



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

LAURA ELAIDY DA SILVA MACHADO

UMA ABORDAGEM INTERDISCIPLINAR SOBRE O SPIN

FORTALEZA

2022

LAURA ELAIDY DA SILVA MACHADO

UMA ABORDAGEM INTERDISCIPLINAR SOBRE O SPIN

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em física do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Licenciado em física.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Santos de Almeida

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M132a Machado, Laura Elaidy da Silva.

Uma abordagem interdisciplinar sobre o Spin / Laura Elaidy da Silva Machado. – 2022.
69 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências,
Curso de Física, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Carlos Alberto Santos de Almeida.

1. Spin. 2. Elétron. 3. Interdisciplinaridade. 4. Ensino de Física. 5. Ensino de Química. I. Título.

CDD 530

LAURA ELAIDY DA SILVA MACHADO

UMA ABORDAGEM INTERDISCIPLINAR SOBRE O SPIN

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em física do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Licenciado em física.

Aprovada em: 03/02/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Alberto Santos de Almeida (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Ramos Gonçalves
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Nildo Loiola Dias
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha mãe.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, pelo apoio, pelo cuidado e acima de tudo, por acreditar na minha capacidade, mesmo em meus momentos de incerteza e desânimo.

À minha irmã Lídia, por ser uma fonte de encorajamento e pelas palavras de conforto nas situações ruins.

A Adriel, meu namorado, por toda a ajuda que me deu durante a graduação, por ser meu companheiro na Física e na vida.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Santos de Almeida, pela orientação no presente trabalho, no projeto de iniciação científica e nos estágios a docência.

Aos professores que me acompanharam nessa trajetória, por tantos ensinamentos.

Aos bons amigos que a universidade me trouxe: Mateus, Barbara, Júnior, Rute e Wiklyn, que me ajudaram em tantos aspectos e estiveram presentes nos piores e melhores momentos da minha graduação.

Ao Doutorando em Engenharia Elétrica, Ednardo Moreira Rodrigues, e seu assistente, Alan Batista de Oliveira, aluno de graduação em Engenharia Elétrica, pela adequação do *template* utilizado neste trabalho para que o mesmo ficasse de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro durante a graduação.

O mundo está cheio de coisas que ninguém, em momento algum, observa.

(Arthur Conan Doyle)

RESUMO

Dentro da nossa realidade complexa e multifacetada, tentamos contextualizar as numerosas informações desarticuladas que recebemos e integrá-las em uma percepção geral do mundo que nos cerca. Todavia, tanto a produção como o ensino de conhecimentos científicos dão ênfase na hiperespecialização, compartimentando cada vez mais os saberes. O resultado desse processo é a formação de indivíduos que compreendem fragmentos isolados da realidade sem aptidão para interligá-los. Nesse contexto, a interdisciplinaridade surge com a proposta de superar a fragmentação e estabelecer relações entre conhecimentos. O presente trabalho começa apresentando as origens e definições da interdisciplinaridade, evidenciando sua importância dentro dos documentos oficiais da educação brasileira. Nos capítulos seguintes, tomaremos o spin do elétron como objeto de estudo interdisciplinar, contextualizando sua descoberta e trazendo suas principais aplicações na tecnologia. No capítulo final, são apresentados os resultados de entrevistas feitas com professores da rede pública de Fortaleza-CE para analisar como o spin é abordado por eles em sala de aula, e investigar as concepções dos mesmos sobre a interdisciplinaridade. Por fim, é feita uma breve análise dos livros didáticos de química para examinar de que modo o conceito de spin está inserido neles. O objetivo primordial do trabalho é fornecer uma base de conhecimentos que auxilie o professor do nível médio a desenvolver uma abordagem interdisciplinar do spin.

Palavras-chave: Spin; elétron; interdisciplinaridade; tecnologia; ensino de Física; ensino de Química.

ABSTRACT

Inside our complex and multifaceted reality, we try to contextualize the numerous disjointed information we receive and integrate it into a general perception of the world that surrounds us. However, both the production and teaching of scientific knowledge emphasize hyperspecialization, increasingly compartmentalizing knowledge. The result of this process is the formation of individuals who understand isolated fragments of reality without the ability to interconnect them. In this context, interdisciplinarity emerges with the proposal of overcoming fragmentation and establishing relationships between knowledges. The present work begins by presenting the origins and definitions of interdisciplinarity, highlighting its importance within the official documents of Brazilian education. In the following chapters, we will take the electron spin as an object of interdisciplinary study, contextualizing its discovery and bringing its main applications in technology. In the final chapter, the results of interviews conducted with public school teachers in Fortaleza-CE are presented to analyze how the spin is approached by them in the classroom, and to investigate their conceptions about interdisciplinarity. Finally, a brief analysis of chemistry textbooks for examine how the concept of spin is embedded in them. The main objective of the work is to provide a knowledge base that helps the secondary level teacher to develop an interdisciplinary approach to spin.

Keywords: Spin; electron; interdisciplinarity; technology; Physics teaching; Chemistry teaching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Um tubo de raios catódicos simples.	25
Figura 2 – O espectro do hidrogênio. Hoje sabemos que o contato da radiação eletromagnética com a matéria faz os átomos absorverem energia, indo para estados de energia mais altos. Como esses estados são instáveis, os átomos liberam energia para voltar ao seus estados normais, gerando assim o espectro de emissão. Já o espectro de absorção é visualizado quando átomos absorvem energia, para alcançar estados de energia mais altos.	28
Figura 3 – Esquema da configuração do átomo para a teoria de Bohr, mostrando as órbitas circulares e coplanares permitidas aos elétrons (a). Na figura (b) temos o modelo melhorado de Sommerfeld, com suas órbitas elípticas, em planos distintos.	30
Figura 4 – Modelo para o estado fundamental do hidrogênio: para $n = 1$, $k = 1$, m pode assumir os valores $+1$ ou -1 . O momento angular orbital L só pode assumir duas orientações, associadas ao movimento em sentido horário e anti-horário do elétron. A limitação nos valores de L recebe o nome de quantização espacial.	31
Figura 5 – O aparato experimental de Stern-Gerlach.	34
Figura 6 – Efeito Zeeman no espectro dos átomos de hidrogênio e de sódio.	36
Figura 7 – Os elétrons, como todas as partículas de spin $1/2$, têm duas orientações de spin possíveis quando colocados em um campo magnético	39
Figura 8 – A construção do padrão de difração de elétrons espalhados na superfície de um cristal. Cada elétron chega em uma localização definida, que não pode ser prevista com precisão. A distribuição em vermelho pode ser prevista como a difração de ondas com o comprimento de De Broglie dos elétrons.	40
Figura 9 – Esquema do emparelhamento dos dois elétrons do átomo de hélio. O campo magnético resultante do movimento destes dois elétrons tem direções contrárias e portanto, se anulam.	44
Figura 10 – Efeito da GMR nas válvulas de spin. O gráfico em azul demonstra que para uma magnetização antiparalela, a resistência $R_{\uparrow\downarrow}$ aumenta e para a magnetização paralela, a resistência $R_{\uparrow\uparrow}$ diminui.	46

Figura 11 – O comportamento dos prótons no campo magnético de um aparelho de ressonância. A) Molécula de água e o spin do próton de hidrogênio. B) Alinhamento do spin em um campo magnético. C) Mudança na direção do spin após a emissão de um pulso de radiofrequência.	48
Figura 12 – Diagrama da energia do spin do elétron na presença de um campo magnético. A separação nas linhas da energia pode ser investigada aplicando um sinal de micro-ondas ressonante.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formação acadêmica e escola onde lecionam os entrevistados.	53
Tabela 2 – Livros de química para o ensino médio indicados pelo PNLD em 2018. . . .	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
LDB	Lei de Diretrizes e Bases
PCN	Parâmetros Curriculares Nacionais
PCNEM	Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio
DCN	Diretrizes Curriculares Nacionais
CNE	Conselho Nacional de Educação
RM	Ressonância Magnética
RSE	Ressonância de Spin Eletrônica
RPE	Ressonância Paramagnética Eletrônica
LD	Livro Didático
PNLD	Programa Nacional do Livro Didático

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Campo magnético
c	Velocidade da luz
e	Carga elementar do elétron
δE	Variação de energia
F	Força
g	Fator de Landé
h	Constante de Planck
I	Momento de inércia
L	Momento angular
m	Massa
m_e	Massa do elétron
p	Momento linear
q	Carga
R	Raio
S	Momento angular de spin
t	tempo
∇	Gradiente
Ψ	Função de onda
μ	Momento magnético
ω	Velocidade angular
ν	Frequência
∂	Derivada parcial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO A INTERDISCIPLINARIDADE	16
1.1	O início da fragmentação do conhecimento	16
1.2	Definições de interdisciplinaridade	17
1.3	Interdisciplinaridade no Brasil	18
1.4	Documentos oficiais e a interdisciplinaridade	18
1.5	Correlações com o ensino de Ciências Naturais	21
2	CRONOLOGIA DO SPIN	23
2.1	Introdução aos modelos atômicos	23
2.2	O conhecimento da estrutura atômica até o início de 1900	24
<i>2.2.1</i>	<i>A descoberta do elétron</i>	<i>24</i>
<i>2.2.2</i>	<i>A radiação e o núcleo do átomo</i>	<i>26</i>
2.3	Análise dos espectros e o átomo de hidrogênio	27
<i>2.3.1</i>	<i>A origem da espectroscopia</i>	<i>27</i>
<i>2.3.2</i>	<i>O surgimento da era quântica</i>	<i>28</i>
<i>2.3.3</i>	<i>As contribuições de Bohr e Sommerfeld</i>	<i>29</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Noções sobre o momento angular</i>	<i>31</i>
<i>2.3.5</i>	<i>O experimento de Stern-Gerlach</i>	<i>33</i>
2.4	A descoberta do spin do elétron	36
<i>2.4.1</i>	<i>Princípio da exclusão de Pauli</i>	<i>37</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Os trabalhos de Uhlenbeck e Goudsmit</i>	<i>38</i>
<i>2.4.3</i>	<i>A Mecânica Quântica Moderna</i>	<i>39</i>
<i>2.4.4</i>	<i>O spin relativístico</i>	<i>42</i>
3	O SPIN E SUAS APLICAÇÕES	43
3.1	Ciência, Tecnologia e Sociedade	43
3.2	O magnetismo na matéria	44
3.3	Spintrônica	45
3.4	Ressonância Magnética	46
3.5	Ressonância de Spin Eletrônica	48
3.6	Ímãs de metais de terras-raras	50
4	ABORDAGEM METODOLÓGICA	52

4.1	Referencial teórico	52
4.2	Análise das Concepções de Professores	53
4.3	Análise de livros didáticos	58
4.4	Conclusões	61
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
	REFERÊNCIAS	64
	APÊNDICE A–QUESTIONÁRIO PARA ENTREVISTA DOS PROFESSORES.	69

1 INTRODUÇÃO A INTERDISCIPLINARIDADE

1.1 O início da fragmentação do conhecimento

Os filósofos da Grécia Antiga cultivavam a ideia da unidade do conhecimento através de um ensino integrado e harmonioso. Platão, por exemplo, argumentava a necessidade de uma ciência unificada e propôs que a filosofia seria responsável por tal unificação. Como herança do pensamento dos gregos, surgiram as artes liberais, compostas pelo *Trivium* (lógica, gramática e retórica) e o *Quadrivium* (aritmética, música, geometria e astronomia). Tais artes eram um método de ensino multidisciplinar que buscava a formação plena dos indivíduos (MACHADO, 2002).

Modelos de ensino semelhantes predominaram durante a idade média, contudo, por volta dos séculos XVII e XVIII, transformações sociais como a industrialização e a divisão do trabalho progressivamente transformaram a busca por um saber unificado em uma demanda crescente por conhecimentos cada vez mais específicos. Essa nova perspectiva recebeu influências de pensadores como René Descartes. Em sua obra de 1637, *o discurso do método*, ele propõe que a forma mais eficaz de obter conhecimento sobre determinada questão é dividir o assunto até que não restem dúvidas sobre o mesmo (SANTOMÉ, 1998). Já em 1808, Napoleão Bonaparte faz uma mudança no sistema de ensino da França ao criar a faculdade de ciências e a universidade de letras. Ao fazer estudantes optarem pela cultura literária ou pela cultura científica, Napoleão promoveu uma diversificação intelectual que foi posteriormente implementada em todo o ocidente.(ZABALA, 2002)

No século XIX, o conhecimento em seus diferentes campos, foi profundamente impactado pela expansão do trabalho científico. Campos de estudo como as ciências naturais passaram a ser divididas e estudadas de forma cada vez mais específica, no intuito de definir mais claramente cada uma de suas segmentações. Nesse período, o cientificismo teve grande destaque em sociedade, sob a luz de uma perspectiva positivista que compreendia o saber das ciências como ferramenta primordial para o progresso humano. Todavia, a chegada do século XX trouxe consigo questionamentos a essa visão progressista da ciência. A crescente dissociação e especificação do saber foi amplamente criticada, afinal, como essa visão nos permite compreender a nossa realidade que interliga uma ampla gama de conhecimentos complexos e distintos?

Se por um lado a especialização nos proporcionou avanços em áreas como a Física e a Química, ela também acaba por restringir o saber produzido, que só consegue ser compreendido

pelos profissionais da área em questão. No aspecto educacional, desde o início da vida escolar dos estudantes o processo de construção de conhecimentos é feito de maneira compartimentada através da separação dos conteúdos em várias disciplinas que pouco interagem e se integram entre si, e esse fator leva os alunos a uma visão reducionista e desconexa dos conteúdos. Nessa perspectiva, reivindicações de movimentos estudantis insatisfeitos com a estruturação do ensino no fim dos anos 60 motivam a realização do congresso de Nice, em 1970, na França. O evento foi um marco na história da interdisciplinaridade, que se apresentou como uma alternativa ao conhecimento compartimentado da ciência moderna (MANGINI; MIOTO, 2009).

1.2 Definições de interdisciplinaridade

Entende-se por disciplina, as diversas categorias que organizam o conhecimento científico como um todo. A organização disciplinar escolar que conhecemos foi instituída a partir do século XIX, com a formação das universidades modernas, e foi posteriormente desenvolvida no século XX, com o crescimento das atividades científicas. No contexto da interação entre disciplinas, surge a interdisciplinaridade. Embora o uso desse termo seja bastante frequente, não há uma definição única e consensual para o mesmo. Podemos, entretanto, analisar definições estabelecidas por diferentes autores. Para Japiassú e Marcondes no livro *Dicionário Básico de Filosofia*:

A interdisciplinaridade é um método de pesquisa e de ensino suscetível de fazer com que duas ou mais disciplinas interajam entre si. Esta interação pode ir da simples comunicação de ideias até a integração múltipla dos conceitos, da epistemologia, da terminologia, da metodologia, dos procedimentos, dos dados e da organização da pesquisa. Ela torna possível a complementariedade dos métodos, dos conceitos, das estruturas e dos axiomas sobre os quais se fundam as diversas práticas científicas.

JAPIASSÚ e MARCONDES (2006, p. 145-146)

Na perspectiva de Ivani Fazenda, uma das pioneiras no estudo do tema no Brasil, a interdisciplinaridade se constitui como um processo contínuo e interminável de elaboração de conhecimentos, orientado por uma atitude crítica e aberta a realidade em sua totalidade (FAZENDA, 1994). Outra perspectiva cuja análise é interessante é a de Jean Piaget, considerado um dos intelectuais mais importantes do século XX. Para ele, a interdisciplinaridade pode ser entendida como "um intercâmbio mútuo e integração recíproca entre várias ciências". Essa interação entre ciências deveria conduzir a um estágio no qual não haveriam mais fronteiras entre as disciplinas, chamado de transdisciplinaridade (PIAGET, 1978).

1.3 Interdisciplinaridade no Brasil

As primeiras discussões sobre a interdisciplinaridade na França da década de 70 foram lançadas por Georges Gusdorf, autor cujos estudos impulsionaram a difusão das práticas interdisciplinaridade no Brasil. Orientado por Gusdorf, Hilton Japiassú publica a primeira produção significativa para a interdisciplinaridade, a sua obra *Interdisciplinaridade e Patologia do Saber*. Na obra, o autor argumenta que o saber altamente especializado do século XX corresponderia a uma intelectualidade problemática, para a qual uma das possibilidades de "conserto" estaria na adoção de uma metodologia interdisciplinar. Entre os objetivos de seu método estava a formação de profissionais melhor adaptados ao mercado de trabalho e a diminuição da distância entre a sociedade e o ambiente acadêmico universitário (JAPIASSÚ, 1976).

Outra publicação relevante é feita em 1970, a partir das pesquisas de Ivani fazenda, sob a influência de Japiassú, Gusdorf e das práticas interdisciplinares na Europa. A autora em seus primeiros trabalhos dedica-se mais a conceituação do tema propriamente dito do que a metodologia. Em sua perspectiva, os estudos da interdisciplinaridade no Brasil dividem-se em três fases distintas:

1970: procura-se uma definição de interdisciplinaridade

1980: tenta-se explicitar um método para a interdisciplinaridade

1990: parte-se para a construção de uma teoria da interdisciplinaridade.

FAZENDA (2007, p.75)

Enquanto Japiassú dedicou-se ao estudo epistemológico do tema, Fazenda torna-se referência na pesquisa interdisciplinar da educação, principalmente no aspecto da formação de professores e de reformas nos currículos escolares. A partir da década de 90, as consequências destes estudos se manifestam nas políticas públicas educacionais, alterando as legislações curriculares vigentes no Brasil.

