

**DÉBORA DA CONCEIÇÃO LIMA**



## **EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONCEITO FÍSICO DA LUZ**

**JI-PARANÁ, RO  
NOVEMBRO DE 2012**

**DÉBORA DA CONCEIÇÃO LIMA**

## **EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONCEITO FÍSICO DA LUZ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Física de Ji-Paraná, Universidade Federal de Rondônia, Campus de Ji-Paraná, como parte dos quesitos para a obtenção do Título de Licenciatura Plena em Física, sob orientação do Prof. Dr. Carlos Mergulhão Júnior.

**JI-PARANÁ, RO  
NOVEMBRO DE 2012**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por capacitar-me na realização desta atividade acadêmica de imprescindível valor nesta reta final; por permitir-me equilíbrio emocional proporcionando-me o controle da ansiedade nos momentos de responsabilidades e compromissos, podendo honrá-los durante o percurso acadêmico. Aos meus pais, Geraldo e Luzinete que são exemplos na minha vida e toda a minha família pelo apoio concedido. Agradeço imensamente a todos os professores do departamento de Física - Unir, em especial ao meu orientador, professor Dr. Carlos Mergulhão Júnior, pela disposição e comprometimento nas orientações, auxiliando expressivamente para a concretização da monografia. Sou grata ainda aos meus amigos Neiva e Alcindo que muito me ajudaram na aquisição de material e no desenvolvido deste trabalho. Obrigada a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Esse é o caminho mais belo que uma teoria física pode assumir: quando ela abre caminho para uma teoria mais ampla, sem perder seu caráter individual.

(Albert Einstein)

# **EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONCEITO FÍSICO DA LUZ**

Débora da Conceição Lima

## **RESUMO**

Na Antiguidade, os filósofos utilizavam o conceito da luz para explicar a aquisição de conhecimento e entendimento. No século XVIII, esse conceito foi fortalecido com o Iluminismo, sendo a luz comparada a razão (inteligência e esclarecimento). Para os iluministas, o raciocínio humano seria o meio de atingir o progresso em todos os campos da sociedade. Por contrapartida, comparavam a ignorância com as trevas, acreditando que a falta do saber seria como a ausência de luz. Fugindo da vertente filosófica e aprofundando no campo científico, foi descoberto que a luz se origina de oscilações eletromagnéticas, abrindo mão do conceito existente na época de que a visão se devia exclusivamente a algo que saia dos nossos olhos, ou seja, éramos geradores e portadores da luz. Houve surgimento de teorias que davam explicações teórica e experimental sobre a natureza da luz, divergindo entre corpuscular e ondulatória. Alguns cientistas defendiam a teoria de que a luz era uma corrente de partículas emitidas por um corpo luminoso, outros acreditavam que a luz era uma onda que se propaga em um meio. Entre os fenômenos físicos sobre a luz também ocorriam divergência, pois alguns apresentam natureza corpuscular e outros, ondulatória, conceitos estes tão divergentes entre si. Então, como determinar a natureza real da luz, sabendo que permeia entre onda e matéria? Aprofundando e aperfeiçoando o conceito físico, no século XX a dualidade onda-partícula foi descoberta, comprovando que a luz apresenta as duas características, ora ondulatória, ora corpuscular, formando um conjunto de conhecimento capaz de explicar os mais variados fenômenos ópticos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Luz. Conhecimento Filosófico. Onda-Partícula.

## **ABSTRACT**

In antiquity, philosophers used the concept of light to explain the acquisition of knowledge and understanding. In the eighteenth century, this concept has been strengthened with the Enlightenment, and the light compared to the reason (intelligence and enlightenment). For the Enlightenment, human reason would be the means of achieving progress in all place of society. By the way, compared with the dark ignorance, believing that the lack of knowledge would be the absence of light. Fleeing the philosophical origins and deeper into the scientific place, it was discovered that the light originates from electromagnetic oscillations, forgoing the existing concept at the time that the vision was due exclusively to something out of our eyes, we were generators and carriers were of light. There were theories that gave rise to experimental and theoretical explanations about the nature of light, diverging between corpuscular and wave. Some scientists have advocated the theory that light was a stream of particles emitted by a luminous body, others believed that light was a wave that propagates in a space. Among the physical phenomena of light divergence also occurred because some have and others corpuscular nature, wave. So how to determine the true nature of light, knowing that permeates between wave and matter? Expanding and improving the physical concept in the twentieth century the wave-particle duality was enunciated, proving that light has both characteristics, corpuscular and wave, forming a set of knowledge to explain the various optical phenomena.

**KEY WORDS:** Light. Philosophical Knowledge. Wave - Particle.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Olho humano descrito por Bacon recebendo raios luminosos.....	33
Figura 2 - Decomposição da luz branca, contrapondo a teoria de Descartes.....	45
Figura 3 - Esquema onde Newton demonstra a dispersão da luz branca nas sete cores.....	49
Figura 4 - Esquema onde Newton demonstra a dispersão e recomposição da luz branca, usando dois prismas com angulação invertida.....	51
Figura 5 - Esquema onde Newton demonstra a dispersão e recomposição da luz branca, usando dois prismas com angulação invertida.....	53
Figura 6 - Reflexão da luz em espelho plano.....	55
Figura 7 - Refração da luz nos meios ar ( $n_1$ ) e vidro ( $n_2$ ).....	57
Figura 8 - Ilustração do <i>Opticks</i> de Newton, mostrando os anéis de interferência e suas cores para transmissão e reflexão.....	59
Figura 9 - A transmissão de uma perturbação (onda) através de um meio intermediário se assemelha a uma colisão entre bolas, que transmitem sucessivamente o movimento. Ilustração do <i>Traité d'Optique</i> de Huygens.....	61
Figura 10 - À esquerda, tremulações minúsculas provocadas pelo fogo emitem perturbações no meio circundante. À direita, frentes de onda originárias de um ponto se encontram em círculos concêntricos. Esta forma de onda é preservada em sucessivas expansões em círculo das frentes de onda. Ilustrações do <i>Traité d'Optique</i> de Huygens.....	63
Figura 11 - Uma frente de onda plana encontra uma superfície plana nos pontos K, em instantes sucessivos. As ondas, emitidas com diferentes atrasos dos vários pontos K se expandem em círculos, formando nova frente de onda plana. Ilustração do <i>Traité d'Optique</i> de Huygens.....	65
Figura 12 - Uma frente de onda plana encontra uma superfície plana nos pontos K, em instantes sucessivos. As ondas, emitidas com diferentes atrasos dos vários pontos K se expandem no meio 2, com velocidade menor que no meio 1, formando nova frente de onda plana. Ilustração do <i>Traité d'Optique</i> de Huygens.....	65
Figura 13 - Experimento da dupla fenda de Young para o comportamento da luz.....	71
Figura 14 - Garrafa de Leyden.....	81
Figura 15 - Oscilar linear.....	83
Figura 16 - Esquema do experimento de Hertz para a comprovação experimental da existência das ondas eletromagnéticas.....	85
Figura 17- Dispositivo experimental de Hertz, em que produziu ondas eletromagnéticas.....	85
Figura 18 - Efeito fotoelétrico.....	93
Figura 19 - Espectro da luz branca de acordo com o comprimento de onda e a frequência de cada luz monocromática.....	95
Figura 20 - Elétron saltando de um nível a outro de energia, devido recebimento de energia proveniente de um fóton.....	97
Figura 21 - Espalhamento Compton.....	99

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
2. PRIMEIROS CONCEITOS HISTÓRICOS SOBRE A LUZ .....	25
3. NATUREZA CORPUSCULAR E ONDULATÓRIA DA LUZ .....	37
3.1. A IDADE DAS TREVAS E A IDADE DA LUZ.....	37
3.2. ESTUDO DA LUZ SOB O PONTO DE VISTA DO MECANICISMO .....	39
3.2.1. A ideia filosófica e científica do éter.....	39
3.3. ESTUDOS CIENTÍFICOS DO COMPORTAMENTO DA LUZ.....	43
3.3.1. René Descartes .....	43
3.3.2. Francesco Maria Grimaldi .....	47
3.3.3. Isaac Newton .....	49
3.3.4. Christian Huygens .....	61
3.3.5. Robert Hooke.....	67
3.3.6. Thomas Young .....	69
3.3.7. Augustin Fresnel.....	73
3.3.8. James Clerck Maxwuel.....	77
3.3.9. Heinrich Rudolf Hertz .....	79
4. DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA DA LUZ.....	89
5. CONCLUSÃO.....	109
REFERÊNCIAS .....	113



## 1 - INTRODUÇÃO

Tanto no campo da Filosofia, quanto no da Ciência, os gregos antigos tiveram papel importante na determinação das bases sociais e científicas. Suas concepções exercem, até hoje, considerável influência, e se constituíram nos fundamentos do pensamento filosófico e científico das sociedades ocidentais. [1]

Na Grécia, não havia uma clara distinção entre Filosofia e Ciência. Assim, muitos pensadores dedicavam-se ao mesmo tempo às especulações filosóficas e às observações científicas.

As observações no campo da Ciência aguçaram a curiosidade da humanidade concernente a ideia da formação do Universo. Filósofos como Tales de Mileto (elemento básico a água), Anaxímenes (ar), Pitágoras (número como essência do Universo), Parmênides (explicação através da razão e opinião), Empédocles (teoria dos Quatro Elementos), Aristóteles (teoria do éter), entre outros, lançaram teorias que pudessem explicar a existência da matéria. Porém, o pensamento mais notável quanto ao conceito da matéria foi desenvolvido por Demócrito e Leucipo, afirmando “que a Natureza se compunha de partículas sólidas e indivisíveis – os átomos -, cujos arranjos e movimento condicionavam a diversidade dos fenômenos naturais e sociais”. [2]

Devido à procura constante pelo saber, pesquisas em vários campos da Ciência foram sendo desenvolvidas ao longo dos séculos, como por exemplo, o conceito da luz e da visão, sendo que os primeiros passos em relação a esse tema foram dados pelas civilizações grega, chinesa e árabe, e em seguida a romana com as traduções das pesquisas.

Os fenômenos associado à luz estão entre aqueles com os quais o ser humano tem uma relação mais íntima e constante ao longo da sua existência. A luz está presente em todas as atividades do dia a dia do homem. Muitos são os fenômenos associados às propriedades da luz.

A área da óptica é um campo de estudo fascinante. De maneira simplificada, pode-se dizer que é o ramo da Física que estuda a propagação da luz e sua interação com a matéria.

Desde a antiguidade, os filósofos e cientistas se dedicaram a explicar os fenômenos envolvendo a luz. A natureza física da luz foi tema de grandes discussões e controvérsias entre a sociedade científica. “O estudo da luz desenvolveu-se, contudo, com grandes dificuldades, esbarrando com sucessivas crises, resultantes, em geral, de obstáculos encontrados no alargamento a aspectos novos das teorias anteriores.” [3]

Até o começo do século XIX, a maioria dos cientistas acreditava que a luz tinha um comportamento corpuscular. Esse modelo, desenvolvido por Isaac Newton, baseava no conceito de que a luz era formada por feixe de partículas emitido por uma fonte luminosa, explicando assim as leis da reflexão e da refração. Para Newton, se a luz fosse onda contornaria obstáculos e não formaria regiões de sombras.

O modelo ondulatório defende a concepção de que a luz se comporta como uma onda. Foi defendido inicialmente por Christian Huygens, mostrando “que o modelo ondulatório da luz também pode explicar as leis de reflexão e refração.” [4]. A rejeição em relação a esse comportamento foi devido ao fato da luz viajar pelo vácuo até chegar a superfície da Terra, e como os tipos de ondas até então conhecidos precisavam de um meio material para se propagar, na visão dos cientistas daquela época, era inconcebível esse novo conceito físico.

O fenômeno óptico, que hoje é conhecido como difração (as ondas podem curvar-se em torno de obstáculos), em 1660 já tinha sido analisado experimentalmente por Francesco Grimaldi. Devido os cientistas do século XVII ainda não terem o conhecimento desse comportamento ondulatório da luz, essa teoria foi rejeitada.

Thomas Young demonstrou o comportamento ondulatório da luz através da interferência, de tal forma que as ondas luminosas podem combinar-se e anular-se de forma destrutiva, não podendo ser explicado pelo modelo corpuscular, pois matéria não pode ser anulada. O princípio da interferência de Young, desenvolvido entre 1801 e 1803, foi embasado mais tarde pelas experiências de Augustin Fresnel.

O conceito de que a luz é uma onda eletromagnética surgiu com o Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo de James Clerk Maxwell, publicado em 1873, sendo confirmado experimentalmente por Hertz em 1888.

Em 1900, retorna a teoria corpuscular da luz, proposta por Planck, quando defendeu que a energia de um feixe de luz concentra-se em pacotes, os quantum (fótons). Em 1905, Albert Einstein, partidário da teoria de Planck, explicou o fenômeno fotoelétrico com base no conceito de partícula de luz. Esse conceito também foi campo de estudo de Compton, confirmando o modelo corpuscular no nível microscópico.

Em 1924, Louis de Broglie, postulou que a matéria pode ter comportamento ondulatório, quando o corpo em questão tem massa muito pequena, assim como o elétron, atribuindo então, o conceito dualístico para a matéria.

Heisenberg, em 1927, postulou seu princípio da incerteza, aonde defendia que é impossível saber, com precisão, a posição e a velocidade de movimento de um elétron ou fóton. Baseando nesse princípio e no conceito de De Broglie, Schrodinger desenvolveu uma

equação matemática que pudesse determinar a região de probabilidade de se encontrar o elétron, tendo sempre certa imprecisão quando calculado a posição e a velocidade da partícula.

A junção das duas teorias só ocorreu por volta de 1930, a partir das concepções desenvolvidas ao longo dos anos, quando foi provado que a luz pode assumir tanto a forma corpuscular como a ondulatória.

## 2 – PRIMEIROS CONCEITOS HISTÓRICOS SOBRE A LUZ

Durante o período conhecido como Idade do Bronze, vários núcleos de habitantes agruparam em torno dos palácios das cidades gregas, sendo o mais importante o de Micenas. Povo conhecido como aqueus, foi famoso devido a sua arte, trabalho em metal e joalheria, assim como as grandes construções de muros e palácios.

Com a destruição dos palácios micênicos em torno de 1100 a.C, a Grécia enfrentou um período de estagnação cultural e social, conhecido como período arcaico grego. Porém, por volta de 600 a.C, a Grécia deu seus primeiros impulsos em direção ao campo científico.[5]

A religião era parte indissociável da vida dos antigos gregos. Seus deuses estavam presentes em todas as atividades do cotidiano. No entanto, a partir do século VI a.C., o pensamento filosófico grego começou a mudar. Os filósofos gregos foram os primeiros no Ocidente a buscarem a compreensão do mundo e do ser humano, com base em si mesmos, com o uso da razão e da própria inteligência. Fugindo dos conceitos mítico-religiosos da existência do mundo, os filósofos procuraram dar explicações físicas e naturais aos fenômenos que ocorrem na natureza. [6]

Na obra República escrita no século IV a.C pelo filósofo grego Platão, o conceito de luz já era abordado para demonstrar a importância do conhecimento filosófico e educação, como forma de superação da ignorância. No livro VII Platão descreve uma conversa entre Sócrates e Glauco:

Suponhamos uns homens numa habitação subterrânea em forma de caverna, com uma entrada aberta para a luz, que se estende a todo o comprimento dessa gruta. Estão lá dentro desde a infância, algemados de pernas e pescoços, de tal maneira que só lhes é dado permanecer no mesmo lugar e olhar em frente; são incapazes de voltar a cabeça, por causa dos grilhões; serve-lhes de iluminação um fogo que se queima ao longe, numa eminência, por detrás deles; entre a fogueira e os prisioneiros há um caminho ascendente, ao longo do qual se construiu um pequeno muro. [7]

Por ficar de costas para a entrada e forçados a olhar somente a parede do fundo da caverna, os prisioneiros podem apenas observar sombras projetadas de outros homens além do muro, devido à fogueira acesa. Os prisioneiros associam o movimento das sombras ao som que vem de fora da caverna, acreditando, portanto que as sombras sejam a realidade.

Imagina que um dos prisioneiros fosse libertado e forçado a olhar à luz. Provavelmente sofreria, devido o ofuscamento de seus olhos pela luz externa e não

conseguiria de imediato observar os objetos. Ao se acostumar com a luz, iria descobrir que as sombras não são realidades, mas projeção da imagem de homens como ele. E caso fosse forçado a voltar à caverna sofreria com a ausência de luz e não mais teria a percepção e nitidez das sombras como outrora.

