

NATUREZA DUAL DA LUZ

OLIVEIRA, Clayton Reis de;

STIER, Paulo Henrique;

RESUMO

A luz para o homem sempre foi um mistério incognoscível. Conhecer sua natureza e comportamento foi um desafio constante. Desde as primeiras concepções de origem míticas/filosóficas, científicas, até o modelo admitido atualmente, um longo caminho foi trilhado. Este trabalho teve como objetivo apresentar um levantamento histórico sobre os meandros da evolução do conhecimento da natureza da luz, tendo como ponto de partida os pensadores gregos, passando pelas teorias corpuscular e ondulatória até os experimentos que definiram a natureza dual da luz e que serviram como base para a consolidação da física quântica.

Palavras-chave: Luz; natureza da luz; corpuscular; ondulatório; física quântica

1.INTRODUÇÃO

Segundo Caruso (2020) o homem sempre foi fascinado pela luz. O brilho dos astros celestes, o sol, o fogo e tudo aquilo que lhe afasta da escuridão que amedronta. Transitando entre o céu e a Terra e, merecendo por isso, um lugar de destaque em seu imaginário, além de essencial para a vida, a luz ocupa também um papel de destaque ao longo do desenvolvimento da Física e da Arte.

À luz também é atribuída o sentido de revelação divina, de esperança, de salvação, de conhecimento e de um referencial a ser seguido. É muito comum encontrar na bíblia expressões como: “O Senhor é a minha luz”. Nesse aspecto, o sol é o astro-luz por excelência e, ao longo da história da humanidade, tem-se recorrido com frequência à luz, e ao próprio sol, para representar o divino, como entre os povos semitas, os egípcios, os iranianos e também na platônica associação do sol com a ideia de bem.

Por outro lado, a vida na Terra, tal qual como conhecemos, não existiria sem a luz proveniente do sol. A luz emitida é responsável direto pela fotossíntese das plantas e conseqüentemente, para sua sobrevivência. Como

os humanos e animais alimentam das plantas, indiretamente nos alimentamos do que as plantas extraíram da luz solar.

Os seres humanos são completamente dependentes da luz. Além dos meios para sobrevivência, muitos benefícios para conforto e desenvolvimento da sociedade ocorreram devido ao estudo da luz. Através dele foi possível: a geração de energia, maior eficiência nos meios de comunicação por meio de fibras óticas; sensores de presença; geração de lasers utilizados na medicina; dentre outros. O estudo da luz foi responsável pelo grande número de avanços tecnológicos. A compressão de sua natureza pode contribuir para o aprimoramento das tecnologias existentes e o surgimento de outras.

Atualmente, através de análises da luz emitida é possível estimar a idade dos astros celestes, suas distâncias e até mesmo sua composição química. Todavia, a verdadeira compreensão sobre o que seja a luz e o entendimento sobre sua natureza sofreram significativa mudança no transcorrer do tempo. Apresentar os aspectos históricos e a evolução desse conhecimento foi o objetivo deste trabalho e, nos itens seguintes, serão abordadas as teorias do conhecimento da luz que se tinham em uma determinada época, bem como os maiores defensores dessas teorias.

Este estudo não apresenta argumentos novos e conclusivos sobre o tema, apenas fornece aspectos históricos e o pensamento de grandes cientistas sobre a natureza da luz em cada período específico. As ideias aqui expostas foram fundamentadas em pesquisadores que, através de livros e periódicos descreveram sobre o assunto.

2.ASPECTOS HISTÓRICOS

2.1 Teorias da Natureza da Luz

A natureza da luz sempre fora palco de grandes debates e discussões. Duas teorias antagônicas se propuseram a explicá-la. De um lado, a teoria corpuscular, tendo como o maior defensor o físico inglês Isaac Newton e do outro, a teoria ondulatória, que era defendida pelo físico holandês Christiaan Huygens.

Segundo Silva (2007) ao realizar um resgate histórico é comum opor os defensores das duas teorias, em que o fiel da balança ora pendeu para um lado, ora para o outro, até a aceitação de ambas no Século XX. Em virtude do grande prestígio científico de Newton, prevaleceria a teoria corpuscular nos séculos XVII e XVIII. Todavia, no início do século XIX, os experimentos de Young e Fresnel, entre outros, estabeleceriam a necessidade de outra proposta, uma teoria ondulatória, complementada com os trabalhos de Hertz, revelando tratar-se a luz de uma onda eletromagnética. Porém, novos efeitos viriam a ser observados no alvorecer do século XX, conduzindo ao estabelecimento de que a luz possui o caráter dual de onda e de partícula.

Mas para que o conceito moderno acerca do comportamento da luz fosse estabelecido, um extenso caminho foi trilhado ao longo dos séculos. Nas próximas seções este trabalho pretende descrever sobre as principais nuances observadas através desse árduo caminho e as perguntas que eram feitas.

2.2 O Pensamento Grego

De acordo com Forato (2014) as primeiras buscas para explicar a natureza da luz foram através da mitologia e a religião, até surgir na antiguidade, por volta do século VI a.C., o pensamento filosófico. Poucas informações se tem sobre essa época, os relatos baseiam-se em alguns documentos históricos.

No que diz respeito aos primeiros estudos sobre a natureza da luz, remonta à Grécia antiga. Na visão dos gregos, não existia uma distinção clara sobre o que era luz e o que era a visão. Muito desses estudos envolviam mais aspectos filosóficos que científicos.

