



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM QUÍMICA EM REDE NACIONAL
PROFQUI



WOLFGANG PAULI: O PRINCÍPIO DA EXCLUSÃO E A CLASSIFICAÇÃO
PERIÓDICA DOS ELEMENTOS

JOSÉ ALLAN CARLOS E SILVA

**WOLFGANG PAULI: O PRINCÍPIO DA EXCLUSÃO E A CLASSIFICAÇÃO
PERIÓDICA DOS ELEMENTOS**

Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação do Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional (PROFQUI/UFRPE-Recife), como requisito necessário à obtenção do título de Mestre em Química.

Orientador Prof. Dr: Luciano de Azevedo Soares Neto.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S586w Silva, José Allan Carlos e
Wolfgang Pauli: o princípio da exclusão e a classificação periódica dos elementos / José Allan Carlos e Silva. - 2024.
99 f. : il.
- Orientador: Luciano de Azevedo Soares Neto.
Inclui referências e apêndice(s).
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Mestrado Profissional em Química (PROFQUI), Recife, 2024.
1. Teoria quântica. 2. história de Wolfgang Pauli. 3. princípio da exclusão. 4. classificação dos elementos. I. Neto, Luciano de Azevedo Soares, orient. II. Título

CDD 540

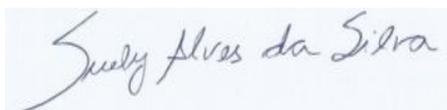
**WOLFGANG PAULI: O PRINCÍPIO DA EXCLUSÃO E A
CLASSIFICAÇÃO PERIÓDICA DOS ELEMENTOS**

BANCA EXAMINADORA



Prof. Luciano de Azevedo Soares Neto
DQ UFRPE SIAPE 384012
ÁREA: FÍSICO-QUÍMICA

**Prof. Dr. Luciano de Azevedo Soares Neto (DQ/UFRPE)
(Orientador)**



**Prof^ª.Dr^ª. Suely Alves da Silva (DQ/UFRPE) Primeira
Examinadora (Membro Externo)**



**Prof. Dr. Joacy Vicente Ferreira (IFPE/Campus Afogados da
Ingazeira) Segundo Examinador (Membro Interno)**

*À minha família em especial a minha esposa
Vanessa e meu filho que me motivam a
continuar estudando.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, que nas horas difíceis sempre está comigo.

À minha mãe, Adelma e meu pai Antônio pelo investimento, conselhos e a oportunidade de estudar, amo vocês.

À minha amada esposa Vanessa, pela paciência e incentivo durante este trabalho, és um pilar em minha vida.

Ao meu querido orientador Prof. Dr. Luciano, que conheci durante esse mestrado e fico muito feliz de tê-lo conhecido, pelo seu caráter, conhecimento e ajuda que me transmitiu neste mestrado, estou enormemente satisfeito de ter sido seu aluno.

A todos os professores que me ajudaram a chegar nesse ponto por acreditarem em mim.

À minha querida amiga de toda a vida acadêmica e também colega de sala mestra Cibelly Novaes, a Lorena Nobrega e a todos os colegas do Profqui que me ajudaram nessa jornada.

Agradeço à Capes pela bolsa de estudos concedida, que me ajudou a dar continuidade a este trabalho.

In memoriam: professor José Tavares de Sousa da Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, que contribuiu com os versos da poesia sobre Pauli para o projeto educacional.

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

RESUMO

Wolfgang Pauli foi um dos físicos mais importantes do século XX que participou ativamente do desenvolvimento da Mecânica Quântica, tendo descoberto o Princípio da exclusão, fundamental na Classificação Periódica dos elementos na forma como conhecemos atualmente. O presente trabalho propõe um material didático em forma de E-book que servirá de apoio para o professor de Química, descrevendo fatos importantes da vida de Pauli e destacando a importância do Princípio da exclusão na Classificação Periódica dos elementos. A pesquisa foi dividida em duas partes. Na primeira parte foi realizado um levantamento histórico sobre a vida de Pauli e como sua descoberta do princípio da exclusão foi determinante para a explicação da classificação periódica dos elementos, contando seus erros e histórias peculiares sobre sua vida. Com isso, foi desenvolvido um E-book para auxiliar as aulas dos professores de ensino médio ou de graduação com o intuito de ajudá-los a prepararem suas aulas sobre a Teoria Quântica e o princípio da exclusão, já que a maioria dos livros didáticos não abordam o contexto histórico e tem uma linguagem de mais difícil compreensão. Na segunda parte foi realizada uma pesquisa com 21 professores para verificar se os conteúdos do E-book estão com uma linguagem de fácil entendimento para seu público-alvo e apresentam conteúdo relevante para a construção de conhecimento dos alunos. Com perguntas para verificar o perfil dos participantes, assim como sobre o conteúdo do e-book. Dessa maneira, o produto educacional proposto tem aspectos pedagógicos que podem contribuir para um melhor entendimento do conteúdo para os alunos, assim como melhorar a formação dos professores que utilizarem.

Palavras-chave: Teoria quântica, história de Wolfgang Pauli, princípio da exclusão, classificação dos elementos.

ABSTRACT

Wolfgang Pauli was one of the most important physicists of the 20th century who actively participated in the development of Quantum Mechanics, having discovered the Exclusion Principle, fundamental in the Periodic Classification of elements as we know them today. The present work proposes teaching material in the form of an E-book that will serve as support for the Chemistry teacher, describing important facts in Pauli's life and highlighting the importance of the Principle of exclusion in the Periodic Classification of elements. The research was divided into two parts. In the first part, a historical survey was carried out on Pauli's life and how his discovery of the exclusion principle was decisive in explaining the periodic classification of elements, telling his mistakes and peculiar stories about his life. With this, an E-book was developed to assist the classes of high school or undergraduate teachers with the aim of helping them prepare their classes on Quantum Theory and the principle of exclusion, since most textbooks do not address the historical context and use language that is more difficult to understand. In the second part, a survey was carried out with 21 teachers to check whether the E-book's contents were in easy-to-understand language for their target audience and presented relevant content for building students' knowledge. With questions to check the profile of the participants, as well as the content of the e-book. In this way, the proposed educational product has pedagogical aspects that can contribute to a better understanding of the content for students, as well as improving the training of teachers who use it.

Keywords: Quantum theory, story of Wolfgang Pauli, exclusion principle, classification of elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Wolfgang Pauli com 9 meses e sua mãe Bertha.	15
Figura 2: Wolfgang Pauli.	16
Figura 3: Wolfgang Pauli jovem.	17
Figura 4: Classe nomeada com “a classe dos gênios”, primeiro em pé à esquerda.....	17
Figura 5: Pauli e Einstein, fotografia tirada por e Ehrenfest.	18
Figura 6: Max Born puxando a orelha de Pauli.....	19
Figura 7: Käthe Deppner (Kate) e Pauli passeando em 1929.....	21
Figura 8: Pauli e Franca (esquerda). O pai de Pauli e Franca (direita).....	22
Figura 9: Pauli com, Ning Hu, José Leite Lopes e Maria Jauch.	23
Figura 10: 45° aniversário de Wolfgang Pauli.....	23
Figura 11: Charles Enz, o último assistente de Pauli.	24
Figura 12: George Gamow e Wolfgang Pauli.	26
Figura 13: Capa do livro <i>Aton and Archetype</i>	27
Figura 14: Ape-man.....	28
Figura 15: Sommerfeld e Pauli.....	30
Figura 16: Pauli e Ehrenfest rindo de uma piada.....	34
Figura 17: Representação dos spins dos elétrons	34
Figura 18: Configuração eletrônica de spin do Berílio e do Oxigênio.....	35
Figura 19: Tabela periódica dividida em camadas (períodos) e subcamadas.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição dos números quânticos para o orbital $1s^2$	37
Tabela 2: Limite de elétrons por subcamada.	37
Tabela 3: Limite de elétrons por camadas.	37
Tabela 4: Algumas respostas da questão 4 do questionário.	46
Tabela 5: Algumas considerações dos participantes do questionário.....	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Respostas sobre onde atuam os participantes do questionário.....	44
Gráfico 2: Respostas da questão 1 do questionário aplicado.....	44
Gráfico 3: Respostas da questão 2 do questionário.....	45
Gráfico 4: Respostas da questão 3 do questionário.....	46
Gráfico 5: Respostas da questão 5 do questionário.....	48
Gráfico 6: Respostas da questão 10 do questionário.....	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1 A TRAJETÓRIA DE VIDA DE WOLFGANG PAULI	15
<i>3.1.1 Wolfgang Pauli, C. G. Jung e a alquimia</i>	25
3.2 PRINCÍPIO DA EXCLUSÃO E A CLASSIFICAÇÃO PERIÓDICA DOS ELEMENTOS	29
4. METODOLOGIA	39
4.1 A PESQUISA	39
4.2 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS PARTICIPANTES DA PESQUISA	40
4.3 CONSTRUÇÃO DO PRODUTO	40
4.4 ANÁLISE DOS DADOS	41
5. PRODUTO EDUCACIONAL	42
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
REFERÊNCIAS	54
APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL	58
APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO ENVIADO AOS PROFESSORES	92
APÊNDICE C - LINHA DO TEMPO DA VIDA DE WOLFGANG PAULI	96

1. INTRODUÇÃO

Um dos físicos de maior destaque na construção dos fundamentos da Mecânica Quântica foi Wolfgang Pauli. Ele foi o descobridor de um princípio fundamental da natureza: o princípio da exclusão. Só a partir da descoberta do princípio da exclusão foi que o entendimento da relação entre a distribuição dos elétrons e as propriedades dos elementos químicos passou a ser mais bem entendida.

Pauli morreu quando tinha apenas 58 anos. Ele teve uma vida muito intensa que foi interrompida por um câncer de pâncreas. De estilo próprio e personalidade marcante, Pauli era chamado pelos colegas de “a consciência da física”. Além da descoberta do princípio da exclusão, que deu a ele o Prêmio Nobel de Física, Pauli foi o primeiro a propor a existência do neutrino, comprovado experimentalmente anos depois. (Atmanspacher; Primas, 1996; Bassalo; Caruso, 2013).

Sua história é rica de fatos importantes para a química e a física, principalmente para o desenvolvimento da mecânica quântica, suas origens justificam sua personalidade forte que foi influenciada por seu padrinho, o também físico Ernst Mach. (Bassalo; Caruso, 2013; Enz, 2003; Miller, 2010). Sendo assim, neste trabalho focamos no contexto histórico da vida pessoal e científica de Pauli, segundo Allchin (2013), os acontecimentos históricos são aqueles que envolvem o compromisso dos alunos com questões históricas. Essas questões devem ser interpretadas não a partir de conhecimentos que temos hoje, mas a partir de conhecimentos que eram aceitos no contexto histórico pertinente à questão analisada, de maneira a entender como as ideias foram progredindo ao longo do tempo.

Outra parte importante da vida de Pauli foi sua amizade com o psicólogo suíço Carl Gustav Jung, que o ajudou a superar traumas de sua vida, dessa maneira em suas análises Jung descobriu que Pauli sonhava muito com alquimia ao ponto de escrever um livro sobre isso. Segundo Schemberg (1984), Jung publicou o resultado das primeiras análises dos sonhos de Pauli sem dizer de quem era o material onírico no livro *Psicologia e Alquimia*.

A maior descoberta de Pauli foi o princípio da exclusão, ela prevê que dois (ou mais) elétrons não podem ocupar o mesmo estado quântico de um mesmo sistema ao mesmo tempo. Desta forma, eles tendem a se distribuir progressivamente das camadas mais internas para as mais externas (Silva, C. D. C.; Binoti; Dilem, 2023). Com esse conceito, pode-se afirmar que a forma com que a tabela periódica é organizada hoje em períodos e subníveis se deve ao

princípio da exclusão, apesar do tema tabela periódica ser fundamental para o ensino de química, pouco se fala sobre o princípio da exclusão e como ele fundamenta a organização periódica dos elementos.

Sendo assim, a importância de se ter materiais sobre esse assunto para aprendizagem é significativa, pois é pouco abordado nos livros didáticos tradicionais, sendo preciso um complemento para ajudar os professores a prepararem suas aulas. Por isso a ideia de fazer um E-book sobre o tema como material de apoio para ajudar no planejamento e execução de aulas do ensino médio, contudo não se descarta seu uso na graduação. O E-book por ser um livreto digital pode ser divulgado mais facilmente pela internet, dessa forma a divulgação do conteúdo pode alcançar pessoas em todo o lugar do mundo dando mais acessibilidade aos usuários deste produto (Valletta, 2015).