O mito da caverna é uma metáfora da condição humana perante o mundo no que diz respeito ao processo de conhecimento, mostrando a visão de mundo do ignorante, que vive de senso comum, e do filósofo, na sua eterna busca da verdade. Porém, fazendo analogia ao conceito físico da luz pode-se perceber que as sombras vistas pelos prisioneiros nada mais é do que ausência da luz perante um objeto, e que não tendo um significado físico para o filósofo na época, já havia entendimento sobre o mesmo de forma aceitável.

Dentro do conceito físico da luz, os principais cientistas gregos como Empédocles e Cláudio Ptolomeu, deram contribuições iniciais. [8]

Empédocles no século IV a.C. deu algumas contribuições à ciência grega, das quais se destaca a teoria dos quatro elementos: terra, ar, fogo e água. Ele acreditava que tudo que existe no Universo é proveniente da mistura e posterior separação desses quatro elementos, sendo então a base da existência do mundo. No campo de investigação experimental, usando um relógio de água, provou que a substância ar tinha, realmente, existência material, notando o modo como são emitidas bolhas quando o ar é preso abaixo da superfície da água.

Fazendo observações no campo da luz e da visão, Empédocles acreditava que “os corpos luminosos emitem algo que encontram raios que emanam dos olhos”. [8] Mesmo não sendo uma teoria correta, ela estava à frente da teoria pitagórica de que o olho é “a origem da luz a qual é emitida pelo órgão visual, vai ao objeto e regressa ao olho dando então a visão”. [3]. Outro ponto defendido pelo filósofo era que a luz leva tempo para viajar pelo espaço, resultado obtido apenas pela razão, já que a prova obtida pela observação foi conseguida 2000 anos após sua análise.

Considerado um dos maiores sábios da antiguidade, Cláudio Ptolomeu, cientista grego, dedicou-se a diversos campos do conhecimento, como a matemática, a geografia, a física e astronomia. Uma de suas maiores obra é o *Almagesto*, dividida em 13 volumes, com tabelas de observações de estrelas e planetas e com um grande modelo geocêntrico do sistema solar.

No campo da Física, Ptolomeu escreveu sobre conceitos ópticos como reflexão, refração, cor e espelhos de diferentes formas. Acreditava que a cor é uma propriedade natural dos corpos e defendeu no século II d.C, a errada teoria grega de que “a visão era causada por alguma coisa, um fluxo visual, emitido pelo olho”. [8]. No que ainda diz respeito à visão,

Ptolomeu determinou através de experimentos “a amplitude do campo visual e provou que a visão viaja em linhas retas” [8], teoria corrigida pelo Princípio Retilíneo da Luz, provando que não é a visão mais sim a luz quem viaja em linha reta. Ptolomeu usou o método experimental para comprovar a existência da refração da luz, sendo esse conceito complementado, somente em 1621 por Willebrord Snel.

No século I d.C, os chineses usaram uma teoria no campo espiritual para justificar as mudanças que ocorrem por todo o mundo natural. Através do movimento cíclico do tipo ondulatório, consideravam que o crescimento e diminuição das duas forças, Yin e Yang seriam as causas das constantes mudanças que ocorrem no universo. O Princípio Retilíneo da Luz já era difundido na China, quando os moístas (seguidores de Mozi e fundadores da escola filosófica chinesa Moísmo) discutindo sobre sombras, constataram que a luz se propaga em linha reta. Os moístas também desenvolveram estudos sobre espelhos planos e côncavos. Eles já conheciam o que hoje chamamos de imagens reais e virtuais. [8]

Ibn Al-Haytham, físico islâmico, no século XI desenvolveu conceitos ópticos originais. Ele declarava que a luz era emitida por forças autoluminadoras, chamadas de emissões primárias. Acreditava existir também, uma emissão secundária, chamada de fonte acidental. Al-Haytham já defendia que a luz se propaga em todas as direções (em forma de esfera), ou seja, tridimensionalmente, e que a fonte secundária viajaria em linha reta, assim como a fonte primária.

Esse conceito de fonte acidental secundária significava que a luz também era emitida de qualquer ponto da poeira que está em um fecho de luz solar ou de um objeto opaco iluminado. (...) Era um pensamento verdadeiramente original, englobando, realmente, o princípio das pequenas ondas secundárias, proposto seis séculos depois pelo holandês Christian Huygens. [8]

Al-Haytham também descreveu sobre o conceito de cores, como sendo reais e independentes dos corpos luminosos, irradiando sua luz em todas as direções, em linha reta. Hoje não seria viável a aceitação desse conceito, já que é sabido que as cores são provenientes da absorção e reflexão da luz visível. Outro mérito de Al-Haytham é o conceito introdutório da existência de raios de luz, com o qual descreveu sobre a visão, rejeitando o modelo grego em que a visão era algo que emanava do olho. Em se tratando da refração da luz chegou à conclusão que ela é causada por raios luminosos que viajam a diferentes velocidades em materiais diferentes. Suas leis sobre refração foram usadas no século XVII por Kepler e Descartes.

Tendo como base para a valorização da educação, a escrita e a leitura, no século XII os romanos desenvolveram o processo de tradução dos textos científicos e filosóficos dos árabes

e gregos, se tornando mais tarde disponíveis em latim. Os principais tradutores dos primeiros trabalhos foram Adelard de Bath, Gerard de Cremona e Michael Scot.

Paris tornou-se rapidamente um grande centro de teologia cristã ocidental, e por volta de 1220, as ordens dominicanas e franciscanas começaram a ensinar. Os franciscanos produziram dois grandes cientistas, Robert Grosseteste e seu aluno Roger Bacon, ambos conhecedores na série de traduções das fontes árabes então disponíveis. [8]

Grosseteste conduziu os franciscanos ingleses ao estudo das Escrituras e das línguas, como também lhes ensinou matemática e ciência natural. O próprio Grosseteste tinha grande curiosidade das coisas naturais e escreveu textos a respeito de astronomia, cosmo, som e particularmente óptica. Seu conhecimento geral dos trabalhos de Aristóteles também o estimulou a escrever sobre a natureza da pesquisa científica. Acreditava que a finalidade da ciência era descobrir as razões para a experiência, encontrar as causas. Com a descoberta das causas, era preciso analisá-las e selecioná-las. Tendo uma hipótese, deveria ser testada pela observação. [8]

Fazendo uma análise de dependência entre as ciências, Grosseteste declarou que a óptica e a astronomia eram subordinadas à geometria, pois ambas usavam técnicas geométricas para explicar o comportamento dos raios de luz refletidos por espelhos ou refratados em vidro ou água, assim como o movimento dos corpos celestes.

Grosseteste considerava que a óptica era ciência física básica. Acreditava que a luz foi a primeira forma de matéria-prima a ser criada, como sendo uma substância física que se propagava a partir de sua fonte em um ponto de uma esfera, dando origem, assim, às três dimensões do espaço. Não se limitando apenas em especulação filosófica sobre a luz, Grosseteste estudou o comportamento dos raios luminosos - raios visuais, refletidos e refratados - assim como a formação do arco-íris. Sobre as imagens formadas por espelhos e lentes, ele acredita que:

Essa parte da óptica, quando bem entendida, nos mostra como podemos fazer com que coisas situadas a grandes distâncias pareçam estar muito perto e coisas grandes e próximas pareçam muito pequenas, e como podemos fazer pequenas coisas colocadas à distância parecerem tão grandes quanto quisermos, de tal forma que nos é possível ler as menores letras a uma distância incrível, ou contar areia, grãos ou sementes ou qualquer espécie de objetos diminutos. [8]

Grosseteste também discutiu sobre a lei da refração da luz através de uma lente, embora não tenha chegado a uma conclusão concreta. No entanto, seu trabalho em óptica foi um grande acontecimento e forneceu uma rápida visão do estímulo ao trabalho científico e experimental que o influxo dos livros de ciências gregas iria trazer.

Do ponto de vista científico, o mais importante discípulo de Grosseteste foi Roger Bacon, que herdou do seu professor o fascínio pela óptica, mergulhando assim na ciência experimental. Dedicou-se a estudos nos quais introduziu a observação da natureza e a experimentação como fundamentos do conhecimento natural. Roger Bacon vai um passo além de seu tutor e descreve o método científico com um ciclo repetido de observação, hipótese, experimentação e necessidade de verificação. Ele registrava a forma em que conduzia seus experimentos em detalhes precisos a fim de que outros pudessem reproduzi-los e testar os resultados.

Bacon acreditava que era possível a aplicações de instrumentos ópticos para usos militares e astronômicos, sabendo que os mesmos fazem parecer mais perto objetos distantes e mais longes objetos próximos, tal como Grosseteste havia observado. [9]

Roger Bacon propôs a hipótese de que as cores do arco-íris teriam origem em reflexões e refrações da luz em ângulos precisos. Também estudou as propriedades do olho humano, do qual fez um diagrama razoavelmente preciso, de acordo com a figura abaixo.

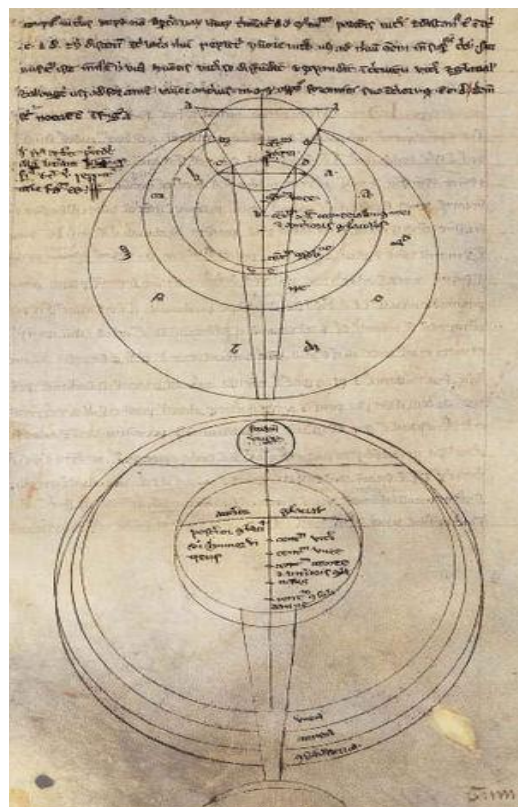


Figura 1: Olho humano descrito por Bacon recebendo raios luminosos.  
Fonte: [www.pt.wikipedia.org](http://www.pt.wikipedia.org).



Bacon, baseado em suas pesquisas sobre óptica, descreveu o olho como uma máquina onde se formam imagens. A concepção do olho como recebendo do objeto visto indica que a teoria da emissão foi abandonada e substituída pela teoria da intromissão. Após compreender as causas da refração da luz, foi o primeiro a sugerir o uso de lentes como óculos. [9]

Bacon desenvolveu suas ideias num tempo, em que a Europa, após um período de letargia iniciado com o declínio do Império Romano, entrava em contato com o pensamento e o conhecimento trazido pela civilização grega e árabe, abrindo assim, um campo de possibilidade de propagação do conhecimento. Como a busca pela ciência virou seu fascínio, Bacon transitou do pensamento religioso para o pensamento científico.

### 3. NATUREZA CORPUSCULAR E ONDULATÓRIA DA LUZ

#### 3.1 - A IDADE DAS TREVAS E A IDADE DA LUZ

A Idade Média (século V ao XV), foi um período de estagnação do conhecimento, ficou conhecida como a “Era das Trevas”, pois todas as ideias filosóficas e científicas que foram desenvolvidas sobre a luz pelos filósofos da antiguidade, foram desconsideradas. O que marcou esse período foi a hegemonia da igreja católica que utilizou seus dogmas para limitar seus seguidores ao julgo da Lei Divina, eliminando assim, por meio da Santa Inquisição, toda forma de rebeldia que poderia surgir através da retórica dos pensadores. O homem enquanto criação Divina, imagem e semelhança de Deus, era considerado soberano sobre todas as coisas da natureza o que justifica a Teoria Geocêntrica na qual a Terra é o centro do Universo, pois é nela que o homem está.

No final da Idade Média alguns católicos começaram a questionar a soberania humana, como Nicolau Copérnico que através de estudos e da observação das estrelas, a olho nu, pode constatar que a Terra girava em torno do Sol. Nasceram então os primeiros rumores da Teoria Heliocêntrica (o Sol no centro do Universo). [2]

Naquele tempo a Igreja Católica aceitava essencialmente o geocentrismo aristotélico e ao contrário do que se poderia imaginar, durante a vida de Copérnico não se encontram críticas sistemáticas ao modelo heliocêntrico por parte do clero católico. De fato, membros importantes da Igreja ficaram positivamente impressionados pela nova proposta e insistiram para que essas ideias fossem mais desenvolvidas. Contudo, Galileu Galilei, contemporâneo de Copérnico, ao defender a teoria heliocêntrica depara-se com grandes resistências no seio da mesma Igreja Católica. Através da Santa Inquisição, a Igreja exige retratação ou a morte. Galileu então, nega suas afirmações, mas segue seus estudos sem divulgá-los.

Esse período no fim da Idade Média que se seguiu durante duzentos anos (século XIV e XV) é chamado de Renascentismo. Foi nele que as ideias começaram a fomentar as mentes. A busca por explicações de fenômenos da natureza na razão e não mais na força Divina causa essa mudança lenta, mas necessária para o desenvolvimento do conhecimento. A Igreja começa a enfraquecer à medida que os pensamentos evoluem. A Ciência, as Artes e principalmente a Filosofia conhecem o início de uma nova era, o Iluminismo. [2]

O Iluminismo (Era da Razão ou Período da Luz) foi um movimento cultural de elite de intelectuais do século XV ao XVIII na Europa, que procurou mobilizar o poder da razão, a

fim de reformar a sociedade e o conhecimento prévio. Promoveu o intercâmbio intelectual e foi contra a intolerância e os abusos da Igreja e do Estado. O centro do Iluminismo foi a França, mas logo se espalhou por toda a Europa. É nesse período que começam os primeiros estudos Físicos sobre a Luz e as primeiras discussões baseadas em experimentos científicos sobre seu comportamento: corpuscular ou ondulatório.

### 3.2 – ESTUDO DA LUZ SOB O PONTO DE VISTA DO MECANICISMO

O desenvolvimento da teoria física da luz durante o Século XVII está associado à construção de modelos mecânicos, caracterizando o mecanicismo. Esses modelos procuram então explicar por meio de conceitos puramente mecânicos as propriedades conhecidas da luz, como a propagação retilínea, a reflexão, a refração ou a origem das cores. Os modelos mecânicos era o que havia de mais inovador para a época. Outra dificuldade concernente a realização dos trabalhos científicos advinha da inexistência de padronização das unidades de medida, uma aquisição que somente seria concretizada com o Sistema Métrico Decimal proposto durante a Revolução Francesa de 1789. Assim, gradativamente, a filosofia mecanicista substituiria o aristotelismo como a nova chave para a compreensão do mundo físico, parecendo adequar-se a todas as áreas. [10]

Torna-se imprescindível para a compreensão das teorias desenvolvidas nesse período, conhecer a ideia de éter que havia na época.

#### 3.2.1 - A ideia filosófica e científica do éter

O conceito do eter surgiu com Aristóteles, discípulo de Platão. Utilizando a teoria dos Quatro Elementos de Empédocles, ele concedeu aos elementos propriedades características: [11]

- Terra: fria e seca
- Água: fria e úmida
- Ar: quente e úmido
- Fogo: quente e seco

As transformações que são observadas à nossa volta, é produto das inúmeras combinações e separações desses quatro elementos fundamentais. A partir disso, Aristóteles sugeriu o princípio que organiza essas transformações. Cada substância tem o seu lugar

natural. Por exemplo, a terra fica abaixo de tudo. Portanto, o lugar da pedra é sempre no chão. É por isso que uma pedra, quando largada de uma altura, cai, instintivamente, buscando seu lugar de origem, o chão. Já o fogo ocupa o lugar mais elevado, no topo da atmosfera. É por isso que o fogo sobe, atravessando o ar. E a água? Ela cai em forma de chuva através do ar, espalhando-se sobre a terra. Com esse raciocínio simples e intuitivo, Aristoteles ordenou o mundo material de acordo com as posições dos quatro elementos fundamentais: a terra abaixo de tudo, a água sobre ela, o ar sobre a água e, por último, nas camadas mais elevada da atmosfera, o fogo. [11]

Para tal, Aristóteles criou uma separação essencial entre o que ocorre aqui na Terra e que ocorre nos céus. Usando a Lua como divisão imaginária entre duas realidades ou domínios, Aristóteles propôs que, da Lua para baixo, tudo fosse feito dos quatro elementos. Porém, os objetos celestes, incluindo a Lua, eram compostos de uma quinta substância, ou quinta essência, que ficou conhecido como éter, sendo considerado imutável, eterno e perfeito. Para ele os céus são o domínio do ser. Ao contrário do movimento natural dos quatro elementos, sempre vertical, o movimento dos objetos celestes, compostos de éter, é circular.

