

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS E DAS
TÉCNICAS E EPISTEMOLOGIA

FRANCISCO DE ASSIS LIMA DE SOUSA JUNIOR

A HISTÓRIA DA CIÊNCIA SOB A PERSPECTIVA DE THOMAS KUHN: da Óptica
primitiva à descoberta da luz Síncrotron

RIO DE JANEIRO

2025

FRANCISCO DE ASSIS LIMA DE SOUSA JUNIOR

A HISTÓRIA DA CIÊNCIA SOB A PERSPECTIVA DE THOMAS KUHN: da Óptica
primitiva à descoberta da luz Síncrotron

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em
História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia da
Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos
requisitos para obtenção do grau de Doutor.

Orientadora: Profa. Dra. Grazieli Simões

Coorientadoras: Profa. Dra. Priscila Tamiasso-Martinhon
Profa. Dra. Maria de Lourdes da Silva

RIO DE JANEIRO

2025

CIP - Catalogação na Publicação

725h

Sousa Junior, Francisco de Assis Lima de
A HISTÓRIA DA CIÊNCIA SOB A PERSPECTIVA DE THOMAS
KUHN: da Óptica primitiva à descoberta da luz
Síncrotron. / Francisco de Assis Lima de Sousa
Junior. -- Rio de Janeiro, 2025.
151 f.

Orientadora: Grazieli Simões.
Coorientadora: Priscila Tamiasso-Martinhon.
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, Decania do Centro de Ciências
Matemáticas e da Natureza, Programa de Pós-Graduação
em História das Ciências e das Técnicas e
Epistemologia, 2025.

1. revolução científica. 2. ciência normal. 3.
Sírius. 4. ensino de Física. I. Simões, Grazieli,
orient. II. Tamiasso-Martinhon, Priscila, coorient.
III. Título.

À memória do meu amado pai, que
sempre foi o meu maior incentivador.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus por me dar saúde, inteligência e proteção para conquistar mais esta vitória em minha vida.

À minha amada esposa Raquel e meus filhos Matheus e Maria Fernanda que juntos são a razão de todo o meu esforço para alcançar os meus objetivos e minha motivação para alçar voos cada vez maiores.

À minha amada mãe Sônia e irmão João Paulo pela força que sempre me deram em todas as minhas empreitadas.

Às minhas orientadoras Profa. Grazieli Simões, Profa. Priscila Tamiasso-Martinhon e Profa. Maria de Lourdes da Silva, por terem acreditado e abraçado o meu projeto, que havia começado sob a orientação do ilustre Prof. Pinguelli (*in memoriam*). Também pela disponibilidade, paciência, incentivo e pelos valiosos ensinamentos, além de todo o suporte técnico e emocional para que eu conseguisse alcançar o título de doutor.

À professora Maira Fróes (NCE/HCTE/UFRJ) que do início ao fim do curso me forneceu todo o apoio burocrático, financeiro e intelectual que precisei para completar mais esta importante etapa da minha vida.

Ao meu amigo e companheiro Fabio Barroso pelas trocas de experiências, ricas discussões e pela parceria nos trabalhos. Caminhou ao meu lado durante todo o doutorado me dando força nos momentos de insegurança e contribuindo com o seu vasto conhecimento pedagógico para a conclusão da minha tese.

Ao Grupo Interdisciplinar de Educação, Eletroquímica, Saúde, Ambiente e Arte (GIEESAA), Grupo Interinstitucional e Multidisciplinar de Ensino, Pesquisa e Extensão em Ciências (GIMEnPEC) e Grupo de Pesquisa Educação e Drogas (GPED/UERJ) pelo suporte logístico.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Uma nova verdade científica não
triunfa porque os que se opunham a ela veem a
luz e saem convencidos, mas porque eles
acabam morrendo e surge uma nova geração
mais familiarizada com ela.

(Thomas Kuhn)

RESUMO

A humanidade desde sempre se interessou pela compreensão da natureza por questões de sobrevivência e do seu bem estar. Especificamente, o conhecimento sobre a luz propiciou ao longo do tempo inúmeros benefícios como proteção, comunicação e saúde. A ciência, responsável por essa produção de conhecimentos, vai sendo construída conforme o pensamento humano vai se modificando ao longo do tempo, mostrando que as teorias científicas não são definitivas. O filósofo da ciência Thomas Kuhn chama atenção para essa característica provisória das teorias científicas. Esta tese tem como objetivo mostrar que a epistemologia de Thomas Kuhn se aplica à história de como os conceitos referentes a luz foram evoluindo ao longo do tempo, contribuindo para uma melhor compreensão da natureza da ciência e consequentemente para o ensino da Física. Ela se justifica pela importância de: a) discutir o papel da ciência na sociedade, analisando o seu impacto na vida das pessoas e a sua capacidade de influenciar as decisões que definem os rumos da humanidade; b) popularizar a ciência, encontrando formas de torná-la acessível e inteligível, para que as pessoas saibam lidar com as tecnologias a sua volta, busquem melhores tratamentos para sua saúde e tenham condições de opinar sobre decisões das autoridades que afetem o bem estar coletivo e c) melhorar a compreensão de como a ciência se desenvolve, por meio do ensino, enxergando o seu caráter provisório e a sua essência humana. Neste sentido, defendemos que o estudo da história da ciência associada à teoria de Kuhn pode contribuir para alcançar esses objetivos citados. Procuramos mostrar que a construção dos conhecimentos sobre a luz ao longo da história passou por momentos distintos que são condizentes com as fases descritas pela estrutura de desenvolvimento da ciência segundo Kuhn. Especificamente, concluímos que a luz síncrotron é resultado da pesquisa realizada durante a fase de *ciência normal* e não de *ciência extraordinária*, ambas denominadas por este filósofo. A pesquisa realizada neste trabalho caracterizou-se por um ensaio teórico em que foi construída uma narrativa histórica referente à luz, não aprofundada em conceitos teóricos e nos objetivos reais dos cientistas, organizando os episódios dentro das fases de desenvolvimento da ciência segundo Kuhn, e uma discussão sobre as possíveis implicações das ideias kuhnianas para o ensino da Física. Observamos, no decorrer da pesquisa, o caráter dinâmico do trabalho científico, as influências socioculturais sofridas por ele e o potencial pedagógico que a epistemologia de Kuhn apresenta.

Palavras-chave: revolução científica; ciência normal; Sírius; ensino de Física.

ABSTRACT

Humanity has always been interested in understanding nature for reasons of survival and well-being. Specifically, knowledge about light has provided countless benefits over time, such as protection, communication and health. Science, responsible for this production of knowledge, is constructed as human thought changes over time, showing that scientific theories are not definitive. The philosopher of science Thomas Kuhn draws attention to this provisional characteristic of scientific theories. This thesis aims to show that Thomas Kuhn's epistemology applies to the history of how concepts related to light have evolved over time, contributing to a better understanding of the nature of science and, consequently, to the teaching of Physics. It is justified by the importance of: a) discussing the role of science in society, analyzing its impact on people's lives and its ability to influence decisions that define the course of humanity; b) popularizing science, finding ways to make it accessible and intelligible, so that people know how to deal with the technologies around them, seek better treatments for their health and are able to give their opinion on decisions made by authorities that affect collective well-being; and c) improving the understanding of how science develops, through teaching, recognizing its provisional nature and its human essence. In this sense, we argue that the study of the history of science associated with Kuhn's theory can contribute to achieving these objectives. We sought to show that the construction of knowledge about light throughout history has gone through distinct moments that are consistent with the phases described by Kuhn's development structure of science. Specifically, we conclude that synchrotron light is the result of research carried out during the phase of normal science and not extraordinary science, both of which are called by this philosopher. The research carried out in this work was characterized by a theoretical essay in which a historical narrative regarding light was constructed, without delving into theoretical concepts and the real objectives of scientists, organizing the episodes within the phases of development of science according to Kuhn, and a discussion on the possible implications of Kuhn's ideas for the teaching of Physics. During the research, we observed the dynamic nature of scientific work, the sociocultural influences it suffered and the pedagogical potential that Kuhn's epistemology presents.

Keywords: scientific revolution; normal science; Sirius; Physics teaching.

PRELÚDIO

Nasci em 19 de abril de 1977 em São João de Meriti, cidade localizada na Baixada Fluminense no estado do Rio de Janeiro. Quando completei seis anos de idade eu e minha família nos mudamos para Jacarepaguá, mais precisamente no bairro da Taquara, onde residi até os 30 anos. Durante este período cursei o Ensino Fundamental I (antigo primário) em uma escola da rede pública enquanto o Ensino Fundamental II e o Ensino Médio foram realizados em escolas da rede particular de ensino.

Dentre as disciplinas que estudei no ensino básico, sempre me interessei mais por Ciências, no Ensino Fundamental, e depois por Física no Ensino Médio. Gostava, desde a tenra idade, de realizar experiências, de aquecer e congelar materiais, de observar o movimento dos corpos em diferentes situações e de testar hipóteses. Tinha o sonho de me tornar médico, mas a paixão pela Ciência foi mais forte assim como pela docência, profissão que já ensaiava nas brincadeiras de criança. Porém, a aceitação deste destino só aconteceu muito tempo depois. Pois, desde a minha juventude, percebia que a profissão de docente era sempre desvalorizada e isso fez com que eu nunca cogitasse seguir este caminho.

Em 1994 iniciei o curso de bacharelado em Física na Universidade Federal do Rio de Janeiro onde permaneci durante todo o ciclo básico (aproximadamente metade do curso). Mas a falta de perspectiva no mercado de trabalho, um pouco por desinformação e também por não enxergar interesse do governo vigente em desenvolver a pesquisa científica no país me fizeram pensar na possibilidade de ser professor.

Então solicitei a transferência do curso de bacharelado para a licenciatura, na mesma universidade, cujo horário era noturno. Nesta época, sentindo a necessidade de não mais depender do meu pai para os meus desejos materiais e de lazer, já havia começado a trabalhar durante o dia e ia para a faculdade à noite. Essa rotina de trabalho e diversão acabou desviando o meu foco me fazendo tomar a decisão de trancar o curso durante um tempo e muitas vezes pensei em desistir da faculdade. A perda do meu emprego me fez refletir sobre a necessidade de terminar o curso e obter uma formação, ainda que não tivesse certeza sobre qual profissão queria exercer.

Retornei para o curso e finalizei as disciplinas, restando apenas o estágio (Prática de Ensino) e a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso. Realizei a Prática de Ensino no Colégio de Aplicação da UFRJ onde efetivamente ministrei a minha primeira aula. Essa experiência foi traumática, na minha concepção a aula foi muito ruim suscitando a dúvida sobre a minha capacidade de ser professor. Foi aí que pude perceber que ser professor é mais do que

simplesmente ensinar, é educar, é orientar e foi isso que o coordenador do estágio fez comigo. Me mostrou onde errei e onde poderia melhorar, me incentivou a continuar e me deu outras oportunidades. O resultado dessa intervenção foi maravilhoso, as aulas seguintes foram melhores, minha confiança aumentou assim como a motivação para me tornar professor.

Porém, a realidade da profissão se mostrou desafiadora logo após eu ter me formado. A dificuldade de conseguir uma escola para trabalhar e os baixos salários me levaram a buscar os concursos públicos como alternativas. Em 2005 me tornei um servidor público federal ao passar no concurso para Assistente Administrativo da UFRJ, onde me encontro vinculado até hoje. Quando a minha carreira de magistério parecia ter terminado sem ao menos começar direito surgiu, em 2009, um concurso para professor da rede estadual de ensino do Rio de Janeiro. Vislumbrando obter mais uma renda acabei participando do certame, fui aprovado e ingressei no magistério público em 2010. A partir daí pude efetivamente exercer a docência de maneira plena, o que me fez conhecer melhor a profissão e me apaixonar por ela.

Em 2015 tive a oportunidade de fazer o mestrado em Ensino de Ciências pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Nesta etapa da vida, agora mais maduro, pude valorizar mais e mergulhar nas teorias de ensino, nas metodologias de pesquisas e estratégias didáticas utilizando os mais variados recursos didáticos. Neste período publiquei dois artigos, um deles apresentado do XXII Simpósio Nacional de Ensino de Física sob o título “Uma proposta de planejamento didático para o tema Pressão Atmosférica no Ensino Fundamental com base no modelo Construtivista de Mudança Conceitual” e o outro publicado na revista eletrônica Debates em Educação Científica e Tecnológica intitulado “Uma proposta de ensino do Efeito Fotoelétrico utilizando Simulação Computacional a partir dos Três Momentos Pedagógicos”. Essas experiências, inéditas na minha vida, me motivaram a continuar estudando e pesquisando.

Em 2019 iniciei o curso de doutorado em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. A mudança de área me trouxe um novo desafio, encontrei muitas dificuldades no início e ainda encontro, porém me acrescentou bastante intelectualmente. A aceitação do Prof. Luiz Pinguelli Rosa, professor consagrado e um dos mais importantes nomes da pesquisa científica no Brasil, como meu orientador foi um verdadeiro presente. Suas aulas e orientações foram inesquecíveis e provocaram uma verdadeira mudança de paradigma em minha vida, transformando o meu modo de pensar e os meus interesses acadêmicos. Infelizmente esta relação foi interrompida com a morte do Prof. Pinguelli em março de 2022. Mas, em meio a esse cenário de perda e incerteza, a coordenação do curso me deu todo o suporte e me indicou a Profa. Priscila Tamiasso-Martinhon para orientar

a minha tese. Assim como o Prof. Pinguelli, a professora Priscila foi responsável por uma grande mudança de comportamento como aluno, aumentando a minha produção acadêmica. Em menos de um ano publicamos três trabalhos em congressos além de participações em mesas de debates sobre educação, área que me sinto mais à vontade.

Em 2023 o tema do meu projeto sofreu uma pequena alteração, mas que significou um grande salto de qualidade e importância. Resolvemos acrescentar os estudos sobre a luz síncrotron à minha pesquisa e com isso acabei ganhando outro presente na minha trajetória acadêmica: a orientação da professora Grazieli Simões. A Profa. Grazi é especialista em luz síncrotron e se tornou fundamental para o desenvolvimento da minha tese. Formamos então um trio que resultou na publicação de dois artigos em congressos (Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia e Scientiarum Historia) e na elaboração de um minicurso que foi ministrado no Simpósio Nacional de Ensino de Física.

Porém, era necessário fortalecer o meu repertório nas discussões sobre educação. Esse suporte teórico me foi gentilmente fornecido pela Profa. Maria de Lourdes da Silva, que se tornou minha orientadora em 2024, sendo determinante para adquirir confiança em uma área da qual não sou especialista.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Descrição gráfica da Teoria da onda.....	34
Figura 2 –	Teoria da emissão.....	37
Figura 3 –	Ilustração da câmara escura de Alhacén.....	38
Figura 4 –	Representação do Princípio de Huygens.....	41
Figura 5 –	Experimento da polarização da luz.....	43
Figura 6 –	Esquema do aparato experimental criado por Faraday.....	50
Figura 7 –	Tubo de Geissler.....	51
Figura 8 –	Aparato experimental de Lenard para estudar os raios catódicos.....	52
Figura 9 –	Ilustração do experimento de Röntgen.....	53
Figura 10 –	Aparato experimental utilizado por Hertz para produzir centelhas em circuitos distintos.....	56
Figura 11 –	Aparato experimental utilizado por Lenard para reproduzir o efeito fotoelétrico.....	57
Figura 12 –	Distribuição de energia de um corpo em função da sua temperatura.....	59
Figura 13 –	Diagrama do experimento de Michelson e Morley.....	60
Figura 14 –	Experimento de espalhamento de Rutherford.....	61
Figura 15 –	Experimento de Bohr.....	68
Figura 16 –	Transição eletrônica (a). Emissão de radiação pelo elétron (b).....	69
Figura 17 –	Esquema do experimento realizado por Compton.....	69
Figura 18 –	Explicação de Compton para a perda de energia do fóton.....	70
Figura 19 –	Representação do experimento da dupla fenda realizado por Davisson e Germer.....	71
Figura 20 –	Foto do equipamento e descrição do experimento de Max von Laue.....	74
Figura 21 –	Esquema de funcionamento de uma fonte de luz síncrotron.....	76
Figura 22 –	Primeira imagem de microtomografia de raios X da linha Mogno, do Sirius, de uma rocha com composição similar às das rochas do pré-sal brasileiro.....	77
Figura 23 –	Fontes de luz Síncrotron pelo mundo.....	81
Figura 24 –	Protótipo do quadrupolo desenvolvido pela WEG.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BNCC	- Base Nacional Comum Curricular
CBPF	- Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
C&T	- Ciência e Tecnologia
CNPEM	- Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais
EM	- Ensino Médio
ENEM	- Exame Nacional do Ensino Médio
ES	- Ensino Superior
ESPEM	- Escola Sirius para Professores do Ensino Médio
FC	- Física Clássica
GE	- General Electric
HC	- História da Ciência
HFC	- História e Filosofia da Ciência
LNLS	- Laboratório Nacional de Luz Síncrotron
PD&I	- Pesquisa e Desenvolvimento e Inovação
PNLD	- Programa Nacional do Livro Didático
PNLEM	- Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio
RRD	- Reconstrução Racional Didática
TD	- Transposição Didática
TQ	- Teoria Quântica
TR	- Teoria da Relatividade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	O PAPEL DA CIÊNCIA NA SOCIEDADE.....	20
2.1	OS OBJETIVOS DA CIÊNCIA.....	21
2.2	A HISTÓRIA DA CIÊNCIA NA CONSTRUÇÃO DO PENSAMENTO CIENTÍFICO.....	25
3	A EPISTEMOLOGIA DE THOMAS KUHN.....	29
3.1	O DESENVOLVIMENTO DA CIÊNCIA SEGUNDO KUHN.....	29
3.2	A RACIONALIDADE CIENTÍFICA NA VISÃO DE KUHN.....	31
4	A HISTÓRIA DA LUZ.....	36
4.1	A LUZ: DA GRÉCIA ANTIGA À ÓPTICA GEOMÉTRICA.....	36
4.2	OS PARADIGMAS DA LUZ.....	39
4.3	A CIÊNCIA NORMAL: PARADIGMA ONDULATÓRIO.....	47
4.4	A CRISE DA LUZ.....	55
4.5	A REVOLUÇÃO CIENTÍFICA.....	65
4.6	A CIÊNCIA NORMAL: PARADIGMA DUAL.....	67
5	A LUZ SÍNCROTRON: REVOLUÇÃO CIENTÍFICA OU CIÊNCIA NORMAL?.....	73
5.1	O QUE É A LUZ SÍNCROTRON?.....	74
5.2	A CONSTRUÇÃO DO SIRIUS.....	78
5.3	A ESCOLA SIRIUS PARA PROFESSORES DO ENSINO MÉDIO.....	84
6	A HISTÓRIA DA CIÊNCIA COMO RECURSO DIDÁTICO.....	86
7	A EPISTEMOLOGIA DE KUHN E O ENSINO DE FÍSICA.....	90
7.1	MANUAIS E EXEMPLARES.....	94
7.2	APLICAÇÃO DA TEORIA DE KUHN AO ENSINO DE FÍSICA.....	95
7.2.1	Propostas didáticas baseadas na epistemologia de Thomas Kuhn.....	95
7.2.2	O relativismo kuhniano e o ensino de Física.....	97
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	100
	REFERÊNCIAS.....	104
	ANEXO A - PRODUÇÕES BIBLIOGRÁFICAS EM EVENTOS CIENTÍFICOS	111

1 INTRODUÇÃO

A compreensão da natureza e do comportamento da luz sempre despertou o interesse dos homens, pois enxergavam que o seu controle, manipulação e produção poderiam beneficiá-los em diversos aspectos como segurança, comunicação e para a própria ciência proporcionando melhores condições de observação dos fenômenos e experimentos. Não obstante, a ciência ao longo da história tem servido à humanidade por meio dos conhecimentos que produz levando à construção de tecnologias, que por sua vez promovem o bem-estar, a proteção e o desenvolvimento da sociedade, mas quando mal utilizadas, trazem riscos à saúde, à degradação do planeta e guerras.

Daí a importância de se discutir continuamente o papel da ciência na sociedade, analisando o seu impacto na vida das pessoas e o seu poder de influenciar nos rumos da humanidade. Entender que a ciência é uma atividade humana e por isso seus objetivos são afetados por fatores sociais, culturais e econômicos, é fundamental para compreender a sua função. Além disso, se faz necessário cada vez mais popularizar a ciência, tanto pela via educacional como pelas mídias, encontrando formas de torná-la acessível e inteligível, para que as pessoas aprendam a lidar com as tecnologias em sua volta, busquem melhores tratamentos para sua saúde e tenham condições de opinar sobre decisões das autoridades que atinjam o bem-estar coletivo.

A luz, tema abordado neste trabalho, possui grande importância para a ciência, estando presente em praticamente todos os seus campos de estudo. Ela foi fundamental para a origem e manutenção da vida em nosso planeta, além de ter servido como fonte de calor e proteção para a espécie humana. A compreensão da natureza e do comportamento da luz resultou em inúmeros avanços tecnológicos e benefícios para a sociedade, mas a sua produção e manipulação também acarretam riscos como, por exemplo, acidentes radioativos e o uso inadequado de lasers em procedimentos estéticos ou cirurgias. Sendo assim, tanto a população quanto os governantes precisam se apropriar dos conhecimentos sobre a luz para poder utilizá-la de forma eficiente e segura.

Todo o conhecimento construído pela ciência se desenvolveu conforme o pensamento humano e foi se modificando ao longo do tempo sendo influenciado pelos contextos históricos no qual estava inserido. No caso da luz não foi diferente, das primeiras concepções até o seu entendimento atual, diversas teorias tentaram explicar os fenômenos obtendo sucesso durante algum tempo e fracassando depois, necessitando ser substituídas por outras que continham novas ideias capazes de solucionar os problemas que foram surgindo. Essa característica provisória das

teorias científicas é bem retratada pela epistemologia do filósofo da ciência Thomas Kuhn. Para ele, a ciência se desenvolve não pelo simples acúmulo de conhecimento, mas passando por períodos em que uma determinada teoria é bem-sucedida, depois se depara com situações que não consegue superar, levando ao seu enfraquecimento e acaba sendo trocada por outra que, naquele contexto, se mostra ou promete ser mais eficiente.

Neste trabalho, analisamos a história da luz, começando pelo advento da ciência com os gregos na Antiguidade até a descoberta da luz síncrotron, que representa o que se tem de mais avançado no estudo e utilização da luz, para responder à seguinte pergunta: A evolução dos conceitos sobre a luz pode ser explicada pela epistemologia de Kuhn? O objetivo dessa análise histórica é mostrar que a construção dos conhecimentos sobre a luz ao longo da história também passou pelas fases descritas por Kuhn. A partir dessa conclusão, nos interessou também identificar em que fase a descoberta da luz síncrotron se encaixa dentro dessa estrutura de desenvolvimento da ciência, se ela representou uma *revolução científica* na área ou foi uma consequência da *ciência normal* nos termos kuhnianos, que abordaremos adiante. E como um legado a ser deixado por este ensaio teórico, pretendemos contribuir para o ensino da Física discutindo possíveis implicações da filosofia de Kuhn no campo educacional.

Para alcançar os objetivos citados, iniciamos no **capítulo 2** uma reflexão sobre o papel da ciência e como ela é vista pela sociedade. Apesar de vir sofrendo muitos ataques e questionamentos nos últimos anos, a ciência ainda possui credibilidade para influenciar na tomada de decisões e o conhecimento que produz continua trazendo inúmeros benefícios para a humanidade. Entretanto, seus métodos rígidos de pesquisa e seus critérios de validação desses conhecimentos escondem elementos subjetivos nas escolhas entre teorias e na própria construção delas. Esse *modus operandi* do fazer científico acaba gerando dúvidas quanto a neutralidade, objetividade e racionalidade, características que sempre foram atribuídas à ciência.

Ao longo do tempo, o pensamento científico sempre sofreu a influência do contexto histórico do qual estava inserido. As crenças, os interesses econômicos, a organização social e até mesmo as ferramentas disponíveis de cada época moldaram o pensamento e a prática científica até os dias atuais. Essas mudanças ontológicas e epistemológicas que a ciência passa no curso do seu desenvolvimento foram objetos de estudo de diversos filósofos como Karl Popper (1902 – 1994), Imre Lakatos (1922-1974), Paul Feyerabend (1924 – 1994) e Thomas Kuhn (1922-1996). Em especial, a maneira com que este último enxerga a ciência e como ela se desenvolve pode ser aplicada à história da luz, essa é a hipótese que pretendemos verificar por meio desse estudo.

Tendo definido o referencial teórico deste trabalho, no **capítulo 3** apresentamos a epistemologia de Kuhn com base em sua principal obra *A Estrutura das Revoluções Científicas*. Aprofundamos os conceitos de **paradigma** e **incomensurabilidade**, bem como as fases de desenvolvimento da ciência: **ciência normal**, **crise** e **revolução científica**.

No **capítulo 4** contamos de maneira breve a história do interesse da humanidade pelo estudo da luz, começando pelos primeiros estudos na Grécia Antiga, passando pelo surgimento da Óptica Geométrica, pelas teorias corpuscular e ondulatória, até a sua definição como onda eletromagnética. A partir deste entendimento, mostramos como os fenômenos luminosos foram sendo explicados e aprofundados, com novos conhecimentos sendo produzidos. Também retratamos os problemas que persistiam sem solução, mobilizando a comunidade científica a repensar suas ideias e chegar a novas teorias. Essas novas teorias transformaram a visão que os cientistas tinham sobre a luz e permitiram a construção de novos conhecimentos. Como consequência, foram desenvolvidas novas tecnologias como a produção e utilização da luz síncrotron. A descrição dos episódios históricos selecionados seguiu a lógica pela qual a ciência se desenvolve segundo Kuhn. Sendo assim, os acontecimentos foram sendo encaixados dentro da estrutura kuhniana com as devidas justificativas e discussões epistemológicas.

Obviamente, uma história pode ser contada de diversas formas, cada qual com enfoque em elementos ou aspectos diferentes. A narrativa apresentada neste trabalho foi construída a partir da leitura e interpretação de textos contidos em livros, teses e artigos sendo, portanto, suscetível a imprecisões. Porém, a opção por uma narrativa não pormenorizada se justifica pela facilidade em trabalhar aspectos que julgamos serem mais importantes como “causa e consequência”, em vez de investigar a fundo as intenções e possíveis falhas experimentais ou matemáticas. Da mesma forma que não necessitamos da Teoria Quântica (TQ) para descrever o movimento de um projétil (as leis de Newton o fazem muito bem), entendemos não ser necessário também conhecer as especificidades dos métodos usados pelos cientistas para poder classificar os episódios históricos dentro das fases de desenvolvimento da ciência segundo Kuhn.

A luz síncrotron, última descoberta científica dentro do nosso recorte histórico, foi tema do **capítulo 5**. Definimos então o que é esse tipo de luz e descrevemos os conceitos envolvidos na sua geração. Também contamos como a tecnologia de produção da luz síncrotron evoluiu e como ela é produzida e utilizada no Brasil. Discutimos como uma nação utiliza os conhecimentos produzidos pela ciência procurando entender o que leva um país, como o Brasil por exemplo, a investir em uma tecnologia tão avançada e custosa como um acelerador de partículas para gerar luz síncrotron, apesar de possuir inúmeros problemas sociais e econômicos que teriam prioridade nos gastos dos recursos. Observamos que o desenvolvimento de um país tem forte ligação com

a sua capacidade de investir em ciência e tecnologia, mas queremos descobrir se a ciência tem o poder de elevar o patamar de um país subdesenvolvido. Finalizamos o capítulo descrevendo perspectivas futuras de utilização da luz síncrotron e analisamos o impacto da sua descoberta para classificá-la como uma revolução científica ou uma consequência da ciência normal.

Essa melhor compreensão do fazer científico, além de possibilitar a reflexão sobre os seus métodos utilizados e a sua evolução, pode contribuir significativamente para o ensino da própria ciência. A História da Ciência (HC), área dedicada ao estudo de como a ciência e as técnicas se desenvolveram ao longo do tempo, produz conhecimentos que podem ser usados como recursos didáticos. No **capítulo 6** apresentamos as vantagens de se trabalhar com a história da ciência para ensinar Física e discutimos, citando pesquisas realizadas, maneiras de utilizar esse recurso didaticamente.

Mostramos também que os currículos oficiais regem a educação no Brasil, bem como o principal concurso de acesso à educação superior, orientam que seja feita uma abordagem histórica dos conteúdos e exigem, em suas questões, que os candidatos demonstrem conhecimentos contextualizados historicamente.

Veremos então que a história da ciência é uma ferramenta didática que potencializa o ensino da Física, pois fornece ao aluno uma visão mais próxima da realidade de como a ciência se desenvolve, mostrando que ela é resultado de erros e acertos, além de ser construída por meio de um trabalho coletivo realizado por vários cientistas e suas contribuições. Thomas Kuhn descreve como esse trabalho se concretiza e a ciência vai sendo construída ao longo do tempo. Por meio da estrutura criada por este filósofo, podemos compreender melhor a natureza da ciência, percebendo que as teorias científicas possuem forte ligação com o contexto histórico na qual foram desenvolvidas, e assim utilizar a história da ciência com os alunos de forma mais fidedigna e não distorcida como geralmente é apresentada nos livros didáticos, por exemplo. Ademais, as ideias de Kuhn não somente proporcionam uma historiografia mais precisa como também são capazes de influenciar a própria educação como um todo e em especial o ensino de ciências. No **capítulo 7** discutiremos como as ideias de Kuhn podem ser usadas para o ensino e os possíveis cuidados que os professores devem tomar para que o suposto relativismo kuhniano não acabe prejudicando a aprendizagem dos conteúdos.

A história da construção dos conhecimentos sobre a luz, contada aqui, se mostra emblemática como aplicação da epistemologia kuhniana e as justificativas para essa afirmação estão entre as considerações finais deste trabalho. Também pontuamos os aspectos que nos levaram a concordar com Kuhn sobre como a ciência se desenvolve. A partir dessa visão sobre a natureza da ciência compreendemos o seu papel dentro da sociedade e como ela influencia, ou

em alguns casos orienta, decisões dos chefes das nações pelo mundo. No caso do Brasil, a criação do Laboratório Sirius se configurou como um investimento de grande porte, atraindo pesquisadores e empresas do mundo inteiro para utilizar essa tecnologia. Esse movimento, além de ampliar a nossa capacidade de produzir mais conhecimento, também nos dá a oportunidade de nos tornar independentes cientificamente.

Por fim, apresentamos os argumentos que nos levaram a concluir que a história da ciência e as ideias de Kuhn possuem grande potencial pedagógico. Mais do que atuar como um elemento motivador nas aulas, a história da ciência revela para os alunos a natureza humana do trabalho científico enquanto a estrutura de desenvolvimento da ciência elaborada por Kuhn pode ser usada para promover uma mudança conceitual nos alunos.

2 O PAPEL DA CIÊNCIA NA SOCIEDADE

Há uma crença generalizada em considerar a ciência uma instituição que fornece conhecimentos com alto grau de certeza. Suas teorias, métodos, técnicas e produtos gozam de grande prestígio com a sociedade, o que a torna capaz de dar um veredito confiável sobre uma determinada situação que envolva o comportamento da natureza (Chibeni, 2004).

Conhecimentos passados de geração para geração são culturalmente construídos e por isso apresentam uma enorme variação, fazem parte do chamado senso comum. Quando esses conhecimentos se confrontam acabam gerando dúvidas que dificultam a tomada de decisão, então as pessoas costumam recorrer ao que a ciência diz como uma forma oficial de obter a resposta certa para o assunto em questão. Fato é que a ciência adquiriu, ao longo do tempo, credibilidade para fornecer respostas que determinem escolhas, revelem erros e expliquem fenômenos. Mas, de onde vem essa credibilidade? O que difere esses conhecimentos científicos do “senso comum”? Por que são mais confiáveis?

Antes de mais nada, a definição da expressão “senso comum” que utilizaremos será a de conhecimentos oriundos do processo de adaptação dos seres humanos às circunstâncias da existência e da vida ordinária, estão relacionados aos sentidos (instintivos e também intuitivos) sendo difundidos e partilhados (Paty, 2003). O método de aquisição desse tipo de conhecimento é puramente empírico, envolvendo crenças e imagens de origem psicológica, sendo assim, está mais suscetível a equívocos. Em se tratando das ciências naturais, a conclusão obtida por meio dos sentidos é insuficiente e induz ao erro, na maioria dos casos. Descartes já dizia: “os sentidos são enganosos”.

Porém, no início, a ciência era baseada no senso comum e, se atualmente esse tipo de conhecimento é considerado superficial, ilusório e falso, por outro lado, constituíram uma primeira análise ou aproximação de uma explicação da natureza e assim, se tornaram inspiração para a construção das teorias científicas que conhecemos. Apesar da importância dessas primeiras conclusões, a ciência procura sempre se distinguir do senso comum, impondo um status superior e de qualidade primária aos conhecimentos alcançados através da razão, enquanto que aqueles adquiridos através dos sentidos possuíam qualidade inferior e secundária. (Germano e Kulesza, 2010).

O conhecimento científico, ao contrário do senso comum, é caracterizado por ser verificável e falseável, isto é, suas afirmações passam por verificação e não são definitivas, pois novas evidências podem torná-las falsas. Com isso, novas hipóteses podem ser criadas e desenvolvidas, reformulando o acervo teórico existente (Marconi e Lakatos, 2003). Segundo

Pasternak e Orsi (2021), o poder da ciência não reside nas suas conclusões, mas em sua estrutura por se tratar da única atividade humana construída e projetada com a finalidade de reconhecer, revisar e aprender com as próprias falhas. Ela reúne teoria e prática para a produção sistemática de saberes (Demo, 1995). Entretanto, por se tratar de uma atividade essencialmente humana, a Ciência necessita estar enraizada culturalmente para que possa ser cultivada por uma sociedade, ou seja, outras comunidades além da científica precisam compreender o que é e como se faz Ciência para que esta se mantenha ativa e tenha condições de se desenvolver.

O público leigo, formado pelas pessoas que não tinham acesso e até então não possuíam interesse pelo conhecimento científico, apenas usufruía da tecnologia ou sofria as suas consequências de forma passiva devido à confiança que depositavam na ciência. Essa confiança, principalmente após a Segunda Guerra Mundial, aumentou devido às pesquisas que prometiam solucionar problemas relacionados à segurança nacional. Surgiu então a chamada *Big Science*, onde os cientistas adquiriram grande prestígio passando a ditar o direcionamento de investimentos e influenciando nas decisões políticas. Neste período, as universidades cresceram rapidamente e laboratórios de grande porte foram construídos. Em seguida, a ciência se voltou para o desenvolvimento socioeconômico das nações, produzindo tecnologia e transferindo-a aos países subdesenvolvidos. Mas essa relação harmoniosa entre os cientistas e a sociedade tem sido abalada por causa do impacto cada vez maior dessa tecnologia sobre a população. Essa ampla e rápida produção de tecnologia tem gerado novos problemas sociais e maiores riscos para a humanidade. A deterioração ambiental, o surgimento de doenças físicas e psicológicas e novos focos de guerras são algumas das consequências que a população tem associado ao trabalho da ciência (Sala, 1974).

A ciência, portanto, é essencial para o progresso humano, o desenvolvimento econômico, a tomada de decisões e a melhoria da qualidade de vida de toda a sociedade. Ao investir em pesquisa científica e promover a alfabetização científica, a sociedade pode usufruir dos muitos benefícios que a ciência oferece. Por outro lado, se faz necessária a popularização da ciência para conscientizar sobre os riscos que a produção científica oferece e também para que as decisões não sejam tomadas apenas pelos cientistas, mas pela sociedade como um todo.

2.1 OS OBJETIVOS DA CIÊNCIA

Diferentemente do senso comum, na ciência realiza-se observações sistemáticas, varia as condições dos fenômenos, testa hipóteses e dessa forma chega a conclusões mais precisas e com

um alcance muito maior. Enquanto o senso comum sofre grande variação devido às diferenças culturais e, por produzirem conhecimentos restritos a situações bastante específicas, podem ser facilmente refutados, a ciência utiliza uma linguagem universal, criada por ela mesma, e busca a generalização dos conhecimentos. Seus métodos de investigação, instrumentos de análise e critérios de avaliação de resultados fazem da ciência uma instituição hegemônica e confiável.

Porém, a ciência não se vale apenas de elementos cognitivos para se desenvolver. Apesar de possuir regras e métodos bem definidos, a história tem nos mostrado que suas teorias contam sempre com um fator subjetivo, com a imaginação dos cientistas. Essa imaginação é fruto das experiências vividas pelos cientistas, das suas crenças particulares e da cultura da qual fazem parte. Mas esse elemento “irracional” nem sempre foi reconhecido. O positivismo, movimento filosófico que considerava a Ciência como o único caminho para o conhecimento, rejeitava tudo o que não fosse possível demonstrar experimentalmente. Ou seja, as teorias científicas deveriam descrever apenas os fenômenos observáveis e suas leis teriam que ser obtidas por indução e comprovadas matematicamente (Rosa, 2006).

Um grupo de filósofos como Popper, Lakatos, Feyerabend e Kuhn se colocaram contra o positivismo ao questionarem o caráter realista e definitivo das teorias científicas. Para estes filósofos, a ciência não é construída de maneira indutiva partindo da observação neutra dos fenômenos, mas por meio de um método hipotético-dedutivo. Sendo assim, as teorias nasceriam de ideias metafísicas, que por sua vez refletiriam aspectos históricos e sociais.

Popper, apesar de ser um empirista convicto, não aceitava a exclusão da metafísica na construção das teorias. Pelo contrário, acreditava que a teoria precedia a observação, cuja função desta última seria testar rigorosamente as proposições fornecidas pela primeira. Caso falhassem, a teoria deveria ser descartada e substituída por outra que passasse nos mesmos testes em que a anterior fora reprovada. Esse processo de testagem por meio de experimentos e observações ficou conhecido como *falseacionismo*. Dessa forma, a ciência avançaria de maneira cumulativa por meio de tentativas e erros, conjecturas e refutações (Chibeni, 2004).

Para Lakatos, o trabalho científico consiste em *programas de pesquisa* que estabelecem um guia para futuras pesquisas, definindo hipóteses não-refutáveis (*heurística negativa*) que constituem o chamado núcleo rígido de uma teoria, e prescrições (*heurística positiva*) de como o programa deve ser desenvolvido (Chalmers, 1976). Como exemplos da heurística negativa temos as hipóteses dos movimentos naturais e impossibilidade do vácuo, pertencentes ao núcleo rígido da cosmologia aristotélica, enquanto a heurística positiva pode ser exemplificada pela necessidade de desenvolvimento de uma mecânica mais avançada e novos instrumentos de observação para sustentar a astronomia copernicana. A ciência segundo Lakatos vai se

desenvolvendo à medida em que os programas de pesquisa obtêm sucesso (*programas progressivos*) e são substituídos quando fracassam persistentemente (*programas degenerantes*) (Chibeni, 2004).

Feyerabend era contra a adoção de um único método para se chegar ao conhecimento, ao contrário, defendia o que chamou de *anarquismo teórico* como condição mais humanitária e com maior capacidade de estimular o progresso do que a ordem e as regras, implantadas pela doutrina positivista. Recorre à história da ciência para justificar a ausência da neutralidade científica, porém não a considerando como uma mera descrição de fatos e suas respectivas conclusões. Os fatos históricos não estão livres de interpretações, pois já nos são apresentados sob certos pontos de vista e ideários. Quanto às teorias, afirma que ao longo da história nenhuma delas, por mais plausível e bem fundamentada, deixou de ser violada em algum momento. Essas violações, voluntárias ou involuntárias, são necessárias para o progresso da ciência (Rocha, 2017).

Kuhn também não acreditava em um método universal utilizado pela ciência. Para ele, o contexto histórico e as idiossincrasias dos cientistas são elementos que influenciam fortemente o pensamento científico, diversificando os padrões de avaliação das teorias, a escolha dos problemas a serem solucionados e as próprias técnicas a serem usadas. Conclui então que toda observação, bem como o experimento construído para realizá-la, já estão impregnados da teoria ou paradigma no qual o cientista crê (Kuhn, 2018).

Essa nova interpretação da natureza da ciência, provocada por esses filósofos citados acima, reacendeu a discussão sobre os objetivos desta. Já que a subjetividade do cientista, constituída por suas experiências de vida, crenças, valores, e a sua imaginação estão sempre presentes nas teorias, a ciência então não teria a pretensão de buscar a verdade das coisas, visto que estes elementos de ordem psicológica certamente produzirão erros, pela própria condição humana, ou, na melhor das hipóteses produzirão inúmeras “verdades”. O objetivo da ciência seria, contudo, encontrar padrões na natureza, entender como ela se comporta para, a partir deste entendimento, promover o bem-estar, a saúde e a segurança da humanidade, não obstante, a sobrevivência da espécie.

Por outro lado, físicos como Heisenberg e Schrödinger não concordam com essa visão utilitarista da ciência. Para eles, o objetivo do trabalho científico é a busca pelo conhecimento e o seu valor não é prático, mas epistêmico e cultural. A ciência, portanto, se legitima em si mesma, como uma necessidade humana de compreender a natureza e não como uma ferramenta para o progresso econômico, por exemplo (Silva, 2017).

Obviamente, outros objetivos sempre impulsionaram o desenvolvimento científico como o lucro e o domínio de uma nação sobre a outra. Mas, tanto esses objetivos como os citados

anteriormente foram moldados pelos contextos históricos do qual fizeram parte e com isso, o pensamento científico foi se transformando de acordo com essas demandas e características de cada tempo. Atualmente, pegando como referência os prêmios Nobel, notamos um direcionamento das pesquisas científicas para questões como a inteligência artificial e a atividade genética nas células. A inteligência artificial com o objetivo de gerar conhecimento e solucionar problemas sem a intervenção humana (Cozman, Plonski e Neri, 2018) e a atividade genética nas células para controlar o seu funcionamento e desenvolvimento. Esses objetivos vêm ao encontro de um contexto da chamada “era da informação”, onde a tecnologia produz muitos dados que precisam ser processados, interpretados e criticados, bem como do surgimento de doenças causadas por novos vírus e bactérias que recentemente têm provocado epidemias no mundo inteiro.

Mas, ao mesmo tempo em que a ciência tem produzido, aceleradamente, grandes avanços tecnológicos, que fornecem a cura de doenças, proporciona bem-estar para a sociedade e facilita a vida das pessoas, também tem sofrido muitos questionamentos e ataques por uma parte da população que considera todas essas transformações uma ameaça. De fato, não houve tempo hábil para a sociedade se adequar a essa enxurrada de tecnologia a sua volta e por isso já vem sentindo impactos negativos. O excesso de tecnologia tem gerado doenças físicas e psicológicas, a deterioração do planeta e até mesmo iniciado guerras. Esses acontecimentos não têm abalado a credibilidade da ciência, pelo contrário, acentuam ainda mais a crença no seu poder de beneficiar ou destruir a humanidade. Mas, sob os argumentos de manipulação de conhecimentos visando o lucro ou domínio ideológico, um movimento mundial vem tentando enfraquecer a confiança da população na ciência, colocando à prova a veracidade ou a precisão de suas descobertas.

Shapin (2020) diz que esse movimento “negacionista” utiliza os próprios métodos da ciência para questioná-la. Para ele, o anticientificismo se alimenta do próprio cientificismo, em outras palavras, recorrem aos mesmos critérios e práticas de validação usados pela ciência para sugerir outras formas ou fontes de conhecimento. Nesse sentido, sabendo que o conhecimento científico não é definitivo, agem como Popper tentando continuamente refutar as teorias e ao mesmo tempo como Kuhn ao relativizar esse conhecimento que seria construído de acordo com as conveniências definidas pelas comunidades científicas.

2.2 A HISTÓRIA DA CIÊNCIA NA CONSTRUÇÃO DO PENSAMENTO CIENTÍFICO

Um dos filósofos, se não o principal, que se debruçou sobre a história da ciência concedendo-lhe status epistemológico e não meramente ilustrativo foi Thomas Kuhn. Para isso, propôs uma nova historiografia em que se busca compreender as teorias científicas ultrapassadas em seus próprios termos, sem compará-las com as teorias atuais, ou seja, sem traduzi-las nos termos científicos atualmente aceitos. Se, em vez de julgar absurda alguma proposição feita por um cientista antigo, procurássemos entender o que influenciou o seu pensamento e quais ferramentas epistemológicas estavam à sua disposição, poderíamos enxergar a importância dos supostos erros na construção do conhecimento. Agindo dessa forma, Kuhn procura mostrar que as teorias atuais não são simples aprimoramentos das teorias obsoletas e que a ciência, de forma geral, não progride cumulativamente. Essa metodologia historiográfica produziria assim uma imagem mais precisa do fazer científico (Mendonça, 2012).

Com base nessa concepção kuhniana da ciência e utilizando a história da ciência da maneira como Kuhn propõe, apresentamos como a ciência foi sendo construída ao longo do tempo. Dentro dessa reconstrução histórica do pensamento científico, inserimos alguns episódios que fizeram parte do desenvolvimento das teorias sobre a luz, tema da Física abordado neste trabalho. Dessa forma, almejamos compreender como o pensamento científico foi se transformando e dando origem às teorias.