Como forma de validação do conteúdo do E-book, foi aplicado um questionário (apêndice B) para 21 professores participantes, com algumas perguntas para verificar o perfil desses professores e outras 10 perguntas sobre o E-book e seu conteúdo. Diante dos resultados obtidos foi possível observar uma ótima aceitação do produto educacional, pois todos os participantes aprovaram o E-book e deixaram algumas sugestões pontuais de melhoria. Dessa maneira, compreendemos que novos recursos devem ser desenvolvidos e utilizados para o ensino e aprendizagem dos alunos, fazendo uso da história da ciência e de como os conceitos científicos foram desenvolvidos ao longo dos anos, isso aumenta o interesse dos alunos em aprender que a ciência é construída com pequenos “tijolos” ao longo do tempo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Analisar material didático de apoio para o professor de Química do Ensino Médio sobre Wolfgang Pauli, o Princípio da exclusão e sua relação com a Classificação Periódica dos Elementos Químicos.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar pesquisa bibliográfica sobre a vida de Wolfgang Pauli e as circunstâncias que levaram Pauli ao Princípio da exclusão.
- Elaborar material de apoio para o professor de Química do Ensino Médio sobre Wolfgang Pauli, o Princípio da exclusão e a sua relação com a Classificação Periódica dos Elementos Químicos.
- Analisar o material didático elaborado aos docentes de Química do Ensino Médio.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 A trajetória de vida de Wolfgang Pauli

Considerado por Albert Einstein seu sucessor, Wolfgang Ernst Friedrich Pauli nasceu em 25 de abril de 1900 em Viena, na Áustria, filho de Wolfgang Josef Pascheles e Bertha Camila Schütz (figura 1). Wolfgang Pascheles cursou Medicina com Ludwig, filho mais velho do famoso físico Ernst Mach, que foi professor de física experimental e influenciou muito a personalidade de Pauli e seu gosto pela física e matemática (Bassalo; Caruso, 2013; Enz, 2003; Miller, 2010). A grande amizade e consideração que Pascheles tinha por Mach, o levou a convidá-lo para ser o padrinho de seu filho Wolfgang Pauli e homenageá-lo com o nome do meio sendo Ernst, o nome Friedrich também foi uma homenagem a seu avô Friedrich Schütz, pai de sua mãe Bertha Camila Schütz, primeira esposa de Pascheles, com quem teve dois filhos, Wolfgang Ernst Friedrich Pauli e Hertha Ernestina Pauli, fato curioso que seu nome do meio Ernestina, também foi uma homenagem a Ernest Mach. (Enz, 2003; Miller, 2010).

Figura 1: Wolfgang Pauli com 9 meses e sua mãe Bertha.



Fonte: Centro Europeu para Pesquisa Nuclear, CERN.

O desenvolvimento de Pauli (figura 2) está muito relacionado à história de seus pais e avós, de origem judia. Os avós paternos de Pauli, eram muito conhecidos e atuantes na comunidade judaica em Praga, onde moravam. Wolfgang Josef Pascheles, pai de Pauli, foi criado nos costumes judaicos, depois formou-se em Medicina, na Universidade de Praga, onde conheceu o físico Ernst Mach, com quem formou fortes laços de amizade que influenciaram sua vida e a da sua família, em seguida, obteve o título de doutor em Medicina na Carl Ferdinand University em 4 de abril de 1893, de acordo com seu próprio Currículo Vitae de 1897. (Enz, 2003).

Figura 2: Wolfgang Pauli.



Fonte: Enz 2002, p. 339.

Após formado, Wolfgang Josef Pascheles sofreu grande influência de Mach para mudar de área de estudo e foi para Química, no qual obteve reconhecimento e sucesso nos seus trabalhos. Contudo, para poder trabalhar na Universidade de Viena, ele precisou se converter ao catolicismo romano, devido às restrições de emprego impostas aos judeus e o crescimento do antissemitismo na região da Alemanha e Áustria naquela época. Quando seu pai Jacob W. Pascheles faleceu, ele recebeu a permissão para mudar seu sobrenome, em 1898, trocou seu sobrenome Pascheles por Pauli. Com a ajuda e influência de Mach, conseguiu uma vaga como assistente na Faculdade de Medicina. Um ano depois, em março de 1899, cortou as relações com a comunidade israelita e em maio do mesmo ano casou-se com Bertha Camila Schütz com quem teve dois filhos, sendo seu primogênito o genial Wolfgang Ernst Friedrich Pauli (figura 3). (Enz, 2002).

Figura 3: Wolfgang Pauli jovem.



Fonte: Enz 2002, p.14.

Quase um ano depois do casamento de seus pais, nascia aquele que seria considerado um gênio da física moderna. Pauli nasceu na Áustria, herdou a religião católica de seus pais, na qual foi batizado e teve como padrinho o famoso cientista Ernst Mach, que foi parte fundamental para seu desenvolvimento intelectual e de sua personalidade forte, aconselhou e guiou no caminho da Física e Matemática desde criança, Pauli frequentava muito o laboratório de seu padrinho e adorava ver sua avó tocar piano. Aos seis anos, nasceu sua irmã Hertha Ernestina Pauli. Aos dez anos Pauli iniciou os estudos no Döblinger Gymnasium, na Áustria; aos quatorze anos já sabia cálculo e já era incentivado pelo seu padrinho Mach à escolha de leituras científicas, mostrava muita aptidão para a Física e Matemática e graduou-se aos dezoito anos com louvor. A classe de Pauli ficou conhecida como a classe dos gênios, observar a figura 4. (Enz, 2003, 2009)

Figura 4: Classe nomeada com “a classe dos gênios”, primeiro em pé à esquerda.



Fonte: Centro Europeu para Pesquisa Nuclear, CERN.

Na escola, Pauli recebia aulas avançadas de Física com professores da Universidade. Se encantou com os artigos de Einstein sobre a teoria geral da relatividade, o que mostrava sua genialidade; ele tinha pleno domínio da teoria. Aos dezessete anos, já estudava os aspectos matemáticos de Einstein e lia livros de Física e Matemática até de madrugada como se fossem livros juvenis. (Pauli, 1996).

Com essa evidente vocação para a física teórica, Pauli decidiu ir estudar com ninguém menos que Johannes Wilhelm Sommerfeld, em Munique, na Alemanha, já que este já era uma autoridade em Física Quântica e respeitado pela academia científica. O próprio Pauli admitiu anos depois que o encorajamento recebido de Sommerfeld e de seus discípulos tinham sido fundamentais para seu desenvolvimento científico. (Pauli, 1996).

Em 1921, Pauli defendeu sua tese sobre a investigação do íon da molécula de hidrogênio, um marco na teoria quântica de Bohr - Sommerfeld, e com isso recebeu seu diploma de doutor pela Universidade de Munique. Foi nessa época que Pauli conquistou grandes amizades, uma delas foi com Werner Karl Heisenberg, que também era aluno de Sommerfeld. Essa amizade se perpetuou por toda sua vida. (Pauli, 1996).

O que realmente chamou a atenção durante o tempo que estudou em Munique com Sommerfeld foi o artigo que Pauli escreveu e foi publicado em 1921 sobre a teoria da relatividade, de tão estonteante encantou o próprio Einstein (figura 5), que disse “ninguém estudando esta obra madura e grandiosamente concebida acreditaria que o autor é um homem de vinte e um anos”. (Pauli, 1996).

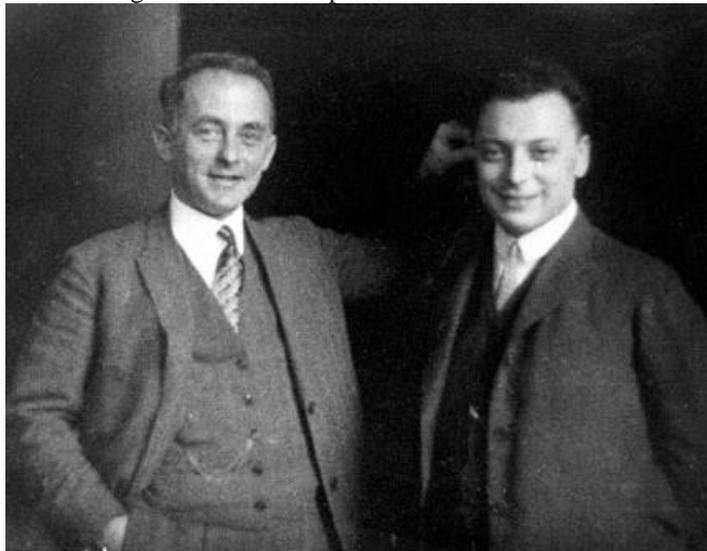
Figura 5: Pauli e Einstein, fotografia tirada por Ehrenfest.



Fonte: Enz 2002, p. 34.

Durante a passagem de ano entre 1921 e 1922, Pauli foi assistente de Max Born (figura 6), em *Göttinger During*, colaborando com a escrita de um artigo sobre as aplicações sistemáticas da teoria das perturbações astronômicas. Foi em *Göttinger During*, que Pauli recebeu um convite do famoso cientista dinamarquês Niels Bohr, para passar um ano trabalhando com ele em Copenhague, com muita surpresa e a irreverência que o jovem Pauli tinha, respondeu a Bohr: “difícilmente acho que as exigências científicas que você fará de mim, vão me causar alguma dificuldade, mas o aprendizado de um idioma estrangeiro como o dinamarquês supera e muito minhas habilidades”. Na verdade, trabalhando em Copenhague, Pauli descobriu que suas duas afirmações estavam totalmente equivocadas. (Enz, 2009).

Figura 6: Max Born puxando a orelha de Pauli.



Fonte: Miller 2009, p. 179.

Esse intercâmbio com Niels Bohr, foi muito importante para a vida e desenvolvimento científico de Pauli. Durante sua estada, ele começou a estudar os problemas de anomalias do efeito Zeeman, estudos esses que o levariam à descoberta do quarto número quântico, o Spin. Foi no seu terceiro artigo sobre as anomalias do efeito Zeeman, publicado em 2 de dezembro de 1924, que Pauli introduziu, de forma disfarçada, o número quântico de Spin do Elétron. O interessante é que quatro meses antes, em 17 de agosto de 1924, ele propôs a hipótese, que, em geral, o núcleo deveria possuir um momento angular resultante que não desaparece. (Enz, 2009).

Seu estudo sobre o efeito Zeeman, resultou no famoso artigo sobre o princípio da exclusão, submetido em 16 de janeiro de 1925, o que levou a ganhar o prêmio Nobel de 1945, um discurso, em um jantar no Instituto de Estudos Avançados de Princeton, em homenagem

por receber o prêmio Nobel daquele ano, Pauli falou: “a premiação desse ano me lembra os meus dias de estudo em Munique”. (Enz, 2009).

No período de 1923 a 1928, Pauli fazia conferências na Universidade de Hamburgo, na Alemanha e em 1928, tornou-se professor de Física teórica do Instituto Federal de Tecnologia (ETH), em Zurique. Foi durante essa época, em Hamburgo, que começou a lenda do efeito Pauli, do qual físicos experimentais diziam que coisas estranhas aconteciam devido à presença de Pauli, acreditava-se que apenas sua presença em um laboratório ou perto dele produzia estranhos problemas. Existem relatos de várias situações inusitadas, como quando o equipamento estourou em vários pedaços, no Instituto de Física da Universidade de Göttingen, sem explicação nenhuma. Depois descobriram que o trem que levava Pauli, de Zurique para Copenhague, tinha feito uma pequena parada na estação de Göttingen no mesmo momento do ocorrido. Outro fato do efeito Pauli ocorreu quando o *cíclotron* da Universidade de Princeton incendiou-se, em 1950, justamente quando Pauli fazia uma visita à Universidade. (Bassalo; Caruso, 2013; Enz, 2009).

Esses acontecimentos do efeito Pauli, fizeram com que seu amigo Otto Stern, famoso cientista da época, não o deixassem entrar em seu Instituto. Chamavam até de mago da matéria, devido ao efeito Pauli, já que quem presenciava dizia que parecia um processo quase mágico. O próprio Pauli acreditava em seu efeito, outro caso do efeito Pauli, ocorreu durante a lua de mel do seu segundo casamento. Na ocasião, o motor do seu carro falhou quando ele o dirigia, sem nenhuma explicação aparente. Seu amigo Carl Jung, mais tarde descreveu o efeito Pauli como um fenômeno sincronístico, foi uma forma de tentar entender o tal efeito. (Bassalo; Caruso, 2013; Enz, 2009; Lindorff, 2009).