Os povos antigos utilizaram a teoria do éter como explicações místicas. Sem recursos físicos essenciais, denominaram o éter como um fluido que preenchia os espaços vazios entre os planetas e estrelas e que a própria matéria seria constituída por esse fluido. Seria o éter o quinto elemento pelo conceito aristotélico. Acreditavam que o espírito humano também era constituído por camadas deste fluido, sendo este conceito defendido por várias linhas místicas, entre elas a Teosofia (conjunto de conhecimento que sintetiza filosofia, religião e ciência), tendo um grande adepto da doutrina espírita, Allan Kardec, que denominava o éter como fluido cósmico universal. [11]

Dentro do conceito científico, no século XIX, influenciados pelas perturbações mecânicas das ondas, os físicos acreditavam que existia uma relação entre a onda luminosa e as ondas mecânicas. Como o éter era considerado uma substância de baixa densidade e que ocupava todo o espaço vazio, seria então o meio através do qual a luz se propaga. Assim como as ondas mecânicas necessitam de um meio material para se propagar, acreditava-se que a luz também precisaria de um meio para propagar-se do Sol até a Terra, e que esse meio seria o éter.

Na segunda metade do século XIX, Maxwell demonstrou matematicamente que a luz não necessita de um meio material para se propagar, podendo assim propagar-se no vácuo,

dando as primeiras características de que a luz é uma onda eletromagnética, ou seja, descobriu que a luz são, na verdade, campos elétricos e magnéticos que se propagam como uma onda.

Em 1887, Michelson e Morley fizeram uma experiência para determinar a velocidade da Terra em relação ao éter. Em sua experiência a velocidade da Terra dava zero, sendo o experimento repetido de forma aprimorada por outros cientistas, obtendo o mesmo resultado. Assim, os cientistas concluíram que se o éter realmente existisse, a natureza se comportava de forma a torná-lo imperceptível. Muitas teorias surgiram para tentar manter a existência do éter. [10]

Por não ser detectado por nenhum dos experimentos realizados, no início do século XX, a teoria do éter se encontrava enfraquecida e desacreditada. Em 1905, Albert Einstein postulou a hipótese fundamental da teoria da relatividade, através da qual elimina a existência do éter, afirmando que a velocidade luz é a mesma para todos os observadores inerciais.

Alguns cientistas da atualidade ainda se dedicam a provar a existência do éter. Uma vertente da física moderna, defensora da teoria do éter, tenta mostrar que ele não é em si vazio, mas preenchido por flutuações eletromagnéticas ou flutuações quânticas chamadas de flutuações do vácuo quântico retratadas como partículas virtuais. Acredita-se que tais teorias ainda estão longe de serem testadas por falta de material ou por não se ter aparelho que permita medir.

### 3.3 – ESTUDOS CIENTÍFICOS DO COMPORTAMENTO DA LUZ

#### 3.3.1 - René Descartes

Na descrição do mundo de Descartes, todos os corpos visíveis seriam compostos pelas formas de matéria acima descritas (Teoria dos Quatro Elementos), bem como de três elementos: O Sol e as estrelas fixas teriam a forma do primeiro elemento (ser luminoso); o céu, do segundo (ser transparente); os planetas e os cometas, do terceiro (ser opaco ou escuro). Com esse modelo, poder-se-ia explicar a propagação retilínea da luz, a diversidade de cores e a refração. Por exemplo, o espectro de cores, produzido quando a luz atravessa um prisma, seria causado por graus variáveis de tendência ao movimento de rotação. Algumas cores seriam mais predispostas que outras a rotação ao invés do movimento em linha reta: a cor vermelha, por se desviar mais em relação à direção original de propagação, seria causada por partes dotadas de uma velocidade maior de rotação do que a cor amarela, e esta, por sua

vez, maior do que o azul, cujas partes seriam as de menor rotação. Evidentemente, se essa velocidade de rotação fosse interpretada de forma semelhante ao conceito atual de frequência, a descrição de Descartes estaria invertida, pois a frequência correspondente ao azul é maior que a do amarelo e a deste é maior que a do vermelho, causando assim maior desvio em relação à direção original. [9]

A decomposição da luz visível pode ser visualizada conforme a figura:

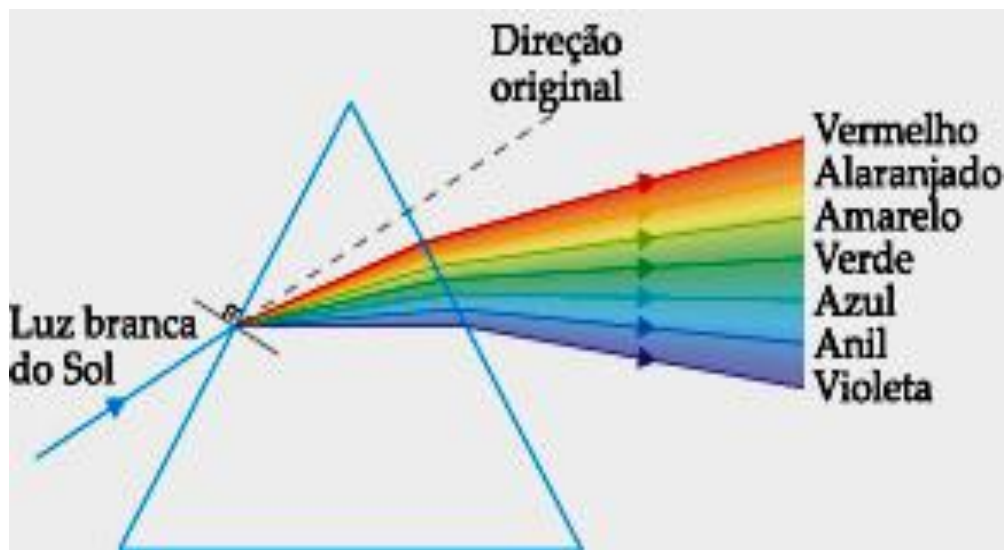


Figura 2: Decomposição da luz branca, contrapondo a teoria de Descartes.  
Fonte: [www.vestibulandoweb.com.br](http://www.vestibulandoweb.com.br)

Descartes formulou uma hipótese mecânica para explicar todo o universo, baseada nos turbilhões de um éter, que transmitiria os movimentos, acoplado mecanicamente os corpos celestes. Segundo ele, a luz seria uma pressão estática produzida pelo éter ou ar sutil e transmitida instantaneamente até o observador, entrando via nervo ótico. A pressão do éter estimularia o nervo ótico, que a transmitiria ao cérebro, onde seria interpretada pela alma. De acordo com Descartes, qualquer centro de turbilhão no universo emite luz, haja um astro nele ou não. Isso explicaria a luz proveniente do Sol.

A chama de uma vela produziria também uma pressão no ar sutil. Esta pressão é como um tremor que se propaga. Descartes relança, portanto, a ideia aristotélica da luz como perturbação de um meio.

Segundo Descartes a refração seria explicável através de uma colisão das partículas de luz com uma membrana (representando a interface dos meios), que mesmo oferecendo resistência, consegue atravessar, sendo parcialmente desviada. Assim, adotara a interpretação corpuscular da luz.

Com base na Lei de Snell para a refração, Descartes observa que a velocidade das partículas de luz depende apenas do meio em que viajam, meio este que opõe diferentes resistências ao movimento. Surge assim a lei de Snell-Descartes, onde  $v$  é a velocidade variando de acordo com o índice de refração ( $n$ ) de cada meio.

$$\frac{V_i}{n_i} = \frac{V_r}{n_r}$$

O modelo proposto por Descartes implica que a velocidade da luz seja maior no vidro que no ar (ou mesmo no vácuo), embora ele tivesse consciência do caráter paradoxal desta conclusão.

$$V_{\text{ar}} < V_{\text{vidro}}$$

O matemático Pierre Fermat, contemporâneo de Descartes, formula o princípio do mínimo tempo de trajeto da luz para a reflexão e a refração, tendo resultados de acordo com a lei de Snell-Descartes. Porém, para esta hipótese ser válida experimentalmente, foi preciso supor que a velocidade da luz no ar é maior que no vidro.

$$V_{\text{ar}} > V_{\text{vidro}}$$

De acordo com o resultado experimental de Fermat, a velocidade de propagação da luz é inversamente proporcional ao índice de refração do meio.

$$\frac{V_i}{V_r} = \frac{n_r}{n_i}$$

### 3.3.2 – Francesco Maria Grimaldi

Grimaldi nasceu em 1618, em Bolonha. Foi professor de matemática e astronomia. Em sua obra *Physicomathesis de Lumine, Coloribus ET Iride* (Tese Psicossomática da Luz, Cores e Arco-íris), publicada em 1665, Grimaldi afirma que a cor não é propriedade dos corpos e que está relacionada com a luz.

Aprofundando na óptica, Grimaldi descobriu e explica de forma detalhada o fenômeno da difração da luz. Essa descoberta permitiu, mais tarde, demonstrar a natureza ondulatória da

luz. Ele observou que mesmo no ar a luz não seguia em linha reta: havia luz mesmo na sombra geométrica, e o fenômeno não dependia do material do anteparo. A difração era explicada por analogia com as ondas de superfície da água, como as ondas do mar que são difratadas ao passar por um barco ancorado. A densidade do fluido que propaga a luz dependeria do meio material onde a luz se propagaria e determinaria sua velocidade no meio.

O fenômeno difração é considerado, o desvio ou espalhamento sofrido pela onda quando esta contorna ou transpõe obstáculos colocados em seu caminho, de acordo com a figura 3. Pode-se dizer que tal fenômeno acontece a todos os tipos de ondas. [9]

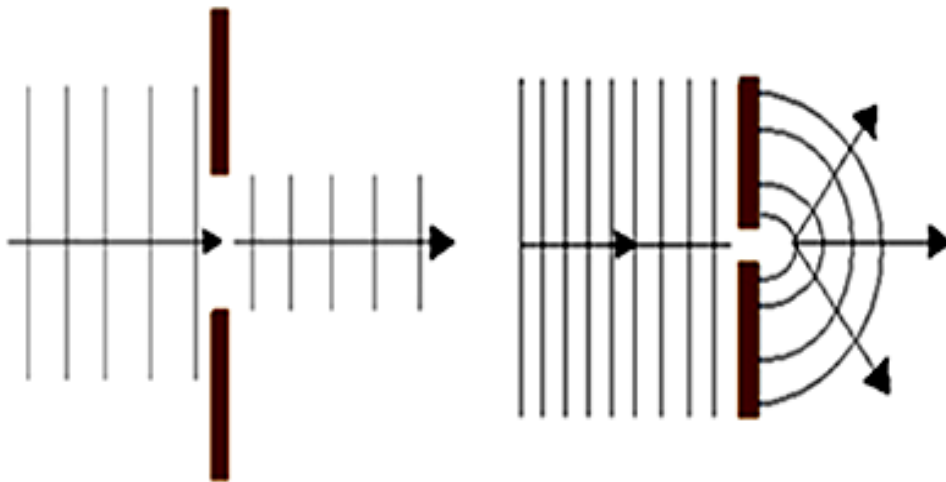


Figura 3: Esquema onde Newton demonstra a dispersão e recomposição da luz branca, usando dois prismas com angulação invertida.

Fonte: [8]

A maior ou menor capacidade que uma onda tem de sofrer difração está relacionada ao tamanho do obstáculo a ser contornado ou à largura da passagem a ser transposta e o seu comprimento de onda.

A difração será tanto mais intensa quanto maior for o comprimento de onda quando comparado ao tamanho do obstáculo. Em outras palavras, a onda contorna mais facilmente os obstáculos quando estes são pequenos, se comparados ao comprimento de ondas das ondas.

### 3.3.3 - Isaac Newton

Os primeiros estudos significativos feitos sobre a luz surgiram de Newton, em meados do século XVIII. Nesse período corriam rumores que a luz poderia ter comportamento ondulatório, mas nada havia de concreto sobre o assunto.



Através do estudo comportamental, Newton explicou a reflexão e partindo da hipótese (que mais tarde foi comprovada como falsa) que a luz tem velocidade maior na água e no vidro do que no ar, conseguiu explicar o fenômeno da refração. Segundo ele, a luz era fluxo de corpúsculos, baseando-se no fato de ser parcialmente refletida e parcialmente refratada, por um sistema de ajustes de reflexão e ajustes de refração. Tais ajustes eram causados, pensava ele, pela vibração dos corpúsculos ao serem ejetados pela força emissora.

Em 1666, fazendo experiências com prismas, Newton verificou que a luz ao passar por um prisma gera um espectro colorido e que, ao colocar outro prisma com orientações opostas no mesmo plano, este por sua vez recompõe a luz branca, fortalecendo a hipótese de que a luz branca seja composta de diferentes cores, cada qual com um índice de refração. [12]

Sobre o fenômeno de dispersão da luz, em 1672, Newton faz um comunicado à Royal Society, detalhando seu experimento com prismas:

De acordo com a minha promessa, faço saber, sem mais cerimônias, que no princípio do ano de 1666, quando me ocupava a polir ópticos de formas não esféricas, obtive um prisma de vidro triangular, para fazer a experiência do célebre fenômeno das cores. Para isso puz-me no meu quarto às escuras e pratiquei um pequeno orifício na porta da janela. Comecei por olhar com prazer as cores vivas e intensas assim produzidas, mas depois, considerando-as com mais atenção surpreendeu-me verificar que elas tinham uma forma oblonga, ao passo que, de acordo com as leis da refração, esperava que a sua forma fosse circular (...) Comparando o comprimento deste espectro colorido com a largura encontrei-o cinco vezes maior; diferença tão extraordinária que me levou a examinar com uma viva curiosidade qual poderia ser a respectiva causa. [3]

A figura 4 representa a experiência realizada por Newton para demonstrar a decomposição da luz branca nas sete cores monocromáticas:



Figura 4: Esquema onde Newton demonstra a dispersão da luz branca nas sete cores.  
Fonte: [www.luztecnologiaearte.weebly.com/luz-branca.html](http://www.luztecnologiaearte.weebly.com/luz-branca.html)

Newton atribuiu as causas da dispersão a defeitos do vidro, e para comprovação faz uma segunda observação, colocando outro prisma com orientações opostas no mesmo plano, acreditando poder aumentar o efeito observado.