Tradicionalmente adota-se como ciência aquela que se originou e se desenvolveu dentro da cultura ocidental. Embora seja reconhecido o conhecimento construído pelos orientais, alguns até mesmo anteriores aos ocidentais, por exemplo, a astronomia egípcia, a matemática árabe e as invenções chinesas, considera-se dentro da academia que a ciência como conhecemos hoje é uma evolução de uma prática que começou com os gregos na Antiguidade (Rosa, 2005).

Apesar de ter absorvido muitos conhecimentos produzidos pelos orientais, os gregos se diferenciaram pela análise racional exaustiva e, a partir daí, a construção de novos conhecimentos. Nesse estágio inicial, o estudo da natureza era realizado pela Filosofia e, apesar de buscar explicações para os fenômenos da natureza por meio da razão, o pensamento ainda sofria forte influência religiosa, que por sua vez continha elementos mágicos (mitologia e curandeirismo). Podemos dizer que, no início e até meados do século XVII, o pensamento científico era permeado pela magia e pela religião (Rosa, 2005).

O comportamento da natureza era então explicado com base na visão que cada filósofo ou grupo de filósofos tinha sobre o universo, do que ele era composto e a sua relação com o divino. Filósofos conhecidos como *atomistas*, por exemplo, defendiam de maneira geral que os

objetos visíveis emitiam minúsculos corpúsculos que, ao entrar em contato com o olho humano, causavam a sensação visual. Esta explicação do comportamento e natureza da luz condizia com a ideia de um universo constituído por partículas minúsculas eternamente idênticas (imutáveis) e indivisíveis que se combinam formando a matéria e suas respectivas qualidades. Outros filósofos como Empédocles acreditavam que a “luz” faria um caminho inverso, sendo emanada pelos olhos na forma de raios que atingiam os objetos e retornavam com as informações emitidas também pelos objetos, esses raios funcionariam como tentáculos que captavam essas informações. Já Platão imaginava esses raios como um fogo que não queimava, mas produzia uma luz suave a qual se misturava com a luz do dia formando um corpo único e homogêneo podendo atingir um objeto. Esses três elementos alinhados, o fogo emanado pelos olhos, a luz do dia e o objeto, passavam uma informação para a alma causando a sensação da visão (Martins, 1990a).

Percebemos nesses exemplos, termos como “eterno” e “alma”, que expressam uma forte influência da religião sobre o pensamento desses filósofos. A ciência originalmente era praticada mediante a observação contemplativa da natureza e as teorias eram construídas a partir dos mitos. Assim se constituíram os primeiros métodos e instrumentos de construção do conhecimento.

Aristóteles, filósofo grego e muitas vezes considerado um dos fundadores da “Física Antiga”, construiu um corpo de conhecimento que se tornou a base da ciência por vários séculos e inclusive incorporada à doutrina da Igreja, que determinava o comportamento e o modo de pensar da sociedade medieval. Utilizava um método lógico-indutivo de observação e conclusão, adotava o sistema Geocêntrico de Ptolomeu e separava a Física em dois mundos distintos: celeste e terrestre. Da metafísica e da religião advinham suas ideias para explicarem os fenômenos e as coisas do universo. O céu como morada dos deuses justificava o movimento “perfeito” dos astros, que se caracterizava por ser circular e eterno. Já o movimento na terra era naturalmente retilíneo, porém corruptível pela ação do homem (Rosa, 2005).

A queda do aristotelismo começou com a chamada Revolução Copernicana, que abriu caminho para a Revolução Científica do século XVII, que marcou o início da Ciência Moderna. Com o objetivo de melhorar as técnicas de predições astronômicas, tornando-as mais exatas e simples em comparação ao sistema Ptolomaico vigente na época, Copérnico sugeriu que a Terra se movia enquanto o Sol permanecia estático. Essa ideia, que era radicalmente contra os fundamentos da Astronomia e feria as leis da Igreja, surgiu no contexto do Renascimento onde também ocorrera um resgate do Neoplatonismo. Esses dois movimentos, que questionavam a relação do homem com Deus e com a natureza pregadas pelo Catolicismo, deram suporte para a liberdade de pensamento, encorajando o surgimento de ideias como a de Copérnico.

Todavia, a teoria copernicana era encarada apenas como um esquema matemático não se comprometendo com a realidade. A substituição do modelo geocêntrico de Ptolomeu pelo heliocêntrico de Copérnico forçou uma mudança da visão cosmológica, esse acontecimento é o que Kuhn define como revolução científica. Essa transformação não foi capaz, em um primeiro momento, de atingir aqueles que não eram astrônomos, mas ao colocar a Terra na categoria de planeta, Copérnico inconscientemente acabara de inaugurar uma nova tradição na astronomia entregando uma série de novos problemas para serem solucionados. Não obstante, a teoria heliocêntrica, como ocorre em todos os episódios revolucionários na ciência, estava incompleta e não havia atingido um consenso nem mesmo entre os astrônomos (Kuhn, 2018).

A aceitação do copernicanismo como uma nova visão de mundo passaria pela superação do aristotelismo e a solução dos problemas gerados por essa teoria que estava surgindo. Neste sentido, Galileu e Kepler foram importantes no fortalecimento do heliocentrismo junto à comunidade científica da época. Galileu, que em outras ocasiões já havia encontrado brechas no aristotelismo e as suas concepções de movimento, fez algumas descobertas astronômicas que corroboraram com as ideias de Copérnico com o auxílio da luneta, outrora aperfeiçoada por ele. Já Kepler, simpatizante do neoplatonismo e do culto ao Sol, percebeu algumas inconsistências na teoria copernicana que o levaram a criar soluções matemáticas para alguns movimentos planetários que estavam sem explicação (Soares, 2013).

Apesar do crescente número de adeptos do heliocentrismo, esta concepção cosmológica carecia de teorias e ferramentas complementares para adequá-la às observações que vinham sendo realizadas. Galileu e Kepler iniciaram esse processo defendendo que o universo seria organizado matematicamente e adotando um método de criação e testagem de hipóteses por meio de experimentos. Essa mudança epistemológica promovida por esses dois cientistas forneceu a base para a Revolução Científica que estaria por vir logo em seguida (Porto e Porto, 2008).

Antes dessa revolução ocorrer, esse novo método de investigação ainda foi reforçado por outro filósofo, Descartes. Este é reconhecido pelo seu pensamento mecanicista e matematizado, com grandes contribuições para a Física e a Matemática. Aperfeiçoou a lei da inércia formulada por Galileu e ratificou a ideia do cosmos como um sistema dinâmico e autogovernado, características que já estavam presentes na teoria de Kepler e que se tornaram precursoras das teorias de gravitação. Essa visão do universo derrubou o último princípio aristotélico que permanecia vivo: o caráter natural das órbitas circulares, movimento considerado perfeito pois ocorre no céu, “morada dos deuses” (Porto e Porto, 2008).

Todo esse conhecimento científico, construído para embasar a cosmologia copernicana, necessitava de um formalismo matemático mais avançado além de uma dose de misticismo. O

físico e filósofo Isaac Newton foi quem preencheu esta lacuna. Suas ideias, leis e equações matemáticas, além de solucionarem as questões ainda obscuras como o movimento dos planetas e a força da gravidade, estabeleceram um caráter de previsibilidade na Física. Unificando a Física celeste com a terrestre, Newton construiu uma Mecânica mais completa e consistente que teve enorme alcance, servindo de base para outras áreas da Física e se tornando um paradigma científico que vigorou por dois séculos. O Newtonianismo representou o pensamento científico da chamada Física Clássica (FC), caracterizada pelo determinismo e por uma visão de mundo em que tempo e espaço são absolutos (Rosa, 2005)

Porém, entre o final do século XIX e início do século XX, a Física passou por uma crise gerada por pontos conflitantes entre a Mecânica e o Eletromagnetismo e os resultados apresentados pelo início da investigação microscópica. Estes acontecimentos acabaram abalando os cânones newtonianos, pois a solução desta crise exigiu uma revisão conceitual profunda ancorada em uma nova fundamentação metafísica. Um universo descontínuo, uma Física probabilística e uma dimensão espaço-tempo relativa estavam surgindo (Silva, 2017).

3 A EPISTEMOLOGIA DE THOMAS KUHN

Thomas Samuel Kuhn foi um físico, historiador e filósofo da ciência que se dedicou ao estudo do processo de desenvolvimento científico sendo considerado um dos precursores da chamada sociologia da Ciência. Se opôs ao positivismo e aos seus padrões rígidos do fazer científico, resgata a importância da metafísica para a construção do conhecimento científico ao invés de privilegiar a lógica da produção científica e utiliza a história da ciência como base para as suas teorias (Rosa, 2006).

Dentre as críticas de Kuhn ao pensamento positivista da ciência podemos citar: a crença na neutralidade da observação; a produção de conhecimento de forma linear, cumulativa e definitiva; e o uso do método indutivo na construção das teorias. Para Kuhn, toda observação já está impregnada de pressupostos teóricos e por este motivo não vê lógica no emprego do método indutivo, também reconhece o caráter inventivo das teorias e por isso não as considera definitivas (Ostermann, 1996).

A seguir, faremos uma síntese da teoria de Kuhn abordando a sua estrutura epistemológica e a visão sobre a ciência que estas ideias podem originar.

3.1 O DESENVOLVIMENTO DA CIÊNCIA SEGUNDO KUHN

O livro “A estrutura das revoluções científicas”, de Thomas Kuhn, foi um dos livros da filosofia científica mais lidos e causou bastante impacto na filosofia da ciência. Também por conta desse sucesso, foi muito debatido e criticado. A filosofia de Kuhn se caracteriza por valorizar a história da ciência e as disputas pelo reconhecimento entre grupos dentro da comunidade científica. Tem como principais conceitos o *paradigma* e a *revolução científica* que pertencem a períodos de desenvolvimento da ciência chamados de *ciência normal* e *crise*.

Kuhn define o paradigma como “realizações científicas reconhecidas durante algum tempo por um grupo de pesquisadores, proporcionando fundamentos para a sua prática posterior” (Kuhn, 2018, p. 71). Para ele, o paradigma é importante porque direciona a pesquisa e aponta os problemas a serem resolvidos. Além disso, afirma que não existe pesquisa sem um paradigma como base. Um paradigma é escolhido quando se torna mais bem-sucedido dentre os competidores, porém não soluciona todos os problemas, pois é uma promessa de sucesso que necessita ser fortalecida. Esse fortalecimento vai ocorrer no período de ciência normal.

O conceito de paradigma dentro da epistemologia de Kuhn é considerado ambíguo para muitos autores, possuindo diversas interpretações. Por conta disso, precisou ser ressignificado pelo próprio Kuhn associando a ele um sentido geral e outro restrito. O primeiro tipo, que Kuhn atribuiu a expressão “matriz disciplinar”, refere-se às regras, técnicas e valores compartilhados pelos cientistas em um determinado período. Fazem parte dessa matriz disciplinar: **generalizações simbólicas** como $F = m.a$ ou enunciados como “a uma ação corresponde uma reação igual e contrária”; **modelos particulares** como considerar as moléculas de um gás se comportando como bolas de bilhar elásticas movendo-se aleatoriamente; e **valores compartilhados** como a predileção por análises quantitativas às qualitativas e critérios como simplicidade, coerência e plausibilidade para julgar teorias. O segundo tipo, corresponde ao que Kuhn chama de “exemplares”, conjunto de problemas que já foram solucionados e se tornaram exemplos para a formação de um cientista. Como exemplo desses problemas já solucionados podemos citar o pêndulo simples, o plano inclinado e órbitas de Kepler (Ostermann, 1996).

A *ciência normal* é um período de amadurecimento do paradigma, uma atualização dessa promessa de sucesso. O objetivo da *ciência normal* não é a descoberta e sim adequar a natureza às teorias, pois as supostas descobertas já são previstas pelo paradigma vigente. Sendo assim, o trabalho do cientista se assemelha à resolução de quebra-cabeças, onde o problema existente já possui uma solução dentro das teorias aceitas pelos cientistas, basta encontrá-la como quem encontra as peças certas de um *puzzle*. Kuhn define como ciência a própria atividade dos cientistas durante o período de ciência normal, pois corresponde ao maior número de horas trabalhadas em sua vida, ou seja, dedicam a maior parte do seu tempo a esse tipo de trabalho (Rosa, 2006). Nesta fase, os cientistas trabalham de forma acrítica empenhando todos os seus esforços na testagem de teorias, aumento de acuidade e na determinação de constantes e leis. Esta ausência de criticidade, segundo Kuhn, é benéfica para o desenvolvimento da ciência, pois permite que o cientista se aprofunde mais rapidamente no seu objeto de estudo, o que não ocorreria se as teorias fossem o tempo inteiro questionadas. E assim, o período de *ciência normal* se mostra bastante produtivo (Bailey, 2006).

Quando a natureza contraria as expectativas do paradigma, surge então uma anomalia. Esta começará a ser amplamente explorada pela área de estudo a qual pertence até se conseguir ajustar a teoria aos dados empíricos. Mas, se essa anomalia resistir, ela passará a ser reconhecida pela comunidade científica e mobilizará um número cada vez maior de cientistas na tentativa de extingui-la. A consequência disso é o surgimento de inúmeras teorias que acabam enfraquecendo o paradigma e inclusive questionando a validade das soluções alcançadas até o momento. Para Kuhn essa proliferação de teorias já é um sinal de um período de *crise* dentro da ciência. Percebe-

se com isso que é o momento de pensar em alternativas conceitualmente diferentes. Aparecem novos candidatos a paradigma iniciando assim uma disputa entre esses postulantes. O paradigma vencedor substitui o anterior, que só é abandonado quando um novo é adotado, ou seja, não se descarta um paradigma enquanto não exista um novo para assumir o seu lugar (Ostermann, 1996).

A esta ruptura de paradigma, com a conseqüente adoção de outro, Kuhn chama de *revolução científica*. A partir da *revolução científica* os cientistas adquirem uma nova visão ao observar os mesmos fenômenos, criam novas práticas de investigação e novos instrumentos de medição. Contudo, espera-se que este “novo ” paradigma, associado ou não a uma nova teoria, seja redutível ao anterior, tornando este um caso particular daquele. Dessa forma, a nova teoria também seria capaz de resolver os problemas que a antiga dava conta, mas isso muitas vezes não ocorre por causa do que Kuhn chama de incomensurabilidade. Para ele, o novo e velho paradigma são incomensuráveis, ou seja, possuem uma linguagem diferente da qual uma não pode ser traduzida para a outra sem perdas. Mesmo contendo elementos comuns, esses paradigmas “são determinados por técnicas bastante diversas e, assim, têm estruturas diferentes e correspondem a conceitos diferentes” (Kuhn, 2006, p. 239).

O termo *revolução científica* pressupõe grandes descobertas com um largo alcance, modificando radicalmente todo o conhecimento construído dentro de uma ou várias áreas de pesquisa. Mas na visão de Kuhn, para ser considerada uma revolução científica, essa mudança radical precisa ser significativa apenas para o grupo que for afetado por ela. Portanto, para Kuhn a ciência se desenvolve, em parte, cumulativamente por acréscimo ao que antes era conhecido, mas também por mudanças revolucionárias que extrapolam os limites impostos pelos conceitos anteriormente definidos (Kuhn, 2018).

3.2 A RACIONALIDADE CIENTÍFICA NA VISÃO DE KUHN

A filosofia moderna, por meio da epistemologia, tenta ao longo do tempo estabelecer um método que descreva um caminho seguro e inequívoco para se chegar ao conhecimento. Mas também tem percebido que a descoberta ou a criação de teorias científicas apresentam um caráter irracional, pois em inúmeras situações é um produto da imaginação dos cientistas. Um exemplo do uso da capacidade inventiva dos cientistas foi a Teoria da Gravitação de Newton (1642-1727), vencendo assim a disputa com Descartes pela construção da teoria mecânica de uma forma mais completa e consistente. Nas palavras de Mário Schenberg (1914-1990): “Descartes não foi capaz

de construir a mecânica porque era um lógico, mas Newton, que foi um mágico, conseguiu fazê-lo (Schenberg, 1984, p. 34). Esse elemento inventivo na construção das teorias colocava à prova um estatuto dos mais importantes da ciência, a sua racionalidade. Com isso, a Filosofia da Ciência se dividiu em duas correntes: uma que insistia na busca de um método e assim restaurar a racionalidade científica e outra que simplesmente negava a existência de um método.

Thomas Kuhn era um dos filósofos da ciência que negavam a existência de um método, mas, apesar disso, considerava que as decisões científicas eram tomadas utilizando critérios cognitivos. Para justificar essa racionalidade ele adotou uma abordagem social do fazer científico. Recebeu, então, duras críticas devido ao seu entendimento de como a ciência solucionava dois problemas: as disputas entre teorias rivais e a formação do consenso. O conceito de incomensurabilidade, originalmente definido por Kuhn, impede uma explicação racional para a escolha entre teorias rivais assim como a sua tese da ambiguidade de valores e padrões de avaliação dentro de uma comunidade científica leva a concluir que a formação do consenso só poderia ocorrer, de acordo com Laudan (1984), no caso de uma “coincidência cósmica” (Guitarrari, 2004).

Com relação à incomensurabilidade, Kuhn inicialmente tentou suavizar esse conceito dividindo-o em três tipos: a epistemológica, a ontológica e a semântica. Segundo Guitarrari (2004), a ontológica dependeria da semântica, que por sua vez dependeria da epistemológica, sendo esta última a mais forte, ou seja, a mais difícil de ser superada por critérios racionais. A incomensurabilidade ontológica refere-se a visões de mundo diferentes, o que leva a uma ressignificação dos conceitos, promovendo assim uma incomensurabilidade semântica entre os paradigmas. Esses dois tipos de incomensurabilidade têm como maior obstáculo a questão da linguagem na comparação entre as teorias, mas, segundo Kuhn, essa diferença de linguagem não gera incomunicabilidade nem incomparabilidade (Kitcher, 1982). Por outro lado, uma mudança paradigmática que atinge o nível epistemológico provoca o surgimento de novos métodos, novos problemas e conseqüentemente novas soluções. Novos métodos implicam em novos padrões de avaliação de resultados e o deslocamento do interesse dos cientistas depende do valor que estes atribuem aos novos problemas. Não obstante, os padrões de avaliação e os valores utilizados pelos cientistas não são universais, são subjetivos (Guitarrari, 2004).

A superação da incomensurabilidade epistemológica passa por considerar a comunidade científica, não o cientista individual, como o agente da ação racional. Para Kuhn (2018), o cientista individual não tem acesso a um conjunto de padrões imparciais, mas a comunidade científica possui padrões de avaliações e regras metodológicas que pesam na escolha de teorias. Essas regras metodológicas e padrões de avaliação são transmitidas pela comunidade científica

aos cientistas por meio de uma educação rígida a qual são submetidos. Não são cruciais na escolha individual, mas restringem as opções de valores e peso que os cientistas podem utilizar (Guitarrari, 2004).

Quanto à formação do consenso, Kuhn utiliza alguns fatores sociológicos para explicá-lo. A sociologia da ciência kuhniana apresenta três níveis explicativos: os indivíduos, as comunidades científicas e os agrupamentos de cientistas. Os indivíduos avaliam e escolhem as teorias, são responsáveis pela produção de evidências e disseminação das informações para a comunidade. Eles têm importância persuasiva, mas são as evidências que levam ao consenso. A comunidade é a entidade que experimenta a mudança de teoria. São unidades produtoras de conhecimento. Como já foi dito, ela limita as regras de escolhas facilitando o consenso.

Esses três níveis explicativos, segundo Silva (2018), são responsáveis por produzir três mecanismos diferentes para a formação do consenso: A pedagogia científica, a teoria de onda e a reestruturação da comunidade científica.

Cientistas que passaram pela mesma educação tendem a ter os mecanismos de avaliação parecidos, esse efeito é causado pela existência de uma pedagogia científica que opera dentro da comunidade científica. Apesar de divergirem quanto à aplicação dos valores e o peso que atribuem a eles, os cientistas adquirem estes padrões de avaliação por meio de uma educação rígida dada dentro do seu grupo. E cientistas que têm a mesma educação tendem a ter avaliações parecidas. Os valores podem ser interpretados de diversas maneiras, mas na prática, dentro de um grupo, existe grande semelhança nas formas que são aplicados. Dessa forma, as avaliações se assemelham mesmo não sendo as mesmas necessariamente, facilitando assim, o consenso (Silva, 2018).

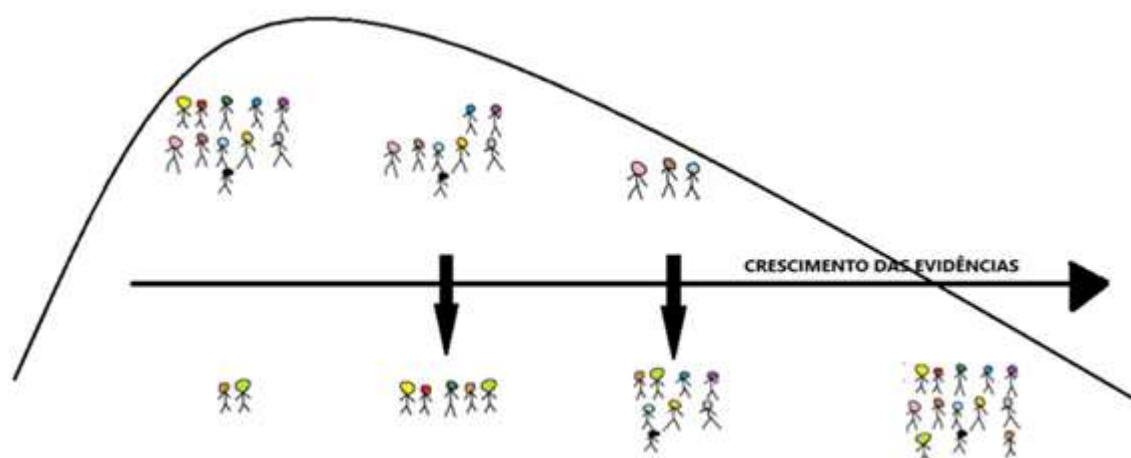
Mas, com o passar do tempo as avaliações vão mudando e alguns cientistas (individualmente) podem insistir em manter as mesmas avaliações ou mudar os seus critérios se afastando da maioria e agindo dessa forma acabam ficando isolados da comunidade. É possível associar como se distribuem as avaliações durante as etapas de desenvolvimento da ciência segundo Kuhn.

O período de *ciência normal* é o de maior consenso relativo, a grande maioria dos cientistas utilizam os mesmos critérios de avaliação e assim, a comunidade científica passa a adotar um paradigma. A etapa da *crise* é caracterizada pelo questionamento do paradigma causado pelas anomalias que insistem em permanecer sem solução. Ocorre então uma proliferação de teorias deixando a comunidade dividida. Nesse momento, a variabilidade das avaliações cresce significativamente. Até que surgem candidatos a novos paradigmas que terão aceitação imediata de grupos diferentes da comunidade científica e compartilharão formas de

avaliação distintas. É um período que Kuhn chama de *ciência extraordinária* que vai culminar em uma *revolução científica*. Quando ocorre a *revolução científica*, com a escolha de um novo paradigma, a comunidade tem que estabelecer novos valores, que vão sendo aprendidos com o desenvolvimento do paradigma. Por isso, a variância das avaliações é alta nessa fase. Ainda estão buscando uma unidade, definindo os valores importantes que serão compartilhados pela grande maioria durante um novo período de ciência normal (Silva, 2018).

Cientistas escolhem as teorias de forma individual, mas a aceitação ocorre de forma coletiva. Dito isto, como uma teoria inicialmente aceita por parte da comunidade conquista a adesão plena dos cientistas? A teoria de onda, termo cunhado por D'Agostino (2010), busca responder a essa questão defendendo a formação do consenso por meio de um processo de crescimento gradual de adesões. Alguns cientistas decidem adotar, buscam por evidências, e se bem sucedidas fazem mais adeptos dentro da comunidade que também passam a se dedicar na busca de mais evidências. O movimento termina quando todos os cientistas aceitam a nova teoria. A Figura 1 descreve graficamente a teoria da onda.

Figura 1. Descrição gráfica da Teoria da onda.



Fonte: Próprios autores.

Mas ainda assim, o aspecto subjetivo aparece. Mesmo um grande número de evidências não é suficiente para obter a confiança da maioria dos cientistas, pois existem casos em que poucas respostas são dadas por uma teoria e ela acabou sendo considerada melhor (Silva, 2022). Isso porque o peso dado por cada cientista às evidências encontradas é diferente. O prestígio do cientista também pode convencer facilmente os outros e a avaliação da teoria pode melhorar ou piorar com o passar do tempo. Isso tudo dificulta a formação do consenso (Silva, 2018). Quanto menos rigoroso o processo de socialização dentro de uma comunidade, mais difícil uma teoria

irá parecer melhor para todos os participantes, devido à heterogeneidade das formas de avaliação e atribuição dos pesos pelos seus membros. Essa alta variabilidade das formas de avaliação pode impedir que o consenso se forme. Porém, quando apenas alguns poucos cientistas insistem em manter suas escolhas, a solução para o consenso seria então uma reestruturação comunitária que poderia se dar de duas formas:

1) Os adeptos das novas teorias começam a construir canais de comunicação próprios, níveis institucionais próprios, isolando os cientistas que não abandonam a sua crença na teoria anterior. Esses acabam não tendo mais as suas pesquisas reconhecidas, são menos citados e recebem menos recursos.

2) Em uma revolução científica pode ocorrer que uma teoria suplanta outra mais antiga, neste caso a comunidade permanece a mesma e poucos insistem na teoria anterior. Mas pode ser que o novo paradigma cause uma divisão maior, onde os adeptos da nova teoria promovem uma especialização que dará origem a um novo campo de pesquisa. Existe também a possibilidade da fusão de dois campos já existentes. E assim a comunidade vai se reorganizando.

As formas descritas até aqui, de como as teorias científicas são construídas e aceitas são interpretações das ideias de Kuhn, que constam principalmente em sua obra mais importante “A estrutura das revoluções científicas” (Kuhn, 2018). Silva (2018) mostrou em sua tese de doutorado que a abordagem sociológica kuhniana não é apenas filosoficamente fundamentada, ela pode ser aplicada na análise das controvérsias científicas reais. Acrescentando métodos quantitativos, este autor clarificou o entendimento dessa sociologia científica kuhniana e justificou a racionalidade científica defendida por Kuhn. Já a tese de doutorado de Guitarri (2004), analisando modelos de racionalidade criados por filósofos como Laudan e Popper, concluiu que o relativismo kuhniano é compatível com esses modelos de racionalidade.

Portanto, apesar de Kuhn indicar elementos não cognitivos nos processos de criação e de escolha das teorias científicas, sua abordagem sociológica do fazer científico resguarda a racionalidade da Ciência.

4 A HISTÓRIA DA LUZ

A luz, que hoje definimos como radiação eletromagnética, originou-se concomitantemente ao processo de criação do universo. A religião cristã, por exemplo, cita a luz como a primeira entidade física a existir logo após a criação do céu e da terra:

[...] No princípio, Deus criou o céu e a terra. A terra estava sem forma e vazia; as trevas cobriam o abismo e um vento impetuoso soprava sobre as águas. Deus disse: “Que exista a luz!” E luz começou a existir. Deus viu que a luz era boa. [...]. (Bíblia Sagrada, Gênesis 1, 1-4).

Para a ciência, o universo teve origem após uma grande explosão causada pela interação entre matéria e antimatéria, de acordo com a teoria que ficou conhecida como *Big Bang*. Essa explosão teria gerado, imediatamente, algumas espécies de partículas juntamente com a luz. Desde então, a luz, proveniente do Sol, participou ativamente da formação da atmosfera do planeta Terra, proporcionou a produção de alimento para os organismos primitivos dos oceanos e posteriormente para as plantas que desenvolveram a fotossíntese. Consequentemente, a vida animal também pôde se desenvolver, pois depende da vida vegetal para viver. Ou seja, sem luz, a vida como conhecemos não pode existir (Salvetti, 2008).

Para a humanidade, além garantir as condições de vida, a luz sempre teve importância fundamental para a sua sobrevivência. O homem começou a produzir luz ao aprender a gerar fogo, que passou a lhe servir também como fonte calor. Assim, esse tipo de luz emitida pelo fogo o protegia do frio e dos perigos da escuridão, além de ser utilizada também para cozinhar alimentos (Salvetti, 2008).

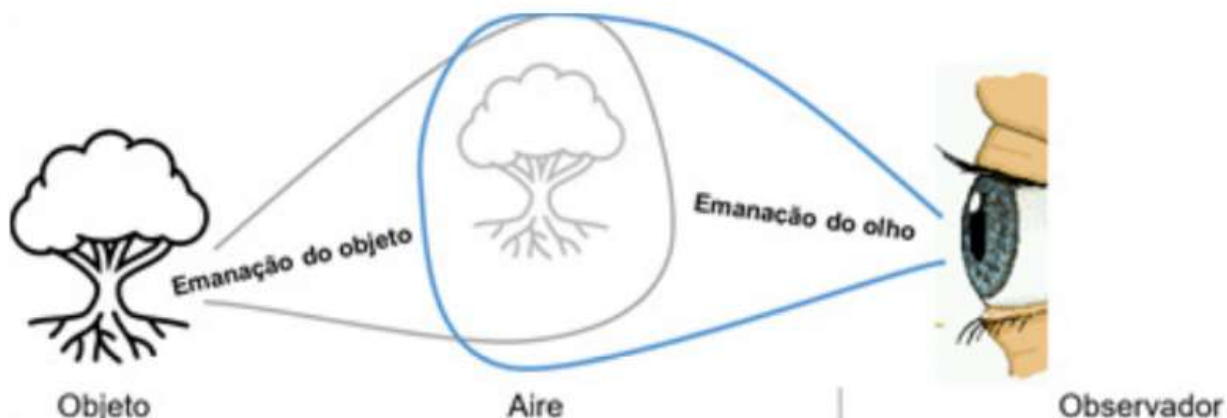
Atualmente, a importância da luz para a humanidade se traduz pelas suas inúmeras aplicações no cotidiano da sociedade bem como para a pesquisa científica. O conhecimento sobre esta entidade física e o seu controle proporcionaram avanços tecnológicos em diversas áreas como a saúde e a comunicação. Utilizando os diversos tipos de luz, podemos diagnosticar e até mesmo curar doenças, iluminar uma cidade, nos comunicar a grandes distâncias e analisar a estrutura interna dos materiais, dentre outras possibilidades.

4.1 A LUZ: DA GRÉCIA ANTIGA À ÓPTICA GEOMÉTRICA

O entendimento sobre a natureza e o comportamento da luz vem sendo construído e reformulado desde a Antiguidade. As primeiras tentativas de explicar a luz, que se tem conhecimento, partiram dos gregos com a ideia de que a luz se propaga em linha reta e na forma

de raios emanados pelos olhos em direção aos objetos ou vice-versa. Essa ideia, que considerava a luz apenas como uma propriedade da visão e, portanto, dependente da subjetividade dos olhos, perdurou por vários séculos (Ribeiro *et al.*, 2015). A Figura 2 faz uma representação da teoria da emissão, como ficou conhecido esse conjunto de ideias.

Figura 2. Teoria da emissão.

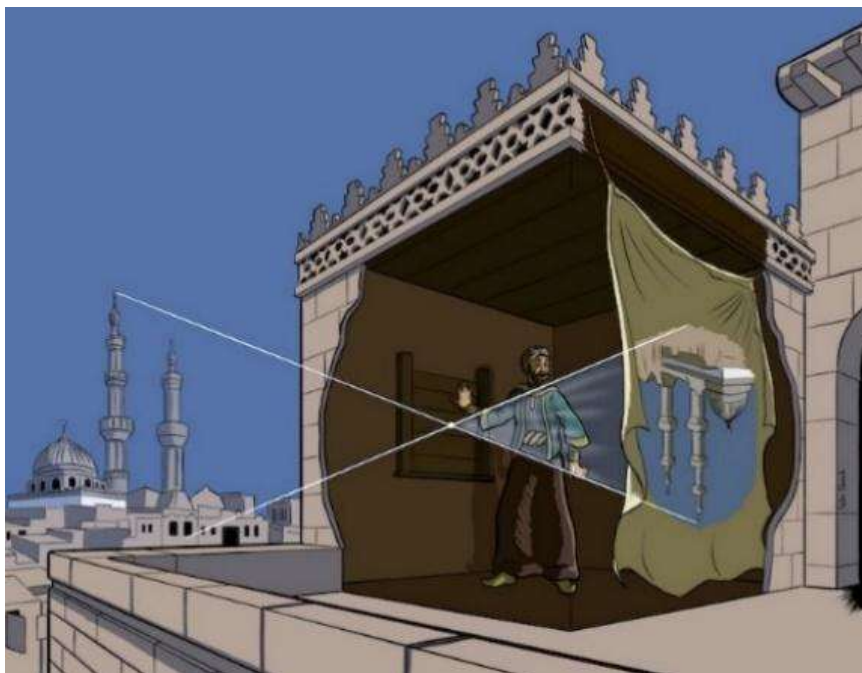


Fonte: Alvarado Guzmán e Nardi, 2021.

Euclides, por volta de 300 a.C., foi o primeiro a estudar o comportamento desses raios, porém sem se preocupar com a natureza destes. Inaugura o tratamento geométrico para descrever os fenômenos ópticos ao investigar a reflexão da luz pelos espelhos. Chega à conclusão de que os ângulos de incidência e reflexão são iguais. No século II, Ptolomeu mediu os ângulos de incidência e refração quando a luz passava do ar para a água, mas não obteve uma equação que relacionasse esses ângulos. Apesar dessas contribuições que seriam incorporadas à Óptica, o entendimento da luz para esses filósofos ainda estava atrelado ao processo da visão (Vicente e Silva, 2024).

O físico árabe Alhacén (965-1040) foi o primeiro, que se tem registro, a separar luz de visão sendo considerado o fundador da Óptica que conhecemos hoje. Dentre as suas contribuições podemos destacar a descrição do funcionamento do olho humano e a invenção da câmara escura (Figura 3) como instrumento de observação de eclipses. Também foi o responsável pela explicação do aumento aparente do Sol e da Lua, estendendo a refração aos fenômenos atmosféricos (Alvarado-Guzman e Nardi, 2021).

Figura 3. Ilustração da câmara escura de Alhacén.



Fonte: <https://www.khanacademy.org/humanities/big-history-project/solar-system-and-earth/knowning-solar-system-earth/a/the-universe-through-a-pinhole-hasan-ibn-al-haytham>. Acesso em 03/04/2025.

A partir desta separação, os cientistas passaram a se aprofundar nos fenômenos produzidos pela luz como a refração e a reflexão, a geração das cores e o arco-íris. Também começaram a realizar experimentos com lentes e espelhos e construíram instrumentos como os óculos, telescópios e até mesmo microscópios. Dentre as leis e descobertas deste período podemos citar a reflexão interna total por Johannes Kepler (1571-1630), a relação entre o ângulo de incidência e o ângulo de refração quando a luz atravessa diferentes meios por Willebrord Snell (1580-1626) e René Descartes (1596-1650), e o princípio de tempo mínimo por Pierre de Fermat (1601-1665) (Ribeiro *et al.*, 2015).

Kepler conseguiu descrever de maneira mais precisa a visão, bem como as funções da pupila, da córnea e da retina. Descobriu ainda a reflexão interna total, mas não foi capaz de deduzir uma lei que relacionasse o ângulo de incidência e o ângulo de refração. Essa lei seria construída com os experimentos de Snell e posteriormente publicada por Descartes na forma como conhecemos atualmente. Em 1657, Pierre de Fermat apresenta uma dedução geométrica da lei de Snell-Descartes fazendo uso do Princípio do Tempo Mínimo de que a luz percorre o caminho de mínimo tempo entre dois pontos.

Esse princípio inspirou físicos como Hamilton que reformulou a Mecânica e influenciou o pensamento científico na construção de teoria mais simples do ponto de vista matemático (Vicente e Silva, 2017).

A Óptica Geométrica, área da Física que estuda o comportamento da luz independente do conhecimento da sua natureza, alcançava assim a sua completude. Seu arcabouço conceitual, associado às suas respectivas leis, fornece explicação para os fenômenos da astronomia, da visão e dos observados no cotidiano (sombra, arco-íris e etc.). Entretanto, uma perspectiva ontológica da luz prometia a descoberta de outros fenômenos e questões a serem investigadas pela ciência.

4.2 OS PARADIGMAS DA LUZ

Apesar de todo o conhecimento produzido até essa época, que foi útil para entender o mecanismo dos fenômenos luminosos e para a construção de instrumentos ópticos, era necessário tentar compreender a natureza da luz para poder ampliar a sua utilidade e aproveitar a sua capacidade de revelar os mistérios do Universo. Pois, conforme Salvetti (2008) afirma: “O nosso principal mecanismo de comunicação com o Universo próximo ou distante é a luz, então nada melhor do que conhecer suas características e principais propriedades” (Salvetti, 2008, p.46).

Antes do século XVII já existiam lentes e espelhos, entretanto, uma teoria que descrevesse o funcionamento desses instrumentos não havia sido ainda elaborada. A primeira grande contribuição veio com Snell na primeira metade do século XVII com a lei de refração, também conhecida como lei dos senos. Essa lei foi deduzida por Descartes e se baseava na existência de ondas de pressão em um meio elástico, com isso percebemos que a luz já era tratada como uma onda ou pelo menos necessitava de uma para se manifestar. Partindo da lei de Snell, Fermat introduziu um princípio que, além de se propagar em linha reta (princípio da menor distância), o raio de luz poderia executar uma trajetória curva se o meio não for homogêneo (Zilio, 2009).

Na segunda metade do século XVII, fenômenos novos como a difração e a interferência luminosos foram descobertos. Grimaldi observou franjas de luz na sombra de um bastão iluminado por uma pequena fonte e Hooke, refazendo os experimentos de Grimaldi, observou padrões coloridos de interferência em filmes finos, principalmente quando pressionava esses filmes um contra o outro em pontos distintos. Hooke passou a estudar fenômenos semelhantes como as bolhas de sabão e concluiu que, ao se colocar uma substância transparente entre duas superfícies com índices de refração diferentes ou sobre uma superfície refletora, as cores seriam produzidas. Ele associou esses fenômenos à interação entre a luz refletida nas duas superfícies do filme propondo que a luz se originava de um movimento vibratório rápido das partículas dos corpos se propagando no meio. Essa explicação tem por analogia o lançamento de uma pedra sobre a superfície da água formando ondas longitudinais (Martins e Silva, 2015).

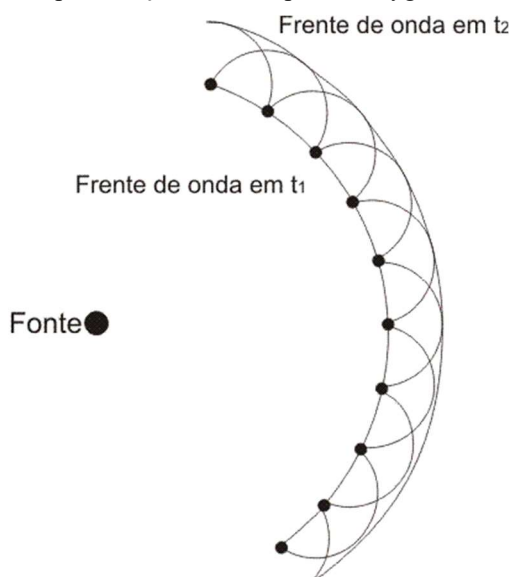
Em 1665 Isaac Newton (1642-1727) realizou experimentos de dispersão da luz em um prisma e decompôs a luz em cores semelhantes às do arco-íris. Ao descrever o fenômeno da dispersão da luz branca atravessando um prisma, elaborou uma teoria em que considerava a luz formada por partículas emitidas por substâncias brilhantes. Essas partículas proporcionariam diferentes sensações de cores ao atingirem os olhos devido às diferentes velocidades pelas quais se propagavam. Os raios (ou feixe de partículas) mais lentos seriam desviados (refratados) mais facilmente, no caso do experimento do prisma, notou que esses raios mais lentos seriam os que produziram a cor azul (Martins e Silva, 2015).

Apesar de essa teoria elaborada por Newton considerar a luz com uma natureza corpuscular, ele próprio não estava convencido disso e aceitava também uma concepção ondulatória para a luz. Para ele, os corpúsculos de luz excitavam o meio formando ondas e as cores correspondiam aos diferentes modos de vibração (Zilio, 2009). Na verdade, segundo Silva e Moura (2008), Newton evitou tratar da natureza da luz em seu livro *Óptica* (1704), usando frequentemente o termo geral “raio de luz” para descrever os fenômenos. Ou seja, não defendeu explicitamente a materialidade da luz.

Essa teoria, conhecida como Teoria Corpuscular, possuía algumas fragilidades como a suposição de que a luz ao incidir em um meio mais refringente teria a sua velocidade aumentada, hoje sabemos que ocorre o inverso. Além disso, a teoria de Newton contraria o princípio da independência dos raios luminosos, pois ao se cruzarem, os raios luminosos teriam os seus corpúsculos de luz se chocando, alterando assim as suas trajetórias (Azevedo e Monteiro Junior, 2019).

A teoria corpuscular possuía uma concorrente na mesma época, a teoria ondulatória desenvolvida por Christian Huygens (1629-1695) e presente em seu livro *Tratado sobre a Luz* (1690). Este cientista introduziu o conceito de ondas secundárias (princípio de Huygens) que seriam responsáveis por originarem novas frentes de onda, e deduziu as leis de refração e reflexão considerando a luz como uma onda. A Figura 4 representa esse princípio pensado por Huygens. Nela observamos que cada ponto de uma frente de onda se comporta como uma nova fonte de ondas. Huygens também estabeleceu que a velocidade da luz variava inversamente com uma propriedade do material denominada de índice de refração (Zílio, 2009).

Figura 4 - Representação do Princípio de Huygens.



Fonte: <https://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Ondas/principiodehuygens.php>. Acesso em 03/04/2025

Sendo assim, ao final do século XVII ambas as teorias eram aceitas, mas, mesmo contendo as inconsistências citadas, por conta do prestígio que Newton gozava diante da comunidade científica, a Teoria Corpuscular se tornou um primeiro paradigma da Óptica Física (Kuhn, 2018). O Óptica de Newton, além de ser considerado mais completo, apresentando estudos sobre os mais variados fenômenos ópticos conhecidos na época diferente do Tratado, que se restringiu à refração, reflexão e dupla refração, teve outras duas edições em inglês, duas em latim e duas em francês, se levarmos em conta apenas o período em que Newton ainda estava vivo, enquanto o livro de Huygens não teve traduções e nenhuma edição imediatamente posterior à publicação original. Enquanto Newton, com seu estilo indutivista, conquistava seguidores não só na Grã-Bretanha, mas em toda a Europa, Huygens, que era holandês, mas viveu muitos anos na França, possuía poucos adeptos na França e suas ideias sucumbiram com a ascensão das ideias newtonianas. O início do século XVIII foi marcado por um processo de popularização da filosofia natural newtoniana, o Newtonianismo. Seus seguidores simplesmente ignoravam os problemas não resolvidos pela óptica newtoniana e tentavam adequar as ideias originais ao sistema de interação entre os corpos proposto na obra mais impactante de Newton, o *Principia* (1687). Esses aspectos relacionados a disputa entre as duas teorias ajudam a compreender o porquê a teoria corpuscular levou vantagem sobre a ondulatória na aceitação da comunidade científica até meados do século XVIII (Moura, 2016).

Porém, a partir da década de 1750, com a teoria corpuscular escolhida como paradigma, os cientistas se voltaram para o seu aperfeiçoamento já que até então todo o conhecimento sobre

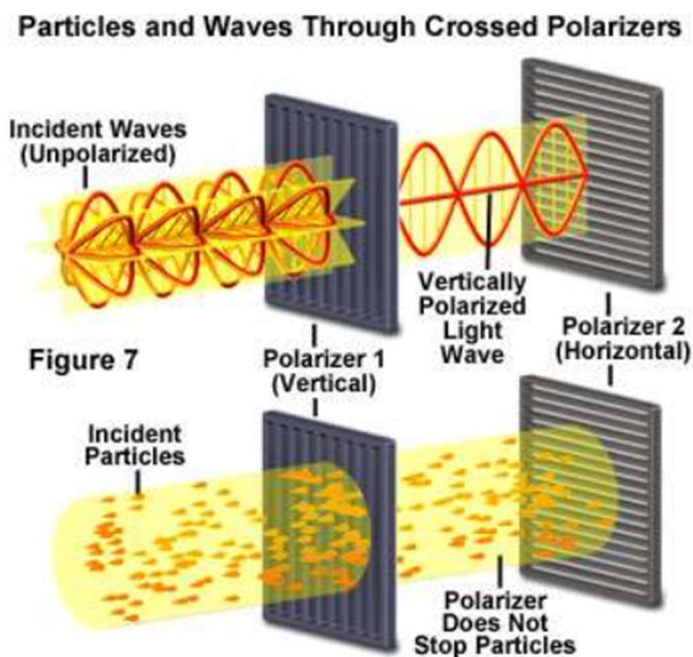
a luz estava baseado nos experimentos contidos no livro *Óptica* e na sua unificação com a mecânica newtoniana. Esta última, por sinal, foi quem deu origem a diversos obstáculos como, por exemplo, a determinação da massa e volume das partículas de luz e a influência da gravidade sobre os raios luminosos. Nesta mesma época, teorias vibracionais para a luz começavam a ganhar força obtendo sucesso em explicar matematicamente e de forma mais clara os fenômenos que a teoria corpuscular não estava conseguindo. A teoria ondulatória conseguia justificar a velocidade reduzida da luz num meio mais denso, além de explicar os fenômenos da polarização e da difração (Silva e Moura, 2008).