Nessa linha:

Para alguns filósofos gregos a luz era algo intrínseco à capacidade visual, ou seja, a luz era compreendida como fazendo parte do sistema visual e não uma propriedade independente. (MARTINS E PORTO, 2018, p.22)

Para os gregos a luz não era algo que existia independentemente da visão, conforme ressalta Knight e Ricci (2009). Todavia, gradualmente, o ponto de vista de que a luz de fato “existe”, que a luz é algum tipo de entidade física

que está presente independentemente de alguém estar olhando ou não, foi surgindo. E assim, se a luz é uma entidade física, qual é ela? Quais são suas características? Ela é uma onda, semelhante ao som? Ou a luz é uma coleção de pequenas partículas que se deslocam pelo espaço como o vento?

As pesquisas iniciais sobre a luz estavam mais endereçadas a fabricação de lentes do que sua natureza e comportamento propriamente dito. Conforme Silva (2010) atribui-se ao filósofo Homero o primeiro indício de especulação em ótica e conseqüentemente, sobre a natureza da luz, em aproximadamente no IX século a.C. Segundo o autor, um modelo de visão no qual esta ocorria quando raios luminosos, partindo dos olhos atingiam o objeto que estava sendo observado, teria sido elaborado por Homero. “Acreditava-se que a luz era formada por corpúsculos e que seus raios eram uma seqüência de partículas”.

Ainda, segundo Silva (2010) posteriormente, filósofos como Pitágoras (560 a 480 a.C.) e seus seguidores: Demócrito (460 a 370 a.C), Epícuro (341 a 270 a.C.), Archytas (por volta de 350 a.C), divergiram do modelo homérico da visão. Esses filósofos defendiam que os objetos emitiam algo para os olhos, de certa forma, acreditavam que a luz era formada por corpúsculos. “Ideia essa, mais tarde, também defendida por Platão (427 a 347 a.C) e pelo seu mais eminente seguidor, Euclides (por volta de 300 A.C.)”.

Inserido na corrente grega, e digno de atenção especial, o filósofo Jônico Empédocles (492 a.C. – 430 a.C.), também defendia de que a luz era formada por partículas.

Empédocles explicava o mundo, a luz e a visão de um modo bem diferente. Para ele o Universo era formado a partir de quatro elementos básicos, que ele associava a quatro divindades: fogo (Zeus), ar (Hera), terra (Hades) e água (Nestis). Tais elementos eram os “tijolos” de todas as coisas que se misturavam em diferentes proporções formando tudo que existia. A luz e a visão estavam relacionadas com o elemento fogo. (FORATO, 2014, p.2)

Empédocles defendia que Afrodite quem teria feito o olho humano e acendido fogo nos olhos dos homens. O fogo saía dos olhos tocava os objetos e traziam as imagens desses objetos.

Nesse contexto, em contraponto ao pensamento até então vigente, um filósofo que lança as primeiras nuances sobre um comportamento ondulatório da luz foi Aristóteles (384-322 a.C.). Para o filósofo a luz necessitava de um meio pelo qual pudesse se propagar

Aristóteles enfatizou a importância do meio material na sua teoria da luz e da visão. Ele acreditava que a luz era uma qualidade dos corpos transparentes. Um meio transparente como o ar tinha a qualidade de permitir a visão do objeto. Porém era necessária a presença da luz do Sol ou de outras fontes luminosas para que se pudesse enxergar. Os objetos produziam uma espécie de alteração no meio transparente ao seu redor, e esse meio transmitia instantaneamente essa alteração para os olhos do observador. (FORATO, 2014, p.2)

Forato (2014) destaca ainda que a luz no conceito de Aristóteles não poderia ser algo material, pois dois corpos não podiam ocupar o mesmo lugar no espaço. Ele não aceitava a ideia de vazio de forma que todo o Universo seria ocupado por matéria. No caso das regiões celestes, essas seriam preenchidas pela quintessência, ou o éter, e, aqui na Terra, os espaços aparentemente vazios entre os objetos seriam preenchidos pelo ar. Para Aristóteles a luz era algo que acontecia entre o observador e o objeto, e assim, “como ela poderia ocupar o mesmo lugar que o ar? Esse era o argumento que ele usava para criticar a teoria de que a luz seria composta de corpúsculos materiais”.

Descrevendo sobre o contexto grego, Martins e Porto (2018) mencionam que esse conflito de ideias conflitantes entre pitagórico-platonista e aristotélicas estavam em um campo especulativo e predominaram até o século XVII. Além disso, as autoras chamam a atenção ao fato de que todos esses filósofos naturais elaboravam suas teorias baseadas nas suas próprias interpretações por isso não havia consenso entre as eles. Para alguns, emanavam corpúsculos dos objetos, para outros, raios saiam de dentro dos olhos, mas se são dos olhos que emergem raios ou fogo que possibilitam a visualização dos objetos, por que a falta de luminosidade do ambiente era um fator importante para o sistema de visão? Se os objetos emanavam corpúsculos carregando suas informações, por que sua matéria não se esgotava?

Para Martins e Porto (2018) reflexões e teorizações com a finalidade de compreender o que é luz se confundiam com o sistema de visão para esses

filósofos naturais, contudo havia questionamentos sem explicações. Atualmente, ao pesquisar o início da elaboração conceitual da luz pode haver um julgamento pré-conceitual, todavia essas teorias são mesmo infundadas? Não. Ao realizar uma análise criteriosa é percebido que essas teorias antecederam a teoria corpuscular e ondulatória da luz, sobre a qual a sua compreensão hoje se apoia.