1.4 Documentos oficiais e a interdisciplinaridade

Em 1996, foi promulgada Lei de Diretrizes e Bases (LDB) nº 9.394/96, como a legislação regulamentadora do sistema educacional brasileiro, nas esferas públicas e privadas. A LDB estabelece o ensino médio como a etapa final da educação básica, e atribui ao Estado a responsabilidade de ofertar esse nível a todos os brasileiros. Conforme o artigo nº 35, o ensino médio tem por finalidades:

I – a consolidação e o aprofundamento dos conhecimentos adquiridos no ensino fundamental, possibilitando o prosseguimento de estudos;

II – a preparação básica para o trabalho e a cidadania do educando, para continuar aprendendo, de modo a ser capaz de se adaptar com flexibilidade a novas condições de ocupação ou aperfeiçoamento posteriores;

III – o aprimoramento do educando como pessoa humana, incluindo a formação ética e o desenvolvimento da autonomia intelectual e do pensamento crítico;

IV – a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina.
BRASIL (1996)

Nessa perspectiva, o ensino deve preparar os discentes tanto para o prosseguimento dos estudos quanto para o mercado de trabalho. Acerca dos aspectos curriculares, propõe-se que os conteúdos devem estar de acordo com as necessidades locais dos alunos, isto é, adequar-se a realidade sócio-cultural dos estudantes. Os currículos devem obrigatoriamente abranger o estudo da matemática, os conhecimentos do mundo físico, a língua portuguesa e a realidade político-social do Brasil (BRASIL, 1996). A lei não faz menções explícitas a interdisciplinaridade, mas sinaliza a criação de áreas do conhecimento afins e integradas.

Como fruto de participações brasileiras em conferências internacionais de educação, o governo implementou, no período de 1993 a 2003, o plano decenal de educação para todos, visando aprimorar continuamente o ensino. Para nortear a educação no país e promover seu desenvolvimento de acordo com as normas da LDB, são estabelecidos os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN), diretrizes elaboradas para orientar os docentes através da padronização de fatores fundamentais ao aprendizado de cada disciplina.

Os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCNEM) determinam a organização dos currículos escolares em três áreas que contemplam a linguagem, a matemática e as ciências naturais, as ciências humanas e as tecnologias referentes a cada uma destas. Como motivação para essa divisão, o documento aponta que a articulação de disciplinas em grandes áreas favorece a compreensão de múltiplos conhecimentos em um panorama geral. Para os PCNEM:

Na perspectiva escolar, a interdisciplinaridade não tem a pretensão de criar novas disciplinas ou saberes, mas de utilizar os conhecimentos de várias disciplinas para resolver um problema concreto ou compreender um determinado fenômeno sob diferentes pontos de vista. Em suma, a interdisciplinaridade tem uma função instrumental. Trata-se de recorrer a um saber diretamente útil e utilizável para responder às questões e aos problemas sociais contemporâneos

BRASIL (2000, p. 21)

A formação de áreas baseia-se na união de conhecimentos que compartilham objetos de estudo e por isso, comunicam-se mais facilmente e criam condições para a prática escolar

interdisciplinar (BRASIL, 2000). A interação entre as disciplinas proposta pelo documento busca facilitar o entendimento sobre o objeto de estudo, porém sem desprezar a identidade e especificidade de cada disciplina.

Posteriormente os PCNEM passaram por uma reformulação complementar no ano de 2002, com o estabelecimento dos PCNs+ que pretendiam fornecer um maior aprofundamento na abordagem de cada disciplina. Para isso, buscou-se oferecer aos professores exemplos e sugestões de ideias para aulas condizentes com os parâmetros propostos anteriormente, atentos as práticas interdisciplinares. Na perspectiva dos PCNs+:

As linguagens, ciências e humanidades continuam sendo disciplinares, mas é preciso desenvolver seus conhecimentos de forma a constituírem, a um só tempo, cultura geral e instrumento para a vida, ou seja, desenvolver, em conjunto, conhecimentos e competências. Contudo, assim como a interdisciplinaridade surge do contexto e depende da disciplina, a competência não rivaliza com o conhecimento; ao contrário, se funda sobre ele e se desenvolve com ele.

BRASIL (2002, p. 13-14)

O documento sugere um conjunto de temas e unidades temáticas no intuito de auxiliar as escolhas do docente. Para cada disciplina há um enfoque nas estratégias de ação didática. Tratando-se da física, é indicado o tema *matéria e radiação*. A organização do conteúdo envolve a descrição da radiação (no ponto de vista físico e químico), seus efeitos na matéria, e os aspectos sociais, culturais e tecnológicos envolvidos em processos radioativos. Nesse contexto, a interdisciplinaridade no documento se apresenta como orientação que visa tornar o espaço escolar um ambiente que transcende a pura memorização de informações, tornando-o um local de incentivo a um pensamento crítico e aplicável a realidade.

Em 2013 são estabelecidas as Diretrizes Curriculares Nacionais (DCN), normas que definem competências e diretrizes para a educação básica, orientando o planejamento curricular dos sistemas de ensino. Concebidas pelo Conselho Nacional de Educação (CNE), as destacam a interdisciplinaridade, assumindo que "todo conhecimento mantém um diálogo permanente com outros conhecimentos". A análise destes documentos oficiais (LDB, PCN, PCN+ e DCN) orientadores da educação brasileira atestam a importância da aplicação de propostas interdisciplinares no contexto escolar. Todavia, a interdisciplinaridade não deve ser vista como uma prática salvacionista ou mero modismo educacional, mas sim uma possibilidade de melhoria no processo de ensino e aprendizagem (OLIVEIRA; SANTOS, 2017)

1.5 Correlações com o ensino de Ciências Naturais

Um dos grandes desafios da nossa realidade contemporânea está em acompanhar a evolução científica e tecnológica que vem acontecendo em uma rapidez nunca vista antes. Para uma sociedade cada vez mais imersa num ambiente tecnológico e globalizado se faz necessário garantir as pessoas uma formação científica para que as mesmas possam utilizar os produtos da tecnologia e além disso, compreender as vantagens e desvantagens inerentes a eles. No Brasil, o ensino de Ciências é marcado pelas metodologias de ensino tradicionalistas, baseadas na transmissão e recepção de conteúdos. A extensa fragmentação dos currículos de ciências naturais induz nos discentes concepções errôneas de que esses conhecimentos são absolutos e não se relacionam a aspectos sociais e políticos. Se concebemos a nossa realidade através da interação entre processos diversos, na qual tudo muda e se aprimora constantemente, não há espaço para a noção de conhecimentos inquestionáveis, imparciais, imutáveis e indiferentes aos aspectos humanísticos (SILVA, 2010).

A ciência é uma atividade humana complexa, histórica e coletivamente construída, que influencia e sofre influência de questões sociais, tecnológicas, culturais, éticas e políticas
(Andery et al., 2012)

Sob esse ponto de vista, tanto o processo de ensino quanto o de aprendizagem deve acompanhar estas transformações, e os conhecimentos das ciências naturais são imprescindíveis para a interpretação de tais mudanças. Para que os saberes dessa área contribuam no entendimento da realidade, novamente evocamos a questão da interdisciplinaridade.

Para compreender as ciências da natureza sob o prisma da integração dos conteúdos, podemos recorrer a uma análise histórica da ciência. Na perspectiva de Edgar Morin, a história das ciências não foi construída somente pela formação e proliferação de disciplinas, mas também foi feita por meio de rupturas entre as fronteiras disciplinares e da circulação de ideias de uma determinada área para outra. Muitas das descobertas científicas importantes vieram a tona quando isolamento entre as disciplinas foi rompido. Como exemplo disso, temos o surgimento da biologia molecular na década de 1950, a partir da junção de conhecimentos biológicos, físicos e químicos. Outra contribuição importante surge da parceria entre a engenharia e a matemática, no período de 1940-1950. A junção entre os trabalhos matemáticos e a pesquisa técnica para criação de máquinas autogovernadas feitas por Alan Turing e Alonzo Church motivaram o surgimento de computadores e da cibernética atual (MORIN, 2003).

A interação entre a física e a química, foco do presente trabalho, tem se desenvolvido ao longo de séculos, proporcionando a descrição de fenômenos naturais e uma série de progressos

científicos. A Física, que dedica-se ao estudo das interações entre a matéria, percorre seu caminho desde as observações e descrições da natureza por Aristóteles, (século IV a.C), passando pelas verificações experimentais de Galileu, e a formulação da mecânica clássica por Newton até a chegada da teoria relativística de Einstein e a Mecânica Quântica no século XX. Já a Química, que detém-se ao estudo das propriedades e estados das substâncias naturais, tem sua origem nas práticas alquimistas (século IX. a C), desenvolve-se no século XVII com as leis de conservação de Boyle e Lavoisier e evolui até a tabela periódica moderna.

Ambas as ciências se desenvolveram com metodologias, histórias e tradições próprias, operando em campos próximos, porém distintos. No processo de construção dos conhecimentos das duas áreas, houveram pontos de convergência, os quais deram origem a Físico-Química, campo de estudo que busca compreender fenômenos químicos através de princípios e conceitos físicos. Sua criação deve-se ao trabalho de vários cientistas, em especial ao físico J. Willard Gibbs, que estabeleceu os fundamentos teóricos ao aplicar as leis da termodinâmica em substâncias heterogêneas, tornando a físico-química uma ciência indutiva e rigorosa (GIBBS, 1876).

Outro ponto em comum, no qual as fronteiras da física e da química tornam-se indistintas, emerge das descobertas na estrutura atômica que foram realizadas nas primeiras décadas do século passado. Essas descobertas serão explicitadas no capítulo seguinte, com enfoque na descoberta do spin, uma propriedade fundamental das partículas subatômicas que tomaremos como objeto de estudo interdisciplinar.

2 CRONOLOGIA DO SPIN

Neste capítulo, faremos uma cronologia dos fatos histórico-científicos que levaram a formulação da ideia do spin, o momento angular intrínseco comum a todas as partículas. Estabelecer esse panorama nos ajuda a entender como a junção de trabalhos de vários físicos e químicos ao longo de anos contribuiu para o desenvolvimento desse conceito. Além disso, o uso da história da ciência pode ser utilizado no ensino das ciências exatas como forma de tornar seu aprendizado mais interessante, aproximando descobertas científicas de fatos históricos. Esse enfoque possibilita a visão da ciência como uma construção humana. Através desse capítulo, espera-se fornecer um maior embasamento teórico para um professor de nível médio que irá abordar a temática em sala de aula.

2.1 Introdução aos modelos atômicos

Um dos anseios mais antigos do pensamento humano está na compreensão da matéria que nos forma e de suas origens. A ideia de matéria constituída por pequenas unidades é antiga e constitui as raízes da filosofia natural que ficou conhecida como atomismo. Essa teoria, cujos principais representantes são dois filósofos gregos pré-Socráticos: Leucipo de Mileto e seu pupilo Demócrito de Abdera, tinha como premissa fundamental o seguinte argumento: a matéria não pode ser dividida infinitamente, portanto, ela deve ser formada por pequenos corpos que não podem ser fragmentados. Cada uma dessas unidades foi nomeada por Demócrito de átomos (do grego *atomos*: indivisível). Ele também afirmou que os átomos eram infinitos em número, em variedade e não poderiam ser criados (KENNY, 2004).

A hipótese atomística posteriormente tornou-se aceita por vários cientistas, como Robert Boyle e Isaac Newton (GRAFTON *et al.*, 2010). Retomando essas idéias, no início do século XVIII, John Dalton em seu trabalho: *Absorption of Gases by Water and Other Liquids* estabelece os fundamentos do que veio a ser a primeira teoria atômica moderna. Nesse artigo, Dalton evidencia os átomos como partículas indivisíveis que combinam-se em proporções fixas, gerando assim os compostos. Além disso, os átomos formadores de um elemento são iguais e devem permanecer inalterados em reações químicas. O modelo de Dalton foi questionado por não conseguir explicar fenômenos como a condução elétrica ou a eletrólise, contudo, seu método e experimentações revolucionaram a química moderna.

A concepção de que o átomo seria a menor parte da matéria foi questionada pelo

filósofo Richard Laming durante os anos de 1838 e 1851. Ele sugeriu que os átomos seriam formados por um núcleo cercados de partículas subatômicas de carga elétrica unitária (FARRAR, 1969). Tais partículas, que foram chamadas de *electrons* em 1891 pelo físico George Stoney, tiveram sua existência confirmada através das experimentações de J.J.Thompson em 1897. É válido notar que muito antes do elétron ter sua existência comprovada, filósofos naturais buscavam explicações e a origem dos fenômenos elétricos. Tendo isso em vista, é pertinente falar brevemente sobre a evolução da ideia de eletricidade até a descoberta dos elétrons.

2.2 O conhecimento da estrutura atômica até o início de 1900

2.2.1 A descoberta do elétron

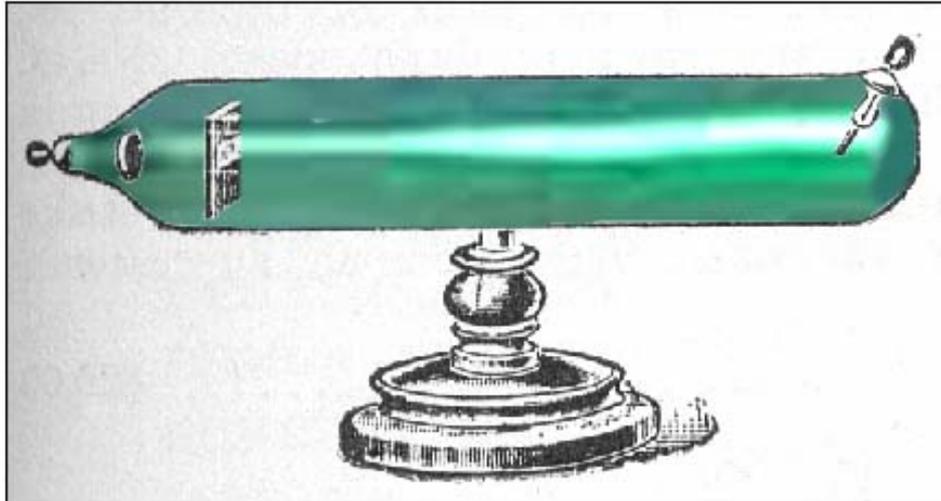
No fim do século XIX, algumas questões não esclarecidas sondavam a mente de vários cientistas. Tratando-se da física, a causa dos fenômenos elétricos não era conhecida, apesar de inúmeras experiências ligadas a eletricidade serem realizadas desde a época da Grécia antiga. Para a química, mesmo com o advento da teoria cinética dos gases e o estabelecimento de leis de proporções dos elementos, pouco se conhecia da composição e estrutura dos átomos. Entre os avanços científicos ocorridos a partir de 1895, quatro descobertas desempenharam um papel fundamental na ampliação de nossos conhecimentos acerca do mundo atômico: o elétron, os raios-x, a radioatividade e o efeito Zeeman.

Os primeiros registros de experiências sobre a eletricidade datam do século VI a.C, quando o filósofo grego Tales de Mileto observou que o âmbar ao ser atritado, atraía e repelia pequenos objetos (SHIPLEY, 1945). Ao longo dos séculos, o estudo de fenômenos dessa natureza foram continuados por inúmeros pensadores, como Stephen Gray, Charles du Fay, Michael Faraday, Benjamim Franklin e outros nomes de destaque da física e da química. Faraday, ao estudar o efeito de descargas elétricas nos tubos de gases rarefeitos em 1833, notou que quanto mais rarefeito um gás eletrizado estivesse, mais forte era o brilho emitido por ele.

Em 1858, o matemático Julius Plücker pensou no que aconteceria à descarga elétrica caso um ímã fosse posto próximo a um tubo a vácuo. Apesar de seu aparato experimental rudimentar, ele observou que a presença do ímã fazia a descarga ser defletida (O'CONNOR; ROBERTSON, 2014). O físico William Crookes melhorou essas experimentações ao desenvolver uma ampola de vidro evacuada, contendo duas placas de metal ligadas numa fonte de tensão elétrica, conforme a figura 1. A placa ligada ao polo negativo recebeu o nome de cátodo e a

positiva foi chamada de ânodo. Quando a tensão entre o ânodo e o cátodo era aumentada, surgia um feixe de luz emitido pelo cátodo, que percorria a ampola (DEKOSKY, 1983). Por sugestão de Eugene Gouldstein, essa forma de radiação foi nomeada raios catódicos.

Figura 1 – Um tubo de raios catódicos simples.



Fonte: University of Illinois (1923)

A teoria iônica da condutância já era conhecida na época de Faraday, mas com a chegada da teoria da dissociação proposta pelo químico sueco Svante Arrhenius, o conceito de íons ganha uma nova importância. A ideia da eletricidade composta por átomos carregados de carga unitária já era discutida e apoiada por nomes como George J. Stoney e Hermann von Helmholtz. Ao trazer os conhecimentos provenientes dos estudos em soluções aquosas para as experimentações nos tubos de raios catódicos, a seguinte conjectura foi formulada: se a condução elétrica deve-se a íons, e o cátodo junto aos raios eram formados de partículas, então tais partículas devem ter propriedades iônicas (LEICESTER, 1971).

Se hoje sabemos que os raios catódicos são elétrons movendo-se a altíssimas velocidades, na época destes experimentos a existência de tais partículas ainda não havia sido provada. Então, destacaram-se duas correntes de pensamento distintas que debatiam a natureza desses raios: uma que acreditava que os mesmos eram formados por partículas corpusculares, enquanto a outra atribuía a constituição dos raios à ondas. Os debates foram encerrados quando o francês J.B. Perrin comprovou que os raios catódicos eram partículas de carga negativa (SEGRE, 1980). A descoberta dos elétrons, todavia, é atribuída a J.J. Thomson, cujas experimentações indicaram a existência da primeira partícula subatômica conhecida.

Thomson, ao aperfeiçoar a ampola de Crookes, mostrou que além do campo mag-

nético, campos elétricos também alteravam a trajetória dos feixes de luz presentes no tubo. Ele postulou que além de comporem os raios catódicos, tais partículas eram um componente universal da matéria e apresentou o cálculo da razão entre carga e massa destes corpúsculos, que foram nomeados "elétrons". Medidas mais precisas foram realizadas por R. Millikan e seu então estudante de doutorado Harvey Fletcher no experimento com gotículas de óleo, no qual a carga elementar de um elétron foi encontrada (GOODSTEIN, 2001).