Diante deste cenário, a teoria ondulatória começou a ser novamente cogitada no início do século XIX. O cientista Thomas Young (1773-1829) teve grande participação ao propor, com o seu experimento da dupla fenda, o princípio da superposição de ondas, que explicava o fenômeno da interferência e os anéis de Newton. Entretanto, Young foi bastante criticado e sofreu enorme resistência dos cientistas europeus que, em sua grande maioria, eram adeptos de Newton. Retomar a concepção ondulatória para a luz, esquecida há décadas, era uma missão que colocaria a reputação de Young em risco perante a comunidade científica. A concepção corpuscular era amplamente aceita e inclusive ensinada nas universidades europeias, ou seja, apesar de estarem cientes das fragilidades da óptica newtoniana, os cientistas da época estavam convencidos da sua validade (Moura, 2016).

As ideias de Young portanto, se tornaram conhecidas, mas tiveram pouco impacto, até que alguns cientistas como François Jean Dominique Arago (1786-1853) se afastaram da escola newtoniana e se abriram a possibilidade da natureza ondulatória da luz. Por gozar de uma posição importante dentro da comunidade científica, Arago foi capaz de dar visibilidade aos trabalhos de outro cientista fundamental no fortalecimento da teoria ondulatória da luz, Augustin Jean Fresnel (1788-1827).

Fresnel contribuiu significativamente ao formular matematicamente os princípios de Huygens e da interferência e suas equações podiam calcular a intensidade da luz refletida e refratada (Ribeiro *et al.*, 2015). Fresnel e Young, assim como outros cientistas, se dedicaram ao fortalecimento da teoria ondulatória, buscando cada vez mais evidências de que a luz se comportava como uma onda. Quanto a essa possibilidade, eles já estavam convencidos, mas achavam que a luz era uma onda do tipo longitudinal como o som. Foi aí que o experimento da polarização (Figura 5) mostrou que a luz, na verdade, se propagava como uma onda transversal e também não poderia se comportar daquela forma se fosse composta por partículas.

Figura 5 – Experimento da polarização da luz.



Fonte: <https://www.olympus-lifescience.com/pt/microscope-resource/primer/lightandcolor/particleorwave/>. Acesso em 29/12/2024.

Ao longo do século XIX a teoria ondulatória foi gradualmente superando a corpuscular, ganhando cada vez mais adeptos por sua capacidade de explicar os fenômenos. Paralelamente à Óptica, a Eletricidade e o Magnetismo iam se desenvolvendo. Até que essas três áreas começaram a se conectarem a partir dos estudos de Michael Faraday (1791-1867) e posteriormente de James Clerk Maxwell (1831-1879).

O sucesso da teoria ondulatória em explicar todos os fenômenos luminosos conhecidos na época a credenciava para se tornar um paradigma. Os experimentos consolidaram a ideia de que a luz se comportava como uma onda, mas naquela época pensava-se que toda onda necessitava de um meio material para se propagar. Surgiu então a questão: Como então a luz das estrelas se propaga no espaço, que não é permeado por matéria? Essa dúvida enfraquecia a teoria ondulatória e permitia sempre que a teoria corpuscular voltasse a ser cogitada. A solução encontrada pelos físicos foi supor a existência de um meio material sutil o suficiente para não criar resistência ao movimento dos planetas, por exemplo, e com propriedades elásticas para conduzir ondas transversais. A esse meio material foi dado o nome de *éter* (Salvetti, 2008).

Solucionada esta última barreira que impedia a vitória da teoria ondulatória sobre a corpuscular, James Clerk Maxwell (1831-1879), admitindo a existência do éter, verificou que os efeitos elétricos e magnéticos se propagavam como ondas transversais com a mesma velocidade que a luz viaja no vácuo. A intenção de Maxwell era associar o éter luminífero a um eventual

éter magnético para oferecer uma fundamentação teórica para a luz e as linhas de força (campo) de Faraday. Com a sua dedução matemática, chegou à conclusão de que a luz é uma onda formada pelos campos elétrico e magnético oscilantes e perpendiculares entre si, uma onda eletromagnética. Estava estabelecido assim o paradigma ondulatório da luz (Azevedo e Monteiro Junior, 2019).

O recorte histórico referente ao desenvolvimento dos conhecimentos sobre a luz descrito até aqui nos mostra algumas características de como Thomas Kuhn compreende o fazer científico. Dentro da sua epistemologia, podemos interpretar esse período histórico seguindo duas vias:

a) Período pré-paradigmático:

Fazendo uma análise macroscópica até este ponto, passando por vários séculos, percebemos uma constante busca pelo entendimento do comportamento e da natureza da luz na forma de uma teoria que fosse aceita por todos os que praticavam a ciência e a partir dela produzir mais conhecimento, ou seja, a busca por um paradigma. A inexistência de um paradigma relacionado a luz caracteriza este período da história da ciência relatado até aqui como um período pré-paradigmático. Nas palavras de Kuhn (2018, p. 63) podemos caracterizar este período pré-paradigmático: “... os primeiros estágios do desenvolvimento da maioria das ciências têm se caracterizados pela contínua competição entre diversas concepções de naturezas distintas [...]”.

No final do século XVII e até meados do século XVIII, mesmo contando com a adesão da maioria dos cientistas, ou pelo menos dos grandes centros de desenvolvimento científicos da época, a teoria corpuscular convivia com a ameaça da teoria ondulatória tomar o seu lugar na compreensão da natureza da luz. Portanto, ainda que o Newtonianismo tivesse grande influência no pensamento científico, a teoria corpuscular possuía muitos pontos sem explicação o que gerava dúvidas sobre a sua validade, impedindo assim o total consenso da comunidade científica. O entendimento de que a luz poderia ser uma onda explicava alguns fenômenos já conhecidos como a difração e a interferência, mas o prestígio de Newton e as dificuldades de divulgação e comunicação da época acabaram ofuscando a teoria ondulatória, que por outro lado se configurava como uma alternativa potencialmente eficaz para solucionar as questões obscuras.

Então, tínhamos na verdade duas teorias coexistindo e sendo defendidas por duas escolas distintas: os newtonianos, que buscavam um modelo mecânico para a luz e os vibracionistas, que explicavam os fenômenos luminosos associando-os ao

comportamento das ondas. Este fato corrobora com o que Kuhn menciona em *Second Thoughts on Paradigms* (1974, p. 295):

“Durante o período que, em *A Estrutura das Revoluções Científicas*, foi chamado de 'período pré-paradigmático', os profissionais de uma ciência são separados em diversas escolas rivais, cada qual alegando competência sobre o mesmo tema de estudo, mas abordando-o de modos bastante diferentes. Esse estágio de desenvolvimento é seguido de uma transição relativamente rápida, em geral, como resultado de alguma realização científica notável, para um suposto 'período pós-paradigmático', caracterizado pelo desaparecimento de todas ou da maioria das escolas, uma mudança que permite um comportamento profissional muito mais poderoso aos membros da comunidade remanescente”.

Apesar de a teoria ondulatória já ser amplamente aceita por volta de 1825 e existindo poucos defensores da corpuscular, somente a partir do trabalho de Maxwell em 1865 a Óptica ganhou uma fundamentação teórica robusta capaz de solucionar com maior precisão e coerência os problemas até então sem respostas. Esta descoberta “sepultou” a teoria corpuscular e, em um curto espaço de tempo, propiciou o desenvolvimento de novas leis e experimentos que produziram uma gama de conhecimentos sobre a luz.

b) A teoria corpuscular como um paradigma e posterior ruptura pela teoria ondulatória:

Essa seria uma visão microscópica desse recorte histórico. Considerando a grande força das ideias de Newton e a sua conseqüente adesão, podemos entender que houve um relativo consenso da comunidade científica quanto à concepção corpuscular da luz. Os grandes feitos de Newton, principalmente com a repercussão do *Principia* o transformaram na referência no pensamento e no método científico, dando origem a uma espécie de física newtoniana, o paradigma newtoniano. Não obstante, estudos em outras áreas precisariam se adequar a essas regras e qualquer teoria que entrasse em desacordo com as leis newtonianas fatalmente seriam descartadas. Além disso, os cientistas partidários de outra visão acabavam ficando isolados e tendo os seus trabalhos pouco divulgados ou não reconhecidos (Moura, 2016).

Como Kuhn afirma, em uma disputa entre paradigmas, nem sempre o vencedor é o que soluciona o maior número de problemas. A teoria corpuscular não explicava, como citado acima, o princípio da independência dos raios luminosos e a interação gravitacional de um raio luminoso ao penetrar em um meio, problemas solucionados pela concepção ondulatória da luz.

Mas a comunidade científica confiava que esses problemas em algum momento teriam solução dentro do arcabouço teórico construído por Newton. Novos instrumentos,

métodos experimentais ou formalismos matemáticos surgiriam com o tempo para sanar essas questões. É o trabalho que se realiza durante a ciência normal, mediante a adoção de um paradigma. Neste período busca-se a adequação dos fenômenos à teoria, calcula-se constantes e mede-se grandezas. Foi o que de certa forma ocorreu entre meados do século XVII e a metade do século XVIII, quando houve a tentativa de criar um modelo dinâmico para a luz bem como medir a sua velocidade em diferentes meios (Silva e Moura, 2008). A crença no paradigma corpuscular era tão forte que os resultados negativos foram ignorados, provavelmente eram enxergados como uma limitação dos próprios cientistas ou dos seus instrumentos de medida.

Com o passar do tempo, diversos fenômenos foram surgindo e se juntaram àqueles que ainda estavam sem explicação, causando uma insegurança entre os cientistas em continuar seguindo o paradigma. A polarização da luz foi um desses fenômenos que enfraqueceram a concepção corpuscular permitindo o ressurgimento da visão ondulatória que viria a substituí-la como paradigma logo em seguida em meados do século XVIII.

Neste trabalho optamos pela interpretação de que o período analisado corresponde a uma fase pré-paradigmática. Os estudos na área da Óptica quase não existiram durante o século XVII ficando caracterizado apenas pelas questões colocadas por Newton no seu livro *Óptica* e pelos fenômenos abordados por Huygens em seu *Tratado*, ou seja, além de existirem duas teorias concorrentes coabitando e mesmo que uma delas tivessem a preferência da maioria, nenhuma grande contribuição foi realizada por nenhuma das duas. A definição ou escolha de um paradigma precede um período de *ciência normal* e esse “hiato científico” que durou até o início do século XVIII nos mostra que essa fase de aprimoramento do suposto paradigma corpuscular não existiu.

Outro aspecto diz respeito à aceitação total da teoria ondulatória no início do século XIX. Se houve uma substituição de paradigmas, houve com isso uma *revolução científica* conforme a definição de Kuhn. A *revolução científica* ocorre após um período de *crise*, onde os problemas são reconhecidos pela comunidade científica como anomalias. As anomalias, fenômenos que insistem em ficar sem solução, geralmente surgem no decorrer do período de ciência normal devido ao constante aprofundamento das teorias. No caso do período histórico descrito, os problemas que o paradigma não conseguia explicar já existiam, mas eram simplesmente ignorados. Kuhn defende essa tese afirmando que: “A ciência normal não tem como objetivo trazer à tona novas espécies de fenômeno; na verdade aqueles que não se ajustam aos limites do paradigma frequentemente nem são vistos” (Kuhn, p. 89, 2018).

A teoria corpuscular, assim como a ondulatória, era bem-sucedida na explicação de uma série de fenômenos, mas a primeira prevaleceu sobre a segunda pelo prestígio do seu criador. Porém, as inúmeras inconsistências impediram essa teoria de avançar na compreensão da luz.

Além de não encontrarmos elementos consistentes que caracterizem esse período de crise, uma revolução científica apresenta algumas consequências que transformam o *modus operandi* da ciência ao menos dentro de uma área específica. De acordo com Kuhn, o cientista ao vivenciar uma revolução científica passa a trabalhar em um mundo diferente, a ter uma outra visão sobre aquela mesma natureza. Ocorre então uma ressignificação parcial e às vezes até mesmo total dos conceitos tornando-os intraduzíveis nos termos da teoria anterior¹. É inegável o avanço que as equações de Maxwell trouxe para a Física ao unificar a Óptica, a Eletricidade e o Magnetismo, porém, entendemos que esta descoberta não foi capaz de modificar a concepção de mundo dos cientistas e nem os seus métodos experimentais. A teoria de Maxwell foi elaborada preservando todo o arcabouço conceitual com o qual os cientistas da época já vinham praticando. A obrigatoriedade de um meio material para preencher o espaço e para a transferir energia, tempo e espaço absolutos, são alguns princípios dos quais a ciência se apoiava e que permaneceram até o início do século XX como discutiremos adiante.

Obviamente que a descoberta da natureza eletromagnética da luz possui um peso que lhe garantiria um status de revolução, mas Maxwell não introduziu ideias novas e não tinha esse objetivo. Estava, na verdade, tentando fortalecer o trabalho que Faraday já vinha fazendo e responder algumas questões ainda nebulosas. Portanto, pelos motivos explicitados, consideramos que as equações de Maxwell teve um efeito sentenciador na adoção de uma das teorias como paradigma, pois ainda existia dúvida sobre a natureza da luz, e não revolucionário como se tivesse rompido um paradigma já estabelecido.

4.3 A CIÊNCIA NORMAL: PARADIGMA ONDULATÓRIO

Como discutimos anteriormente, podemos interpretar o recorte histórico adotando uma visão macroscópica, considerando um período pré-paradigmático, ou microscópica, considerando a teoria corpuscular um paradigma que enfrentou muitas questões até ser substituída pela ondulatória que teve nas equações de Maxwell um exemplo de revolução

¹ Kuhn, posteriormente ao seu livro *A Estrutura das Revoluções Científicas*, suavizou esta afirmação relativizando o conceito original de incomensurabilidade (REF).

científica. Optamos pela visão macroscópica e iniciamos esta seção com um paradigma recém definido.

Durante o período que definimos neste trabalho como pré-paradigmático diversas leis e equações foram desenvolvidas com base na concepção ondulatória da luz. A interferometria de Young e as equações da refração, reflexão e difração de Fresnel são exemplos da antecipação de um período de desenvolvimento da ciência do qual Kuhn chamou de ciência normal. Este período corresponde a uma fase em que a ciência se desenvolve de forma cumulativa, baseada em um corpo conceitual fornecido por um paradigma. Mesmo com a teoria corpuscular concorrendo com a ondulatória, esta última já vinha adquirindo status de paradigma devido as evidências que produzia e o crescimento da sua aceitação junto à comunidade científica.

Mas a descoberta de Maxwell, que em 2025 completará 160 anos, provocou o descarte (temporário) da teoria corpuscular, promovendo um consenso na comunidade científica quanto à natureza ondulatória e eletromagnética da luz. Sua teoria foi muito bem construída e por isso ganhou rapidamente muitos adeptos que enxergavam grande potencial para o desenvolvimento da ciência na época, iniciando assim efetivamente o período de ciência normal a partir desta teoria. Nesta fase, os cientistas passam a trabalhar na testagem das teorias, na determinação de constantes, na construção de instrumentos de medida e no aumento de acuidade (Ostermann, 1996).

Sendo assim, os objetivos dos cientistas passaram a ser a comprovação experimental da teoria de Maxwell e a solução de algumas inconsistências que a tornavam ainda obscura em alguns aspectos como, por exemplo, a explicação da existência do éter luminífero. Neste sentido, em 1879, a Academia de Ciências de Berlim ofereceu um prêmio para o cientista que conseguisse realizar essa verificação experimental. Mas somente anos mais tarde foi que o cientista Heinrich Hertz (1857-1894) começou a trabalhar nesta oferta alcançando feitos como a geração e detecção das ondas eletromagnéticas, além de, no decorrer desses estudos, ter descoberto acidentalmente um fenômeno que ficou conhecido como efeito fotoelétrico (Mangili, 2012).

Este fenômeno foi estudado posteriormente por Philipp Lenard (1862-1947), que era aluno de Hertz, revelando um comportamento da luz que contrariava com os paradigmas adotados naquela época: a dependência da frequência da radiação, ao invés da intensidade, para a obtenção da energia mínima de ocorrência do efeito fotoelétrico. Configurou-se, portanto, como uma anomalia, fato científico que surge no decorrer do período de ciência normal. Geralmente, esses fenômenos inexplicáveis são negligenciados em um primeiro momento na esperança de serem solucionados mais a frente e até mesmo por outras áreas de estudo. Essas soluções futuras

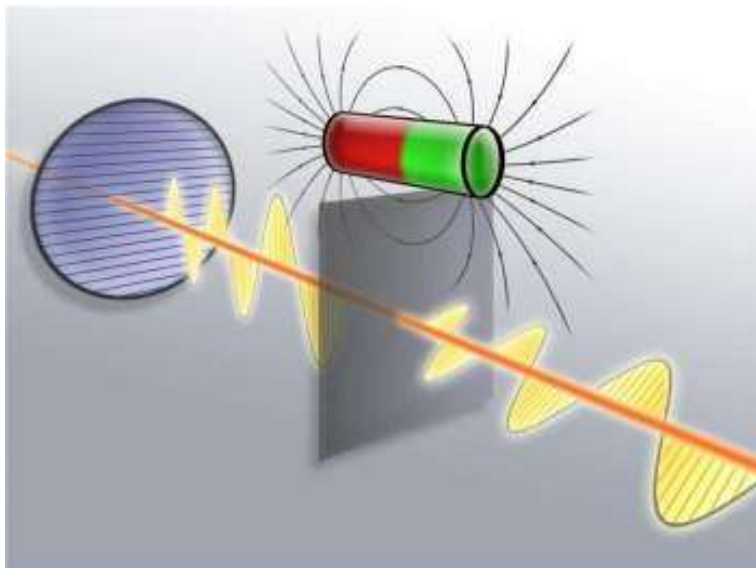
podem surgir do aprofundamento do próprio paradigma ou dar origem a novas teorias que irão proporcionar o rompimento desse paradigma (Kuhn, 2018).

De acordo com Kuhn (2018), é no período de *ciência normal* que a promessa de sucesso dada pelo paradigma se atualiza, ou seja, suas leis precisam ser capazes de responder a questões que apareçam no decorrer das pesquisas assim como a comprovação experimental das suas previsões. Uma das questões que o paradigma precisava dar conta era encontrar uma maneira de provar a existência do éter como um meio material de propagação de luz, condição *sine qua non* para a caracterização de uma onda. Essa missão, ou problema apresentado pelo paradigma, forçou a construção de instrumentos e aparatos experimentais. Dentre eles, temos o Interferômetro de Michelson-Morley cuja engenhosidade impressionava por conter um grande, se não todo, arcabouço conceitual praticado na época tornando-se fundamental para a Interferometria como técnica de investigação científica. Porém, como veremos mais a frente, o experimento construído por Michelson e Morley acabou produzindo outra anomalia, que seria superada anos depois com os postulados de Einstein.

Até o final do século XVIII ainda não havia um consenso sobre a natureza da luz, portanto, os estudos sobre a luz levavam em consideração a sua propagação como raios que ao percorrerem diferentes meios materiais teriam a sua velocidade alterada resultando em diferentes cores. Mas somente no início do século XIX observou-se que a luz se decompunha também em radiação que não era visível. Em 1800, o cientista alemão William Herschel (1738-1822) decompôs a luz solar em um prisma e mediu a temperatura de cada cor. Percebeu que a temperatura ia aumentando no sentido da cor violeta para o vermelho (última faixa de luz visível) e que, em uma região invisível logo após o vermelho, a temperatura era ainda maior. A essa faixa de luz invisível Herschel chamou de “raios caloríficos” e mais tarde ficou conhecida como radiação infravermelha (Santos, 2018). Um ano depois, Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) estudou a outra extremidade da luz visível e descobriu que existiam raios invisíveis com as mesmas características da faixa violeta, nomeou-os de raios químicos, eram os raios ultravioletas que conhecemos atualmente (Marques e Bulhões, 2019).

A luz, que até então era considerada como uma onda de natureza desconhecida, começou a ser relacionada a fenômenos eletromagnéticos a partir do chamado Efeito Faraday, descoberto em 1845 pelo físico britânico Michael Faraday (1791-1867). Faraday construiu um aparato (Figura 6) onde a luz, após sofrer uma polarização, experimentava um forte campo elétrico que provocava uma rotação no seu plano de polarização. As equações de Maxwell deram sustentação à hipótese de a luz ser constituída por campos elétricos e magnéticos, pois descreviam a propagação desses campos na forma de ondas e com a já conhecida velocidade da luz.

Figura 6. Esquema do aparato experimental criado por Faraday.



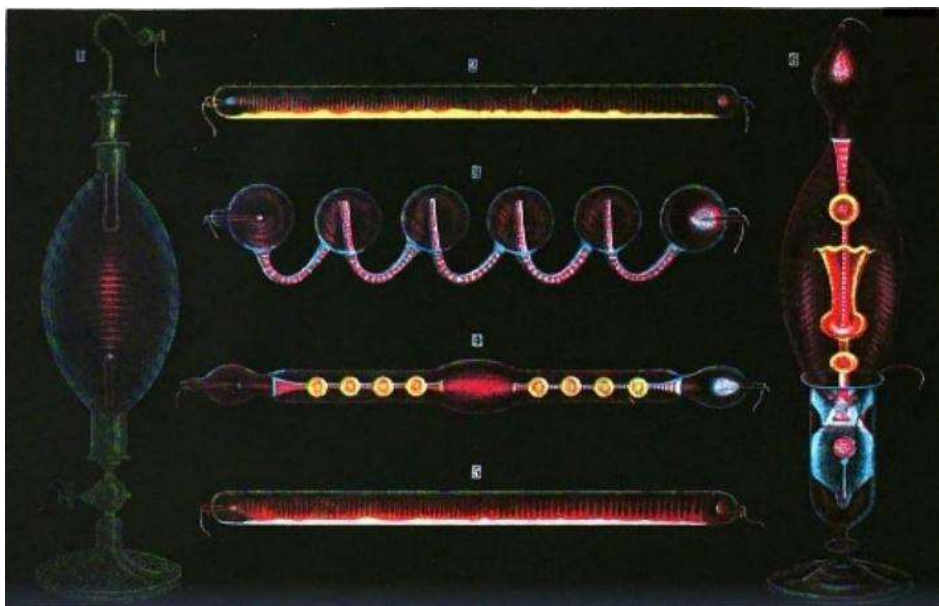
Fonte: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=transistor-optico&id=010110110411>.

Acesso em 23/04/2025.

Com a definição de um paradigma para luz, que agora era compreendida como ondas eletromagnéticas, novos estudos começaram a serem realizados juntando os conhecimentos já produzidos pela teoria ondulatória aos que surgiam com a unificação da óptica com o eletromagnetismo. Por meio desses estudos foi possível construir o espectro eletromagnético de forma completa e investigar a interação da luz com a matéria. Neste período também ocorreram descobertas, consideradas revolucionárias, como os raios X por Wilhelm Conrad Röntgen (1845 – 1923) em 1895 e a Radioatividade por Marie Skłodowska-Curie (1867 – 1934) em 1898 (Martins, 1990b).

Os raios X foram observados após as tentativas de Röntgen em explicar a natureza dos chamados raios catódicos. Esses raios catódicos surgiram após os experimentos que Faraday realizou, por volta do ano de 1838, com descargas elétricas em um tubo com gás. Seu objetivo era estudar a condução de eletricidade em um gás, mas se deparou com uma luminosidade em uma das extremidades do tubo. Esse fenômeno chamou a atenção dos cientistas que começaram a repetir este experimento de Faraday aperfeiçoando os aparatos experimentais e inserindo variáveis. Em 1857, Heinrich Geissler (1815-1879) construiu tubos com gás residual (Figura 7) e aplicou uma tensão que gerava luz a partir do gás que se tornava ionizado. Essa invenção foi utilizada na época como lâmpadas coloridas em estabelecimentos e deu origem mais tarde à luz neon.

Figura 7. Tubo de Geissler.



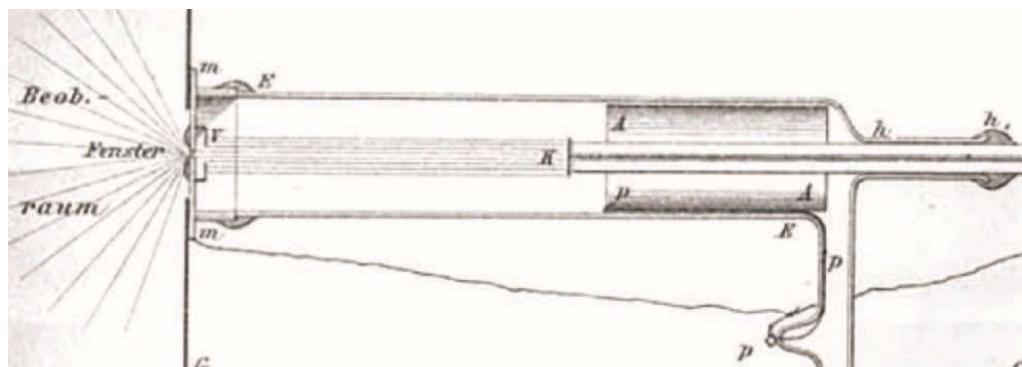
Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Tubo_de_Geissler. Acesso em 03/04/2025.

Em 1858, Julius Plücker (1801-1868) utilizou um tubo evacuado e dessa vez apareceu um raio que se movia em linha reta. Esse raio acabava sendo defletido quando era colocado sob a ação de um campo magnético. Em 1869, Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914) notou que ao aumentar o vácuo, surgia um brilho na região do anodo enquanto o catodo ficava escuro. No ano seguinte, William Crookes (1832-1919) construiu uma potente bomba de vácuo e acoplou a um tubo, intensificando o fenômeno observado por Hittorf. Esses raios, que partiam do catodo em direção ao anodo, ou seja, se originavam no catodo, ficou conhecido como raios catódicos e a sua natureza começou a ser investigada. Seriam como as ondas eletromagnéticas ou um feixe de partículas carregadas eletricamente?

Hertz pensou que, se fossem partículas carregadas elas poderiam ser desviadas também por um campo elétrico. Essa hipótese acabou não se confirmando quando Hertz a testou, chegou então à conclusão de que se tratavam de ondas eletromagnéticas como a luz. Porém, o fracasso na observação dessa hipótese de Hertz ocorreu devido ao vácuo que não foi bem-produzido. Outro comportamento que refutava a hipótese de os raios catódicos possuírem natureza corpuscular era que estes eram capazes de atravessarem películas muito finas e até mesmo percorrerem pequenas distâncias no exterior do tubo onde eram produzidos. Lenard construiu então um aparato experimental que permitia observar os raios catódicos no exterior do tubo e publicou em 1894 suas observações. Para isso introduziu uma “janela de alumínio” no lado oposto ao catodo (Figura 8) e observou que os raios se espalhavam em todas as direções sendo detectados em materiais fosforescentes colocados em frente ao tubo (Pacheco e Freitas-Reis,

2023). Além desse comportamento idêntico ao fenômeno de difração provocado por ondas, o fato de os raios percorrerem uma distância considerável fora do tubo, não seria possível se fossem constituídos por partículas pois as prováveis colisões com as partículas do ar reduziriam o seu deslocamento a poucos milímetros.

Figura 8 – Aparato experimental de Lenard para estudar os raios catódicos.



Fonte: Domínio público.

Esse experimento de Lenard inspirou outro cientista, Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923), a continuar estudando o estranho fenômeno provocado pelos raios catódicos no exterior do tubo. Em 1895, usando o mesmo tubo que Lenard projetou, Röntgen decidiu cobri-lo com uma caixa de papelão preto, apagou todas as luzes do seu laboratório e ligou o instrumento. Notou então que uma placa de material fosforescente localizada no fundo da sala ficava iluminada e o mesmo ocorria quando esta placa tinha a sua face invertida. Concluiu que se tratava de um outro tipo de raio, diferente dos raios catódicos pois era invisível e com poder de penetração superior. Expôs em seguida este “raio invisível” a outros materiais de densidades diferentes para estudar a sua capacidade de atravessá-los até que, ao segurar um disco de chumbo com a sua mão, percebeu uma sombra referente ao disco e também uma sombra da sua mão (Figura 9). Como ainda não se sabia que tipo de raio era esse, ficou conhecido como raio X. Naquela época os raios X eram muito confundidos com os raios catódicos, que em 1897 Joseph John Thomson (1856–1940) descobriu se tratar de um feixe de partículas carregadas negativamente que recebeu o nome de elétrons (Lima, Afonso e Pimentel, 2009).

Figura 9 – Ilustração do experimento de Röntgen.



Fonte: <https://www.dw.com/pt-br/120-anos-da-descoberta-do-raio-x/a-18835497> (acesso em 18/02/2025).

Röntgen analisou as propriedades dos raios X e observou que não sofriam desvio em prismas nem em lentes de vários materiais, não eram sujeitos à polarização, reflexão regular ou interferência e também não eram desviados pelo ímã (ao contrário dos raios catódicos). Mas possuíam características semelhantes às da luz como a sua propagação em linha reta, a formação de sombras e fluorescência. Sugeriu então que os raios X pudessem ser ondas longitudinais no éter. Diversas hipóteses foram levantadas para explicar os raios X, mas após vários experimentos os cientistas se convenceram que se tratavam de ondas eletromagnéticas de alta frequência e assim fizeram parte do espectro eletromagnético até então conhecido (Martins, 1990b).

Apesar de ser uma descoberta que não estava prevista nas teorias, classificamos os raios-x como uma consequência do período de *ciência normal*, cujas pesquisas científicas procuravam explicar as propriedades dos raios catódicos baseados nos paradigmas vigentes na época. Os raios catódicos possuíam características comprovadamente corpusculares, portanto, um fenômeno que se originasse deles não poderia se comportar como uma onda. Entretanto, como foi mencionado, o paradigma ondulatório foi capaz de fornecer uma explicação que convenceu a comunidade científica naquele momento. Por outro lado, a imagem da mão da esposa de Röntgen (a primeira radiografia) causa espanto até os dias de hoje e foi responsável por uma transformação na medicina. Não há, portanto, como negar o status de revolução científica à descoberta dos raios X.

Conforme será tratado mais a frente, a *revolução científica*, em sua essência, promove uma mudança na visão de mundo, uma ressignificação de conceitos, e isso não ocorreu na época em que os raios X foram descobertos. A anomalia detectada no experimento de Röntgen não

gerou uma crise, pois foi relativamente rápida a sua adequação à concepção ondulatória da luz. Porém, conforme o próprio Kuhn afirma, ela pode afetar apenas os paradigmas de uma área de estudos específica, ao passo que, para os cientistas de outros campos pode parecer um simples acréscimo de conhecimento. A respeito desta característica Kuhn pondera:

“Os astrônomos, por exemplo, podiam aceitar os raios x como uma simples adição ao conhecimento, pois seus paradigmas não foram afetados pela existência de uma nova radiação. Mas para homens como Kelvin, Crookes e Roentgen, cujas pesquisas tratavam da teoria da radiação ou dos tubos de raios catódicos, o surgimento dos raios x violou inevitavelmente um paradigma ao criar outro” (Kuhn, 2018, p.178).

Outros experimentos que sucederam a descoberta de Röntgen mostraram que os raios X poderiam ser produzidos sem os tubos de raios catódicos e que eles seriam emitidos na verdade pelos materiais fosforescentes quando iluminados. Becquerel, em 1896, buscando compreender a relação entre a fosforescência e a produção dos raios-x acabou se deparando com um fenômeno novo, um tipo de radiação emitida pelo urânio que era diferente dos raios X pois se refletia e refratava. Essa radiação ficou conhecida como “raios de Becquerel” ou “raios do urânio”, porém, Becquerel acreditava que esse fenômeno ocorria apenas com o urânio e quando ele era iluminado. Não sabia, portanto, que a radiação do urânio poderia se estender por meses apesar de não haver recebido luz, ou seja, a emissão dessa radiação se fazia de forma espontânea por esta substância e não pela excitação provocada pela luz que incidia nele (Martins, 1990b).

Dois anos depois, Marie Curie comprovou que essa radiação era emitida de forma espontânea e não apenas pelo urânio, mas por outras substâncias como o Tório e o Polônio por exemplo. Se tratava então de uma propriedade que esses materiais possuíam devido às suas características atômicas. Essa propriedade ficou conhecida como radioatividade (Martins, 1990b).

Seguindo com os estudos da radioatividade, em 1900, o físico e químico francês Paul Villard (1860-1934) analisou a radiação emitida por uma amostra de Rádium que incidia numa placa fotográfica protegida por uma fina camada de chumbo e descobriu um outro tipo de radiação que acabava atravessando a placa de chumbo. Inicialmente Villard pensou se tratar de partículas semelhantes as já conhecidas α e β , emitidas durante o processo de decaimento nuclear. Essa radiação era diferente das, já que a primeira seria bloqueada pela camada de chumbo e a segunda sofreria deflexão quando submetida a um campo magnético, ou seja, duas situações que não ocorriam com a “nova radiação” observada.

Ernest Rutherford (1871-1937), em 1903, identificou que essa radiação desconhecida seria um terceiro tipo de radiação emitida durante o processo de decaimento nuclear e a chamou de radiação γ . Mas em 1910, William Henry Bragg (1862-1942) provou que os raios gama eram

ondas eletromagnéticas como a luz e, seguindo essa teoria, Rutherford e Edward Andrade (1887-1971) mediram os seus comprimentos de onda descobrindo que eram semelhantes aos raios-x. Naquela época distinguia-se os raios gama dos raios X por serem os primeiros mais energéticos, porém atualmente se consegue produzir raios X mais energéticos que os raios γ e por isso a distinção é feita pela forma como são produzidos. Os raios X provém da excitação dos elétrons, enquanto os raios γ são emitidos pelo decaimento nuclear (Lima, 2015).

Com os raios gama, o espectro eletromagnético se tornou completo e a luz passou a ser totalmente descrita segundo o paradigma ondulatório. Notamos que a cada nova radiação descoberta, os cientistas utilizavam toda a gama de conhecimentos construídos pelos paradigmas corpuscular e ondulatório para definir aquela radiação como um feixe de partículas ou ondas eletromagnéticas. Trabalhando dessa forma, começavam a encontrar as peças dos quebra-cabeças fornecidos pelos respectivos paradigmas. O espectro eletromagnético foi sendo montado, assim como a estrutura da matéria foi sendo revelada durante esse período de ciência normal. Mas, como o passar do tempo, alguns novos fenômenos trouxeram muitos questionamentos sobre a natureza ondulatória da luz e como a matéria se organiza. Se tornava emergente pensar em uma nova teoria para a luz que justificasse o seu comportamento corpuscular, demonstrado em algumas situações, e a partir daí construir modelos atômicos mais consistentes.

4.4 A CRISE DA LUZ

A consequência da ciência normal é uma ciência cada vez mais especializada e à medida que um paradigma é aprofundado, ele se torna mais suscetível a anomalias. Anomalias, segundo Kuhn, são fenômenos que insistem em contrariar as teorias, isto é, quando a natureza de alguma forma viola as expectativas do paradigma vigente (Kuhn, 2018). As anomalias provocam insegurança na atividade científica e, quando persistem, geram crises que levam a comunidade científica a reconhecer a necessidade de desenvolver novas teorias, ou seja, a emergência da substituição do paradigma por outro.

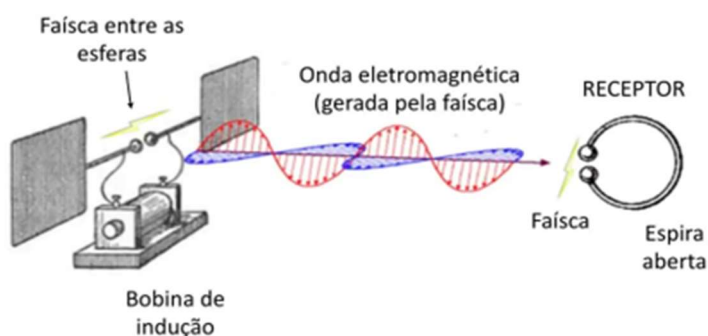
Na seção anterior, tivemos a oportunidade de observar alguns episódios que se caracterizam como anomalias, por não terem sido previstas pelo paradigma, que surgem naturalmente no decorrer do período de ciência normal devido ao avanço dos instrumentos de medição ou dos aparatos experimentais, porém foram rapidamente ajustadas às teorias paradigmáticas. São, portanto, consideradas como descobertas porque foram inesperadas, mas não abalaram o paradigma, que continuou dando conta de explicá-las. A descoberta dos raios X

e dos raios gama, por exemplo, mostraram que os cientistas buscavam compreender como se comportavam e do que eram constituídos os raios catódicos, a natureza acabava revelando a existência de outros tipos de radiação. Essa situação continua fazendo parte da ciência normal, pois se tratava de uma investigação ancorada nos paradigmas vigentes (mecanicista e ondulatório), mas que demonstrou certa imaturidade dos cientistas em prever essas descobertas.

Entretanto, houve momentos em que os resultados inesperados não conseguiram ser ajustados às teorias, e também certas descobertas que mostraram o iminente esgotamento do paradigma. As pesquisas realizadas tanto por Hertz quanto por Michelson e Morley, acabaram originando anomalias que enfraqueceram o paradigma e causaram, tempos depois, a sua substituição. O experimento de Rutherford, precedido por Thomson, que ocasionou na construção de um modelo atômico mais completo, porém inconsistente, também contribuiu para a comunidade científica reconhecer que o paradigma havia chegado ao seu limite. Veremos na próxima seção, que um novo paradigma solucionou tanto o problema da luz quanto a questão da estrutura da matéria e ainda mostrou que o comportamento de um produzia o outro.

Hertz, em 1888, descobriu acidentalmente um fenômeno que ficou conhecido como efeito fotoelétrico. Seu experimento de geração de ondas eletromagnéticas produzia centelhas que eram transmitidas de um dispositivo a outro conforme mostra a Figura 10. Para tornar estas centelhas com uma intensidade maior, pensou em deixar o ambiente mais escuro possível, pois entendia que a luminosidade do ambiente ofuscava o brilho dessas centelhas. Entretanto, Hertz observou que ocorrera um efeito contrário, a intensidade das centelhas diminuiu. Ele atribuiu esse fenômeno à luz ultravioleta presente durante a realização dos experimentos, mas não investigou a fundo esse fenômeno, pois os seus objetivos eram outros. Essa tarefa acabou sendo abraçada pelo seu então auxiliar, o físico Phillip Lenard (1862-1947).

Figura 10 – Aparato experimental utilizado por Hertz para produzir centelhas em circuitos distintos.

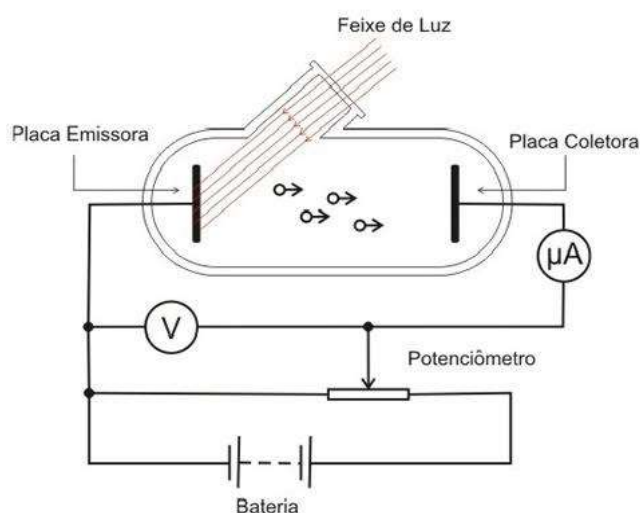


Fonte: <https://www.facebook.com/entendamaisciencia/photos/a.116847706363621/200384454676612/?type=3>

(Adaptado). Acesso em 30/03/2024.

Lenard construiu um aparato experimental (Figura 11) para estudar a influência da luz no aumento das centelhas. Para isso, fez um feixe de luz incidir sobre uma placa metálica e observou que essa ação gerava uma corrente elétrica. Concluiu então que se tratava de um fenômeno ainda não descoberto do qual a luz, ao interagir com a matéria, fazia com que cargas elétricas se desprendessem delas.

Figura 11 – Aparato experimental utilizado por Lenard para reproduzir o efeito fotoelétrico.



Fonte: https://www.sofisica.com.br/conteudos/fisicamoderna/FisicaQuantica/efeito_fotoeletrico.php. Acesso em 30/03/2024.

Este fenômeno ficou conhecido como efeito fotoelétrico. Sabendo disso, experimentou aumentar intensidade da luz incidente para produzir mais corrente elétrica, mas verificou que o efeito fotoelétrico não acontecia para todas as frequências de luz. Além disso, notou que a energia cinética adquirida pelos “elétrons” ejetados não era maior quando a intensidade da luz era mais forte, porém aumentava quando utilizava frequências superiores àquelas cujo efeito fotoelétrico se originou. O fato de a luz arrancar elétrons da placa metálica não representava uma anomalia, pois era perfeitamente explicado pelo eletromagnetismo e pela teoria ondulatória da luz. Porém, a dependência da frequência da luz incidente na matéria em vez da sua intensidade, para que o efeito fotoelétrico ocorresse, configurou-se como uma anomalia.

O próprio Lenard, em 1902, tentou dar uma explicação para este problema usando o chamado paradigma clássico, que antecedeu a revolução científica promovida pelas teorias Quântica e Relatividade. Apresentou uma justificativa que ficou conhecida como “hipótese de gatilho” em que uma suposta ressonância entre as vibrações da radiação incidente e as dos *quantum* de eletricidade (elétrons) dos átomos que constituem a placa metálica seria a responsável pelo efeito fotoelétrico. Como cada elétron teria uma frequência de vibração

diferente, o ejetado pela luz ultravioleta não seria, por exemplo, o mesmo que o gerado pelos raios X. Do mesmo modo, as velocidades com as quais os elétrons escapavam da placa estavam ligadas às suas frequências vibracionais preexistentes nos átomos. Assim, a radiação incidente teria a função de “engatilhar” (selecionar) os diferentes elétrons a serem ejetados. Essa hipótese de gatilho foi aceita pela comunidade científica até meados de 1911, quando foi refutada experimentalmente pelo próprio Lenard em parceria com o cientista Carl Ramsauer (1879–1955) após observarem que a luz não tinha o papel de selecionar os elétrons e sim de fornecer energia a eles (Suttini, Caluzi e Errobidart, 2024).

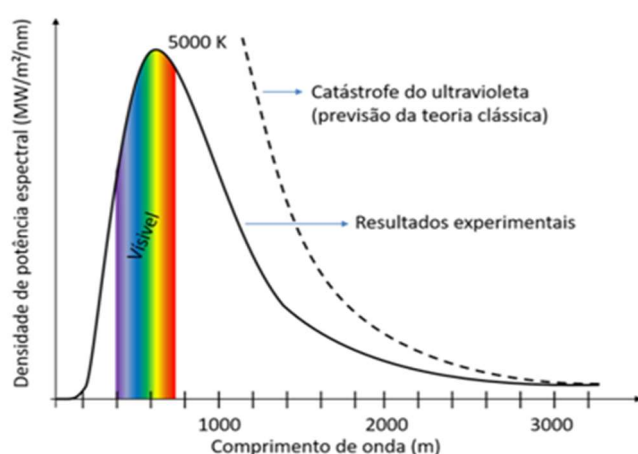
Outras tentativas de adequar essa anomalia à teoria ondulatória-eletromagnética surgiram neste período. Suttini, Caluzi e Errobidart (2024) citam as hipóteses de Arthur Erich Haas (1910) e as duas hipóteses de J.J. Thomson (1910 e 1913). A primeira propunha um acréscimo de energia, provocado pela radiação incidente, que seria absorvida tanto pelos elétrons quanto pelos orbitais nos quais eles estariam localizados. Esta ideia foi considerada arbitrária pelos físicos da época pois combinava de forma simples duas áreas da Física distintas até então: a Óptica e a Quântica, esta última em fase embrionária ainda. A primeira hipótese de Thomson supôs a existência de *dupletos-elétricos* como constituintes da matéria atuando como ressonadores provocando “uma perturbação cada vez maior no equilíbrio dinâmico do movimento do elétron, até que ele seja lançado para fora do átomo” (Suttini, Caluzi e Errobidart, 2024, p. 10). Na segunda hipótese, de 1913, Thomson postulou que as forças elétricas (atrativa e repulsiva) que atuam sobre um elétron ficam confinadas em *tubos de força elétrica* permitindo a sua oscilação. Quando uma luz de mesma frequência de oscilação atinge o elétron, ocorre uma transferência de energia radiante para cinética. Porém é necessário que haja um trabalho externo mínimo para que o elétron seja ejetado. Essas duas hipóteses de Thomson, apesar de terem atraído algumas pesquisas, foram consideradas arbitrárias além do fato de que as teorias da Relatividade e Quântica estavam atingindo um consenso na comunidade científica.

