento químico, então, entende-se como o conjunto discreto de linhas luminosas (ou escuras) que lhe pertence. Esse conjunto é a assinatura única de cada átomo, a sua verdadeira impressão digital.

Esse livro se propõe a conter todos os conceitos necessários para se entender a Física Quântica e a explicar o seu significado. Eles são aqui apresentados e discutidos, dentro do contexto histórico do seu aparecimento.

Heisenberg e Schrödinger, que interpretaram corretamente as bases da Física Quântica, foram privilegiados. Puderam sintetizar o significado de tudo aquilo que estava se desenvolvendo até então. Eles correspondem às conexões mais luminosas da grande teia, mas existem muitas outras conexões, que são narradas

neste livro. A Física Quântica surgiu graças ao esforço de vários homens que viveram em locais e épocas diferentes, a maioria deles nem sequer se deu conta de que fazia parte de uma grandiosa aventura humana, sintetizada na Física Quântica. Muitos jamais sonharam que as suas contribuições científicas eram peças desse grande tabuleiro de quebra-cabeça. Contudo, eis que a grande síntese mudou o significado de tudo, e hoje sabemos o sentido da contribuição de cada um deles.

Dessa perspectiva, a presente obra convida o leitor a refletir sobre a natureza da Ciência no contexto do coletivo humano. Sugere-se que não é só a religião nos faz crer que somos mais do que a simples soma de nossas vidas individuais. Os eventos aqui narrados, que levaram a descoberta da Física Quântica, nos conduzem a essa mesma reflexão, a de que somos parte de um todo muito maior do que uma coleção de indivíduos. A misteriosa síntese que levou ao mundo quântico ocorreu quando diversas descobertas da Física, em áreas aparentemente desconexas e disjuntas, começaram a apontar para a mesma direção. Novas e surpreendentes interconexões começaram a surgir como se fossem sinapses entre os diferentes pontos de uma teia, cujo sentido é muito maior do que a soma das suas conexões. O esplendor da síntese quântica nos faz refletir sobre o sentido da gestação de ideias. A presente narrativa nos convida a refletir sobre o momento mágico quando um campo semeado subitamente germina em todos os seus cantos. O calor radiante surpreendentemente tinha pontos em comum com a luz vinda dos astros celestes e os átomos não eram meras suposições, eles eram reais. A luz, que era considerada uma onda, e a matéria, feita de corpúsculos, revelaram novas faces, a luz se provou ser feita de partículas e a matéria de ondas. Da síntese dessas ideias contraditórias nasceu a Física Quântica.

No cotidiano, estamos constantemente lidando com diferentes tamanhos, tais como a distância entre cidades, o comprimento, a largura e a altura de peças do mobiliário, do vestuário e assim por diante. A humanidade foi, aos poucos, galgando novas fronteiras no mundo dos tamanhos e chegando a limites antes considerados inimagináveis. A escala de tamanhos foi, paulatinamente, se ampliando tanto na direção do maior como do menor. Foi graças à expansão dessa escala ao cosmos e ao átomo que chegamos à Física Quântica. Hoje, sabemos que o tamanho do átomo é da ordem de **0,05 nm** (nanômetros) e que a distância da Terra ao Sol é de **150.000.000 km** (quilômetros), por exemplo. Para entender a Física Quântica, é preciso se familiarizar com o nanômetro, tanto quanto estamos familiarizados com o metro e o quilômetro, por exemplo. Para isso, começamos dividindo um milímetro por mil e temos o micrômetro: **1μm = 1mm/1000**. Novamente, dividimos um micrômetro por mil e chegamos ao nanômetro: **1nm = 1μm/1000**. Assim, o nanômetro é um milímetro dividido por um milhão: **1 nm = 1mm/1.000.000**. Em relação ao metro, o nanômetro é a fração de um bilhão, ou seja, **1nm = 1m/1.000.000.000**.