No período áureo do pensamento grego existiam várias teorias e pouco consenso para descrever um comportamento que fosse satisfatório para a luz, todavia as indagações lançadas pelos gregos foram o alicerce para que os cientistas consolidassem os estudos posteriores, que no séc. XVII culminaram para duas teorias antagônicas acerca da natureza da luz, a teoria corpuscular e a teoria ondulatória.

2.3 Primeira Contribuição Científica

Segundo Silva (2016) somente em meados do séc.XVII, os estudos sobre a luz começam a perder a natureza filosófica e passam a exibir uma face científica, fundamentada na tríade previsão-experimentação-matematização dos fenômenos da natureza. Esses estudos foram influenciados por movimentos como o Renascimento, Iluminismo e a Revolução Científica.

A primeira contribuição moderna foi feita na idade média por Descartes. Por ele não acreditar no vazio, encarava a luz como uma pressão transmitida, assim como o som, através de um meio perfeitamente elástico, o éter. O éter era formado por pequenos corpúsculos que serviriam para a propagação da luz. Esse meio material permaneceria, mesmo se o ar fosse retirado. Isso poderia ser constatado em um tubo de vidro transparente, que mesmo sendo provocado um vácuo, ainda assim a luz atravessaria esse tubo.

Segundo Caruso (2020), Descartes afirmava que esse fluido contínuo mediava as interações entre os corpos por meio de um sistema de vórtices. A existência ou não desse meio, desse substrato para a propagação da luz, vai ser tema de muita discussão e investigação científica até o surgimento da Teoria da Relatividade Restrita, em 1905.

A estratégia de Descartes para defender sua teoria consistia em fazer uso de analogias. Segundo Ramos (2010) em analogia do movimento da

bengala, utilizada por um cego, Descartes deseja tornar inteligível o modo pelo qual a luz pode ser considerada um movimento ou uma ação a qual, através de um medium, parte do corpo luminoso e chega aos olhos de um observador. O autor menciona também mais duas analogias:

Por meio da analogia do barril - recipiente preenchido de uvas pisadas e com vários orifícios -, cujo conteúdo Descartes compara à matéria sutil que supostamente preencheria os espaços outrora considerados vazios, ele pretende explicar como a luz pode ser considerada a ação pela qual as partes mais altas dessa matéria tendem para baixo como se fosse em linha reta. Com a analogia do jogo de raquete, Descartes pretende comparar o raio luminoso à bola rebatida com força pela força pela raquete. Assim, Descartes concebe a ação da luz por meio das mesmas leis do movimento mecânico. (RAMOS, 2010, p.423)

2.4 A Teoria Corpuscular da Luz

Atomistas como Leucipo de Mileto (500 a.C.), Pitágoras (560 a 480 a.C.) e Epicuro (341 a 270 a.C.) e posteriormente, o matemático e astrônomo árabe Alhazen (973-1048) e o padre matemático e astrônomo francês Pierre Gassendi (1592-1655) defendiam que a luz era formada por pequenas partículas.

Embora não tenha sido o precursor de uma teoria corpuscular para a luz, foi sem dúvida, o maior expoente dessa teoria, Isaac Newton. Conforme o relato de Moura (2015) é bem sabido que Newton é popularmente conhecido como o principal defensor da materialidade da luz. Newton, de fato, adotou uma concepção corpuscular para a luz, mas nunca a defendeu abertamente em seus escritos. De acordo com o autor, não há ao longo do texto do *Óptica* uma defesa explícita aos corpúsculos de luz. No Livro I, Newton utilizou o termo “raio de luz”, definido de maneira geral como as menores partes da luz e “as que tanto são sucessivas nas mesmas linhas como simultâneas em várias linhas”

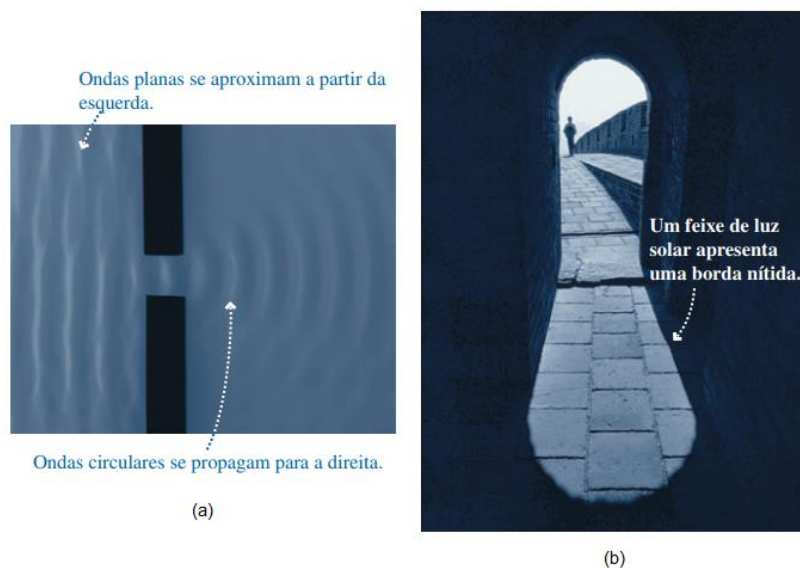
Segundo Silva (2007) observa que Newton publica seus dois primeiros artigos, coincidentemente sobre óptica. No primeiro, apresenta uma teoria da luz, profundamente inspirada no trabalho do francês Pierre Gassendi; no segundo, descreve o telescópio refletor, uma invenção para evitar a aberração cromática produzida nas lentes dos telescópios refratores da época. O primeiro

trabalho de Newton foi severamente criticado pelo primeiro astrônomo real da Inglaterra, Flamsteed , por Huygens e, sobretudo, por Hooke, que acusava Newton de conceber a luz como uma substância material, ou seja, corpuscular. Talvez por isso tenha postergado a publicação de sua Óptica até 1704, após a morte de Hooke, ocorrida em 1703.