Além do efeito fotoelétrico, o final do século XIX ficou marcado por mais dois problemas que contrariavam o pensamento e as teorias disponíveis na época: a radiação do corpo negro e o experimento de Michelson-Morley. O problema da radiação do corpo negro² se refere ao fato de que a relação entre a intensidade da luz emitida por um corpo e a sua temperatura se mostrava incompatível com a previsão teórica (Figura 12). As tentativas teóricas de explicar a absorção e

² Um corpo negro era definido como aquele que transforma em calor toda a radiação que incide sobre ele. Trata-se de um modelo ideal que consiste em uma cavidade com um orifício por onde a luz adentra, sofre infinitas reflexões nas paredes internas dessa cavidade e depois sai. A cada choque com as paredes da cavidade, um pouco da energia dessa radiação incidente é absorvida (Fleming, 2001).

emissão de radiação por um corpo negro sugeriam a existência de sistemas mecânicos oscilantes dotados de carga elétrica, representados por osciladores elementares, presentes nas paredes internas desse corpo. Esses osciladores, ao serem agitados termicamente, emitiriam radiação, mas também poderiam absorver radiação que porventura incidisse sobre ele e, quando se atingia o equilíbrio térmico, a quantidade (medida pela intensidade) de radiação absorvida e emitida se igualariam. Mas, de acordo com os cálculos, essa intensidade tenderia ao infinito para altas frequências, essa inconsistência ficou conhecida como *catástrofe do ultravioleta* (Dionísio, 2005).

Figura 12 – Distribuição de energia de um corpo em função da sua temperatura.



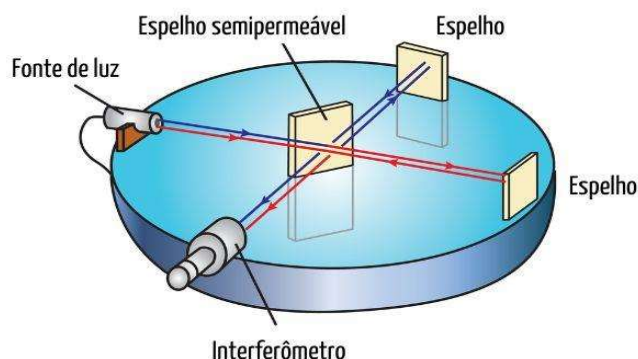
Fonte: <https://vestibulares.estrategia.com/public/questoes/fatores-que-levaram1222cbbab0f/>. Acesso em 30/03/2024.

A chamada catástrofe do ultravioleta foi uma consequência da equação elaborada pelo físico Lorde Rayleigh (1842-1919) sendo, em seguida, aprimorada por James Jeans (1877-1946). Essa equação conhecida como lei de Rayleigh-Jeans foi uma tentativa de descrever a distribuição de energia para baixas frequências emitidas por um corpo negro, cuja lei proposta anteriormente por Wilhelm Wien (1864-1928) não conseguia alcançar. A solução obtida por Rayleigh-Jeans se ajustava perfeitamente aos dados empíricos para as baixas frequências, mas previa resultados impossíveis para altas frequências. Físicos como Otto Lummer (1860- 1925) e Ernst Pringsheim (1859-1917), além de Heinrich Rubens (1865-1922) e Ferdinand Kurlbaum (1857- 1927), realizaram experimentos para testarem as leis de Wien e Rayleigh-Jeans, porém só reforçaram as suas limitações. Com isso deixava claro que o modelo clássico, ancorado pela Termodinâmica, Óptica ondulatória e o Eletromagnetismo, não seriam mais capazes de resolverem esse problema do corpo negro (Thiara et.al., 2022).

Em uma atitude de desespero³ e ao mesmo tempo de confiança nas leis da Física praticadas na época, Max Planck (1858-1947) apresentou uma solução para o problema do corpo negro que se transformaria no germe da famosa e bem-sucedida TQ. Planck propôs que os osciladores elementares, mencionados anteriormente, não poderiam vibrar com qualquer energia, mas apenas com quantidades de energia cujos valores seriam múltiplos inteiros de um valor mínimo fundamental, do qual chamou de *quantum de energia* (Dionísio, 2005).

Já o experimento de Michelson-Morley (Figura 13) consistiu em uma tentativa de medir o movimento da Terra em relação ao éter luminoso, mas acabou provando que esse meio material não existe. A ideia era mostrar que a luz sofreria um atraso devido à resistência aplicada pelo suposto “vento etéreo”, originado pelo movimento da base do aparato. O referido atraso seria então detectado por uma alteração da figura de interferência projetada no anteparo. Mas o que se observou foi o mesmo padrão de interferência projetado no anteparo antes e depois do giro da base. Assim como ocorreu com relação ao problema da radiação do corpo negro, surgiram algumas tentativas sem sucesso de explicar o resultado inesperado da experiência.

Figura 13 – Diagrama do experimento de Michelson e Morley.



Fonte: <https://www.preparaenem.com/fisica/fisica-moderna.htm>. Acesso em 30/03/2024.

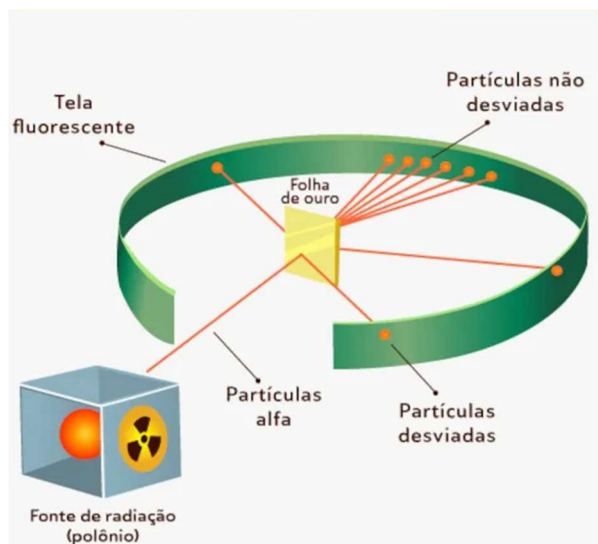
O físico holandês Hendrik Lorentz (1853-1928) buscou incorporar o resultado do experimento de Michelson-Morley à sua “Teoria do Elétron”, da qual toda a matéria seria constituída de elétrons que conduzem eletricidade e, a partir da interação com o éter, adquire oscilações que produzem luz. Assim, defendia que os braços do interferômetro tinham as suas forças intermoleculares afetadas pelo movimento relativo do éter sofrendo contração no espaço, o que seria responsável pela compensação do suposto aumento da distância percorrida pela luz.

³ Para justificar a hipótese dos quantas de energia Max Planck disse: “tratou-se de uma hipótese puramente formal, e não refleti muito sobre ela, mas apenas sobre o fato de que, sob quaisquer circunstâncias, custasse o que custasse, um resultado positivo (para o problema da radiação de cavidade) tinha de ser obtido” (Fleming, 2001, p.10).

Este experimento, mesmo após a solução dada por Einstein, continuou a ser repetido várias vezes na esperança de detectar o “vento etéreo”, ou seja, o pensamento mecanicista ainda não havia sido totalmente superado.

Uma outra anomalia que impôs limites à física clássica foi a descoberta do próton, após o por experimento de espalhamento realizado por Rutherford em 1911, resultando na construção de um novo modelo atômico, mais completo que o “pudim de passas” de Thomson. O experimento consistiu em incidir um feixe de partículas alfa, emitidas por um material radioativo proveniente do polônio, sobre uma folha de ouro sendo circundada por um anteparo fluorescente de sulfeto de zinco (Figura 14). Rutherford observou que a maioria das partículas atravessava a folha de ouro, algumas eram repelidas enquanto outras eram desviadas. Antes, porém, em 1903, Rutherford já havia verificado que a radiação alfa era constituída de partículas positivas. Concluiu então que o átomo (de ouro) era composto por uma região muito densa a qual chamou de núcleo e que a maior parte do átomo é espaço vazio. Por este motivo que uma grande quantidade de partículas que atravessaram a folha de ouro não sofreu desvio, algumas poucas se chocaram com o núcleo e por isso foram repelidas, enquanto outra pequena quantidade passou próximo ao núcleo (que possui carga positiva) e acabou sendo desviada por forças de repulsão, pois possuíam a mesma carga do núcleo (Reis, Oliveira e Silva, 2012).

Figura 14 - Experimento de espalhamento de Rutherford.



Fonte: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/atomo-rutherford.htm/>. Acesso em 08/04/2025.

Rutherford propôs um modelo em que um átomo seria constituído por um núcleo, de carga positiva e contendo quase toda a massa, e uma região externa onde se localizavam partículas de carga negativa, os elétrons. Os resultados do experimento de espalhamento

contrariavam o modelo de Thomson, que não previa os desvios das partículas alfas. Sendo assim, o modelo rutherfordiano explicava esse fenômeno, porém, duas questões que surgiram em sequência colocaram em dúvida a sua estabilidade: como o núcleo positivo e o elétron negativo não se atraíam? De acordo com as leis do Eletromagnetismo, o elétron, ao ser acelerado, não emitiria energia continuamente e teria o raio da sua trajetória diminuindo cada vez mais, ocasionando o choque com o núcleo do átomo? A resposta para a primeira questão viria do movimento circular exercido pelo elétron. Esse movimento produziria uma força centrípeta que compensaria as forças atrativas, mantendo o elétron em sua órbita. Por outro lado, segundo o eletromagnetismo, esse movimento circular, que é acelerado, faria com que o elétron emitisse energia e acabaria entrando em colapso com o núcleo. Essa inconsistência, referente ao modelo atômico de Rutherford, se tornaria mais uma anomalia que contribuiria para a instauração de uma crise na Física (Raicik, 2023).

Considerando a precisão com que o modelo rutherfordiano descrevia o átomo, porém ciente da sua instabilidade, Niels Bohr⁴, por volta de 1913, criou um modelo atômico mantendo as características do átomo de Rutherford e introduzindo as hipóteses quânticas sugeridas por Planck (Rocha e Moreno, 2013). Bohr, mesmo acreditando no modelo de Rutherford reconhece nas inconsistências deste, uma limitação do paradigma clássico, ou seja, enxerga que a ciência está passando por um período de crise, de questionamentos em relação aos seus cânones. Busca então, soluções baseadas em ideias que não obedeciam ao paradigma em vigor, demonstrando ser favorável a uma reformulação na visão de mundo estabelecida pelos cientistas até aquele momento.

Os quatro problemas citados: o efeito fotoelétrico, a radiação do corpo negro, o experimento de Michelson-Morley e o átomo de Rutherford, provocaram uma insegurança na comunidade científica com relação ao paradigma vigente. A visão clássica de mundo, onde tempo e espaço são absolutos em um universo considerado contínuo, havia chegado ao seu limite e o paradigma ondulatório da luz, que estava inserido neste modo de entender a natureza, estava prestes a ser quebrado. O rompimento deste paradigma com a instauração de um novo se fazia necessário para que a ciência superasse esses obstáculos e continuasse a se desenvolver. Conforme Kuhn (2018, p. 147) afirma: “A emergência de novas teorias é geralmente precedida por um período de insegurança profissional pronunciada [...]”.

⁴ Niels Henrik David Bohr (1885-1962) foi um físico dinamarquês conhecido por suas contribuições à Física Quântica e à Química. Fez parte da equipe de cientistas comandada por Rutherford e construiu um modelo atômico baseado na quantização da energia, em que os elétrons estariam localizados em órbitas com níveis de energia específicas.

Mas, como Kuhn afirma, um paradigma não é abandonado enquanto não surgem outros candidatos para substituí-lo. A dificuldade em superar as anomalias, demonstradas pelas inúmeras tentativas frustradas de adaptá-las ao paradigma atual, induz os cientistas a pensarem em outras soluções que fogem das regras e leis desse paradigma. Para isso, quase sempre recorrem à Filosofia e à História da Ciência nesses momentos de crise, para inspirar novas teorias que muitas vezes nascem de ideias resgatadas de épocas pregressas. Não obstante, se libertam dos dogmas criados pelo paradigma do qual estão imersos e dos métodos praticados na ciência normal, abrindo espaço para a imaginação e a criatividade.

O próprio éter, que acabou sendo refutado, foi idealizado por Aristóteles, recriado por Descartes para embasar o seu Mecanicismo e depois foi aplicado à Óptica eletromagnética. Aristóteles negava o vácuo e a existência dos átomos, defendia um universo contínuo em que o espaço era todo preenchido por uma substância sutil. Descartes, assim como Aristóteles, acreditava em um universo todo preenchido de modo que o movimento dos corpos seria causado por colisões entre eles ou pelo arrasto provocado por vórtices etéreos (Rosa, 2005). Apesar de Newton postular o conceito de força à distância e mais tarde Faraday a ideia de campo, o paradigma mecanicista ainda vigorava durante o desenvolvimento do Eletromagnetismo e da Óptica ondulatória, que já caminhavam para uma unificação em prol de uma definição para a natureza da luz. Portanto, ao atingir o consenso de que a luz é uma onda formada pela união dos campos elétrico e magnético perpendiculares entre si, os cientistas precisaram introduzir um meio material à teoria para justificar a propagação dessas ondas no espaço, onde não continha matéria. Utilizaram então o éter como um meio material sutil e elástico (Bezerra, 2006).

Einstein também recorreu a uma antiga concepção para dar uma explicação ao efeito fotoelétrico, conforme veremos a seguir. A já superada teoria corpuscular da luz serviu de inspiração para a ideia dos *quantas de luz*, que mais tarde ficariam conhecidos como *fótons*⁵. Einstein faz uma analogia para descrever o efeito fotoelétrico:

Consideremos um muro construído na praia. As ondas chocam-se nele continuamente, escalavram-lhe parte da superfície e retiram-se, deixando caminho franco para novas ondas. A massa do muro decresce, e podemos perguntar quanto dela é subtraída durante um ano. Mas figuremos agora um diferente processo. Queremos diminuir a massa do muro da mesma quantidade, mas por um sistema diverso. Damos tiros no muro e desagregamo-lo nos pontos em que as balas batem. A massa do muro decresce, e podemos imaginar que uma igual redução de massa se opera nos dois casos. Da aparência do muro, entretanto, podemos facilmente ver se é o contínuo choque das ondas que atua ou o descontínuo choque das balas (Einstein e Infeld, 1938, p.230).

⁵ O termo fótons, ao que se tem registrado, foi cunhado em 1926 pelo físico-químico americano Gilbert Newton Lewis. Porém, Einstein jamais se referiu ao quantum de luz por esse termo (Santos, 2015).

A Teoria Quântica, segundo o físico Erwin Schrodinger, revive as ideias de Leucipo e Demócrito surgidas há 25 séculos, de um universo descontínuo constituído por átomos implantados no espaço vazio. A forma discreta com que a luz se apresentava nos experimentos de absorção e emissão de radiação por um corpo e no efeito fotoelétrico, levaram os cientistas a reconstruírem suas concepções sobre o universo. Físicos como Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg e Schrödinger adotaram um método de investigação filosófica na busca da compreensão da natureza que estava se revelando de outra forma conforme a TQ estava se desenvolvendo (Silva, 2017).

Analisando o que abordamos até aqui nesta seção e fazendo um paralelo com as ideias de Kuhn, notamos que o reconhecimento das anomalias com a consequente implantação da crise não é instantâneo, mas um processo que envolve a mobilização da comunidade científica para examinar cada anomalia, a resistência de adaptação ao paradigma e o seu obscurecimento, culminando inclusive com questionamentos relacionados às soluções que esse mesmo paradigma já obteve sucesso. Em um primeiro momento, as anomalias são atacadas dentro das regras do paradigma, foi o que vimos por exemplo, nas hipóteses de Lenard, Haas e Thomson, para adequar o Eletromagnetismo e a Óptica ondulatória aos problemas gerados pelo efeito fotoelétrico. Não obtendo êxito nesta estratégia, os cientistas começam a flexibilizar essas regras, inventando situações específicas em que a natureza pode se comportar de maneira diferente ou criando entidades físicas capazes de preencher as lacunas deixadas pelo paradigma. Essa característica do período de crise pode ser exemplificada pelo postulado de Planck referente à quantização da energia. Ele impôs uma limitação ao movimento dos osciladores elementares que violava as leis da Mecânica. Situação parecida com a ocasião em que Einstein postulou a constância da velocidade da luz, ou seja, foi preciso pedir licença à Mecânica para estudar o movimento da luz. Tanto Einstein quanto Planck não estavam convencidos de que a FC devesse ser abandonada, ambos tinham plena confiança nas realizações e conhecimentos produzidos até ali, pois, ao menos naquele momento, mantiveram o arcabouço teórico alterando aspectos bastante específicos deste paradigma (Dionísio, 2005).

As anomalias que geram crises, ou seja, que não foram superadas pela própria pesquisa normal, geralmente recebem um rótulo (problema da radiação do corpo negro, experimento de Michelson-Morley) e aguardam a evolução de instrumentos e métodos de investigação para serem resolvidas, em uma clara esperança no surgimento de soluções dadas por gerações futuras. Quando esse avanço tecnológico e epistemológico não acontece, a comunidade científica começa a se convencer de que a barreira impeditiva do progresso da ciência neste momento está ligada ao esgotamento do paradigma e não à incapacidade do cientista.

O reconhecimento de que chegara o momento de substituir o paradigma para pôr fim à crise geralmente parte dos cientistas mais jovens. Estes têm pouco tempo de trabalho em suas áreas e, portanto, não atingiram um grau elevado de comprometimento com as regras tradicionais da ciência normal. Com isso, se tornam menos resistentes a abandonar o paradigma para inaugurar uma nova tradição científica do que os mais antigos que, além de estarem presos às concepções que ajudaram a construir, possuem uma reputação a zelar. Bohr foi um exemplo de cientista jovem e com pouca experiência⁶ que ousou criar novas ideias que mudariam o olhar sobre a natureza. O seu modelo atômico conserva os elementos do átomo de Rutherford aplicando a quantização de Planck para dar estabilidade a sua estrutura. Esse modelo abriu as portas para o mundo quântico que se revelava, dando origem a outros modelos atômicos mais modernos e possibilitando grande avanço tecnológico.

Para Kuhn, algumas situações como a proliferação de teorias e o interesse de outras áreas em solucionar as anomalias são características desse período de crise, dando sinais de que o paradigma está prestes a ser quebrado.

4.5 A REVOLUÇÃO CIENTÍFICA

Em 1900, o físico alemão Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858 – 1947), com o objetivo de ajustar a previsão teórica aos resultados experimentais, propôs uma solução para o problema da radiação do corpo negro. Baseado ainda nas leis e teorias da FC, postulou que os osciladores, responsáveis pela absorção e emissão de radiação em um corpo, realizavam essas ações em quantidades inteiras de energia, ou seja, em valores correspondentes a múltiplos inteiros de um valor mínimo fundamental, chamado *quantum* de energia. A proposta de Planck solucionou o problema do corpo negro, mas era considerada inconsistente e, portanto, não gozava de credibilidade junto à comunidade científica da época. Porém, a ideia do quantum de energia inspirou a criação da Teoria Quântica, que trouxe um grande avanço na ciência.

Em 1905 Albert Einstein (1879 – 1955), utilizando a ideia de Planck, explicou por completo o efeito fotoelétrico atribuindo novamente propriedades corpusculares à luz (Ribeiro *et al.*, 2015). A ideia dos *quantas* (grãos) de luz, já mencionado acima, era considerada por Einstein como um fato concreto, porém de caráter inventivo tanto que a chamou de princípio heurístico. Referia-se à energia atuando de forma descontínua, como se fossem “átomos de luz”.

⁶ Bohr se doutorou em 1911, então com 26 anos. No ano seguinte foi trabalhar com Thomson em Cambridge e depois estudou com Rutherford em Manchester. Em 1916 se tornou professor da Universidade de Copenhague e recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1922, aos 37 anos.

A comprovação experimental dessa ideia viria com o chamado *Efeito Compton* em 1923, que consiste no espalhamento de um fóton por um elétron (Moreira, 2005).

Einstein também foi o responsável por solucionar o problema do experimento de Michelson-Morley ao postular a constância da velocidade da luz independente da velocidade da fonte emissora de luz e do movimento do observador, nascia assim a sua Teoria da Relatividade (TR). Com essas duas teorias, Einstein rechaça a existência de um éter como sustentador da luz e decreta o fim do paradigma mecanicista (Azevedo e Monteiro Junior, 2019).

A TQ e a TR estabeleceram uma nova visão de mundo para os físicos, um novo grupo teórico-metodológico e experimental de se pensar e de se fazer ciência, caracterizando o que Kuhn chama de Revolução Científica (Ferreira; Silva; Verdeaux, 2018). Essas novas teorias não complementam as anteriores e nem as absorvem como um caso particular, pois são incompatíveis entre si, ou incomensuráveis segundo Kuhn. O que ocorre, na verdade, é um deslocamento da rede conceitual entre os paradigmas anterior e atual. Por exemplo, a massa na visão clássica se conservava, mas na TR ela pode se converter em energia. Portanto, a grandeza permaneceu com o mesmo nome, porém o seu conceito foi modificado. Por este motivo, apesar de aparentemente ser possível reduzir a mecânica de Einstein à de Newton, esta derivação não atestaria a compatibilidade entre elas já que a última precisaria ser transformada para se encaixar à primeira. Essa transformação não se resume a considerar situações específicas como aproximações, ela teria que desconsiderar todo o corpo conceitual da teoria da qual deriva (Kuhn, 2018).

A revolução científica promove uma nova tradição na ciência, alterando métodos e aplicações a partir de novos princípios (Ostermann, 1996). Estabelece um novo paradigma e, a partir daí, inicia-se um outro período de ciência normal onde novos problemas vão surgindo, novos instrumentos de medição e observação vão sendo construídos. Segundo Kuhn (2018, p.224): “Após uma revolução científica, muitas manipulações e medições antigas tornam-se irrelevantes e são substituídas por outras”.

Apesar de a Revolução Científica suscitar uma nova visão sobre as coisas, os cientistas continuam observando o mesmo mundo e fazendo isso utilizando, durante um bom tempo, os mesmos instrumentos de medidas. Porém, os resultados são interpretados de outra forma e novos problemas são investigados.

A Astronomia é um exemplo de área que foi afetada pelas teorias da Relatividade de Einstein e a Teoria Quântica de Planck. A Relatividade alterou a geometria espacial e a Quântica, por meio da análise das radiações, revelou a temperatura e a composição das estrelas. Os dados captados pelos telescópios tiveram que ser reinterpretados levando-se em conta as distorções do espaço-tempo provocadas pela gravidade. Da mesma maneira, imagens que sugeriam a estrutura

de nebulosas eram, na verdade, de galáxias e a diversidade de cores das radiações emitidas pelas estrelas permitiram calcular com maior precisão as distâncias (Marranghello e Pavani, 2011).

Como geralmente ocorre em uma *revolução científica*, as teorias de Planck e de Einstein não foram aceitas no início. O paradigma clássico, que descrevia um universo contínuo e absoluto, juntamente com a teoria eletromagnética de Maxwell, que era muito bem compreendida, ainda estavam enraizados no pensamento dos cientistas da época. Uma possível concepção dual era inconcebível para eles. Compton, por exemplo, se esforçou ao máximo para explicar a sua descoberta dentro da visão clássica e conseguiu até certo ponto. Isso porque as evidências do comportamento corpuscular luminoso, demonstradas pelo espalhamento dos raios X, o levou a adotar a TQ como possibilidade de explicação (Silva e Freire Jr, 2014).

A substituição de um paradigma por outro não acontece de maneira instantânea, passa por um período de grande resistência da comunidade científica. É um processo que envolve uma conversão individual, essa ocorrendo de forma repentina, e depois coletiva, levando certo tempo para a formação do consenso. Portanto, trata-se de uma questão sociológica, de como se organizam e são educados cientificamente os diversos grupos dentro da comunidade científica. Os padrões de avaliação compartilhados por esses grupos vão determinar as escolhas entre teorias. Mas o tempo de resistência ao novo paradigma está relacionado aos valores individuais de cada cientista.

Eliminada última barreira de resistência ao paradigma vencedor, a comunidade científica aceita essas novas ideias e um novo período de *ciência normal* se inicia. Durante o período em que o consenso está sendo formado, algumas pesquisas já começam a ser realizadas tomando como base o novo paradigma. Inclusive, novas evidências promovidas por essas pesquisas acabam ganhando um peso considerável nas escolhas científicas. Na sequência, faremos um relato sobre a ciência que passou a ser praticada após o comportamento dual da luz ter sido estabelecido como paradigma.

4.6 A CIÊNCIA NORMAL: PARADIGMA DUAL

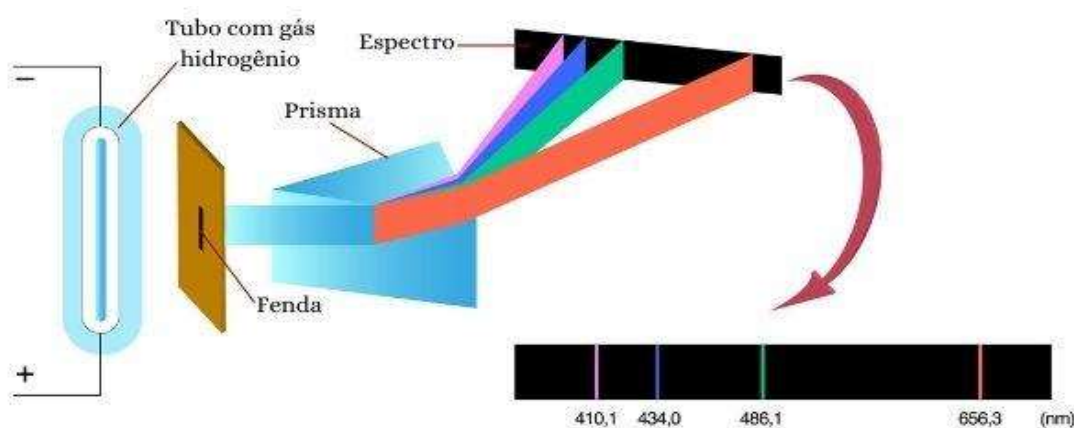
No paradigma atual, a luz possui natureza dual, se comportando em algumas situações como onda e em outras como partícula, viajando com velocidade constante no vácuo independente do referencial e emitida de forma discreta (quantificada).

Considerando essas premissas, novos modelos atômicos como o de Bohr com seus níveis de energia puderam ser criados, novos fenômenos como o espalhamento de um fóton por um elétron resultando na diminuição da energia desse fóton espalhado (*Efeito Compton*) foram

explicados, e dispositivos mais modernos como as lâmpadas fluorescentes foram construídos. Os dois primeiros exemplos aconteceram em um período ainda de dúvidas sobre o sucesso do novo paradigma. Porém, enquanto Bohr criou o seu modelo atômico aplicando as ideias quânticas, ou seja, verificando a sua validade conforme uma das funções da *ciência normal*, Compton estava estudando os efeitos dos raios x usando as ideias clássicas.

Buscando solucionar o espectro descontínuo (Figura 15) emitido pelo gás hidrogênio excitado, Bohr utilizou as concepções quânticas para explicar esse efeito e ainda conseguiu solucionar as inconsistências do modelo atômico de Rutherford.

Figura 15 – Experimento de Bohr.



Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/o-atomo-bohr.htm>. Acesso em 19/04/2025.

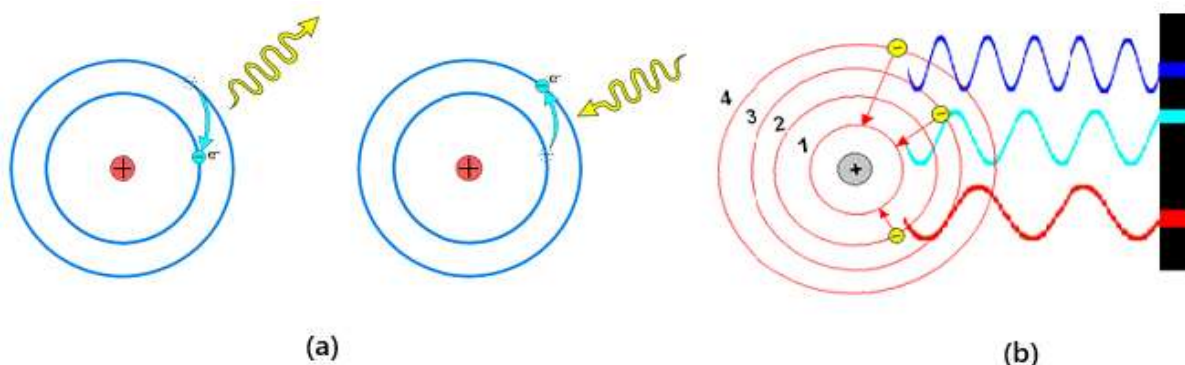
Esse experimento mostrava que a luz poderia ser constituída de partículas já que o espectro formado não era contínuo, como acontecia na dispersão da luz branca por um prisma. Bohr conjecturou então que isso ocorria porque os elétrons emitem energia em “pacotes” com valores definidos de energia (Raicik, 2023). Para sustentar essa hipótese postulou que:

- a) Os elétrons estão distribuídos em órbitas circulares, localizadas a distâncias bem definidas, ao redor do núcleo.
- b) Cada órbita abriga elétrons com energias específicas cujo valor corresponde a um múltiplo inteiro do número $h/2\pi$.

Esses dois postulados implicam que os elétrons acelerados se mantêm na mesma órbita enquanto sua energia não alcança o nível de outra órbita, dessa forma não perdem energia continuamente. Quando absorvem energia (suficiente), deslocam-se para órbitas mais energéticas e depois retornam para a sua órbita anterior emitindo radiação. Podemos entender que a luz atua como uma onda (contínua) fornecendo energia aos elétrons, que por sua vez só a

absorve em valores bem definidos (pacotes) para mudar de órbita, revelando assim a identidade dual da luz. O modelo atômico de Bohr, criado em 1913, ficava assim definido (Figura 16):

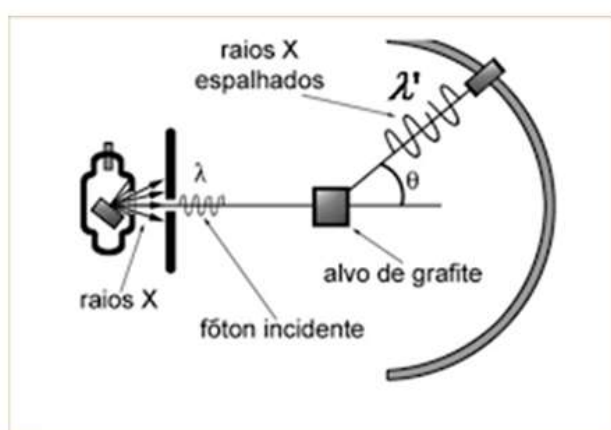
Figura 16 – Transição eletrônica (a). Emissão de radiação pelo elétron (b).



Fontes (adaptadas): <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/o-atomo-bohr.htm> e <https://www.manualdaquimica.com/quimica-geral/modelo-atomico-rutherford-bohr.htm>. Acesso em 20/04/2025.

Em 1923, o físico Arthur Compton (1892-1962), chegou à conclusão de que “a teoria clássica se mostrava irreconciliável com o fato de que parte dos raios secundários, que são de comprimento de onda maior do que o feixe primário, são verdadeiramente espalhados” (Compton, 1922, p. 18). O problema citado por Compton refere-se a uma anomalia detectada pelo experimento, criado por ele, para estudar o espalhamento dos raios X (Figura 17).

Figura 17 – Esquema do experimento realizado por Compton.

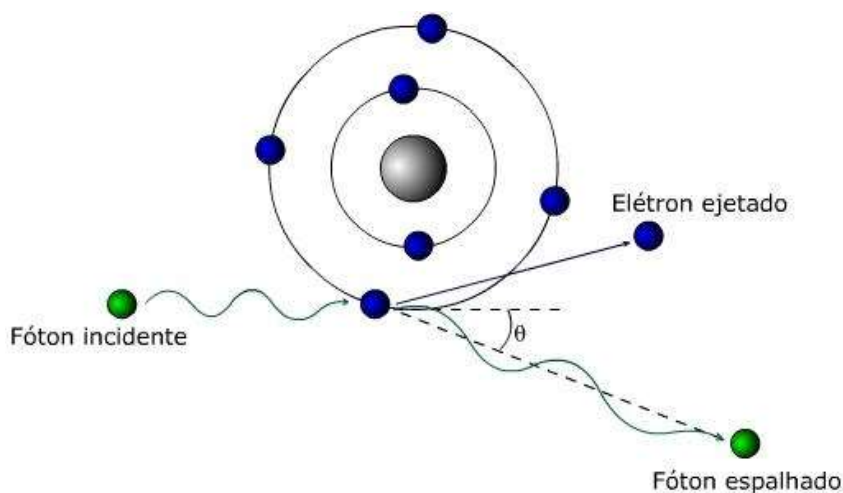


Fonte: https://www.inesul.edu.br/professor/arquivos_alunos/doc_1404244080.pdf. Acesso em 23/04/2025.

Neste experimento, Compton emitiu um feixe de raios x na direção de uma placa de grafite passando antes por uma fenda de alumínio. Após se chocar com a placa, os raios x foram espalhados, mas com um comprimento de onda menor do que possuíam quando foram emitidos

(Figura 18). Utilizou então a ideia do quantum de energia para explicar o fenômeno, considerando que a perda de energia do raio x se deu pela transferência de momento para o elétron. A final dos seus estudos, reconheceu que a radiação tem um comportamento ondulatório quando incide na matéria, e corpuscular em nível atômico (Silva e Freire Jr, 2014).

Figura 18 – Explicação de Compton para a perda de energia do fóton.



Fonte: <https://feitofotoeletricoecompton.webnode.com.br/feito-compton/>. Acesso em 20/04/2025.

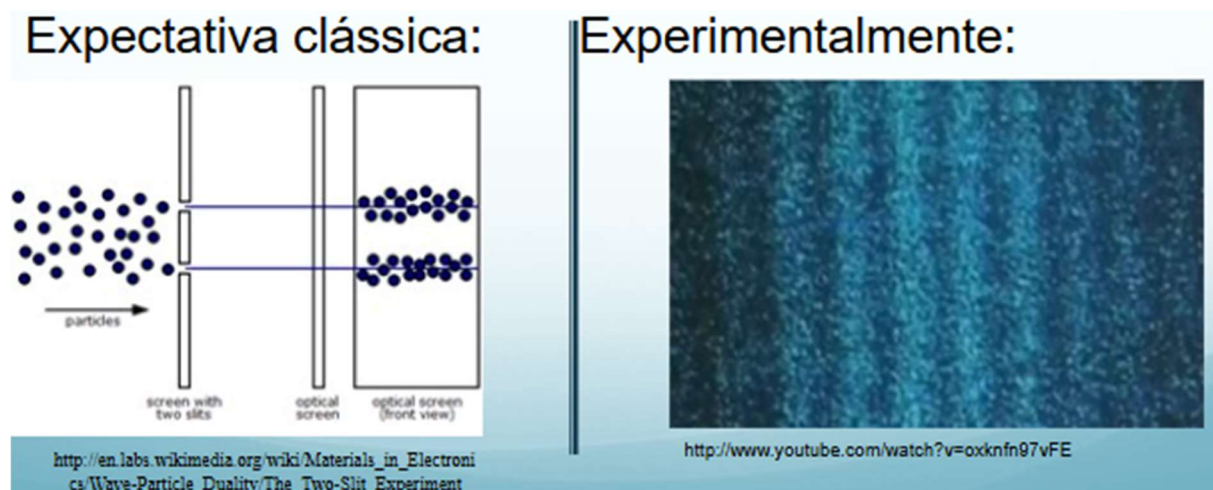
Convencido das propriedades corpusculares da luz, Louis De Broglie (1892-1987), em 1924, defendeu a sua tese de doutorado estendendo à todas as partículas o dualismo atribuído às radiações. Dessa forma, toda a matéria e radiação teriam uma onda associada a eles. Portanto, elétrons também poderiam se comportar como ondas (Martins e Rosa, 2014). De Broglie, de fato, foi o primeiro a admitir a dualidade onda-partícula, Einstein apenas defendeu a presença de um corpúsculo no interior da radiação enquanto Bohr e Compton sugeriam que a luz, sob certas condições, ora se apresentava como uma onda ora como partícula (Ferreira e De Souza Filho, 2019). A respeito disso, pronunciou:

“Uma grande luz se fez então em meu espírito, de forma súbita. Eu fiquei convencido de que o dualismo das ondas e dos corpúsculos descoberto por Einstein em sua teoria dos quanta de luz era absolutamente geral e se estendia a toda a natureza física, e pareceu-me desde então certo que ao movimento de qualquer corpúsculo, seja ele um fóton, elétron, próton ou outro, está associada à propagação de uma onda” (De Broglie, 1987, p.103-104).

Se o elétron pode se comportar como uma onda, o experimento da dupla-fenda proposto por Young seria capaz de comprovar essa teoria. Em 1927, os físicos americanos Clinton Davisson e Lester Germer realizaram este experimento lançando elétrons, um a um, sobre um alvo de níquel cristalino. Primeiro colocaram uma única fenda entre o canhão de elétrons e o anteparo, depois substituíram por duas fendas (Figura 19). Verificaram então que as marcas no

alvo, provocadas pelos choques dos elétrons em sua superfície, apresentavam um padrão de interferência quando usavam a fenda dupla, assim como ocorria no experimento de Young, com franjas claras em regiões que os elétrons estariam impedidos de atingir.

Figura 19 – Representação do experimento da dupla fenda realizado por Davisson e Germer.



Fonte: <https://slideplayer.com.br/slide/2327989/> (adaptado). Acesso em 21/04/2025.

Apesar de comprovar a teoria de De Broglie, uma questão lógica permanecia sem resposta: O que faria o elétron “se transformar” em onda no caso da dupla fenda? Esse experimento foi replicado mais tarde colocando-se detectores nas fendas para aferir o que acontece com os elétrons ao atravessá-las. O resultado dessa experiência foi o desaparecimento da figura de interferência no anteparo, dando a impressão de que a observação induz a “escolha” do tipo de comportamento que o elétron apresentará. Esta anomalia pôde ser explicada com a evolução da TQ, mais precisamente por meio do Princípio de Incerteza de Heisenberg que atribuía uma alta imprecisão na medida devido à interação do detector com o elétron. Na verdade, essa explicação só demonstrou a incapacidade de se compreender como a natureza age para gerar esse efeito contraditório (Ferreira e De Souza Filho, 2019)

Enfim, alcançada toda essa compreensão sobre a luz, técnicas de manipulação e análise das radiações, como a espectroscopia, além de métodos de investigação sobre a estrutura da matéria a partir da absorção de radiação por um material e detecção da radiação emitida por ele posteriormente, puderam ser construídos. Novos tipos de radiação como a luz síncrotron, que falaremos na sequência, foram criados e equipamentos cada vez mais avançados de tratamento e diagnóstico de doenças foram construídos com base nos conhecimentos produzidos por este paradigma atual.

Neste momento, as pesquisas caminham para a obtenção de novas tecnologias partindo desses conhecimentos, deixando os problemas sem soluções de lado temporariamente. Ou seja, os cientistas acreditam que o paradigma ainda pode ser explorado, ainda não se esgotaram as possibilidades de pesquisas que ele seria capaz de oferecer. Por este motivo, consideramos que atualmente os estudos sobre a luz se encontra em um período de *ciência normal*, cuja intenção dos cientistas é produzir mais conhecimento com base no paradigma do qual estão imersos. Não surgiram, até agora, problemas que impedissem o avanço da ciência nesta área. Os que ainda se encontram sem solução estão devidamente guardados para as futuras gerações, talvez de posse de um outras teorias, resolverem. Não é o momento, portanto, de se pensar na substituição desse paradigma.

5 A LUZ SÍNCROTRON: REVOLUÇÃO CIENTÍFICA OU CIÊNCIA NORMAL?

O Brasil atualmente faz parte de um seleto grupo de países do mundo que produzem tecnologia de última geração para análise da estrutura e comportamento de diversos tipos de materiais. O Sirius, acelerador de partículas genuinamente brasileiro, é a maior e mais complexa infraestrutura científica já construída no país e uma das mais avançadas fontes de luz síncrotron do mundo (CNPEM, 2025).

Este equipamento de grande porte produz luz síncrotron de alto brilho e amplo espectro, que atua como um potente microscópio permitindo a visualização da matéria em níveis atômicos devido à sua alta capacidade de penetração, contribuindo, por exemplo, para a criação de novas técnicas de pesquisas, melhores formas de extração de petróleo, desenvolvimento de novos fármacos, de materiais eletrônicos e de materiais para a construção civil (Coimbra, 2023).

O Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) é o responsável pela operação do Sirius e abriga instalações multiusuários, disponibiliza cursos de treinamento para os usuários e formação de pessoal em atividades de Pesquisa e Desenvolvimento e Inovação (PD&I), oferece bolsas para estudantes de graduação, além de fornecer curso de formação continuada para professores do ensino básico por meio da Escola Sirius para Professores do Ensino Médio (ESPEM). A luz síncrotron, portanto, apresenta diversas aplicações que beneficiam a sociedade, desde a pesquisa científica e o desenvolvimento de materiais em geral, até a educação em ciências.

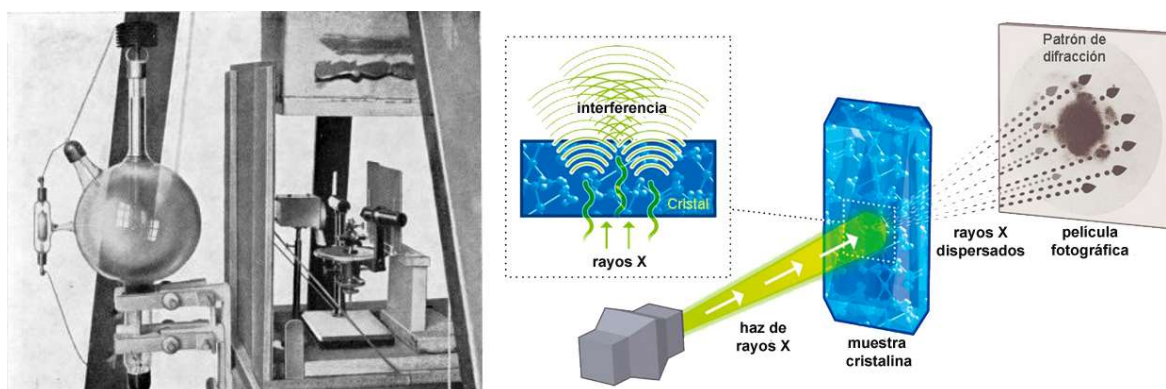
Neste capítulo abordaremos o tema da luz síncrotron desde a sua descoberta e definição, os conceitos físicos envolvidos no processo de produção dessa radiação e as suas aplicações. Com isso, pretendemos identificar em que fase de desenvolvimento da ciência segundo Kuhn a luz síncrotron se encontra atualmente. Ela representou uma *revolução científica*, mudando a concepção que se tinha a respeito da luz? Ou a sua descoberta ocorreu devido ao aprofundamento do paradigma vigente que direcionou as pesquisas na busca de uma radiação mais potente e penetrante? Dedicaremos também um espaço para falar sobre o Sirius, contando como foi o seu processo de construção, a sua estrutura atual e as perspectivas futuras. O objetivo dessa investigação é compreender como fatores extra científicos como econômicos, políticos e até mesmo as idiosincrasias individuais, influenciam nos rumos da ciência em um país. Por último, como parte do legado que este trabalho pretende oferecer, apresentaremos a ESPEM discutindo a sua importância para o ensino de ciências.

5.1 O QUE É A LUZ SÍNCROTRON?

A luz síncrotron é definida como uma radiação eletromagnética de altíssimo brilho contemplando ampla faixa espectral (desde o infravermelho até os raios X). A particularidade da luz síncrotron está na sua baixa emitância, ou seja, feixe com alto fluxo de fótons, mas com tamanho e divergência angular reduzidos. Essas características propiciam, a esse tipo de radiação, apresentar um alto brilho, polarização ajustável e feixe altamente colimado.

A Ciência dos Materiais⁷ é a principal área de aplicação da luz síncrotron, que se tornou uma poderosa ferramenta de investigação das propriedades estruturais, eletrônicas e magnéticas da matéria. O surgimento da Cristalografia⁸ e das suas técnicas de sondagem e análise de materiais, permitiram que informações sobre a estrutura da matéria em nível atômico fossem captadas. Os métodos cristalográficos se baseiam nas propriedades dos raios-x que foram descobertos por Rontgen e posteriormente estudados por Max von Laue (1879-1960). Este último percebeu que um feixe colimado de raios-x, ao atravessar um cristal, sofria difração. Uma placa de filme, colocada perpendicularmente à direção de incidência da radiação, capturou uma imagem simétrica e perfeita que revelava a organização estrutural de um cristal (Torriani, 2014). A Figura 20 ilustra o experimento que Von Laue⁹ realizou para chegar a essa conclusão.

Figura 20 – Foto do equipamento e descrição do experimento de Max von Laue.



Fonte: Nature (vol. 505, p. 602, 2014).

⁷ Ciência dos Materiais é a área que estuda a composição, estrutura e propriedades dos materiais (Smith; Rosa, 1998).

⁸ Cristalografia é a área multidisciplinar, voltada ao estudo da estrutura atômica de materiais e proteínas a partir da difração de raios X em cristais (FAPESP, 2024).