2.2.2 A radiação e o núcleo do átomo

Todavia, a descoberta de outro tipo de radiação em 1895 eclipsou as pesquisas sobre os elétrons. William C. Röntgen, investigando um tubo de Crookes envolto numa cobertura escura para que a luz proveniente da ampola não interferisse na experiência, usou uma tela pintada com um composto de platocianeto de bário e observou a formação de um brilho verde sobre a tela a cerca de um metro de distância. Röntgen percebeu que raios invisíveis vindos do tubo passavam pelo papelão e faziam a tela brilhar. Desconhecendo a natureza de tal radiação, ele a nomeou de raios-x. No período que se seguiu a descoberta de Röntgen, Henri Becquerel imaginou que o fenômeno da fosforescência da luz estaria diretamente ligado aos raios-X. Das observações acerca da emissão luminosa em sais de urânio, ele constatou que tal material era uma fonte de raios capazes de penetrar na matéria ao seu redor, descobrindo assim o fenômeno da radiação (MARTIN, 2006). Além do urânio, elementos como o polônio e o rádio foram investigados anos depois por Marie e Pierre Curie, cujos trabalhos estabeleceram a nova ciência da radiação.

Outro nome de grande importância desponta nas investigações sobre a radioatividade: o físico neozelandês Ernest Rutherford. Partindo dos trabalhos de seus contemporâneos e com a ajuda de Thomson, ele se dedicou a medir a ionização produzida pelo urânio. Como resultado de seus trabalhos, ele anuncia a existência de dois tipos de radiação, nomeadas alfa e beta (as duas diferiam entre si por sua absorção pela matéria). Rutherford orientou e colaborou com muitos estudantes que realizaram grandes descobertas, entre eles Frederick Soddy, que observou o decaimento radioativo de alguns elementos (FREEDMAN, 2009). Além de Soddy, Rutherford supervisionou uma série de experimentações de H. Geiger e E. Marsden sobre o espalhamento da radiação alfa, cujos resultados lançaram luz sobre a composição do átomo.

A ideia mais aceita sobre a estrutura atômica em meados de 1900 era a conjectura de Thomson, que considerava o átomo uma esfera carregada positivamente sobre a qual os elétrons distribuíam-se uniformemente. Todavia, esse modelo não era universalmente aceito

e outros cientistas propuseram modelos alternativos, a exemplo do japonês Hantaro Nagaoka. Para o seu modelo, Nagaoka fez duas previsões: o átomo deveria ter um centro massivo e os elétrons orbitariam ao redor do núcleo, de modo análogo aos anéis que orbitam o planeta Saturno (BRYSON, 2005). As experimentações de Rutherford, Geiger e Marsden, confirmando aspectos da teoria de Nagaoka, provaram a existência de um núcleo positivo, massivo e rodeado por uma nuvem de elétrons, conhecido como modelo planetário (RUTHERFORD; RATCLIFFE, 1938).

Uma descoberta de 1896, entretanto, permaneceu sem uma explicação satisfatória por duas décadas, até o desenvolvimento da Mecânica Quântica. O holandês Pieter Zeeman, em seus estudos sobre a influência do magnetismo na emissão de luz, observou que linhas espectrais de um sistema podiam desdobrar-se em duas ou mais frequências sob a ação de um campo magnético. Essa observação, nomeada efeito Zeeman, teve um papel importante nas descobertas posteriores do princípio de Pauli e do spin do elétron e será melhor discutida após uma introdução breve sobre a espectroscopia e os princípios da Mecânica Quântica.

2.3 Análise dos espectros e o átomo de hidrogênio

2.3.1 A origem da espectroscopia

A origem da espectroscopia remonta a uma das experimentações mais famosas de Isaac Newton. Ao descobrir a dispersão da luz do sol, que espalhava-se em cores variadas ao refratar-se num prisma de vidro, ele criou a nomenclatura "espectro" para referir-se a faixa de cores do arco-íris. Anos depois, William Wollaston observou pela primeira vez a existência de linhas claras e escuras no espectro solar, todavia, não atribuiu significado a elas (WOLLASTON, 1802). Combinando prismas e aparatos mais modernos (como grades de difração), Joseph Fraunhofer fez um estudo detalhado sobre o espectro da luz do sol, realizando medições nos seus comprimentos de onda. Logo depois, vários cientistas dedicaram-se a observação de espectros emitidos por diferentes fontes luminosas, avançando os estudos da espectroscopia.

Em 1860, o físico Gustav Kirchhoff trabalhando com o químico Robert Bunsen constatou que o padrão observável de linhas espectrais era único para cada elemento químico (KIRCHOFF; BUNSEN, 1861), o que possibilitou a identificação de elementos a partir da análise espectral. Os estudos voltados ao espectro do átomo de hidrogênio (ver figura 2) começaram com o matemático suíço Johann Balmer, que demonstrou que as 4 linhas visíveis do espectro do hidrogênio podiam ser representadas matematicamente, resultado conhecido como série de

Balmer. Esse resultado foi generalizado por Johannes Rydberg, com a criação de uma equação que calcula os comprimentos de onda do espectro do hidrogênio e de vários outros elementos.

Figura 2 – O espectro do hidrogênio. Hoje sabemos que o contato da radiação eletromagnética com a matéria faz os átomos absorverem energia, indo para estados de energia mais altos. Como esses estados são instáveis, os átomos liberam energia para voltar ao seus estados normais, gerando assim o espectro de emissão. Já o espectro de absorção é visualizado quando átomos absorvem energia, para alcançar estados de energia mais altos.



Fonte: Instituto DE Física Unicamp (2021)

2.3.2 O surgimento da era quântica

Paralelamente as observações e aos avanços na espectroscopia, a partir de 1901, uma outra área que revolucionaria a Física é iniciada. Quando o jovem Max Planck ingressou na universidade de Munich, foi aconselhado por um de seus professores a não dedicar-se aos estudos da Física, pois nessa área quase tudo já havia sido descoberto e restava apenas preencher alguns "buracos" (LIGHTMAN, 2005). Contudo, Planck opta por não seguir o conselho e prossegue seus estudos na Física Teórica, no campo da Termodinâmica. Suas pesquisas sobre a radiação do corpo negro o guiaram na formulação de dois princípios: o primeiro deles afirma que átomos só podem absorver ou emitir energia em quantidade discretas (a menor unidade dessa energia foi nomeada "quanta") e o segundo estabelece a relação de proporcionalidade entre a energia emitida e a frequência da radiação, expressa pela relação matemática:

$$E = h \cdot \nu \quad (2.1)$$

Na qual E representa a energia da radiação, h a constante de Planck e ν a frequência da radiação. Entretanto, Planck concluiu que esses resultados eram apenas um aspecto dos processos de

absorção e emissão, mas não forneciam um significado físico para a radiação em si. Mais tarde, em 1905, Albert Einstein reinterpretou a teoria de Planck para explicar o efeito fotoelétrico (fenômeno da ejeção de elétrons num material exposto a uma determinada fonte de luz), concluindo que a luz era composta de quantas discretas de energia, ou fótons. Com essas descobertas, as bases da promissora mecânica quântica foram lançadas.

2.3.3 *As contribuições de Bohr e Sommerfeld*

Em seu modelo atômico planetário, Rutherford documentou uma inconsistência referente a estabilidade do átomo: de acordo com o eletromagnetismo clássico, toda carga acelerada emite radiação, um processo que dispende energia das partículas. Considerando isso, como os elétrons percorriam suas órbitas emitindo radiação e perdendo continuamente energia, sem eventualmente colapsar contra o núcleo positivo? Uma outra dificuldade residia na falta de alguma propriedade que confirmasse a igualdade dos átomos entre si, pois não havia no modelo confirmação alguma dessa proposição (SEGRE, 1980). Ambas as questões foram abordadas por um dos mais notáveis estudantes de Rutherford, o dinamarquês Niels Bohr.

Bohr, ponderando sobre esses problemas, refletiu que a nova teoria da quantização de Planck e Einstein deveria desempenhar um papel importante em uma descrição correta da estrutura dos átomos. Por uma sugestão de seu colega Hans M. Hansen, Bohr atentou-se a observar o espectro do hidrogênio (BOHR, 1913) e, ao investigar a fórmula de Balmer das linhas espectrais, encontrou uma resposta para seus questionamentos. Bohr apresentou correções ao modelo de Rutherford através da publicação de 3 postulados em 1913. O primeiro deles estabelecia que o elétron poderia permanecer em certas órbitas circulares estáveis ao redor do núcleo sem irradiar energia. No segundo, determinou que as órbitas estacionárias possuem um momento angular orbital L determinado pela relação:

$$m_e v r = L = n \hbar \quad (2.2)$$

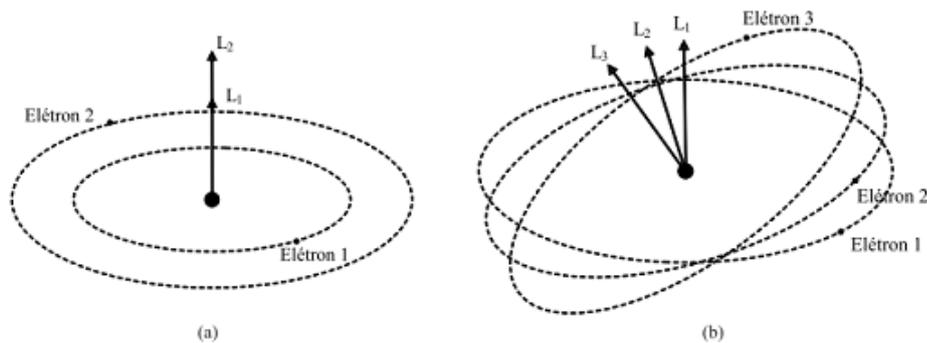
Onde n é o número quântico principal, que indica os níveis de energia do elétron. O menor valor possível para n , ($n = 1$) nos fornece o menor raio orbital possível, chamado de raio de Bohr (igual a $0.0529nm$). Uma vez na órbita de menor energia, o elétron não pode aproximar-se mais do núcleo. Desse modo, Bohr resolveu o problema da estabilidade e estabeleceu o raio de Bohr como parâmetro de equivalência entre os átomos. O terceiro postulado determina que

os elétrons só ganham ou perdem energia saltando de uma órbita para outra, absorvendo ou emitindo radiação de acordo com a relação de Planck (BOHR, 1923):

$$\Delta E = h\nu \quad (2.3)$$

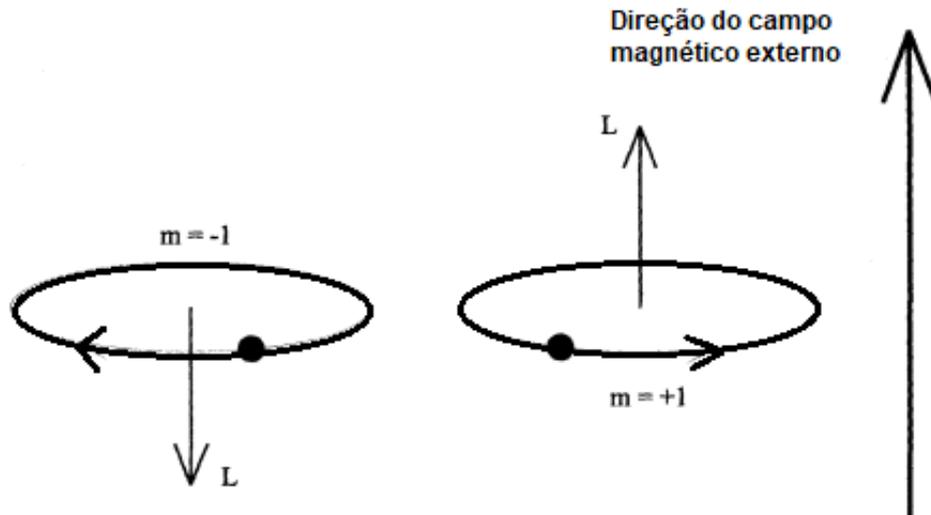
Apesar do modelo de Bohr apresentar uma descrição satisfatória para o hidrogênio e átomos semelhantes, tratando-se de átomos maiores, as previsões do modelo para os espectros não eram corretas (TIPLER; LLEWELLYN, 2012). A chamada estrutura fina do hidrogênio, isto é, o desdobramento das raiais espectrais em outras linhas de frequências próximas, era um efeito não explicado pela teoria de Bohr. Esses problemas levaram Arnold Sommerfeld a modificar e aperfeiçoar o modelo de Bohr. Foram incluídos efeitos relativísticos na teoria e mudanças nas órbitas eletrônicas, que tornaram-se elípticas em vez de circulares, conforme a figura 3. Desse modo, as órbitas dos elétrons ao redor do núcleo foram quantizadas em relação ao seu tamanho, formato e orientação no espaço, através da regra que hoje é conhecida como a quantização espacial de Bohr-Sommerfeld (ver figura 4). Além dos dois números quânticos existentes, o *principal* $n = 1, 2, 3, \dots$ e o *azimutal* k (que assume os valores $k = 1, 2, \dots, n$) que determinam o tamanho e a forma dos orbitais elípticos, Sommerfeld adicionou o número quântico de projeção m , que varia de $-k$ até $+k$, especificando a orientação das órbitas no espaço. Como o vetor momento angular orbital L é perpendicular ao plano da órbita, m determina a projeção de L em um eixo. É válido enfatizar que estes números quânticos foram reinterpretados posteriormente pela Mecânica Quântica moderna.

Figura 3 – Esquema da configuração do átomo para a teoria de Bohr, mostrando as órbitas circulares e coplanares permitidas aos elétrons (a). Na figura (b) temos o modelo melhorado de Sommerfeld, com suas órbitas elípticas, em planos distintos.



Fonte: Gomes e Pietrocola (2011)

Figura 4 – Modelo para o estado fundamental do hidrogênio: para $n = 1$, $k = 1$, m pode assumir os valores $+1$ ou -1 . O momento angular orbital L só pode assumir duas orientações, associadas ao movimento em sentido horário e anti-horário do elétron. A limitação nos valores de L recebe o nome de quantização espacial.



Fonte: Friedrich e Herschbach (1998)

A busca por uma comprovação experimental da validade da quantização de Bohr e Sommerfeld impulsionaram os dois físicos alemães Otto Stern e Walther Gerlach a realizar um experimento que desempenhou um importante papel na compreensão do spin do elétron. Para compreender melhor o experimento de Stern-Gerlach, é necessária uma breve introdução a um conceito fundamental aos estudos da física, o momento angular.

2.3.4 Noções sobre o momento angular

O momento angular é uma grandeza associada a movimentos de rotação de objetos ao redor de um determinado eixo. Uma partícula movendo-se através do espaço possui momento angular, um vetor definido pela equação:

$$L = \vec{r} \times \vec{p} \quad (2.4)$$

Onde r e p são, respectivamente os vetores posição e momento linear da partícula. Tal relação é frequentemente chamada de momento angular orbital, uma propriedade de objetos orbitando um eixo fixo (como a imagem clássica de um elétron que orbita um núcleo atômico). Para a

mecânica clássica, não há restrições nos valores ou nas direções que o momento angular pode assumir. Desde que Àmpere anunciou suas contribuições à teoria eletromagnética, sabemos que correntes elétricas atuam como geradoras de momento magnético. Logo, um elétron carregado, em seu movimento orbital produzirá uma corrente que irá gerar um campo magnético dipolar. A força do campo de dipolo é medida pelo momento magnético μ , que por sua vez, está relacionado ao momento angular orbital L pela equação:

$$\mu_L = g_L \frac{q}{2m} L \quad (2.5)$$

g_L corresponde ao fator-g orbital do elétron, uma constante adimensional. A expectativa baseada nestas relações clássicas é de que os átomos devem comportar-se como minúsculos ímãs. Estas considerações motivaram o surgimento da ideia clássica do spin (termo inglês para giro). O momento angular de rotação ou de spin S , conforme veremos adiante, foi associado a rotações de um corpo em torno de um eixo que atravessa seu próprio centro, análogo ao movimento de rotação do planeta Terra. Nesse caso, o momento angular S é calculado pela relação:

$$S = I\omega \quad (2.6)$$

Na qual I é o momento de inércia do corpo e ω é a sua velocidade angular. O momento de inércia é calculado a partir da distribuição de massa no corpo em relação ao seu eixo rotacional. Para uma esfera de raio R , rotacionando em torno de seu diâmetro, o momento de inércia assume o valor:

$$I = \frac{2}{5} mR^2 \quad (2.7)$$

Se a esfera é carregada eletricamente, a movimentação das cargas ao redor do eixo de rotação irá originar um campo magnético de dipolo cuja intensidade é medida pelo momento de dipolo a seguir:

$$\mu_S = g_e \frac{q}{2m} S \quad (2.8)$$

Onde g_e é o fator-g de spin do elétron, constante adimensional que, assim como g_L , caracteriza o momento magnético. Se queremos estender esses cálculos a uma partícula pontual como o elétron, aplicamos o limite de R tendendo à zero. Como consequência, seu momento de inércia I é nulo e, a menos que ω assumira um valor infinitamente grande, o momento angular S também será nulo. Se considerarmos que ω não é infinito, S tem valor zero e o elétron não tem um momento magnético μ . Sob essa perspectiva, para que o elétron possua momento angular magnético temos que considerá-lo como uma esfera de raio muito pequeno. Entretanto, conforme veremos adiante, esta imagem clássica do elétron como uma minúscula esfera giratória mostrou-se incompatível com princípios básicos da relatividade especial. Com a formulação da Mecânica Quântica e de sua versão relativística, o valor do momento magnético foi alterado, através da modificação no valor do fator g_e . Para essa constante foi determinado teoricamente e experimentalmente o valor aproximado de 2,002318 (ODOM *et al.*, 2006). Podemos reescrever a relação (2.8) na forma:

$$\mu = -\frac{e}{2m}g_eS \quad (2.9)$$

A análise do valor de μ é fundamental quando consideramos que a existência do momento magnético do elétron foi o que possibilitou a realização dos experimentos que revelaram as propriedades do spin (CRESSER, 2009).