Foi durante o período de 1927 a 1930 que Pauli passou por grandes acontecimentos que mudaram sua vida. Um deles foi o suicídio de sua mãe Bertha, em 15 de novembro de 1927, que o abalou profundamente e foi mais um fator que o levou a deixar o catolicismo em 1929. No mesmo ano, Pauli casou com Luise Margarete Käther (Kate) Deppner (figura 7), em 23 de dezembro de 1929, em Berlim. Kate foi dançarina no cabaré Cornichon. Contudo, ela já estava apaixonada por Paul Goldfinger, professor de Química na Universidade de Libré. Em um relacionamento infeliz, Kate e Pauli se divorciaram em menos de um ano de casamento, em 26 de novembro de 1930. Kate casou-se em seguida com Goldfinger. Foi uma grande derrota para Pauli e assim começaram os problemas com a bebida e o fumo virou um hábito, principalmente o cachimbo. Pauli não aceitava ter sido trocado por um químico medíocre, como ele mesmo dizia. (Enz, 2003).

Figura 7: Käthe Deppner (Kate) e Pauli passeando em 1929.



Fonte: Miller 2009, p. 152.

Contudo, seus problemas pessoais não afetaram seu trabalho e foi durante esse período que Pauli propôs a existência de uma nova partícula. Em uma carta de 4 dezembro de 1930, enviada para Lise Meitner e Hans Geiger, Pauli informou sobre a sua descoberta teórica, a possível existência de uma nova partícula, partícula que Fermi, em 1934, nomeou de neutrino. (Bassalo; Caruso, 2013). Pauli era muito focado em seu trabalho e um crítico muito franco, astuto e muitas vezes duro, gostava de sentar na primeira fileira para assistir aos colóquios, seminários e conferências de Física, quando não concordava com as ideias apresentadas, imediatamente dizia que isso estaria absolutamente errado ou que era falso e não fazia sentido, por causa disso, algumas frases de Pauli ficaram bem conhecidas como – Não apenas não está certo, como nem ao menos está errado, ou não me importo que você pense devagar, mas me importo que você publique mais rápido do que você pensa. Essa personalidade forte e crítica deu a Pauli alguns apelidos, como “a consciência da física”. Algumas vezes, ele mesmo assinava suas cartas críticas como o flagelo de Deus ou o terrível Pauli, mas suas críticas, quase sempre eram sólidas e férteis. Ele dizia que, embora às vezes tenha considerado algo certo como errado, nunca considerou algo errado como certo. (Atmanspacher; Primas, 1996; Bassalo; Caruso, 2013).

Em 1934, Pauli se casaria novamente, em Londres, com Franziska Bertram, conhecida como Franca (figura 8), porém, não teve filhos. De 1935 a 1936, trabalhou como professor visitante na Universidade de Princeton, EUA, mais precisamente no Instituto de Física

Avançada (IFA). Em 1938, a Áustria foi ocupada e anexada pela Alemanha. Dessa maneira, Pauli se tornou cidadão alemão. Com o começo da Segunda Guerra em 1939, Pauli sentiu muita dificuldade em permanecer em sua terra natal. Com seus contatos no tempo em que trabalhou em Princeton, Pauli recebeu um convite para ser professor titular no IFA, no qual o principal cientista era Einstein, que já trabalhava lá. Pauli teve que praticamente fugir com sua esposa Franca, em uma viagem difícil pela Europa para chegar aos Estados Unidos em 1940. (Bassalo; Caruso, 2013; Enz, 2003; Pauli, 1996).

Figura 8: Pauli e Franca (esquerda). O pai de Pauli e Franca (direita).



Fonte: Miller 2009, p. 183 – 184.

Durante o período em que morou nos Estados Unidos, Pauli orientou o doutorado do físico brasileiro José Leite Lopes (figura 9), grande físico pernambucano que foi um desbravador no desenvolvimento da Física Brasileira. Também foi nesse período que Pauli foi agraciado com o prêmio Nobel em 1945, com indicação de ninguém menos que Albert Einstein pelo seu trabalho sobre o princípio da exclusão, que é comumente chamado de princípio da exclusão de Pauli, no qual revela a existência do quarto número quântico, o Spin. Foi em dezembro de 1945 em Princeton, em uma reunião em comemoração à conquista do Prêmio Nobel, que Einstein fez questão de dizer que via em Pauli o seu sucessor. (Enz, 2003; Silva, V., 2019).

Figura 9: Pauli com, Ning Hu, José Leite Lopes e Maria Jauch.



Fonte: Enz 2002, p. 396

No ano agitado de 1946, Pauli se tornaria membro permanente da Universidade de Princeton e se tornaria cidadão americano, ou seja, foi naturalizado norte-americano. Nesse mesmo ano, com o final da guerra, voltaria para Zurique, na Suíça, no seu antigo posto no ETH e realizou e participou de diversas palestras e encontros pela Europa, por ser ganhador do Nobel do ano anterior. “Em dezembro de 1946, Pauli estava presente na cerimônia do Nobel, onde fez seu discurso de ganhador do ano anterior e em 1949 foi naturalizado suíço.” (Bassalo; Caruso, 2013, p. 4).

Figura 10: 45º aniversário de Wolfgang Pauli.



Fonte: Centro Europeu para Pesquisa Nuclear, CERN.

Pauli trabalhou muito durante esse tempo e em 1958 descobriu que estava com câncer no pâncreas. Fez uma operação no dia 13 de dezembro, mas no dia 15 de dezembro de 1958

faleceu. Morria um dos homens mais geniais do século XX, que possuía uma fixação pela constante do seu professor Sommerfeld, a constante de estrutura fina era aproximadamente $1/137$, o que levou nos últimos momentos de sua vida pedir para que seu último assistente (figura 11) o transferisse para o quarto no hospital de número 137, onde passou os últimos instantes de sua vida. Em 20 de dezembro, seu corpo foi cremado em uma cerimônia com apenas os membros da família e seus amigos. (Enz, 2003, 2009).

Figura 11: Charles Enz, o último assistente de Pauli.



Fonte: Enz 2002, p. 311.

Pauli recebeu várias homenagens durante e depois de sua vida, como a medalha Lorentz, medalha Franklin, medalha Matteucci, medalha Max Planck e o mais importante: o prêmio Nobel de física. Sua vida foi cheia de altos e baixos como a de qualquer ser humano, contudo, sua personalidade forte e seu jeito excêntrico o levaram a descobertas como a do princípio da exclusão que levaria à elucidação de como os elétrons se distribuem nos átomos e consequentemente ficou claro como essa distribuição está totalmente relacionada com a organização da classificação periódica dos elementos como a conhecemos hoje. (Bassalo; Caruso, 2013).

Durante sua curta vida, o consumo exagerado de álcool e os vexames de Pauli, devido a sua separação com Kate e o falecimento de sua mãe, o levou a ter um grande colapso nervoso. Isso fez com que seu pai o propusesse a fazer um tratamento psicológico com o famoso psicanalista Carl Gustav Jung, em Zurique, com quem Pauli faria uma bela e grande amizade, que permaneceria por toda sua vida. Essa amizade resultou em alguns livros e várias

correspondências, entre eles, sobre a interpretação dos sonhos de Pauli e sua ligação com a alquimia que será descrito à frente. (Bassalo; Caruso, 2013; Pauli, 1996).

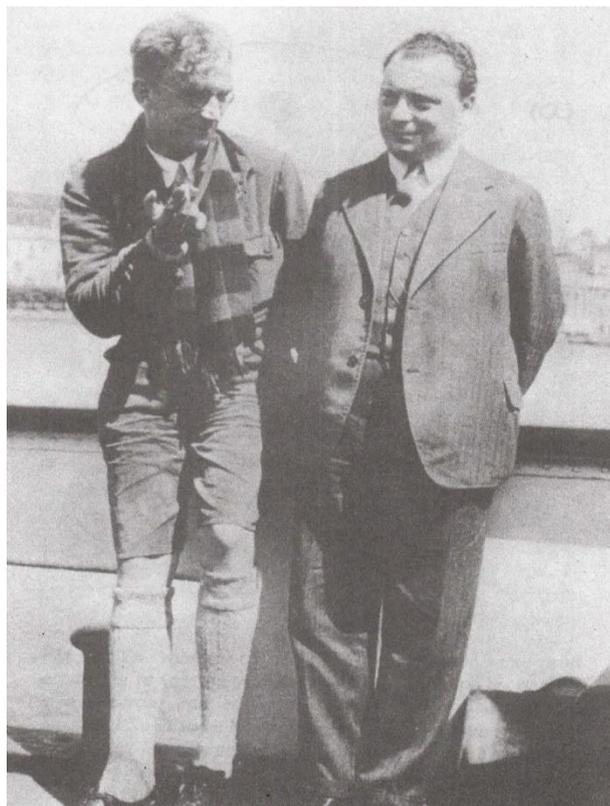
Pauli já conhecia o trabalho de Jung. Antes de conhecê-lo, já tinha visto em algumas conferências e lido alguns trabalhos de Jung. No começo do seu tratamento, Pauli se consultava com uma discípula de Jung, chamada Erma Rosenbaum. Contudo, devido à personalidade de Pauli e também o interesse de Jung pelos seus frequentes sonhos, o próprio Jung começou a consultar Pauli. Dessa forma, Jung relacionou os sonhos que Pauli tinha à alquimia, escrevendo até um livro depois chamado *Psychology and alchemy*. Também relacionou seus sonhos a um símbolo da mandala, ao ego, ou intelecto (mephisto) e a anima. Fazendo interpretações e avanços importantes para a psicanálise e para o tratamento de Pauli. (Enz, 2003; Pauli, 1996).

3.1.1 *Wolfgang Pauli, C. G. Jung e a alquimia*

Como vimos no item anterior, Wolfgang Pauli teve uma vida muito curta, morreu aos 58 anos, deixou seu nome na história não só da física, mas da ciência como um todo, principalmente pela descoberta de um princípio fundamental da natureza: o Princípio da exclusão, e pela proposta da existência dos neutrinos, que foram comprovados experimentalmente 30 anos depois.

George Gamow (1904-1968), físico ucraniano naturalizado norte-americano, em seu livro *“Thirty years that shook Physics”* (Gamow, 1966) afirma que Pauli é conhecido pela descoberta do Princípio da exclusão, pela descoberta dos Neutrinos e pelo “Efeito Pauli”, que era assim que os amigos chamavam os acontecimentos misteriosos que coincidentemente aconteciam sempre que Pauli estava por perto, como, por exemplo, equipamentos que quebravam sempre que Pauli visitava algum laboratório de colegas experimentais. Nas palavras de Gamow (1966), “o efeito Pauli não podia ser explicado em base puramente material” (Gamow, 1966, p. 64). Ver Figura 12:

Figura 12: George Gamow e Wolfgang Pauli.



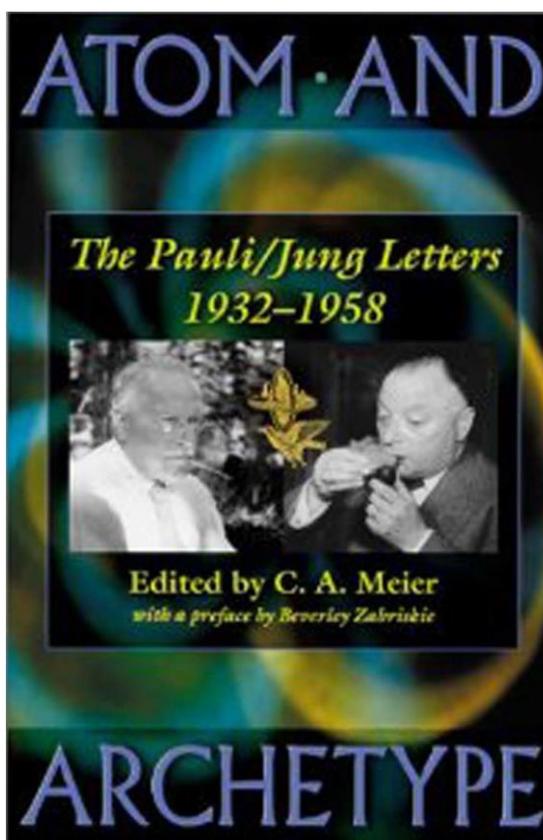
Fonte: Gamow, 1966, p. 71.

Pauli foi figura extremamente ativa no desenvolvimento da Física Quântica, convivendo com os grandes físicos da época como Einstein, Bohr, Schrödinger, Heisenberg, Dirac e Max Born, entre outros. Além de toda a sua atuação na Física, Pauli teve uma interação muito importante com o médico psiquiatra suíço Carl Gustav Jung. Por indicação de seu pai, Pauli procurou Jung para se tratar de problemas psicológicos, eles ficaram amigos e chegaram inclusive a escrever artigos juntos que resultou em livro chamado *escritos sobre física y filosofia*.