A luz que enxergamos tem o comprimento característico entre **400 e 700 nm** ou, igualmente, entre **0,4 e 0,7 μm**. Esse comprimento característico se chama *comprimento de onda* e o seu significado é fundamental para entender a Física Quântica, e é amplamente discutido neste livro. Para evitar escrever números muito longos com acúmulo excessivo de zeros, se desenvolveu uma notação mais compacta, que é a seguinte: **1nm = 1m/10⁹** ou, de maneira equivalente, **1nm = 10⁻⁹ m**. Note que o número de zeros em **1.000.000.000** se transformou no expoente **9**.

A narrativa deste volume tenta se equilibrar entre duas visões conflitantes da História, aquela que apresenta todos os fatos e a que descreve somente o que é importante. Essa dualidade está presente desde a mitologia grega, onde dois deuses distintos disputavam o controle do tempo, Cronos e Kairós. Enquanto Cronos quer relatar tudo aquilo que acontece sem deixar escapar o menor detalhe, Kairós apenas registra os momentos mais marcantes. Para Cronos, o tempo devora a tudo e a todos, enquanto, para Kairós, o tempo não passa, ele permanece fixo nas imagens das experiências relevantes que foram vividas. Não se escapa desse conflito entre Cronos e Kairós. Queremos conhecer com exatidão os detalhes do passado e, ao mesmo tempo, reter em nossas memórias apenas os fatos relevantes. Dessa tarefa inglória, porém gratificante, retiramos ensinamentos, e um deles é que todo tempo presente é de gestação e repete indefinidamente o eterno ciclo da criação.



Marco Antonio de Dominis (1560-1624)

1

A descoberta das propriedades da luz

*Se as portas da percepção estivessem limpas,
tudo apareceria para o homem tal como é: infinito.*
William Blake (1757-1827)

1.1 O arco-íris e a lei esquecida por 600 anos

A Divina Comédia
 Ângulos de 42° e 51° para os arco-íris primário e secundário
 Arco-íris primário e secundário
 Descoberta da luz quântica
 Dispersão da luz
 Faixa de Alexandre
 Fenômeno da difração
 Forma da imagem que sai do prisma
 Índice de refração
 Lei da refração ou dos senos
 Opositores de Newton
 Prisma, origem das cores segundo Newton e Descartes
 Raio de luz
 Reflexão da luz

Hoje, todos os estudantes aprendem uma lei da Física, mas poucos sabem que ela permaneceu esquecida por cerca de 600 anos. É a Lei da Refração, ou Lei dos Senos, e tem uma longa história. Ela foi descoberta pelo matemático persa Abu Said al-Ala Ibn Sahl (ca 940-1000), que a escreveu, por volta de 984, no seu livro *Sobre os Instrumentos Ardentes* (Kwan; Dudley; Lantz, 2002; Rashed, 1993). Se foi bom para os estudantes não precisarem estudar esta lei por 600 anos foi ruim para a Ciência pois ela permaneceu obscura por séculos. No passado ela era considerada por demais complexa na sua matemática e interpretação, mas hoje não é mais vista assim. Ela descreve o desvio que a luz sofre na passagem da luz por dois meios transparentes, desvio este que todos sabemos ocorrer, mas que apenas poucos dominam o significado da lei da Física que o governa. Para entendê-la, vamos contar a história de um fenômeno natural intimamente ligado a ela, o arco-íris.

O arco-íris aparece quando o Sol brilha e no ar existem gotículas suspensas, criadas por uma chuva ou pela proximidade de uma fonte d'água, como uma cachoeira ou uma mangueira aberta espirrando água. A aparição do arco-íris sempre nos surpreende, mas a sequência de cores nele não deve, pelo menos para aqueles que já prestaram atenção nela, pois é sempre a mesma. São essas regularidades observadas na natureza que nos fazem suspeitar da presença de alguma lei da Física atuando por detrás. Na sua parte mais alta, o arco-íris é vermelho, enquanto, na parte mais baixa, é violeta, e entre esses dois extremos ocorre uma gradual mudança de cores, passando pelo laranja, amarelo, verde, azul e anil (ou índigo). A Lei dos Senos explica a sequência de cores do arco-íris, mas demorou séculos para se chegar a essa conclusão.

Alguns já puderam constatar, em dia de grande nitidez, a presença de um outro arco-íris, acima do principal. É o chamado arco-íris secundário, cuja sequência de cores é exatamente oposta à do principal, ou seja, o violeta está acima e o vermelho abaixo e no meio a mesma graduação, porém na ordem inversa, como mostra a Figura 1.1-1 (Corradi, 2016; Nussenzveig, 1977).