2.3.5 O experimento de Stern-Gerlach

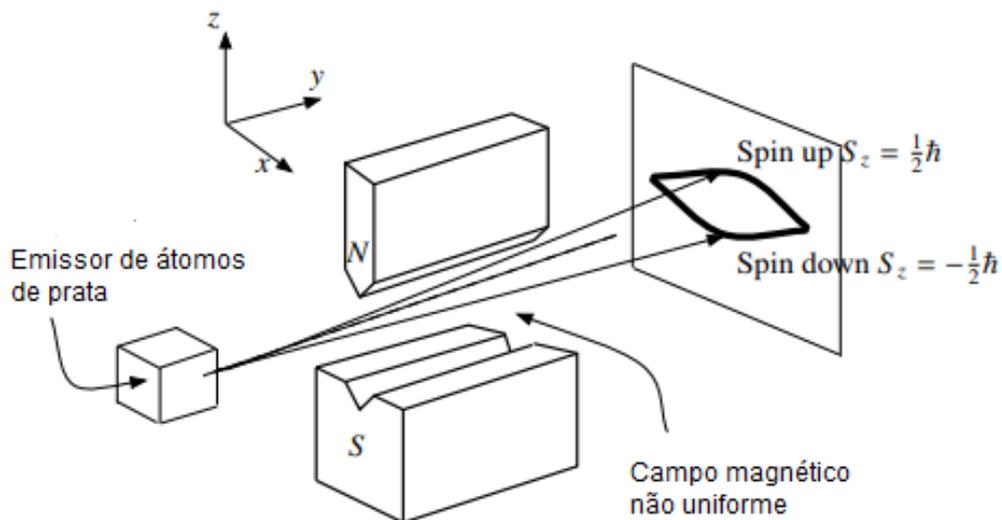
Ocorrida em 1922, a experiência de Stern-Gerlach é frequentemente citada como a evidência fundamental de que os elétrons possuem um tipo de momento angular intrínseco, isto é, um spin. Todavia, essa experiência, na época em que foi proposta, não tinha relação com o spin do elétron, que foi proposto inicialmente três anos depois por George Uhlenbeck e Samuel Goudsmit. A experiência, que buscava verificar a quantização espacial do modelo atômico de Bohr-Sommerfeld, só foi associada ao spin do elétron a partir de 1927 (GOMES; PIETROCOLA, 2011).

O experimento consiste em fazer um feixe de átomos de prata atravessar um campo magnético não homogêneo gerado por ímã e observar a deposição destes átomos numa placa detectora, conforme a figura 5. Acerca dos critérios experimentais, duas observações são pertinentes: primeiramente, os átomos de prata foram escolhidos por sua neutralidade, já que partículas carregadas num campo magnético sofreriam uma grande deflexão. Segundo, se

considerarmos as partículas do experimento como dipolos magnéticos giratórios com momento magnético μ , então haverá uma precessão induzida pelo torque que o campo exerce sobre o dipolo. Se o campo magnético for homogêneo, as forças exercidas nas extremidades do dipolo se cancelam e a trajetória da partícula não é afetada. Para o campo não homogêneo utilizado, a força em uma das extremidades do dipolo é maior, gerando uma força resultante que desvia a trajetória da partícula. A energia potencial das partículas é $E = \mu \cdot B$, que resulta numa força equivalente a $F = \nabla(\mu \cdot B)$. No experimento, o gradiente do campo magnético está principalmente na direção z gerando uma força F_z expressa por:

$$F_z = \frac{\partial(\mu \cdot B_z)}{\partial z} = \mu_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad (2.10)$$

Figura 5 – O aparato experimental de Stern-Gerlach.



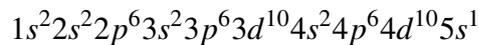
Fonte: Cresser (2009)

Stern considerou que, se a quantização espacial fosse correta, as componentes do momento angular só poderiam assumir valores discretos, logo, a direção do vetor momento angular seria restringida a determinadas quantidades. Essa hipótese poderia ser testada levando em consideração que um elétron em órbita gera um momento magnético μ proporcional ao momento angular orbital L . Portanto, a medição do momento magnético indicaria a validade da quantização espacial. Com essa hipótese em mente, Stern previu que o feixe de átomos saídos do aparato dividiria-se em duas componentes distintas, pois no átomo de prata no estado

fundamental, para o elétron de valência eram atribuídos os valores $n = k = 1$ e portanto m deveria apresentar os valores $+1, -1$ (FRIEDRICH; HERSCHBACH, 1998). A expectativa clássica, por sua vez previa que os vetores de momento magnético dos átomos seriam orientados aleatoriamente no espaço da tela detectora, ou seja, uma propagação contínua na direção da componente z dos momentos magnéticos dos átomos conforme eles saem do forno, variando de $-|\mu_z|$ até $|\mu_z|$ (o que deixaria uma linha na tela ao longo da direção de z) (CRESSER, 2009). Os resultados do experimento indicavam a chegada dos átomos na tela em apenas dois pontos, cujos momentos magnéticos correspondiam aos valores:

$$\mu_z = \pm\mu_b; \quad \mu_b = \frac{e\hbar}{2m_e} \quad (2.11)$$

Onde μ_b é o magneton de Bohr. Os idealizadores do experimento tiveram êxito em demonstrar a quantização espacial, porém, não perceberam que os resultados deviam-se ao spin do elétron. A explicação desses resultados é baseada nos conhecimentos atuais da estrutura do átomo de prata. A prata possui 47 elétrons, com distribuição eletrônica:



O único elétron da camada de valência tem momento angular orbital nulo, de modo que a única contribuição para o momento magnético do átomo vem apenas de seu spin. Nesses átomos, os elétrons se emparelham em sentidos contrários de rotação, neutralizando o momento magnético no átomo como um todo. No átomo de prata, o elétron solitário da camada de valência permanece desemparelhado, e como consequência disso, surge um momento magnético que faz o elétron comportar-se como um ímã. Conforme os átomos atravessam o campo magnético do experimento, o torque do campo deflete os dipolos magnéticos até que suas posições correspondam a direção do campo mais forte. Os átomos então se aproximam ou se afastam do campo magnético mais forte em quantidades específicas, que dependem do valor do spin do elétron de valência. Desse modo o feixe de átomos de prata se divide enquanto viaja pelo campo magnético não homogêneo, de acordo com o spin do elétron de cada átomo. O experimento representa uma medida direta do spin S , que assume dois valores:

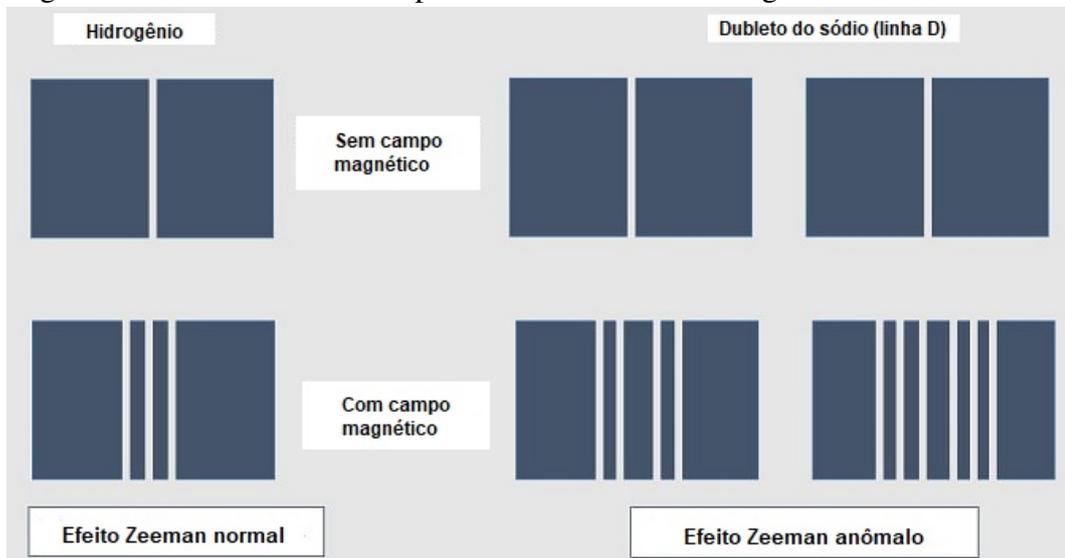
$$S_z = \pm\frac{1}{2}\hbar \quad (2.12)$$

Esses valores, junto ao fator $g_e = 2$, combinados na equação (2.9) levam ao resultado encontrado em (2.11).

2.4 A descoberta do spin do elétron

Após os experimentos de Stern-Gerlach e a comprovação das regras de quantização, a teoria de Bohr-Sommerfeld tornou-se o modelo atômico mais aceito no começo da década de 1920. Por meio dessa teoria, nomeada de Mecânica Quântica velha, abriu-se o caminho para a explicação do efeito Stark, fenômeno no qual linhas espectrais de átomos são deslocadas e divididas na presença de um campo elétrico. Apesar destes êxitos, o modelo de Bohr e Sommerfeld fracassou na tentativa de elucidar o problema do efeito Zeeman em sua totalidade. (KRAGH, 2012). A explicação inicial do fenômeno, em termos do eletromagnetismo clássico, havia sido proposta por Hendrik Lorentz em 1896. Ao considerar o espectro de elétrons movendo-se sob influência de um campo magnético, Lorentz constatou que a frequência ν_0 de vibração dos elétrons dividia-se num triplete de frequências. Essa configuração de tripletos é nomeada efeito Zeeman normal. Entretanto, no estudo de linhas espectrais de vários elementos foi observado que, na presença de um campo magnético fraco, as frequências separavam-se em múltiplas linhas, seguindo padrões muito mais complexos, fenômeno conhecido com efeito Zeeman anômalo (mostrado na figura 6).

Figura 6 – Efeito Zeeman no espectro dos átomos de hidrogênio e de sódio.



Fonte: Difference Between.com (201)

Tal anomalia era um problema persistente que absorvia a atenção de alguns dos físicos mais famosos do século XX, entre os quais, o austríaco Wolfgang Pauli. Em seus primeiros estudos acerca do efeito Zeeman, Pauli buscava uma explicação para a estrutura de dupletos dos metais alcalinos. Esse estudo o leva a publicação de um artigo, em dezembro de

1924, no qual foi demonstrado que a teoria de Bohr-Sommerfeld não conseguia explicar o efeito Zeeman de metais alcalinos corretamente. Pauli então concluiu que, se fosse assumido um novo número quântico, isto é, uma nova propriedade quântica do elétron, o problema da estrutura de dupletos seria esclarecido.

2.4.1 Princípio da exclusão de Pauli

Esse novo número quântico, ligado ao momento magnético do elétron podia assumir dois valores distintos. Tal propriedade foi identificada posteriormente como o spin. Pauli exibiu uma intuição impressionante ao constatar a natureza quântica do momento magnético antes mesmo da criação da mecânica quântica moderna, cuja primeira formulação surgiu em 1925 a partir dos trabalhos de Werner Heisenberg, Max Born e Paschoal Jordan.

Em janeiro de 1925, Pauli publica outro resultado, o chamado princípio da exclusão: Em um átomo não podem existir dois ou mais elétrons equivalentes, isto é, elétrons cujos 4 números quânticos são iguais. Nessa publicação, Pauli explica o significado de cada um dos 4 números para um único elétron em um átomo, que na notação moderna correspondem as quantidades n , l , $j = l + 1/2$ e m_j . n e l , o primeiro (número quântico principal) e o segundo (número quântico do momento angular) já eram conhecidos, j e m_j são o momento angular total e sua projeção, respectivamente. Pauli adicionou o número j , que para o caso $l = 0$, tinha valor igual $\pm 1/2$. Pauli todavia não atribuiu nenhuma interpretação física a essa nova quantidade, já que ele acreditava que a mesma não podia ser descrita pela física clássica (KAPLAN, 2019).

Ao ministrar uma palestra em Tubingen no ano de 1925, Pauli impressionou fortemente um de seus ouvintes, o jovem estudante Ralph Kronig. Como forma de preparação para a palestra, Kronig havia lido uma carta de Pauli que continha a essência de seu princípio da exclusão e enfatizava a necessidade de um número quântico adicional para solucionar o efeito Zeeman anômalo. Inspirado pela leitura, Kronig desenvolve o conceito de spin e propõe que o mesmo corresponderia ao novo número quântico. Ele imaginou o elétron como uma pequena esfera que gira com um eixo de rotação que poderia apontar em duas direções. Isso explicaria os dois valores possíveis ou dois graus de liberdade mencionados por Pauli para esse novo número. Assumindo que o momento magnético gerado pela esfera carregada tem o valor de um magneton de Bohr (μ_b), Kronig conseguiu formular uma explicação para a separação em dupletos dos metais alcalinos através do efeito spin-órbita, isto é, o acoplamento entre o momento magnético do elétron e o campo magnético que o movimento do núcleo atômico gera sobre o elétron.

Entretanto, ao testar sua hipótese experimentalmente através da análise da estrutura fina do hidrogênio, Kronig observou que seus cálculos indicavam uma divisão duas vezes maior das raias espectrais do que o observado. (COMMINS, 2012)

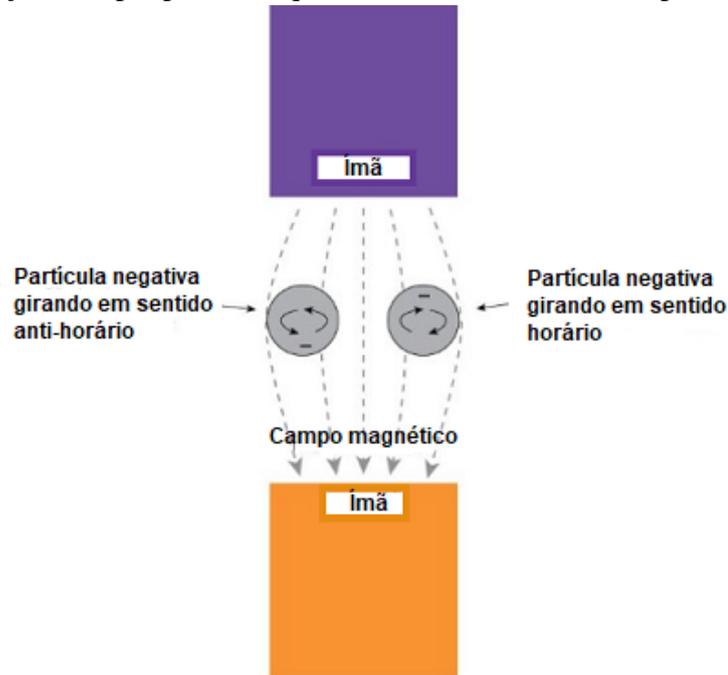
Apesar desse obstáculo, Kronig decidiu demonstrar seus resultados a Pauli, que rejeitou a ideia por considerá-la inconcebível na realidade. Pauli fez duas objeções específicas a ideia: primeiro, o fator 2 de discrepância na estrutura fina do hidrogênio e segundo, para uma esfera de raio clássico $r_0 = e^2/m_e c^2$, o momento magnético calculado só seria possível caso a velocidade na superfície do elétron fosse muitas vezes superior a da luz. Kronig ainda tentou apresentar suas ideias a Niels Bohr, que as recebeu sem entusiasmo. Desmotivado pelas rejeições, ele acaba decidindo abandonar a ideia de spin.

2.4.2 Os trabalhos de Uhlenbeck e Goudsmit

O conceito de spin é retomado em setembro de 1925 por dois estudantes holandeses, George Uhlenbeck e Samuel Goudsmit. Tal como Kronig, a dupla associou os números quânticos à graus de liberdade do elétron e assumiu que o número adicional da teoria de Pauli era proveniente da rotação da partícula. Foi assumido que o spin do elétron deveria interagir com um campo magnético externo e tal interação alteraria a energia de um estado particular. Então, o spin poderia estar alinhado ou anti-alinhado com o campo magnético, o que corresponderia a um número quântico de spin igual a $\pm 1/2$. Apesar da estranheza aparente da medida fracionária, o matemático Alfred Landé já havia demonstrado em 1921 a possibilidade dos números quânticos assumirem valores semi-inteiros (PAIS, 1989).

O número quântico de spin, conforme sabemos hoje, não é causado por rotações, apesar de seu nome. A figura 7 é uma representação abstrata dos elétrons que, de alguma maneira, agem como se estivessem girando quando expostos sob um campo magnético. Uhlenbeck e Goudsmit demonstram sua hipótese a Hendrik Lorentz, o físico teórico mais renomado da Holanda na época. Lorentz faz uma série de objeções às proposições, todas baseadas em seu conhecimento da eletrodinâmica clássica. Apesar das críticas, um pequeno artigo contendo a hipótese é publicado. Logo em seguida, a publicação atraiu o interesse de físicos, incluindo Bohr, que decide reconsiderar a ideia, apesar das inconsistências. Heisenberg envia uma carta a Goudsmit na qual ele aponta o mesmo erro presente nos trabalhos de Kronig, o fator 2 na estrutura fina do hidrogênio. Por essa mesma incoerência, Pauli ainda rejeitava a ideia, a qual ele só aceitou após as contribuições de Llewellyn Thomas (COMMINS, 2012).

Figura 7 – Os elétrons, como todas as partículas de spin 1/2, têm duas orientações de spin possíveis quando colocados em um campo magnético



Fonte: Hapern (2017)

Em 1926, Thomas descobre o motivo pelo qual a separação da estrutura fina era o dobro do esperado. Através da precessão de Thomas, uma correção relativística aplicada ao efeito spin-órbita, os cálculos da estrutura fina foram refeitos e foi encontrado um fator adicional de $1/2$, nomeado de "o fator meio de Thomas". Com este novo fator, a discrepância na estrutura fina do hidrogênio estava resolvida. Após tomar conhecimento dos resultados, Pauli enfim aceita a ideia do spin do elétron e cerca de um ano depois, estabelece uma formulação não relativística para descrever essa propriedade. A descrição completa do spin vem com o desenvolvimento da Mecânica Quântica Relativística, através dos trabalhos de Erwin Schrodinger e Paul Dirac.