A imagem abaixo é um manuscrito, datado cerca de 1672, contendo um esboço da experiência de Newton para mostrar não somente que a luz branca (chegando em S, à esquerda) é dispersa, em suas cores distintas, por um prisma, mas também que essas cores podem ser recombinadas usando-se um segundo prisma, invertido. [8]

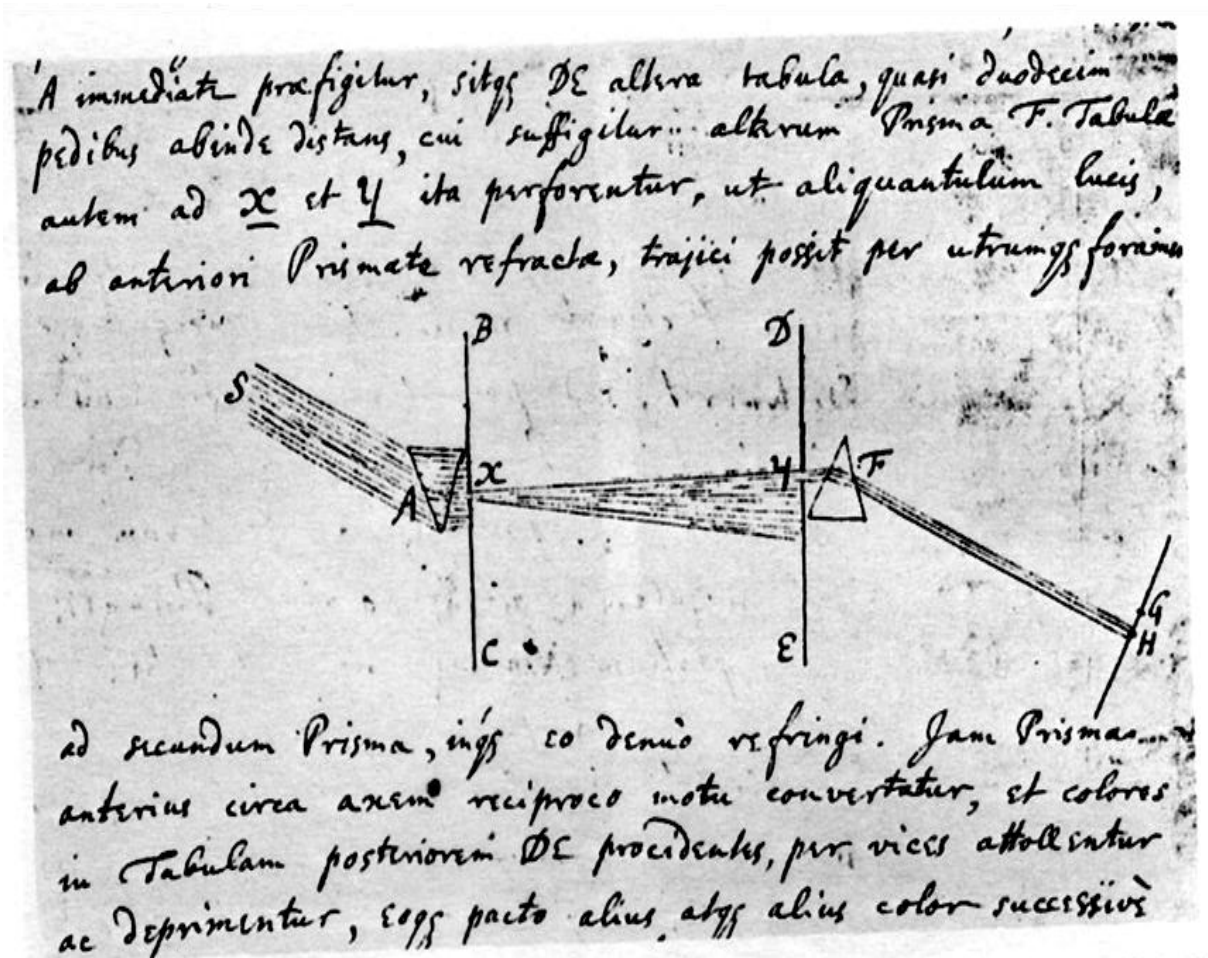


Figura 5: Esquema onde Newton demonstra a dispersão e recomposição da luz branca, usando dois prismas com angulação invertida.

Fonte: [8]

Após as observações, Newton conclui:

(...) as cores não são modificações da luz, resultando, como se crê geralmente, da refração ou reflexão, mas são suas propriedades originais e natas que, para raios diferentes são diferentes (...) Ao mesmo grau de refringência pertence sempre a mesma cor e à mesma cor pertence sempre o mesmo grau de refringência. Os raios menos refringentes são vermelhos; os mais refringentes apresentam uma cor violeta

intensa (...) Quando um raio é bem isolado dos de outra espécies, conserva sempre com obstinação a sua cor, e nunca pôde ver mudar de natureza. [3]

Partindo da experiência com os dois prismas, Newton concluiu que após a passagem da luz pelos dois prismas, a luz se recompõe, fortalecendo a hipótese de que a luz branca seja composta de diferentes cores, cada qual com um índice de refração.

Ao fazer experiência com superfícies polidas, Newton postulou a existência de uma força refratante distribuída uniformemente, e observou que quando, partículas de luz incidem sobre a superfície gera a reflexão das mesmas, tendo ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão, de acordo com a figura 6:

$$\theta_i = \theta_r$$

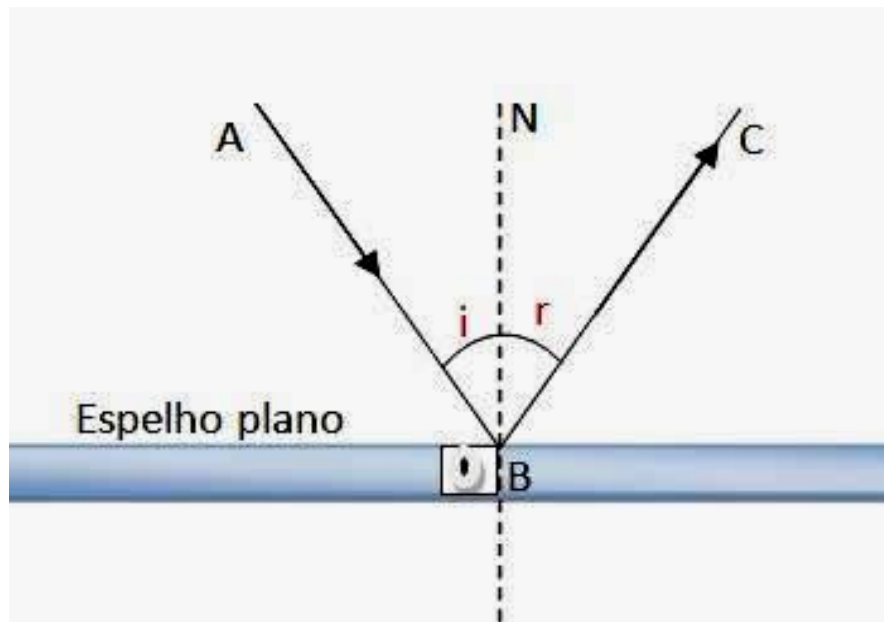


Figura 6: Reflexão da luz em espelho plano.  
Fonte: [www.sofisica.com.br](http://www.sofisica.com.br)

Quanto à refração, Newton baseou-se nos dados de Descartes, chegando à conclusão de que a partícula de luz quando passa de um meio para outro sofre desvio, afastando da normal, perpendicular à superfície de separação dos meios. Convém notar que, como no caso de Descartes, Newton supôs que a velocidade no vidro seja maior do que no ar.

A figura 7 demonstra a refração sofrida pela luz ao passar do meio ar para o meio vidro de acordo com a observação de Newton:

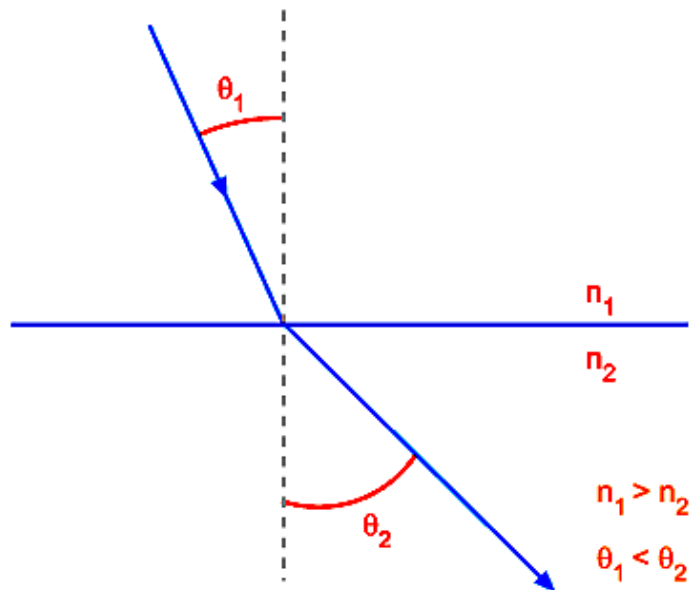


Figura 7: Refração da luz nos meios ar ( $n_1$ ) e vidro ( $n_2$ ).  
 Fonte: www.passeiweb.com

Mesmo sendo principal defensor da teoria corpuscular da luz, Newton reconheceu que quando a luz incidia em uma película fina produzia efeitos de borda colorida, pois acreditava que a luz se propagava de forma retilínea. E para explicar interferência, em suas experiências com lâminas finas e interfaces, Newton postulou mais tarde a existência de certos aspectos ondulatórios da luz. [9]

Para explicar os anéis de interferência, postulou mais tarde a existência de certos aspectos ondulatórios da luz. Em suas experiências com lâminas finas e interfaces, Newton observou que:

- I. Anéis se formam entre lente esférica e vidro plano.
- II. A posição dos anéis só depende da espessura do ar, não do vidro utilizado.
- III. A sequência de cores se repete de forma periódica com a espessura da camada de ar.
- IV. Os anéis se tornam mais nítidos com luz monocromática.
- V. Cada cor tem um comprimento característico (medido por Newton) para periodicidade de seus anéis.
- VI. Existem anéis de transmissão e de reflexão, que são complementares:

Luz branca: cores complementares reflexão/transmissão

Luz monocromática: alterna-se transmissão/reflexão

De acordo com a figura abaixo, é possível perceber os anéis de interferência observado por Newton:

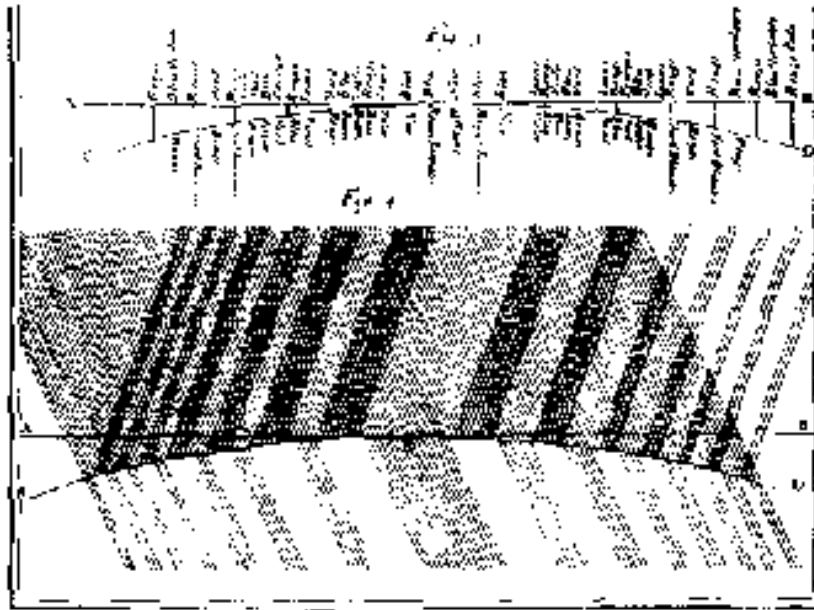


Figura 8: Ilustração do *Opticks* de Newton, mostrando os anéis de interferência e suas cores para transmissão e reflexão.

Fonte: [9]

A explicação ondulatória de Newton para estes fenômenos é a seguinte: a colisão das partículas de luz com as interfaces produz ondas secundárias, como pedras ao bater na superfície da água. Seriam ondulações de um éter que tudo permeia, mas que não constituem por si mesmas, a luz.

Se as partículas atingem a segunda interface em fase com esta onda, ela tem acesso para penetrar ao meio. Caso contrário, há reflexão. Os comprimentos dessas ondulações dependem da cor da luz. Em suma, Newton mediu o comprimento de onda da luz de diversas cores. A teoria de Newton é, portanto, híbrida entre ondulatória e corpuscular. No entanto, a história reteve apenas a teoria corpuscular, considerada dogma científico por algum tempo.

Em 1704, Newton publicou a obra *Opticks*, em que relata seus resultados sobre a decomposição espectral da luz branca e observações de efeitos ondulatórios, incluindo determinações precisas de comprimentos de onda, combinando as teorias corpuscular e ondulatória. [9]

### 3.3.4 - Christian Huygens

A teoria ondulatória da luz teve contribuição inicial de Christian Huygens. Ele nasceu em Adia, na Holanda, em 14 de abril de 1629. Filho de Constante Huygens, uma das figuras mais importantes do renascimento na Holanda, foi também um grande amigo do filósofo René Descartes. Foi convidado por Luis XIV a vir para Paris como um membro da Academia de Ciências que tinha acabado de ser fundada. Aceitando o convite, passou quinze anos em Paris saindo de lá somente para visitas a sua terra natal. Em 1678, Huygens apresentou a academia francesa, sua mais importante contribuição para o progresso da Física, o trabalho intitulado Tratado da Luz, onde descrevia sua teoria ondulatória da luz, mas só publicou em 1690, em Leyden. [9]

Originário de família holandesa abastada, Huygens foi aluno direto de Descartes. Escolheu a interpretação ondulatória do modelo cartesiano, que admitia que a luz pudesse consistir de tremores no ar sutil. Tal como Descartes, postulava um meio material que transmite mecanicamente a luz como perturbação. O principal argumento de Huygens na defesa deste ponto de vista foi a seguinte consideração: dois feixes de luz que se cruzam não são desviados um pelo outro (não colidem), logo não são materiais.

A concepção ondulatória da luz exige um meio de propagação que permeie o universo, designado pelo nome de éter. Ele deveria transmitir a perturbação do meio, o impulso, conforme a analogia mecânica de uma colisão de esferas representada na figura 9:

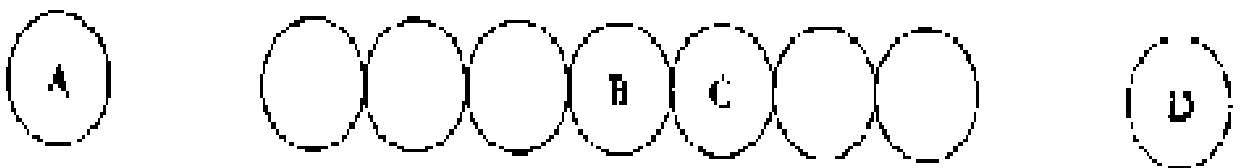


Figura 9: A transmissão de uma perturbação (onda) através de um meio intermediário se assemelha a uma colisão entre bolas, que transmitem sucessivamente o movimento. Ilustração do *Traité d'Optique* de Huygens.

Fonte: [9]

Segundo este modelo, a chama de uma vela, por exemplo, produziria uma agitação do éter na forma de impulsos que por ele se propagariam instantaneamente. Não havia, no entanto, ainda claramente formulada a noção de frequência e comprimento de onda em tais perturbações, o ponto fraco da teoria ondulatória de Huygens.

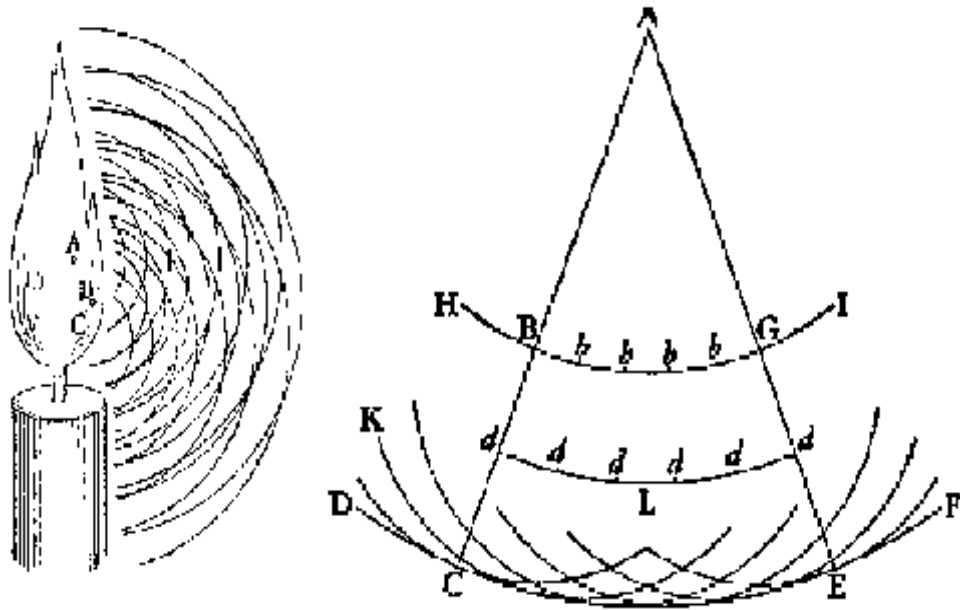


Figura 10: À esquerda, tremulações minúsculas provocadas pelo fogo emitem perturbações no meio circundante. À direita, frentes de onda originárias de um ponto se encontram em círculos concêntricos. Esta forma de onda é preservada em sucessivas expansões em círculo das frentes de onda. Ilustrações do *Traité d'Optique* de Huygens.

Fonte: [9]

No entanto, o Princípio de Huygens foi bem sucedido na explicação de vários fenômenos, enunciando que “cada ponto do éter atingido pela excitação luminosa pode ser considerado como o centro de uma nova onda esférica.” [3]. A onda idealizada por Huygens era como um pulso, uma onda semelhante às ondas do mar que chegam a uma praia.

Pelo Princípio de Huygens, a vibração total do éter será a soma dessas pequenas contribuições de forma esférica. Somente no lugar geométrico dos pontos em que todas as frentes de onda se somam, haverá perturbação significativa, ocorrendo cancelamento das ondas nas demais regiões do espaço. Em suma, trata-se de uma formulação rudimentar dos fenômenos de interferência e vibração. O Princípio de Huygens permite explicar alguns fenômenos bem conhecidos da óptica:

- **Incidência oblíqua em um espelho:** há um retardamento nos pontos de emissão situados sobre a interface. O efeito combinado dos retardamentos resulta na reflexão da onda de acordo com a figura abaixo.