Ainda mais difícil de observar é o curioso fenômeno do escurecimento do azul do céu entre estes dois arco-íris em comparação com o céu externo a eles. Essa região de azul escuro é a faixa de Alexandre, nome dado em homenagem ao filósofo que primeiro a descreveu, Alexandre de Afrodísias, nascido entre 140 e 160 d.C. na cidade de Afrodísia, atual Turquia (Tiburtino, 2014).

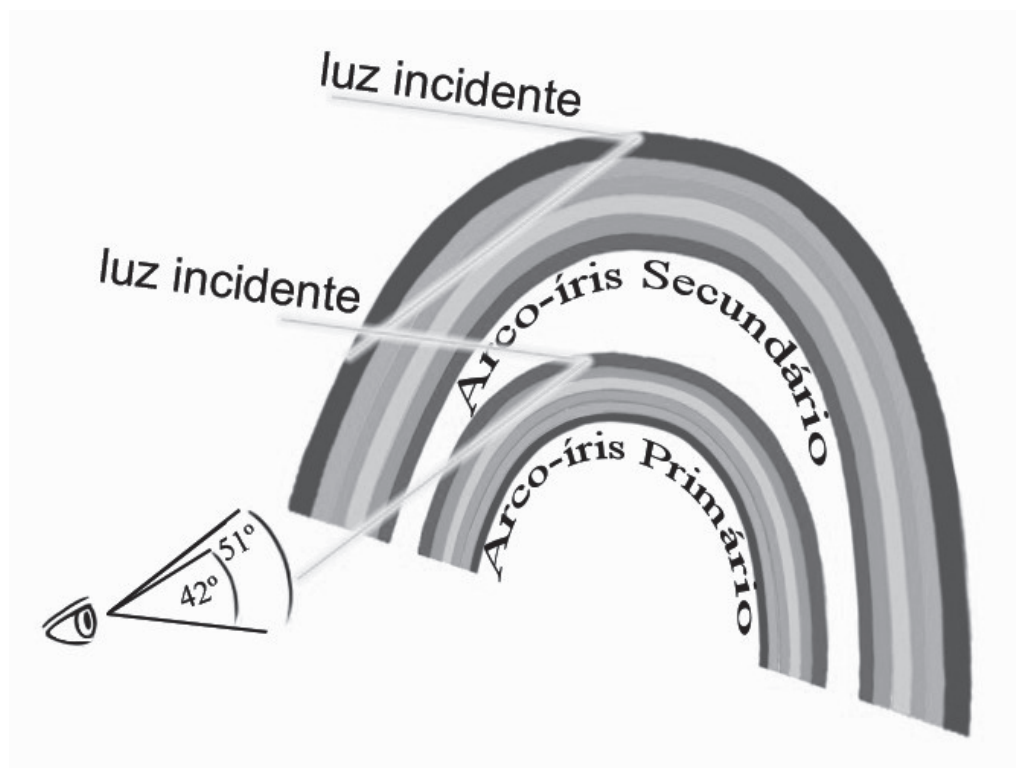


Figura 1.1-1 Arco-íris primário e secundário e os ângulos de seus cones.

Desde o passado longínquo, muitos se indagaram sobre as razões por detrás da existência do arco-íris. Séculos antes de Alexandre de Afrodísias, Aristóteles (c.384 a.C.-c.322 a.C) já havia percebido que o arco-íris era devido à luz refletida pela umidade presente nas nuvens. O arco-íris sempre aparece no lado oposto do Sol, nunca ao seu lado, uma consequência de a luz observada ser aquela refletida pelas nuvens (Nussenzveig, 1977, p. 116).

Aristóteles também concluiu que o arco-íris não está localizado num lugar fixo do céu e, portanto, não adianta procurar o local onde ele termina e encosta o solo, pois isto não existe. Já Lúcio Sêneca (ca 4 a.C.-65 d.C.) foi além de Aristóteles ao sugerir que a umidade no ar é a causadora do arco-íris, devido a gotículas de água suspensas. É na luz refletida pelas gotículas que está a origem do arco-íris. Seneca chegou a construir um cilindro de vidro como modelo de uma gotícula de modo a poder estudar a reflexão da luz no seu interior (Corradi, 2016).