2.4.3 A Mecânica Quântica Moderna

Como o comportamento atômico é tão diferente da experiência comum, é muito difícil acostumar-se com ele, e ele parece estranho e misterioso para todos, seja o físico novato ou experiente - Richard Feynman

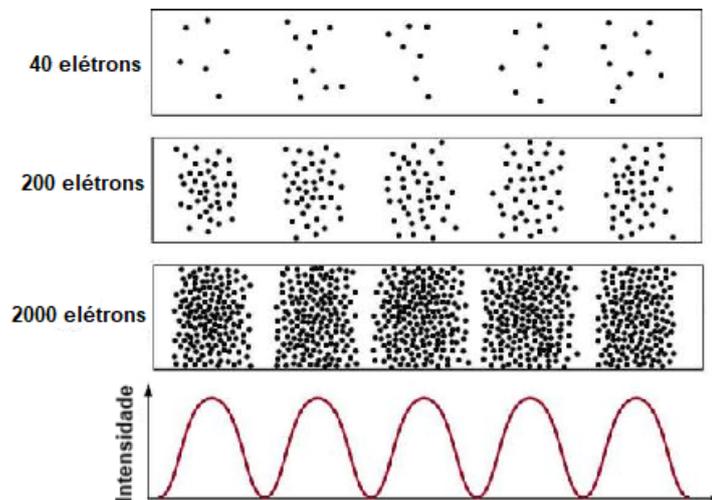
O começo da nova mecânica quântica remete aos trabalhos de Louis de Broglie, físico e aristocrata francês. Refletindo sobre a natureza da luz, ele se deparou com duas visões distintas: Por um lado os experimentos envolvendo os fenômenos óticos de interferência e difração atribuíam a composição da luz às ondas eletromagnéticas. Por outro, o efeito fotoelétrico de

Einsten não podia ser explicado através da teoria ondulatória clássica, mas seria satisfatoriamente explicado se a luz apresentasse um caráter corpuscular. Einstein então considerou que a luz era composta de pequenas partículas nomeadas fótons. Em sua tese de 1924, "Recherches sur la théorie des quanta", De Broglie relaciona ambas as visões com sua teoria da dualidade onda partícula, que estabelece a existência de uma função de onda associada para toda e qualquer partícula (DE BROGLIE, 1970). Em outras palavras, toda a matéria comporta-se como onda e também como partícula, uma ideia que pode ser resumida pela relação:

$$\lambda = h/p \quad (2.13)$$

Nela temos o comprimento de uma onda λ ligado ao momento p de uma partícula. Com a hipótese de De Broglie surgiram dúvidas acerca de como mensurar certas propriedades das partículas. Sabemos, por exemplo, que as ondas tendem a se espalhar ao longo de uma determinada distância. Para um elétron que obedece a dualidade onda-partícula, como mediríamos sua posição? Teríamos que considerá-lo uma partícula pontual ou uma onda? Para encontrar as respostas destas questões vários experimentos envolvendo a difração da luz, como o exemplificado na figura 8 foram realizados.

Figura 8 – A construção do padrão de difração de elétrons espalhados na superfície de um cristal. Cada elétron chega em uma localização definida, que não pode ser prevista com precisão. A distribuição em vermelho pode ser prevista como a difração de ondas com o comprimento de De Broglie dos elétrons.



Fonte: chem.libretexts.org (2018)

Os resultados demonstraram que devido ao seu comportamento de onda, a trajetória

e a posição final não podem ser determinadas precisamente para cada partícula individual. Conforme a quantidade de elétrons na experiência aumenta, obtemos uma distribuição relacionada ao comprimento de onda da partícula e ao padrão de difração. Existe uma certa probabilidade de encontrar um elétron num determinado local e o padrão geral dos elétrons na tela define a distribuição de probabilidades. Essa compreensão das ondas eletrônicas ou ondas de matéria por um viés probabilístico surgiu com os trabalhos de Erwin Schrödinger em 1926 (GREENE, 2003).

Na física clássica, o caráter ondulatório é descrito através de equações de onda, que estão presentes em áreas como o eletromagnetismo, a dinâmica dos fluidos e a acústica. Se partículas como o elétron comportam-se como ondas, é lógico pensar que deve haver um tipo de equação de onda que as descreva. Essa função é cumprida pela equação de Schrödinger, que traz em seu formalismo matemático o conceito de função de onda Ψ , uma representação matemática abstrata do estado de um sistema. Através da função de onda obtemos a probabilidade de encontrar uma partícula em um determinado espaço e num determinado instante, o que nos permite descrever como o estado quântico de um sistema muda com o tempo. Além da equação de Schrödinger, a mecânica matricial de Heisenberg, descoberta em 1925, também é um modo de fazer previsões na mecânica quântica. Posteriormente, Schrödinger demonstrou que as duas abordagens eram equivalentes (HANLE, 1977).

Uma das conclusões mais importantes da mecânica matricial e dos experimentos da figura 8, está na descoberta que o simples ato de mensurar uma grandeza, afeta o sistema que está sendo observado. Como exemplo disso, podemos fazer uma medição do momento de uma partícula em um sistema, ao fazê-la colidir com um detector. A colisão gera uma diminuição do impulso e conseqüentemente, uma mudança no momento da partícula. As informações na medida podem ser perdidas e para certos casos, não é possível medir duas grandezas físicas simultaneamente com precisão. Existe, a princípio, um limite para o conhecimento absoluto das grandezas de um sistema.

Heisenberg foi o primeiro a declarar essa limitação no conhecimento ao demonstrar o seu princípio da incerteza em 1929. Este princípio nos diz que há um limite na precisão com que podemos medir a posição x e o momento p de uma partícula, de modo que, quanto mais precisa é a medida da posição da partícula, menos precisa se torna a medida do momento da mesma (HILGEOORD; UFFINK, 2016). Qualquer tentativa de mensurar uma das grandezas inevitavelmente perturbará a outra e esta conseqüência não depende da precisão do instrumento

de medida, mas sim de uma regra imutável da realidade microscópica.

2.4.4 O spin relativístico

Apesar de suas objeções iniciais, Pauli formaliza uma teoria não relativística do spin em 1927, utilizando como base ambas as abordagens de Schrödinger e de Heiseberg da mecânica quântica. Em sua teoria, ele introduziu uma função de onda de dois componentes (spinor) que é representada por um conjunto de matrizes 2×2 , conhecidas como de matrizes de Pauli. Enquanto Uhlenbeck e Goudsmit abordaram o spin como fruto de uma rotação clássica, Pauli enfatizou que o spin é uma propriedade intrínseca e não clássica.

A busca por uma relação análoga a equação de Schrödinger e que fosse compatível com os princípios relativísticos motivou o surgimento da equação de Klein-Gordon e a equação de Dirac. Enquanto a relação de Klein Gordon se aplica a partículas sem spin, a equação de Dirac descreve partículas de spin $1/2$, como o elétron. Na equação de Dirac, que se baseia nos princípios gerais da invariância de Lorentz, um spinor de 4 componentes corresponde a função de onda do elétron. Entre os grandes êxitos dessa equação estão a presença do fator $g_e = 2$, que emerge naturalmente e a explicação a estrutura fina do hidrogênio sem a necessidade de correções. Os resultados de Dirac, que figuram entre as mais importantes descobertas da física do século XX, proporcionaram a aceitação ampla e definitiva ao spin do elétron.

3 O SPIN E SUAS APLICAÇÕES

3.1 Ciência, Tecnologia e Sociedade

Ao longo da história, várias sociedades nasceram e evoluíram por meio da influência direta ou indireta da ciência e de suas aplicações. A relação entre a ciência e o progresso tornou-se cada vez mais evidente a partir da chegada da industrialização e da revolução científica no século XVII. Nessa época surge a concepção de ciência, influenciada por pensadores como Isaac Newton e Francis Bacon, que povoa o senso comum até os dias atuais: a crença na ciência como empreendimento autônomo, neutro e objetivo, fundamentado em um código racional, rígido e livre das influências externas dos aspectos sociais e subjetivos (SILVEIRA; BAZZO, 2005).

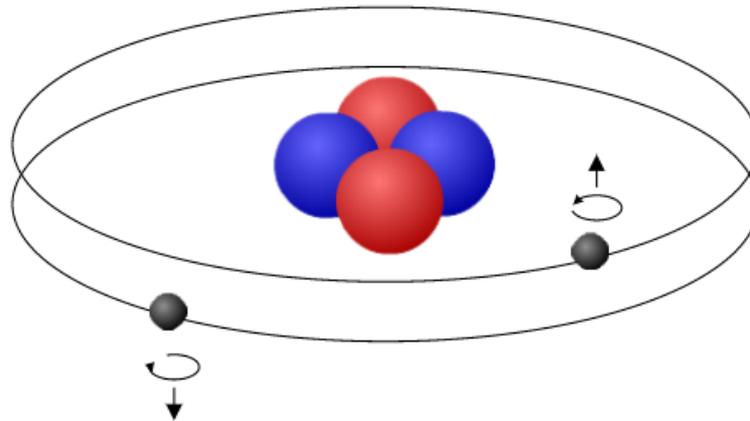
Esse ideal de prática científica passa a ser questionado a partir do século XX, através dos estudos de intelectuais como Karl Mannheim e Thomas Kuhn. Em sua análise da sociologia do conhecimento, Mannheim fundamenta as bases da relação entre o pensamento científico e o meio social no qual a ciência se desenvolve. Na percepção de Kuhn, a análise racionalista da ciência proposta pelo positivismo lógico é insuficiente, sendo necessário apelar para a dimensão social da ciência para explicar a produção, a manutenção e a mudança nas teorias científicas (BAZZO *et al.*, 2003). Nesse contexto, no período pós segunda guerra, surge o movimento CTS, (acrônimo de Ciência, Tecnologia e Sociedade), que propõe-se a analisar as relações entre a ciência e tecnologia como partes constituintes do contexto social e por isso, influenciadas por variáveis como o tempo, o meio e a cultura. No campo educacional as abordagens CTS vem ganhando destaque como um modo de integrar conhecimentos e demonstrar a multiplicidade dos conteúdos voltados as ciências.

O objetivo de tais abordagens é formar cidadãos conscientes do papel da ciência e da tecnologia em suas realidades. Ao tornar os indivíduos letrados cientificamente, eles poderão compreender a tecnologia que os cerca e pensarão criticamente sobre ela, avaliando seus aspectos positivos e negativos. Nesse sentido, esse capítulo dedica-se a apresentar aplicações tecnológicas provenientes do estudo do spin, que transcendem aos domínios da física e da química para oferecer contribuições na medicina, na engenharia e na computação.

3.2 O magnetismo na matéria

O spin do elétron está diretamente ligado ao magnetismo existente em alguns materiais. Apesar de nem todos os elementos possuírem propriedades magnéticas, os elétrons de um átomo produzem um campo magnético na medida que giram e orbitam o núcleo atômico (MCCRAY, 2009). Em qualquer átomo, é comum encontrar elétrons emparelhados, isto é, elétrons que giram e orbitam em direções opostas (conforme a figura 9). A direção do campo magnético é determinada pela direção do spin e da órbita, portanto, para dois elétrons emparelhados as componentes do campo magnético somam zero. A força geral do campo magnético dos átomos que possuem todos os elétrons emparelhados é zero (FAIZAN, 2017).

Figura 9 – Esquema do emparelhamento dos dois elétrons do átomo de hélio. O campo magnético resultante do movimento destes dois elétrons tem direções contrárias e portanto, se anulam.



Fonte: Iowa State University (2021)

Em geral, materiais que possuem todos os elétrons emparelhados em seus átomos (sem momento magnético líquido) são chamados materiais diamagnéticos. Entretanto, existem algumas exceções. Quando os materiais diamagnéticos são colocados no campo magnético de um ímã, eles produzem um pequeno campo magnético oposto ao campo magnético principal. Ambas as extremidades de um ímã em formato de barra repelem um material diamagnético. Esses materiais incluem elementos como o zinco, o ouro e o mercúrio.

Materiais que possuem um ou mais elétrons desemparelhados são pelo menos ligeiramente magnéticos. Os materiais que são levemente atraídos por um ímã são paramagnéticos (alumínio, tântalo, manganês) e os que são atraídos fortemente são ferromagnéticos (ferro, cobalto e níquel). Na presença de um campo magnético externo, os materiais paramagnéticos

são levemente atraídos e seus elétrons são realinhados paralelamente ao campo. As propriedades magnéticas desses elementos não são mantidas quando o campo externo é removido. Em elementos ferromagnéticos, os momentos magnéticos de um grande número de átomos se alinham paralelamente uns aos outros, criando áreas fortes de magnetização no material. Regiões onde os campos magnéticos se alinham e se agrupam são chamadas de domínios magnéticos. Os ímãs, materiais geradores de campo magnético, são ferramentas utilizadas pelas sociedades desde os séculos VII e VIII, quando bússolas magnéticas foram utilizadas em navegações na China e na Península Arábica (SCHMIDL, 1996). A partir da descoberta que cargas elétricas em movimento podem gerar magnetismo em 1820, os eletroímãs passaram a ser aplicados em toda a indústria. Formados a partir de combinações de materiais ferromagnéticos, os ímãs estão presentes em praticamente todos os dispositivos eletrônicos, em motores que compõem equipamentos automotivos, periféricos de computadores, relógios, gravadores e guindastes.

3.3 Spintrônica

A spintrônica, ou eletrônica baseada em spin, é um campo da eletrônica em nanoescala dedicado a detecção e manipulação do spin do elétron na física do estado sólido. Diferente da eletrônica convencional, na qual apenas a carga do elétron é explorada, a spintrônica também leva em consideração o spin, que é explorado como um grau de liberdade adicional. Esse grau extra pode ser utilizado para aumentar a eficiência do armazenamento e transferência de dados em dispositivos eletrônicos, demandando um menor gasto energético (LIU *et al.*, 2020).

A primeira tecnologia proveniente da spintrônica, a magneto-resistência gigante ou GMR, deu a Albert Fert e Peter Grünberg o prêmio Nobel de física de 2007. A GMR explica o funcionamento das válvulas de spin, estruturas formadas por 3 ou mais camadas de espessura nanométrica compostas por materiais magnéticos e não-magnéticos alternando entre si. A magnetização de um material magnético está diretamente ligada a orientação dos spin de seus elétrons. Quando as camadas de material magnético têm a mesma direção e sentido de magnetização, ocorre a diminuição da resistência elétrica do dispositivo, que se torna um melhor condutor elétrico (SAVIGNANO, 2014). Quando as camadas magnéticas tem sentidos opostos de magnetização, ocorre um aumento na resistência. O efeito é esquematizado na figura 10.

Figura 10 – Efeito da GMR nas válvulas de spin. O gráfico em azul demonstra que para uma magnetização antiparalela, a resistência $R_{\uparrow\downarrow}$ aumenta e para a magnetização paralela, a resistência $R_{\uparrow\uparrow}$ diminui.



Fonte: Mishra e Niser (2016). Tradução do autor.

Essas estruturas desempenham um papel fundamental na constituição de sensores que fazem leitura das informações em discos rígidos. Uma das grandes vantagens da spintrônica está na possibilidade de compactação de uma grande quantidade de dados em uma área reduzida, por exemplo, um trilhão de bits em uma área de 1mm^2 em dispositivos de armazenamento de informação. Entre as perspectivas futuras para a área, está a computação quântica baseada em spin e no emalhamento de elétrons em diferentes dispositivos semicondutores. A spintrônica, em geral, mostra-se promissora para a eletrônica digital.

3.4 Ressonância Magnética

Uma das mais importantes aplicações do spin do elétron é a Ressonância Magnética (RM), técnica de imagem médica utilizada para obtenção de imagens dos órgãos e tecidos do corpo. Em 1977 em Nova York, o cientista e médico Raymond Damadian construiu junto a alguns de seus alunos a primeira máquina capaz de escanear o corpo de forma não invasiva, utilizando um ímã supercondutor e uma bobina de fios de antena. Desde então, essa tecnologia percorreu um longo caminho até se tornar um exame utilizado frequentemente por médicos para o diagnóstico de tumores cerebrais, esclerose múltipla, derrames e outras doenças.

O aparelho de RM é geralmente constituído por um longo tubo horizontal que tem em média 60cm de diâmetro, no qual o paciente adentra. A parte mais importante do equipamento é um grande ímã, que produz um campo magnético de $0,5\text{ tesla (T)}$ até 2T (ou de 5000 até 20.000 Gauss), cerca de 40.000 vezes mais forte que o próprio campo magnético produzido pela Terra (BROADHOUSE, 2019). A maioria dos aparelhos de ressonância utilizam um ímã supercondutor, constituído por várias bobinas (fios metálicos enrolados percorridos por uma

corrente elétrica) que criam um campo magnético de até $2T$. A manutenção de um campo tão intenso requer uma grande quantidade de energia, que é obtida através da supercondutividade. Ao resfriar os fios da bobina utilizando hélio líquido a 270°C negativos, a resistência diminui drasticamente e a geração de energia torna-se mais eficiente. No equipamento também existe um conjunto de bobinas que transmitem ondas de radiofrequência para o corpo do paciente e cada bobina se adapta as diferentes partes corporais.