Vale enfatizar que existiam antipatias mútuas entre Newton e o eminente cientista Robert Hooke. Este considerava que a propagação da luz seria através de pulsos de menor magnitude num meio contínuo. Ideia essa que indicava um comportamento ondulatório.

Como mencionam Knight e Ricci (2009), Newton tinha conhecimento que uma onda que se desloca na água, ao passar por uma abertura, se propaga de modo a preencher o espaço existente atrás desta, como uma onda plana (Figura 1a). Esse espalhamento das ondas é o fenômeno chamado de difração e é típico de ondas. Em contraste, a Figura 2b mostra que a luz solar produz uma sombra com bordas nítidas após passar por uma porta, não sendo observado a luz solar se propagando em arcos. É o que poderia esperar se a luz consistisse de partículas que se deslocassem em linhas retas. Este raciocínio levou Newton à conclusão de que a luz consistia de partículas leves, rápidas e muito pequenas, que ele denominou de corpúsculos.

FIGURA 1 – ONDAS QUE SE PROPAGAM NA ÁGUA ATRAVÉS DE UM ORIFÍCIO E LUA QUE PASSA ATRAVÉS DE UMA ABERTURA



Fonte: Knight e Ricci (2009)

Sobre as cores, segundo Martins e Porto (2018) Newton entendia que cada cor possuía um tipo de corpúsculo ou uma mistura deles. Por exemplo, a cor verde corresponde a corpúsculos dessa cor ou à mistura de amarelo com a azul. Assim, a teoria corpuscular explicava muito bem os fenômenos de reflexão, pois partia da analogia dos movimentos das bolas em colisões elásticas contra uma parede rígida, mas não conseguia explicar por que parte da luz se reflete e parte se refrata.

Ao longo do séc. XVIII, diferentes concepções concorreram para tentar explicar a natureza da luz. Apesar disso, observa Oliveira *et al.* (2019), que havia maior predomínio da teoria corpuscular entre os estudiosos da época, especialmente na Grã-Bretanha. Em fins do séc. XVIII, contudo, as dificuldades inerentes à teoria se tornaram cada vez mais evidentes.

2.5 A Teoria Ondulatória da Luz

Em contraponto com ao comportamento corpuscular, a teoria ondulatória teve ao longo da história muitos defensores e colaboradores.

Até a primeira metade do século XVII, o progresso científico e tecnológico no ramo da óptica envolvia, essencialmente, os fenômenos de reflexão e refração, possíveis de serem explicados a partir de modelos de partícula ou de onda, mas que, até meados do século XVII, não foram tratados, convincentemente, com base nesses modelos. A partir da segunda metade do século XVII, entretanto, outros fenômenos básicos da óptica foram descobertos (difração, por volta de 1665; formação de cores em películas delgadas – explicado hoje em termos de interferência de ondas –, também por volta de 1665; polarização, 1678), ampliando ainda mais o debate científico, sem, contudo, poderem ser explicados, facilmente, a partir apenas de modelos corpusculares por apresentarem características tipicamente ondulatórias, como é o caso da formação de cores em películas transparentes delgadas. Surgiram, então, os defensores da teoria ondulatória dos fenômenos luminosos, tendo Robert Hooke (1663-1703) como um dos seus primeiros formuladores. (Rocha, 2020, p.576)

Um dos nomes relevantes a propor que a luz teria um comportamento ondulatório foi físico, matemático e astrônomo holandês Christiaan Huygens (1629 – 1695).

Martins e Porto (2018) citam que para contrapor a teoria corpuscular, um argumento utilizado por Huygens foi que os feixes de luz ao se cruzarem em uma mesma região do espaço cada feixe segue seu caminho, aparentemente sem qualquer alteração. Nesse caso, se a luz fosse formada por corpúsculos, não seria de se esperar choques entre os feixes de luz, alterando assim a propagação da luz após o cruzamento dos feixes?

Segundo Moura (2016) Huygens e Newton eram coetâneos e viveram em uma época bem particular para a Óptica. Em sua obra “O Tratado sobre a Luz” em algumas dezenas de páginas, Huygens buscou descrever e explicar os principais fenômenos luminosos, baseando-se no conceito da luz como pulsos não periódicos propagados pelo éter. Não existem os conceitos que usualmente são associados a ondas, tais como periodicidade, comprimento de onda ou frequência. Em trechos iniciais do texto, a posição de Huygens ficou evidente: Como as percussões no centro dessas ondas não possuem uma sequência regular, também não se deve imaginar que as ondas sigam umas às outras por distâncias iguais. Assim, a teoria de Huygens enquadra-se mais precisamente em uma concepção vibracional que propriamente ondulatória.