Culturas e sociedades distintas podem chegar às mesmas conclusões científicas, sem trocar ideias. Elas aparecem quando as sociedades atingem certa maturidade social e intelectual. Por exemplo, passados mil anos de Sêneca, na China, Sun Sikong (1015–1076) e Shen Kuo (1031–1095) desenvolveram ideias similares as dele sobre o arco-íris (Corradi, 2016).

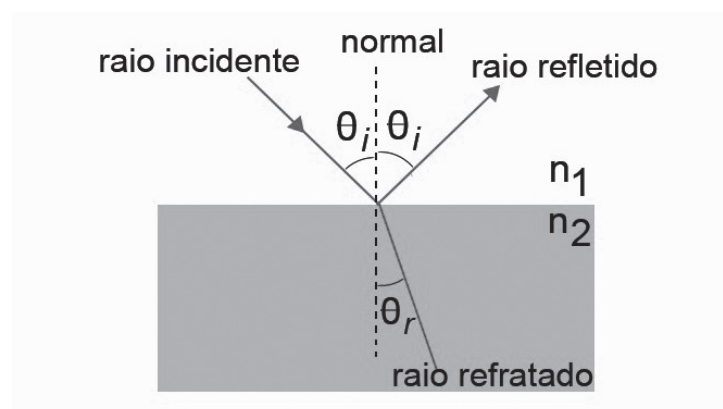


Figura 1.1-2 Raios incidente, refletido e refratado com seus respectivos ângulos em relação a reta normal.

Na Europa, também passados mais de mil anos, outros, como Albertus Magnus (1206-1280), chegaram às conclusões de Sêneca sobre a formação do arco-íris, de que ele se desenvolve a partir das gotículas de chuva isoladas, e não no conjunto delas. A separação da luz em cores ocorre quando a luz entra em cada gotícula e essa separação se mantém na luz refletida na superfície interna da gotícula. Embora Magnus não tenha entendido bem como se dá a separação das cores dentro da gotícula, ele foi um dos primeiros a chamar a atenção da ocorrência de dois fenômenos importantes no interior dela, o da reflexão e o da refração (Corradi, 2016). A estes, adicionamos um terceiro e igualmente importante fenômeno, chamado de dispersão. Para entendê-los, deixamos o arco-íris de lado por um momento para nos concentrarmos na luz incidindo numa superfície plana que separa dois meios transparentes.

A reflexão é o mais simples desses três fenômenos e, para entendê-lo, pensemos num raio de luz com uma direção bem definida. Ele incide na superfície que separa dois meios e reflete. Por raio, entendemos a própria direção de propagação da luz. Matematicamente, a Lei da Reflexão trata do ângulo formado entre o raio e uma reta imaginária perpendicular à superfície que desenhamos nas nossas mentes. Essa lei afirma que o ângulo formado pelo raio incidente é igual àquele feito pelo raio refletido. Portanto, em termos matemáticos, a Lei da Reflexão é expressa como

$$\theta_{\text{incidente}} = \theta_{\text{refletido}}$$

que, por serem iguais, descritos pelo mesmo ângulo θ_i , como ilustrado na Figura 1.1-2.

A Lei da Reflexão é conhecida desde tempos imemoriais, foi narrada na *Divina Comédia*, obra do poeta italiano Dante Alighieri (1265-1321), escrita na Idade Média. No canto XV do purgatório, Dante descreve uma luz que lhe atinge tão fortemente que ele desvia o olhar. Segundo Dante, tudo se passa como se um raio de luz tivesse atingido uma superfície de água ou de um espelho, pelo qual o raio sobe formando um ângulo idêntico ao do raio que desce, em relação à vertical.

Como quando da água ou do espelho
Salta o raio do lado oposto
Subindo pra cima no mesmo modo
(Aleghieri, Inferno, Canto XV, 1300)

Era uma Segunda-Feira no Purgatório, dia 28 de março do ano de 1300.