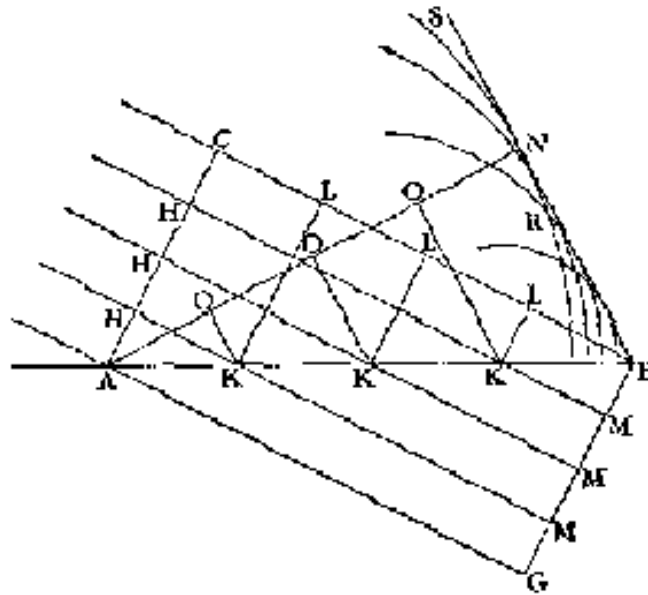


Figura 11: Uma frente de onda plana encontra uma superfície plana nos pontos K, em instantes sucessivos. As ondas, emitidas com diferentes atrasos dos vários pontos K se expandem em círculos, formando nova frente de onda plana. Ilustração do *Traité d'Optique* de Huygens.

Fonte: [9]

- **Refração:** a estrutura da matéria deve ser tal que a velocidade diminui no meio mais denso. Os múltiplos pontos de emissão na interface produzem uma onda que se aproxima da direção normal, como de fato ocorre experimentalmente e essa onda refratada é demonstrada na figura 12:

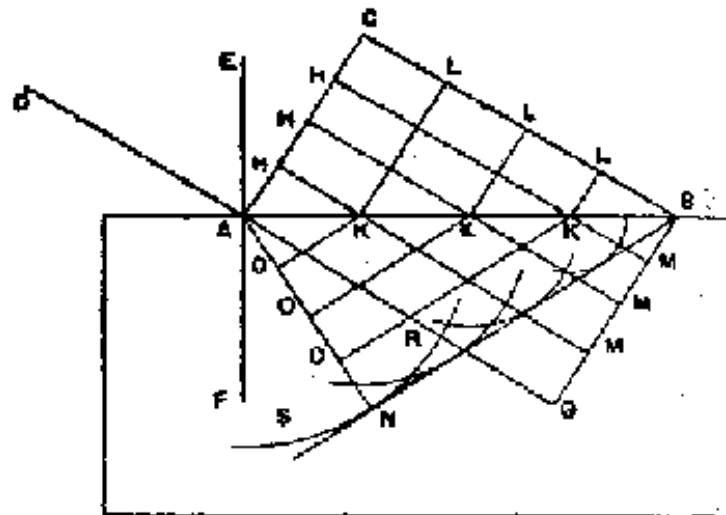


Figura 12: Refração sofrida pela onda proposta por Huygens

Fonte: [9]



No modelo de luz de Huygens, matéria deve interagir com o éter para modificar a velocidade de propagação da luz: meios como o vidro tornam o éter localmente mais denso, modificando sua elasticidade. A hipótese de Huygens está de acordo, no entanto, com o princípio do mínimo tempo de Fermat, que implica numa velocidade da luz menor no meio mais refringente, como o vidro. [9]

Christian Huygens havia proposto uma teoria ondulatória da luz, segundo a qual ela consistiria de vibrações de uma substância sutil, a que se chamou éter luminífero. Mas a teoria de Huygens não era suficientemente precisa e expressa com nitidez, e foi ofuscada pela teoria corpuscular de Newton, que prevaleceu durante todo o século XVIII.

O empenho de Huygens se dá, no sentido de considerar as várias propriedades da luz, apontando as falhas do modelo corpuscular para explicar tais propriedades e evidenciando as potencialidades do modelo ondulatório.

O *Traité d'Optique* de Huygens é breve e diversas questões não são abordadas, como aponta Newton em sua crítica a esta obra de seu contemporâneo. A principal delas é a origem das cores, para a qual Huygens não apresenta qualquer hipótese.

No tratado, Huygens afirma que as demonstrações relativas à Óptica são fundamentadas sobre verdades tiradas da experiência, tais como a propagação retilínea da luz, a igualdade dos ângulos de incidência e reflexão e o desvio do raio refratado segundo a regra dos senos. [13]

O tratado é dividido em duas partes: na primeira ele explica o que ocorre na refração e a reflexão e na segunda parte faz um discurso sobre o peso. Nesse período as ciências naturais vão se separando da filosofia e se contrapondo as ideias religiosas da época, conceitos sobre espaço aristotélico cheio e qualitativo, ou seja, o espaço era o lugar ocupado pelo corpo, em que a natureza tem horror ao vácuo e, ao trasladar-se um corpo, deslocava-se com ele o espaço por ele ocupado, é trocado pelos conceitos newtonianos de espaço contínuo, onde dois corpos não ocupam o mesmo espaço. Todas essas teorias precisavam de comprovações. A contribuição de Huygens deve ser compreendida no contexto de sua época. [10]

### **3.3.5 - Robert Hooke**

Robert Hooke, assim como Descartes, possuía uma concepção mecânica da luz. Supunha ser a luz uma vibração mecânica de grande frequência e pequena amplitude. Um exemplo concreto por ele apresentado foi a propagação da luz no duro diamante e outros corpos transparentes, possível apenas com estas hipóteses. Segundo Hooke, a luz teria uma velocidade muito grande, mas não infinita, se propagando em linha reta. [9]

Hooke foi um dos principais opositores às teorias corpusculares apresentadas por Newton. A hipótese corpuscular não era de fato indispensável na explicação de grande parte de suas observações, tais como o fato da luz branca ser composta pelas cores do arco-íris.

Em 1665, Robert Hooke, publica sua *Micrografia*, em que descreve observações ao microscópio das cores de lâminas delgadas, explicadas hoje como um fenômeno de interferência, e da difração, também descrito por Francesco Maria Grimaldi, nesse mesmo ano. Grimaldi evidenciou experimentalmente a difração da luz por volta de 1660.

Para Hooke, a luz seria constituída por pulsos de pequena amplitude, propagando-se em um meio contínuo, e possuiria apenas duas cores básicas, o vermelho e o azul. As demais cores seriam geradas a partir dessas duas durante as refrações.

### 3.3.6 - Thomas Young

Young foi o décimo filho de uma família sem muitos recursos financeiros. Tinha um amplo interesse por idiomas, literatura e ciências. Estudou medicina em Londres e antes mesmo de graduar, já desenvolvia estudos científicos em várias áreas. Suas primeiras pesquisas foram sobre visão e audição, o que o levou a se interessar pela óptica e pelas teorias a respeito da natureza da luz.

Young foi um pesquisador extremamente eclético em suas atividades. Estudou a audição e o problema da propagação de ondas e vibrações. No campo de decifração de alfabetos, procurou decifrar a *Pedra de Roseta* (bloco de granito negro com escrita hieroglífica), fornecendo uma primeira interpretação dos hieróglifos egípcios (escrita contendo sinais alfabéticos e símbolos). [1]

Leu a *Óptica* de Newton e rejeitou sua teoria dos acessos para explicar os anéis de interferência. Raciocinou a respeito da luz em analogia com as vibrações sonoras. Para explicar a interferência, imaginou que a luz poderia ser sempre refletida, mas que certas ondas podem se aniquilar, produzindo as cores que vemos. Comparou tal aniquilação com o então já

conhecido fenômeno dos batimentos sonoros. Retomou as experiências de Newton sobre anéis de interferência, dando outra explicação para as franjas escuras no caso da luz monocromática.

Ao fazer seu famoso experimento, em 1802, Young demonstrou que a luz possuía natureza ondulatória, pois os fenômenos de difração e interferência descritos nessa experiência são de características exclusivamente ondulatórias. Ele fez um pincel de luz monocromática incidir sobre uma tela opaca  $O_1$  (obstáculo), com uma estreita fenda. A luz que atinge essa fenda se espalha sofrendo difração. Atrás da primeira tela, ele colocou outra tela opaca  $O_2$ , com duas fendas muito estreitas convenientemente próximas, sendo que cada uma delas funciona como uma fonte primária de ondas exatamente iguais (mesma frequência, mesmo comprimento de onda, mesma velocidade e em fase), ou seja, ondas coerentes, que é condição necessária para que ocorra a interferência. Em seguida, colocou um anteparo (película fotográfica) para registrar a figura de interferência. [9]

A figura abaixo mostra a montagem do experimento da dupla fenda feita por Young:

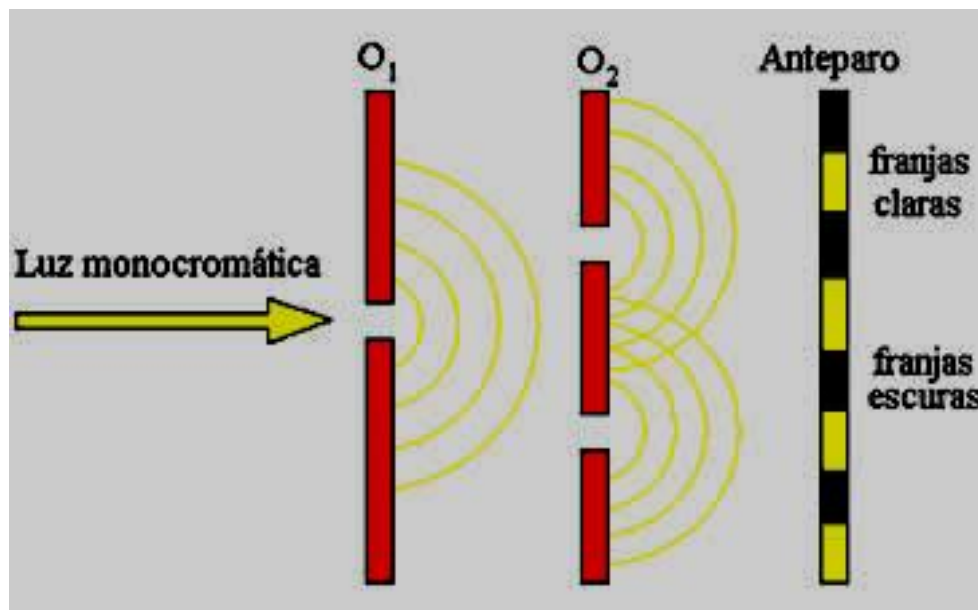


Figura 13: Experimento da dupla fenda de Young para o comportamento da luz  
Fonte: [www.alunosonline.com.br](http://www.alunosonline.com.br)

Young observou no anteparo uma figura de interferência formada por franjas brilhantes coloridas (interferência construtiva) alternadas por franjas escuras (interferência destrutiva). Se a luz incidente for luz monocromática vermelha as franjas serão vermelho escuro, se verde, verde escuro, se policromática branca, teremos uma faixa central branca,

resultado da interferência construtiva para todas as cores e as demais fixas serão coloridas (interferência construtiva para algumas cores e destrutiva para outras).

Concluiu também que o tamanho das fendas está relacionado com a definição das franjas. Quando as fendas aumentam temos franjas menos definidas e quando diminuem, mais definidas.

Devido à reflexão em suas superfícies internas e externas podemos ver manchas coloridas (franjas de interferência) em poças de água quando elas tiverem em sua superfície externa, óleo. Essa interferência entre as ondas refletidas ocorre porque a distância entre a superfície anterior e posterior da película é muito pequena. O mesmo acontece com as bolhas de sabão.

Nas franjas de interferência formadas no anteparo existem regiões em que a interferência é parcial e nelas, a intensidade luminosa sofre variações graduais.

As fendas dos obstáculos O1 e O2 não estão alinhadas, o que comprova a natureza ondulatória, pois, levando-se em conta a propagação retilínea da luz, o anteparo deveria estar completamente escuro e não seria atingido por nenhum raio de luz proveniente da fonte monocromática.

Os experimentos conduziram Young a concluir que a luz seria composta de ondas que se propagam no éter a 300 000 km/s. As cores corresponderiam a diversos comprimentos de onda da luz.

Young analisou que se a luz fosse constituída por corpúsculos emitidos pelos corpos luminosos deveria depender da fonte de luz. E se a velocidade da luz dependesse da fonte luminosa, a luz sofreria diferentes refrações conforme a fonte que a emitisse, mas isso não ocorre, concluindo então que a velocidade de uma onda depende do meio de propagação. [9]

Publicou resultados em 1804, enfrentando viva oposição do meio científico às suas ideias. Acreditavam que, Young como um médico, não tinha conhecimento científico suficiente para contrariar a teoria de Newton. Correspondeu-se com François Arago, na França, que lhe deu certo crédito, e que mais tarde contribuiria na consolidação das teorias ondulatórias da luz.

### **3.3.7 - Augustin Fresnel**

Fresnel não era um acadêmico de formação, mas engenheiro de pontes e calçadas. Criou alguns artefatos engenhosos em óptica, como a lente de Fresnel, utilizada para direcionar a luz em faróis de sinalização marítima.

Acreditava que a luz pudesse ser produzida graças a um fluido capaz de transmitir vibrações. Supôs que a hipótese corpuscular fora a mais aceita devido apenas à maior complexidade da matemática envolvida na descrição dos movimentos ondulatórios de um meio contínuo. [9]

Em 1814, participa de conflitos políticos na França e é retido em prisão domiciliar. Ele tem enfim o tempo para se dedicar ao problema da luz. Reproduziu a experiência da difração por um fio de cabelo, observando as franjas. Convenceu-se, com este experimento, da impossibilidade da teoria corpuscular. Fresnel busca orientação bibliográfica em François Arago (que já lera o trabalho de Young), que recomenda leitura de Grimaldi, Newton e Young. Mas Fresnel não sabe inglês ou latim, e não chega a tomar contato com a obra de Young. Sem o auxílio de Arago, Fresnel provavelmente não teria desenvolvido suas pesquisas, nem tampouco conseguido o reconhecimento da comunidade científica francesa, que em sua maioria defendia a teoria corpuscular da luz. [3]

Como Tomas Young, Fresnel também calcula corretamente a trajetória hiperbólica dos lugares geométricos dos pontos de interferência construtiva. Desenvolve a teoria, detalhando os cálculos e explicando a reflexão, a difração, as cores e envia a Arago (o mesmo que se interessara pelos resultados de Young). Em 1815, termina a prisão de Fresnel e ele pode trabalhar em laboratório. Faz experiências com luz monocromática e com fenda dupla. Aperfeiçoa sua teoria da difração supondo uma contribuição de ondas de todos os pontos da fenda, e não apenas das extremidades, obtendo, desta vez, o resultado correto.

Fresnel definia a propagação da luz como de vibrações de um fluido infinitamente sutil. Generalizou o princípio de Huygens e passa a contestar abertamente a teoria corpuscular de Newton.

Em 1819, a Academia de Ciências de Paris oferece um prêmio ao pesquisador capaz de solucionar alguns problemas fundamentais da ótica:

- Determinar os efeitos que ocorrem quando a luz passa na extremidade de um corpo.
- Deduzir por indução matemática os movimentos dos raios em sua passagem na proximidade de um corpo.

Fresnel redige um enorme tratado desenvolvendo esses temas. O matemático Poisson, no júri, mostra que certo efeito bizarro deveria se produzir na difração de um anteparo circular com incidência oblíqua, o que provaria a falsidade da teoria de Fresnel. Para uma dada geometria, se encontraria um máximo central na sombra geométrica do disco. Mas, realizado o experimento, o efeito realmente se produz. Fresnel ganha o prêmio em 1819. Este máximo

central na região de sombra passou a ser conhecido como ponto brilhante de Fresnel. Esta descoberta foi um grande triunfo da visão ondulatória da luz.

Dentro da teoria ondulatória, ainda não havia uma explicação científica para a polarização da luz. Fresnel e Ampère cogitam como possível explicação para a polarização, que a luz fosse a vibração transversal do éter, mas não a admitem publicamente. Muitas experiências apontam nessa direção.