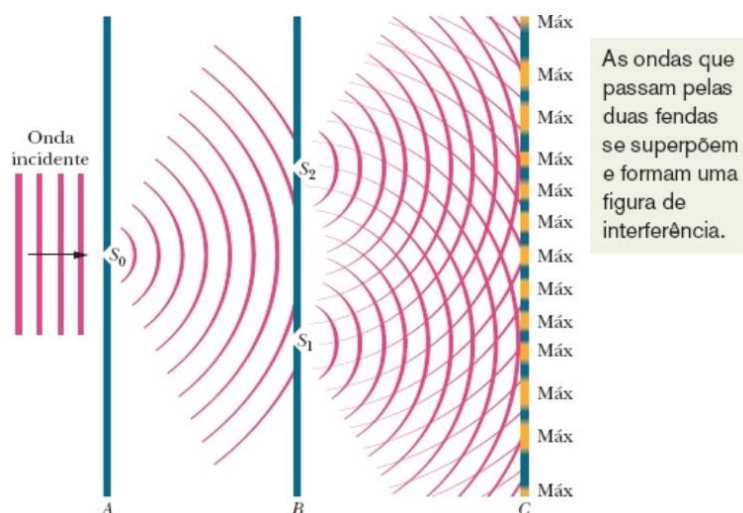
3 A EXPERIÊNCIA DE TOMAS YOUNG

Segundo Knight e Ricci (2009) Newton sofreu uma oposição vigorosa por parte de Hooke e de Huygens, todavia, Newton prevaleceu, embora o debate fosse enérgico, e por vezes ácido. A crença de que a luz é formada por corpúsculos não foi seriamente questionada durante mais de cem anos após a morte de Issac Newton.

O séc. XVIII assistiu à ascensão das teorias de Newton, com aplicações diversas categorias de fenômenos e influência em outras áreas do saber. A Revolução Francesa traria o sistema métrico decimal, que se difundiria através do planeta. Lavoisier estabeleceria, com base em medidas precisas da quantidade de reagentes e de produtos, o conceito de indestrutibilidade da matéria, enunciaria o conceito de substância simples e compostas, e levaria à derrocada do flogisto. Assim, após a morte de Huygens e com o sucesso da mecânica de Newton, a teoria ondulatória entrou em declínio. (SILVA, 2007, p.154)

Nos primórdios do séc. XX esse panorama começaria a ser alterado, quando em 1801 o cientista inglês Thomas Young (1773-1829) realizou um experimento e demonstrou que duas ondas de luz que se superpõem podem interferir uma na outra, semelhante à uma onda na água. O experimento é esquematizado na Figura 2.

FIGURA 2 – ESQUEMA DO EXPERIMENTO DE YOUNG



Fonte: Halliday *et al.* (2016)

Na descrição de Hallyday *et al.* (2016) com base na Figura 2, a luz monocromática é difratada pela fenda S_0 , que se comporta como uma fonte luminosa pontual, emitindo frentes de onda semicirculares. Quando a luz chega ao anteparo B, é difratada pelas fendas S_1 e S_2 , que se comportam como duas fontes pontuais. As ondas que deixam as fendas S_1 e S_2 se combinam e sofrem interferência, formando um padrão de interferência, composto de máximos e mínimos, na tela C.

Segundo o Silva (2007) a análise dos máximos e mínimos, além de estabelecer uma base material convincente para sustentar a teoria ondulatória, permitiu-lhe medir o comprimento de onda da luz solar, estimada em 570 nm (em unidades atuais), bem próximo do valor atual de 555 nm.

Knight e Ricci (2009) observam que o experimento de Young foi penosamente difícil de realizar com a tecnologia disponível na época. Apesar disso, os resultados definiram rapidamente o debate em favor de uma teoria de ondas luminosas porque a interferência é um fenômeno caracteristicamente

ondulatório. Visão essa também defendida por Silva (2010) que também enfatizou que os resultados de Young dariam base para que Augustin Fresnel (1788-1827) formulasse um modelo matemático para a luz, corroborando com os trabalhos de Young e fazendo avançar o modelo ondulatório.

4 A SUPREMACIA DO COMPORTAMENTO ONDULATÓRIO

Na extensa discussão entre as teorias corpuscular ou ondulatório e o avanço dessa última graças à Young e Fresnel, no final do séc. XIX, Maxwell apresenta sua Teoria Eletromagnética e surge o grande triunfo do comportamento ondulatório sobre o corpuscular. De acordo com Knight e Ricci (2009) em 1865 as ideias de campo de Faraday foram embasadas em fundamentos matemáticos por James Clerk Maxwell, um físico escocês de grande percepção física e habilidade matemática. Maxwell descreveu todos os comportamentos conhecidos dos campos elétricos e magnéticos com quatro equações, hoje conhecidas como as equações de Maxwell.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

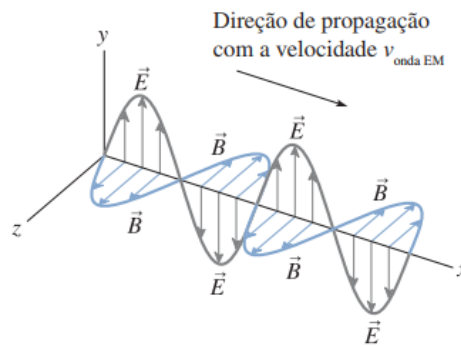
$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

O estudo de Maxwell conseguiu de prever que os campos elétricos e magnéticos poderiam sustentar-se mutuamente, livres da ação de cargas e de correntes, se esses constituíssem uma onda eletromagnética. A geometria que envolveria essa onda necessariamente teria uma característica particular de forma que os campos elétrico (\vec{E}) e magnético (\vec{B}) fossem perpendiculares entre si, bem como à direção de propagação, ou seja, a onda eletromagnética deveria ser uma onda transversal, como mostrada na Figura 3.