Pauli se interessou pelas ideias originais de Jung sobre o inconsciente coletivo, pela Teoria dos Arquétipos e pela interpretação dos sonhos. Jung recebeu de Pauli farto material sobre os seus sonhos. Boa parte da correspondência trocada entre Pauli e Jung permaneceu em sigilo durante muito tempo, até mesmo depois da morte de Pauli em 1958. Sobre isso, Emílio Segrè, físico italiano e Prêmio Nobel de Física de 1959, também contemporâneo de Pauli, afirmou: “esse outro aspecto de sua personalidade, embora aparentemente importante para ele, foi mantido em relativo segredo” (Segrè, 1987). Jung publicou o resultado das primeiras análises dos sonhos de Pauli sem dizer de quem era o material onírico no livro *Psicologia e Alquimia*. (Schemberg, 1984).

Desse modo, somente nos anos 90 tornou-se de conhecimento público as cartas trocadas entre Pauli e Jung, elas foram colocadas no livro *Aton and Archetype*, (figura 13) escrito por Maier. Em 1999, o pesquisador Cesar R. Xavier, escreveu sua dissertação de mestrado em história da ciência pela PUC/SP, baseado na troca de cartas entre Pauli e Jung, que mais tarde se tornaria um livro intitulado a “permuta dos sábios: um estudo sobre as correspondências de Carl Gustav Jung e Wolfgang Pauli.

Figura 13: Capa do livro *Aton and Archetype*.

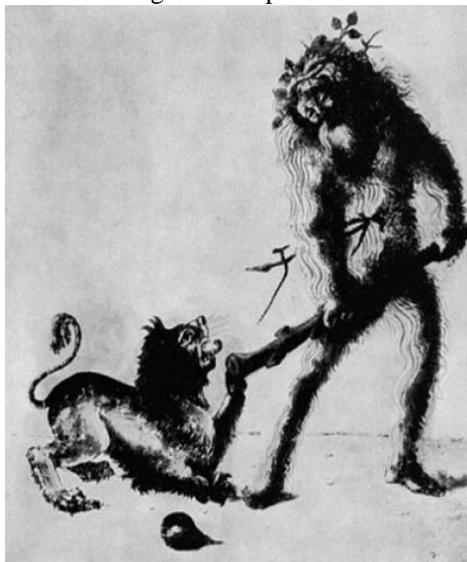


Fonte: capa do livro *Aton and Archetype*.

No farto material onírico de Pauli, Jung encontrou fortes evidências de conteúdos relacionados com a Alquimia. Segundo o físico teórico brasileiro Mário Schemberg (1914-1990) “a obra de Jung teve o mérito de aproximar a Psicologia e a Alquimia” (Schemberg, 1984, p. 83). Em vários sonhos descritos por Pauli aparecia a figura de um monstro que ele chamava de “ape-man”, homem macaco (Figura 13). “Jung mostrou a ele que a mesma figura aparecia em um texto de Alquimia escrito quatrocentos anos antes” (Miller, 2009, p. 186). Dessa forma, Pauli se convenceu dos argumentos de Jung sobre a Alquimia que estava presente nos seus sonhos. Jung na sua análise dos sonhos de Pauli não buscava explicações sobre o que levava Pauli a ter ideias tão originais, como, por exemplo, a do Princípio da exclusão. O fato

de Jung ter identificado conteúdo de Alquimia nos sonhos de Pauli se deveu principalmente à sua vasta cultura e conhecimento de literatura antiga.

Figura 14: Ape-man.



Fonte: Miller 2009, p. 186.

Além disso, não devemos esquecer que várias descobertas importantes na Química tiveram a participação dos sonhos de forma determinante. É só lembrar os casos de Kekulé sobre a estrutura do Benzeno, de Mendeleev sobre a estrutura da Tabela Periódica dos elementos e a descoberta de Werner da estrutura de complexo de cobalto (Farias; Neves, 2011).

Jung ter encontrado conteúdos de alquimia nos sonhos de Pauli chama a atenção por se tratar de um grande físico teórico conhecido pela sua genialidade e por ser chamado por vários colegas de “a consciência da física”. O conhecimento contido principalmente nas cartas trocadas entre Pauli e Jung não pode ser explorado porque a segunda esposa de Pauli, a Sra. Franca Pauli, não permitiu a publicação desse material, fato que só aconteceu bem depois de sua morte em 1987. As cartas só foram publicadas pela primeira vez em 1992 em uma edição alemã e posteriormente em espanhol (1996) e finalmente em inglês (2001) (Xavier, 2003).

Boa parte de toda a história de Pauli só pode ser conhecida com a publicação da biografia escrita pelo seu último assistente na Escola Politécnica de Zurique, o físico Charles Enz (1925-2020). Além de ter convivido com Pauli por um bom tempo, o Prof. Enz teve acesso a todos os objetos pessoais de Pauli disponibilizados pela Sra. Franca Pauli antes de sua morte. A biografia de Pauli escrita pelo Prof. Charles Enz só foi publicada em 2002 (Enz, 2002).

3.2 Princípio da exclusão e a classificação periódica dos elementos

No início do século XX, Niels Bohr, cientista dinamarquês, que havia trabalhado com Joseph Thomson, resolveu se debruçar no modelo atômico com núcleo de seu antigo professor Ernest Rutherford. O grande desafio de Bohr, era explicar porque os elétrons do modelo de Rutherford, não se colapsam com o núcleo, devido aos princípios do eletromagnetismo, os elétrons por apresentarem cargas elétricas negativas perdem energia ao orbitar o núcleo e isso inviabilizaria a existência do átomo. (Vieira, 2015).

Tentando achar resposta para essa questão, Bohr começou a estudar as raias espectrais, a qual são a base da espectroscopia de emissão, que ocorre quando um gás sofre uma descarga e observa-se a emissão de linhas com cores brilhantes em um fundo escuro. (Jewett; Serway, 2013). Bohr, tinha a capacidade de relacionar fenômenos que pareciam desconexos, ajudando o físico Charles Galton Darwin, neto do famoso Charles Darwin, a resolver um problema sobre a perda de energia entre o choque das partículas alfa com os elétrons. Os cálculos de Darwin não batiam com os dados experimentais, porque ele considerava os elétrons como livres dentro do átomo. Contudo, Bohr conhecia as ideias de Max Planck, sobre a energia quantizada, com isso, ele considerou que os elétrons possuíam vibrações que absorviam e liberavam energia de forma quantizada, ou seja, em pequenos pacotes. (Vieira, 2015).

Com essa ideia, Bohr deu início ao seu modelo atômico quântico, no entanto, o que mais influenciou na proposta desse modelo foi a fórmula de Balmer, essa fórmula descrevia com precisão as raias espectrais do átomo de hidrogênio. Porém, até então, ninguém sabia o que significava de fato essa fórmula e em que poderia ser utilizada. Bohr de forma surpreendente conseguiu relacionar a fórmula de Balmer com energia em forma de quantum que o elétron recebe. (Vieira, 2015). Dessa forma, Vieira (2015) descreve que:

[...] o elétron, ao girar em torno do núcleo, só pode fazer isso caso se mantenha em órbitas predeterminadas. Se o elétron receber luz – ou seja, um quantum de energia – , ele salta para uma órbita mais energética, passa fração de segundo lá e, ao voltar à sua órbita original, expõe a energia na forma de um quantum. É esse processo, repetido continuamente, que dá origem às raias espectrais. O espaçamento dessas linhas (a descontinuidade) é explicado, então, pelo fato de a luz expelida pelos átomos ser quantizada, ter valores discretos. (Vieira, 2015).

Com isso, Bohr publicou um artigo em 1913 sobre o seu modelo atômico quântico, no qual apresenta o elétron em uma órbita estável, com uma energia mínima que o impede de se colidir com o núcleo e quando excitado, ou seja, com alta energia, o elétron se mostra instável e sai da sua órbita para outra de mais alta energia, depois libera esse excesso de energia em forma de luz e volta para sua órbita de origem. Bohr, conseguiu descrever muito bem o átomo

de hidrogênio, que possui apenas um elétron, no entanto, com átomos com mais de um elétron se tornava uma tarefa difícil para calcular as muitas órbitas hipotéticas que surgiam. (Lopes, 1992).

Nesse momento, entra em cena, Arnold Sommerfeld, físico teórico respeitado, professor na Universidade de Munique e orientador Pauli e Heisenberg, que teve papel importante para o melhoramento do modelo atômico de Bohr. Sommerfeld tinha um grande conhecimento em matemática aplicada na física teórica e utilizou para melhorar o modelo proposto por Bohr. (Kumar, 2010).

Figura 15: Sommerfeld e Pauli.



Fonte: Miller 2009, p. 182

Bohr, afirma que os elétrons se moviam em órbitas circulares ao redor do núcleo, contudo, Sommerfeld, sabendo que órbitas circulares de elétrons fazem parte de um subconjunto de órbitas elípticas quantizadas, utilizou esse conhecimento para modificar o modelo atômico de Bohr, adicionado ao número quântico n (principal), mais dois números quânticos o ℓ (secundário), para quantificar uma órbita elíptica e o terceiro número quântico o m (magnético), para explicar o efeito Zeeman para o átomo de hidrogênio. O efeito Zeeman é a parte crucial para entender como Pauli chegou ao seu princípio da exclusão. (Kumar, 2010).

Para falar do princípio da exclusão, tem-se que ir à sua origem. Pauli começou estudando o efeito Zeeman, em homenagem ao cientista holandês Pieter Zeeman, que descobriu a repartição de linhas espectrais por campos magnéticos intensos. Nessa época, Pauli estava estudando em Copenhague com o dinamarquês Niels Bohr, seu trabalho era tentar explicar o

efeito Zeeman, que intrigava todos os cientistas da época e não se tinha uma explicação até então. Em 1923, Pauli voltava para Hamburgo, porém triste por ainda não ter conseguido avançar em nada sobre a explicação do efeito Zeeman. (Kumar, 2010; Miller, 2010).

Em 1924, Pauli praticamente já havia desistido de explicar o efeito Zeeman, contudo, sempre estava lendo artigos sobre o assunto, quando se deparou o quarto livro do seu professor Sommerfeld, *Atomic Structure and Spectral Lines*, que havia no prefácio a citação de um artigo da revista *Philosophical Magazine*. Pauli buscou esse artigo o mais rápido possível para lê-lo. Esse artigo foi escrito por Edmund Stoner, que fazia pós-graduação em Cambridge, e estava sendo orientado por ninguém menos que Ernest Rutherford. Seu artigo tinha como título '*The Distribution of Electrons Between Atomic Levels*', em tradução livre, "a distribuição de elétrons em níveis atômicos". Neste trabalho Stoner, sugeriu que os elétrons da camada de valência de um átomo alcalino têm mais estados de energia para assumir do que os elétrons da última camada fechada dos gases nobres em sequência na tabela periódica. (Kumar, 2010; Miller, 2010).

Desse modo, Stoner chegou à conclusão que o número quântico principal (n) corresponde a uma camada de elétrons do modelo de átomo de Bohr, e ela só estaria completamente preenchida (fechada), quando número de elétrons que possui atingir o dobro do seu número de estados de energia possíveis, ou seja, existia uma quantidade fixa de elétrons em cada camada e essa quantidade seria o dobro do número quântico principal. Stoner, chegou a essa conclusão, após calcular, de forma inteligente, o número de possibilidades (multipletos) de um átomo alcalino que emite as linhas espectrais do efeito Zeeman. Com tudo, Stoner foi um pouco mais além que Heisenberg e Bohr, que já haviam feito esse experimento, conseguindo assim, relacionar o número total de elétrons de cada camada à quantidade de estados possíveis para cada elétron. (Kumar, 2010; Miller, 2010).

Stoner não foi mais além em seus estudos, mas fez com que Pauli se inspirasse e concluísse que no trabalho de Stoner havia algo novo ainda escondido. Pauli decidiu entender melhor o método de Stoner e aplicou um quarto número quântico que possuísse valores de $+1/2$ e $-1/2$ para o elétron solitário. Dessa forma, a regra descoberta por Stoner levou Pauli a perceber que todos os valores possíveis que os números quânticos poderiam assumir era igual a $2n^2$ sendo "n" o número quântico principal ($n=1, 2, 3, \dots$), que era justamente o mesmo valor que Bohr propôs no seu modelo atômico, porém sem cálculo ou base nenhuma. Essa descoberta de Pauli, se mostrou correta já que casava com a organização dos elétrons dos elementos químicos nos períodos da tabela periódica 2, 8, 18, 32 e assim por diante. (Hall, 1986; Kumar, 2010; Miller, 2010).