Já a refração descreve a passagem da luz através dos dois meios transparentes e relaciona os ângulos que o raio faz em cada um deles. Tal como na reflexão, são comumente definidos em relação a uma reta

imaginária perpendicular à superfície, conforme ilustrado na Figura 1.1-2. A Lei da Refração requer que se associe um número a cada meio para descrever a sua capacidade de desviar a luz. Esse número se chama *Índice de refração* e é representado pela letra **n**. Por exemplo, para o vácuo **n = 1**, para o ar, **n = 1,0002**, para a água **n = 1,333** e para o vidro, **n = 1,517**. Impurezas na água alteram ligeiramente esse número, assim como diferentes tipos de vidro também diferem entre si pelos seus índices de refração.

A Lei da Refração contém uma dificuldade matemática que assustou a muitos, e ainda assusta, em especial aos estudantes, e assim se explica por que permaneceu mal interpretada por 600 anos. Ela é expressa através de uma função matemática, que vem da trigonometria, chamada de seno. Ela diz que o produto do índice de refração com o seno do ângulo se mantém o mesmo na passagem de meio, ou seja, é igual nos dois lados da superfície

$$n_1 \text{sen}\theta_i = n_2 \text{sen}\theta_r$$

conforme ilustrado na Figura 1.1-2. Realmente, ela requer certo nível de conhecimento matemático. Portanto, se você não a entendeu, não se sinta sozinho. Para os nossos propósitos, não é necessário um aprofundamento matemático, basta saber que o seno do ângulo cresce com o valor do próprio ângulo até 90°. Aliás, para pequenos ângulos, o seno do ângulo é quase igual ao próprio ângulo, $\text{sen}\theta \approx \theta$. Assim para ângulos pequenos a lei se torna $n_1\theta_i \approx n_2\theta_r$, ou seja, quanto maior o índice de refração, menor será o desvio, e mais próximo é o raio da linha imaginária perpendicular à superfície. Na situação em que os índices de refração são iguais, $n_1 = n_2$, a Lei da Refração determina que os ângulos sejam iguais, $\theta_i = \theta_r$, o quer dizer que a luz não sofre desvio, como esperado.

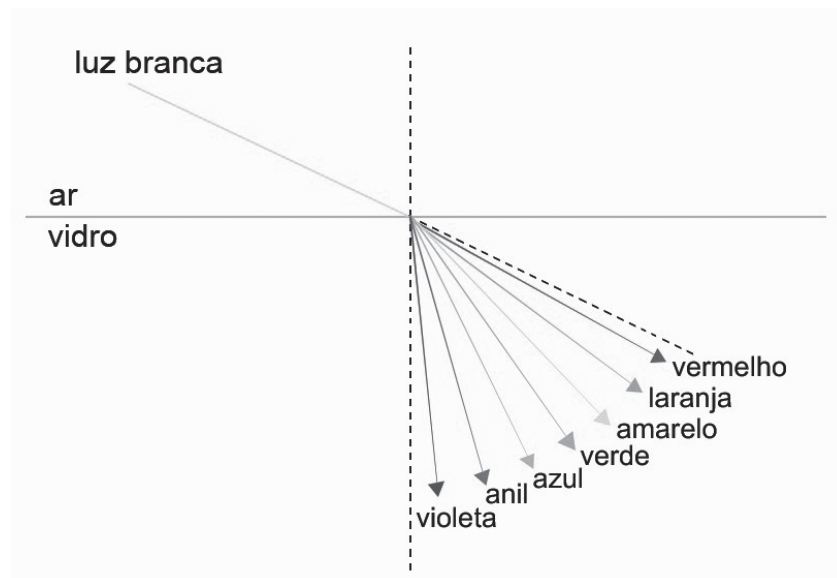


Figura 1.1-3 Dispersão da luz e formação de cores na passagem do ar para o vidro.

Um conceito muito importante é o da *dispersão*, que é fruto da refração. A dispersão é a separação da luz em cores na passagem de um meio para outro, e acontece porque cada cor possui um índice de refração diferente. Portanto, ocorre dispersão da luz tanto na passagem para o vidro como para a água. Cada cor forma um ângulo diferente e por esta razão elas se separam, ou melhor dizendo, se dispersam (Figura 1.1-3).