FIGURA 3 – ONDA ELETROMAGNÉTICA



Fonte: Knight e Ricci (2009)

Outra grande contribuição do trabalho de Maxwell foi a capacidade de prever a velocidade que uma onda eletromagnética, dada por:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (5)$$

Onde ϵ_0 é a constante de permissividade e μ_0 é a constante de permeabilidade do meio. No caso do vácuo, essa velocidade de propagação seria aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s.

Segundo Silva (2007) Maxwell fez uma síntese das equações do eletromagnetismo e, por simetria, percebeu a ausência de um termo em uma delas. Esse termo permitiu-lhe demonstrar que os campos elétricos e magnéticos satisfazem equações de onda que se propagam com a velocidade da luz. Ele associou o fato desses campos se propagarem com a velocidade da luz à interpretação de a luz visível ser um caso particular de onda eletromagnética, isto é, as ondas eletromagnéticas na faixa de frequência perceptível pelo olho humano constituiriam a luz visível. A hipótese era ousada, desvinculada tanto da tradição mecânica quanto da tradição da teoria ondulatória clássica. O trabalho de Maxwell chegou a ser ridicularizado na grande imprensa.

Não sabemos a reação imediata de Maxwell ao completar este cálculo, mas deve ter sido de choque e excitação. Ele previu a velocidade para as ondas eletromagnéticas, uma previsão obtida diretamente de sua teoria, e o que obteve foi nada mais do que a velocidade da luz! Tal concordância poderia ser apenas uma coincidência, entretanto não foi assim que Maxwell pensou. Com um audacioso lance de imaginação, ele concluiu que a luz é uma onda eletromagnética. (KNIGHT E RICCI, 2009, p.1062)

Knight e Ricci (2009) relatam ainda que, passaram-se 25 anos até que as previsões de Maxwell fossem testadas. Em 1886, o físico alemão Heinrich Hertz descobriu como gerar e transmitir ondas de rádio. Dois anos depois, em 1888, ele conseguiu mostrar que as ondas de rádio se propagam com a velocidade da luz. Infelizmente Maxwell não viveu para assistir ao seu triunfo. Ele havia morrido em 1879, aos 48 anos. Entretanto, como consequência da unificação do magnetismo, a partir das equações de Maxwell tanto o campo magnético, quanto o campo elétrico satisfazem uma equação de onda análoga a de Jean D'Alembert, conforme as equações 6 a 8.

$$\nabla^2 \cdot \vec{E} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (\text{Equação para o campo elétrico}) \quad (6)$$

$$\nabla^2 \cdot \vec{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (\text{Equação para o campo magnético}) \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 u^2}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{Equação de onda de D'Alembert}) \quad (8)$$

E nessa linha, Hallyday *et al.* (2016) chamam a atenção de que as ondas sonoras e as ondas em cordas obedecem às equações da mecânica newtoniana. As ondas de matéria obedecem à equação de Schrödinger, proposta em 1926 pelo físico austríaco Erwin Schrödinger. Já as ondas luminosas, obedecem às equações de Maxwell.

Com o trabalho de Maxwell o comportamento ondulatório da luz triunfa sobre a teoria corpuscular e impõe sua supremacia.

5 O EFEITO FOTOELÉTRICO O ESPALHAMENTO DE COMPTON

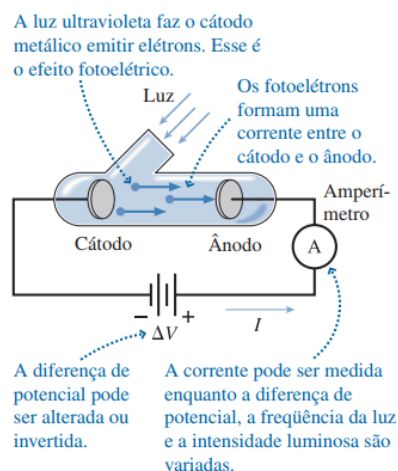
Quando já estava praticamente aceito por unanimidade pela comunidade científica que a luz tinha um comportamento ondulatório, dois fenômenos intrigaram os pesquisadores: o efeito fotoelétrico e o espalhamento de Compton. Esses fenômenos só conseguiram ser explicados se o

comportamento da luz fosse através de partículas e lançaram os fundamentos para uma nova base da física, a física quântica.

Conforme relata Knight e Ricci (2009), Hertz ao comprovar as previsões da teoria eletromagnética de Maxwell, descobriu acidentalmente um fenômeno que iria dar início à revolução quântica. Ele notou que um eletroscópio negativamente carregado podia ser descarregado através da incidência de luz ultravioleta. Essa observação chamou a atenção de J.J. Thomson, que concluiu que a luz ultravioleta causava a emissão de cargas negativas pelo eletrodo. Em 1899, Thomson demonstrou que as cargas emitidas eram elétrons. A emissão de elétrons devido à incidência de luz em sua superfície tornou-se conhecida como efeito fotoelétrico.

Em 1902, Philip Lenard um dos alunos de Hertz mostrou que a luz ultravioleta facilitava a descarga ao fazer com que elétrons fossem emitidos da superfície do cátodo a uma taxa constante (Figura 4).