Esta hipótese esbarra, no entanto, num bloqueio fundamental: como vibrações mecânicas transversais poderiam se propagar num fluido? Apesar dessa contradição básica, Fresnel acaba por sustentar que esta é a única hipótese que explica as experiências de polarização. Para se compreender o impasse, convém notar que não existem ondas elásticas transversais em fluidos, mas apenas em sólidos. A explicação de Fresnel em concordância com a teoria ondulatória é que é preciso acumular no éter um grande número de propriedades muitas vezes de difícil conciliação. [9]

No entanto, a simples volta para a hipótese corpuscular, para resolver esta contradição, já não era possível. Além do sucesso na descrição quantitativa da interferência e difração e outros fenômenos, a teoria ondulatória da luz ganhou outro suporte experimental. Experiências de interferência da luz atravessando a água, feitas por Hippolyte-Louis Fizeau, em 1849, levaram à conclusão de que a velocidade da luz é de fato inversamente proporcional ao índice de refração. A teoria corpuscular é definitivamente rejeitada, até surgir a hipótese dos *quantum* de luz em 1900, por Planck.

### 3.3.8 – James Clerk Maxwell

Maxwell, nascido em Edimburgo em 13 de julho de 1831, estudou matemática, filosofia e lógica na Universidade de Edimburgo. Mudou, em 1850, para Cambridge e filiou-se ao Trinity College, que havia sido frequentado por Isaac Newton. Se formou em 1854 em matemática.

Enquanto estava em Trinity, Maxwell, entre 1801 e 1803, começou suas pesquisas sobre eletricidade e magnetismo, e ao retornar para a Glenlair, dedicou-se a escrever sua obra que tem como título Tratado da Eletricidade e do Magnetismo publicado em 1873.

De acordo com o conceito de Maxwell, as ondas eletromagnéticas são perturbação que se propaga no meio. São geradas a partir de oscilações nos campos elétricos e magnéticos. Os campos elétricos e magnéticos obedecem aos princípios da superposição. Sendo assim, seus vetores cruzam-se e criam os fenômenos da refração e difração. Uma onda eletromagnética

pode interagir com a matéria e, em particular, interagir com átomos e moléculas que as absorvem, podendo os mesmos emitir ondas em outra parte do espectro. Assim, como qualquer fenômeno ondulatório, as ondas eletromagnéticas podem interferir entre si. Sendo a luz uma oscilação, ela não é afetada pela estática elétrica ou campos magnéticos de outra onda eletromagnética no vácuo.

Maxwell afirmava então, que perturbações eletromagnéticas geradas numa dada região deveriam propagar-se pelo espaço à velocidade da luz, exibindo também o caráter ondulatório típico da propagação luminosa.

### **3.3.9 – Heinrich Rudolf Hertz**

Hertz nasceu em Hamburgo, em 22 de fevereiro de 1857, filho de renomado advogado. Durante seus estudos preliminares, em um colégio da cidade natal, seu maior interesse se voltava para as oficinas da escola, onde passava a maior parte do tempo livre. Ali trabalhava no torno, construindo e montando os mais diferentes mecanismos, sobretudo instrumentos ópticos. Esse gosto característico pela construção se manteve durante toda sua vida, mesmo quando se dedicou à intensa pesquisa física: sempre construiu os instrumentos e aparelhos de que necessitava para seu trabalho.

Foi o interesse pelas construções mecânicas que, ao término do colégio, o orientou para uma faculdade de engenharia. Frequentou por dois anos, mas o desejo de realizar pesquisa pura se tornou mais forte que sua inclinação para a engenharia. Passou então, em 1878, a dedicar-se aos estudos de física, na Universidade de Berlim.

Sua seriedade e empenho nos estudos logo foram notados por Von Helmholtz, que era seu professor. E quando este propôs aos seus alunos, em 1880, um trabalho versando sobre uma questão de eletrodinâmica, de escolha individual, Hertz apresentou uma pesquisa original, intitulada Sobre a Energia Cinética da Eletricidade, que foi merecidamente a vencedora.

Ainda nesse ano de 1880, também ano de sua diplomação, Hertz tornou-se assistente de Von Helmholtz e, durante os três anos que passou no instituto berlinense, ocupou-se com pesquisas experimentais sobre a elasticidade dos gases e sobre as descargas elétricas através destes. Em 1883, obteve a docência na Universidade de Kiel, onde começou a estudar a eletrodinâmica de Maxwell. Este havia previsto teoricamente a existência das ondas

eletromagnéticas, mas o fato ainda não havia recebido confirmação experimental. “Hertz foi o primeiro a gerar e detectar ondas eletromagnéticas em um laboratório experimental”. [4]

Os estudos de eletrodinâmica o fascinavam, e ele imaginava como poderia reproduzir experimentalmente os fenômenos tão claros na teoria. Uma de suas descobertas fundamentais foi realizada diante dos estudantes, durante uma aula demonstrativa, no outono de 1886. Nessa ocasião, Hertz encontrava-se em Karlsruhe, onde era professor da Escola Politécnica desde o ano anterior.

Durante uma aula, na qual se utilizava, para demonstração, de duas bobinas ligadas a faiscadores, notou que, enquanto numa das bobinas deflagrava uma faísca, na segunda era deflagrada outra. Esta, porém, era muito pequena, pouco luminosa, e seu ruído era coberto pelo da primeira, muito mais forte. Foi desse modo que Hertz, descobriu o importante fenômeno das centelhas secundárias.

O jovem cientista compreendeu que aquelas faíscas elétricas eram consequência de fenômenos eletrodinâmicos que se processavam nas proximidades de circuitos oscilantes com capacitância e autoindução mínimas. Para comprovar suas ideias, repetiu, seguidamente, as experiências. Logo percebeu que tinha diante de si um campo novo: o da criação das ondas eletromagnéticas e sua propagação à distância.

O princípio para comprovação experimental da existência de ondas eletromagnéticas feita por Hertz foi realizado de acordo com o esquema da figura 14:

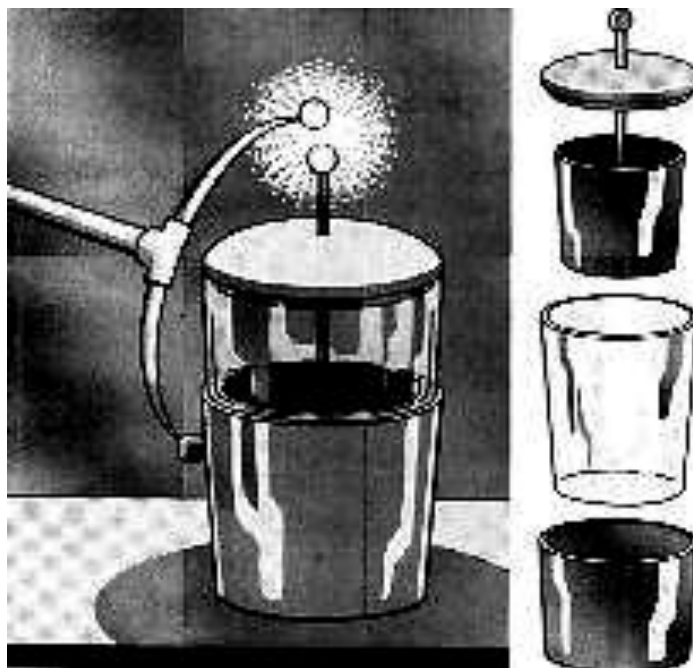


Figura 14: Garrafa de Leyden  
Fonte: [www.rc.unesp.br](http://www.rc.unesp.br)



Inicialmente, conduziu experiências com um circuito constituído por uma garrafa de Leyden como condensador, uma bobina como indutância e um faiscador. Constatou, então, que a cada faísca que se produzia aparecia uma correspondente muito intensa em uma outra bobina, colocada em frente a primeira. O valor da capacitância era pequeno (a garrafa de Leyden possui pequena capacitância e forte resistência às altas tensões), mas o efeito era notável.

Hertz continuou suas experiências por cinco anos, utilizando instrumentos sempre mais complexos. O aparelho típico que usava era um oscilador linear (ou dipolo), formado por duas grandes esferas metálicas ligadas por um condutor retilíneo interrompido por um faiscador, constituído por duas esferas metálicas menores, conforme a figura abaixo. Os dois braços deste oscilador eram ligados aos polos de uma bobina de Ruhmkorff; quando a bobina gerava uma tensão alta, ocorria uma descarga entre os dois braços do oscilador. Tal descarga era oscilante, e Hertz verificou que as oscilações possuíam uma frequência que dependia, unicamente, das características geométricas do oscilador. Era por isso que as faíscas irradiavam no espaço ondas eletromagnéticas de frequência bem determinada. [3]

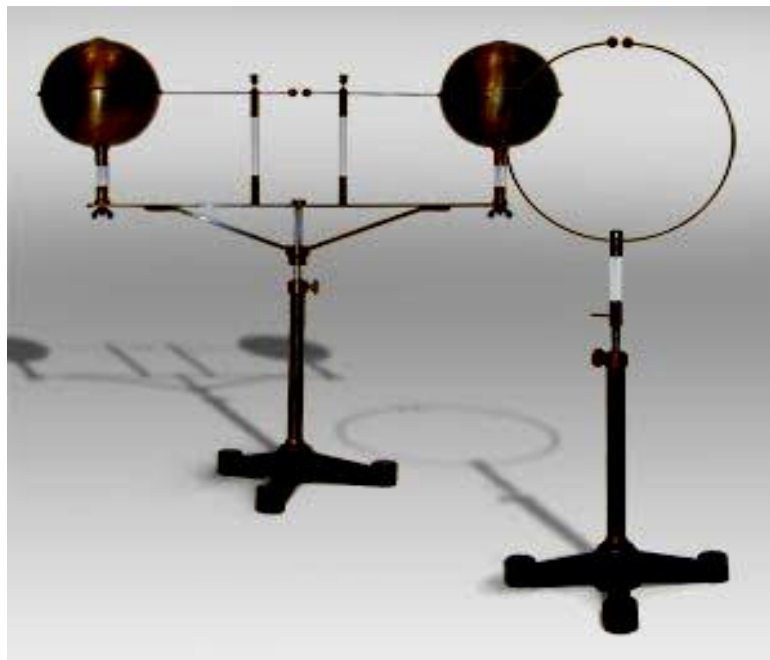


Figura 15: Oscilar linear  
Fonte: [www.rc.unesp.br](http://www.rc.unesp.br)

A figura 16 mostra o esquema realizado por Hertz para a verificação da existência de ondas eletromagnéticas utilizando um oscilador linear:

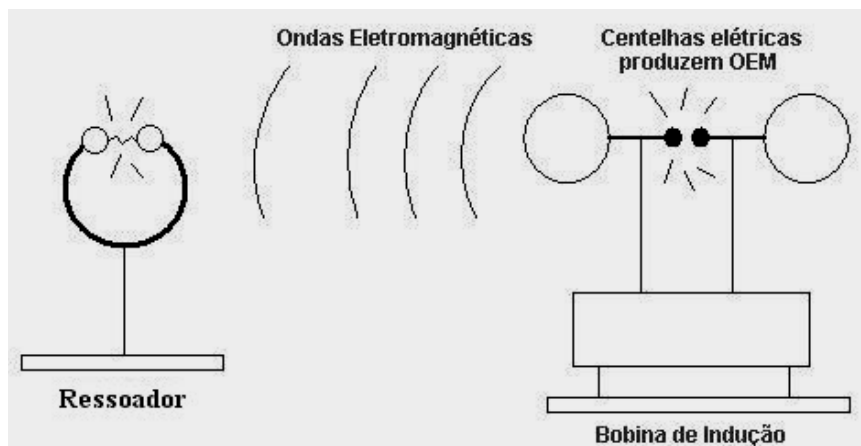


Figura 16: Esquema do experimento de Hertz para a comprovação experimental da existência das ondas eletromagnéticas.

Fonte: [www.rc.unesp.br](http://www.rc.unesp.br)

Com isso, Hertz demonstrou na prática a existência das ondas eletromagnéticas previstas por Maxwell. Começou, então, a estudar as propriedades dessas ondas. Descobriu, por meio de experiências extremamente engenhosas, que as ondas eletromagnéticas se comportam de maneira inteiramente semelhante às ondas luminosas, fato também previsto na teoria de Maxwell, mas que ainda esperava por uma demonstração experimental. Assim, surge a natureza física da luz como sendo constituída por campos elétricos e magnéticos que caminham no espaço como uma onda.

A figura a baixo é uma foto, datada por volta de 1887, do oscilador linear montado por Hertz:

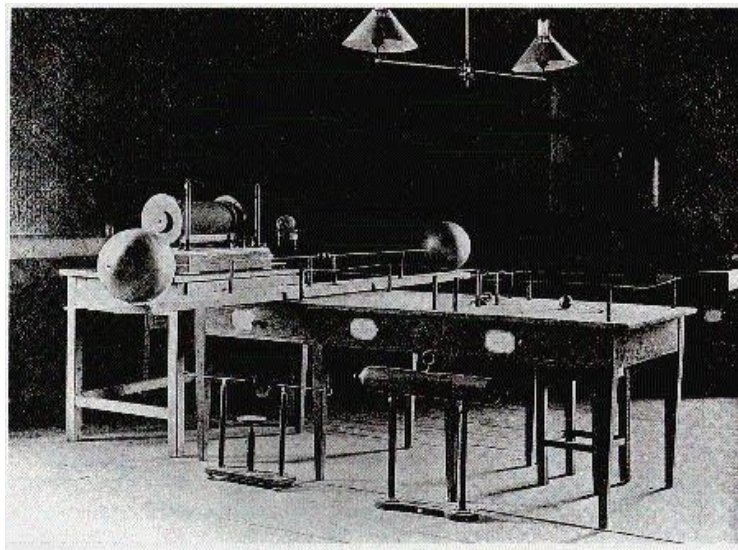


Figura 17: Dispositivo experimental de Hertz, em que produziu ondas eletromagnéticas.

Fonte: [www.rc.unesp.br](http://www.rc.unesp.br)

Analisando a propagação das ondas eletromagnéticas, concluiu que sua velocidade é a mesma da luz, e que sua propagação no vácuo é retilínea. O comprimento de onda, porém, é maior do que o das ondas luminosas.

Passou então, a desenvolver uma série de experiências ópticas. As primeiras foram sobre reflexão em superfícies metálicas, como ocorre também com as ondas luminosas. Entretanto, Hertz verificou que, no caso das ondas eletromagnéticas, a reflexão especular ocorre também quando as superfícies são opticamente ásperas. Isso porque as ondas eletromagnéticas possuem comprimento muitíssimo maior que o da luz.

Hertz realizou uma nova experiência usando um prisma de piche, com o qual demonstrou a refração das ondas eletromagnéticas. Atravessando um prisma de piche, as ondas mudam de direção, como ocorre no caso das ondas luminosas ao atravessarem um prisma de vidro. O cientista provou, finalmente, que as ondas oscilam em um plano que contém a direção de propagação. Para demonstrar este fato, era necessário provar, primeiramente, a possibilidade de polarizar ondas eletromagnéticas. Para isso, Hertz idealizou e construiu um dispositivo dotado de uma grade de fios metálicos, que, quando atingido por ondas eletromagnéticas, as polarizava. [14]

Hertz apresentou os resultados de seus trabalhos ao Congresso da Sociedade Alemã para o Progresso da Ciência, em 1888. Eles punham abaixo os velhos conceitos de ação à distância, assim como as tentativas dos mecanicistas em reduzir a eletrodinâmica a uma dinâmica do tipo newtoniano, explicada por movimentos de corpos invisíveis num meio hipotético, o éter.

Os expressivos resultados de suas experiências, revelando e estudando as características das ondas eletromagnéticas, fizeram com que elas fossem batizadas com o nome de ondas hertzianas.