Pauli foi além, propôs também que cada elétron do átomo, possuía dois valores possíveis para o quarto número quântico, estando em um campo magnético ou não. Isso foi fundamental para explicar a organização da tabela periódica como conhecemos hoje, por Pauli afirmar que o elétron possui quatro números quânticos e não três e que dois ou mais elétrons de um átomo não poderiam apresentar os quatro números quânticos iguais, ou seja, dois elétrons com os números quânticos iguais não poderiam ocupar o mesmo nível energético, então surgia assim, o princípio de exclusão de Pauli. Quem deu e ajudou a espalhar esse nome foi Paul Dirac, que destacou o trabalho de Pauli, falando sobre a importância desse trabalho para a explicação de diversos fenômenos do universo e tudo que existe nele, como o Princípio da exclusão obriga os elétrons a ocuparem o estado de mais alta energia, o que explica a existência de diferentes tipos de átomos e suas características únicas e como se manifestam de formas e estados diferentes. (Farmelo, 2009). O próprio Dirac comentou sobre a descoberta do quarto número quântico e essa intrínseca característica do elétron e suas propriedades:

“... o princípio da exclusão de Pauli explica por que o elétron extra do sódio não simplesmente se junta aos outros e forma um tipo quase idêntico de átomo; em vez disso, ele ocupa um estado quântico de alta energia que é responsável pelas diferenças entre o comportamento dos dois elementos. Pela mesma razão, se não houvesse princípio da exclusão, o mundo ao nosso redor não teria nenhuma da enorme variedade de formas, texturas e cores que consideramos naturais. Não apenas nossos sentidos não teriam nada para perceber, eles não existiriam. Nem, de fato, os seres humanos ou mesmo a própria vida.” (Farmelo, 2009, p. 103).

A descoberta de Pauli foi fantástica porque explicava vários fenômenos ainda não explicados como, por exemplo, o efeito Zeeman, o átomo de Bohr, o porquê da primeira camada só possuir 2 elétrons e a segunda 8 e a terceira 18. Por estar totalmente relacionado com a organização dos elétrons, o princípio da exclusão é determinante para a classificação periódica no formato atual (Baker, 2015; Kumar, 2010).

O princípio da exclusão de Pauli é de suma importância para a química, porque não está restrita apenas aos elétrons, por definição o princípio da exclusão de Pauli afeta todos os férmions, partículas que constituem o átomo, o próton, o nêutron e o elétron. Férmions, que são partículas que possuem spin semi-inteiros e que obedecem à estatística de Fermi-Dirac, partículas de spin inteiro são chamados de bósons. (Baker, 2015; Bassalo; Caruso, 2013; Bispo; Nunes, 2018; Hall, 1986; Kaplan, 2013).

Por conta disso, podemos explicar o porquê de dois objetos não poderem ocupar o mesmo espaço, porque conforme o princípio da exclusão como um férmion não pode estar no mesmo lugar e local que outro férmion, e são eles que formam a matéria. Então conclui-se que a matéria não pode ocupar o mesmo espaço que já está ocupado, isso dá a característica de

sólido à matéria, já que a maior parte do átomo é vazio, afinal, férmions idênticos não ocupam o mesmo estado quântico. Também está associado à organização da tabela periódica, já que somente dois elétrons podem ocupar um orbital, porque os números quânticos são diferentes e isso leva a toda a organização eletrônica da tabela periódica, lembrando que são os elétrons da camada os principais responsáveis pelas propriedades químicas de um elemento (Baker, 2015; Bispo; Nunes, 2018; Kaplan, 2013).

Na mesma época em que Pauli desenvolvia o princípio da exclusão, Goldsmith e Uhlenbeck, dois alunos de Paul Ehrenfest também estudavam o efeito Zeeman. Eles descobriram que aquele fenômeno ocorria devido a uma propriedade do elétron que eles chamaram “Spin”. Goldsmith e Uhlenbeck consideraram que um elétron age como uma bola eletricamente carregada que gira formando assim um campo eletromagnético, semelhante ao giro que o planeta Terra faz em torno de seu próprio eixo, o próprio nome Spin significa giro. Com isso, pode-se comprovar mediante um experimento que o elétron possui duas direções para girar, uma contrária a outra, essas direções do elétron explicavam as divisões das linhas espectrais do efeito Zeeman (Baker, 2015; Hall, 1986; Kaplan, 2013; Martins, 2014).

A descoberta do Spin é cheia de curiosidades. Goldsmith e Uhlenbeck eram jovens na época que propuseram a hipótese do Spin do elétron. Eles eram orientados por Paul Ehrenfest, cientista mais liberal na concepção das ideias e muito amigo de Einstein. Contudo, Kronig, assistente de Pauli, também teve a mesma ideia do Spin um pouco antes que Goldsmith e Uhlenbeck e associava ela a um quarto número quântico. Pauli rejeitou a proposta de Kronig e afirmava que havia muitas inconsistências. Goldsmith e Uhlenbeck, ficaram sabendo da rejeição de Pauli que já possuía fama na época. Ehrenfest já tinha mandado o artigo sobre a hipótese do Spin, para publicação em uma revista de Física, para surpresa de todos o artigo não foi recusado e as críticas de Pauli, sobre o Spin, foram consideradas injustas, em pouco tempo o artigo foi publicado em duas importantes revistas, sendo uma delas a Nature no ano de 1926. (Martins, 2014; Miller, 2010).

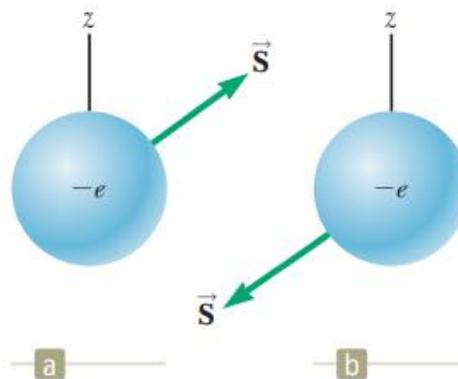
Figura 16: Pauli e Ehrenfest rindo de uma piada.



Fonte: Miller 2009, p. 180.

O Spin surgiu para explicar o problema das raias espectrais, da estrutura fina e hiperfina no efeito Zeeman, que aparecia quando se aplicava um campo magnético intenso no local em que um átomo emitia as radiações. O giro do elétron em seu próprio eixo (Figura 17), era das poucas ideias que os cientistas ainda não haviam levado em conta. Pela hipótese, o giro era o responsável pelo surgimento de um momento magnético intrínseco que levaria a um aumento energético, explicando assim o desdobramento dos níveis de energia e sendo chamado de efeito Zeeman em homenagem ao seu descobridor. (Martins, 2014).

Figura 17: Representação dos spins dos elétrons



Fonte: Jewett & Serway (2013, p. 247).

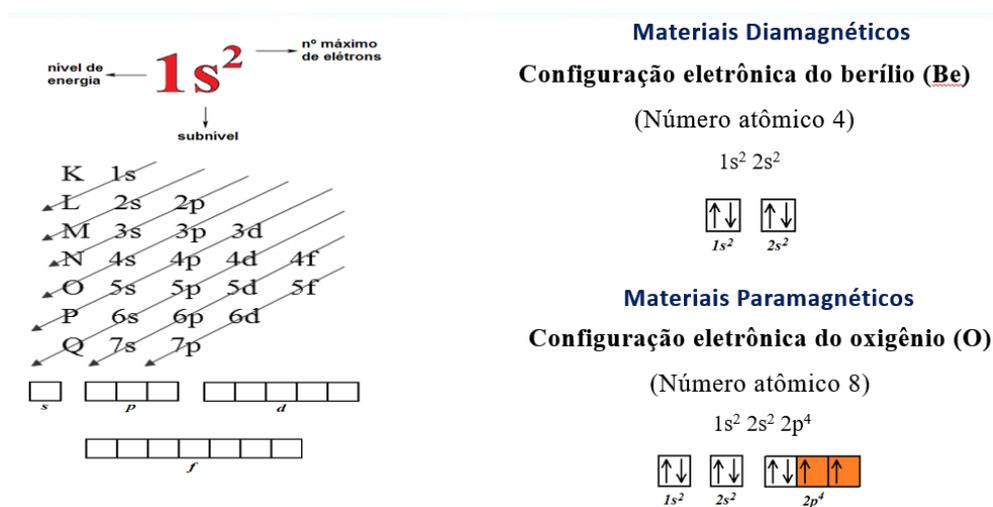
Goldsmith e Uhlenbeck, muito pouco tempo depois, publicaram o artigo sobre o Spin em 20 de novembro 1925. Muitas críticas apareceram. Um fato interessante foi o de Bohr que viajou para o Leiden, para as comemorações do 50º aniversário do doutorado de Lorentz.

Quando chegou em Hamburgo, logo se encontrou com Pauli, que foi logo perguntando o que ele achava do artigo sobre o Spin do elétron. Bohr desaprovava. Achava que tinha algum defeito e seguiu viagem para Leiden. Quando chegou, deu logo de cara com Einstein e Ehrenfest. Bohr então já foi despejando todas as suas objeções sobre o spin, contudo Einstein, já havia resolvido todos os problemas utilizando a Teoria da Relatividade. Depois de toda a explicação, Bohr aceitou e afirmou que foi uma revelação completa sobre o spin do elétron. Em seguida, lamentou profundamente pela rejeição do Spin do elétron quando Kronig estava em Copenhague argumentado sobre o assunto com ele. (Martins, 2014).

Contudo, Pauli demorou mais a aceitar o conceito de Spin e associá-lo como sendo o quarto número quântico. O Spin do elétron era realmente uma característica intrínseca ao elétron. Depois que todos os pontos que faziam Pauli rejeitar o Spin quântico foram resolvidos e esclarecidos Pauli cedeu e aceitou o Spin, o que levou a se sentir muito culpado por desencorajar Kronig, que teve essa ideia primeiro. (Martins, 2014; Miller, 2010).

Um conceito associado ao quarto número quântico, o spin é sobre o magnetismo dos materiais, isso ocorre devido ao emparelhamento ou não dos elétrons, lembrando que devido ao princípio de Pauli somente dois elétrons podem ocupar o mesmo orbital cujo spin possui um campo eletromagnético, isso gera polos. Quando os elétrons estão emparelhados, um elétron anula o campo eletromagnético do outro e dizemos que esse material é diamagnético. Quando ocorre o contrário e os elétrons estão desemparelhados, ou seja, os efeitos magnéticos não se cancelam, então dizemos que o material é paramagnético. Veja o exemplo do berílio e do oxigênio. (Brady, 2016; Barreto; Barros, 2019.)

Figura 18: Configuração eletrônica de spin do Berílio e do Oxigênio.



Fonte: Adaptado Barreto e Barros, 2019.

Como podemos observar no exemplo, a distribuição eletrônica do berílio nos orbitais os elétrons são representados pela setinha para cima e para baixo que indica se o spin é positivo ou negativo, dessa forma eles estão emparelhados um para cima e outro para baixo, anulando assim o campo eletromagnético dos elétrons e tornando o berílio um material diamagnético. Contudo, no oxigênio ocorre um desemparelhamento dos elétrons, como mostra a figura 20, mantendo o campo magnético dos elétrons, dessa forma classificamos como um material paramagnético e chegamos à conclusão que quando se conhece a susceptibilidade magnética do material com a distribuição eletrônica dele, obedecendo ao Princípio da exclusão de Pauli, consegue-se classificar os materiais em diamagnéticos ou paramagnéticos. (Brady, 2016; Barreto; Barros, 2019.)

A descoberta por Pauli do quarto número quântico e do Princípio da Exclusão foi fundamental para explicar a organização da tabela periódica como conhecemos hoje, inclusive, o termo “Princípio da Exclusão” foi criado pelo físico britânico que sempre destacava a importância do trabalho de Pauli (Farmelo, 2009, p. 103). Segundo Sommerfeld (1931, p. 155) em seu livro já citado: “a distribuição dos elétrons nas camadas eletrônicas era feita de forma errada mesmo por Bohr. A segunda camada, que todos sabiam possuir 8 elétrons, eram distribuídas por Bohr em 4 + 4 elétrons. A terceira camada, que possui 18 elétrons, era organizada por Bohr como 6 + 6 + 6. Graças a Stoner e Pauli hoje sabemos que a distribuição é 2 + 6 na primeira camada e 2 + 6 + 10 elétrons na terceira camada”. Esse fato descrito por Sommerfeld ilustra bem a consequência do Princípio da Exclusão na organização da Classificação Periódica e consequentemente no entendimento das propriedades químicas dos elementos.