FIGURA 4 – DISPOSITIVO EXPERIMENTAL DE LENARD PARA ESTUDAR O EFEITO FOTOELÉTRICO



Fonte: Knight e Ricci (2009)

Relatam Knight e Ricci (2009) que em 1905, Einstein publicou um artigo sobre a natureza da luz. Nele, o cientista propõe uma ideia ousada, mas extremamente simples, para explicar os dados de Lenard sobre o efeito fotoelétrico. Einstein foi o primeiro a considerar a ideia de quantização de Planck. Foi ainda mais longe e sugeriu que a própria radiação eletromagnética fosse quantizada! Ou seja, a luz não seria uma onda contínua, e sim, incidiria em pequenos pacotes ou feixes de energia. Ele denominou cada pacote de

energia de quantum de luz e postulou que a energia de um quantum de luz é diretamente proporcional à frequência luminosa.

A interpretação de Einstein para o fenômeno deu origem a três postulados sobre os quanta de luz e suas interações com a matéria:

1 - A luz de frequência f consiste em quanta discretos, cada qual com energia $E = hf$, onde h é a constante de Planck. Cada fóton viaja à velocidade da luz, c .

2 - Os quanta de luz são emitidos ou absorvidos integralmente. Uma substância pode emitir 1, 2 ou 3 quanta, mas não 1,5 quantum. Analogamente, um elétron de um metal não pode absorver meio quantum, e sim, apenas um número inteiro deles.

3 - Um quantum de luz, quando absorvido pelo metal, transfere a totalidade de sua energia a um único elétron.

Knight e Ricci (2009) ressaltam que esses três postulados – que a luz incide em porções, que as porções não podem ser divididas e que a energia de uma porção é entregue a um elétron apenas – são cruciais para a compreensão das novas ideias que originaram a física quântica. Eles estão em total oposição aos conceitos da física clássica, segundo a qual a energia pode ser continuamente subdividida e compartilhada.

Segundo Silva (2010) a explicação do efeito fotoelétrico Einstein retoma de certo modo, ideias de Isaac Newton dos séc. XVII e XVIII, apesar de já serem consideradas fora do uso no séc. XX. Suas hipóteses foram submetidas a testes experimentais e comprovadas por Robert Millikan em 1916.

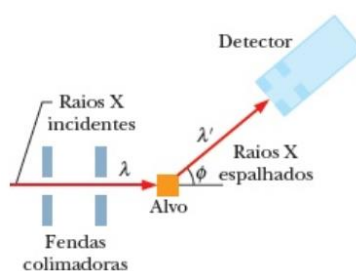
Por outro lado, segundo Caruso (2020) foi também a partir de experimentos com raios X que Arthur Holly Compton, em 1922, obteve evidências de que a radiação eletromagnética (a luz), na interação com a matéria, se comportava, em alguns casos, como se fosse constituída de feixes de partículas – os fótons – que obedeciam às leis de conservação relativísticas de momentum e de energia.

Segundo Silva e Freire Jr. (2014) o físico norte-americano Arthur Holly Compton (1892-1962) foi laureado em 1927 com o mais prestigioso reconhecimento científico em física, o Prêmio Nobel, devido a sua explicação quântica para o processo de espalhamento dos raios X pela matéria. Tal

resultado tornou-se fundamental para os desenvolvimentos ulteriores da teoria quântica.

Compton fez incidir um feixe de raios-X com comprimento de onda λ , em um alvo de grafite. Após essa incidência dos raios X no grafite, mediu-se a o comprimento de onda e intensidade dos raios X através de vários ângulos de espalhamento, conforme mostrado na Figura 5.

FIGURA 5 – ESQUEMA DO EXPERIMENTO DE COMPTON



Fonte: Halliday *et al.* (2016)

Os resultados encontrados por Compton foram que havia uma redução da energia dos raios X espalhados. Analisado o efeito encontrado no experimento, do ponto de vista clássico, a teoria eletromagnética não poderia explicar a redução na energia dos raios X. Assim, Compton interpretou seus resultados para o espalhamento como uma colisão entre um fóton de raio X e um elétron, conservando a energia e o momento linear na colisão. Comportamento esse, típico de partículas.

De acordo com Silva e Freire Jr. (2014) a descoberta desse efeito foi resultado do desenvolvimento de um longo programa de pesquisa e contribuiu tanto para a teoria quântica quanto para outras áreas da ciência. Compton, antes de chegar à explicação do fenômeno quântico, também abordou o problema semiclassicamente em 1921. Seu trabalho passou por diferentes fases e conjecturas até a sua formulação quântica.

Silva e Freire Jr. (2014) e citam ainda que o estudo foi uma forte evidência experimental de que era necessário considerar propriedades corpusculares para a radiação X. Neste caso, o que poderia ser mais partícula do que uma colisão tipo bola de bilhar? Deste modo, Compton havia encontrado evidências experimentais tanto da natureza corpuscular quanto da ondulatória dos raios X. Nada pode simbolizar melhor o profundo dilema da

onda-partícula que os físicos enfrentaram com a descoberta do efeito Compton já que, enquanto os fenômenos de interferência, difração e reflexão eram explicados pela teoria eletromagnética clássica, o processo de espalhamento dos raios X pela matéria era explicado pela hipótese do quantum de radiação.

6 A NATUREZA DUAL DA LUZ

Segundo Knight e Ricci (2009) embora Planck tenha sugerido inicialmente, foi Einstein quem mostrou de forma convincente que a energia é quantizada e que a luz, apesar de exibir interferência, comporta-se como se fosse formada por pacotes de energia. Tais unidades fundamentais de energia luminosa foram denominadas, mais tarde, fótons.