## 4. DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA DA LUZ

Em fins do século XVIII, uma das dificuldades da física consistia na interpretação das leis que governam a emissão de radiação por parte dos corpos negros. Tais corpos são dotados de alto coeficiente de emissão e absorção de radiações. Um corpo negro é um corpo que absorve toda a radiação que nele incide, não ocorrendo reflexão. Quando um corpo negro é aquecido, essas propriedades o tornam uma fonte ideal de radiação térmica, produzindo então radiação eletromagnética, tal como luz. Se um corpo negro ideal a certa temperatura for cercado por outros objetos da mesma temperatura e em equilíbrio térmico, um corpo negro em média emitirá menos do que absorve, em todos os comprimentos de onda, ou seja, cada raio que atinge o objeto é absorvido, então ele será emitido da mesma forma. As observações experimentais sobre os corpos negros não podiam ser explicadas completamente pelo conceito ondulatório da luz, voltando à tona a natureza corpuscular, surgindo então a Mecânica Quântica a partir dos trabalhos de Planck em relação à radiação do corpo negro. [15]

Heisenberg, um dos físicos fundadores da Mecânica Quântica, fez o seguinte comentário sobre a ligação desse fenômeno térmico ao nascimento da teoria quântica:

A origem da teoria quântica está ligada a um fenômeno bem conhecido que não pertencia às partes centrais da física atômica. Qualquer pedaço de matéria, quando aquecido, torna-se incandescente, principalmente avermelhado e depois esbranquiçado a temperaturas mais elevadas. Sua coloração não depende muito de sua superfície e para um corpo negro ela depende somente da temperatura em que se encontra. Portanto, a radiação térmica por um corpo negro a altas temperaturas é um objeto de interesse para a pesquisa científica; trata-se de um fenômeno simples que deveria ter uma explicação igualmente simples, com base nas leis clássicas conhecidas da radiação e do calor. [15]

Em 1900, Max Planck, ao estudar o espectro do corpo negro, obtidos a partir da medição da temperatura de altos-fornos de uma siderúrgica, propôs com sucesso que um corpo ao absorver ou emitir energia, o mesmo faz de forma descontínua, ou seja, na forma de pacotes unitários de energia, onde cada um desses pacotes de energia é chamado de quantum ou mais comumente de fóton. Toda radiação possui fótons com uma energia própria (específica), sendo o fator responsável por essa diferenciação a frequência da onda. Assim, obviamente o fóton da luz azul é diferente do da luz verde.

A energia de um fóton pode ser obtida pela equação abaixo, de modo que a energia de cada fóton é proporcional à frequência da radiação, sendo  $h$  a constante de Planck.

$$E = h \cdot f$$

Um alto-forno de siderúrgica, fechado, é um exemplo aproximado de corpo. Se medir a energia emitida por um pequeno furo em uma das paredes do forno, é possível obter, para cada temperatura, um valor múltiplo da constante  $h$  e da frequência sobre a qual medimos a energia, confirmando assim a lei da radiação de Planck. A radiação emitida pelo forno independe do material que está sendo fundido. [15]

Quando o material de um alto-forno atinge o ponto de fusão desejado, o forno é aberto e o material fundido é retirado.

Nessa situação, o forno não apresenta mais uma boa aproximação de corpo negro, pois, se medirmos a energia emitida pelo interior do forno aberto passa a depender da composição do material que está sendo fundido, e assim, a lei de Planck não é válida.

A regra introduzida por Planck, como um artifício numérico para simplificar os cálculos, significava que a energia emitida pelo corpo negro, para uma dada frequência  $f$ , que está diretamente relacionada a sua cor, só pode ter certos valores múltiplos de  $h$ .

A equação de Planck, apesar de resolver o problema da radiação emitida por um corpo negro e de estar de acordo com os dados experimentais de todos os ferreiros, contrariava as leis de Newton, que não faziam restrições à energia da radiação, permitindo que ela assumisse qualquer valor.

Numa carta datada de 07 de outubro de 1931, Planck, fazendo menção a seu trabalho, afirmou:

Em poucas palavras, eu posso caracterizar todo o procedimento como um ato de desespero, desde que, por natureza, eu sou sossegado e contrário a aventuras duvidosas. Contudo, eu já tinha lutado por seis anos (desde 1894) com o problema do equilíbrio entre radiação e matéria sem ter alcançado nenhum resultado positivo. Eu estava ciente de que este problema era de importância fundamental para a Física, e eu conhecia a fórmula que descrevia a distribuição de energia no espectro normal (isto é, o espectro de um corpo negro); portanto, uma interpretação teórica tinha de ser fornecida a todo custo, qualquer que fosse o preço, por mais que ele fosse. [15]

Quando todo mundo estava convencido de que a luz era formada de ondas eletromagnéticas pelos trabalhos que Young, Fresnel, Maxwell e Hertz demonstraram, Planck veio com a teoria dos fótons, reeditando a teoria corpuscular de Newton. Porém, o próprio Planck não acreditava na sua hipótese, aceitando provisoriamente a idéia de que a energia se dividia em pacotes apenas durante a emissão da radiação, mas logo após se transformava numa onda contínua.

Fenômenos luminosos, como a interferência e a difração, são explicados com base na natureza ondulatória da luz. Todavia, os fenômenos relacionados à emissão de radiação pela matéria como a radiação do corpo negro e o efeito fotoelétrico, só podem ser explicados pelo modelo corpuscular.

O fenômeno fotoelétrico foi observado inicialmente por Heinrich Hertz em 1887. Porém o primeiro cientista a explicar o conceito físico para esse fenômeno foi Albert Einstein em 1905, por intermédio da teoria dos fótons de Planck. Ao incidir feixe de luz formado por números inteiros de fótons (pacotes de energia), numa placa emissora, e os fótons ao colidirem com os elétrons da placa, transferem energia para estes. Os elétrons transformam a energia recebida em energia cinética para escapar da placa emissora, caracterizando assim a formação de uma corrente elétrica. O fato de arrancar os elétrons da placa demonstra a característica corpuscular da luz, já que as ondas transportam apenas energia e não matéria e, além disto, as ondas transmitem energia de forma espalhada e não de forma localizada. [16]

A figura abaixo mostra o efeito fotoelétrico, conforme a observação de Einstein:

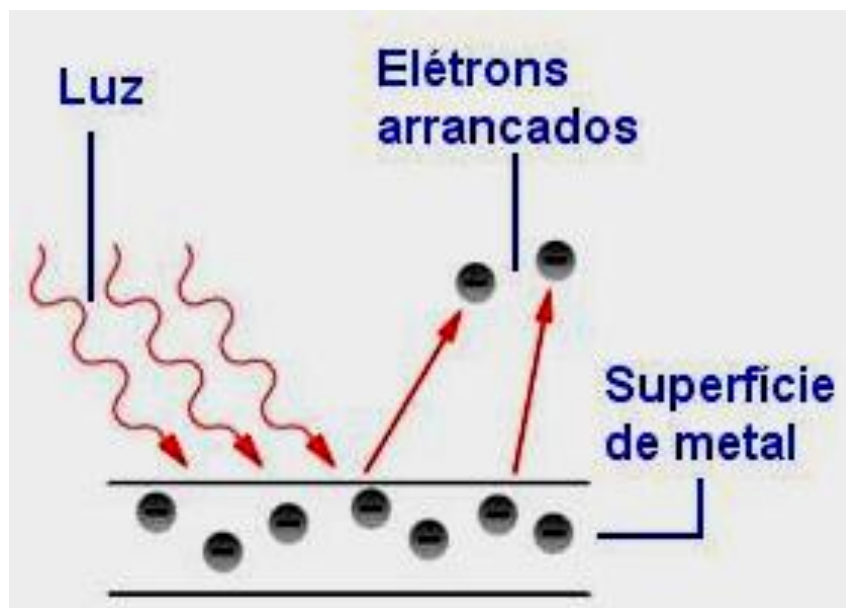


Figura 18: Efeito fotoelétrico  
Fonte: [www.quartzodeplasma.files.wordpress.com](http://www.quartzodeplasma.files.wordpress.com)

Einstein observou que um elétron é capaz de absorver um único fóton (ou não absorve nada, pois não existe fração de fóton), não podendo jamais armazenar dois ou mais fótons para ser arrancado do átomo. Dessa forma, se uma radiação não arrancar elétrons do metal, não adianta aumentar sua intensidade luminosa, pois continuará não arrancando elétrons. Nesse caso, deve-se aumentar a energia do fóton e, de acordo com a Equação de Planck, aumenta proporcionalmente a frequência da radiação. Assim, se para um determinado metal, a

luz vermelha não for capaz de arrancar elétrons, pode ser que a luz violeta consiga fazê-lo, por apresentar maior frequência que a luz vermelha. [17]

As cores dispersas do espectro da luz visível pode ser observação conforme a figura 19, ordenadas de acordo com seus respectivos comprimento de onda e frequência:

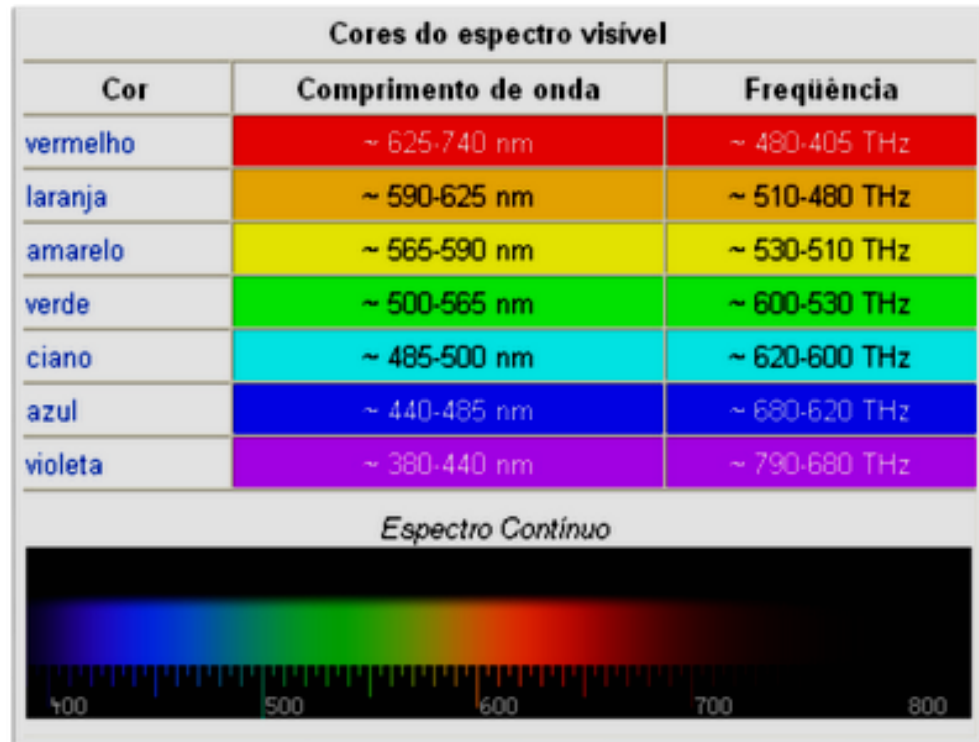


Figura 19: Espectro da luz branca de acordo com o comprimento de onda e a frequência de cada luz monocromática.

Fonte: <http://.designdear.blogspot.com.br>

Para Einstein, a luz é um conjunto de fótons se propagando no meio em forma de onda, e ao interagir com a matéria, devido à interação única, ou seja, para cada elétron a possibilidade de absorver apenas um fóton, se faz de maneira corpuscular.

A teoria elaborada por Maxwell para o eletromagnetismo levou a uma revisão do modelo atômico aceito na época, proposta por Ernest Rutherford.

De acordo com a teoria de Maxwell, cargas com aceleração emitem radiação perdendo energia. Portanto, os átomos estariam continuamente perdendo energia, o que provocaria a “queda” dos elétrons no núcleo e o colapso da matéria.

Assim, para explicar por que não ocorria o colapso da matéria, em 1913 Niels Bohr propôs que a teoria de Maxwell não se aplicaria à escala atômica.

Utilizando a ideia de quantização de energia feita por Planck, Bohr propôs que os elétrons de um átomo estariam em certos níveis estáveis de energia e ao receberem uma

quantidade bem definida de energia, ocorreria o salto. Ao retornar ao nível original, ele emite a energia absorvida na forma de radiação. [16]

Pela figura 20 é possível observar a representação dos níveis de energia proposto por Bohr e a movimentação do elétron:

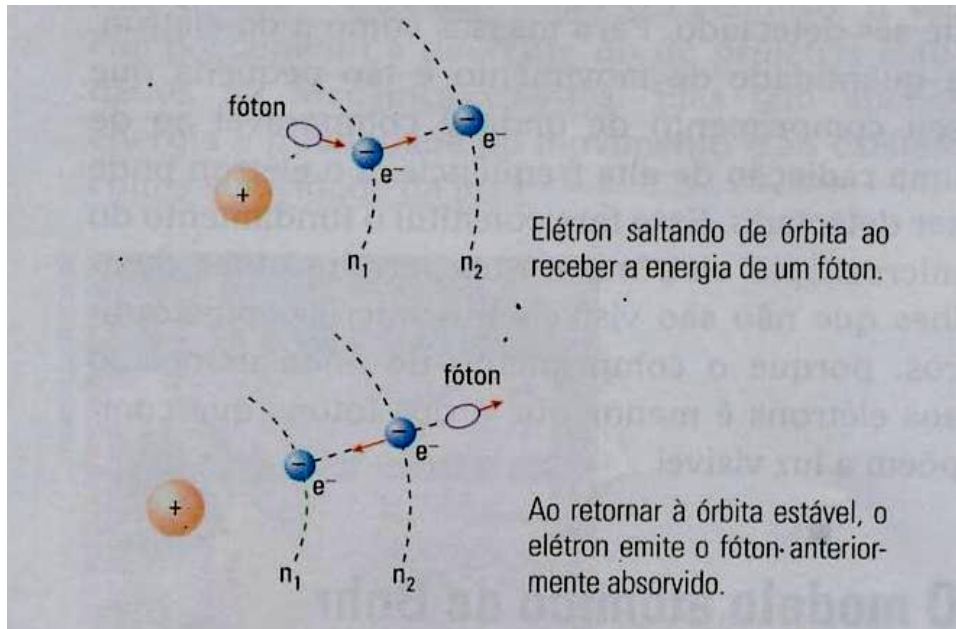


Figura 20: Elétron saltando de um nível a outro de energia, devido recebimento de energia proveniente de um fóton.

Fonte: [15]

Das diversas interações da radiação com a matéria, pode-se enfatizar o efeito ou espalhamento Compton. Em 1923, Arthur Holly Compton confirmou a natureza corpuscular da luz, a partir de estudos com raios X. Compton observou que na interação do feixe de raios X com a matéria, gerava transferência de energia para os elétrons e ocorria o espalhamento, havendo então uma diminuição da energia do fóton de raios X e da sua frequência, e consequentemente aumento do comprimento de onda.

Compton e independentemente Debye, interpretaram os resultados experimentais com base na abordagem de Einstein, postulando que o feixe de raio X era um conjunto de fóton, cada um com energia  $E = h \cdot f$ , e que esses fótons colidiam com os elétrons livres do material da mesma forma que bolas de bilhar, enfatizando assim, a natureza corpuscular da luz.

De acordo com a teoria ondulatória, a frequência de uma onda não é alterada por nenhum fenômeno que ocorre com ela, sendo característica da fonte que a produz. Mas o que se constatou, através da experimentação, foi que a frequência dos raios X espalhados era sempre menor do que a frequência dos raios X incidentes, dependendo do ângulo de desvio.



Essa diminuição da frequência se dá pela perda de energia do fóton incidente. Consequentemente, havendo diminuição da frequência ocorre aumento do comprimento de onda [16], conforme figura abaixo:

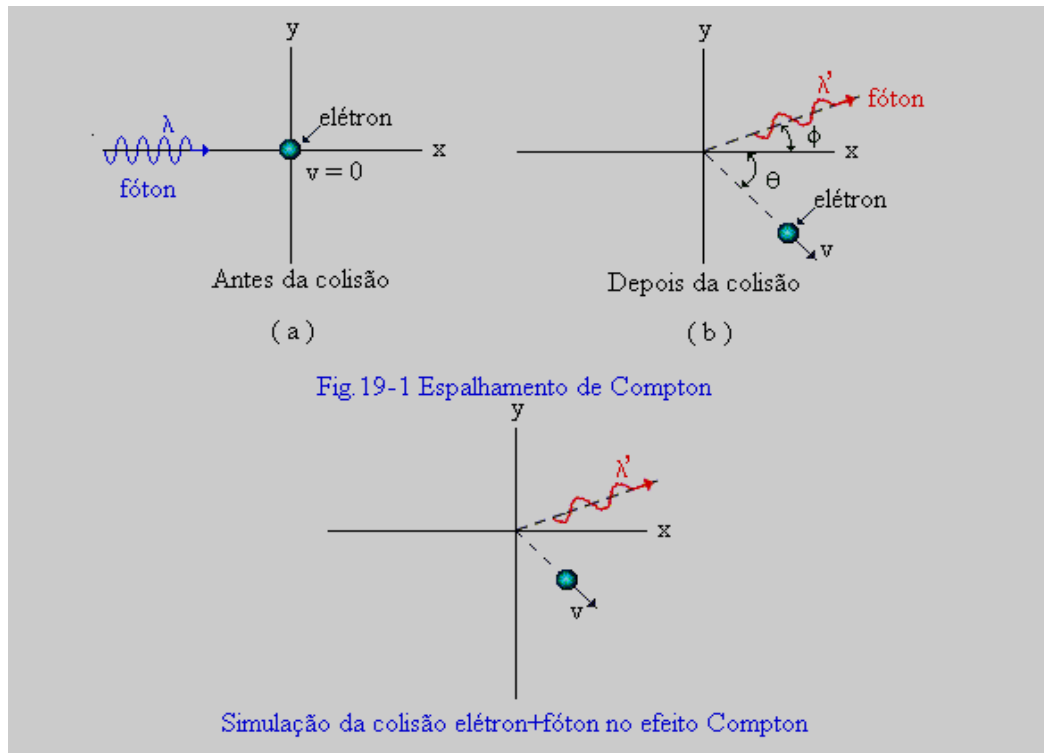


Figura 21: Espalhamento Compton  
Fonte: www.unb.br

Em 1924, o físico Louis Victor de Broglie atribuiu propriedades ondulatórias à matéria. De Broglie verificou que, se a luz se comporta como partícula em certas situações, a matéria, como por exemplo, o elétron, apresenta características tanto ondulatórias como corpusculares, comportando-se de um ou outro modo dependendo do experimento específico, apresentando também um comportamento dual. Ou seja, se a luz se comporta como onda-partícula, a matéria também pode ter comportamento partícula-onda.