⁹ O experimento de Max Von Laue, realizado em 1912, abriu caminho para o uso dos raios-x como ferramenta de estudo dos materiais, lhe concedendo o prêmio Nobel de Física em 1914 (Torriani, 2014).

Esse experimento de Max von Laue, cujo funcionamento consiste na visualização do ordenamento atômico e magnético por meio do espalhamento dos raios-x, deu origem a novas técnicas de microscopias. A evolução dessas técnicas culminou com o desenvolvimento da luz Síncrotron, que é produzida por aceleradores de elétrons e contém raios-x de alta intensidade e coerência possuindo maior poder de penetração nos materiais.

A radiação síncrotron foi observada pela primeira vez em 1947, no síncrotron de elétrons de 70 MeV do laboratório de pesquisa da General Electric (GE) em Schenectady, Nova York. O cientista Herbert Pollock, então pesquisador da GE, colocou o acelerador de elétrons em sua potência máxima e observou uma radiação com um alto brilho formada nas paredes de proteção do laboratório (Pollock, 1983).

A exploração dessa radiação demorou a acontecer devido às máquinas síncrotrons (aceleradores de elétrons) terem sido construídas para atuarem nos estudos de colisões de partículas, isto é, trabalhavam em “regime parasita”. Com o passar dos anos, os cientistas foram se interessando pela radiação Síncrotron à medida que as possibilidades de pesquisa com a utilização dos aceleradores de elétrons estava se esgotando. O avanço das técnicas cristalográficas, por meio da difração de raios-x, abriu as portas para a aplicação da radiação síncrotron na microscopia (Craievich, 1985).

A utilização da luz síncrotron como um microscópio baseia-se na obtenção de imagens por contraste produzido pela absorção dos raios-x, proporcionando a visualização em tempo real e com resolução nanométrica da estrutura molecular. Esse avanço tecnológico permitirá o desenvolvimento de pesquisas encaradas como desafios futuros para a ciência como, por exemplo, compreender o funcionamento de mecanismos biológicos fundamentais (Torriani, 2014).

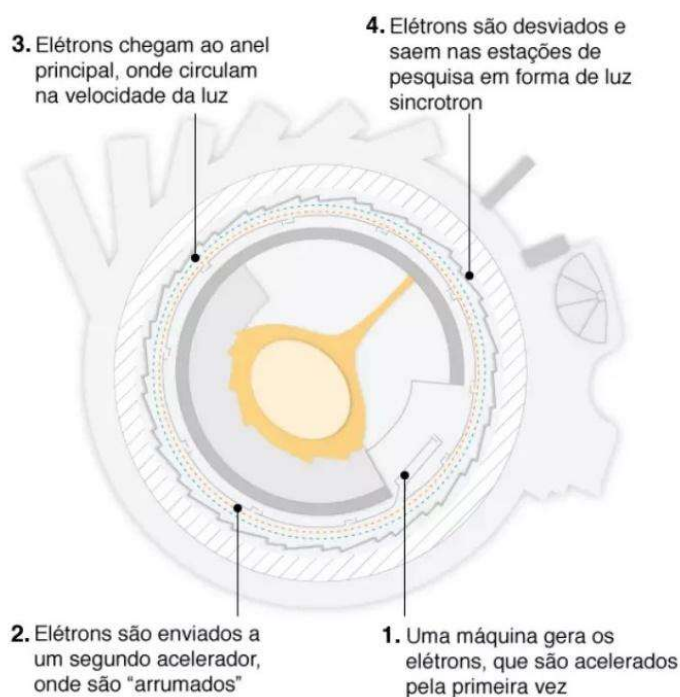
A geração de luz síncrotron é feita por aceleradores de partículas usados como fontes de luz. Resumidamente, elétrons são injetados em uma câmara de vácuo onde vão sofrer a ação de campos magnéticos para fazerem curvas, adquirindo assim aceleração centrípeta. De acordo com o eletromagnetismo, cargas aceleradas emitem luz, portanto, cada vez que os elétrons sofrem este desvio de suas trajetórias a luz síncrotron é gerada (Pasquini, 2010).

Os aceleradores de partículas, embora se diferenciem quanto à sua aplicação e tipo de partícula que utilizam, são regidos pelas mesmas leis físicas para funcionarem. Podem ser do tipo colidores, cuja finalidade é observar a estrutura interna das próprias partículas postas para colidirem, bem como alguns fenômenos resultantes dessas experiências, ou do tipo fontes de luz, cujo objetivo é produzir luz de altíssima intensidade e qualidade que será usada para estudar a organização estrutural interna dos materiais. Mas ambos compartilham conhecimentos de Física

como: movimento circular, campos elétricos e magnéticos, relatividade e física quântica (Pasquini, 2010).

A Figura 21 a seguir mostra a estrutura de um acelerador de partículas usado como fonte de luz síncrotron.

Figura 21 – Esquema de funcionamento de uma fonte de luz síncrotron.



Fonte: CNPEM. Ano: 2023

No Brasil, o interesse pela construção de um equipamento para produzir e realizar pesquisas com a luz síncrotron começou no início da década de 80, mas, discordâncias políticas, dificuldades para encontrar financiamento e fragilidades nos projetos apresentados, acabaram atrasando em mais de uma década a inauguração do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) junto com o seu primeiro anel de luz síncrotron, o UVX (Rauen, 2017). A fonte de luz síncrotron UVX, inaugurada em 1997, era considerada de 2ª geração e, portanto, se tornou incapaz de realizar experimentos mais avançados. Porém, em 2020 foi inaugurada uma fonte de luz síncrotron de última geração (4ª geração), o acelerador de partículas Sirius, que se tornou a maior obra de infraestrutura científica já construída no país.

Atualmente o Sirius, acelerador de partículas cujo nome é uma referência à estrela mais brilhante observada no céu a partir de ambos os hemisférios da Terra e pertencente à constelação do Cão Maior, produz luz síncrotron de maior brilho no mundo dentro da faixa de energia que utiliza, permitindo assim, uma redução no tempo de aquisição de dados, melhora da precisão dos

resultados das medidas e um aumento do número de amostras que podem ser analisadas em um mesmo intervalo de tempo, em comparação com os experimentos realizados atualmente pelo UVX. Na Figura 22 temos uma imagem produzida pelo Sirius, na qual observamos uma alta resolução em 3D¹⁰ e riqueza de detalhes internos da amostra. Em sua primeira fase de operação, o Sirius abriga 14 linhas de luz sendo 10 em operação e duas em montagem, mas foi planejado para abrigar até 38 linhas que servirão para solucionar problemas em áreas estratégicas para o desenvolvimento do país (CNPEM, 2025).

Figura 22 - Primeira imagem de microtomografia de raios X da linha Mogno, do Sirius, de uma rocha com composição similar às das rochas do pré-sal brasileiro.

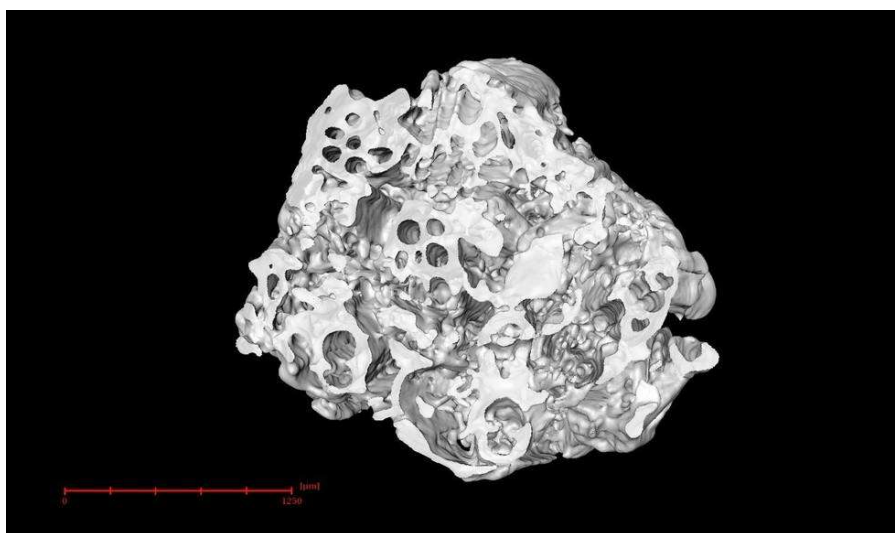


Foto: Reprodução/CNPEM

Analisando o que foi apresentado até aqui a respeito do que é a luz síncrotron, como foi desenvolvida e aplicada, podemos concluir que ela nasceu da tentativa de melhorar a precisão das imagens cristalográficas. Traçando um paralelo com a teoria de Kuhn, notamos que, neste processo de desenvolvimento, houve uma quebra de paradigma em nível epistemológico, originando mudanças nos métodos experimentais, nos padrões de avaliação dos resultados e nos problemas definidos pelas pesquisas. Nesse aspecto, o surgimento da luz síncrotron pode ser encarado como uma *revolução científica*, ao menos para a Cristalografia.

Porém, a compreensão sobre a natureza e o comportamento da luz não se alterou, ou seja, continuou sendo definida como uma radiação eletromagnética e baseada na dualidade onda-partícula. Sendo assim, do ponto de vista conceitual, a luz síncrotron não é revolucionária, ou

¹⁰ O laboratório Sirius é uma ferramenta de pesquisa em 4D de alto nível, produzindo imagens 3D e em tempo real (CNPEM).

seja, não transformou a concepção que se tinha referente a luz. Ela sofre difração como qualquer onda eletromagnética, dispersão como ocorre com a luz branca e emite brilho como qualquer luz visível, características que corroboram com o paradigma vigente. Para gerar luz síncrotron foi preciso apenas encontrar uma maneira de tornar mais intensa e coerente a radiação emitida por elétrons acelerados. Essa é uma das funções dos cientistas durante o período de *ciência normal*, criar soluções, matemáticas e/ou experimentais, de concretizar o que está previsto pelo paradigma. Assim como procuramos as peças que montem um determinado quebra-cabeça, os cientistas desenvolveram técnicas e equipamentos capazes de produzir luz com essas características da radiação síncrotron.

O Dr. Antônio José Roque da Silva, diretor do LNLS, afirma que o Sirius funcionará ainda por décadas, o que corrobora com a ideia de que a luz síncrotron está vivendo um período de ciência normal. Os cientistas, reconhecendo que esta tecnologia opera no limite do que a Física hoje permite, buscam se aprofundar nas possibilidades que ela pode oferecer para a ciência e a própria sociedade, confiando plenamente nos conhecimentos construídos pelo paradigma do qual estão imersos.

Na seção seguinte abordaremos como essa *ciência normal* se deu no Brasil mostrando como ocorreu o processo de construção do Sirius, começando pela decisão de investir em *Big Science*¹¹ no país, passando pela escolha da tecnologia a ser desenvolvida até chegar à estrutura atual dessa ciência de ponta.

5.2 A CONSTRUÇÃO DO SIRIUS

A construção do Sirius retrata como a Ciência e Tecnologia (C&T) no Brasil se modernizou nos últimos anos. A ideia de construir um acelerador de partículas para estudar e aplicar as propriedades da luz síncrotron teve início na década de 1980. Mas essa ideia partiu do desejo anterior, por volta dos anos 50, de se praticar a chamada *Big Science* no Brasil. Havia nessa época a percepção de que a ciência brasileira, que era predominantemente teórica, precisava se alinhar à pesquisa que estava sendo desenvolvida no exterior, mais especificamente nos Estados Unidos e na Europa. A física nuclear experimental era o mais moderno tipo de pesquisa praticado nesses lugares, mas requeria a construção de equipamentos de grande porte e grande investimento (Velho e Pessoa Jr, 1998).

¹¹ Big Science é um termo que pode ser entendido como Ciência de grande escala. Refere-se à prática da Ciência por meio de equipamentos de grande porte que requerem grandes investimentos (Velho e Pessoa Jr, 1998).

Um projeto para se construir uma máquina grande no Brasil foi criado, porém não chegou a ser concretizado por causa de problemas administrativos e técnicos. Em seguida, veio o golpe militar de 1964 que, entre vários prejuízos, afastou os cientistas do país e essa situação acabou suspendendo esse projeto temporariamente. No início dos anos 80, com um ambiente mais favorável politicamente, a construção de um grande equipamento de pesquisa voltou a ser cogitada. O físico Roberto Lobo, então diretor do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), sugeriu a construção de um laboratório de âmbito nacional que fornecesse infraestrutura e motivação para os pesquisadores trabalharem de forma competitiva. Este laboratório pensado por Lobo teria que possuir as seguintes características: ele deveria ser usado por pesquisadores de todo país independentemente das suas áreas de pesquisa, deveria permitir pesquisa de alta qualidade por um longo período de tempo, deveria ser uma novidade, deveria desenvolver capacitação tecnológica e gerar aplicações tecnológicas (Velho e Pessoa Jr, 1998).

Propostas de diferentes áreas da Física foram apresentadas, mas a radiação síncrotron estava chamando a atenção da comunidade científica naquele momento. A inauguração do National Synchrotron Light Source em Brookhaven (NY), em 1981, motivou países em desenvolvimento como o Brasil a optarem por construir um laboratório de luz síncrotron. Começava naquele momento um processo de convencimento junto às instituições que detinham o poder de autorizar esse projeto ambicioso.

O Projeto Síncrotron, assim chamado, tinha como argumentos a favor: colocar o Brasil em um patamar de competitividade com os países desenvolvidos, possibilidade de articulação da tecnologia com o setor produtivo e transformação do modelo de financiamento de pesquisas no Brasil. Este último argumento refere-se a financiar projetos grandes em vez de propostas de cientistas individuais, criando assim uma demanda induzida. Entretanto, logo surgiram argumentos contra o projeto, dentre eles: o deslocamento de verbas de outros projetos para o síncrotron e o fato de que o Brasil não deveria investir em *Big Science* sendo um país com tanta pobreza.

Uma resposta a esses argumentos contrários foi elaborada e discutida com a comunidade científica nacional em 1982. Mais informações sobre as possibilidades de pesquisa e crescimento tecnológico foram apresentadas, além da promessa de que novos recursos financeiros seriam injetados. Na pior das hipóteses, no caso de não se conseguir construir a máquina, o resultado seria positivo já que o Brasil, sendo o responsável por toda a construção e instalação do equipamento, iria adquirir o domínio de inúmeras técnicas novas. Essa tentativa, apesar de ainda receberem algumas críticas, foi aceita pela maioria dos envolvidos.

Os argumentos usados para conseguir a aprovação do projeto demonstram que o apelo político-estratégico estava acima do próprio interesse no desenvolvimento dos estudos da radiação síncrotron. O Brasil se encontrava atrasado com relação às pesquisas científicas, os conhecimentos produzidos não saíam das universidades, os cientistas estavam desmotivados e os recursos estagnados pela escassez de projetos. Era necessário promover uma mudança na maneira que a C&T vinha sendo praticada no Brasil. O investimento em um laboratório de grande porte não foi para responder a problemas científicos ou desenvolver aplicações tecnológicas, mas para estimular a capacitação e a inserção do Brasil em novo patamar de organização científica. Contudo, o processo de decisão pela *Big Science* no Brasil ficou restrito aos diretores de laboratórios, não sendo negociadas com o governo e nem com a comunidade de cientistas. Diferentemente da forma como ocorreu em outros países, em que houve primeiramente o desejo coletivo dos cientistas em ter o equipamento e audiências com o governo.

Aprovado o projeto para a construção do laboratório de luz síncrotron, o próximo passo seria definir o local onde este seria construído. Quatro cidades se candidataram a sede do laboratório: duas do Estado do Rio de Janeiro (do Rio e de Niterói) e duas do Estado de São Paulo (Campinas e São Carlos). Foram adotados como critérios de escolha: proximidade com universidades e indústrias, facilidade de aeroportos, instalações residenciais e escolares. Todas as cidades, com exceção de São Carlos, possuíam esses requisitos, mas Campinas tinha um maior apoio político.

Chegava então o momento de dimensionar o projeto, definir qual seria o tamanho e a capacidade do equipamento. Inicialmente iria se contemplar apenas a luz ultravioleta, aproveitando o acelerador linear que o CBPF já possuía, que trabalhava com energia de 300 MeV. Mas, alguns cientistas com experiência internacional em grandes equipamentos afirmavam que, para atrair o interesse de pesquisadores, a máquina tinha que chegar pelo menos aos raios X moles, necessitando assim da construção de um novo injetor que elevaria a faixa de energia operada pelo acelerador a 1 GeV. Outro grupo de cientistas e engenheiros igualmente experientes defendiam que os cristalógrafos, principais usuários da luz Síncrotron, só se interessariam por uma máquina que alcançasse os raios X duros. Para isso ela teria que ser redimensionada para 2 GeV, então os próprios cristalógrafos se colocaram contra, sugerindo que seria mais vantajoso financeiramente enviar os cientistas brasileiros para os laboratórios síncrotrons de outros países.

Com essa falta de apoio dos próprios cristalógrafos e as dificuldades financeiras se acentuando, percebeu-se que construir um acelerador de 2 GeV seria um projeto ambicioso demais. Entretanto, a ansiedade de criar o laboratório aliado às incertezas futuras quanto ao real interesse dos potenciais usuários, fez com que os responsáveis pelo projeto decidissem construir

um anel de 1,15 GeV. Uma atualização logo em seguida elevou a energia do anel para 1.37 GeV e assim, o então nomeado Laboratório Nacional de Luz Síncrotron iniciou os testes com as fontes de luz síncrotron. Esse anel, que era do tipo UVX, alcançando os raios X moles, operou de 1998 a 2018, sendo modernizado diversas vezes.

Todavia, com a evolução das pesquisas e técnicas de análise e manipulação de materiais, a fonte UVX (de 2ª geração) foi se tornando obsoleta, sua luz síncrotron se encontrava com capacidade penetrante limitada. Sua emitância passou a ser considerada alta e o fluxo de fótons bastante baixo para as novas aplicações, que exigiam altas resoluções espaciais e temporais. Como o UVX não poderia mais fornecer os dados que as pesquisas científicas e o setor produtivo precisavam, um novo anel de armazenamento, que alcançasse os raios X duros teria que ser construído, sob a pena do LNLS perder a atratividade (Craievich, 2020).

A decisão de construir um anel com essa capacidade começou a ser discutido em 2003. Um primeiro projeto, com o nome Sirius, foi apresentado em 2010 com especificações compatíveis com fontes de luz síncrotron de 3ª geração. Porém, o projeto foi concluído em 2012 prevendo a construção de um acelerador de 3 GeV com emitância 500 vezes menor do que a do UVX. Com essas características, o Brasil passaria a ser, ao lado da Suécia e França, um dos três países no mundo que possuem uma fonte de luz síncrotron de 4ª geração (Craievich, 2020). A Figura 1 mostra um mapa com a localização das fontes de luz síncrotron operando ou em construção pelo mundo em 2016.

Figura 23 – Fontes de luz Síncrotron pelo mundo.



Fonte: <https://cnpem.br/especial-sirius-o-novo-sincrotron-brasileiro-de-ultima-geracao/>. Acesso em 15/04/2025.

O Projeto Sirius se dividiu em 3 encomendas: as obras civis, o desenvolvimento de ímãs e a contratação das demais tecnologias dos aceleradores e das linhas de luz. Quanto às obras, o projeto exigia a garantia da estabilidade térmica e mecânica da edificação, bem como o isolamento da radiação produzida pelos aceleradores durante o período de operação destes. O cumprimento desses requisitos demandou esforço de engenheiros e pesquisadores para desenvolver tecnologia que não estava disponível no mundo (Rauen, 2017).

Os ímãs eram considerados como a parte mais importante do projeto, pois eles são os responsáveis pela obtenção de melhores valores de emitância e maior brilho, além fornecer estabilidade à trajetória do feixe de elétrons. Contudo, ímãs capazes de executar essas funções teriam que ser desenvolvidos, ou seja, não haviam empresas que fabricassem esses dispositivos. A equipe gestora do Projeto Sirius identificou a WEG, cuja especialidade é fabricar motores elétricos, como uma empresa potencialmente capaz de confeccionar esses ímãs. As especificações dos ímãs requeridas pelo Projeto Sirius representavam uma inovação tecnológica para essa empresa. O desafio a ser superado por ela seria a precisão na construção dos ímãs, qualquer saliência ou aresta levaria a perdas de eficiência destes. Esta missão acabou sendo importante para a WEG que adquiriu *expertise* no desenvolvimento de ímãs para aceleradores de partículas, gerando assim, o interesse de outros países em importar essa tecnologia. Na Figura 24 temos a imagem de um ímã que compõe a rede magnética do Sirius (Rauen, 2017).

Figura 24 - Protótipo do quadrupolo desenvolvido pela WEG.



Fonte: Imagem concedida pelo CNPEM.

A última etapa encomendada pelo Projeto Sirius, conforme mencionado anteriormente, foi o desenvolvimento das demais tecnologias dos aceleradores e das linhas de luz. Diferentemente das etapas anteriores, em que o LNLS contratou as empresas de maneira direta utilizando recursos próprios, a encomenda das demais tecnologias foi realizada por meio de um

processo de seleção pública de projetos. Foram definidos alguns desafios referentes ao desenvolvimento de tecnologias oriundas do segmento de instrumentação científica e da ciência de precisão, nas mais diferentes áreas de aplicação dentro do projeto, e lançados às empresas na forma de editais de concorrência. Após esse processo de encomendas o Sirius foi finalmente construído e começou a operar em 2020.

O histórico da construção do Sirius, relatado aqui, possui alguns aspectos que dialogam com a visão de Kuhn sobre o fazer científico. Observamos que interesses políticos e econômicos, atrelados ao contexto histórico e cultural de uma nação, são capazes de direcionar as decisões científicas. Neste caso, podemos afirmar que as escolhas feitas para construção do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron foram de tipo “racional”? Uma decisão “racional” pode ser considerada aquela que satisfaça aos interesses comuns de uma comunidade, a qual se chega através de longas discussões entre indivíduos e grupos locais, resultando em uma seleção imparcial do que aparenta ser a melhor alternativa. O fato de haver uma justificativa racional para uma decisão não implica que não haja concomitantemente um jogo de interesses por trás da decisão.

Mesmo que essas questões políticas se sobreponham ao objetivo da ciência, que é de produzir conhecimento, as decisões científicas não deixam de ser racionais. Os cientistas, ao tentarem convencer seus grupos ou até mesmo os governantes, expõem os valores que adquiriram durante a sua vida profissional. Acreditam que o investimento em determinada pesquisa, da qual valorizam, trará benefícios para a sociedade e para eles em particular. Porém, muitas vezes esses benefícios prometidos pelo projeto do cientista não compensam um esforço financeiro ou o deslocamento das pesquisas. Então o poder de persuasão vai ser crucial para alcançar a aceitação e o apoio da comunidade científica. O passar do tempo, as movimentações políticas e novas evidências também contribuíram para a decisão de implementar a *Big Science* no Brasil.

Os últimos anos de ditadura trouxeram uma certa estabilidade econômica, política e social para o país, as nomeações para cargos de direção das instituições científicas promoveram alianças políticas importantes, a evolução das pesquisas no exterior mostrava que a luz Síncrotron estava fornecendo resultados promissores. Esse cenário acabou fortalecendo os argumentos a favor do Projeto Sirius, reduzindo a desconfiança de muitos cientistas e aumentando as chances de alcançar um consenso.

Outra peculiaridade do processo de construção do Sirius foi a forma com que os recursos foram aplicados. A opção por se produzir todo o equipamento no próprio país, como uma forma de adquirir *expertise* e estimular projetos correlatos, determinou uma quebra de paradigma relacionado ao fomento da ciência no Brasil.

Em resumo, vimos que a ciência utiliza caminhos alternativos para viabilizar o cumprimento dos seus objetivos. O desejo de investir em superlaboratórios com equipamentos de grande porte se justifica mais pela força estratégica e política do que propriamente o desenvolvimento científico. Apesar disso, há sempre um retorno intelectual e prático no fim desse processo. Essa força estratégico-política se dá pelo poder que a comunidade científica tem de influenciar os chefes das nações e a sociedade. Uma determinada pesquisa não recebe apoio se não estiver no escopo daquelas que estão no centro das discussões atuais. O domínio sobre esses temas e a sua respectiva tecnologia associada atrai investimentos, eleva a competitividade no mercado e promove a independência de um país. Para o diretor do LNLS, Dr. Antônio José Roque da Silva, é fundamental se investir em C&T já que elas podem apresentar soluções em momentos de crise.

5.3 A ESCOLA SIRIUS PARA PROFESSORES DO ENSINO MÉDIO

Como já foi dito anteriormente, dentre as múltiplas funções exercidas pelo LNLS está a formação e qualificação de pessoal para atuarem em atividades de PD&I. Porém, a ciência e tecnologia de ponta que vem sendo produzida no Brasil precisava ser divulgada. Essa divulgação se torna ainda mais importante se realizada nas escolas e, pensando assim, um grupo com representantes do LNLS e da Sociedade Brasileira de Física criaram a Escola Sirius para Professores do Ensino Médio (ESPEM), cujo objetivo era proporcionar uma formação continuada para professores, que já estavam atuando em sala de aula, por meio de um curso que colocasse os docentes em contato com a mais alta tecnologia de ponta desenvolvida e aplicada no Brasil (Acioly et.al, 2020).

O curso oferecido pela ESPEM é ministrado pelos profissionais do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) e conta com aulas teóricas e práticas, além de palestras de convidados das áreas de educação e ciências. Os professores participantes visitam as instalações dos laboratórios que fazem parte do CNPEM e são introduzidos às pesquisas e desenvolvimentos nas áreas de atuação desse centro. Há também um espaço para discussões sobre estratégias de ensino e troca de experiências entre os professores de todo o Brasil, estimulando-os a levarem ideias para as salas de aula onde atuam.

A primeira turma, formada em 2019, contou com 20 professores de 16 estados e do Distrito Federal. O curso teve duração de 5 dias e a programação continha aulas teóricas, visitas aos laboratórios, seminários com pesquisadores do CNPEM e oficinas para elaboração de

propostas didáticas. O conteúdo das aulas incluiu tópicos como: aceleradores de partículas, produção de luz síncrotron, óptica de raios X e detectores, e conceitos básicos de técnicas experimentais como espalhamento e difração, espectroscopia, entre outros. Os participantes avaliaram bem o curso, enxergando como uma oportunidade de envolvimento efetivo dos professores de física do Ensino Médio com a física moderna, a pesquisa científica e a inovação. Reconheceram também que a experiência proporcionada pela ESPEM contribuiu para as suas práticas pedagógicas (Acioly et.al, 2020).

A partir de 2021 a ESPEM passou a selecionar também professores de Biologia e de Química. A 7ª edição ocorreu este ano entre os dias 13 e 17 de janeiro, contando também com aulas teóricas, palestras, visitas aos laboratórios e oficinas didáticas. Dessa vez, 60 professores de Física, Química e Biologia participaram do curso. Outra novidade foi o convite para ex-participantes ministrarem algumas palestras.

Apesar de contar com uma variedade de atividades e estratégias didáticas, o foco da ESPEM é promover a aproximação dos professores com a prática científica. Para Kuhn a prática científica se concretiza no que ele chama de *ciência normal*? Durante este período, que representa quase sempre o tempo vivido por uma geração inteira, os cientistas trabalham de maneira acrítica imersos em um paradigma, ou seja, plenamente confiantes de que os métodos e conhecimentos que estão usando fornecerão as respostas que buscam em suas respectivas pesquisas. Da mesma forma, ao ensinar os professores mostrando como a ciência é praticada, essa escola estará promovendo uma educação dogmática, no sentido em que não há dúvidas sobre o que está sendo ensinado.

Os pesquisadores usam em seu trabalho um conjunto de padrões, instrumentos e técnicas que adquiriram com a educação que receberam. Essa educação é feita por meio de manuais contendo um conjunto de leis e problemas já solucionados, que servirão como exemplos para a resolução de futuras questões com as quais os cientistas irão se deparar em seu trabalho. Um estudante de ciências, que se tornará um profissional da área, não é estimulado a estudar a história da ciência já que esta pode trazer outros olhares para uma mesma situação, apresentar-lhe conceitos e padrões de resoluções de problemas que a sua futura profissão já descartou (Kuhn, 2012).

Enfim, Kuhn (2018) considera esse tipo de ensino, rígido e estreito, eficaz para a educação científica. Mas essa eficácia pode ser estendida ao ensino de ciências? Alunos que não serão cientistas podem ter a sua aprendizagem facilitada por esse método rígido de ensino? Essas questões serão apresentadas e discutidas adiante no capítulo “A epistemologia de Kuhn e o ensino de Física”.

6 A HISTÓRIA DA CIÊNCIA COMO RECURSO DIDÁTICO

A ciência foi sendo construída ao longo do tempo influenciada pelos interesses da sociedade, contribuindo para o bem-estar e a segurança das pessoas, e até mesmo por motivos econômicos. Dessa forma, a trajetória da ciência tomou diversos rumos, com muitos erros e acertos originando fatos históricos que nos ajudam a entender que o conhecimento científico não provém exclusivamente da genialidade de alguns homens, como nos é apresentado muitas vezes nas escolas, mas da contribuição de várias pessoas que se dedicaram ao estudo da natureza. Não ter essa compreensão sobre a ciência torna o seu ensino mais difícil e desmotivante (Martins, 1990a).

De acordo com Martins (2005, p. 314), “A história da ciência é feita por seres humanos e se constitui em uma reconstrução de fatos e contribuições científicas que ocorreram, muitas vezes, em épocas distantes da nossa”. Sendo assim, a HC fornece elementos que revelam a natureza da ciência, como ela é construída e disseminada. Podemos perceber que o conhecimento científico é dinâmico e constantemente reformulado. Essas características da ciência podem ser úteis pedagogicamente, pois se opõem a um ensino dogmático, acrítico e longe da realidade, ensino este que queremos modificar.

Gurgel (2020) defende que não basta os alunos entenderem os conteúdos das ciências, é preciso que esses conhecimentos sejam justificados e, neste sentido, a HC pode ser considerada o principal meio de apresentar como a ciência é construída. Mas, apresentar episódios históricos de forma excessivamente simplificada e com a visão atual de mundo pode provocar uma concepção distorcida do fazer científico e de que antigas teorias estavam erradas devendo, portanto, serem descartadas.

Para Oliveira e Silva (2012), um ensino de ciências de qualidade deve desenvolver no aluno um pensamento crítico e criativo, preparando-o para lidar com as inovações tecnológicas e capacitá-lo a fazer uso social dos conteúdos científicos aprendidos. A memorização de fórmulas e leis, as técnicas de resolução de exercícios, são importantes para o aprendizado científico sendo defendidos até mesmo por filósofos como Thomas Kuhn. Mas a utilização exclusiva desta metodologia produz um conhecimento efêmero, limitado a situações específicas e sem significado para o aluno.

Neste sentido, a HC pode suscitar nos estudantes um encadeamento lógico do método utilizado pelos cientistas para se chegar a uma teoria. As controvérsias e erros cometidos por eles contribuem para a visão de uma ciência humanizada e viva, pois, as crenças e hábitos culturais dos cientistas estão impregnados em suas teorias. Todas estas características apresentadas pela

HC tornam mais fácil a compreensão dos conteúdos abordados pelos professores, consolidando e fortalecendo o aprendizado. Briccia e Carvalho (2011) afirmam que é possível motivar os alunos em relação ao seu interesse pelo estudo da ciência e melhorar a participação no processo de ensino-aprendizagem ao utilizar a HC como estratégia de ensino de Física. Para Martins (2005), a História da Ciência não tem a capacidade de substituir o ensino comum das ciências, mas é capaz de complementá-lo de várias formas.

Convencido de que a HC pode ser útil ao aprendizado, qual abordagem o professor deverá usar? A Internalista, baseada nos conteúdos conceituais? Ou a Externalista, que se baseia em fatores extra científicos no desenvolvimento da Ciência (Oliveira e Silva, 2012)? O enfoque na racionalidade e objetividade científica é defendido por muitos pesquisadores já que estes valores levaram o homem a interpretar a natureza com maior precisão e avançar tecnologicamente. O enfoque sociológico, por sua vez, pode contribuir para a compreensão dos alunos sobre a natureza da ciência, que é resultado de um processo histórico e social, ajudando também a formar cidadãos críticos e ativos (Greca e Freire, 2004). Em contrapartida, essa abordagem Externalista pode levar a um descrédito da ciência, por parte dos estudantes, devido ao seu caráter relativista.

Apesar dessas terminologias (Internalista e Externalista) ainda serem usadas, atualmente o termo “história contextual” vem aparecendo em muitos trabalhos. Os diferentes contextos em que a ciência foi e vem sendo construída, tem servido como um guia para o seu desenvolvimento e didaticamente interessante para o seu ensino. Como exemplos, lembramos que o contexto econômico impulsionou a construção das máquinas térmica e a 2ª Guerra Mundial motivou a produção das bombas atômicas (Gurgel, 2020).

Outra discussão sobre a metodologia de utilização da HC diz respeito ao material que o professor utilizará. Fontes primárias, com textos e obras originais produzidas pelos cientistas? Ou secundárias, por meio de textos e trabalhos produzidos por historiadores? Silva (2012) ressalta que: “[...] alguns textos históricos, devido ao seu caráter acadêmico, não são possíveis de serem trabalhados em sua forma original, necessitando adaptações compatíveis com o grau de instrução do público-alvo”. (Silva, 2012, p. 3).

Um exemplo dessa contraindicação seria trabalhar no Ensino Médio (EM) com a obra “Princípios Matemáticos da Filosofia Natural”, de Isaac Newton (1687). Sua linguagem extremamente matemática e o uso de uma geometria complexa como método dedutivo dificultariam a compreensão do aluno. Portanto, a intervenção do professor se faz necessária para realizar a transposição didática deste material.

As fontes secundárias e os textos didáticos também apresentam problemas que podem comprometer a aprendizagem. Equívocos encontrados nos textos somados à falta de

conhecimento sobre o tema por parte dos professores podem acarretar transmissões de concepções distorcidas da ciência em sala de aula. (Silva *et al.*, 2014). Sendo assim, adaptações devem ser feitas com cuidado para evitar generalizações, simplificações e omissões danosas ao processo de ensino-aprendizagem.

Os livros didáticos, em geral, contêm textos que se baseiam na HC como complemento pedagógico dos conteúdos presentes em cada um dos seus capítulos. Esses textos, porém, se apresentam de forma resumida, contemplando apenas os sucessos obtidos, dando a ideia de uma ciência incontestável e construída apenas por grandes gênios. Ou seja, suprimem partes importantes do processo de elaboração das teorias, que facilitariam a compreensão dos alunos e não simplesmente a memorização. Isso ocorre tanto em livros do Ensino Básico (EB) quanto do Ensino Superior (ES), mas a diferença de objetivos pedagógicos entre estes dois níveis de ensino reduz a importância desse tipo de abordagem no caso do ES.

A principal referência de indicação de livros didáticos, o Programa Nacional do Livro Didático (PNLD), analisa, seleciona e distribui para as escolas públicas de todo o território brasileiros os exemplares, visando a universalização dos conteúdos. Possui um programa específico para o EM, o Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio (PNLEM). Porém, com o advento da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), o PNLD se adequou e elaborou uma coleção única atendendo às mudanças implementadas por esse documento. Essa coleção, dividida em quatro grandes áreas, possui os seguintes volumes para a área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias: Matéria, Energia e a Vida; Movimentos e Equilíbrios na Natureza; Eletricidade na Sociedade e na Vida; Origens; Ciência, Sociedade e Ambiente; Ciência, Tecnologia e Cidadania.

Estes livros propõem um ensino partindo da contextualização histórico-social com situações do cotidiano dos alunos. Elementos de HC são raros, mas quando aparecem são introduzidos de forma bastante pontual através de menções a teorias, leis, fórmulas ou equipamentos criados por cientistas consagrados. Ou seja, apenas com o objetivo de situar historicamente algum conceito e não como estratégia ou complemento pedagógico. Nota-se, portanto nestes livros o tecnicismo prevalecendo sobre o pensamento crítico, apresentando uma ciência hegemônica e neutra em oposição à realidade sempre em construção na qual observamos.

As escolas particulares, muitas delas, utilizam apostilas com a mesma estrutura e até mais resumida que essa coleção do PNLD. Mas, as que ainda optam pela utilização do tradicional livro didático, podem contar com alguns textos de HC contidos neles. Porém, como já foi dito anteriormente, estes textos pouco acrescentam didaticamente se restringindo apenas a aguçar a curiosidade do aluno quanto à biografia de alguns cientistas ou seus feitos.

Carvalho e Garcia (2015) analisaram os livros indicados pelo PNLD 2012 para verificar como a HC tem sido apresentada nos livros de Física, não apenas em boxes do tipo “Você sabia?”, como no decorrer de todo o texto contido em cada capítulo. Após confirmar a presença de elementos de HC, estes foram categorizados quanto aos aspectos internos e externos e analisados quanto à Interação, Atores, Métodos e Construção da Ciência. Nesta ordem, verificavam se uma teoria era apresentada como um trabalho individual ou em colaboração; se os cientistas menos consagrados também eram citados assim como os seus perfis sociais; como o método de desenvolvimento da teoria é explicado em cada assunto; se estão sendo evidenciados não apenas os acertos, mas também os erros e controvérsias, bem como se a ciência é construída cumulativamente.

Como resultado desta pesquisa constatou-se que a maioria dos livros abordava a história da ciência através de figuras (fotografias) históricas mostrando grandes realizações, ênfase em um método científico padronizado e praticado individualmente e uma ciência construída através de fatos isolados. Dessa forma, os autores concluíram que a forma como a HC é utilizada nos livros didáticos contribui muito pouco ou quase nada para o ensino, sendo assim, defendem mais pesquisas sobre a utilização da HC no ensino de Física e a sua inserção nos livros didáticos.

O Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), principal concurso de ingresso às universidades, possui um conteúdo programático, chamado de Matriz de Referência, em que é listado um conjunto de habilidades e competências no qual os candidatos terão que demonstrar ao realizarem as provas. Dentre as habilidades exigidas dos candidatos referentes à prova da área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias podemos citar: “Confrontar interpretações científicas com interpretações baseadas no senso comum, ao longo do tempo ou em diferentes culturas” (Brasil, p. 8, 2022). A Matriz de Referência do ENEM foi elaborada com base nas diretrizes curriculares contidas na BNCC, que por sua vez, também valoriza a abordagem histórica dos conteúdos. Sobre isso, menciona em seu documento: “A contextualização social, histórica e cultural da ciência e da tecnologia é fundamental para que elas sejam compreendidas como empreendimentos humanos e sociais” (Brasil, p. 549, 2018).

Portanto, observamos que a HC, além de se mostrar um recurso com grande potencial didático, possui um corpo de conhecimento exigido tanto pelas diretrizes curriculares vigentes quanto pelos vestibulares.

7 A EPISTEMOLOGIA DE KUHN E O ENSINO DE FÍSICA

A visão de Thomas Kuhn sobre fazer científico é absorvida por diversos campos de estudos além das ciências físicas, incluindo aqueles considerados ciências sociais. Não obstante, a pesquisa em educação também tem se apropriado de suas ideias centrais como podemos ver em diversos trabalhos (Bailey, 2006).

Melesse e Yayeh (2020) apontam quatro lições valiosas para os educadores que o livro “A Estrutura das Revoluções Científicas” podem fornecer: 1) a necessidade de revisitar os desafios atuais da pesquisa educacional; 2) a necessidade de lutar por mudanças de paradigma em algumas teorias e pensamentos educacionais; 3) a necessidade de repensar a escrita de livros didáticos e; 4) a necessidade de redefinir os termos ciência e cientista no campo da educação.

A pesquisa educacional, não apenas em ensino de Física, atualmente se assemelha ao que Kuhn chama de pesquisa científica normal, pois trabalha imersa em alguns paradigmas que não são questionados assim como fazem os cientistas, que agem de forma acrítica durante o período de *ciência normal*. Dessa forma, não reconhecem os problemas educacionais como anomalias, tampouco percebem que estão vivenciando um período de crise. Mas, aos poucos, essa prática tem levado pesquisadores e professores a duvidar da capacidade de evolução no campo da educação, essa é uma característica marcante do reconhecimento da *crise* segundo Kuhn. A insistência em métodos científicos rígidos e a predominância da abordagem quantitativa têm produzido muitos trabalhos, mas que efetivamente não ajudam a melhorar a educação, portanto é emergente a busca por outro paradigma. Muitos pesquisadores têm defendido uma valorização dos métodos qualitativos para a pesquisa educacional e, entendendo a educação como um processo social, aplicar métodos elaborados por cientistas sociais. Mas essa mudança de paradigma precisa começar nas universidades, que enfatizam as metodologias de pesquisa e pouco se discute a filosofia e a história das diferentes abordagens de pesquisa (Melesse e Yayeh, 2020).

Com relação à educação científica, para aqueles que se tornarão cientistas, Kuhn contraria o pensamento atual dos pesquisadores da área de Ensino de Física. Enquanto o ensino da Física caminha na direção de uma abordagem mais crítica, Kuhn defende ser necessário um método educacional rígido para formar cientistas. Para ele, saber como o conhecimento científico foi adquirido e por que foi aceito pela comunidade científica representam excesso de bagagem para a formação do aluno, pois o objetivo da educação científica é formar pesquisadores competentes

e isso só ocorrerá se estes dominarem os métodos e conceitos determinados pelo paradigma no qual sua pesquisa está imersa (Bailey, 2006).

Popper é um dos filósofos da ciência que criticam essa interpretação de Kuhn de que a educação científica é dogmática. Para Popper o cientista não crítico que aceita o dogma ou paradigma foi mal-educado em ciência, pois aprendeu apenas a aplicar a teoria sem saber por que, sofreu doutrinação. Sua formação deveria ser crítica e não somente um treinamento para a resolução de quebra-cabeças (Rosa, 2006).

As ideias de Popper a respeito do fazer ciência inspiraram pesquisadores em educação que enxergaram analogias com o processo de aprendizagem dos alunos. A mudança conceitual, processo pelo qual o aluno reorganiza ou substitui suas concepções sobre um tema, e que ainda é defendido por muitos educadores, pode ser alcançada questionando-se a veracidade das teorias e promovendo um debate racional com regras bem definidas em que novas ideias são apresentadas e comparadas entre si para a escolha daquela que mais se aproxima da verdade, assim como Popper entende o desenvolvimento da ciência. Porém, ao desconsiderar fatores externos como interesses políticos e econômicos, acaba gerando a ideia de uma ciência neutra e sabemos que essa ideia não condiz com a realidade (Rufatto e Carneiro, 2009).

Assim como Popper, a visão de Kuhn referente ao desenvolvimento científico também contribuiu para a construção do conceito de mudança conceitual. Segundo Posner (1982), essa mudança conceitual ocorreria analogamente a uma *revolução científica*. Mas, diferentemente de Popper, Kuhn defendia que as mudanças teóricas ocorrem não por causa de um experimento crucial e sim pelo confronto entre paradigmas. Além disso, são influenciadas por fatores chamados de “extra científicos” como financiamentos de pesquisa, hegemonia de comunidades acadêmicas e até mesmo cargos importantes (Rufatto e Carneiro, 2009).

Feyerabend, outro filósofo da ciência que confrontou a tradição positivista e inspirou metodologias educacionais, afirmava que a ciência não se desenvolvia por meio de um único método e que todos os tipos de regras possuíam um limite. Essas regras, em algum momento, já foram violadas inclusive por grandes cientistas ao utilizarem maquinações retóricas, hipóteses *ad hoc* e diversos outros artificios para construir suas teorias. Assim, pregava que o progresso científico dependia da testagem de um maior número de teorias possíveis, um “pluralismo metodológico” (Abrahão, 2005). Comparando a Ciência a um monstro, Feyerabend disse em uma de suas conferências: “O monstro CIÊNCIA que fala como uma única voz é uma colagem feita por propagandistas, reducionistas e educadores” (Feyerabend, 2016, p.85). Essas ideias podem ser úteis aos professores pois, assim como a ciência se utiliza de diversos métodos de investigação e teorias para produzir conhecimento, segundo Feyerabend, a educação pode se

valer de várias metodologias para alcançar a aprendizagem dos alunos. E quanto mais metodologias de ensino o professor tiver à sua disposição, maiores serão as chances de escolher a(s) que obterá(ão) melhor(es) resultado(s).

Se por um lado o chamado racionalismo lógico de Popper induz a uma visão de ciência que preserva a tradição e métodos consagrados, com um único caminho para se chegar às soluções, Kuhn e Feyerabend apontam aspectos subjetivos e relativos como características do fazer científico. Essas duas concepções de ciência, tratadas de maneira isolada, podem prejudicar o ensino, limitando o raciocínio dos alunos, no caso de Popper, ou levando ao descrédito do que estão aprendendo, referindo-se às visões de Kuhn e Feyerabend. Afinal de contas, o método científico é a única forma de se chegar à verdade? Qual a função da ciência já que existem infinitas respostas que variam historicamente e culturalmente? Se existem infinitas crenças científicas, então não há um paradigma, e conseqüentemente não pode haver crise (Matthews, 2022).