Mas o que são exatamente os fótons? Embora eles possuam características de partículas, os fótons claramente não se ajustam à ideia clássica associada a uma partícula. Ao incidir em um aparato de fenda dupla de Young, uma partícula clássica atravessaria um orifício ou outro. Neste caso, se a luz fosse constituída de partículas clássicas, veríamos dois pontos brilhantes na tela. Em vez disso, observamos franjas de interferência no experimento de fenda dupla. (KNIGHT e RICCI, 2009, p.1216)

Ainda, segundo Knight e Ricci (2009) que o padrão de interferência pode ser construído fóton a fóton quando a intensidade da luz é muito baixa. Esse comportamento indica que o fóton deve de algum modo, passar por ambas as fendas e interferir consigo mesmo! Os fótons parecem revelar, ao mesmo tempo, comportamento ondulatório e comportamento corpuscular.

Coletivamente, os fótons parecem se comportar como ondas e, como tais, são explicados pelos fenômenos ondulatórios. Individualmente, cada fóton se comporta como uma partícula com energia, velocidade de propagação e uma certa localização no espaço, de modo que pode colidir com um elétron. (MARTINS e PORTO, 2018, p.44)

Segundo Paty (2013) o surgimento da mecânica quântica, nos anos de 1925-1927, consagrou o duplo caráter ondulatório e corpuscular da luz e dos elementos da matéria no nível atômico, ao basear-se, por assim dizer, sobre esse caráter, ao menos em um primeiro momento. Essa dualidade constituiu um problema, durante muito tempo (e ainda hoje continua sendo

problemática para alguns), uma vez que, segundo a física clássica, trata-se de dois caracteres incompatíveis no seio de uma mesma teoria física. Ela suscitou interpretações físico-filosóficas sobre a natureza da descrição do mundo físico nesse domínio, a tal ponto que alguns chegaram a pôr em dúvida a própria noção de realidade física.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentro das grandes áreas de estudo da física, a óptica é aquela responsável pela luz e pelos fenômenos óticos e luminosos. A óptica a rigor, se divide na óptica geometria, responsável pelo estudo da propagação da luz, e na óptica física, responsável pela compreensão da natureza da luz. Este trabalho concentrou-se na óptica física, descrevendo sobre a natureza da luz.

Durante a descrição, é provável que grandes pesquisadores não foram citados nesse estudo, bem como muitos anônimos que não constam seus nomes entre os eminentes colaboradores da história da ciências, porém tentou-se aqui apresentar as contribuições mais relevantes sobre o tema.

E assim, finaliza esta exposição do extenso “caminho percorrido pela luz” desde as civilizações remotas até os dias atuais. Ao longo dos séculos pensadores e pesquisadores sempre se depararam com a dicotomia acerca da natureza da luz. Muitos criaram modelos para caracterizá-la. O conceito atual, no qual estabelece as bases para a física quântica é que a luz seja de natureza dual, hora assume o comportamento corpuscular, outra hora o ondulatório, dependendo do que se pretende analisar. Em meio a toda essa discussão, a luz nunca esteve presa a modelos propostos, sempre foi o que verdadeiramente é, luz.

REFERÊNCIAS

CARUSO, F.; **O Universo da Luz**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 42, e20200250, 2020.

FORATO, T.C.M.; **A Luz, o Éter e a Natureza da Ciência: Minicurso de História da Óptica na Escola Básica**. (Curso de curta duração), 2014.

MARTINS, A. P. B.; PORTO, M. B. D. S. M.; **A Luz, sua História e suas Tecnologias, Curso de Atualização para Professores da Educação Básica**.

1. ed., v. 01. 69p, 2018. Disponível em: <
<http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/431389> > Acesso em: 01/set. 2021

SILVA, B. V. C.; **Controvérsias sobre a natureza da luz: uma aplicação didática**. 180p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, 2010

KNIGHT, R.; D.; RICCI, T. F.; **Física: uma abordagem estratégica**. v.2, 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2009

SILVA, B. V. Cruz.; **Aspectos da natureza da ciência na sala de aula: o caso da natureza da luz nos séculos XVII e XVIII**. Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia, Ponta Grossa, v. 9, n. 2, p. 214-236, mai./ago. 2016.

RAMOS, J.P.S.; **Demonstração do movimento da luz no ensaio de óptica de Descartes**. Scientiae Studia, São Paulo, v. 8, n. 3, p. 421-450, 2010.

MOURA, B.A.; **Newton versus Huygens: como (não) ocorreu a disputa entre suas teorias para a luz**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 33, n. 1, p. 111-141, abr. 2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2016v33n1p111>

SILVA, F.W.O.; **A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 1, p. 149-159, 2007.

ROCHA, K.F.M.; Aspectos de corpúsculo e de onda na teoria newtoniana da luz: das visões do período pós-newtoniano à visão atual dos fenômenos microscópicos. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 37, n. 2, p. 574-592, ago. 2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2020v37n2p574>

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. **Fundamentos de Física**. v.4, 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016

OLIVEIRA, R.A.; MARTINS, A.F.P.; SILVA, A. B.; **Thomas Young e a teoria ondulatória da luz no início do século XIX: aspectos conceituais e epistemológicos**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 41, n.2, e20180141, 2019

SILVA, I.; FREIRE JR, O. **A descoberta do efeito Compton: De uma abordagem semiclássica a uma abordagem quântica**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 36, n.1, 1601, p.1-14, 2014

PATY, M.; **Considerações sobre o caminho original de Einstein rumo a uma teoria quântica da radiação (a propósito do artigo “Einstein y el efecto Compton”)**. Scientiae Studia, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 221-42, 2013.

SILVA, A.A.; **Crônicas da luz: Uma breve história da óptica**. 39 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Instituto de Física, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.