Embora fosse muito amigo de Pauli, logo após a sua morte, Bohr chegou a afirmar que: “Pauli era absolutamente maravilhoso, mas havia absolutamente nenhuma palavra que seja nova no princípio de Pauli”. Para Bohr o Princípio da Exclusão poderia realmente ser chamado de “Princípio de Stoner.” (Miller, 2009, p. 348). No entanto, Miller (2009, p. 348) também afirma: “na verdade, embora Stoner estivesse perto de descobrir o princípio da exclusão, ele foi incapaz de dar o salto final. Com uma compreensão mais profunda do problema, Pauli fez.”

O princípio da exclusão de Pauli afirma que não existem dois elétrons com valores idênticos em seus quatro números quânticos. Para entender isso de forma simples, se o átomo possui sua configuração eletrônica $1s^2$, os números quânticos seriam distribuídos como mostra na tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Distribuição dos números quânticos para o orbital $1s^2$.

1° elétron.	2° elétron.
n ; número quântico principal, corresponderia ao 1	n ; número quântico principal, corresponderia ao 1
ℓ ; número quântico secundário, corresponderia a 0	ℓ ; número quântico secundário, corresponderia a 0
m_ℓ ; número quântico magnético, corresponderia a 0	m_ℓ ; número quântico magnético, corresponderia a 0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Dessa forma, é nítido que tanto o primeiro elétron quanto o segundo possuem os mesmos números quânticos. Contudo, o princípio da exclusão exige que os números quânticos sejam diferentes, desse modo um quarto número quântico se faz necessário, nesse momento entra a sacada de Pauli, que propôs um quarto número quântico que seria depois chamado de spin (m_s), história que contaremos a seguir. O quarto número quântico serviria justamente para diferenciar os elétrons, ou seja, o primeiro elétron vai ter o $m_s = +1/2$ e o segundo $m_s = -1/2$. (Brady, 2016; Atkins, 2012; Leite, 1992).

Isso explica muita coisa como, por exemplo, somente dois elétrons podem ocupar simultaneamente o orbital $1s$. Dessa maneira o princípio da exclusão de Pauli diz que somente dois elétrons podem ocupar um mesmo orbital no máximo e quando isso ocorrer os dois elétrons devem possuir os spins opostos e isso também limita as populações máximas de elétrons nas camadas e subcamadas como mostrado na tabela 2 e 3:

Tabela 2: Limite de elétrons por subcamada.

Subcamada	Número de orbitais	Número máximo de elétrons
s	1	2
p	3	6
d	5	10
f	7	14

Fonte: Brady, p. 279.

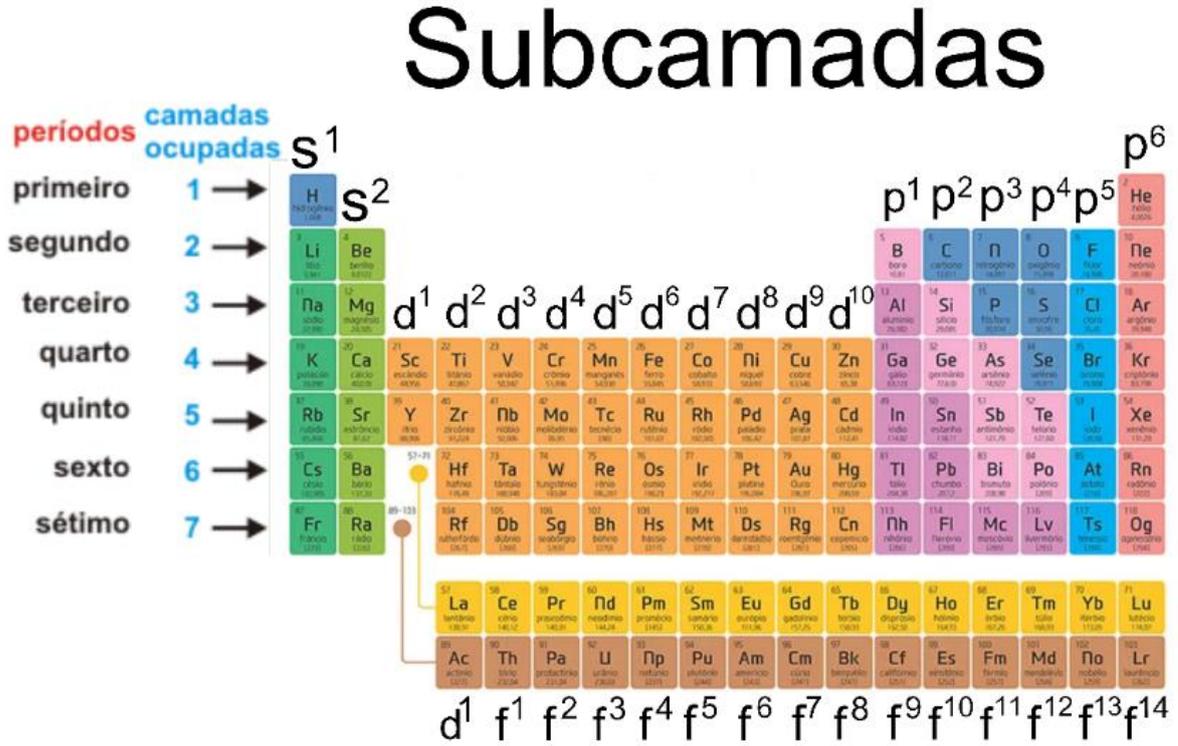
Tabela 3: Limite de elétrons por camadas.

Camada	Subcamadas	Máximo de elétrons por camada
1	$1s$	2
2	$2s$ $2p$	8 (2+6)
3	$3s$ $3p$ $3d$	18 (2+6+10)
4	$4s$ $4p$ $4d$ $4f$	32 (2+6+10+14)

Fonte: Brady, p. 279.

Portanto, o princípio da exclusão de Pauli, corrigido por Bohr e até outros cientistas dividiram os elétrons em camadas e subcamadas (subníveis), organiza toda a tabela em períodos (camadas) e subcamadas (figura 18), isso explica alguns fenômenos como o efeito Zeeman. (Brady, 2016; Atkins, 2012; Leite, 1992).

Figura 19: Tabela periódica dividida em camadas (períodos) e subcamadas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos foi feito um levantamento bibliográfico histórico sobre a vida de Wolfgang Pauli, o princípio da exclusão e sua relação com a Classificação Periódica dos elementos com o intuito de produzir um E-book, ferramenta que poderá ser utilizada como material de apoio para a preparação de aulas e desenvolvimento de atividades sobre o tema.

Para tornar o conteúdo do E-book ainda mais atrativo e atual, contatamos o Prof. Dr. José Tavares de Souza (in memoriam) da Universidade Estadual da Paraíba em Campina Grande que além de pesquisador também é repentista e se prontificou em preparar um “repente” sobre Pauli e o Princípio da exclusão que terá como rima principal (o “mote”): “o Princípio da exclusão é uma lei fundamental da natureza”. Fica nosso agradecimento pela ajuda.

4.1 A pesquisa

A pesquisa sustenta-se na utilização do método qualitativo de pesquisa que segundo Minayo (2010) a pesquisa qualitativa procura “desvelar” processos sociais que provavelmente ainda não são de conhecimento da sociedade e busca proporcionar o desenvolvimento de novas abordagens, conceitos e categorias do fenômeno estudado.

Dessa forma, a utilização da pesquisa qualitativa é uma ótima escolha, porque os professores participantes terão a oportunidade de expressar suas opiniões. Segundo Minayo (1992) e Durval (2016), a pesquisa qualitativa carrega uma aproximação entre o sujeito e o objeto de mesma natureza, fazendo com que se desenvolva empatia aos motivos, projetos dos atores e as intenções, fazendo com que suas ações, relações e estrutura se tornem significativas.

A pesquisa foi realizada em duas etapas, na qual a primeira foi um levantamento bibliográfico cuja função foi produzir um E-book sobre a riquíssima história de Pauli e seu princípio da exclusão. Lakatos e Marconi (2010, p. 166), afirmam que uma pesquisa bibliográfica “abrange toda bibliografia já tornada pública em relação ao tema de estudo. [...] Sua finalidade é colocar o pesquisador em contato direto com tudo o que foi escrito, dito ou filmado sobre determinado assunto”.

A segunda parte foi a realização de um questionário (Apêndice B), segundo Gil (1999, p.128), pode ser determinado “como a técnica de investigação composta por um número mais ou menos elevado de questões apresentadas por escrito às pessoas, tendo por objetivo o conhecimento de opiniões, crenças, sentimentos, interesses, expectativas, situações vivenciadas, etc.”. O

questionário visa verificar a aceitação do produto educacional, se ele está de acordo com seu público-alvo (ensino médio), se sua escrita está de fácil entendimento para seu público e se os professores utilizariam em suas aulas.

4.2 Identificação e caracterização dos participantes da pesquisa

Todos os participantes são professores, 21 participantes no total, dos quais 18 lecionam química, 2 lecionam biologia e 1 física. A experiência dos participantes varia muito. Dos 21 participantes, um tem apenas 4 meses no exercício da função, enquanto outro tem 20 anos de sala de aula. 19 dos professores lecionam no ensino médio e apenas 2 no fundamental.

Para evitar exposição e preservar a identidade dos participantes, a cada professor foi atribuído um código conforme a ordem que enviaram as respostas. Desta forma, os códigos foram: (P1) - professor 1; (P2) - professor 2; (P3) - professor 3; até o último professor (P21) – Professor 21.

4.3 Construção do Produto

O produto foi feito utilizando um modelo disponível no *Word Office*®, versão 2013, utilizando o levantamento bibliográfico realizado na pesquisa. A linguagem do E-book é acessível e de fácil entendimento, de modo a aproximar o leitor do produto com muitas imagens e questões que o leitor possa responder somente lendo os textos.

O questionário para avaliação do E-book foi realizado na plataforma do “*GOOGLE forms*”®, enviado para os professores mediante link de acesso. A plataforma permite criar formulários de forma rápida e eficaz e obter respostas em forma de gráficos, o que ajuda muito na análise das respostas.

O questionário foi dividido em duas partes, um com perguntas sobre a vida profissional dos entrevistados e a segunda parte com perguntas sobre o produto educacional (E-book), com perguntas abertas e fechadas. Dessa forma as questões abertas permitem aos participantes total liberdade de resposta, as fechadas possuem um grupo de respostas das quais o participante tem a liberdade de escolher uma delas.

4.4 Análise dos dados

O questionário foi aplicado no período de 11/09/2023 à 20/10/2023, as respostas coletadas foram transcritas pelo autor respeitando toda a sua integridade, mantendo seu conteúdo na íntegra.

5. PRODUTO EDUCACIONAL

Como consequência deste trabalho foi preparado um produto educacional (P.E). De acordo com esse material, o professor de química poderá ter como auxílio para sua aula um guia no formato de e-book, que segue uma sequência lógica e que adota uma breve introdução histórica sobre a química quântica, em seguida a história de Wolfgang Pauli e sua contribuição para a organização da tabela periódica.

A tecnologia vem avançando muito rápido nos últimos tempos, com a palavra quântica tendo estado muito presente no ambiente escolar, contudo muitas vezes o tema é tratado de forma completamente equivocada sendo associado a pseudociências ou a objetos como, por exemplo, a venda de “colchões quânticos”. Sendo assim, é muito importante que os alunos tenham um conhecimento básico sobre a teoria quântica. Sendo assim, a química quântica foi implementada no currículo escolar de Pernambuco para o novo ensino médio, fazendo parte da grade curricular de Química (Pernambuco, 2021).

Dessa forma, o produto educacional (P.E.) tem como proposta auxiliar a aula do professor sobre esse tema e ajudá-lo a planejar a mesma, o P.E apresenta uma breve história sobre a teoria quântica e seus principais cientistas, entrando no tema central que é a história de Pauli e a importância do princípio da exclusão para a organização da tabela periódica. Como o docente irá utilizar o PE ficará a seu critério, dessa forma o docente vai ter mais liberdade para poder escolher a metodologia que queira aplicar com esse assunto.