Pensemos numa luz branca no ar onde todas as cores têm o mesmo índice de refração. Elas estão juntas, mas, ao atravessar do ar para a água ou para o vidro, se separam. Entre as cores, o vermelho possui índice de refração mais próximo ao do ar, e isso significa que o vermelho sofre pouco desvio. Por outro lado, a luz

violeta tem índice de refração bem diferente do ar, e isto causa um grande desvio para o violeta. Dizemos que o raio vermelho é o que menos se dispersa e o violeta o que mais se dispersa. Essas duas cores estão nos extremos e, entre elas, se encontram as outras. Pensando em termos da sequência completa de sete cores, violeta, anil, azul, verde, amarelo, laranja e vermelho, os seus respectivos índices de refração no vidro ou água estão ordenados da seguinte forma:

$$n_{\text{violeta}} > n_{\text{anil}} > n_{\text{azul}} > n_{\text{verde}} > n_{\text{amarelo}} > n_{\text{laranja}} > n_{\text{vermelho}}$$

que leva ao ordenamento dos desvios mostrados na Figura 1.1-3. Esses índices de refração são todos muito próximos e a Tabela 1.1-1 mostra os seus valores para quatro cores em dois tipos de vidro chamados de *crown* e *flint* (Garg & Prakash, 1997). A última coluna da tabela trata do comprimento de onda, uma grandeza que será apresentada no Capítulo 1.6.

Tabela 1.1-1 Índice de refração das cores em dois tipos de vidro.

Cor	Índice de refração – vidro crown	Índice de refração – vidro flint	Comprimento de onda (nanômetros)
Vermelho	1,515	1,622	656,3
Amarelo	1,517	1,627	589,3
Azul	1,523	1,639	486,1
Violeta	1,533	1,663	396,9

Foram necessários mais de 600 anos desde Ibn Sahl para que a Lei da Refração voltasse a ser tema de investigação, desta vez por René Descartes (1596-1650). Ele a publicou no seu livro, *Discurso do Método*, em 1637, sem reconhecer o trabalho anterior de Ibn Sahl de 984, mesmo porque, ele o desconhecia. Porém, 16 anos antes de Descartes, Willebrord Snell (1591-1626) já havia escrito a Lei da Refração e, por isso, ela é conhecida como Lei de Snell, embora na França a tratem como a Lei de Descartes. O justo seria chamá-la Lei de Ibn Sahl, em alusão ao seu verdadeiro descobridor (Descartes, 2005; Rached, 1993; Kwan; Dudley; Lantz, 2002).

Muita confusão aconteceu nesses 600 anos, graças ao escasso entendimento da Lei da Refração pela maioria que incluía até um conterrâneo e contemporâneo de Ibn Sahl, o famoso matemático persa Abu Ali al-Hasan Ibn Al-Haitham (965-1039), mais conhecido como Alhazen. Acontece que Alhazen leu a Lei da Refração no livro *Óptica* de Ptolomeu de Alexandria (ca. 90-168 a.D.), onde estava escrita de forma errada. Os resultados que Ptolomeu apresentou não foram obtidos por medição, mas por cálculo, onde ele sugeriu uma forma incorreta da Lei da Refração. A respeitabilidade de Alhazen e Ptolomeu (Kwan; Dudley; Lantz, 2002), fez com que essa formulação errada da lei fosse incorporada e se perpetuasse, gerando um equívoco secular. Curioso que Alhazen escreveu um texto que diz exatamente o oposto do que ele fez:

Encontrar a verdade é difícil, e o caminho é acidentado. Como buscadores da verdade, o melhor é não julgar e não confiar cegamente nos escritos dos antigos. É preciso questionar e examinar criticamente o que foi escrito, por todos os lados. É preciso aceitar apenas o argumento e a experiência, em vez do que qualquer pessoa diz, pois todo ser humano é vulnerável a todos os tipos de imperfeição. Como buscadores da verdade, devemos suspeitar e questionar nossas próprias ideias ao investigarmos fatos, para evitar preconceitos ou pensamentos descuidados. Sigam este caminho e a verdade vos será revelada. (Alhazen, citação atribuída).