Mesmo existindo contradições a respeito da utilização dessas epistemologias no ensino, muitos educadores se viram atraídos pelos conceitos de revolução científica, incomensurabilidade, quebra de paradigmas e rejeição da verdade cunhados por Thomas Kuhn (Matthews, 2022). Peduzzi (2011) afirma que as ideias de Kuhn, com destaque para o conceito de *revolução científica*, exercem fascínio sobre os estudantes, pois contrasta com a concepção cumulativa, inerte e inquestionável da ciência ensinada tradicionalmente nas escolas. Porém, alguns equívocos acerca da filosofia kuhniana precisam ser sanados e entendidos pelos professores antes que estes a utilizem didaticamente.

Raicik e Gonçalves (2022) citam mal-entendidos envolvendo o conceito de incomensurabilidade, levando a uma interpretação relativista da teoria de Kuhn. Por este motivo, faz-se necessário intervir nos processos de formação docente sob pena de transferir para os alunos essa concepção relativista que o professor possa ter adquirido. A ênfase dada por este professor a fatores externos no desenvolvimento da ciência pode enfraquecer a crença no poder do conhecimento científico por parte dos alunos, desestimulando o seu aprendizado.

Outra questão controversa é trabalhar didaticamente a mudança de paradigma provocada pela revolução científica na visão de Kuhn. Quando ocorre uma mudança de paradigma na Ciência, os cientistas passam a trabalhar em um mundo diferente. Kuhn se baseou na chamada psicologia Gestalt para exemplificar essas mudanças de mundo, a qual não se resume apenas a uma nova interpretação dos fatos, mas a ver tudo de forma diferente. Além de descobrir novos objetos, a troca de paradigma promove uma mudança irreversível na percepção do cientista, alterando a natureza dos objetos observados no antigo paradigma (Feve, 2022). Isso também

ocorre com os alunos quando é atingida a mudança conceitual? Os alunos passam a enxergar um mundo diferente de quando as suas concepções alternativas prevaleciam?

De acordo com Mattheus (2022), os pesquisadores em educação se apropriaram da filosofia de Kuhn sem o devido conhecimento ou por simples modismo, pois o ensino de ciências para ele deve acontecer de maneira contrária ao que pregam esses educadores. Há um certo consenso na educação de que o ensino deve ter características como: protagonismo do aluno, multiplicidade metodológica, criticidade e problematização entre outros. Mas para Kuhn o aluno deve ser introduzido em um paradigma dominante, ou seja, em um quadro conceitual a partir do qual possam compreender o mundo. Usando apenas as teorias aceitas pela comunidade científica, o cientista avança mais rapidamente e se aprofunda mais em sua pesquisa do que se mudanças de paradigmas ocorressem o tempo todo. Além disso, considera “excesso de bagagem” apresentar aos alunos como certo conhecimento foi adquirido e por que foi aceito pela comunidade científica (Bailey, 2006). Analogamente, o aluno, ao se deparar com mudanças de paradigmas o tempo todo, acaba aprendendo pouco sobre cada teoria apresentada.

Entretanto, os objetivos da educação em ciências e a formação de um cientista são diferentes. Enquanto o futuro cientista precisa aprender todas as técnicas e conhecimentos para bem desempenhar o seu ofício, o aluno que está estudando ciências na escola precisa compreender o aspecto epistêmico dessa disciplina, ser capaz de questionar a confiabilidade do conhecimento científico. O futuro cientista se preocupa com o avanço da ciência, já o aluno de ciências é ensinado a, partindo desses conhecimentos científicos, compreender o mundo em que vive, lidar com os avanços tecnológicos e exercer o seu papel como cidadão.

O professor, ao optar em utilizar a estrutura de desenvolvimento da ciência na visão de Kuhn para fins didáticos, precisaria selecionar os fatos históricos de maior relevância dentro do tema a ser abordado e identificar as diferentes fases pelas quais a pesquisa científica atravessa. Além disso, a construção de um conceito científico é um trabalho complexo que engloba capacidade de interpretação da natureza e raciocínio matemático. Por este motivo, uma transposição didática (TD) bem executada dos acontecimentos e teorias científicas referentes aos conteúdos a serem abordados é fundamental para transformar o conhecimento científico em educacional. Neste sentido, segundo Mello (2019):

[...] Pode-se mostrar que quando a teoria original foi construída em um período de revolução paradigmática a teoria precisa primeiramente ser consolidada no novo paradigma antes de sofrer uma TD até o nível médio. Que seus modelos explicativos originais devem ser adaptados ou reescritos nesse novo paradigma (Mello, 2019, p. 13).

Como exemplo, este mesmo autor pesquisou como ocorreu a TD da teoria de quantização de Max Planck em alguns livros didáticos. Concluiu que a explicação do problema da radiação

do corpo negro foi dada por Planck como mera hipótese *ad hoc*, ou seja, sem apresentar os modelos ou fatos experimentais que deram origem a teoria, apenas relatam que Planck postulou a quantização de energia (Mello, 2019).

Ao longo de sua obra, Kuhn também discute a forma como a Ciência é ensinada nas escolas e nas universidades. Em especial, faz críticas e também elogios aos recursos didáticos a quem chamou de manuais e exemplares.

7.1 MANUAIS E EXEMPLARES

Kuhn define os manuais como “veículos pedagógicos destinados a perpetuar a ciência normal...” (Kuhn, 2018, p.233). É o que ocorre com os livros didáticos, que contém as contribuições de cada cientista e como estes solucionaram muitos problemas, dando a aparência de uma ciência que sempre progride por meio do acúmulo de conhecimento. Considera-os pedagogicamente funcionais e eficientes para ensinar leis e teorias da ciência normal, porém distorcem a verdadeira tradição científica deixando para os alunos a falsa impressão de um conhecimento construído individualmente e sucessivamente. Como geralmente os alunos não leem trabalhos originais, artigos ou teses dos cientistas, até por não terem ainda atingido uma maturidade intelectual compatível para isso, os manuais “substituem sistematicamente a literatura científica da qual derivam...” (Kuhn, 2018, p. 268). No caso dos futuros cientistas, aprendem a trabalhar com a *ciência normal* e até a produzir crises, mas não aprendem a superá-las, a dar nova interpretação ao fenômeno.

Segundo Kuhn (2018), os estudantes compreendem bem ao lerem o manual, porém sentem muitas dificuldades em resolver muitos dos problemas propostos. Precisam ter aprendido a resolver problemas semelhantes, analogias, estabelecer relações entre os símbolos para aplicá-los da mesma maneira eficaz. Necessitam então dos chamados exemplares e quanto mais os tiverem, melhor serão os manuais. Os exemplares consistem em “exemplos de situações que seus predecessores no grupo já aprenderam a ver como semelhantes entre si ou diferentes de outros gêneros de situações” (Kuhn, 2018, p.303). O “plano inclinado”, “pêndulo”, “calorímetro”, “câmara escura”, entre outros, fazem parte dessas situações que os professores exploram em sala de aula. Os exemplares fornecem “habilidades de agrupar objetos e situações em conjuntos semelhantes” (Kuhn, 2018, p.311), muito importantes para os alunos encontrarem similaridades, fazerem analogias e criarem modelos.

Ensinar as leis ou teorias antes das situações que se apresentam ou não na natureza, não resulta em um aprendizado sólido. Assim como ocorre na língua, quando as palavras são aprendidas juntamente aos exemplos concretos e não de forma isolada, o aluno adquire um conhecimento tácito. A quantidade de exemplos necessários para que um conceito seja aprendido e capaz de ser utilizado varia de aluno para aluno, ou seja, uns precisam de mais e outros de menos. É um dos motivos pelo qual a aprendizagem não ocorre exclusivamente com a ajuda do professor, por meios verbais, mas em algum momento em que esses exemplares são trabalhados.

7.2 APLICAÇÃO DA TEORIA DE KUHN AO ENSINO DE FÍSICA

A estrutura criada por Thomas Kuhn, a qual descreve o desenvolvimento da ciência de forma cíclica, passando por etapas ou fases, também pode ser usada para o ensino? Alguns autores defendem que sim e inclusive criaram propostas pedagógicas aplicando as ideias de Kuhn. Porém, o modo como Kuhn considera as escolhas científicas como um ato social, acaba gerando uma interpretação de que a ciência é um empreendimento irracional. Trazer essas concepções para a sala de aula pode causar confusão nos alunos e um descrédito da ciência por parte deles. A seguir apresentaremos alguns trabalhos contendo propostas de aplicação da teoria de Kuhn ao ensino de Física e discutiremos também o impacto da relatividade kuhniana na aprendizagem dos alunos.

7.2.1 Propostas didáticas baseadas na epistemologia de Thomas Kuhn

Arden Zylbersztajn foi um dos autores que inseriram as ideias de Kuhn para ensinar Física aos seus alunos. Sua proposta era comparar o aluno a um cientista kuhniano que possui concepções prévias norteadas pelo paradigma vigente e que, em determinado momento, depara-se com anomalias que confrontam o seu conhecimento até que se torna necessária uma mudança conceitual caracterizada pela revolução científica. Zylbersztajn (1991) criou um modelo de ensino, baseado na epistemologia de Kuhn, dividido em quatro etapas:

- 1ª) Elevação do nível de consciência conceitual: etapa em que o professor estimula o aluno a expor o seu conhecimento prévio, comparando-o com as concepções do senso comum. Consiste na simulação de um paradigma vigente, análogo às ideias que se encontram enraizadas no cognitivo dos alunos.

- 2^a) Introdução de anomalias: inserção de situações (argumentos teóricos, demonstrações ou experimentos) em que o aluno, baseado em suas concepções, não consegue mais explicar. Essas situações passam a causar desconforto levando este aluno a refletir sobre as limitações do seu conhecimento.
- 3^a) Apresentação da nova teoria: etapa em que ocorre a quebra do paradigma, a revolução científica e a instauração de um novo paradigma. O professor apresenta uma teoria mais completa, capaz de solucionar as anomalias que surgiram. Em relação ao aluno, é a fase em que ele sofre uma mudança conceitual.
- 4^a) Articulação conceitual: momento de aplicação e aperfeiçoamento da “nova teoria”. É a fase da qual Kuhn chama de “ciência normal”, onde os cientistas trabalham resolvendo “quebra-cabeças”, ou seja, adequando as teorias aos problemas que vão surgindo.

Soares (2016) apresenta uma proposta de atividade em sala de aula utilizando o modelo de Zylbersztajn e acrescentando uma quinta etapa chamada de “Análise da apresentação do episódio que está sendo discutido”. Esta atividade pode contemplar diversos assuntos, sendo de livre execução por parte do professor, que decidirá quais recursos e estratégias se adequarão melhor a turma aplicada. A proposta apresentada não foi aplicada, porém é uma das raras tentativas de adaptar a teoria de Kuhn ao ensino.

Arruda e colaboradores (2001) propõem um novo objetivo para a utilização pedagógica dos laboratórios didáticos. Em vez de funcionar como um verificador ou demonstrador de teorias, poderiam servir como um processo de adaptação da teoria com o experimento, função defendida por Kuhn, que não enxerga o experimento como um tribunal de teorias científicas dando-lhe um valor de verdade. Para ele, o experimento apenas comprova a adequabilidade empírica da teoria, pois o primeiro nasce do paradigma gerado pelo segundo. Com essa nova proposta, a preocupação do professor ao utilizar o laboratório didático passaria a ser o aprendizado de novos termos, a aquisição de uma nova linguagem por meio dos experimentos e suas soluções. As aulas no laboratório, de acordo com os autores, não deveriam simplesmente testar hipóteses ou teorias, mas articular o experimento com a teoria de maneira integrada. A proposta não entra em detalhes de como executá-la, apenas discute e sugere uma mudança epistemológica na utilização do laboratório didático de Física.

Zakiah e colaboradores (2024) apresentam a metodologia da “Aprendizagem Inteligente” e fazem um paralelo com a epistemologia de Kuhn. Escolheram o tema “A história da tecnologia para a aprendizagem”, partindo desde a pré-história, com as técnicas de pinturas rupestres e

tradições orais de ensino, até a pandemia da COVID-19 com as tecnologias aplicadas pelos professores para o ensino remoto. A partir deste recorte histórico foram distribuindo os acontecimentos dentro das fases de desenvolvimento da ciência criadas por Kuhn, a saber: pré-paradigma, ciência normal, anomalias, crises e revolução científica. Essa pesquisa teve natureza qualitativa e descritiva em que as hipóteses e teorias foram construídas por meio de uma abordagem bibliográfica de trabalhos publicados em livros, periódicos e teses. Concluíram que a Aprendizagem Inteligente representou uma nova visão na educação analogamente a uma revolução científica na concepção kuhniana, além disso, mostraram que a organização, dentro da estrutura criada por Kuhn, dos conteúdos a serem trabalhados é realizável e potencialmente eficaz para o ensino.

Em oposição aos que defendem a aplicação das ideias de Kuhn para o ensino, o trabalho de Greiffenhagen e Wendy (2008) argumentam que a analogia entre a mudança conceitual sofrida pelos alunos e a mudança de paradigma sofrida pelos cientistas é enganosa. Após examinarem os objetivos e pressupostos teóricos da mudança conceitual e compará-los com o fazer científico segundo Kuhn, perceberam que a diferença psicológica entre o aluno e o cientista é fundamental para tornar essa analogia incompatível. Para os autores, o que os alunos aprendem na escola não estão em conflito com o que já sabem e eles não adquirem uma nova visão a respeito dos conteúdos que estudaram, isto é, suas concepções prévias não são descartadas, diferentemente dos cientistas que passam a trabalhar em um mundo diferente, com conceitos e métodos reformulados quando ocorre uma quebra de paradigma.

7.2.2 O relativismo kuhniano e o ensino de Física

Como trabalhar com os alunos os conteúdos de Física utilizando quebras de paradigmas sem colocar a hegemonia da ciência à prova?

Primeiramente, devemos tentar entender como os alunos definem o que é uma escolha ou uma construção científica racional. Em que situações eles percebem que determinada teoria foi desenvolvida com o auxílio de elementos não cognitivos, que fogem a execução de um método, ou em que situações as teorias são substituídas por outras que não demonstram ser mais eficazes? Villani e colaboradores (1997) consideram ser improvável que os alunos possuam um modelo de racionalidade pré-estabelecido enquanto Mathews (1994) sugere uma preparação prévia para que os alunos adquiram essa capacidade de identificar ações racionais.

O trabalho de Silva, Nardi e Laburu (2008) propôs a Reconstrução Racional Didática (RRD), inspirada nas ideias de Imre Lakatos, como preparação para o aluno ser capaz de reconhecer a racionalidade científica e assim contribuir com a aprendizagem dos conteúdos. A RRD baseia-se no uso da História e Filosofia da Ciência, selecionando os fatos que são metodologicamente interpretados e omitindo tudo o que é irracional no recorte estudado. E a contribuição de Lakatos vem da ideia de que os programas de pesquisas (teorias) são fortalecidos ou degenerados por meio de regras metodológicas e assim vão permanecendo ou sendo substituídos no decorrer do desenvolvimento científico.

Estes autores elaboraram então uma sequência de passos para alcançar esses dois objetivos citados: revelação das concepções alternativas dos alunos, apresentação de duas teorias rivais porém igualmente fortes, confrontar as duas teorias por meio de um debate racional utilizando o falseacionismo lakatosiano para promover uma proliferação de fatos contraditórios de uma delas, discussão racional entre as concepções alternativas e a teoria vencedora e, por último, enfraquecimento das concepções alternativas com a aceitação da nova teoria (Silva, Nardi e Laburu, 2008).

Supondo que o aluno adquiriu em algum momento um critério de avaliação de racionalidade, há uma grande possibilidade deste aluno, assim como muitos filósofos da ciência, considerar a epistemologia kuhniana irracional. Sendo assim, ensinar Física usando os conceitos de *revolução científica* e quebra de paradigmas pode gerar um descrédito da ciência por parte dos alunos devido ao caráter provisório e inverídico das teorias na visão de Kuhn.

Como vimos neste trabalho, Kuhn sempre se esquivou da acusação de irracionalidade das suas ideias e desfez alguns mal-entendidos criados por seus críticos. Caberia então ao professor, absorver as justificativas e utilizar essas ideias de modo a preservar a racionalidade científica na concepção dos alunos. Gurgel (2020) indica que o fato de a ciência ser produto de trabalhos coletivos e, como consequência disso, que debates públicos sempre levam a melhores decisões, podem convencer os alunos que a ciência é construída racionalmente.

Ainda que as revoluções científicas mostrem a superação de uma teoria por outra, dando a ideia de que a ciência produz um conhecimento efêmero, ela não deve provocar a destruição, em termos didáticos, a teoria substituída. Para Kuhn, existem revoluções científicas de grande e pequeno alcance, onde o arcabouço conceitual é total ou parcialmente modificado (Kuhn, 2018).

Cientistas de diferentes áreas, debruçados sobre diferentes problemas, podem reconhecer ou não uma descoberta como uma revolução científica e assim, dependendo da situação investigada, podem usar a nova teoria ou ainda as mesmas teorias que outras áreas consideram superadas. Analogamente, um aluno que está estudando a queda dos corpos nas proximidades da

Terra não precisaria usar a gravitação einsteiniana quando a newtoniana soluciona todos os problemas deste nível. É neste sentido que Kuhn valoriza uma educação científica rígida em que os alunos aprendem por meio dos exemplares, que são soluções construídas pelos cientistas durante o período de produção cumulativa de conhecimento do qual chamou de *ciência normal*. Portanto, esse conhecimento, mesmo que “ultrapassado” não deve ser desprezado, pois é útil no ensino da Física. Enquanto os cientistas, segundo Kuhn, têm como objetivo solucionar problemas, os alunos querem aprender como esses problemas foram solucionados.

Por outro lado, a aprendizagem dos conteúdos de Física pode ser facilitada utilizando o processo pelo qual a ciência chega a uma revolução científica como uma estratégia de mudança conceitual, ou seja, utilizar a quebra de paradigma como um recurso didático para a superação das concepções prévias dos alunos.

Reconhecendo que a epistemologia de Kuhn ainda é bastante debatida entre defensores e opositores, entendemos que é possível adaptar as ideias de Kuhn ao ensino da Física e que o seu modo de enxergar o desenvolvimento científico favorece a compreensão da natureza da ciência por parte dos alunos, aspecto fundamental para a aprendizagem dos conteúdos. Além disso, concluímos que o relativismo kuhniano, se bem trabalhado pelo professor, não representa empecilho para o ensino da Física.

Em resumo, entendemos que o professor deve se apropriar de diversos métodos e recursos, pois o processo de ensino-aprendizagem engloba momentos em que os alunos são estimulados a construir um raciocínio, mas também há outros em que se faz necessário trabalhar os conteúdos de forma dedutiva, pronta. Assim como Kuhn valoriza a aprendizagem acríica daqueles que se tornarão cientistas e o próprio trabalho científico durante a *ciência normal*, acreditamos que existem momentos em que os alunos devem receber um ensino mais rígido, inquestionável. Os futuros cientistas precisam aprender a sua profissão e, portanto, os conhecimentos que utilizarão no seu trabalho, na sua prática. Os cientistas precisam crer nas teorias e nos métodos para avançar em suas pesquisas. Da mesma forma, os alunos só conseguirão progredir no seu aprendizado se, em determinados momentos, o professor utilizar uma abordagem mais doutrinária.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho defendemos a tese de que a construção dos conhecimentos referentes à luz ao longo da história passou por momentos distintos que são condizentes com as fases descritas pela estrutura de desenvolvimento da ciência segundo o filósofo da ciência Thomas Kuhn. Especificamente, a luz síncrotron é resultado da pesquisa realizada durante a fase de ciência normal e não de ciência extraordinária. Com isso, mostramos que a visão de Kuhn sobre o fazer científico encontra exemplos práticos na história da ciência, desmistificando características como neutralidade, assertividade e cumulatividade, geralmente associados a ela.

Em outras palavras, a ciência é um produto sociocultural sendo, portanto, influenciada por crenças e valores de uma sociedade, bem como pela interpretação e imaginação de quem a constrói, os cientistas. Suas teorias não são definitivas visto que, à medida que os conhecimentos vão se ampliando, novos problemas vão surgindo e exigem a atualização ou até mesmo a substituição dessas teorias. E por último, a ciência não evolui linearmente a partir de conhecimentos anteriores. Ideias que já foram descartadas podem retornar em outros momentos servindo de base para novos paradigmas.

Estendemos essa visão kuhniana da ciência ao ensino de Física com o objetivo de descobrir como suas ideias podem contribuir para a aprendizagem dos alunos. Partindo do potencial pedagógico que a história da ciência possui, comprovado em diversos trabalhos, discutimos como o ensino da Física e de outras disciplinas podem adotar as ideias de Kuhn didaticamente. Para esse filósofo, a forma deturpada como a ciência é apresentada aos alunos desmotiva e dificulta a aprendizagem dos seus conteúdos. Sendo assim, compreender de maneira mais realista como a ciência se desenvolve pode elevar o interesse dos alunos e conseqüentemente facilitar o processo de ensino-aprendizagem.

Em nosso entendimento, a teoria de Kuhn é mais simples de ser compreendida e de ser aplicada em comparação com a de seus contemporâneos como Popper, Lakatos e Feyerabend. A estrutura criada por Kuhn para descrever a prática científica facilita a percepção de que a ciência é um empreendimento humano e por este motivo é orientada pelos interesses da sociedade, pelos contextos históricos e pelas idiossincrasias daqueles que a constroem. Lakatos, com os seus programas de pesquisa, é quem mais se aproxima das ideias de Kuhn. Podemos comparar o conceito de *núcleo rígido* lakatosiano aos paradigmas kuhnianos, e o trabalho realizado nesses programas científicos de pesquisa à atividade praticada na *ciência normal*. Porém, conceitos como a heurística negativa e positiva são vagos e dificultam a sua aplicação. Com relação a Popper, é difícil imaginar que os cientistas, mesmo inconscientemente, investem o seu tempo em

puramente tentar destruir as teorias, conforme descreve o falseacionismo popperiano. E o anarquismo feyerabendiano, capitaneado pela expressão “tudo vale”, ao nosso ver relativiza a força da ciência sobre outras formas de aquisição de conhecimento. Essa radicalidade não serve ao propósito deste trabalho.

O processo de construção da narrativa histórica sobre como a compreensão da luz foi evoluindo ao longo do tempo propiciou a identificação de diversas características contidas em cada uma das fases de desenvolvimento da ciência segundo Kuhn. Mostrou também que essas fases não ocorrem sequencialmente e em ordem cronológica, pois em alguns episódios as descobertas antecipam a fase e em outros acabam explicando questões que surgiram em fases anteriores. Por este motivo, encontramos certa dificuldade em classificá-los dentro desses períodos. São os casos, por exemplo, da descoberta dos raios x e do modelo atômico de Bohr.

A descoberta dos raios X, apesar de ainda poder ser explicado pela FC, deu origem a uma série de fenômenos que forçaram a quebra deste paradigma. Por outro lado, a distância temporal entre a sua descoberta (1895) e o seu efeito quântico (1923), nos levou a classificá-los como um resultado da *ciência normal* e não os considerar como uma *revolução científica*. Mas, de posse de tudo o que conhecemos atualmente sobre os raios X, é muito difícil não admitir que se tratou de uma descoberta revolucionária.

No caso de Bohr, a dificuldade se deu em encaixá-lo no período de *crise* (pré-revolução científica) ou de *ciência normal* (pós-revolução científica). O modelo atômico de Bohr foi criado em um contexto caracterizado pela incapacidade do paradigma clássico em explicar as inconsistências apresentadas pelo modelo de Rutherford. A ciência já vinha de um período de crise provocado pelos problemas da radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico e o experimento de Michelson-Morley, mas que foram solucionados pelas recém-criadas TQ e TR. Essas teorias ainda buscavam aceitação quando o modelo rutherfordiano apresentava anomalias. Neste sentido, Bohr estaria trabalhando para superar uma crise científica. No entanto, a *revolução científica* proporcionada pelas teorias de Planck e Einstein, ainda que não reconhecidas assim na época, disponibilizou ideias que solucionaram as inconsistências do átomo de Rutherford. Sendo assim, estaria Bohr praticando a *ciência normal* ao aplicar o novo paradigma em seu modelo atômico?

A luz síncrotron, último tema do nosso recorte histórico, também impôs dificuldades na tentativa de classificá-la na estrutura de Kuhn. O salto tecnológico que essa radiação provocou associado às inúmeras e importantes aplicações que possibilitou, nos leva a considerá-la como uma verdadeira *revolução científica*. O processo de construção do Sirius, desde a decisão de se investir em *Big Science* no Brasil até a sua inauguração, mostrou o quanto a Ciência pode

transformar a política e a economia de um país. Também revelou que interesses extra científicos às vezes se sobrepõem aos da própria pesquisa. Mais do que desenvolver e aplicar os conhecimentos sobre a luz síncrotron, a ideia de construir um laboratório de grande porte surgiu do desejo de reaquecer a ciência no país que andava estagnada e abrir as portas para os cientistas que estavam sem perspectivas profissionais.

Mas, quando analisamos as características de uma *revolução científica*, definidas por Kuhn, percebemos que a luz síncrotron não admite esse adjetivo. Uma *revolução científica* nasce de uma crise que induz a busca por outro paradigma que provocará uma nova interpretação do mundo, uma alteração ontológica dos elementos envolvidos. No entanto, o próprio Kuhn considera, como revoluções científicas, alguns casos que proporcionam menores transformações. O fato de não ter havido uma crise que antecederesse a criação da luz síncrotron e também não ter alterado a concepção que se tem sobre a natureza da luz, pesaram para que decidíssemos considerá-la como fruto do período de *ciência normal*.

Com relação ao ensino, percebemos que a epistemologia de Thomas Kuhn pode ser usada como estratégia didática ou até mesmo como metodologia de ensino. Um levantamento realizado neste trabalho mostrou algumas possibilidades de inserir as ideias de Kuhn em estratégias didáticas. As concepções prévias dos alunos podem funcionar como paradigmas, a introdução de problemas são comparáveis às anomalias que surgem no decorrer das pesquisas e põem dúvida no conhecimento dos alunos, essa dúvida acaba gerando um enfraquecimento dessas concepções enraizadas nos seus cognitivos, propiciando uma oportunidade de alcançar uma mudança conceitual, uma quebra de paradigma pedagógica. Dentre os benefícios que a adoção das ideias de Kuhn pode trazer no âmbito educacional estão a quebra do paradigma tradicional, tanto das metodologias de ensino quanto da prática docente, e a possibilidade de uma melhor compreensão da natureza da ciência por parte do aluno.

Individualmente falando, este trabalho contribuiu significativamente para a minha vida profissional promovendo uma reflexão sobre a visão da ciência que eu possuía e sobre a minha prática docente. O estudo da história da luz fortaleceu meus conhecimentos comprovando que a HC tem grande potencial pedagógico. A Filosofia da Ciência, aqui representada pela epistemologia de Thomas Kuhn, melhorou a minha compreensão do fazer científico enquanto trabalho realizado coletivamente e, portanto, suscetível a fenômenos sociológicos. Além disso, aprendi que a ciência não se encerra em si mesma, ao contrário, é aberta a atualizações e mudanças de interpretações. Considerando todos esses aspectos citados, pretendo reconstruir meus métodos de ensino para estender aos alunos o pensamento crítico e o interesse em investigar

como cada conhecimento científico foi sendo construído, ambos adquiridos com a realização desta tese.

Conscientes da importância da ciência para a humanidade e, em consequência disso, da necessidade de divulgá-la e torná-la compreensível para a população, esperamos que esta tese incentive novos estudos e aplicações da epistemologia de Kuhn bem como de outros filósofos da ciência.

REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, L. H. L. A Iconoclastia da Ciência no Pensamento de Paul Feyerabend. Revista Três [...] Pontos (UFMG), Belo Horizonte, MG, v. 2, p. 19-25, 2005.
- ACIOLY, V.; PICORETI, R.; ROCHA, T.; AZEVEDO, G.; SANTOS, A. C. F. A Luz Síncrotron Iluminando a Formação de Professores. A Física na Escola (Online), v. 18, p. 1, 2020.
- ALVARADO-GUZMAN, L. L.; NARDI, R. Reconstruindo alguns modelos sobre luz e visão da história da ciência. Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática - RBECM, v. 4, p. 1242-1267, 2021.
- ARRUDA, S. M.; SILVA, M. R.; LABURÚ, C. E. Laboratório didático de física a partir de uma perspectiva kuhniana. Investigações em Ensino de Ciências, Londrina, v. 6, n. 1, 97-106, 2001.
- AZEVEDO, J. S.; MONTEIRO JUNIOR, F. N. As disputas acerca da natureza da luz: o uso da história e filosofia da ciência para aprendizagem significativa no ensino de física. Aprendizagem Significativa em Revista, v. 9, p. 12-30, 2019
- BAILEY, .. Science, Normal Science and Science Education – Thomas Kuhn and Education. Learning for Democracy, Vol. 2, No. 2, 2006.
- BEZERRA, V. A. Maxwell, a teoria do campo e a desmecanização da física. SCIENTIAE STUDIA (USP), São Paulo, SP, v. 4, n.2, p. 177-220, 2006
- BRASIL, Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília, 2018.
_____, Ministério da Educação. Matriz de Referência ENEM. Brasília: Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. Disponível em:
https://download.inep.gov.br/download/enem/matriz_referencia.pdf. Acesso em 02/02/2022.
- BRICCIA, V.; CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. Visões sobre a Natureza da Ciência construídas a partir do uso de um texto histórico na escola média. REEC. Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias, v. 10, p. 1-22, 2011.
- CARVALHO, C.; GARCIA, N. M. D. A história da ciência nos livros didáticos de Física. In: XII Educere, 2015, Curitiba. Atas do XII Educere, 2015.
- CHALMERS, A.F. What is this Thing called Science? St. Lucia, University of Queensland Press, 1976.
- CHIBENI, S. S. O que é ciência. Instituto de Filosofia e Ciências Humanas da Unicamp, 2004.
- COIMBRA, V. 2023. “O que é e para que serve o Sirius, acelerador de partículas que recebeu investimento público bilionário”. GHZ Ciência e Tecnologia, 3 de maio de 2023.
- COMPTON, A.H. Bulletin of the National Research Council 4, 1 (1922).

- COZMAN, F. G.; PLONSKI, G. A.; NERI, H. Inteligência artificial. Livro eletrônico: avanços e tendências. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados, 2021.
- CRAÏEVICH, A. Fontes de radiação síncrotrônica: características gerais e sistema de vácuo. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*. Volume 5, 1985.
- CRAÏEVICH, A. F. Radiação síncrotron no Brasil. Passado, presente e futuro. *Física e Química da Radiação* 167, 2020.
- D'AGOSTINO, F. *Naturalizing epistemology: Thomas Kuhn and the 'essential tension'*. New York: Palgrave-Macmillan. 2010.
- DE BROGLIE, L. *Un itinéraire Scientifique*. Paris: La Découverte. Edited by Georges Lochak, 1987.
- DEMO, P. *Metodologia científica em ciências sociais*. 3.ed. São Paulo: Atlas, 1995.
- DIONÍSIO, P. H. Albert Einstein e a Física Quântica. *Cad. Bras. Ens. Fís.*, v. 22, n. 2: p. 147-164, ago. 2005.
- FERREIRA, D. C.; DE SOUZA FILHO, M. P. O experimento virtual da dupla fenda ao nível do ensino médio (Parte II): uma análise quântica do comportamento corpuscular e ondulatório da luz. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física, [S. l.]*, v. 36, n. 1, p. 302–329, 2019. DOI: 10.5007/2175-7941.2019v36n1p302. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2019v36n1p302>.
- FERREIRA, M.; SILVA, A. L. S.; VERDEAUX, M. F. S. Progresso e não determinismo científicos, a partir de conceitos-chave da epistemologia de Thomas Kuhn. *Conjectura: Filos. Educ.*, Caxias do Sul, v. 23, n. 2, p. 244-266, maio/ago. 2018.
- FEVE, C. Les transformations de la vision du monde scientifique et la psychologie de la Gestalt chez Thomas Kuhn. *Philosophia Scientiae* 26-3, 255-273, 2022.
- FEYERABEND, P. K. *Ciência, um Monstro: lições trentinas*. Trad. Rogério Bettoni; Edição, revisão técnica e notas: Luiz Henrique de Lacerda Abrahão. Belo Horizonte: Autêntica Editora, 2016.
- FLEMING, H. Max Planck e a Ideia do Quantum de Energia. In: HUSSEIN, M.; SALINAS, S. (Orgs.). *100 anos de física quântica*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2001.
- GERMANO, M. G.; KULESZA, W. A. Ciência e senso comum: entre rupturas e continuidades. *Caderno Brasileiro De Ensino De Física*, 27(1), 115–135, 2010. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2010v27n1p115>
- GRECA, I. M.; FREIRE JR., O. A “crítica forte” da ciência e implicações para o ensino. *Ciência & Educação*, v. 10, n. 3, p. 343-361, 2004.
- GREIFFENHAGEN, C.; WENDY, S. Kuhn and conceptual change: on the analogy between conceptual changes in science and children. *Loughborough University Journal contribution*. 2008.

GUITARRARI, R. Incomensurabilidade e racionalidade científica em Thomas Kuhn: uma análise do relativismo epistemológico. 2004. Tese (Doutorado em Filosofia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

GURGEL, I. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 37, n. 2, p. 333-350, ago. 2020.

GUZMAN, L. L. A.; NARDI, R. Reconstruindo alguns modelos sobre luz e visão da história da ciência. RBECM, Passo Fundo, v. 4, edição especial, p. 1242-1267, 2021.

KITCHER, P. (1982). Implications of Incommensurability. PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, 1982, 689–703.

<http://www.jstor.org/stable/192453>

KUHN, T, S.. A função do dogma na investigação científica. Organizador: Eduardo Salles O. Barra; tradução: Jorge Dias de Deus. Curitiba: UFPR. SCHLA, 2012.

_____. A estrutura das revoluções científicas. 2. ed. Tradução Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. São Paulo: Perspectiva. 2018.

_____. O caminho desde a Estrutura: ensaios filosóficos 1970-1993, com uma entrevista autobiográfica. Ed. por James Conant e John Haugeland. Tradução por Cezar Mortari. São Paulo: Editora UNESP, 2006.

LIMA, L. S. Radiação gama, Rev. Ciência Elem., V2(04):084, 2015.

LIMA, R. S.; AFONSO, J. C.; PIMENTEL, L. C. F. Raios X: Fascinação, medo e ciência. Quim. Nova, Vol. 32, No. 1, 263-270, 2009.

MANGILI, A. I. Heinrich Rudolph Hertz e a “descoberta” do efeito fotoelétrico: Um exemplo dos cuidados que devemos ter ao utilizar a história da ciência na sala de aula. História da Ciência e Ensino. Volume 6, pp. 32-48, 2012.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. Fundamentos da Metodologia Científica. São Paulo: Editora Atlas, 2003.

MARQUES, N. L. R.; BULHÕES, L. O. de S.. Uma abordagem histórica sobre a interação da radiação com a matéria. Revista Educar Mais, v. 3, p. 219-229, 2019.

MARRANGHELLO, F. G; PAVANI, B. D. Astronomia e Física Moderna: duas necessidades, uma solução. I Simpósio Nacional de Educação em Astronomia. Rio de Janeiro, 2011.

MARTINS, R. de A. Sobre o papel da história da ciência no ensino. Boletim da sociedade brasileira de história da ciência, v. 9, p. 3-5, 1990a.

MARTINS, R. de A. Como Becquerel não descobriu a radioatividade. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 7, p. 27-45, 1990b.

MARTINS, R. de A. As pesquisas de Newton sobre a luz: Uma visão histórica. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 37, n. 4, 4202, 2015.

MARTINS, L. A. P. História da Ciência: objetos, métodos e problemas. *Ciência e Educação* (UNESP), São Paulo, v. 11, n.2, p. 305-317, 2005.

MATHEWS, M. R. *Science Teaching – The role of history and philosophy of science*. New York: Routledge (1994).

MATTHEWS, M.R. Thomas Kuhn and Science Education. *Sci & Educ*, 2022.

MELESSE, S.; YAYEH, M. Lessons educators could learn from Thomas Kuhn's the structure of scientific revolutions. *International Journal of Education & Management Studies*, 10(1), 113-119, 2020.

MELLO, L. A. Using Didactic Transposition Theory and the Concept Maps Tool to Build a Theory of Scientific Knowledge. *International Journal of Research in Education and Science*, v. 4, p. 8-18, 2019.

MENDONÇA, A. L. de O. O legado de Thomas Kuhn após cinquenta anos. *Scientiae Studia* (USP), v. 10, p. 535-560, 2012.

MOREIRA, I. C. Einstein e seus Trabalhos de 1905 e 1915. *Educação Pública*. Dez. 2005.

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.

OLIVEIRA, R. A.; SILVA, A. P. B. História da Ciência e ensino de Física: Uma análise meta-históricográfica. In: Luiz O. Q. Peduzzi; André Ferrer P. Martins e Juliana Mesquita Hidalgo Ferreira (Org.). (Org.). *Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino*. 1ªed. Natal: EDUFRN, 2012, v., p. 41-64.

OSTERMANN, F. A epistemologia de Kuhn. *Cad. Cat. Ens. Fis.*, v.13, n3: p.184-196, dezembro de 1996.

PACHECO, L. L.; FREITAS-REIS, I. Principais Contribuições responsáveis pela descoberta dos raios X: a estirpe coletiva da ciência. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 45, e20230016, 2023.

PASQUINI, P. S. Características Físicas e Aspectos Instrumentais dos Aceleradores Síncrotron (LNLS) e LHC (CERN). *Relatório de Iniciação Científica LNLS-Campinas*, 2010.

PASTERNAK, Natalia; ORSI, Carlos. *Ciência no cotidiano: viva a razão, abaixo a ignorância*. São Paulo: Contexto, 2021.

PATY, M. A ciência e as idas e voltas do senso comum. *Scientiae Studia*, 1(1), 9-26, 2003.

PEDUZZI, L. O. Q., *Evolução dos Conceitos da Física*. 1.ed. Florianópolis: UFSC/EAD/CED/CFM. 130p, 2011.

POLLOCK, H. C. “A descoberta da radiação síncrotron”. *Jornal Americano de Física*. 51 (3): 278–280, 1983.

PORTO, C.; PORTO, M.B.D.S.M. A evolução do pensamento cosmológico e o nascimento da ciência moderna. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2008.

POSNER, G. J.; STRIKE, K. A.; HEWSON, P. W.; GERTZOG, W. A. Accomodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change. *Science Education*, v. 66, n. 2, p. 211-227, 1982.

RAIČIK, A. C. Um resgate histórico-epistemológico do átomo de Bohr: uma gênese nem sempre contada e suas implicações ao ensino de ciências. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 45, p. e20230039, 2023.

RAIČIK, A. C.; GONCALVES, F. P. (Re)Pensando Thomas Kuhn: reflexões sobre mal-entendidos da Estrutura e suas implicações para o ensino de ciências. *REXE Revista de Estudios y Experiencias en Educación*, v. 21, p. 366-394, 2022.

RAUEN, C. V. O Projeto Sirius e as Encomendas Tecnológicas para a Construção da Nova Fonte de Luz Síncrotron Brasileira. In: André Tortato Rauen. (Org.). *Políticas de Inovação pelo lado da Demanda no Brasil*. 1ed. Brasília, Distrito Federal, Br: IPEA, 2017, v. 1, p. 329-371.

REIS, N. A.; OLIVEIRA, A. S. ; SILVA, E. L. . Contribuições da Radioatividade para o desenvolvimento das teorias atômica de Thomson a Rutherford: um debate histórico epistemológico no Ensino de Química. In: XVI Encontro Nacional de Ensino de Química (XVI ENEQ) / X Encontro de Educação Química da Bahia., 2012, Salvador/Bahia. XVI Encontro Nacional de Ensino de Química (XVI ENEQ) / X Encontro de Educação Química da Bahia. Salvador/Bahia, p. 1-8, 2012.

RIBEIRO, A. R., COELHO, L., BERTOLAMI, O., & André, R. *Luz: História, Natureza e Aplicações*. Gazeta de Física, Lisboa, 2015.

ROCHA, C. A. A.. Skinner e Feyerabend sobre o Método e o Papel da Ciência em uma Sociedade Livre. *Temas em Psicologia – Vol. 25, nº 3*, 913-926, 2017.

ROCHA, J. F. M.; MORENO, R. R. de M.. O átomo quântico. *Ciência Hoje*, 305, 2013.

ROSA, L. P., *Tecnociências e humanidades: novos paradigmas, velhas questões*. São Paulo: Paz e Terra, 2005.

_____, *Tecnociências e humanidades: novos paradigmas, velhas questões (vol. 2)*. São Paulo: Paz e Terra, 2006.

RUFATTO, C. A.; CARNEIRO, M. C. . A concepção de ciência de Popper e o ensino de ciências. *Ciência e Educação (UNESP)*, v. 15, p. 585, 2009.

SALA, O.. O papel da ciência na sociedade. *Revista de História*, v. 50 n. 100, p.813-820, dez. 1974. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revhistoria/article/view/132677>

SALVETTI, A., R (2008). *A história da luz*. Editora Livraria da Física.

SANTOS, C. A. dos. O físico e o fóton. *Revista Eletrônica Ciência Hoje*, 2015.

SANTOS, F. D.. O Debate Histórico e Contemporâneo sobre as Alterações Climáticas. Memórias da Academia das Ciências de Lisboa. Academia das Ciências de Lisboa, v. 45, p. 125-134, 2018.

SCHENBERG, M.. Pensando a Física (Editora Brasiliense, São Paulo, 1984).

SHAPIN, S. É verdade que estamos vivendo uma Crise da Verdade? (Trad. Rogério Monteiro). Revista Brasileira de História da Ciência, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 308-319, 2020.

SILVA, A. A. da. Teoria quântica dos campos: filosofia e história na perspectiva de Thomas S. Kuhn. 2022. Tese (Doutorado em Filosofia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

SILVA, C. C.; MOURA, B.A.. A natureza da ciência por meio do estudo de episódios históricos: o caso da popularização da óptica newtoniana. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, n. 1, 1602, 2008.

SILVA, B. V. C. Textos históricos de natureza pedagógica na formação de professores de física. In: ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 14., 2012. Maresias. Anais ... Maresias, 2012.

SILVA, B. V. C. et al. As necessidades formativas do professor de ciências ao inserir a História e a Filosofia da Ciência na sala de aula: o uso dos textos históricos de natureza pedagógica. Ensino de Ciências e Tecnologia em Revista. v.4, n.2, p.36-49, 2014.

SILVA, I.; FREIRE JR., O.. A descoberta do efeito Compton: De uma abordagem semi-clássica a uma abordagem quântica. Revista Brasileira De Ensino De Física, 36(1), 1601, 2014.
<https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000100026>

SILVA, O. H. M. da; NARDI, Roberto e LABURU, Carlos Eduardo. Uma estratégia de ensino inspirada em Lakatos com instrução de racionalidade por uma reconstrução racional didática. Ens. Pesqui. Educ. Ciênc. [online], vol.10, n.1, p.09-22, 2008.

SILVA, P. P. A.. A estrutura das controvérsias científicas: a sociologia da ciência de Thomas Kuhn. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

SILVA, V. C. da. Teoria quântica, física nuclear e filosofia grega: ensaio sobre os físicos filósofos do século XX. Griot : Revista de Filosofia, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 233–250, 2017.
SMITH, W. F.; ROSA, M. Princípios de ciência e engenharia de materiais. 3. ed. Portugal: Editora McGraw-Hill, 1998.

SOARES, J. L.. A defesa do copernicanismo por Galileu Galilei. 2013. 105f. Dissertação (Mestrado em História) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.

SOARES, J. M. S.. As Contribuições da epistemologia de Thomas Kuhn para o estudo de episódios históricos e suas repercussões no ensino de Física.. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Filosofia da Educação) - Universidade Estadual da Paraíba, Paraíba, 2016.

SUTTINI, R. S. da S., CALUZI, J. J., ERROBIDART, N. C. G.. Tentativas clássicas de interpretação do efeito fotoelétrico – Parte 1: as hipóteses de Philipp Lenard, Arthur Haas e J.J. Thomson. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 46; 2024

THIARA, A. C., BATISTA, L. P., OLIVEIRA, D., SIQUEIRA, M. (2022). Transposição Didática: A radiação do corpo negro nos livros didáticos do PNL D 2018. *Latin American Journal of Physics*, 16 (1), 1-10. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8444860>.

TORRIANI, I. L.. *Cristalografia: Uma ciência Multidisciplinar*. 2014. (Apresentação de Trabalho/Seminário).

VELHO, L.; PESSOA JR, O. . *O Processo Decisório na implantação do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron*. Campinas: Departamento de Política Científica e Tecnológica, 1998.

VICENTE, I. D.; SILVA, S. L. L.. A natureza quântica da luz e a lei de Snell-Descartes. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 46, e20230368, 2024.

VILLANI, A.; BAROLLI, E.; CABRAL, T. C. B.; FAGUNDES, M. B.; YAMAZAKI, S. C. Filosofia da ciência, história da ciência e psicanálise: analogias para o ensino de ciências. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 14, no 1: p. 37-55, abr. 1997.

ZAKIAH, A., et. al., "The Philosophy of Smart Learning Using the Approach Thomas Kuhn Paradigm Shift ", *International Journal of Information Engineering and Electronic Business (IJIEEB)*, Vol.16, No.1, pp. 54-62, 2024.

ZÍLIO, S. C.. *Óptica moderna*. Instituto de Física de São Carlos. Universidade de São Paulo, 320 pp, 2009.