Com isso, o produto tem como finalidade fornecer mais conhecimento sobre a teoria quântica e a história de Pauli, estando assim conforme o novo organizador curricular de Pernambuco de modo a auxiliar os professores na tarefa de divulgação do conhecimento para que os alunos consigam diferenciar o que é teoria quântica enquanto ciência, das *fake News* que existem sobre o assunto.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi a elaboração de um E-book sobre Wolfgang Pauli e o princípio da exclusão (apêndice A), com isso, também foi elaborado um questionário (apêndice B), para avaliar entre os professores de química, se os conteúdos estão segundo o nível do novo ensino médio. Desta forma, o questionário foi dividido em duas partes, a primeira relacionada ao perfil dos professores participantes e a segunda uma análise do E-book pelos mesmos. Com isso, apresentam-se as respostas obtidas e o resultado e discussão acerca do questionário.

Na primeira parte do questionário foi traçado um perfil dos participantes, no qual a primeira questão foi sobre o nível de escolaridade, em que todos os participantes possuem ensino superior completo, sendo 4 deles com especialização, 3 dispõem de mestrado completo, 1 com doutorado, 4 com pós-graduação, 1 respondeu que possuía pós-graduação incompleta, 2 que ainda estavam cursando o mestrado e 6 com o ensino superior. Os participantes que responderam ter ou está cursando uma pós-graduação não indicaram qual seria.

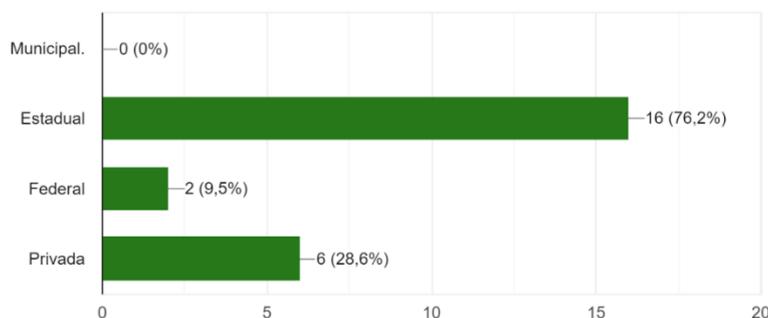
A segunda pergunta foi sobre qual disciplina lecionam atualmente, 16 participantes lecionam somente química, 1 em química, bioquímica e tecnologia e inovação, 1 leciona biologia e química e 3 lecionam outras matérias, sendo um em biologia, outro em física e o terceiro em ciências e biologia. Em sua grande maioria, lecionam química, o que torna relevante as suas respostas porque são o público desejado do E-book.

A próxima pergunta foi sobre o tempo de atuação, com experiência entre 0 e 9 anos foram 10 docentes, com experiência entre 10 e 19 anos são 9 participantes e com 20 anos foram 3 docentes, sendo que ao mais novo tinha apenas 4 meses. Isso mostra que professores de diversas faixas de experiência docente participaram do questionário.

A próxima pergunta foi qual tipo de instituição (ou instituições) de ensino que atua, podendo ser marcado mais de uma opção, os resultados mostraram que a maioria atua na rede pública de ensino, em apenas uma instituição de ensino, somente 2 docentes atuam em mais de uma instituição, 4 atuam somente na rede particular como mostrado no gráfico abaixo:

Gráfico 1: Respostas sobre onde atuam os participantes do questionário.

Tipo de instituição (ou instituições) de ensino que atua: (pode marcar mais de uma opção)
21 respostas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Associando a questão anterior, foi perguntado qual o nível de escolaridade eles atuavam como docentes, essa pergunta é importante para saber se os professores lecionam para o público-alvo do E-book, que seria ensino médio e superior. A maioria dos professores leciona no ensino médio, sendo 19 deles, apenas dois lecionam no ensino fundamental, contudo nenhum dos participantes ensinam no ensino superior.

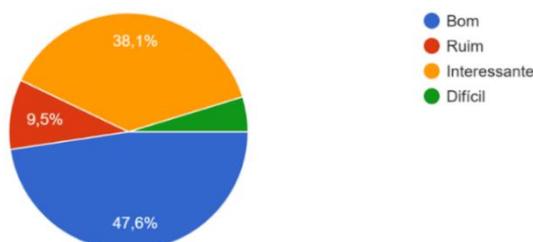
Desse modo, encera-se a primeira parte do questionário, para avaliar o perfil dos participantes. Sendo assim, nessa primeira parte, nota-se que todos os participantes são docentes e estão atuando nas áreas de química, física e biologia, em sua grande maioria, no ensino médio, sendo muito relevante essas informações porque a pesquisa acerta seu público-alvo, somente faltando professores de ensino superior que também podem utilizar o material.

A próxima parte do questionário está relacionado ao E-book, com o intuito de ajudar a melhorar o material, verificar se ele está consoante a proposta curricular de Pernambuco para o novo ensino médio e como os professores participantes utilizariam esse material em sala de aula.

A primeira questão com as respostas está elucidada no gráfico abaixo:

Gráfico 2: Respostas da questão 1 do questionário aplicado

Q1: O que você achou da inclusão de introdução à química quântica, no novo conteúdo curricular de Pernambuco do novo ensino médio?
21 respostas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

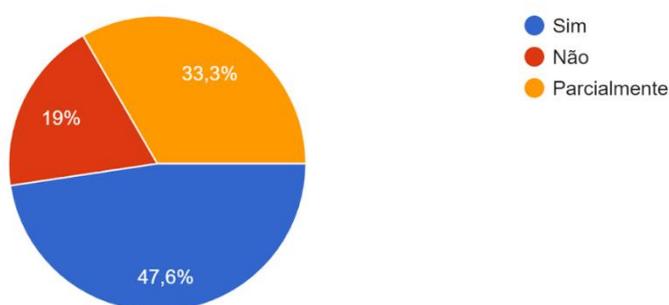
O gráfico mostra que a maioria dos professores respondeu bom ou interessante, isso mostra a necessidade de se ter materiais didáticos sobre o tema, como o e-book proposto nesse trabalho e a importância dele para o auxílio na preparação de uma aula. Uma pequena parte de 9,5% que representa 2 participantes responderam ruim para a introdução da química quântica no ensino médio e apenas 1 participante reportou que seria difícil abordar esse assunto.

A próxima pergunta está relacionada com a anterior, abaixo segue a pergunta com o gráfico das respostas:

Gráfico 3: Respostas da questão 2 do questionário.

Q2: O conteúdo "introdução a química quântica" está de acordo com o programático para a série/nível de ensino, ou seja, 3º ano do ensino médio?

21 respostas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

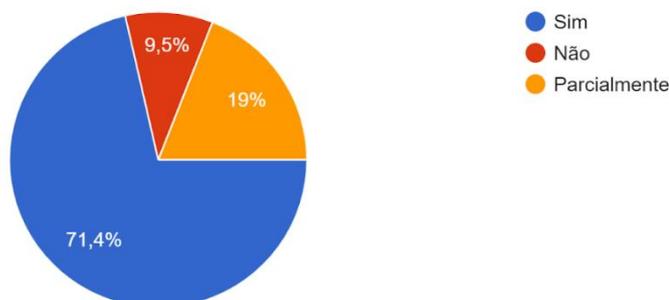
Quase a metade dos participantes responderam sim, contudo quando somamos quais responderam não e parcialmente, chega-se a praticamente um empate, isso deve ocorrer pelo receio de ministrar aulas de quântica, já que o assunto muitas vezes é taxado como difícil, outro fator que deve influenciar nas respostas é o fato de faltar, muitas vezes, base e maturidade científica do aluno, o que torna o ensino e divulgação da química quântica um desafio em sala de aula, principalmente para o ensino médio.

Contudo, a próxima pergunta mostra que a maioria dos docentes que responderam o questionário acreditam que é pertinente a discussão, em sala de aula, sobre a introdução da química quântica, como mostra o gráfico abaixo:

Gráfico 4: Respostas da questão 3 do questionário.

Q3: Você considera o estudo da introdução da química quântica um tema relevante para ser discutido no ensino médio?

21 respostas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Fica claro no gráfico que a maioria acredita que a introdução a química quântica é um tema relevante para se abordar no ensino médio, o que mostra a importância de se ter materiais que esteja conforme o tema e de fácil entendimento para seu público, desmistificando e ajudando a disseminar informação correta sobre o assunto, evitando a crença em *fake News*.

A próxima questão foi se o professor já ministrou aulas sobre a teoria quântica e se sim, se ele (a) conhecia o Princípio da Exclusão de Pauli, 11 participantes responderam que não ministraram aulas sobre a teoria quântica, 10 responderam que sim já ministraram. O quadro abaixo mostra algumas das respostas dos docentes.

Tabela 4: Algumas respostas da questão 4 do questionário.

Q4: Você já ministrou aulas sobre a Teoria Quântica? Se sim, já conhecia a história do Princípio da Exclusão?	
P18	“Não. Nunca ministrei aulas sobre a Teoria Quântica. Por conhecer, já fiz muitas relações enquanto trabalhava outros conteúdos com os estudantes”.
.P5	“Sim já ministrei mas não conhecia a história do Princípio da exclusão”.
P2	“Não ministrei, mas conheço a história do Princípio da Exclusão”.
P17	“Sim. Realizei uma eletiva de Química Quântica ao nosso redor. Os alunos adoraram o tema e o que viram. A história do princípio da exclusão não conhecia, pois da forma que aprendi foi tipo, o princípio é isso e ponto final, sem contexto nenhum”.
P12	“Ensinei de modo superficial. Já conhecia”.

P13	“Ainda não lecionei, porém, tive uma cadeira de introdução a esse conteúdo na faculdade”.
P7	“Sim, já ministrei, conhecia a história por meio da academia, mas a nível de ensino médio a abordagem metodológica e os materiais didáticos ocultam esse contexto, mas tanto a abordagem dos materiais didáticos quanto a linguagem científica tratada sem contextualização histórica torna o processo de ensino e aprendizagem da temática um tanto complicado e escasso”.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Os professores P5 e P2, colocaram respostas interessantes, um afirmou que já ministrou aulas sobre a teoria quântica, mas não conhecia a história do princípio, enquanto o outro não ministrou, mas conhecia a história do princípio. Isso evidencia que mesmo professores que possuem o conhecimento em teoria quântica, às vezes não aplicam ele em sala e outros aplicam, contudo, falta uma parte do conhecimento para ser transmitido, talvez o E-book ajudaria esse professor com a preparação de sua aula aumentando seu conhecimento sobre o tema. Outros professores abordaram o conteúdo de teoria quântica de forma indireta, como o professor P18, que não ministra uma aula sobre teoria quântica, no entanto, apresenta relações da teoria quântica com outros conteúdos. O professor P7 traz uma abordagem provocante, ele já ministrou e conhecia a história pela academia, mas os livros de ensino médio colocam o assunto de forma muito resumido e sem contexto histórico, nas palavras dele: “torna o processo de ensino e aprendizagem da temática um tanto complicado e escasso”. Isso mostra, a importância de novos materiais serem desenvolvidos para o ensino de química e de temas que são muito pouco abordados em livros didáticos, como introdução a quântica e também a parte histórica da ciência que muitas vezes é negligenciada por livros voltados para o ensino de química.

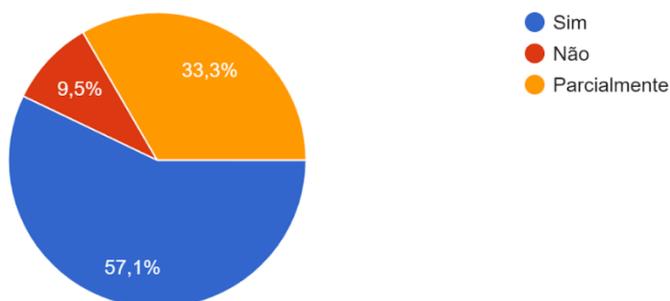
A resposta do professor P17 reforça a discussão, ele faz essa colocação: “A história do princípio da exclusão não conhecia, pois da forma que aprendi foi tipo, o princípio é isso e ponto final, sem contexto nenhum”. Isso evidencia que faltou algo em sua formação acadêmica e consequentemente prejudica na elaboração de suas aulas. Afinal o professor P17, coloca em sua resposta (quadro) que fez uma eletiva sobre introdução a teoria quântica, e que os alunos gostaram do tema e do que aprenderam, talvez se ele já estivesse com um material didático mais voltado para o tema como o nosso e-book pudesse contextualizar melhor suas aulas e apresentar a história por detrás da ciência.

A próxima questão e as respostas estão no gráfico abaixo:

Gráfico 5: Respostas da questão 5 do questionário.

Q5: Você considera o estudo da química quântica, o princípio de exclusão e sua história um tema relevante para ser discutido no ensino médio?