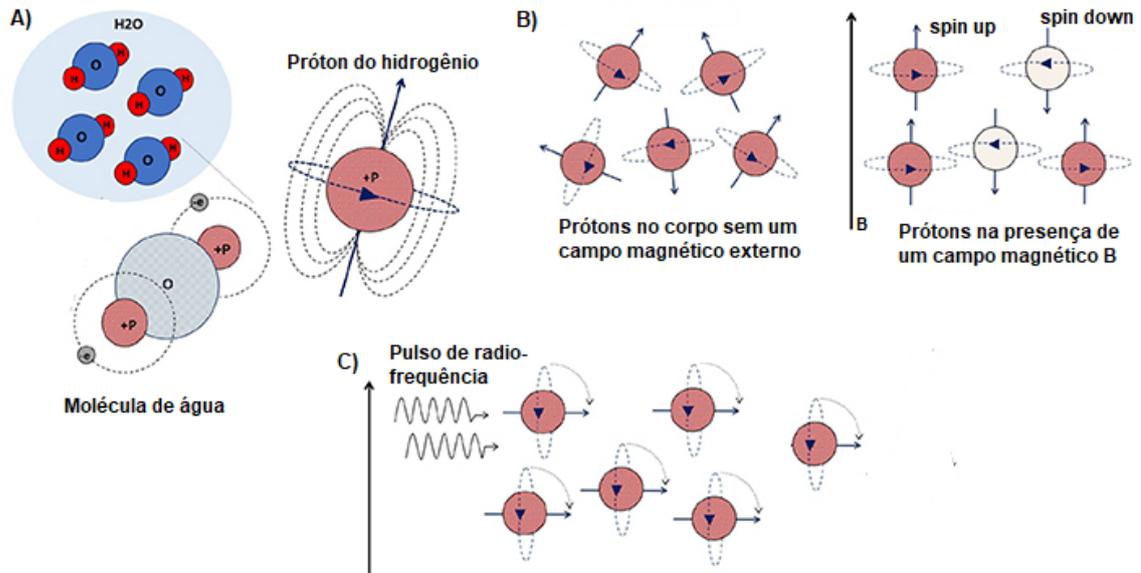
A RM usa campos magnéticos e ondas de rádio para medir a quantidade de água em diferentes tecidos do corpo e, ao mapear a localização da água, essas informações são utilizadas para gerar imagens detalhadas. A precisão destas imagens se deve ao fato do corpo humano ser composto em sua maior parte por água, substância composta por dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio. São os átomos de hidrogênio que tornam a água interessante para a RM, pois através deles os sinais corporais são recebidos. No núcleo de cada átomo de hidrogênio há um próton que se comporta como um ímã e rotaciona em torno de seu próprio eixo, isto é, possuem um spin. Em nosso corpo, os bilhões de prótons nos átomos de hidrogênio têm seus spins orientados em direções aleatórias (GOULD; EDMONDS, 2008).

Os átomos de hidrogênio possuem um forte momento magnético, de modo que, na presença de um campo magnético, os seus spins se alinham na presença deste campo. Na RM, como o campo magnético vai em direção ao centro da máquina, os spins dos prótons se alinham em paralelo ou antiparalelo ao campo, na direção da cabeça ou dos pés do paciente. Cerca de metade dos prótons vão em sentidos opostos e portanto, seus momentos magnéticos se cancelam. Apenas alguns prótons em cada milhão de átomos não são cancelados, e a partir desse pequeno campo magnético resultante as imagens detalhadas são formadas. Na figura 11 temos um esquema do comportamento destes prótons.

Em seguida, a máquina de RM aplica um pulso de radiofrequência específico para o hidrogênio, direcionado para a área do corpo que se pretende examinar. Os prótons não cancelados absorvem a energia desse pulso e mudam de direção novamente. O pulso de rádio frequência os força a girar numa frequência determinada (daí o nome ressonância) e numa direção específica. Essa frequência de ressonância é conhecida como frequência de Larmour e seu cálculo é feito com base no tecido que está sendo examinado e na força do campo magnético principal. Quando o pulso é desligado, os prótons se alinham novamente ao campo e liberam a energia absorvida, que é captada pelas bobinas na forma de uma corrente elétrica. Essa corrente é transformada, pelo computador, através de um cálculo chamado transformada de Fourier em imagens na tela

do computador. Como diferentes partes do corpo emitem quantidades diferentes de energia, diferentes tipos de tecido humano podem ser identificados (BROADHOUSE, 2019).

Figura 11 – O comportamento dos prótons no campo magnético de um aparelho de ressonância. A) Molécula de água e o spin do próton de hidrogênio. B) Alinhamento do spin em um campo magnético. C) Mudança na direção do spin após a emissão de um pulso de radiofrequência.



Fonte: Broadhouse (2019). Tradução do autor.

3.5 Ressonância de Spin Eletrônica

A Ressonância de Spin Eletrônica (RSE) ou Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE) é um método da espectroscopia utilizado na detecção e análise das características de elétrons desemparelhados numa substância. Neste método, a absorção da energia de micro-ondas por átomos em um campo magnético externo permite a análise de substâncias como radicais livres, íons de metais de transição, moléculas orgânicas e outros materiais que apresentam propriedades paramagnéticas. Essa técnica é análoga a utilizada na RM, porém, leva-se em consideração a excitação nos spins dos elétrons em vez dos spins do núcleo atômico. A RSE é utilizada com menos frequência se comparada a RM porque a maioria das moléculas apresenta uma configuração eletrônica de valência completa, isto é, sem a presença de elétrons desemparelhados (ZAVOISKY, 1945).

Seu princípio de funcionamento se baseia no spin do elétron e seu momento magnético associado. Quando o elétron é colocado na presença de um campo magnético B_0 , os

dois possíveis estados de spin $\pm 1/2$ têm valores de energia diferentes, sendo essa discrepância causada pelo efeito Zeeman. O momento magnético do elétron pode se alinhar antiparalelo ao campo ($m_S = +1/2$) ou paralelo ao mesmo ($m_S = -1/2$). A diferença entre os estados de energia é definida por:

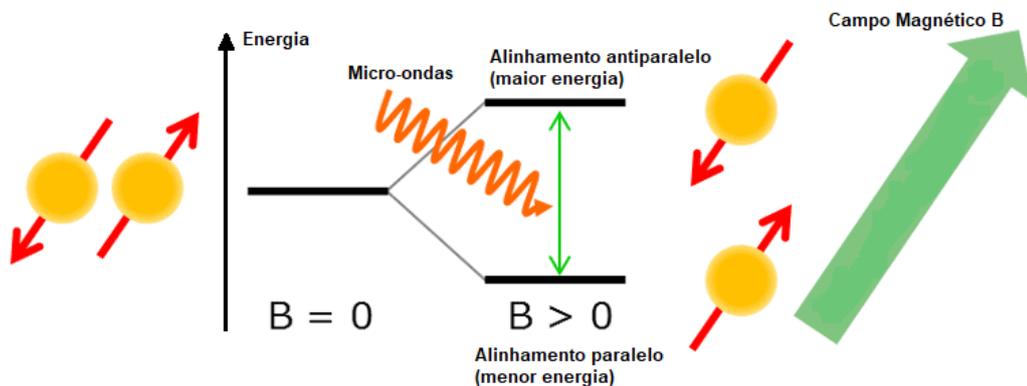
$$\Delta E = m_S g_e \mu_B B_0 \quad (3.1)$$

Onde g_e é o fator g de Landé e μ_B é o magneton de Bohr. O elétron desemparelhado pode mudar de estado de energia ao absorver ou emitir um fóton de energia $E = h\nu$. Essa relação nos leva a equação fundamental da espectroscopia RSE:

$$h\nu = m_S g_e \mu_B B_0 \quad (3.2)$$

As medições na RSE são geralmente feitas explorando a relação entre a frequência e o campo magnético. Mantendo-se a frequência fixa, o campo magnético aumenta e conseqüentemente a diferença de energia ΔE também se amplia, até que ela se torne equivalente a energia da radiação de micro-ondas. A energia absorvida é monitorada e convertida em um espectro cujas propriedades são analisadas (CHECHIK *et al.*, 2016). Um esquema da técnica é representado na figura 12. As aplicações da RSE se estendem por diversas áreas. Na paleontologia e na

Figura 12 – Diagrama da energia do spin do elétron na presença de um campo magnético. A separação nas linhas da energia pode ser investigada aplicando um sinal de micro-ondas ressonante.



Fonte: Toida *et al.* (2019). Tradução do autor.

arqueologia, suas técnicas são utilizadas para a datação de fósseis e objetos. Na indústria alimentícia, a radiação ionizante (raios gama) tem sido estudada como método de conservar

comida sem o uso de produtos químicos. Nesse contexto, a RSE é utilizada para detectar e monitorar a quantidade de radiação recebida por produtos orgânicos, visando garantir que estes sejam próprios para consumo humano (LEAL *et al.*, 2004). Nas pesquisas médicas, a RSE é a ferramenta mais utilizada para o estudo dos radicais livres, átomos com elétrons desemparelhados na última camada eletrônica que são instáveis e tem alto poder reativo. Dentro do metabolismo, esses radicais podem causar doenças degenerativas de envelhecimento e morte celular. As imagens espectrais dessas espécies permitem entender qual é o papel desempenhado por esses radicais em várias doenças. Além disso, a RSE também pode ser utilizada para diagnóstico de cânceres (KLARE, 2012).

3.6 Ímãs de metais de terras-raras

Ímãs de terras raras são um tipo de ímã permanente que produzem campos magnéticos mais fortes que ímãs mais comuns de ferrita ou de ligas de alnico (alumínio, níquel e cobre). Desenvolvidos entre as décadas de 1970 e 1980 nos Estados Unidos, estes ímãs existem em dois tipos: os ímãs de Samário e Cobalto e os de Neodímio.

Os elementos de terras raras, que correspondem a série dos lantanídeos na tabela periódica, são metais ferromagnéticos, isto é, assim como o ferro, podem ser magnetizados para tornarem-se ímãs permanentes. As propriedades magnéticas nos materiais está associada a temperatura de Currie, uma temperatura na qual os materiais perdem suas características magnéticas. Os lantanídeos em geral possuem uma temperatura de Currie abaixo da temperatura ambiente, e portanto, o magnetismo neles só aparece em baixas temperaturas. Quando estes metais são combinados a metais de transição, como o ferro, níquel e o cobalto, são gerados compostos com temperaturas de Currie elevadas, magnetos permanentes e resistentes a altas temperatura. Essa combinação dá origem aos ímãs de terras raras.

A força do campo magnético presente nesse tipo de ímã está ligada a distribuição eletrônica e ao spin do elétron. Nos metais lantanídeos, os últimos elétrons estão localizados nas camadas $4f$, que comportam até 14 elétrons. Seguindo a ordem de preenchimento dessas camadas (regra de Hund), podem haver até sete elétrons desemparelhados. Este número alto de elétrons desemparelhados gera um elevado momento magnético, que por sua vez, explica a geração de um forte campo magnético (BELAÇON, 2018).

Entre as múltiplas aplicações dos ímãs de terras raras temos os motores de tração presentes em veículos, motores lineares presentes em trens de levitação magnética, unidades de

disco rígido de computadores, alto-falantes e scanners de ressonância magnética. No cenário atual de busca por energias limpas, uma aplicação em destaque das terras raras está no seu uso em turbinas de geradores eólicos. A importância deste tipo de ímã no contexto industrial já o tornam objeto de conflito comercial e econômico entre nações como os Estados Unidos, Japão, Alemanha e a China (que atualmente detém o monopólio da exploração destes metais). (CHU, 2011)

As aplicações mencionadas neste capítulo auxiliam a compreender os desdobramentos de uma teoria científica na tecnologia e na sociedade, além de explorar as articulações entre ciências distintas. O estudo de um tema aparentemente muito específico como o spin pode ser encorajado e facilitado a partir da noção da importância do mesmo dentro de um contexto social.

4 ABORDAGEM METODOLÓGICA

4.1 Referencial teórico

Na concepção de (LAKATOS; MARCONI, 1991), a pesquisa científica pode ser entendida como um procedimento reflexivo sistemático, controlado e crítico que permite a descoberta de fatos, relações ou leis em qualquer área do conhecimento. Antes de qualquer pesquisa científica, é necessária a escolha de um método, que organiza e delinea os caminhos a serem percorridos pelo cientista. Neste trabalho, optou-se por um método misto entre a pesquisa qualitativa e a bibliográfica. De acordo com (NEVES, 1996) a pesquisa qualitativa refere-se a intenção de dados descritivos através do contato e da interação entre o pesquisador e o seu objeto de estudo. O pesquisador busca entender os fenômenos segundo a perspectiva dos participantes da situação que está sendo estudada, e partindo disso, ele constrói a sua própria interpretação do fenômeno. A pesquisa bibliográfica, de acordo com (MANZATO; SANTOS, 2012) procura explicar um determinado problema a partir de referências teóricas publicadas em documentos. Essa pesquisa busca fazer um levantamento e uma análise crítica acerca das obras publicadas (como livros, revistas, teses, artigos) sobre um tema específico, com o intuito de ampliar os conhecimentos sobre o assunto ou abordá-lo sob um novo enfoque.

O método qualitativo se deu a partir de entrevistas realizadas com professores de química das escolas públicas de ensino médio na cidade de Fortaleza - CE. Os questionamentos presentes na entrevista buscaram investigar as concepções dos docentes acerca do ensino do spin e as estratégias utilizadas por eles na abordagem do tema, além de objetivar conhecer as percepções dos mesmos sobre as práticas interdisciplinares. Já o método bibliográfico foi utilizado para a análise dos Livro Didático (LD) de química para o ensino médio indicados pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) de 2018, com o objetivo de investigar como tais obras caracterizam e apresentam o spin do elétron.

De acordo com (GOMES; PIETROCOLA, 2011) e (BELAÇON, 2018), o spin do elétron é uma propriedade não intuitiva da matéria que os estudantes não conseguem definir ou compreender propriamente. Com isso em mente, ao unir estas duas metodologias de pesquisas distintas objetivamos estabelecer um panorama geral do contexto da sala de aula, para entender porque o spin das partículas, décadas após o desenvolvimento de sua teoria, permanece como um conceito mal compreendido.

4.2 Análise das Concepções de Professores

A entrevista destinou-se especificamente aos professores de Química, tendo em vista que o spin no contexto de ensino médio é ensinado dentro do domínio desta disciplina. No total, cinco docentes de diferentes escolas de ensino médio públicas foram entrevistados, a partir de um questionário elaborado através da ferramenta digital de formulários *Google Forms*. As perguntas presentes no questionário (apêndice A) são, em sua maioria abertas, para que estimular os entrevistados a se expressarem livremente sobre o assunto em questão.

Para que não haja identificação pessoal, os 5 professores consultados serão identificados por P1, P2, P3, P4 e P5, conforme a tabela 1.

Tabela 1 – Formação acadêmica e escola onde lecionam os entrevistados.

Identificação	Instituição	Formação Acadêmica
P1	EEFM Professora Adalgisa Bonfim Soares	Graduado
P2	EEMTI Antônio Bezerra	Doutorado
P3	EEMTI Visconde do Rio Branco	Mestrado
P4	EEMTI General Eudoro Correa	Mestrado
P5	EEM Dona Júlia Alves Pessoa	Graduado

No começo do questionário, é perguntado aos professores se o conceito de spin do elétron é abordado em suas aulas no ensino médio. Todos os entrevistados responderam que o tema é ao menos citado por eles em sala de aula. Discutiremos agora as cinco respostas da primeira questão discursiva, começando por P1.

1. Em suas aulas, como você apresenta o spin do elétron aos seus alunos? No seu ponto de vista, quais são as principais dificuldades no ensino deste tópico?

P1: A complexidade e a abstração que envolvem o conceito de spin tornam o seu ensino bastante desafiador. Para ilustrar essa propriedade, eu recorro a representação do elétron girando ao redor de si mesmo, uma comparação que foi disseminada inclusive durante a minha própria formação universitária mas que, conforme sabemos, é ultrapassada. A grande questão é, como fornecer uma imagem precisa e coerente do que é o spin para os estudantes que não estão familiarizados com conceitos importantes da Mecânica Quântica?

Sob o viés da teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, a aquisição de novos conhecimentos por um indivíduo depende da existência de ideias prévias, chamadas de subsunçores ou ideias-âncora. Desse modo, as analogias e comparações desempenham um papel fundamental na assimilação e transmissão dos conteúdos, considerando que aprendemos novas informações em termos daquilo que nos já conhecemos (PELIZZARI *et al.*, 2002). Nesse sentido,

temos a analogia que foi mencionada por P1. O spin do elétron é uma propriedade quântica intrínseca aos átomos, para a qual não há um comparativo clássico satisfatório. Como forma de visualizar essa propriedade abstrata, os professores recorrem a comparação com modelo clássico de elétron como esfera maciça girando ao redor de seu eixo, uma imagem que apesar de fornecer uma ilustração do que seria o spin, induz a uma interpretação do elétron que não contempla noções quânticas como o princípio da dualidade onda-partícula.

Na perspectiva de P1, uma contextualização mais completa sobre o spin, que supere o uso de analogias que não refletem o real em sua totalidade, está atrelada ao ensino da Mecânica Quântica. A inclusão da área no ensino médio, que tem sido objeto de estudo de pesquisadores há duas décadas, é recomendada pelos PCN+, que evidenciam a importância do ensino das interpretações quânticas para fornecer aos alunos um conhecimento atualizado da Química e da Física (BRASIL, 2002). Todavia, conforme aponta (BIAZUS; ROSA, 2016), há uma série de obstáculos que dificultam a inserção da teoria quântica no nível médio. Entre elas, as autoras apontam a formação ineficiente dos professores, que optam por distanciar-se destes conteúdos, o volume excessivo do currículo escolar que dificulta a adição de novos tópicos e a necessidade de novas metodologias que façam a transição do pensamento de uma física clássica, visível e quantificável para uma física abstrata e probabilística.

A segunda resposta é dada por P2:

P2: Apesar da sua importância na tecnologia atual, a propriedade do spin é deixada de lado em sala de aula, inclusive pelos próprios livros didáticos, que introduzem muito superficialmente o conceito ou muitas vezes nem o mencionam. Em minhas aulas, após o estudo dos modelos atômicos (especialmente a teoria de Bohr), os números quânticos são introduzidos e os alunos memorizam as regras que estes números obedecem, como o princípio da exclusão de Pauli e a regra de Hund. A maior dificuldade está em fazê-los compreender o significado e a utilidade do spin e de outros números quânticos, e torná-los capazes de estabelecerem associações entre essas propriedades e os fenômenos estudados.

A fala de P2 menciona uma ordem nos conteúdos ensinados, que parte dos modelos atômicos e chega nos números quânticos. Resultados diretos do desenvolvimento da Mecânica Quântica, esses números são abordados na química para o estudo da tabela periódica e da estrutura eletrônica dos átomos. Todavia, a forma como são ensinados, de acordo com (CASTRO, 2015) transmite a ideia de que tais números são apenas quantidades que identificam camadas, subníveis energéticos e a localização dos elétrons nos átomos, sem que as conexões dos mesmos com os fenômenos quânticos que lhe dão origem sejam explicitadas. A dificuldade do estudante em compreender a importância dos números quânticos pode residir no foco exclusivo em enunciados matemáticos, em detrimento de uma abordagem que conecte os conteúdos com fenômenos da

realidade. O enunciado da regra de Hund citada por P2, que determina a ordem de preenchimento dos orbitais pelos elétrons no átomo é memorizado pelos alunos, mas não é explicitado para os mesmos que esse princípio e o spin do elétron são fundamentais para o magnetismo presente nos metais. Também é ensinado, a partir do modelo de Bohr, que os elétrons no átomo podem transitar entre as camadas ao absorver ou perder energia, mas esse fato não é relacionado, por exemplo, a emissão luminosa que ocorre nos fogos de artifício.