ZYLBERSZTAJN, A.. *Revoluções científicas e Ciência Normal na sala de aula*. In: MOREIRA, Marco Antônio e AXT, Rolando (orgs.). *Tópicos em ensino de ciências*. Sagra, 1991, Porto Alegre. RS.

ANEXO A: PRODUÇÕES BIBLIOGRÁFICAS EM EVENTOS CIENTÍFICOS



Certificamos que

FRANCISCO DE ASSIS LIMA DE SOUSA JUNIOR apresentou o trabalho oral intitulado *A transição da Física Clássica para a Física Moderna segundo Thomas Kuhn* no Congresso *Scientiarum Historia XII*, realizado nos dias 11 e 12 de dezembro de 2019, na Decania do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, campus Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro RJ.

Rio de Janeiro, 12 de dezembro de 2019.


Maira Monteiro Fróes
PRESIDENTE DO CONGRESSO



programa de pós-graduação
em história das ciências e das técnicas
e epistemologia HCTE - UFRJ



The transition from classical physics to modern physics according to Thomas Kuhn

A transição da Física Clássica para a Física Moderna segundo Thomas Kuhn

Francisco de Assis Lima de Sousa Junior¹, Luiz Pinguelli Rosa²

¹Programa de Pós-graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia,
Universidade Federal do Rio de Janeiro

²Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade
Federal do Rio de Janeiro

fassis@metalmat.ufrj.br, lpr@adc.coppe.ufrj.br

Recebido: 4/12/2019 Aceito: 8/12/2019 Publicado: 13/12/2020

Abstract. *Thomas Kuhn, the philosopher of science, became prominent in the mid-twentieth century by advocating an epistemology based on the history of science. His best-known work, “The Structure of Scientific Revolutions” has had a major impact on the scientific community by supposing that science does not progress continually through the substitution of theories but does so through ruptures of paradigms. According to Kuhn, scientific development goes through a period of deepening (normal science) followed by a culminating crisis, the paradigm break (scientific revolution). This paper sought to show that the transition from Classical Physics to Modern Physics, where the Newtonian paradigm breaks down, clearly exemplifies Kuhn's theory.*

Keywords: *History of science. Kuhn's Theory. Classical physics. Modern physics.*

Resumo. *O filósofo da ciência Thomas Kuhn teve grande destaque em meados do século XX ao defender uma epistemologia baseada na História da Ciência. Sua mais conhecida obra “A estrutura das revoluções científicas” causou grande impacto na comunidade científica ao supor que a Ciência não progride continuamente através da substituição de teorias e sim por meio de rupturas de paradigmas. Segundo Kuhn, o desenvolvimento científico passa por um período de aprofundamento (ciência normal) e depois de crise culminando com a quebra de paradigma (revolução científica). Este trabalho procurou mostrar que a teoria de Kuhn pode ser claramente exemplificada pelo período de transição da Física Clássica para a Física Moderna onde ocorre o rompimento do paradigma newtoniano.*

Palavras-chave: *História da ciência. Teoria de Kuhn. Física clássica. Física moderna.*





1. Introdução

Muitos filósofos da ciência se preocuparam em tentar descrever como a ciência produz conhecimento e como ela se desenvolve. Desde a Grécia Antiga, as diversas correntes filosóficas que surgiram buscavam compreender como o homem adquire conhecimento e cria métodos para explicar a natureza (ROSA, 2005). Podemos citar entre essas correntes o Idealismo, o Empirismo, o Racionalismo, o Realismo e o Positivismo, que teve grande influência durante o século XIX sendo reformulado no início do século XX dando origem ao Neopositivismo (ROSA, 2005). Porém, em meados do século XX, um grupo de filósofos da ciência criticou duramente a doutrina positivista e os seus padrões rígidos do fazer científico. Dentre eles destacamos Karl Popper (1902 –1994), Paul Feyerabend (1924 –1994) e Thomas Kuhn (1922–1996), que se opuseram ao positivismo resgatando a importância da metafísica e a preocupação com a construção do conhecimento científico ao invés de privilegiar a lógica da produção científica (ROSA, 2006).

Para Popper, a ciência avança permanentemente por meio da substituição de teorias, onde uma melhor ou mais consistente toma o lugar da anterior. Assim, as teorias são sempre provisórias pois são postas à prova continuamente, isso é o que caracteriza uma teoria científica segundo Popper, o fato dela ser falseável e consequentemente refutável. Considera que as teorias se originam de conjecturas, negando assim o seu caráter dedutivo e indutivo (POPPER, 2011 apud. GALINDO DA COSTA; TONELO, 2012).

Feyerabend defendia o que batizou de anarquismo metodológico, uma espécie de vale-tudo científico. Dessa forma, criticou a uniformidade na ciência por deixá-la acrítica e os seus métodos imutáveis como um conjunto de regras bem definidas a serem seguidas pelos cientistas. Valoriza toda e qualquer teoria pois é capaz de aperfeiçoar o conhecimento mesmo considerada ultrapassada ou absurda (ROSA, 2006).

Já para Kuhn, a ciência avança por meio de rupturas de paradigmas que ocorrem de tempos em tempos. Ao intervalo de tempo em que os paradigmas norteiam a produção científica Kuhn chamou de ciência normal. Segundo Kuhn, após um período de crise devido ao surgimento de anomalias (fenômenos que contrariam as teorias), a ciência normal daria origem a uma revolução científica gerando como consequência a instauração de um novo paradigma, ou seja, uma nova forma de fazer ciência (KUHN, 2018).

Esses três nomes da filosofia científica têm em comum o fato de utilizar a História da Ciência como base para as suas teorias (GALINDO DA COSTA; TONELO, 2012). Mas a Teoria de Kuhn possivelmente foi a que causou maior impacto sendo debatida até os dias de hoje. Podemos observar em seu livro “A estrutura das Revoluções Científicas” que suas definições de paradigma e revolução científica remontam com certa facilidade ao período de transição da Física Clássica, com predomínio da Mecânica Newtoniana, para a Física Moderna, com o advento das Teorias da Relatividade e da Mecânica Quântica. O objetivo deste trabalho é demarcar, dentro desse período de transição, os momentos de ciência normal e de revolução científica fazendo uma análise crítica da teoria kuhniana.



2. A Física Clássica

A chamada Revolução Científica do século XVII, iniciada no século XVI com o Heliocentrismo de Copérnico e em seguida com o primitivo método científico de Galileu, trouxe uma nova visão de mundo para a humanidade. A Terra deixava de ser o centro do universo e o homem passava ser parte da natureza, com isso buscava-se não mais contemplá-la, mas entendê-la para reproduzir os seus fenômenos e passar a controlá-la. Apesar de outros grandes físicos, como Descartes e Leibniz terem contribuído para a “nova Física” que surgia, foi Isaac Newton que acabaria unificando as físicas celeste e sublunar, descrevendo com grande precisão, à partir de sua Mecânica, tanto o movimento dos planetas quanto dos corpos nas proximidades da Terra (ROSA, 2005).

A Mecânica Newtoniana, com suas leis de movimento e a Gravitação, se tornou o paradigma mais forte da história da ciência moderna, vigorando por dois séculos e servindo de base conceitual para outras áreas da Física como a Óptica/Ondulatória, Termodinâmica e Eletromagnetismo (PINHEIRO, 1999). O conjunto dessas áreas, influenciadas pelo paradigma mecanicista (newtoniano) que mais tarde fora rompido, é comumente chamado de Física Clássica. Todas as teorias que surgiram neste período da história, tinham que concordar com a Física newtoniana (RIBEIRO FILHO, 2014).

A Física Clássica tem como características principais a previsibilidade e o determinismo; suas leis possuíam consistência matemática e eram comprováveis experimentalmente (PINHEIRO, 1999). Tivemos, dentro do paradigma clássico, grandes descobertas que muitos estudiosos da ciência consideram verdadeiras revoluções, a unificação da Eletricidade com o Magnetismo, com a Óptica por meio das equações de Maxwell, e com a Termodinâmica utilizando os conceitos de energia e de conservação da energia (ROSA, 2006). Enquanto o Eletromagnetismo contou com um formalismo matemático sofisticado, a Termodinâmica tratava os seus fenômenos de forma sistêmica utilizando variáveis coletivas (Pressão, Volume e Temperatura) em vez de partículas isoladas como a mecânica fazia. Porém, estas descobertas ainda tinham como base a mecânica newtoniana e poderiam de alguma forma sempre apropriar-se de suas grandezas e conceitos. Essa apropriação foi feita mais tarde com a teoria cinética dos gases, que através da Mecânica Estatística, inseriu as Leis de Newton na Termodinâmica. Enquanto isso, Maxwell desenvolveu o seu Eletromagnetismo insistindo no éter e seus efeitos mecânicos (ROSA, 2006).

3. A Física Moderna

Chamada de “moderna” por ser mais recente, possui base conceitual diferente da clássica e teve início aproximadamente na primeira década do século XX. Nesta época, ainda sob a vigência do paradigma clássico, Sir William Thomson (1824-1907), também conhecido como Lorde Kelvin, fez a seguinte afirmação: “existem apenas duas nuvens a serem removidas do céu límpido da Física” (MARTINS, 2014).

Esta frase nos mostra a grande confiança que os cientistas tinham nas leis da Física Clássica em sua capacidade de solucionar os problemas que surgiam. Por outro lado, essas duas anomalias estavam sinalizando um possível esgotamento dessa capacidade. Uma das



nuvens diz respeito ao problema do espectro que um corpo negro emitia ao absorver radiação, essa distribuição de energia insistia em contrariar a teoria. A outra nuvem seria o resultado inesperado do experimento de Michelson-Morley que, apesar da sofisticação experimental, não conseguiu detectar o vento etéreo, isto é, comprovava ainda mais a inexistência do éter (SCHULZ, 2007).

Para a radiação do corpo negro, Max Planck sugeriu que as ondas eletromagnéticas se propagam descontinuamente, como em pacotes discretos de energia. O experimento de Michelson-Morley levou Einstein a negar a existência do éter e a postular a constância da velocidade da luz. Essas duas soluções propostas por Planck e Einstein foram o germe da Mecânica Quântica e Relatividade respectivamente, trouxeram novos conceitos como “quantização da energia” e “dualidade onda-partícula”, e assim um novo paradigma começava a surgir (RIBEIRO FILHO, 2014).

A Física Moderna tem como características teorias não intuitivas e interpretações probabilísticas. Algumas experiências relacionadas a TR e a MQ fornecem resultados totalmente inesperados como, por exemplo, a dilatação do tempo percebida pelos corpos que viajam com velocidades próximas a da luz. Outro exemplo contra intuitivo é o que mostra o experimento da fenda dupla onde um elétron, com propriedades de partícula, passa pelas duas fendas ao mesmo tempo (ROSA, 2006).

Diferentemente da Física Clássica, as dificuldades de observação dos fenômenos e a medição de suas grandezas dão um caráter de indeterminação para a Física Moderna, em especial para a Mecânica Quântica. O Princípio de Heisenberg é um exemplo da influência dos aparelhos de medida sobre o fenômeno observado no mundo quântico. Segundo este princípio não é possível determinar a posição e o momento de uma partícula subatômica ao mesmo tempo, ou seja, ao determinar a posição dessa partícula perde-se a medida do seu momento (PINHEIRO, 1999).

Essa “nova Física” trouxe outra visão de mundo para os cientistas, novas formas de interpretar a natureza e de fazer ciência.

4. A Teoria de Kuhn

O livro *A estrutura das revoluções científicas*, de Thomas Kuhn, foi um dos livros da filosofia científica mais lidos, causando bastante impacto na filosofia da ciência. Também por conta desse sucesso, foi muito debatido e criticado. A filosofia de Kuhn se caracteriza por valorizar a história da ciência e as disputas pelo reconhecimento entre grupos, dentro da comunidade científica. Tem como principais conceitos o paradigma e a revolução científica, cujas funções são, respectivamente, direcionar as pesquisas e instaurar novas formas de enxergar os fenômenos.

Kuhn define o paradigma como “realizações científicas reconhecidas durante algum tempo por um grupo de pesquisadores proporcionando fundamentos para a sua prática posterior” (KUHN, p. 71, 2018). Para Kuhn, o paradigma é importante porque direciona a pesquisa e aponta os problemas a serem resolvidos; chega a afirmar que não existe pesquisa sem um paradigma como base. Um paradigma é escolhido quando se torna mais bem-sucedido entre os competidores, porém não soluciona todos os problemas, pois é uma



promessa de sucesso necessitando ser fortalecida, o que vai ocorrer no período de ciência normal (KUHN, 2018).

A ciência normal é um período de amadurecimento do paradigma, uma atualização dessa promessa de sucesso. O objetivo da ciência normal não é a descoberta e sim adequar à natureza às teorias, pois as supostas descobertas já foram previstas pelo paradigma vigente. Sendo assim, o trabalho do cientista se assemelha à resolução de quebra-cabeças, onde o problema existente já possui uma solução dentro das teorias aceitas pelos cientistas, basta encontrá-la como quem encontra as peças certas de um *puzzle* (KUHN, 2018).

Quando a natureza contraria as expectativas do paradigma, surge então uma anomalia que começará a ser amplamente explorada pela área de estudo à qual pertence, até que se consiga ajustar a teoria aos dados empíricos. Porém, se essa anomalia resistir, ela passará a ser reconhecida pela comunidade científica, mobilizando um número cada vez maior de cientistas na tentativa de extingui-la. A consequência disso é o surgimento de inúmeras teorias que acabam enfraquecendo o paradigma e, inclusive, questionando a validade das soluções até este momento alcançadas. Para Kuhn essa proliferação de teorias já seria um sinal de crise dentro da ciência. É o momento de pensar em alternativas conceitualmente diferentes, em que aparecem novos candidatos a paradigma, iniciando, assim, uma disputa entre estes postulantes (KUHN, 2018).

O processo de escolha de um paradigma se dá muito mais pelo poder de persuasão do que pela sua capacidade de resolução de problemas. Isso acontece porque cada um deles, possui a sua própria forma de interpretar a natureza e geralmente apresentam grande eficiência. Por serem incompatíveis, os paradigmas em disputa não conversam entre si, não podem sofrer comparações e a escolha por um deles acaba sendo determinada por uma mistura de critérios objetivos e subjetivos (MENDONÇA; VIDEIRA, 2007). Esta situação ficou conhecida como a tese da incomensurabilidade de Kuhn. Enfim, o paradigma vencedor substitui o anterior, que só é abandonado quando um novo é adotado, ou seja, não se descarta um paradigma enquanto não exista um novo para tomar o seu lugar.

A esta ruptura de paradigma, com a consequente substituição por outro, Kuhn chama de revolução científica (PEDUZZI, 2006). A partir daí os cientistas passam a ter uma nova visão ao observar os mesmos fenômenos, criam novas práticas de investigação e novos instrumentos de medição. O termo “revolução científica” pressupõe grandes descobertas com um largo alcance, modificando radicalmente todo o conhecimento construído dentro de uma ou várias áreas de pesquisa. Mas para Kuhn, essa mudança radical não necessita mais do um grupo forte afetado para ser considerada uma revolução científica.

5. A mudança do paradigma clássico para a Mecânica Quântica

O período de transição entre a Física Clássica e a Física Moderna é emblemático, pois apresenta acontecimentos que podem ser explicados pela Teoria de Kuhn. Em uma tentativa de demarcar as fases descritas por esta teoria dentro do período histórico citado, consideramos inicialmente como ciência normal o período de realizações da Física compreendido entre o surgimento das Leis de Newton até o advento das Equações de Maxwell. A Mecânica Newtoniana serviu de base para outras áreas da Física, pois todas as



teorias tentavam sempre se adequar ao paradigma mecânico (BEZERRA, 2006). Durante a vigência deste paradigma, a Física se aprofundou e se especializou, agregando uma enorme gama de conhecimentos e dando conta de praticamente todos os fenômenos até então conhecidos. Dessa forma, entendemos que os cientistas praticaram a chamada ciência normal até o surgimento do Eletromagnetismo de Maxwell, onde começaram a surgir algumas inconsistências.

A teoria de Maxwell foi formulada totalmente independente da existência do éter, cuja existência, até então, era condição *sine qua non* para a propagação das ondas eletromagnéticas assim determinadas pela teoria (BEZERRA, 2006). Além do problema da existência ou não do éter, outra anomalia estava perturbando os cientistas: tratava-se da inadequação dos dados experimentais à teoria da radiação do corpo negro, do qual a energia (radiação eletromagnética) deveria ser emitida de maneira contínua, conforme o paradigma clássico. Ambos os casos mobilizaram diversos cientistas e várias teorias foram criadas para eliminar essas anomalias, mas acabavam gerando mais inconsistências e comprovavam cada vez mais que o paradigma precisava ser substituído (MARTINS, 2014). Assim, podemos associar esta situação ao período em que Kuhn chama de crise.

Este período de crise teria permanecido até Max Planck, em 1900, propor a quantização da energia, que serviu de base para o surgimento da Mecânica Quântica. Quinze anos mais tarde, Einstein postulou a constância da velocidade da luz em qualquer referencial, que deu origem à Teoria da Relatividade (RIBEIRO FILHO, 2014). Concluímos então que essas duas teorias representaram uma revolução científica, pois trouxeram uma nova forma de enxergar a natureza e novos fenômenos foram descobertos. Um mundo determinístico dava lugar a um mundo probabilístico, espaço e tempo absolutos passaram a ser relativos, a matéria deixava de ser contínua com o desenvolvimento dos modelos atômicos. Instaurava-se assim um novo paradigma na Física e conseqüentemente um novo período de ciência normal.

6. Considerações finais

A obra de Thomas Kuhn impactou bastante a comunidade científica, revolucionando a filosofia da ciência e o concedendo a Kuhn o reconhecimento como um dos mais influentes epistemólogos da história (MENDONÇA, 2012). Segundo Mendonça (2012) além de confrontar os neopositivistas, Kuhn atribuiu importante papel epistemológico à História da Ciência na construção do conhecimento científico, diferente do papel meramente ilustrativo que sempre recebeu ao longo do tempo.

Porém, Kuhn também foi bastante criticado sendo acusado inclusive de considerar que a ciência é construída de maneira irracional. Sua tese da incomensurabilidade ameaça a racionalidade da ciência para muitos filósofos, pois Kuhn afirma que as técnicas argumentativas de persuasão utilizadas dentro da comunidade científica é que são determinantes para a escolha do paradigma vencedor ao invés da lógica e das observações empíricas (KUHN, 2018). Se os paradigmas anterior e atual são incompatíveis, isso implica que também são incomparáveis entre si, portanto, os resultados empíricos de nada serviriam para decidir um conflito de paradigmas (ROSA, 2006).

As múltiplas interpretações sobre paradigma e revolução científica também foram motivos de crítica, assim como a suposta desvalorização do trabalho do cientista que passa



a maior parte da sua vida se ocupando com a ciência normal. Será que Newton e Einstein praticavam ciência normal?

Estamos sob a vigência do paradigma Moderno, porém, alguns autores consideram que neste momento a ciência pode estar passando por um período de crise, com novos questionamentos sobre o seu papel na sociedade e com a necessidade de aproximação com as ciências sociais (GALINDO DA COSTA; TONELO, 2012). Estamos em vias de presenciar o surgimento de um novo paradigma? Um paradigma Pós-moderno?

Financiamento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências

BEZERRA, V. A.. **Maxwell, a teoria do campo e a desmecanização da física**. SCIENTIAE STUDIA (USP), São Paulo, SP, v. 4, n.2, p. 177-220, 2006.

GALINDO DA COSTA, A.; TONELO, D. **Filosofia da ciência e mudanças de paradigma: uma breve revisão da literatura**. Temas de Administração Pública (UNESP. Araraquara), v. 4, p. 1-13, 2012.

KUHN, T.S. **A estrutura das revoluções científicas**. Trad. Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. São Paulo: Perspectiva, 2018. (Debates;2015)

MARTINS, R.A., ROSA, P.S. **História da Teoria Quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.

MENDONÇA, A.L.O. **O legado de Thomas Kuhn após cinquenta anos**. Scientiae Studia (USP), v. 10, p. 535-560, 2012.

MENDONÇA, A.L.O.; VIDEIRA, A.A.P. **Progresso científico e incomensurabilidade em Thomas Kuhn**. Scientiae Studia (USP), v. 5, p. 167-83, 2007.

PEDUZZI, L. O. Q.. **Sobre continuidades e descontinuidades no conhecimento científico: uma discussão centrada na perspectiva kuhniana**. Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino. São Paulo: Livraria da Física, 2006, v., p. 59-83.

PINHEIRO, I.A. **O Tao da Administração**. In: XXIII ENANPAD, 1999, Foz do Iguaçu, PR. Anais (CD), 1999.

RIBEIRO FILHO, A. **Uma Breve Discussão sobre alguns Caminhos da Física**. Ideação (UEFS), v. 28, p. 79-120, 2014.

ROSA, L.P. **Tecnociências e humanidades: novos paradigmas, velhas questões, v.1: O determinismo newtoniano na visão de mundo moderna**. São Paulo: Paz e Terra, 2005.



ROSA, L.P. **Tecnociências e humanidades: novos paradigmas, velhas questões, v.2: a ruptura do determinismo, incerteza e pós-modernismo.** São Paulo: Paz e Terra, 2006.

SCHULZ, P. A. **Dois nuvens ainda fazem sombra na reputação de Lorde Kelvin.** Revista Brasileira de Ensino de Física (Impresso) , v. 29, p. 509-512, 2007.



NOTAS SOBRE A HISTÓRIA DA CIÊNCIA NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES E O SEU IMPACTO NO ENSINO DE FÍSICA

Francisco de Assis Lima de Sousa Junior¹⁻⁴, Priscila Tamiasso Martinhon¹⁻⁴, Maira Monteiro Fróes¹⁻⁴, Célia Sousa¹⁻⁴; Luiz Pinguelli Rosa (*in memoriam*)

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil
 (fassis@metalmat.ufrj.br)

²Programa de Pós-Graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia (HCTE/UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil

³Grupo Interdisciplinar de Educação, Eletroquímica, Saúde, Ambiente e Arte (GIEESAA), Rio de Janeiro, Brasil

⁴Grupo Interinstitucional e Multidisciplinar de Ensino, Pesquisa e Extensão em Ciências (GIMEnPEC), Rio de Janeiro, Brasil

Resumo: Neste trabalho discutimos a importância da História da Ciência (HC) para o Ensino de Física e como ela é apresentada na formação de professores. Fizemos um levantamento das disciplinas que tratam de HC nos principais cursos de Licenciatura em Física do país e aplicamos um questionário com professores do Ensino Médio. Verificamos que estes consideram a formação inicial deficitária em HC e uma escassez de disciplinas dessa área nos cursos de licenciatura em Física.

Palavras-chave: Ensino de Física; História e Filosofia da Ciência; Formação de professores.

INTRODUÇÃO

A História da Ciência (HC) ou História e Filosofia da Ciência (HFC) é um recurso didático utilizado por muitos professores. Estes acreditam que discutir com os alunos sobre o significado de uma determinada teoria, bem como o caminho percorrido na sua construção, pode acrescentar positivamente no processo de aprendizagem. Briccia e Carvalho (2011) afirmam que é possível motivar os alunos em relação ao seu interesse pelo estudo da ciência e melhorar a participação no processo de ensino-aprendizagem ao utilizar a HC como estratégia de ensino de Física.

Atualmente, trabalhar com HC em algum momento na sala de aula não é mais uma simples alternativa para o docente e sim uma orientação a ser seguida. A Base Nacional Comum Curricular (BNCC), referência obrigatória para elaboração dos currículos escolares, traz em suas normas a importância de um ensino contextualizado historicamente em seus aspectos social, cultural, político e econômico, assim como a apresentação dos múltiplos pensamentos que ajudaram a construir o conhecimento humano (BRASIL, 2018). O Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), em sua Matriz de Referência, cita concepções e relações históricas como objetos de conhecimento do conteúdo programático da prova de ciências da Natureza (BRASIL, 2022).

Pelos motivos citados, muitos docentes tentam à sua maneira inserir conteúdos de HC em suas aulas. Entretanto, assim como em todos os outros recursos didáticos, para ser eficaz, essa inserção precisa ser bem planejada, com objetivos bem definidos e conhecimento técnico adequado, não se limitando apenas a motivar o aluno aguçando a sua curiosidade.

Sendo assim, os professores precisam ter contato com a HC desde a sua formação inicial, conhecer como a ciência se desenvolveu ao longo da história da humanidade, entender como ocorreu o processo de construção do conhecimento com muitas reviravoltas e brigas de poder, descobrir os fatores que levaram os cientistas a trilharem certos caminhos e compreenderem qual o papel da Ciência na sociedade. Somado a isso, a HC tem a capacidade de desenvolver, nos futuros docentes, um pensamento crítico (OLIVEIRA e SILVA, 2012).

Um breve levantamento, que será descrito adiante neste trabalho, mostrou que as universidades públicas ainda se preocupam pouco com o conhecimento histórico e filosófico da Física. Verificamos que em suas grades curriculares constam no máximo duas disciplinas voltadas para esses temas, priorizando fortemente um conteúdo técnico. Porém, não basta apenas inserir a HC na formação de professores, se



faz necessário incluir também disciplinas que orientem a sua aplicação em sala de aula (MEDEIROS e BEZERRA FILHO, 2000 *apud* GOMES, 2015). Ou seja, os cursos de Licenciatura em Física estão formando professores com pouco conhecimento em HC e consequentemente despreparados para utilizá-la em sala de aula. Os próprios docentes consideram a sua formação deficitária no que diz respeito à aprendizagem de HC. Nesta pesquisa foi aplicado um questionário para um grupo de professores do Ensino Médio (EM) cujas respostas corroboram com essa afirmativa.

O objetivo deste trabalho foi levantar o ensino de HC nos melhores cursos de Licenciatura em Física do país e, através de relatos associados a um questionário, indicadores preliminares da importância da HC para o Ensino de Física, avaliando a valorização por parte dos professores, por um lado, e, na experiência destes, o interesse dos estudantes destes cursos.

MATERIAL E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos foi realizado um levantamento das disciplinas que tratam especificamente deste tema nos currículos dos cinco cursos de Licenciatura em Física com melhor nota no Exame Nacional de Desempenho de Estudantes (ENADE) de 2021, a saber: Universidade de São Paulo (USP), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Além disso, professores de Física, Química e Biologia do EM, totalizando 8, responderam a um questionário contendo, dentre outras, as seguintes perguntas:

- O que você pensa sobre a utilização da HC como ferramenta didática em suas aulas?
- Você já utilizou a HC como estratégia didática em suas aulas? Qual foi o resultado?
- Você acha que os cursos de licenciatura preparam o professor para utilizar a HC em suas aulas?
- Se a sua resposta foi "Não", você acha que os cursos de licenciatura deveriam possuir mais disciplinas voltadas para a História e Filosofia das Ciências? Ou o professor é quem deveria buscar esse conhecimento em cursos de formação continuada?

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra a lista de disciplinas específicas de História e/ou Filosofia da Ciência contidas nas grades curriculares consideradas obrigatórias para esses cursos.

Tabela 1. Disciplinas obrigatórias de História e/ou Filosofia da Ciência ofertadas nas Universidades.

USP
Não possui disciplinas
UNICAMP
Não possui disciplinas
UFRJ
História da Física - Cosmologia antiga. A física de Aristóteles. A física medieval. As origens da mecânica. Mecanicismo. A teoria eletromagnética de Maxwell. Conceito de campo. Os impasses da mecânica clássica. A teoria da relatividade e a mecânica quântica.
UFMG
Evolução das ideias da Física - Filosofia grega da natureza. Ciência alexandrina. Declínio da ciência antiga. Física medieval. Renascença e a revolução científica. Física newtoniana. Física no "século das luzes". Decadência do mecanismo e nascimento do eletromagnetismo e da termodinâmica. Crise finisecular e nascimento da física contemporânea. Problemas atuais.
UFRGS
História da Física e Epistemologia - Origem e justificação do conhecimento (dos antigos gregos à atualidade); discussão dos principais períodos históricos de desenvolvimento da física (Aristotelismo, física medieval, a física de Copérnico, Kepler, Galileu, Descartes, Newton e a física do Século XX); epistemologias do Século XX (Popper, Kuhn, Lakatos, Laudan, Bachelard, Feyerabend, Toulmin, Maturana); a epistemologia empirista-indutivista nos livros de texto atuais e nas concepções de ensino-aprendizagem e as implicações da história e epistemologia da física para o ensino.

Apesar dos objetivos dos cursos de Licenciatura em Física das diversas universidades pelo Brasil serem praticamente os mesmos, ou seja, formarem professores para atuarem no Ensino Básico, foram observadas algumas diferenças curriculares. Especificamente com relação à importância de fornecer aos novos professores subsídios para utilizarem a HC, como estratégia didática em suas aulas, verificamos que dois dos cinco melhores cursos de formação de professores em Física sequer têm disciplinas de HC em suas grades curriculares obrigatórias, como é o caso da USP e da UNICAMP. Estas duas universidades tratam das questões filosóficas, históricas e epistemológicas inseridas em disciplinas como Didática da Física, Tópicos de Ensino da Física e Projetos de Ensino de Física ou,



de maneira bem superficial, nas disciplinas que compõem os tópicos da Física.

A USP oferece as seguintes disciplinas na condição de optativas: Introdução à Epistemologia das Ciências, Tópicos de História da Física Clássica (também de moderna), Evolução dos Conceitos da Física, Filosofia da Física, Tópicos de Filosofia da Física. Dessa forma, cabe ao aluno, que será um futuro professor, e talvez o seu orientador, avaliar a importância de acrescentar esses conhecimentos à sua formação. Essas disciplinas abordam exclusivamente como a ciência é construída, sob quais contextos históricos e sociais, bem como a evolução do pensamento científico ao longo da história.

Com apenas uma disciplina na grade curricular obrigatória, História da Física, a UFRJ oferece aos seus alunos um curso que aborda, em ordem cronológica, a produção do conhecimento da Física desde a Grécia Antiga até a Física do século XX. Analisando a ementa desta disciplina, observamos que é adotada uma historiografia internalista, dando ênfase nas descobertas científicas, desprezando a influência sociológica na concepção das teorias. Uma abordagem histórica é considerada internalista quando mostra como a ciência foi desenvolvida nos laboratórios e entre os cientistas em sua comunidade (OLIVEIRA e SILVA, 2012).

A UFMG também possui apenas uma disciplina que trata da construção histórica do conhecimento científico, a Evolução das ideias da Física. Apesar de não possuir o termo ‘História’ em seu nome, esta disciplina contextualiza historicamente cada um dos tópicos e discute questões filosóficas geradas por eles.

Por fim, a UFRGS, oferece a disciplina História da Física e Epistemologia que, além de fazer parte das disciplinas obrigatórias do curso de Licenciatura em Física desta universidade, contempla tanto os aspectos históricos quanto filosóficos e epistemológicos da Física. Esta disciplina possui um perfil mais completo, fornecendo aos futuros docentes um conhecimento dos fatos, sua interpretação e sua função dentro do processo de construção da Ciência. Moreira, Massoni e Osterman (2007) fizeram um estudo descrevendo como esta disciplina foi implementada e as mudanças ocorridas nas concepções dos alunos sobre a natureza da ciência. Dentre os resultados citaram:

“...a apresentação e discussão das principais visões epistemológicas contemporâneas de forma direta e utilizando amplamente os aspectos históricos de construção da física contribuiu de forma positiva na evolução das visões da natureza da ciência do grupo de estudantes e sugeriu uma formação de professores de física mais reflexiva e crítica” (MOREIRA, MASSONI e OSTERMAN, 2007, p.133).

As respostas dos professores entrevistados também demonstram que estes valorizam a HC como recurso didático ao mesmo tempo em que admitem precisarem aprender mais sobre como utilizar esta ferramenta em sala de aula. Sobre a utilização da História da Ciência (HC) como ferramenta didática nas aulas de Física/Química/Biologia, apenas um dos professores não opinou por considerar não ter estudado suficientemente sobre o assunto. O restante utilizou termos como “fundamental”, “importante”, “interessante”, “muito útil” e “muito relevante” para o ensino de Ciências, afirmando terem utilizado a HC como recurso didático em suas aulas, com exceção de um deles. Como resultados citados pelos que utilizaram a HC temos: melhor compreensão dos conteúdos, oportunidade de discutir a natureza da ciência, alunos ficam mais interessados/motivados/surpresos, humanização da ciência, vantagem de educar pelo exemplo de vida entre outros. Tivemos também relatos de que observaram a dispersão de alguns alunos e que evitam usar a HC de maneira ilustrativa.

Todos os entrevistados, com exceção de um, consideram que os cursos de licenciatura não preparam os futuros professores para usarem a HC em suas aulas. Para eles, é função das licenciaturas oferecerem disciplinas que forneçam metodologias diversas, dentre elas a própria HC. Reconhecem que a HC é muito pouco abordada nos cursos, devendo existir mais disciplinas sobre essa área de ensino ou inserida com maior frequência nas próprias disciplinas do currículo. Um dos professores entrevistados foi além, defendendo não apenas a inserção de mais disciplinas ou conteúdos de HC nas próprias disciplinas, mas uma revisão de todo projeto pedagógico dos cursos visando um equilíbrio entre a parte técnica e filosófica dos conteúdos.

CONCLUSÃO

Em face das dificuldades encontradas pelos professores ao ensinar Física, a HC torna-se uma alternativa metodológica eficaz. Como pudemos observar, este recurso didático possui grande aceitação entre os docentes que, mesmo não possuindo uma formação adequada nesta área, incluem a HC em algum momento da sua prática. Diante disso, concluímos que os cursos de licenciatura em Física deveriam valorizar a HC contemplando em suas grades curriculares mais disciplinas que tratam desse tipo de abordagem.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao Programa de Pós-Graduação História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia (HCTE-

Anais do III CoBICET – Trabalho completo
Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia
 “15 anos dos BIs e LIs: retrospectiva, resistência e futuro”



UFRJ) por oportunizar essa pesquisa de doutoramento.

Ao Professor Luiz Pinguelli Rosa por toda dedicação ao programa de pós-graduação em História das Ciências, das Técnicas e Epistemologia, desde sua fundação até seu convescimento.

REFERÊNCIAS

BRASIL, Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília, 2018.

_____, Ministério da Educação. Matriz de Referência ENEM. Brasília: Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. Disponível em: https://download.inep.gov.br/download/enem/matriz_referencia.pdf. Acesso em 02/02/2022.

BRICCIA, V.; CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. Visões sobre a Natureza da Ciência construídas a partir do uso de um texto histórico na escola média. REEC. Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias, v. 10, p. 1-22, 2011.

GOMES, T.G., Uma história da radioatividade para a Escola Básica: desafios e propostas. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2015.

MOREIRA, M. A.; MASSONI, N.; OSTERMANN, F. História e Epistemologia da Física na Licenciatura em Física: uma disciplina que busca mudar as concepções dos alunos. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, p. 127-134, 2007.

OLIVEIRA, R. A.; SILVA, A. P. B. História da Ciência e Ensino de Física: Uma análise Meta-históricográfica. In: Luiz O. Q. Peduzzi; André Ferrer P. Martins e Juliana Mesquita Hidalgo Ferreira (Org). (Org.). Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino. 1ªed.Natal: EDUFRRN, 2012, v., p. 41-64.

Verifique o código de autenticidade 6309179.5418043.874796.0.09471483789308131429 em <https://www.even3.com.br/documentos>

VI EHECO
Encontro de História da
Educação do Centro-
Oeste

Certificamos que **Francisco de Assis Lima de Sousa Junior, Priscila Tamiasso Martinhon e MAIRA MONTEIRO FRÓES**, participaram na qualidade de **APRESENTADORES**, do evento **VI Encontro de História da Educação do Centro-Oeste**, apresentando na Modalidade Comunicação Oral e Área(s) Temática(s) **Formação e profissão docente**.

Uberlândia, 28 de setembro de 2022


BETÂNIA DE OLIVEIRA LATERZA RIBEIRO
COORDENADORA DO VI EHECO


CARLOS HENRIQUE DE CARVALHO
COORDENADOR DO VI EHECO





**A HISTÓRIA DO PENSAMENTO CIENTÍFICO E O “NOVO” ENSINO MÉDIO:
EXPERIENCIANDO O TEMA GERADOR “ENERGIA” COM BASE NA
EPISTEMOLOGIA DE THOMAS KUHN**

Francisco de Assis Lima de Sousa Junior¹

Priscila Tamiasso Martinhon²

Maira Monteiro Fróes³

Resumo

A reestruturação educacional proposta pelo Novo Ensino Médio (NEM) tem gerado amplos debates entre educadores e pesquisadores, que se dedicam a formação de professores, no que concerne a política educacional a que ela se propõe. Dentre as questões debatidas está a preocupação com a oferta de um ensino superficial causado pela abordagem interdisciplinar exigida pelo NEM. No contexto do Ensino de Física (EF) questionamos a viabilidade de se assumir uma postura crítica e de resistência ao empregar “História do Pensamento Científico” (HPC) e a “História e Filosofia da Ciência” (HFC), recursos didáticos bastante experimentados e defendidos por pesquisadores da área de EF, em aulas de Física suleadas pelo Tema Gerador (TG) Energia. No presente trabalho os planejamentos pedagógicos propostos e realizados pela equipe pedagógica do Grupo Interinstitucional e Multidisciplinar de Ensino, Pesquisa e Extensão em Ciências (GIMEnPEC), dialogou com Thomas Kuhn sobretudo ao revisitar a práxis docente pensada na sala de aula como um espaço de construção de conhecimento democrático e não dogmático. Este físico e filósofo da ciência se destacou por valorizar os aspectos filosóficos e sociológicos do fazer científico, desmistificando a suposta neutralidade e inquestionabilidade da Ciência. A proposta, baseada na estrutura de desenvolvimento da ciência segundo Kuhn, obteve grande aceitação dos professores que participaram da pesquisa. Estes docentes também demonstram preocupação com a implantação do NEM, pontuando a necessidade de uma formação inicial e/ou continuada, voltada ao EF, com mais disciplinas sobre HPC e HFC, com ênfase na prática em sala. Verificamos também que o tema Energia, um dos três Eixos Temáticos para Ciências da Natureza contidos na Base Nacional Comum

¹ Francisco de Assis Lima de Sousa Junior. Universidade Federal do Rio de Janeiro. fassis@metalmat.ufrj.br.

² Priscila Tamiasso Martinhon. Universidade Federal do Rio de Janeiro. pris-martinhon@hotmail.com.

³ Maira Monteiro Fróes. Universidade Federal do Rio de Janeiro. froes.maira@gmail.com.



Curricular (BNCC), é bastante exigido no Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), que por sua vez também apresenta tradicionalmente questões referentes à HPC e HFC.

Palavras-chave: Formação docente. BNCC. Ensino de Física.

INTRODUÇÃO

A História do Pensamento Científico (HPC) e a História e Filosofia da Ciência (HFC) são recursos didáticos utilizados por alguns professores na tentativa de melhorar a compreensão do aluno e despertar o seu interesse pela física. Entretanto, assim como em todos os outros recursos didáticos, para ser eficaz, essa inserção precisa ser bem planejada, com objetivos bem definidos e conhecimento técnico adequado, não se limitando apenas a motivar o aluno aguçando a sua curiosidade.

Atualmente, trabalhar com HFC em algum momento na sala de aula não é mais uma simples alternativa para o docente e sim uma orientação a ser seguida. A Base Nacional Comum Curricular (BNCC), referência obrigatória para elaboração dos currículos escolares, traz em suas normas a importância de um ensino contextualizado historicamente em seus aspectos social, cultural, político e econômico, assim como a apresentação dos múltiplos pensamentos que ajudaram a construir o conhecimento humano (BRASIL, 2018). O Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), em sua Matriz de Referência, cita concepções e relações históricas como objetos de conhecimento do conteúdo programático da prova de ciências da Natureza. Por outro lado, com a criação do Novo Ensino Médio (NEM), organização curricular aprovada pelo Ministério da Educação e implementada em 2022, muitas dúvidas surgiram quanto a possibilidade de utilização da HFC como recurso didático. A fusão das disciplinas Física, Química e Biologia em uma só área chamada de Ciências da Natureza, transformaram os conteúdos em temas interdisciplinares. Sendo assim, os conceitos precisam ser trabalhados de forma objetiva e aplicável a esses temas sugeridos.

Mas, em decidindo utilizar este recurso, onde os professores podem encontrar material referente a HFC e de boa qualidade? Os livros didáticos, principal ferramenta utilizada pelos professores, exploram corretamente este recurso didático? Muito criticada, a HFC usada nos livros é geralmente resumida e com recortes que fortalecem ainda mais a ideia de uma ciência produzida apenas por grandes mentes e seus momentos de genialidade. A título de curiosidade



e como elemento motivador os textos contidos nos livros podem ser benéficos, porém acrescentam muito pouco pedagogicamente (CARVALHO e GARCIA, 2015).

O excesso de conteúdos de física ministrados aos alunos de forma dogmática, sequenciada e finalizada, induz à conclusão de que o conhecimento científico é construído de forma cumulativa e seguindo um único método (NASCIMENTO, CARVALHO e SILVA, 2017). O filósofo da ciência Thomas Kuhn (1922-1996) foi um dos que romperam com essa mística de uma ciência cumulativa, sempre progressiva e que descreve a realidade dos fenômenos naturais. Valorizando os fatores históricos e sociais na construção do conhecimento, Kuhn define a ciência como um empreendimento humano cíclico onde as disputas entre grupos dentro da comunidade científica determinam um conjunto de regras e conceitos a serem seguidos (KUHN, 2018; OSTERMANN, 1996; PEDUZZI, 2011).

Diante desses aspectos expostos até aqui, algumas questões emergiram:

- De que maneira podemos melhorar o ensino de física?
- A HC pode contribuir positivamente para o processo de ensino-aprendizagem?
- Como preparar os professores para utilizarem a HC em sala de aula?
- A epistemologia de Kuhn pode ser utilizada para ensinar física?
- É possível utilizar a HC em um currículo interdisciplinar e com temas atuais como o do Novo Ensino Médio?

Este trabalho busca comprovar a seguinte hipótese: A estrutura de desenvolvimento da Ciência, de acordo com a epistemologia de Thomas Kuhn, pode ser aplicada ao ensino de Física obtendo resultados satisfatórios. O objetivo principal deste trabalho é propor uma metodologia de ensino da Física com base na estrutura de evolução da Ciência segundo Kuhn e que seja adaptável às recomendações do NEM. Para isso, pretendemos realizar um levantamento bibliográfico sobre propostas de ensino de Física que utilizem a HC como recurso didático; criar uma estratégia de ensino para um determinado tópico da Física; elaborar material didático para os professores baseado nessa estratégia e discutir com eles a viabilidade de aplicação em sala de aula.

PROBLEMATIZAÇÃO

A utilização da HFC como estratégia de ensino pode trazer alguns benefícios pedagógicos como desfazer a visão distorcida da construção do conhecimento científico,



desmistificar a suposta neutralidade da Ciência mostrando que ela sofre influência social, econômica e política, que os erros são importantes para o avanço das teorias (OLIVEIRA e SILVA, 2012). Muitos trabalhos publicados em revistas especializadas em ensino têm sugerido a utilização da HFC nas aulas de Física, Química e Biologia, com relatos de experiências realizadas com alunos do EM e ES alcançando bons resultados no que diz respeito ao aumento do interesse pela matéria e melhora no desempenho acadêmico (NASCIMENTO, CARVALHO e SILVA, 2017). As mudanças curriculares trazidas pelo NEM, aumentou a demanda por novas metodologias e materiais didáticos. Tomando como base os conteúdos definidos pela BNCC, a estrutura curricular do NEM oferecerá aos alunos do Ensino Médio a possibilidade de aprofundamento em áreas das suas preferências e também uma formação técnica e profissional. Ou seja, o EM deixará de ter foco exclusivamente na preparação para o ES e passará a ter como objetivo também a inserção no mercado de trabalho (BRASIL, 2017).

No NEM os conteúdos não estão mais distribuídos em disciplinas e sim em áreas de conhecimento. Dessa forma, os conhecimentos de Química, Física e de Biologia, por exemplo, tem que ser abordados pelo professor através de temas comuns à essas três disciplinas. O objetivo dessa mudança é estimular os professores a trabalharem por meio de projetos, oficinas e atividades interativas e não apenas com aulas expositivas sem a participação dos alunos (BRASIL, 2022). Estas características citadas acima podem facilitar a decisão do professor em utilizar a HFC como recurso didático e até mesmo a sua execução

Ao utilizar a HFC em suas aulas, o professor precisará organizar os conteúdos de acordo com a lógica dos acontecimentos que levaram a construção dos conhecimentos abordados. Esta organização não precisará ser cronológica, mas deverá contemplar o contexto histórico, os interesses da sociedade e os percalços sofridos pelos cientistas. Neste sentido, acreditamos que a estrutura criada por Thomas Kuhn, da qual descreve o desenvolvimento da ciência de forma cíclica passando por etapas ou fases também pode ser usada para o ensino.

A filosofia de Kuhn se caracteriza por valorizar a história da ciência e as disputas pelo reconhecimento entre grupos dentro da comunidade científica. Tem como principais conceitos o paradigma e a revolução científica que pertencem a períodos de desenvolvimento da ciência chamados de ciência normal e crise (KUHN, 2018).