De Broglie enunciou que “toda partícula de massa  $m$  em movimento com velocidade  $v$  possui uma quantidade de movimento  $P = m.v$ , cujo comprimento de onda pode ser obtido pela expressão  $\lambda = h/P$ ”. [16]

A análise dessa expressão, em que  $h$  é a constante de Planck, leva à conclusão de que, quando um corpo possui massa muito elevada, o comprimento de onda é tão pequeno que não pode ser detectado. Para massas como a do elétron, a quantidade de movimento é tão pequena (devido à massa ser pequena) que o elétron pode ser detectado.

Tentando interpretar o comportamento onda-partícula ou partícula-onda, o físico alemão Werner Heisenberg formulou seu Princípio de Incerteza de uma transcendência histórica extraordinária. Enunciado em 1927, esse princípio está relacionado a uma limitação nos processos de medida realizados com partículas muito pequenas, como elétrons e fótons. Essa limitação refere-se à determinação das incertezas associadas às medidas da velocidade e à posição de uma partícula ou ao tempo de duração da medida e a energia de uma partícula. [15]

A incerteza de uma medida é um valor numérico a ela associado que indica o intervalo confiável em que está contido o valor real da medida.

O princípio de incerteza de Heisenberg afirma que não é possível determinar simultaneamente, com valor exato, o momento e a posição da matéria ou da radiação. Quanto mais melhoramos a medida da posição, pior será a medida do momento, e vice-versa.

As ideias de Heisenberg tornaram-se importantes por explicarem a dualidade onda-partícula, ou seja, o fato de a luz apresentar, em algumas experiências, aspectos de onda e, em outras experiências, aspectos de partícula. Se tentarmos determinar, por meio de uma experiência, se a luz é onda ou partícula, montando, por exemplo, um aparato para verificar seu comportamento ondulatório destruirá seu aspecto corpuscular. Ou vice-versa, se tentamos verificar aspecto corpuscular, melhorando a detecção de suas partículas, impossibilitaremos a determinação de suas propriedades ondulatórias e vice-versa.

O fato de a radiação apresentar dois aspectos excludentes parecia contraditório e violava a forma como os físicos clássicos entendiam a ciência. Aceitar dois comportamentos excludentes é o oposto do método científico tradicional, que, por sua vez, buscava propor, diante de uma contradição, uma nova experiência para decidir entre as duas posições.

De acordo com o Princípio de Incerteza, as ideias de onda e partícula são complementares. É a melhor forma de descrever a natureza. As representações corpuscular e ondulatória são como duas imagens que se complementam mutuamente. [16]

O físico austríaco Erwin Schrodinger, em 1927, aprofundando a ideia de De Broglie e embasado no Princípio da Incerteza, propôs o comportamento das partículas, incluindo os fótons, por meio de funções de onda, ou seja, de funções matemáticas que descrevem, sob determinadas condições, o comportamento quântico das partículas, numa forma probabilística.

Segundo as funções de onda da Mecânica ondulatória, o elétron deveria espalhar-se como uma nuvem, com formas variáveis, dependendo dos estados estacionários correspondentes, denominada por Schrodinger como nuvem eletrônica.

A partir de uma função de onda pode-se calcular a probabilidade de encontrar a partícula numa dada região, num determinado instante. Isso significa que a posição da partícula não pode ser determinada com precisão, como ocorria na Mecânica Clássica. As medidas vêm sempre acompanhadas de uma incerteza. A trajetória de um elétron, por exemplo, não pode ser determinada de forma precisa. O que se dizer é que, em certo instante, há uma determinada região do espaço na qual existe a probabilidade de o elétron ser encontrado.

Como foi observado, ao fazer experiência para tentar descobrir se a luz é uma onda, ela irá se comportar como uma onda; ao fazer experiência para descobrir se a luz é composta por partículas, ela irá se mostrar por partículas. Pelo universo quântico esse conceito é possível devido a participação do observador.

Schrodinger defendia que ao observar, através de instrumentos de precisão, a posição de um elétron no interior de um átomo, pode-se definir o estado (de onda ou de partícula) que está sendo observado. [15]

Um elétron se espalha como uma onda ao redor do núcleo do átomo, como se estivesse em todos os lugares possíveis ao mesmo tempo, até quando se tenta determinar sua posição. Nesse instante, ele transforma-se em uma partícula e passa a ocupar um ponto determinado do espaço. Segundo esse conceito, Schrodinger dá a sua contribuição à natureza dualística, demonstrando que as naturezas corpuscular e ondulatória se aplicam tanto a luz quanto ao elétron, de forma combinatória, mesmo sendo conceitos contraditórios.

Schrodinger, em 1935, conceitual que a natureza probabilística pode surgir ao nível macroscópico, ilustrando o problema a partir de uma experiência conceitual envolvendo o destino de um gato, experiência essa conhecida como paradoxo do gato.

Coloca-se um gato numa caixa de aço juntamente com o seguinte engenho infernal (deve-se ter cuidado para que o gato não interfira com ele): num contador Geiger (componente de um circuito capaz de contar o número de partículas que o atinge), põe-se uma amostra de uma substância radioativa tão pequena que, ao fim de uma hora, talvez haja um átomo decaído, ou talvez não haja nenhum, com iguais probabilidades de acontecer uma coisa ou outra; se acontecer de um átomo decair, ocorre uma descarga no tubo do contador que vai acionar um mecanismo preso a um martelo. Esse martelo parte uma pequena ampola que contém uma amostra de cianeto capaz de matar o gato. Isso tudo, é claro, só acontece se um átomo decair. Se deixasse esse sistema entregue a si próprio durante uma hora, dir-se-ia que o gato estaria vivo se, entretanto, nenhum átomo tivesse decaído. O primeiro átomo que decaísse liquidava o gato. [15]

Através dessa experiência fica clara a probabilidade do gato estar vivo ou morto. O gato permanece num estado de vida suspensa até que alguém espreite para dentro da caixa e verifique o que lá se passa. Dessa forma, temos no paradoxo do gato de Schrodinger um

exemplo conceitual em que os acontecimentos quânticos do mundo microscópico se estendem ao mundo macroscópico. [18]

Heisenberg e Bohr passaram uma temporada em Copenhague tentando resolver o enigma da teoria quântica.

Heisenberg considerava que tanto a linguagem corpuscular quanto a linguagem ondulatória seriam satisfatórias para descrever os objetos, mas Bohr insistia que ambas eram necessárias. Em 1927, Niels Bohr elabora seu princípio da complementaridade. Segundo esse princípio, um objeto muito pequeno não pode ser inteiramente compreendido dentro de um quadro único, mas necessita de descrições que excluam umas às outras, como onda ou partícula que, juntas, se complementam para descrever o objeto.

Bohr descreveu esse princípio em analogia a uma moeda:

Quando olhamos a face da cara de uma moeda não vemos a face da coroa e vice-versa. Mas a moeda não é somente a cara ou a coroa mas, sim, as duas ao mesmo tempo. Porém, nunca podemos observar suas duas faces ao mesmo tempo. Cada uma das faces complementa a outra, formando a moeda. [15]

Os aspectos de onda e de partícula, segundo o princípio da complementaridade, são as duas faces da mesma moeda. Para Bohr, os aspectos ondulatório e corpuscular de uma entidade quântica (como a luz) são necessários para se realizar uma completa descrição dos fenômenos conhecidos. No entanto, ambos os aspectos não podem ser revelados simultaneamente em uma mesma experiência, ou seja, caso a luz esteja se comportando como onda não pode ao mesmo tempo se comportar como partícula.

O princípio da complementaridade de Bohr parecia ter resolvido o problema da medida, mas nem todos os físicos concordaram com essa explicação.

O 6º Congresso de Física de Solvay, realizado em 1930, na Bélgica, apresentou discussões memoráveis sobre os fundamentos da Física Quântica. As discussões mais célebres desse congresso foram as tentativas de Einstein de escapar do princípio da incerteza de Heisenberg, sendo que Einstein acreditava que uma realidade independe da observação humana. Porém Bohr conseguiu vencer todos os desafios propostos por Einstein. [15]

As vitórias de Bohr sobre Einstein, o maior físico do século, certamente ajudaram os físicos a aceitar a interpretação da complementaridade, que passou a ser a interpretação dominante da Mecânica Quântica. De maneira geral, os físicos passaram a ignorar problemas de fundamentos da Física Quântica, confiando na solução apresentada por Bohr.

Várias interpretações foram construídas para explicar o comportamento dual da luz. Segundo a teoria quântica, a luz existe num estado que sobrepõe às propriedades de onda e

partícula, e só se decide por um ou outro quando testada com um experimento. Segundo a teoria: o simples fato de olhar para alguma coisa transforma essa coisa [15]. Portanto, a partir de 1930, as naturezas corpuscular e ondulatória da luz não eram mais observadas separadamente, mas como um conjunto de conceitos contraditórios, porém complementares.

## 5 - CONCLUSÃO

A retrospectiva sobre a natureza da luz a partir do Século XVII revela inicialmente a existência de um modelo mecânico e, posteriormente, de um modelo eletromagnético. No modelo inicial, tratava-se de uma explicação puramente mecânica para uma perturbação, que se transferia por meio de choques de um corpúsculo a outro. No segundo caso, trata-se de uma aplicação de onda eletromagnetismo para um campo variável que se propaga através do espaço.

A retomada da antiga oposição entre corpúsculo e onda ocorre, então, em outro paradigma. As partículas de luz já não podem ser interpretadas como os corpúsculos clássicos da Teoria de Newton, nem as ondas de luz como as antigas ondas de pressão da Teoria de Huygens. Afinal os conceitos só adquirem significado dentro da teoria em que foram concebidos. Distinguir, portanto, o contexto em que esses termos são empregados é essencial para apreciar o resultado de três séculos de pesquisa e perceber que não se trata de um retorno ao ponto de partida, mas sim descobertas de novas características para o conceito da luz.

A difração e a interferência da luz podem ser explicadas pelo modelo clássico da onda eletromagnética, enquanto o efeito fotoelétrico e outros experimentos que envolvem a interação da luz com a matéria, torna-se viável a explicação utilizando o conceito da luz como partícula.

Uma onda é uma perturbação que se propaga em um meio. No caso de uma onda eletromagnética a perturbação são os campo elétrico e do campo magnético. Mas alguns experimentos realizados no fim do século XIX mudam um pouco essa concepção, mostrando que a luz também se comporta como partícula. Assim, pode-se afirmar que quando a luz se propaga no espaço, ela se comporta como onda, mas quando a luz incide sobre uma superfície, ou seja, interage com a matéria, passa a se comportar como partícula, comprovando assim a dualidade onda-partícula da luz.

Todas essas divergências em torno da natureza da luz foram movidas por discussões de cientistas ao longo da história, todos com o intuito de provar a natureza de forma teórica e experimental, mas sob aspectos diferentes. Cada cientista defendia a natureza da luz de acordo com as suas observações, e como a natureza corpuscular é totalmente contraditória a natureza ondulatória, gerava um conflito de ideias que proporcionou um desenvolvimento científico culminando com o surgimento da Mecânica Quântica.

Na década de 30, no Congresso de Solvay, os cientistas puderam então perceber que suas teorias não estavam erradas, porém eram vistas por linha de pensamentos diferentes, sendo que, mesmo contraditórias, as naturezas corpuscular e ondulatória da luz se completam, compondo um conceito único, não podendo ser desvinculadas, formando assim, a característica dualística da luz.

## REFERÊNCIAS

- 1 - CAMPOS, Flávio de; MIRANDA, Renan G. **A Escrita da História**. São Paulo: Escala Educacional, 2005.
- 2 - AQUINO, R. S. L. de; FRANCO, D. de A.; LOPES, O. G. P. C. **História das Sociedades: das comunidades primitivas às sociedades medievais**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1980.
- 3 - GILBERT, A. **Origens Históricas da Física Moderna: Introdução abreviada**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1982.
- 4 - SERWAY, R. A.; JEWETT JR., J. W. **Princípios da Física: óptica e física moderna**. 3. ed. São Paulo: Pioneiro Thomson Learning, 2004. 4 v.
- 5 - CIVILIZAÇÃO Micênica. Disponível em: <<http://www.infoescola.com>>. Acesso em: 20 de maio de 2012.
- 6 - DOMARESKI, Augusto. **História Geral e do Brasil: ética**. Curitiba: Editora Positivo Ltda, 2008. 2 v.
- 7 - PEREIRA, M. H. da R. **A República: Platão**. 9. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2001. Disponível em: <<http://livrosfilosofiaownload.blogspot.com.br/2012/06/republica-platao-completa.html>>. Acesso em: 19 de maio de 2012.
- 8 - RONAN, Colin A. **História Ilustrada da Ciência da Universidade de Cambridge**. São Paulo: Círculo do Livro, 1987. 01-04 v.
- 9 - FRANCO, H. **O Triunfo das Teorias Ondulatória e Corpuscular da Luz**. Disponível em: <<http://www.fisica.ufs.br>>. Acesso em: 08 de julho de 2012.
- 10 - SILVA, F. W. O. da. **A Evolução da Teoria Ondulatória da Luz e os Livros Didáticos**. Revista Brasileira de Ensino de Física, Campinas, v. 29, n. 1, p. 149-159, 2007. Disponível em: <<http://www.cielo.br/pdf>>. Acesso em: 10 de junho de 2012.
- 11 - PACHECO, J. R. **Química: evolução do pensamento científico sobre a constituição da matéria**. Curitiba: Editora Positivo Ltda, 2009. 2 v.
- 12 - SILVA, C. C. **A Teoria das Cores de Newton: um estudo crítico do Livro I do Opticks**. 1996. 141 p. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996. Disponível em: <<http://www.ghtc.usp.br/serverTesesCibelle-Celestino-Silva-MS.pdf>>. Acesso em: 09 de junho de 2012.
- 13 - KRAPAS, S.; QUEIROZ, G. R. P. C.; UZÊDA, D. **O Tratado sobre a Luz de Huygens: Comentários**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Rio de Janeiro, v.28, n. 1, p. 123-151, abr. 2011. Disponível em: <<http://www.periódicos.ufsc.br/pdf>>. Acesso em: 08 de julho de 2012.



14 – CIOLDIN, F. H. **Oscilador de Hertz**. Relatório Final – Tópicos de Ensino de Física, Unicamp, 2010. Disponível em:  
<[http://www.ifi.unicamp.br/vieF809F809\\_sem1\\_2010FredericoC-Monica\\_RF2.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/vieF809F809_sem1_2010FredericoC-Monica_RF2.pdf)>. Acesso em: 09 de junho de 2012.

15 - PINTO, A. C.; LEITE, C.; SILVA, J. A. da. **Física**. 2. ed. São Paulo: Editora do Brasil, 2010.

16 - PARANÁ, D. N. da S. **Física**. 6. ed. São Paulo: Editora Ática, 2004.

17 - VASCONCELLOS, C. A. Z. **Efeito Fotoelétrico**. 6 p. Departamento de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em:  
<<http://www.cesarzen.com/FISIO56LISTA4.pdf>>. Acesso em: 22 de julho de 2012.

18 - SIMÕES, M. **Não vemos gatos quânticos porque não podemos contar**. Revista Cálculo Matemático Para Todos. São Paulo: Segmento, n. 13, 2012.