No ponto de vista de P3:

P3: Quando leciono acerca da estrutura atômica, o spin é citado e contextualizado dentro dos números quânticos e do princípio da exclusão de Pauli, representado como a propriedade de um elétron que pode assumir dois valores distintos. Não me detenho a uma abordagem mais complexa, pois adentraria nos conceitos relativos a Mecânica Quântica, que não são contemplados pelo conteúdo programático da escola. Além disso, percebo nos alunos uma série de lacunas nos conhecimentos de Física e Matemática, que dificultam uma discussão mais aprofundada sobre o tema.

P3 aponta a mesma dificuldade relatada por P1, acerca dos problemas no ensino da Mecânica Quântica. Contudo, a fala de P3 menciona um aspecto que não foi mencionado pelos outros entrevistados: a necessidade de uma estratégia didática que contemple não apenas a Química, mas que estabeleça ligações com outros conhecimentos. A abordagem dos conteúdos da Física como a rotação, o momento angular e o momento magnético são imprescindíveis para a própria definição do que é spin. A matemática, por sua vez, tem sua inserção limitada, já que o formalismo matemático do spin está além dos conteúdos vistos no nível médio.

Finalizando as respostas do primeiro questionamento, temos os relatos de P4 e P5:

P4: Durante minhas aulas o spin é apresentado a caráter de informação, eu evito adentrar em aspectos mais técnicos relacionados a ele. Se os alunos não possuem uma base de conhecimentos necessárias, esse conceito irá parecer difícil de assimilar e distante da realidade.

P5: Acredito, pela minha própria experiência, que esse conceito não seja bem compreendido até mesmo nos cursos de graduação de física ou química. Ensiná-lo para o nível médio é desafiador porque é difícil encontrar comparações que facilitem o entendimento dessa propriedade.

P4, assim como P3, afirma debater apenas superficialmente o tema em sala de aula, motivado pela ausência de subsunçores essenciais nos conhecimentos de seus alunos. Já para P5, a própria complexidade do assunto é o entrave para uma discussão mais completa. Também é mencionado por P5 a persistência das dificuldades na aprendizagem do conceito nos cursos de graduação. No contexto de formação universitária é pertinente analisar o artigo de (GOMES; PERES, 37., 2017), no qual se discute a presença da disciplina de Química Quântica no currículo de cursos de licenciatura em Química. Essa disciplina é ofertada em graduações

como optativa, e a justificativa para essa não obrigatoriedade reside na complexidade de seus conteúdos, que requerem uma ampla gama de conhecimentos prévios e o uso de ferramentas como a álgebra linear e o cálculo diferencial e integral. A Química Quântica, campo de estudo que utiliza métodos da Mecânica Quântica no tratamento de problemas da Química, descreve o comportamento da matéria na escala molecular, permitindo a descrição de uma infinidade de sistemas químicos. Dito isso, é evidente a importância da disciplina para o professor em formação que ensinará conceitos e fenômenos ligados a teoria atômica. Neste sentido (GRECA; MOREIRA, 2001) ressaltam que:

Os estudantes dificilmente aprimoram seus estudos sobre tópicos de Mecânica Quântica depois de terminar o curso de graduação (licenciatura), consideramos indispensável uma reorganização das disciplinas destinadas para o ensino da mesma dos cursos de licenciatura, de modo a permitir uma maior reflexão conceitual.

A falta desse componente curricular e de outros semelhantes suprime o acesso a conhecimentos importantes que contribuirão para a formação acadêmica dos futuros professores. Esse fator pode estar associado as dificuldades manifestadas pelos professores na abordagem de assuntos como o spin e outras propriedades quânticas. Garantir uma formação acadêmica mais completa, é portanto, imprescindível para que melhores estratégias de ensino sejam adotadas.

O segundo questionamento da entrevista traz as seguintes perguntas:

2. Em sua concepção, o spin e outras temáticas semelhantes concernentes a Física e a Química podem ser melhor ensinadas e compreendidas dentro de uma perspectiva interdisciplinar? Em seu cotidiano na docência, quais condições são necessárias para que uma proposta interdisciplinar seja aplicada com eficiência?

Para essas perguntas, serão discutidas as três respostas que mais contribuíram para a discussão do assunto, que serão citadas a seguir começando por P3:

P3: Acerca do spin, a interdisciplinaridade é indispensável para um ensino mais completo. A cooperação entre a Química e a Física, que por vezes passa despercebida pelos alunos em vários conteúdos, não pode deixar de ser apresentada nesse tema. Uma proposta de ensino interdisciplinar pode ser aplicada, se os professores de química e física de uma instituição se reunirem para discutir como ministrar uma aula que contemple aspectos físicos, químicos e tecnológicos do spin, por exemplo.

Assim como P3, todos os entrevistados mostraram familiaridade com a metodologia disciplinar e afirmam que ela pode ser uma estratégia para otimizar o processo de ensino-aprendizagem do spin do elétron. Em sua fala, P3 alude a falta de percepção dos estudantes para compreender as ligações entre a Física e a Química. Quando o aluno compreende que um conteúdo visto na aula de Química pertence única e exclusivamente a essa disciplina, ele está adquirindo uma visão

incompleta da realidade. Na natureza as duas ciências não se encontram dissociadas, elas são apenas aspectos distintos de um mesmo objeto.

Para os mesmos questionamentos, P2 responde:

P2: A interdisciplinaridade é uma importante ferramenta de ensino, que promove conexões entre as várias ciências. Procuo trazer esse método para minhas aulas de química e percebo que os alunos em geral reagem positivamente. No caso do spin, acredito que uma abordagem interdisciplinar seja particularmente viável e que ela facilitaria o aprendizado. Ao meu ver, a aplicação das práticas interdisciplinares depende da postura do docente. Essas práticas requerem do professor o esforço contínuo de estar sempre se atualizando dentro dos conteúdos de sua disciplina e também fora dela. Tem professores que são resistentes em aderir novas metodologias de ensino e isso acaba retardando a presença da interdisciplinaridade nas escolas.

P2 reporta a relutância de docentes em trazer a metodologia interdisciplinar para o ambiente escolar, um problema que ocorre por razões diversas. Na perspectiva de (FEISTEL; MAESTRELLI, 2012), os documentos oficiais exigem dos professores o desenvolvimento de um ensino contextualizado e integrador, sem considerar que a formação dos mesmos não foi feita sob uma perspectiva interdisciplinar. Esse ponto de vista remete a concepção de (BELAÇON, 2018) que afirma existir uma tendência nos professores de ensinar da forma como eles foram ensinados. Essas discussões evidenciam a necessidade de debater a interdisciplinaridade primordialmente nos cursos de formação dos professores.

Outra razão para a relutância são as incompreensões acerca do próprio conceito de interdisciplinaridade. Conforme aponta (BERTI, 2007), com os avanços da pesquisa em interdisciplinaridade no Brasil, surgiram concepções equivocadas que pressupunham extinguir as disciplinas com o intuito de alcançar a integração dos saberes. Por sua vez, a formação de três grandes áreas do conhecimento propostas pelos PCN disseminou uma ideia errônea de que o professor deveria ser formado por área do conhecimento, devendo por tanto, ter o domínio do conteúdo de várias disciplinas. Essas ideias induzem a equívocos, pois a interdisciplinaridade não objetiva privar o professor dos seus conhecimentos específicos e da visão de sua área, mas sim permitir que ele adquira visões distintas e mesmo com algumas dificuldades, busque percepções mais integradas.

Por fim, temos a resposta de P4:

P4: Acredito na importância das propostas interdisciplinares e que elas podem trazer bons resultados, principalmente quando se trabalha em disciplinas afins, como a Física e a Química. Não acredito, contudo, que é coerente esperar de um único professor a aptidão para ensinar todos os múltiplos aspectos de um assunto. Duas condições necessárias para desenvolver um ensino interdisciplinar são o tempo e o planejamento. Convivi com vários colegas de profissão

que lecionavam em mais de uma escola, e alguns destes ainda conciliavam o trabalho com a pós graduação. Fatores como esse tornam difícil superar o método disciplinar tradicional de ensino.

As falas de P2 e P4 apresentam concepções divergentes. P2 atribui a responsabilidade de uma abordagem interdisciplinar principalmente ao professor, no sentido individual. A partir de um novo pensar e agir de cada professor, a interdisciplinaridade pode se estabelecer efetivamente nas escolas. Já na concepção de P3 e P4, essa responsabilidade pertence ao coletivo docente da escola, sendo necessários dois ou mais professores para articular os conhecimentos que serão repassados. P4 evoca em sua fala uma noção distorcida de interdisciplinaridade, representada pela figura do professor superespecializado. Seu relato também traz um aspecto crucial para a realização da interdisciplinaridade: as condições de trabalho do professor. Quando submetido a uma carga horária de trabalho elevada em uma ou mais instituições o professor não consegue planejar e estruturar um método de ensino mais complexo e abrangente.

Para concluir a entrevista, os professores foram questionados sobre os livros didáticos de suas instituições:

3. Os livros didáticos utilizados pela escola onde você leciona, discutem e ilustram satisfatoriamente o spin?

Essa questão foi colocada como objetiva. De todas as cinco respostas, apenas P5 afirmou considerar que o livro didático cobre satisfatoriamente o spin e conteúdos relacionados. Essas respostas motivaram a realização de uma pesquisa bibliográfica sobre os livros de Química escolhidos para o ensino médio nas escolas públicas, que será desenvolvida na seção seguinte.

4.3 Análise de livros didáticos

O livro didático, um dos principais instrumentos do ensino, se fez presente em praticamente todo o desenvolvimento escolar brasileiro, desde o fim do século XIX. Além de facilitar o processo de aprendizagem do aluno, o livro representa um guia ou norteador para o professor, na medida em que define caminho e sequência para o aprendizado. Com a implantação do PNLD em 1985, os livros têm sido distribuídos aos estudantes da rede pública no decorrer de todas as séries do ensino fundamental e médio, sob a responsabilidade do Governo Federal.

Embora atualmente existam novos recursos tecnológicos disponíveis, os livros impressos ainda são o material mais usado e acessível aos estudantes. Para selecionar quais livros didáticos serão repassados às escolas, o PNLD determina um quadro de especialistas para avaliar,

por meio de critérios que vão desde os aspectos técnicos até os pedagógicos, obras de diferentes editoras. O resultado da avaliação estabelece um guia que orienta as escolas sobre as obras selecionadas. Dito isso, analisaremos as coleções didáticas de Química indicados pelo PNLD de 2018, para observar como tais livros abordam tópicos referentes ao spin.

Tabela 2 – Livros de química para o ensino médio indicados pelo PNLD em 2018.

Livro didático	Nome	Autor	Editadora
1.	Ser Protagonista: Química	Júlio Cezar Foschini Lisboa Aline Thaís Bruni Ana Luiza Petillo Nery Rodrigo Marchiori Liegel Vera Lúcia Mitiko Aoki	SM
2.	Química Cidadã	Wildson Luiz P. dos Santos Gerson de Souza Mói Siland Meiry França Dib Roseli Takako Matsunaga Sandra Maria de Oliveira S. Eliane Nilvana F. de Castro Gentil de Souza Silva Salvia Barbosa Farias	AJS
3.	Química - Ciscato, Pereira, Chemello, Proti	Carlos Alberto Mattoso Ciscato Luis Fernando Pereira Emiliano Chemello Patricia Barrientos Proti	Moderna
4.	Química	Eduardo Fleury Mortimer Andréa Horta Machado	Scipione
5.	Vivá - Química	Vera Lúcia Duarte de Novais Murilo Tissoni Antunes	Positivo

As coleções analisadas na tabela 2 dividem-se em 3 volumes, para as 3 séries do ensino médio e seguem uma divisão, em geral, parecida: o primeiro livro contempla a química geral e inorgânica, o segundo volume os conteúdos referentes a físico-química e o terceiro engloba tópicos de química orgânica. Para a análise, foi levado em consideração as recomendações dos PCNEM, especificamente na seção ciências da natureza e matemática. Na seção referente à Química, são propostos 9 temáticas estruturadoras, dentre as quais temos o tema: *modelos quânticos e propriedades químicas*. Para o ensino do tema o documento sugere a articulação entre a Física, no estudo das interações das matérias e radiações, com a Química para compreender como a interpretação quântica dos átomos afeta as ligações químicas e as propriedades dos diversos elementos (BRASIL, 2000).

O livro didático 1 da tabela 2 apresenta os modelos atômicos e suas evoluções, desde

o atomismo grego, passando pelos modelos de Dalton, Thomson e Rutherford até a teoria de Bohr, apresentando os postulados da Mecânica Quântica velha e as propriedades atômicas dos elementos da tabela periódica. Conceitos de Mecânica Quântica moderna não são citados ao longo dos 3 volumes da coleção e o spin do elétron não é mencionado.

O livro didático 2, a história e desenvolvimento dos modelos atômicos é abordada no primeiro volume da coleção, e no terceiro, o modelo quântico do átomo é introduzido em um capítulo, no qual são apresentadas as contribuições de Einstein, Planck e os princípios da dualidade onda-partícula e da incerteza. Os conceitos ligados a equação de Schrödinger, como a função de onda Ψ e os orbitais atômicos são explanados e o spin é inserido no capítulo do seguinte modo:

A grande contribuição de Dirac foi conceber o que se pode chamar de movimento de rotação em torno do eixo do elétron, descrito pela nova Física como spin, obtido como uma solução do conjunto de equações que ele desenvolveu.

O princípio da exclusão de Pauli é apresentado e o número quântico de spin é relacionado aos conceitos de momento angular e magnético. É explicada a influência do campo magnético na direção do spin e a aplicação do spin no magnetismo na matéria é demonstrada pelo exemplo do átomo de hélio:

No átomo de Hélio (He_2), se os dois elétrons no orbital $1s$ tivessem spins iguais ou paralelos ($\uparrow\uparrow$ ou $\downarrow\downarrow$), os seus campos magnéticos reforçar-se-iam entre si, tornando o átomo de hélio paramagnético. Substâncias com essas características são capazes de serem atraídas por um ímã. Por outro lado, se os spins estão dispostos de forma antiparalela ($\uparrow\downarrow$ ou $\downarrow\uparrow$), os efeitos magnéticos tornam-se nulos e o átomo passa a ter uma característica diamagnética. Substâncias que têm essa característica, como é o caso do hélio, são repelidas por ímãs.

Após introduzir os tópicos mencionados, o capítulo aborda a configuração eletrônica, o diagrama de Linus Pauling e a tabela periódica, conceitos discutidos e fundamentados pelo viés da Mecânica Quântica.

O livro didático 3 apresenta o estudo da estrutura atômica através de sua criação e desenvolvimento, explorando até o modelo de Bohr e seus postulados, numa seção na qual apenas o primeiro número quântico do elétron é mencionado. O átomo na Mecânica Quântica não é apresentado e o spin do elétron não é citado. A abordagem do livro tem enfoque nas propriedades químicas e físicas dos elementos da tabela periódica utilizados no cotidiano, explorando suas aplicações na medicina, na indústria e na eletrônica.

No 4º livro didático da tabela, o padrão da introdução aos modelos atômicos é seguido, todavia, com uma contextualização mais ampla da teoria de Bohr, que é utilizada em conjunto com o conceito físico da eletricidade (lei de Coulomb) para explicar propriedades

periódicas como a energia de ionização e o raio atômico dos elementos químicos. O modelo de átomo atual é apresentado através das contribuições de De Broglie, Heisenberg, Max Born, Schrödinger, Pauli e Dirac, para introduzir o estudo da organização da tabela periódica moderna. O spin é apresentado através dos números quânticos e do princípio da exclusão de Pauli:

O spin do elétron muitas vezes é interpretado como o sentido da rotação do elétron em torno de seu eixo, o que não é muito adequado, pois implica assumir que o elétron é apenas uma partícula. Esse modelo implica a concepção do elétron como onda. Dois elétrons num mesmo nível, subnível e orbital necessariamente têm spins opostos, o que está relacionado ao Princípio de Exclusão de Pauli, que estabelece que dois elétrons num mesmo átomo não podem ter os quatro números quânticos idênticos.

Por fim, o livro didático 5 também traz a evolução das teorias atômicas e inclui um capítulo dedicado ao estudo da radioatividade. No contexto dos modelos de Bohr e Rutherford, a origem da mecânica quântica é apresentada em um breve parágrafo. O spin do elétron não é mencionado nos livros desta coleção.

4.4 Conclusões

As respostas presentes na entrevista mostram o spin como um tópico pouco discutido em sala de aula. A dificuldade relatada pelos professores em dar significado a essa propriedade restringe a discussão do assunto à superficialidade e a mera exposição de conteúdos. Os problemas na compreensão estão ligados ao descompasso entre o ensino da Química e da Física. Enquanto os alunos vêem o spin e outros números quânticos na Química, a abordagem física dos conteúdos de Mecânica Quântica é incipiente e por vezes ausente nos currículos escolares. Mesmo conceitos clássicos e fundamentais da Física, como momento angular e o magnetismo não são mencionados. Como resultado disso, a ideia de spin soa confusa, sem contexto e sem significado evidente para os alunos.

Autores como (Castro, 2015) discutem a retirada dos números quânticos do currículo do ensino médio, sob a justificativa de que a formação básica dos professores não os dá condições de desenvolver um ensino que aborde apropriadamente esses temas. Contudo, remover esses conteúdos do nível médio é privar os estudantes de conhecimentos importantes não apenas para o aprendizado de Física e Química, mas para a própria compreensão da realidade dos mesmos. Como alternativa a essa subtração de conteúdos das grades curriculares podem ser utilizadas estratégias didáticas interdisciplinares, para trazer um ensino mais coerente e contextualizado.