Kuhn define o paradigma como “realizações científicas reconhecidas durante algum tempo por um grupo de pesquisadores proporcionando fundamentos para a sua prática posterior” (KUHN, 2018, p.71). A ciência normal é um período de amadurecimento do paradigma, uma atualização dessa promessa de sucesso. Quando a natureza contraria as expectativas do paradigma, os cientistas se deparam com uma anomalia e assim inicia-se um período de crise na ciência. Caso a anomalia não consiga ser superada a comunidade científica começa a pensar em alternativas conceitualmente diferentes, aparecem então novos candidatos a paradigma que irão entrar em disputa. O paradigma vencedor substitui o anterior, dando origem ao que Kuhn chama de revolução científica.

Portanto, para Kuhn a ciência se desenvolve, em parte, cumulativamente por acréscimo ao que antes era conhecido, mas também por mudanças revolucionárias que extrapolam os limites impostos pelos conceitos anteriormente definidos (PEDUZZI, 2011).

METODOLOGIA

Como já foi dito anteriormente, o objetivo principal deste trabalho foi desenvolver uma sequência didática para o ensino de um tópico da Física utilizando a HC como recurso pedagógico e adaptá-la ao NEM. Para isso, dividimos a pesquisa em duas partes: entrevista com professores e elaboração da sequência didática.

Entrevista com professores

Convidamos 8 professores da área de Ciências da Natureza para responderem a um questionário que tinha como objetivo investigar se os professores já conhecem o NEM, o que eles entendem dessa nova proposta, quais os impactos sobre as suas práticas em sala de aula. Além disso, procuramos saber dos professores se já fizeram uso da HC em suas aulas, quais os resultados e se consideram possível continuar utilizando a HC para o ensino de Física mesmo após essas mudanças provocadas pelo NEM.

Sobre a utilização da História da Ciência (HC) como ferramenta didática nas aulas de Física/Química/Biologia, apenas um dos professores não opinou por considerar não ter estudado suficientemente sobre o assunto. O restante utilizou termos como “fundamental”, “importante”, “interessante”, “muito útil” e “muito relevante” para o ensino de Ciências, afirmando terem utilizado a HC como recurso didático em suas aulas, com exceção de um deles.



Como resultados citados pelos que utilizaram a HC temos: melhor compreensão dos conteúdos, oportunidade de discutir a natureza da ciência, alunos ficam mais interessados/motivados/surpresos, humanização da ciência, vantagem de educar pelo exemplo de vida entre outros. Tivemos também relatos de que observaram a dispersão de alguns alunos e que evitam usar a HC de maneira ilustrativa.

Todos os entrevistados, com exceção de um, consideram que os cursos de licenciatura não preparam os futuros professores para usarem a HC em suas aulas. Para eles, é função das licenciaturas oferecerem disciplinas que forneçam metodologias diversas, dentre elas a própria HC. Reconhecem que a HC é muito pouco abordada nos cursos, devendo existir mais disciplinas sobre essa área de ensino ou inserida com maior frequência nas próprias disciplinas do currículo. Um dos professores entrevistados foi além, defendendo não apenas a inserção de mais disciplinas ou conteúdos de HC nas próprias disciplinas, mas uma revisão de todo projeto pedagógico dos cursos visando um equilíbrio entre a parte técnica e filosófica dos conteúdos.

Com relação ao Novo Ensino Médio, a maioria dos professores entrevistados entendem que essa reforma trará prejuízos para o ensino de suas disciplinas. Com exceção de dois professores, que citam a vantagem de os alunos escolherem em que área irá se aprofundar e a oportunidade de o professor utilizar diversas metodologias pedagógicas incluindo a HC, todos os demais acreditam que o conteúdo da formação comum (obrigatória) será comprometido devido à uma suposta redução de carga horária específica e a obrigatoriedade de trabalhar os conteúdos de forma interdisciplinar. Esses aspectos, segundo eles, promoverão um ensino superficial, deixando para trás conceitos fundamentais de cada disciplina. Não obstante, existe o problema da formação específica de cada professor, que precisará abordar os temas sob a ótica das outras ciências, trazendo prejuízos didáticos e curriculares.

Apesar do panorama pessimista encontrado entre a maioria desses professores, estes creem ser possível adaptar metodologias alternativas, incluindo a HC, no âmbito do Novo Ensino Médio. Porém, o debate e a formação dos professores devem ser permanentes, com um aumento de pesquisas sobre o tema e a criação de estratégias didáticas que auxiliem o professor nessa adaptação. Essa conclusão se concretizou pelo fato de que apenas um dos entrevistados não aceitaria participar de uma oficina de aplicação da HC ao Novo Ensino Médio.



Elaboração da sequência didática

Após coletar as opiniões dos professores, começamos o processo de elaboração da sequência didática analisando as propostas de ensino de Física, com base na HC, encontradas na revisão da literatura feita a seguir. Esta análise foi importante para evitar erros e exageros que comprometem a eficácia da proposta pedagógica, bem como possibilitar a captação de ideias que pudessem contribuir. Além disso, buscamos identificar dificuldades reportadas pelos pesquisadores ao inserir a HC em suas metodologias de ensino e os objetivos epistemológicos pretendidos por eles com suas intervenções pedagógicas.

Em seguida, procedemos com a escolha do tema a ser abordado na sequência didática. Essa escolha foi realizada com base na sua relevância para a BNCC e incidência no ENEM. Como vimos anteriormente, a BNCC integrou o currículo das disciplinas Física, Química e Biologia dividindo-o em dois grandes temas: “Matéria e Energia” e “Vida, Terra e Cosmos” e para cada um desses temas, foram definidas competências a serem trabalhadas pelos professores e habilidades a serem alcançadas pelos alunos. Em nosso entendimento, esses dois conceitos que dão nome ao eixo temático “Matéria e Energia”, podem ser trabalhados separadamente. Apesar de estarem intrinsecamente ligados, são conceitos que surgiram em épocas distintas e possuem, cada um deles, grande quantidade de fundamentos e características que merecem um capítulo à parte. Ao optarmos pelo tópico “Energia”, nos perguntamos: O que os alunos precisam aprender sobre esse tema? Quais os conteúdos sobre Energia precisam ser trabalhados para que sejam atingidas as habilidades e competências exigidas pela BNCC? Como abordá-los interdisciplinarmente?

O Prof. Ricardo Rechi Aguiar, do IFSP, durante 18ª Semana Nacional de Ciência e Tecnologia, traduziu em termos de tópicos de um currículo, as habilidades e competências descritas na BNCC para o EM, área das Ciências Naturais e suas Tecnologias, no que diz respeito ao tema “Matéria e Energia” (Quadro 1). Também citou exemplos de conteúdos que podem ser abordados nas aulas de Física, de maneira específica e também multidisciplinar, baseados nesses tópicos (Quadro 2).



Quadro 1: Habilidades x Temas da Física.

COMPETÊNCIA ESPECÍFICA 1		HABILIDADES
Matéria e Energia		
Habilidade	Tema	
101	Conservação e Transformação de matéria e energia	
102	Sistemas térmicos e variáveis termodinâmicas	
103	Radiações: riscos e benefícios	
104	Composição e toxicidades de matérias	
105	Ciclo dos elementos, interferências e suas consequências	
106	Energia elétrica: geração, transporte, distribuição e consumo	

Fonte: SNCT 2018 - Semana Nacional de Ciência e Tecnologia.

Quadro 2: Temas da Física e áreas com seus respectivos conteúdos.

Hab	Tema	Exemplos na Física
101	Conservação e Transformação de matéria e energia	MEC - energia e quantidade de movimento, colisões
102	Sistemas térmicos e variáveis termodinâmicas	MEC/TER - pressão, temperatura, umidade relativa, ciclos termodinâmicos
103	Radiações: riscos e benefícios	FMC - radioatividade, fusão nuclear (evolução estelar), efeitos biológicos
104	Composição e toxicidades de matérias	FMC - radioatividade, efeitos biológicos das radiações
105	Ciclo dos elementos, interferências e suas consequências	OPT/FMC - efeito estufa, camada de ozônio, efeitos biológicos das radiações
106	Energia elétrica: geração, transporte, distribuição e consumo	EM - eletrodinâmica, formas geração de energia elétrica

Fonte: SNCT 2018 - Semana Nacional de Ciência e Tecnologia.

Em se tratando do ENEM, analisamos a sua última prova acontecida em 2021, e identificamos as questões que versam ou que tenham relação com o tema “Energia”. O conceito de energia está presente em praticamente todos os fenômenos físicos e, portanto, engloba o conhecimento sobre vários outros conceitos. Sendo assim, se torna difícil desvincular o tema energia de uma questão de Física, pois ele, na maioria das vezes, está implícito na situação abordada. A prova do ENEM, relativa à área das Ciências da Natureza e suas Tecnologias,



contém 45 questões que versam sobre temas abordados pelas disciplinas Física, Química e Biologia. Tradicionalmente a banca procura equilibrar a quantidade de questões entre estas três disciplinas no que diz respeito aos conteúdos estudados especificamente ou predominantemente por cada uma delas. Sendo assim, em média, encontramos 15 questões relativas ao conteúdo programático de Física, 15 de Química e 15 de Biologia. Podemos observar que o tema “Energia” apareceu explicitamente em aproximadamente 15% da prova (7 questões), sendo que apenas duas dessas questões (questões 109 e 118) necessitam de conhecimentos, que não advém da Física, para solucioná-la.

De posse destes conhecimentos e informações, traçamos as estratégias e os objetivos que irão compor a sequência didática. Em seguida organizamos em ordem cronológica as ações e atividades da proposta, mas é preciso destacar que a proposta tem um caráter aberto, ou seja, o objetivo é que a mesma apenas norteie o trabalho do professor oferecendo um caminho alternativo que pode ser perfeitamente adequado por ele de acordo com as suas necessidades.

DESENVOLVIMENTO

Construímos uma unidade (ou capítulo) direcionada aos professores na qual trabalharão com seus alunos por meio de uma sequência didática dividida em: parte teórica, parte prática e aplicações no cotidiano. O objetivo é fornecer um material didático flexível onde o professor, dentro da estrutura montada na sequência didática, possa escolher as referências e estabelecer objetivos na confecção de suas aulas. A proposta elaborada neste trabalho, baseada na estrutura do NEM, contempla apenas a carga horária ou planejamento reservado à BNCC, não sendo indicada à parte dos Itinerários Formativos onde os conteúdos são aprofundados para que os alunos sigam profissionalmente nas respectivas áreas.

Na “parte teórica” da sequência didática são abordados todos os tópicos definidos e concernentes ao tema escolhido. Os conceitos e teorias são apresentados utilizando a HC como recurso didático, onde se discute como estes surgiram, como evoluíram ao longo do tempo e quais as implicações para a construção do conhecimento científico. Nesta etapa, optamos preferencialmente pela utilização de slides, vídeos e eventualmente o quadro negro nas aulas, pois diversos trabalhos que relatam intervenções pedagógicas com o uso da HC e a nossa própria experiência em sala de aula demonstram pessimismo quanto à utilização de textos com



os alunos. Os conteúdos são trabalhados por um viés histórico incluindo aspectos socioculturais e visões das outras duas ciências, a Química e a Biologia. Organizamos os conteúdos da unidade de modo que a HC seja utilizada com base na concepção de desenvolvimento da Ciência segundo Thomas Kuhn. Ou seja, definido o recorte histórico a ser trabalhado, é necessário identificar as fases em que a Ciência se desenvolve de acordo com Kuhn e assim, podemos optar entre dois caminhos a seguir:

Fase pré-paradigmática → paradigma vencedor → ciência normal

Ciência normal → período de crise → revolução científica

Fase pré-paradigmática – período em que diversos cientistas apresentam suas teorias, possibilidades de compreender os fenômenos e certificar se correspondem a potenciais anomalias (CLARO, 2017).

Paradigma vencedor – discussão e escolha da teoria aceita pela comunidade científica segundo os critérios de maior alcance, complexidade e poder de persuasão do(s) autor(es).

Ciência normal – fase de aplicação e aperfeiçoamento da teoria eleita, período em que o paradigma vigora.

Período de crise – período em que surgem anomalias, fenômenos que a teoria não consegue explicar ou que a contradizem.

Revolução científica – quebra do paradigma, nova maneira de explicar os fenômenos, adoção de nova teoria.

Na “parte prática”, agora sem a abordagem didática por meio da HC, constam o desenvolvimento e as aplicações das teorias. As equações matemáticas, deduções e demonstrações são construídas e trabalhadas com os alunos através de exercícios e situações-problemas. Nesta fase são sugeridos diversos tipos de atividades além de experimentos.

Enfim, a última parte, por nós chamada de “aplicações no cotidiano”, tem como objetivo: apresentar e discutir a produção de tecnologia, como a Ciência entende e aplica estes conhecimentos atualmente, e projetar o uso desses conhecimentos no futuro. O debate sobre o papel da Ciência para a humanidade, sua importância para a tomada de decisões, as



consequências da exploração e do uso das tecnologias, são o foco deste espaço dentro do capítulo. Sendo assim, propomos um conteúdo programático contendo os mesmos tópicos tradicionalmente ensinados, porém organizados e trabalhados de maneira diferente (Quadro 3).

Quadro 3: distribuição dos tópicos referentes ao tema Energia

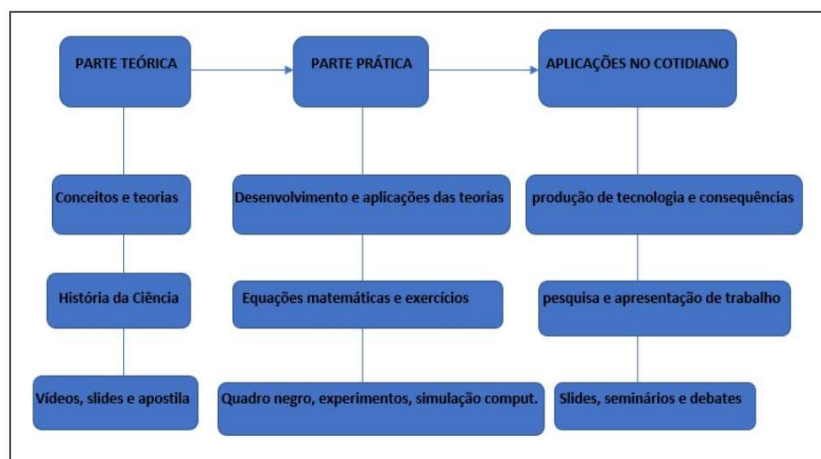
Conteúdo Programático do tema Energia	
1. Como surgiu o conceito de energia	} Fase pré-paradigmática
1.1 Aristóteles e a ideia de transformação	
1.2 O “ <i>impetus</i> ” e a “ <i>vis viva</i> ”	
1.3 A constância no meio de mudança	} Paradigma vencedor
2. Trabalho e Energia Cinética	
2.1 Potencia e rendimento	
2.2 Máquinas simples	} Ciência normal
3. Princípio da Conservação de energia	
3.1 Máquinas Térmicas	} * Período de crise / Revolução científica
3.2 Motor elétrico	
4. A “quantização” da energia	
4.1 A radiação do Corpo Negro*	} Ciência normal
4.2 Átomo de Bohr / O efeito fotoelétrico	
4.3 A radioatividade	
5. Outros tipos de energia	} Ciência normal
5.1 Recursos energéticos	
5.2 Impactos da utilização da energia	

Fonte: Produzido pelos próprios autores.

Definidos os tópicos que constarão no capítulo/unidade “Energia” e considerando as dificuldades apresentadas acima, a estratégia didática para a abordagem desses assuntos segue o fluxograma abaixo (Quadro 4). A ideia é que o professor possa repetir ou aplicar, se possível integralmente, as três fases (“parte teórica”, “parte prática” e “aplicações no cotidiano”) para cada item do capítulo. Porém, o professor terá a liberdade de optar por distribuir estas fases dentro do capítulo, sendo o mais importante obedecer a sequência (parte teórica → parte prática → aplicações no cotidiano) e suas respectivas metodologias.



Quadro 4 – Fluxograma de aplicação da estratégia didática



Fonte: Produzido pelos próprios autores.

O fluxograma de aplicação da estratégia didática contém quatro linhas e três colunas. Considerando em ordem crescente de cima para baixo temos:

1ª linha – Divisão do conteúdo em fases que representam o tipo de abordagem a ser utilizada pelo professor.

2ª linha – O que será abordado, referente ao conteúdo, em cada uma das fases descritas na 1ª linha.

3ª linha – Metodologia a ser utilizada pelo professor em cada uma das fases.

4ª linha – Recursos didáticos sugeridos ao professor para implementar a metodologia de cada fase.



CONCLUSÕES

Neste trabalho analisamos as mudanças implementadas pelo NEM no que diz respeito à estrutura curricular e competências a serem alcançadas pelos alunos. Concluímos que um ensino mais crítico e menos dogmático proposto pelo NEM favorece a adoção da HFC como recurso pedagógico. Dentre os assuntos elencados pela BNCC e conseqüentemente exigidos pelo NEM, o tema Energia se destaca pela capacidade de ser abordado interdisciplinarmente e pela quantidade de questões que aparecem no ENEM.

A estratégia didática construída neste trabalho, mostrou que é possível abordar os conteúdos de física por um viés histórico-filosófico tomando como base a estrutura de desenvolvimento da ciência segundo Thomas Kuhn.

Por meio da entrevista que realizamos com os professores da área de Ciências da Natureza, percebemos que a maioria deles são abertos a novas metodologias de ensino. Pretendemos assim, com a proposta didática apresentada, fornecer mais uma alternativa pedagógica aos professores do EM.

REFERÊNCIAS

BRASIL, **Lei nº 13.415**, de 16 de fevereiro de 2017.

_____. Ministério da Educação. **O que muda no Novo Ensino Médio?** Disponível em: <<https://www.gov.br/mec/pt-br/novo-ensino-medio>>. Acesso em: 25 de out. de 2022.

CARVALHO, C.; GARCIA, N. M. D.. A história da ciência nos livros didáticos de Física. In: XII Educere, 2015, Curitiba. Atas do XII Educere, 2015.

CLARO, M. V. S.. O Processo de Ressignificação na Formação de Paradigma Segundo Thomas Kuhn. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

KUHN, T. S. **A estrutura das revoluções científicas**. 2. ed. Tradução Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. São Paulo: Perspectiva. 2018.

NASCIMENTO, L. A. do; CARVALHO, H. R. de; SILVA, B. V. da C.. A História e a Filosofia da Ciência como recurso didático: Discutindo o seu uso com professores de Ciências em formação. Revista de Educação, Ciências e Matemática, v. 7, p. 182-200, 2017.

OLIVEIRA, R. A.; SILVA, A. P. B.. História da Ciência e Ensino de Física: Uma análise Meta-historiográfica. In: Luiz O. Q. Peduzzi; André Ferrer P. Martins e Juliana Mesquita Hidalgo Ferreira (Org.). (Org.). Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino. 1ªed. Natal: EDUFRN, 2012, v., p. 41-64.

VI ENCONTRO DE HISTÓRIA DA EDUCAÇÃO DO CENTRO-OESTE
 EDUCAÇÃO EM TEMPO DE PANDEMIA: ENSINO E PESQUISA EM HISTÓRIA DA EDUCAÇÃO
 Faculdade de Educação | Programa de Pós-Graduação em Educação |
 Universidade Federal de Uberlândia



OSTERMANN, F. **A epistemologia de Kuhn**. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 13, n. 3, p. 184-196, 1996.

PEDUZZI, L. O. Q. **Evolução dos Conceitos da Física**. 1.ed. Florianópolis: UFSC/EAD/CED/CFM. 130p, 2011.

A filosofia de Thomas Kuhn e suas implicações para o ensino de física

Thomas Kuhn's philosophy and its implications for the teaching of physics

Francisco de Assis Lima DE SOUSA JUNIOR

Programa de Pós-graduação em História das Ciências e das Técnicas e
Epistemologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
fassis@metalmat.ufrj.br

Priscila TAMIASSO-MARTINHON

Programa de Pós-Graduação em História das Ciências e das Técnicas e
Epistemologia, UFRJ
Programa de Pós-Graduação Profissional em Química em Rede Nacional, UFRJ
Programa de Pós-Graduação Profissional em Ensino de Química, UFRJ
pris-martinhon@hotmail.com

Maira Monteiro FRÓES

Programa de Pós-graduação em História das Ciências e das Técnicas e
Epistemologia, UFRJ
froes@nce.ufrj.br

Célia SOUSA

Programa de Pós-Graduação Profissional em Química em Rede Nacional, IQ, UFRJ
sousa@iq.ufrj.br

Abstract. *In this work we seek to show that the history of science can become an important pedagogical resource for the teaching of physics in view of the curricular and structural changes that the Brazilian educational system is undergoing. We also intend to show the ideas of the philosopher of science Thomas Kuhn bring many contributions to teaching and can be used to address physics contents or even modify the teacher's view of their methodologies. We then carried out a search for works and theses that presented proposals for teaching physics whose Kuhnian philosophy served as a basis. We highlight three of these works from which we analyzed the clarity of the didactic proposal, the feasibility of application and the possible pedagogical benefits. We hope with this work to contribute to the area of physics teaching and to encourage further studies on Kuhn's epistemology applied to education.*

Keywords: *Physics Teaching. History of Science. BNCC.*



Resumo. Neste trabalho buscamos mostrar que a história da ciência pode se tornar um importante recurso pedagógico para o ensino de física frente às mudanças curriculares e estruturais que o sistema educacional brasileiro está sofrendo. Em especial, pretendemos mostrar também as ideias do filósofo da ciência Thomas Kuhn trazem muitas contribuições para o ensino e podem ser utilizadas para abordar conteúdos de Física ou até mesmo modificar a visão do professor sobre as suas metodologias. Realizamos então uma busca de trabalhos e teses que apresentavam propostas de ensino de Física cuja filosofia kuhniana servia de base. Destacamos três desses trabalhos do qual analisamos a clareza da proposta didática, a viabilidade de aplicação e os possíveis benefícios pedagógicos. Esperamos com este trabalho contribuir para a área de Ensino de Física e incentivar mais estudos sobre a epistemologia de Kuhn aplicada à educação.

Palavras-chave: Ensino de Física. História da Ciência. BNCC.

Introdução

O ensino de Física não pode continuar dissociado das questões vivenciadas em nosso século. Ele precisa “ampliar o seu diálogo com a sociedade, não só no âmbito local, mas também no global e planetário” (GERPE et al, 2021, p. 89). Contudo, no Brasil o mesmo ainda se caracteriza por ser predominantemente conteudista, privilegiando a quantidade de assuntos e deixando a qualidade do ensino em segundo plano. Além disso, geralmente é descontextualizado, onde se apresenta ao aluno situações que não se conectam à sua realidade fazendo pouco ou nenhum sentido para ele.

O Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), principal concurso de acesso às universidades e avaliador do Ensino Médio (EM), com suas questões mais interpretativas e menos objetivas, acabou forçando uma mudança por parte das escolas em suas estratégias didáticas e promovendo uma atualização em seus currículos. Com um enfoque na compreensão e aplicação de conceitos em vez de cálculo de grandezas, esta prova exige do candidato um conhecimento contextualizado com as diferentes épocas da história, trazendo questões sobre problemas atuais e do passado.

Com o objetivo de unificar o currículo do EM no Brasil e ao mesmo tempo orientar escolas e professores fornecendo parâmetros, competências e habilidades exigidas em todas as disciplinas do Ensino Básico, foi instituída em dezembro de 2017 a Base Nacional Comum Curricular (BNCC).

A BNCC define competências e habilidades que devem ser desenvolvidas com os alunos do Ensino Médio em cada uma das áreas de conhecimento: Linguagens e suas Tecnologias, Matemática e suas Tecnologias, Ciências da Natureza e Tecnologia, Ciências Humanas e Sociais Aplicadas. Dessa forma, sistematiza a aprendizagem dos conhecimentos conceituais das áreas, a



contextualização social, cultural, ambiental e histórica desses conhecimentos, os processos e práticas de investigação e as linguagens de cada uma dessas áreas (BRASIL, 2018).

O currículo de física tradicionalmente adotado pelas escolas, segmentado, detalhado em tópicos e desconectado da realidade, foi substituído por um interdisciplinar e contextualizado, onde professores ganham uma maior autonomia para decidir o que ensinar. Este novo modelo curricular permite aos alunos adquirirem um maior senso crítico além de propiciar a aplicação dos conhecimentos aprendidos em situações do seu cotidiano (BRASIL, 2022).

Tomando como base os conteúdos definidos pela BNCC, uma nova organização curricular aprovada pelo Ministério da Educação começou a ser implementada a partir de 2022, o Novo Ensino Médio (NEM).

Dentre as mudanças que o NEM trouxe, está o aumento da carga horária mínima total, dividida em uma parte comum obrigatória contemplando todo o conteúdo contido na BNCC em suas áreas de conhecimento e uma parte flexível contendo os chamados Itinerários Formativos, onde o aluno poderá escolher entre o aprofundamento relacionado a essas áreas de conhecimento ou optar por uma formação técnica e profissional (BRASIL, 2017).

Com relação aos conteúdos, não se encontram mais distribuídos em disciplinas e sim em áreas de conhecimento onde os professores poderão trabalhar por meio de projetos, oficinas e atividades interativas e não apenas com aulas expositivas sem a participação dos alunos. Estas características citadas acima podem facilitar a decisão do professor em utilizar recursos didáticos alternativos em suas aulas, como por exemplo a História da Ciência (HC).

De acordo com Martins (2005, p. 314): “A História da Ciência é feita por seres humanos e se constitui em uma reconstrução de fatos e contribuições científicas que ocorreram, muitas vezes, em épocas distantes da nossa”. Sendo assim, a HC fornece elementos que revelam a natureza da ciência, como ela é construída e disseminada. Podemos perceber que o conhecimento científico é dinâmico e constantemente reformulado. Essas características da Ciência podem ser úteis pedagogicamente, pois se opõem a um ensino dogmático, acrítico e irreal, ensino este que queremos modificar.

O filósofo da ciência Thomas Kuhn (1922-1996) foi um dos que romperam com essa mística de uma ciência cumulativa, sempre progressiva e que descreve a realidade dos fenômenos naturais. Valorizando os fatores históricos e sociais na construção do conhecimento, Kuhn define a ciência como um empreendimento humano cíclico onde as disputas entre grupos dentro da comunidade científica determinam um conjunto de regras e conceitos a serem seguidos (KUHN, 2018; OSTERMANN, 1996; PEDUZZI, 2011).

Sendo assim, surge a questão: De que maneira a filosofia de Kuhn pode contribuir para o ensino de Física? Este trabalho tem como objetivo discutir algumas formas de utilizar a epistemologia de Kuhn para o ensino e apresentar os prós e contras destas intervenções pedagógicas.



A Epistemologia de Kuhn e o ensino de Ciências

O livro “A estrutura das revoluções científicas”, de Thomas Kuhn, foi um dos livros da filosofia científica mais lidos e causou bastante impacto na comunidade científica. Também por conta desse sucesso, foi muito debatido e criticado (RAICIK; GONÇALVES, 2022). A filosofia de Kuhn se caracteriza por valorizar a história da ciência e as disputas pelo reconhecimento entre grupos dentro da comunidade científica. Tem como principais conceitos o paradigma e a revolução científica que pertencem a períodos de desenvolvimento da ciência chamados de ciência normal e crise, respectivamente (KUHN, 2018).

Kuhn define o paradigma como “realizações científicas reconhecidas durante algum tempo por um grupo de pesquisadores proporcionando fundamentos para a sua prática posterior” (KUHN, 2018, p. 71). Para ele, o paradigma é importante porque direciona a pesquisa e aponta os problemas a serem resolvidos. Além disso, Kuhn afirma que não existe pesquisa sem um paradigma como base. Um paradigma é escolhido quando se torna mais bem-sucedido dentre os competidores, porém não soluciona todos os problemas, pois é uma promessa de sucesso que necessita ser fortalecida. Esse fortalecimento vai ocorrer no período de ciência normal.

A ciência normal é um período de amadurecimento do paradigma, uma atualização dessa promessa de sucesso. O objetivo da ciência normal não é a descoberta e sim adequar a natureza às teorias, pois as supostas descobertas já são previstas pelo paradigma vigente. Sendo assim, o trabalho do cientista se assemelha à resolução de quebra-cabeças, onde o problema existente já possui uma solução dentro das teorias aceitas pelos cientistas, basta encontrá-la como quem encontra as peças certas de um *puzzle*.

Quando a natureza contraria as expectativas do paradigma, surge então uma anomalia. Esta começará a ser amplamente explorada pela área de estudo na qual pertence até se conseguir ajustar a teoria aos dados empíricos. Mas, se essa anomalia resistir, ela passará a ser reconhecida pela comunidade científica e mobilizará um número cada vez maior de cientistas na tentativa de extingui-la. A consequência disso é o surgimento de inúmeras teorias que acabam enfraquecendo o paradigma e inclusive questionando a validade das soluções alcançadas até o momento. Para Kuhn essa proliferação de teorias já é um sinal de um período de crise dentro da ciência. Percebe-se com isso que é o momento de pensar em alternativas conceitualmente diferentes, aparecem novos candidatos a paradigma iniciando assim uma disputa entre estes postulantes. O paradigma vencedor substitui o anterior, que só é abandonado quando um novo é adotado, ou seja, não se descarta um paradigma enquanto não exista um novo para assumir o seu lugar.

A esta ruptura de paradigma, com a consequente adoção de outro, Kuhn chama de revolução científica. A partir da revolução científica os cientistas adquirem uma nova visão ao observar os mesmos fenômenos, criam práticas de investigação e instrumentos de medição. Contudo, espera-se que este “novo” paradigma, associado ou não a uma nova teoria, seja redutível ao



anterior, tornando este um caso particular daquele. Dessa forma, a nova teoria também seria capaz de resolver os problemas que a antiga dava conta, mas isso muitas vezes não ocorre por causa do que Kuhn chama de incomensurabilidade. Para ele, o novo e velho paradigma são incomensuráveis, ou seja, possuem uma linguagem diferente da qual uma não pode ser traduzida para a outra sem perdas. Mesmo contendo elementos comuns, esses paradigmas “são determinados por técnicas bastante diversas e, assim, têm estruturas diferentes e correspondem a conceitos diferentes (KUHN, 2006, p. 239).

O termo “revolução científica” pressupõe grandes descobertas com um largo alcance, modificando radicalmente todo o conhecimento construído dentro de uma ou várias áreas de pesquisa. Mas na visão de Kuhn, para ser considerada uma revolução científica, essa mudança radical precisa ser significativa apenas para o grupo que for afetado por ela. Portanto, para Kuhn a ciência se desenvolve, em parte, cumulativamente por acréscimo ao que antes era conhecido, mas também por mudanças revolucionárias que extrapolam os limites impostos pelos conceitos anteriormente definidos.

Ao longo de sua obra, Kuhn também analisa a forma como a Ciência é ensinada nas escolas e nas universidades. Em especial, faz críticas e elogios aos recursos didáticos a quem chamou de manuais e exemplares. Apesar de se referir ao ensino das ciências para uma formação científica, ou seja, para aqueles que pretendem se tornar cientistas, é possível utilizar as mesmas considerações para a formação geral.

Kuhn define os manuais como “veículos pedagógicos destinados a perpetuar a ciência normal...” (KUHN, 2018, p. 233). É o que ocorre com os livros didáticos que contém contribuições e soluções de problemas de antigos cientistas dando a aparência de uma ciência construída cumulativamente. Considera-os pedagogicamente funcional e eficiente para ensinar leis e teorias da ciência normal, porém distorce a verdadeira tradição científica deixando para os alunos a falsa impressão de um conhecimento construído individualmente e sucessivamente. Como geralmente os alunos não leem trabalhos originais, artigos ou teses dos cientistas, até por não terem ainda atingido uma maturidade intelectual compatível para isso, os manuais “substituem sistematicamente a literatura científica da qual derivam...” (KUHN, 2018, p. 268). No caso dos futuros cientistas, aprendem a trabalhar com a ciência normal e até produzir crises, mas não aprendem a superá-las, a dar nova interpretação ao fenômeno.

Segundo Kuhn (2018), os estudantes compreendem bem ao lerem o manual, porém sentem muitas dificuldades em resolver muito dos problemas propostos. Precisam ter aprendido a resolver problemas semelhantes, analogias, estabelecer relações entre os símbolos para aplicá-los da mesma maneira eficaz. Necessitam então dos chamados exemplares e quanto mais os tiverem, melhor serão os manuais. Os exemplares consistem em “exemplos de situações que seus predecessores no grupo já aprenderam a ver como semelhantes entre si ou diferentes de outros gêneros de situações” (KUHN, 2018, p. 303). O “plano inclinado”, “pêndulo”,



“calorímetro”, “câmara escura”, entre outros, fazem parte dessas situações que os professores exploram em sala de aula. Os exemplares fornecem “habilidades de agrupar objetos e situações em conjuntos semelhantes” (KUHN, 2018, p. 311), muito importantes para os alunos encontrarem similaridades, fazerem analogias e criarem modelos. Ensinar as leis ou teorias antes das situações que se apresentam ou não na natureza, não resulta em um aprendizado sólido. Assim como ocorre na língua, quando as palavras são aprendidas juntamente aos exemplos concretos e não de forma isolada, o aluno adquire um conhecimento tácito. A quantidade de exemplos necessários para que um conceito seja aprendido e capaz de ser utilizado varia de aluno para aluno, ou seja, uns precisam de mais e outros de menos. É um dos motivos pelo qual a aprendizagem não ocorre exclusivamente com a ajuda do professor, por meios verbais, mas em algum momento em que esses exemplares são trabalhados.

Apesar de valorizar aspectos do ensino considerado tradicional, como a utilização dos manuais e a resolução de problemas já solucionados pelos cientistas, as ideias de Kuhn também podem servir como base para um ensino crítico e dialógico. Seus questionamentos sobre a neutralidade da Ciência e o suposto progresso científico contribuem para a superar a visão positivista predominante nas escolas ao mesmo tempo em que fornece um caráter orgânico ao ensino. Para Forato, Pietrocola e Martins (2011) o ensino de Ciências atualmente tem, como um dos seus objetivos, promover a compreensão de como o conhecimento científico é desenvolvido e nesse sentido, filósofos da ciência como Popper, Feyrabend e o próprio Kuhn tornam-se referências.

Peduzzi (2011) afirma que as ideias de Kuhn, com destaque para o conceito de revolução científica, exercem fascínio sobre os estudantes, pois contrasta com a concepção cumulativa, inerte e inquestionável da ciência ensinada tradicionalmente nas escolas. Porém, alguns equívocos acerca da filosofia kuhniana precisam ser sanados e entendidos pelos professores antes que estes a utilizem didaticamente. Raíck e Gonçalves (2022) citam mal-entendidos envolvendo o conceito de incomensurabilidade levando a uma interpretação relativista da teoria de Kuhn. Por este motivo, faz-se necessário intervir nos processos de formação docente sob pena de transferir para os alunos essa concepção relativista que o professor possa ter adquirido. A ênfase dada por este professor a fatores externos no desenvolvimento da ciência pode enfraquecer a crença no poder do conhecimento científico por parte dos alunos, desestimulando o seu aprendizado.

Em face das implicações que as ideias de Kuhn, expostas acima, promovem no ensino de ciências e em especial para o ensino de Física, este trabalho soma-se a outros na tentativa de sugerir a aplicação dessas ideias como recurso didático para a abordagem dos conteúdos de Física.



Metodologia

Para alcançar os objetivos traçados, realizamos uma busca por trabalhos publicados nas cinco principais revistas brasileiras da área de Ensino de Física, ou seja, com melhor classificação Qualis/CAPES, tratam da aplicação das ideias de Kuhn ao ensino de Física. As revistas acessadas foram: Investigações em Ensino de Ciências, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Ciência e Educação, Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências e Revista Brasileira de Ensino de Física. Essa busca pelos artigos ocorreu da seguinte forma: nos sites de cada uma dessas revistas pesquisamos pelo termo “Thomas Kuhn”, em seguida separamos os trabalhos que tinham alguma referência a Kuhn no próprio título e destes retiramos aqueles que apresentavam propostas didáticas para o ensino de física baseadas nas ideias de Kuhnianas. Além disso, pesquisamos trabalhos do mesmo assunto na plataforma Google usando o termo “Thomas Kuhn e o ensino de física”. A partir daí analisamos essas pesquisas quanto à clareza e viabilidade das propostas didáticas, assim como os resultados obtidos por elas.

Resultados

As ideias de Kuhn e as suas implicações para o ensino de ciências são constantemente debatidas, porém, poucas propostas de intervenção didática foram encontradas na revisão de literatura realizada neste trabalho. A busca por artigos em periódicos, de trabalhos que efetivamente apresentam propostas didáticas para o ensino de Física, retornou apenas o trabalho de Arruda et al. (2001), e no caso dos trabalhos de conclusão de curso (teses, dissertações ou monografias) destacamos Zylbersztajn (1991), Soares (2016).

Em Zylbersztajn (1991), o autor comparava o aluno a um cientista khuniano que possui concepções prévias norteadas pelo paradigma vigente, depara-se com anomalias que confrontam o seu conhecimento até que se torna necessária uma mudança conceitual caracterizada pela revolução científica. Ou seja, durante a sua vida acadêmica o aluno deve ser encarado em alguns momentos como um cientista trabalhando em um período de ciência normal e em outros como um cientista vivenciando uma revolução científica. Criou então um modelo de ensino considerando esses dois momentos cada um deles divididos em etapas com métodos pedagógicos distintos.

Para um *aluno atuando em uma revolução científica*, um novo tópico será introduzido por meio das seguintes etapas:

1ª) Elevação do nível de consciência conceitual: etapa em que o professor estimula o aluno a expor o seu conhecimento prévio, comparando-o com as concepções do senso comum. Consiste na simulação de um paradigma vigente, análogo às ideias que se encontram enraizadas no cognitivo dos alunos.



2ª) Introdução de anomalias: inserção de situações (argumentos teóricos, demonstrações ou experimentos) em que o aluno, baseado em suas concepções, não consegue mais explicar. Essas situações passam a causar desconforto levando este aluno a refletir sobre as limitações do seu conhecimento.

3ª) Apresentação da nova teoria: etapa em que ocorre a quebra do paradigma, a revolução científica e a instauração de um novo paradigma. O professor apresenta uma teoria mais completa, capaz de solucionar as anomalias que surgiram. Em relação ao aluno, é a fase em que ele sofre uma mudança conceitual.

Ao aluno **atuando como um cientista normal**, serão propostas atividades focadas na interpretação de situações e resolução de problemas, equivalentes ao que Kuhn chama de solucionar quebra-cabeças, trabalho realizado pelos cientistas durante o período de ciência normal. Zylbersztajn nomeou esta etapa de “Articulação Conceitual”, se referindo ao momento de aplicação e aperfeiçoamento da “nova teoria”.

Esta proposta didática, análoga às ideias de Kuhn, se mostra coerente com o ensino tradicional, até certo ponto defendido por Kuhn, bem como às orientações pedagógicas atuais que estimulam a criticidade e a autonomia do aluno na construção do seu conhecimento. Possui uma estrutura de fácil compreensão e aplicação, pois é dividida em etapas bem definidas, porém permite ao professor adaptá-la aos conteúdos e à sua própria didática. Além disso, também é capaz de induzir a uma quebra de paradigma na prática docente.

Soares (2016) apresenta uma proposta de atividade em sala de aula utilizando o modelo de Zylbersztajn e acrescentando uma etapa final chamada de “Análise da apresentação do episódio que está sendo discutido”. Esta atividade tem como objetivo a confrontação dos argumentos históricos e filosóficos abordados pelos livros didáticos e pode contemplar diversos assuntos sendo de livre execução por parte do professor, que decidirá quais recursos e estratégias se adequarão melhor a turma aplicada. A proposta apresentada não foi aplicada, porém, segundo o autor, incentiva a adoção de um ensino contextualizado em detrimento à memorização de conteúdos, promovendo uma mudança conceitual gradativa como um processo de construção e transformação do conhecimento por parte do aluno. Como se baseou no modelo criado por Zylbersztajn (1991) a mesma análise de clareza e viabilidade também valem para Soares (2006).

Arruda et al. (2001) propõem um novo objetivo para a utilização pedagógica dos laboratórios didáticos. Em vez de funcionar como um verificador ou demonstrador de teorias, poderiam servir como um processo de adaptação da teoria com o experimento, função defendida por Kuhn, que não enxerga o experimento como um tribunal de teorias científicas dando-a um valor de verdade. Para ele, o experimento apenas comprova a adequabilidade empírica da teoria, pois o primeiro nasce do paradigma gerado pelo segundo. Com essa nova proposta, a preocupação do professor ao utilizar o laboratório didático passaria a ser o aprendizado de novos termos, a aquisição de uma nova linguagem por meio dos experimentos e suas soluções. As aulas no laboratório, de acordo com os autores, não deveriam simplesmente testar hipóteses ou teorias,



mas articular o experimento com a teoria de maneira integrada. A proposta não entra em detalhes de como executá-la, apenas discute e sugere uma mudança epistemológica na utilização do laboratório didático de Física.

Considerações finais

As reformas curriculares e estruturais da educação básica que vêm ocorrendo no Brasil ao longo dos anos tem exigido a transformação do ensino tradicional, caracterizado pela exposição de conteúdos e resolução de exercícios de solução única, por um ensino crítico e contextualizado, onde o aluno tem um papel ativo no processo de aprendizagem. Em se tratando do ensino de Física, essas orientações apontam para a necessidade de os alunos compreenderem melhor como a natureza da Ciência, como ela é construída e se desenvolvida. Neste sentido, as ideias de Kuhn podem contribuir positivamente para a o ensino adaptando o trabalho científico ao ambiente escolar. Mas ainda hoje Kuhn sofre muitas críticas e o seu mais famoso livro, A Estrutura da Revoluções Científicas, continua sendo bastante debatido gerando inúmeras interpretações e mal-entendidos principalmente na área de educação.

A busca por trabalhos que apresentam propostas didáticas baseadas na epistemologia de Kuhn, realizadas nesta pesquisa, obteve poucos exemplos. Destacamos três desses trabalhos do qual nenhum deles teve a sua proposta didática testada, porém mostraram-se promissores para serem aplicados em sala de aula. Dentre os benefícios que podem trazer para o ensino de ciências estão a quebra do paradigma tradicional tanto das metodologias de ensino quanto da prática docente e a possibilidade de uma melhor compreensão da natureza da Ciência por parte do aluno.

Com isso, verificamos que é possível adaptar as ideias de Kuhn ao ensino e esperamos ter incentivado os pesquisadores a produzirem mais propostas didáticas utilizando esses conhecimentos.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-graduação História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (HCTE – UFRJ). Ao professor Victor de Oliveira Rodrigues pela revisão e colaboração.

Financiamento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.



Referências

ARRUDA, S. M., SILVA, M. R., & LABURÚ, C. E. Laboratório didático de física a partir de uma perspectiva kuhniana. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 6, n. 1, p. 97-106, 2001.. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/588/381>>. Acesso em: 25 out. 2022.

BRASIL, Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018.

_____. **Lei nº 13.415**, de 16 de fevereiro de 2017.

_____. Ministério da Educação. **O que muda no Novo Ensino Médio?** Disponível em: <<https://www.gov.br/mec/pt-br/novo-ensino-medio>>. Acesso em: 25 de out. de 2022.

FORATO, T. C. de M.; PIETROCOLA, M.; MARTINS, R. de A. Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 27-59, 2011.

GERPE, R. L.; TAMIASSO-MARTINHON, P.; MIRANDA, J. L. **Agrotóxicos como Tema Gerador no Processo de Aprendizagem de Química**. In: OLIVEIRA, G. C. G. et al. (org). Ensino de Química em Revista: meio ambiente e contextualização. 1. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Química, UFRJ, 2021.

KUHN, T. S. **A estrutura das revoluções científicas**. 2. ed. Tradução Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. São Paulo: Perspectiva. 2018.

_____. **O caminho desde a Estrutura: ensaios filosóficos 1970-1993, com uma entrevista autobiográfica**. Ed. por James Conant e John Haugeland. Tradução por Cezar Mortari. São Paulo: Editora UNESP, 2006.

MARTINS, L. A. P. História da Ciência: objetos, métodos e problemas. **Ciência e Educação (UNESP)**, v. 11, n. 2, p. 305-317, 2005.

OSTERMANN, F. **A epistemologia de Kuhn**. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 13, n. 3, p. 184-196, 1996.

PEDUZZI, L. O. Q. **Evolução dos Conceitos da Física**. 1.ed. Florianópolis: UFSC/EAD/CED/CFM. 130p, 2011.

RAÍCIK, A. C.; GONCALVES, F. P. (Re)Pensando Thomas Kuhn: reflexões sobre mal-entendidos da Estrutura e suas implicações para o ensino de ciências. **REXE - Revista de Estudos y Experiencias en Educación**, v. 21, p. 366-394, 2022.



SOARES, J. M. S. **As contribuições da Epistemologia de Thomas Kuhn para o estudo de episódios históricos e suas repercussões no ensino de física.** Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Filosofia da Educação) - Universidade Estadual da Paraíba, Paraíba, 2016.

ZYLBERZTAJN, A. (1991). **Revoluções científicas e ciência normal em sala de aula.** In M. A. Moreira & R. Axt, Tópicos em Ensino de Ciências. Porto Alegre, Sagra.