Nesse sentido, os professores entrevistados mostram-se conscientes e com visões positivas acerca das práticas interdisciplinares, porém, sem a perspectiva ingênua de idealização

das mesmas. Os docentes expõem as dificuldades presentes na adoção do método interdisciplinar, entre as quais figura a extensa carga horária de trabalho de alguns docentes. Esse fator torna inviável que o professor, sozinho, realize um ensino integrador. Desse modo, a interdisciplinaridade é responsabilidade de todo o corpo docente, devendo ser trabalhada por todos e não apenas pelo professor individualmente.

Na pesquisa bibliográfica, observamos que, das cinco coleções indicadas pelo PNLD 2018, em três delas não há menção ao spin do elétron em seus conteúdos. Nas duas coleções restantes, o spin é introduzido após uma contextualização dos princípios da Mecânica Quântica. Todavia, apenas uma delas se detém a trazer aplicações do spin, relacionando-o ao magnetismo dos materiais. Embora seja discutida toda a relevância do spin no contexto científico e tecnológico atual, as obras didáticas tendem a abordar cada vez menos esse e outros tópicos semelhantes (CASTRO, 2015), uma tendência que vai na contramão de um ensino de ciências atualizado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No contexto das ciências naturais, a Física e a Química tratam de alguns conceitos abstratos, que parecem alheios a realidade palpável. Conteúdos como estes requerem estratégias de ensino diferenciadas, que auxiliem na compreensão de temas que não são intuitivos aos alunos. A interdisciplinaridade, uma das estratégias possíveis, é um conceito importante que ganhou espaço no cenário educacional brasileiro nas últimas duas décadas. Nessa perspectiva, o trabalho trouxe o spin do elétron como um tópico relevante em vários aspectos (físico, químico, tecnológico e social) e que carrega em si a ideia de interdisciplinaridade, ao estabelecer conexões indissociáveis entre os conhecimentos da Física e da Química.

Após apresentar todo o desenvolvimento histórico do spin e as suas aplicações na sociedade, buscamos entender como esse conceito se desenvolve em sala de aula, através de duas perspectivas importantes: as percepções dos docentes e o viés dos livros didáticos. Através da entrevista, pudemos entender as dificuldades no ensino do tema, e avaliar quais são os empecilhos a realização das práticas interdisciplinares. Dada a realidade do professor, suas condições de trabalho e formação, compreendemos que o método interdisciplinar pode ter êxito se emergir de uma prática coletiva. Acerca da pesquisa bibliográfica, os livros pesquisados, em geral, não auxiliam o professor a formular um ensino satisfatório. Quando os materiais didáticos não mencionam o spin em seus conteúdos, eles contribuem para que o tópico continue sendo pouco discutido e acabam por fomentar as incompreensões relacionadas ao mesmo. Por conseguinte, se objetivamos um ensino contextualizado e esclarecedor do spin e temas relacionados, uma das etapas fundamentais para tal consiste na reformulação dos livros didáticos.

REFERÊNCIAS

- ANDERY, M. A. *et al.* **Para Compreender a Ciência: uma perspectiva histórica.** Rio de Janeiro: Garland, 2012.
- BAZZO, W. A.; LINSINGEN, I. V.; PEREIRA, L. T. V. **Introdução aos estudos CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade).** Mari, Espanha: Organização dos Estados Ibero-americanos, 2003.
- BELAÇON, M. P. O ensino do spin: uma abordagem integrada a tecnologia e a sociedade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 1, 2018.
- BERTI, V. P. **Interdisciplinaridade: um conceito polissêmico.** 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Instituto de Química: Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- BIAZUS, M. de O.; ROSA, C. da. Abordagem de tópicos de mecânica quântica no ensino médio partindo da aproximação com o cotidiano. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 11, n. 3, p. 159–177, 2016.
- BOHR, N. On the constitution of atoms and molecules. **Philosophical Magazine**, v. 26, n. 6, p. 1–25, 1913.
- BOHR, N. The structure of the atom. **Nature**, v. 112, p. 29–44, 1923.
- BRASIL. **Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino médio.** Brasília: MEC/SEF, 2000.
- BRASIL. **PCN+ Ensino Médio: Orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais. ciências da natureza, matemática e suas tecnologias.** Brasília: MEC/SEF, 2002.
- BRASIL. **Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996:** Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9394.htm. Acesso em: 28 nov. 2021.
- BROADHOUSE, K. M. **The Physics of MRI and How We Use It to Reveal the Mysteries of the Mind.** 2019. Disponível em: <https://kids.frontiersin.org/articles/10.3389/frm.2019.00023>. Acesso em: 05 dez. 2021.
- BRYSON, B. **Breve história de quase tudo.** São Paulo: Companhia das Letras, 2005.
- CASTRO, T. S. **Números Quânticos: Abordagens desconexas que favorecem a memorização.** 2015. Instituto de Química: Universidade de Brasília.
- CHECHIK, V.; CARTER, E.; MURPHY, D. **Electron Paramagnetic Resonance (UK ed.).** England: OUP Oxford, 2016.
- CHEM.LIBRETEXTS.ORG. **The Heisenberg Uncertainty Principle.** 2018. Disponível em: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Physical_Chemistry_for_the_Biosciences_\(Chang\)/11%3A_Quantum_Mechanics_and_Atomic_Structure/11.06%3A_The_Heisenberg_Uncertainty_Principle](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Physical_Chemistry_for_the_Biosciences_(Chang)/11%3A_Quantum_Mechanics_and_Atomic_Structure/11.06%3A_The_Heisenberg_Uncertainty_Principle). Acesso em: 24 nov. 2016.
- CHU, S. Critical materials strategy. **DIANE publishing**, v. 1, 2011.

- COMMINS, E. D. Electron spin and its history. **Annual Review of Nuclear and Particle Science**, v. 62, n. 1, p. 133–157, 2012.
- CRESSER, J. **Particle Spin and the Stern-Gerlach Experiment**. 2009. Disponível em: <http://physics.mq.edu.au/~jcresser/Phys301/Chapters/Chapter6.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2016.
- DE BROGLIE. The reinterpretation of wave mechanics. **Found Phys**, v. 1, p. 5–15, 1970.
- DEKOSKY, R. K. William crookes and the quest for absolute vacuum in the 1870s. **Annals of Science**, v. 40, n. 1, 1983.
- DIFFERENCE BETWEEN.COM. **Difference Between Normal and Anomalous Zeeman Effect**. 201. Disponível em: <https://www.differencebetween.com/difference-between-normal-and-vs-anomalous-zeeman-effect/>. Acesso em: 22 jul. 2021.
- FAIZAN, A. **Difference Between Diamagnetism, Paramagnetism, and Ferromagnetism**. 2017. Disponível em: <https://electricalacademia.com/electromagnetism/magnetic-materials-para-dia-and-ferromagnetic-materials/>. Acesso em: 05 dez. 2021.
- FARRAR, W. Richard laming and the coal-gas industry, with his views on the structure of matter. **Annals of Science**, v. 25, n. 3, 1969.
- FAZENDA, I. A. **Interdisciplinaridade: História, teoria e pesquisa**. São Paulo: Papirus, 1994.
- FAZENDA, I. C. A. **Interdisciplinaridade: História, teoria e pesquisa**. Campinas - SP: Papirus Editora, 2007.
- FEISTEL, R. A. B.; MAESTRELLI, S. R. P. Interdisciplinaridade na formação inicial de professores: um olhar sobre as pesquisas em educação em ciências. **Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v. 5, n. 1, p. 155–176, 2012.
- FREEDMAN, M. I. Frederick soddy and the practical significance of radioactive matter. **The British Journal for the History of Science**, v. 12, n. 3, p. 257–260, 2009.
- FRIEDRICH, B.; HERSCHBACH, D. Space quantization: Otto stern’s lucky star. **Daedalus**, v. 127, n. 1, p. 165–191, 1998.
- GIBBS, J. W. On the equilibrium of heterogeneous substances. **Transactions of the Connecticut Academy of Sciences**, v. 3, 1876.
- GOMES, G. G.; PIETROCOLA, M. O experimento de stern-gerlach e o spin do elétron: um exemplo de quasi-história. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, 2011.
- GOMES, J. F.; PERES, G. L. Um olhar sobre o componente curricular de química quântica da UFFS campus Realeza-PR. *In: ENCONTRO DE DEBATES SOBRE O ENSINO DE QUÍMICA*, 37., 2017, Rio Grande, RS.
- GOODSTEIN, D. In the case of robert andrews millikan. **American Scientist**, v. 89, n. 1, p. 54–60, 2001.
- GOULD, T. A.; EDMONDS, M. **How MRI Works**. 2008. Disponível em: <https://science.howstuffworks.com/mri.htm>. Acesso em: 05 dez. 2021.
- GRAFTON, A.; GLEN, M. W.; SALVATORE, S. **The Classical Tradition**. Cambridge-Massachussets-London: The Belknap Press of Harvard University Press, 2010.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da mecânica quântica introdutória. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 6, n. 1, p. 29–56, 2001.

GREENE, B. **The elegant universe**: superstrings, hidden dimensions, and the quest for the ultimate theory. New York: W.W. Norton Co., 2003.

HANLE, P. A. Erwin schrödinger's reaction to louis de broglie's thesis on the quantum theory. **Isis**, v. 68, n. 4, p. 606–609, 1977.

HAPERN, P. **Spin**: The quantum property that should have been impossible. 2017. Disponível em: <https://medium.com/starts-with-a-bang/spin-the-quantum-property-that-should-have-been-impossible-40bd52548b22>. Acesso em: 24 nov. 2016.

HILGEOORD, J.; UFFINK, J. **The Uncertainty Principle, The Stanford Encyclopedia of Philosophy**. 2016. Disponível em: <https://plato.stanford.edu/entries/qt-uncertainty/>. Acesso em: 22 jul. 2021.

INSTITUTO DE FÍSICA UNICAMP. **Espectro de Emissão do Hidrogênio**. 2021. Disponível em: <https://www.ifi.unicamp.br/~fauth/1OrigensMecanicaQuantica/2OatomodeBohr/AtomoBohr.html>. Acesso em: 22 out. 2021.

IOWA STATE UNIVERSITY. **Electron Pairing**. 2021. Disponível em: <https://www.nde-ed.org/Physics/Magnetism/atommagnetism.xhtml>. Acesso em: 05 dez. 2021.

JAPIASSÚ, H. **Interdisciplinaridade e patologia do saber**. Rio de Janeiro: Imago editora, 1976.

JAPIASSÚ, H.; MARCONDES, D. **Dicionário básico de filosofia**. Rio de Janeiro: Zahar, 2006.

KAPLAN, I. G. Pauli exclusion principle and its theoretical foundation. **arXiv preprint**, v. 1902, n. 0049, 2019.

KENNY, A. **Ancient Philosophy**: A new history of western philosophy. Oxford: Clarendon Press, 2004.

KIRCHOFF, G.; BUNSEN, R. **Untersuchungen über das Sonnenspektrum und die Spektren der Chemischen Elemente**. Berlin: Abhandl. KGL. Akad. Wiss, 1861.

KLARE, J. P. Biomedical applications of electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy. **Biomedical Spectroscopy and Imaging**, v. 1, n. 2, p. 101–124, 2012.

KRAGH, H. **Niels Bohr and the Quantum Atom**: The bohr model of atomic structure 1913-1925. United Kingdom: Oxford University Press, 2012.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. D. A. **Metodologia do Trabalho Científico**. São Paulo: EDITORA ATLAS S.A, 1991.

LEAL, A.; KRAMBOCK, K.; GUEDES, K.; RODRIGUES, R. Ressonância paramagnética eletrônica – RPE aplicada a análise de especiarias irradiadas (com radiação gama). **Food Science and Technology**, v. 24, n. 3, p. 427–430, 2004.

LEICESTER, H. M. **The Historical Background of Chemistry**. New York: Dover Publications, 1971.

LIGHTMAN, A. P. **The discoveries: great breakthroughs in twentieth-century science, including the original papers**. Toronto: Alfred A. Knopf Canada, 2005.

LIU, W.; BRYAN, M.; XU, Y. Introduction to spintronics and 2d materials. *spintronic 2d materials*. **Spintronic 2D Materials**, n. 1, p. 1–24, 2020.

MACHADO, J. N. **Epistemologia e didática: as concepções de conhecimento e inteligência e a prática docente**. São Paulo: Editora Cortez, 2002. v. 5º ed.

MANGINI, F. N. da R.; MIOTO, R. C. T. A interdisciplinaridade na sua interface com o mundo do trabalho. **Revista katálysis**, v. 12, p. 207–215, 2009.

MANZATO, A. J.; SANTOS, A. B. A elaboração de questionários na pesquisa quantitativa. **Departamento de Ciência de Computação e Estatística–IBILCE–UNESP**, v. 1, p. 1–17, 2012.

MARTIN, B. R. **Nuclear and Particle Physics**. England: John Wiley Sons, 2006.

MCCRAY, W. P. How spintronics went from the lab to the ipod. **Nature Nanotechnology**, v. 4, 2009.

MISHRA, S. S.; NISER, B. Fitting the experimental data on thermally excited ferromagnetic resonance and spin torque ferromagnetic resonance in magnetic tunnel junction nanopillars. **Summer Project Report - Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf**, 2016.

MORIN, E. **A cabeça bem-feita: A cabeça bem-feita: repensar a reforma, reformar o pensamento**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

NEVES, J. L. Pesquisa qualitativa: características, usos e possibilidades. **Caderno de pesquisas em administração**, v. 1, n. 3, p. 1–5, 1996.

O'CONNOR, J. J.; ROBERTSON, E. F. **Julius Plücker**. 2014. Disponível em: <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Plucker/>. Acesso em: 01 oct. 2021.

ODOM, B.; HANNEKE, D.; GABRIELSE, G.; DURSO, B. New measurement of the electron magnetic moment using a one-electron quantum cyclotron. **Physical Review Letters**, v. 97, n. 3, 2006.

OLIVEIRA, E. B.; SANTOS, F. Pressupostos e definições em interdisciplinaridade: diálogo com alguns autores. *interdisciplinaridade*. **Revista do Grupo de Estudos e Pesquisa em Interdisciplinaridade**, v. 11, n. ISSN 2179-0094, 2017.

PAIS, A. George uhlenbeck and the discovery of electron spin. **Physics Today**, v. 42, n. 12, 1989.

PELLIZZARI, A.; KRIEGL, M.; BARON, M.; FINCK, N.; DOROCINSKI, S. Teoria da aprendizagem significativa segundo ausubel. **revista PEC**, v. 2, n. 1, p. 37–42, 2002.

PIAGET, J. **Psicologia do desenvolvimento**. São Paulo: Difel, 1978.

RUTHERFORD, E.; RATCLIFFE, J. **Forty Years of Physics: Background to modern science**. England: Cambridge University Press, 1938.

SANTOMÉ, J. T. **Globalização e interdisciplinaridade**: o currículo integrado. Porto Alegre: Editora Artes Médicas Sul Ltda, 1998.

SAVIGNANO, V. **Artigo em destaque**: Engenharia precisa na fabricação de válvulas de spin. 2014. Disponível em: <https://www.sbpomat.org.br/pt/tag/magnetorresistencia-gigante/>. Acesso em: 05 dez. 2021.

SCHMIDL, P. G. Two early arabic sources on the magnetic compass. **Journal of Arabic and Islamic Studies**, v. 1, p. 81–132, 1996.

SEGRE, E. **From X-Rays To Quarks**: Modern physicists and their discoveries. San Francisco: W. H. F C, 1980.

SHIPLEY, J. T. **Dictionary of Words Origins**. New York: The Philosophical Library, 1945.

SILVA, M. da. **Os hábitos professorais**: o objeto dos estudos sobre o ato de ensinar. Rio de Janeiro: Revista Brasileira de Educação, 2010.

SILVEIRA, R. M. C.; BAZZO, W. A. **Ciência e Tecnologia**: transformando a relação do ser humano com o mundo. Anais Ponta Grossa/Paraná: IX Simpósio Internacional, 2005.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Modern Physics**. New York: W. H. Freeman and Company, 2012.

TOIDA, H.; KAKUYANAGI, K.; MUNRO, W. J.; YAMAGUCHI, H.; SAITO, S. Electron spin resonance spectroscopy using a superconducting flux qubit. **NTT Technical Review**, v. 17, n. 8, 2019.

UNIVERSITY OF ILLINOIS . **Tube drawing: copyright by Central Scientific Company. Glow**. 1923. Disponível em: <https://history.aip.org/exhibits/electron/jjrays.htm#crookes>. Acesso em: 01 out. 2021.

WOLLASTON, W. H. A method of examining refractive and dispersive powers, by prismatic reflection. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, n. 92, p. 365–380, 1802.

ZABALA, A. **Enfoque Globalizador e pensamento complexo**: uma proposta para o currículo escolar. Porto Alegre: Editora Artmed, 2002.

ZAVOISKY, E. Spin-magnetic resonance in paramagnetics. **Fizicheskii Zhurnal**, v. 9, p. 211–245, 1945.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO PARA ENTREVISTA DOS PROFESSORES

Questão 1. Nome da escola ou instituição onde trabalha:

Questão 2. Qual o seu grau de formação acadêmica?

- (a) Graduado
- (b) Mestre
- (c) Doutor
- (d) Especialista

Questão 3. Em suas aulas, você apresenta o spin do elétron aos seus alunos?

- (a) Sim
- (b) Não

Questão 4. Se sua resposta a questão anterior foi **sim**, de que modo você apresenta o assunto? Quais são as principais dificuldades no ensino dessa propriedade, em seu ponto de vista?

Questão 5. Se sua resposta a questão 3 foi **não**, por qual razão você não aborda o tema em sala de aula?

Questão 6. Em sua concepção, o spin e outras temáticas semelhantes concernentes a Física e a Química podem ser melhor ensinadas e compreendidas dentro de uma perspectiva interdisciplinar? Em seu cotidiano na docência, quais condições são necessárias para que uma proposta interdisciplinar seja aplicada com eficiência?

Questão 7. Os livros didáticos utilizados pela escola onde você leciona, discutem e ilustram satisfatoriamente o spin?

- (a) Sim
- (b) Não