21 respostas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Pouco mais de 50% (12) dos professores entrevistados consideram o estudo da química quântica e o princípio da exclusão um tema interessante para ser discutido e vivenciado nas aulas no ensino médio, 33% (7) responderam parcialmente e 9,5% (2) não consideram. Percebe-se que existe um medo dos professores em entrar nesse assunto sobre teoria quântica porque existe uma “mística” de que é um assunto muito difícil ou que somente pessoas muito inteligentes falam desse tema, o que não é verdade, por isso defendo a divulgação para se ter uma melhor compreensão do tema.

A questão seguinte queria saber dos participantes se eles possuíam o conhecimento de que o Princípio da Exclusão foi formulado por Pauli sem ele utilizar o spin do elétron, 14 responderam que não tinham esse conhecimento e 7 que sim. Essa pergunta é muito relevante porque mostra que é preciso ter um conhecimento histórico da formulação do princípio da exclusão para saber desse fato, o que muitas vezes os livros didáticos e também de ensino superior deixam de lado. Quando os livros abordam o princípio da exclusão de Pauli, geralmente não passam de uma página do capítulo ou um parágrafo e dão a entender que foi Pauli o descobridor do spin, o que não é verdade.

A próxima questão aborda a relevância do conteúdo do E-book para as aulas, 16 responderam que sim, 2 responderam parcialmente e 3 que não. Dessa forma, a maioria acredita ser relevante o conteúdo para ser ensinado em sala de aula. Em seguida foi perguntado se a linguagem do livreto está segundo o nível dos alunos de ensino médio, 17 responderam que sim e estão de acordo e 4 que estão parcialmente de acordo, ou seja, a linguagem se faz adequada para o público-alvo do livreto. Outro questionamento foi se eles utilizariam o E-book em suas

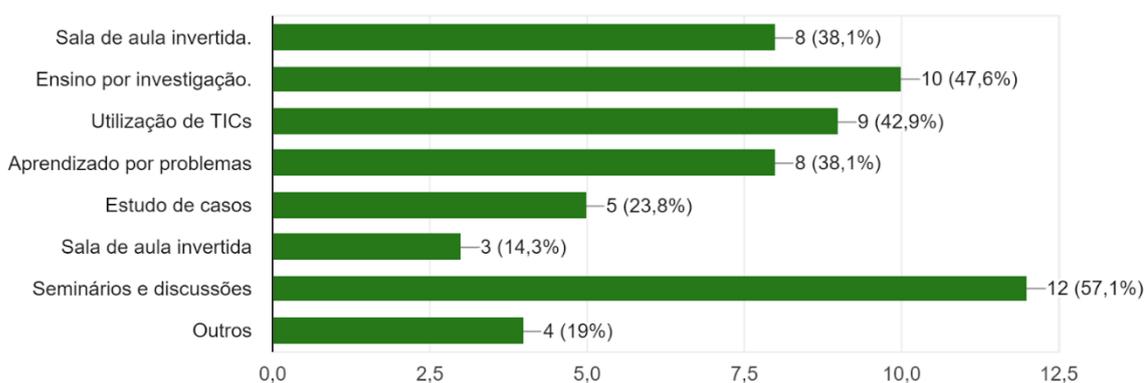
aulas, 18 professores responderam que sim e 3 não, novamente a maioria utilizaria o livro. Dessa forma pode-se concluir que a maioria dos professores gostou do conteúdo do E-book, e aprovam o conteúdo e a linguagem do mesmo, sendo acessível, como material de apoio, aos alunos de ensino médio e também podendo ser utilizado em graduações de química ou física.

O gráfico mostra a respostas dos professores sobre os tipos de metodologias que poderiam ser utilizadas com o E-book em sala de aula, podendo ser escolhida mais de uma resposta.

Gráfico 6: Respostas da questão 10 do questionário.

Q10: Quais tipos de metodologias você utilizaria (pode marcar mais de uma opção).

21 respostas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O gráfico elucidada as muitas estratégias de ensino que podem ser utilizadas e empregadas usando o material, as metodologias mais citadas foram seminários e discussões, ensino por investigação e utilização de TICs (Tecnologia da Informação e Comunicação). Dessa maneira, fica evidente que com o E-book o professor pode trabalhar de diversas formas em sala de aula, escolhendo a melhor estratégia que se adeque a sua realidade escolar e de seus alunos.

Por fim, foi pedido aos professores entrevistados que fizessem um comentário sobre o material, os comentários mais pertinentes foram colocados na tabela 2 abaixo:

Tabela 5: Algumas considerações dos participantes do questionário.

Aqui você pode comentar sobre as questões ou sobre o material e sugerir algo que precisa ser reavaliado ou acrescentado ao E-book.	
P10	“O material está muito bem elaborado. Entretanto, com o Novo Ensino Médio, as aulas de Química foram reduzidas para apenas uma aula no 3º ano, desta forma, é praticamente impossível ministrar todos os conteúdos. Esse Novo Ensino Médio é realmente um retrocesso”.

P12	“Em relação a inserção de quântica no ensino médio é relevante, mas acredito que de forma superficial por se tratar de assunto complexo”.
P17	“Achei muito interessante as questões. Elas estão bem amarradas ao texto de cada capítulo e construídas de forma interessante estimulando o raciocínio e memória do aluno para a resolução. Parabéns pela pesquisa. Fiquei encantando com a história de Pauli”.
P5	“Achei o material muito interessante principalmente pelo resgate histórico contido. Dificilmente é abordado em sala de aula a história da química quântica. Esse assunto é de extrema complexidade para estudantes de ensino médio mas acho ele de extrema relevância. Com certeza abordarei nas minhas aulas de química”.
P2	“Material relevante para ser utilizado em sala de aula”.
P18	“Considero o E-book (na descrição deste formulário vocês faz referência ao material como 'livreto'. Interessante deixar em evidência no próprio material se é um livreto ou um e-book e/ou se é a mesma coisa) um material de excelente. Você conseguiu utilizar uma linguagem acessível para o estudante, relacionando a quantidade de texto com a quantidade de imagem muito bem. Tem as questões finalizando cada parte do conteúdo, novamente, meus parabéns. E seria justamente nas questões que eu modificaria o material. Adicionando questões de ENEM e outros vestibulares como uma forma de incentivar a importância do estudo do tema pelos estudante. Não podemos esquecer que o material é direcionado para estudante do Ensino Médio e muitos deles querem ingressar no ensino superior via ENEM ou outros vestibulares”.
P14	“O material é super didático com uma linguagem bem facil de entender”.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O professor P10 aborda um problema visível do novo ensino médio, a diminuição das aulas de química, contudo utilizando uma metodologia que atenda a escassez de aulas pode-se apresentar o conteúdo de forma satisfatória, os professores P14, P2 e P17 disseram que o material está didático, com textos bem amarrados, relevante para ser utilizado em aula e que estimulam o raciocínio dos leitores, isso mostra que o material está maduro didaticamente e que pode ser utilizado tanto para professores aprenderem mais sobre o assunto, como para divulgarem e ensinarem sobre a história do princípio da exclusão e da teoria quântica.

Os professores P5 e P12, abordam a dificuldade de se trabalhar a teoria quântica em sala de aula, já que o nome “quântica” vem carregado como algo de difícil entendimento, apesar disso eles gostaram do material, disseram que é interessante e relevante principalmente a parte histórica do material, justamente a parte que muitos livros didáticos deixam de lado, isso reforça a importância do material. O professor P18, traz uma sugestão interessante a utilização de questões do ENEM (exame nacional do ensino médio), ou outros vestibulares, realmente é uma sugestão interessante que pode ser colocada no futuro, contudo no atual momento poucas questões abordam o conteúdo sobre teoria quântica por falta de divulgação e ensino nas escolas tornando um assunto pouco colocado nos vestibulares, talvez com a implementação do ensino de química quântica que ocorreu no novo ensino médio pode se tornar um assunto cada vez mais introduzido nos vestibulares, isso somente o tempo dirá.

Perante o resultado, a proposta do E-book foi muito bem aceita pelos participantes, alguns dos professores ainda possuem um receio sobre a dificuldade do assunto, contudo gostaram muito da abordagem histórica, isso mostra que o material pode ser utilizado tanto no ensino médio quanto em graduação como material de apoio.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a importância da história para a aprendizagem, é importante salientar que a história da ciência é riquíssima como podemos ver neste trabalho. A vida de Wolfgang Pauli está totalmente ligada à história da teoria quântica, um tema que carrega muita curiosidade e medo para as pessoas leigas sobre o assunto. Dessa forma, o presente trabalho tem o intuito de divulgar sobre a teoria quântica e sua importância para a química e ajudar professores em suas aulas sobre esse tema para disseminar a bela história de Pauli, do princípio da exclusão e da classificação periódica dos elementos.

Para tratar desse tema, foi desenvolvido um levantamento da história de Pauli. A maior dificuldade foi achar livros ou artigos em português que falem da história de Pauli e como ele chegou ao princípio da exclusão, a grande maioria está em inglês. A teoria quântica no ensino médio traz seus desafios já que praticamente não é abordada nas escolas, dessa maneira desenvolvemos um E-book que poderá ajudar no planejamento do professor e auxiliá-lo em suas aulas. Tentamos tornar o assunto mais atraente possível, com fotos e figuras e uma linguagem de mais fácil compreensão porque entendemos que quando se fala de teoria quântica existe o estigma de que é um assunto muito difícil de entender.

As contribuições feitas pelos professores participantes do questionário mostram que o E-book foi bem recebido e suas contribuições ajudarão a melhorá-lo, tornando um material de mais fácil acesso, por isso a escolha de um formato digital, como o E-book, para disseminar nas redes o conteúdo já que o professor poderá armazená-lo no seu celular, computadores outros dispositivos. Concluímos que as respostas foram muito positivas para a divulgação do material e o conteúdo está com uma linguagem de fácil compreensão, ainda que muitas coisas possam ser melhoradas, como, por exemplo, a inserção de questões de vestibulares ao E-book, a princípio os professores acharam muito satisfatório o material.

Acreditamos que os professores tendo um material para auxiliá-los em suas aulas podem ficar à vontade para escolher a metodologia que irão utilizar em suas aulas, dessa maneira o produto educacional traz a versatilidade de se utilizar diferentes metodologias. Com tudo isso explanado, é possível dizer que o produto educacional foi validado pelos participantes do questionário, embora não simbolizem uma generalização, os comentários feitos sobre o produto foram muito positivos, o que nos motiva a continuarmos melhorando.

Em suma, acreditamos que essa pesquisa e seu produto educacional ajudará muitos professores na desmistificação da teoria quântica, mostrando que existe uma história por detrás de toda a ciência e que abordá-la com o conteúdo trará uma melhor compreensão do assunto pelo aluno. Como professor de química do ensino médio, acredito que este trabalho mostrou a importância do professor conhecer a história da química e como é necessário ferramentas que ajudem o professor com seu planejamento e conhecimento, já que a grande maioria dos livros didáticos não abordam a parte histórica, o que faz parecer que as descobertas científicas foram feitas de forma ordenada o que não é verdade. Também destaco, o meu desejo que o produto educacional possa ser utilizado por diversos professores, sejam eles de ensino médio ou superior, que possam ajudá-los em suas aulas e atividades de ensino.

REFERÊNCIAS

- ANASTASIOU, L. C.; ALVEZ, L. P. (Orgs). **Processos de ensinagem na universidade: pressupostos para as estratégias de trabalho em aula**. Joinville: UNIVILLE; 2007. p.15-43.
- ALLCHIN, D. **Teaching the nature of science: Perspectives and resources**. St. Paul: SHiPS Education Press. 2013.
- ASH, D.; KLEIN, C. Inquiry in the informal learning environment. In Minstrell, J.; van ZEE, E. H. (Eds.), **Inquiry into Inquiry Learning and Teaching in Science**. Washington, CA: Corwin. 2000.
- ATMANSPACHER, H.; PRIMAS, H. The Hidden Side of Wolfgang Pauli: An eminent physicist's extraordinary encounter with depth psychology. **Journal of Consciousness Studies**, 1996. v. 3, n. 2, p. 112–126.
- BAKER, J. **50 ideias de física quântica, que você precisa conhecer**. 1ª Edição ed. São Paulo: Planeta, 2015.
- BASSALO, J. M. F.; CARUSO, F. **Pauli**. 1ª ed. São Paulo: [s.n.], 2013.
- BISPO, L. C. S.; Nunes, M. E. S. Método das Relações de Recorrência aplicado no problema do elétron em campo magnético constante e uniforme. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 2018. v. 40, n. 3.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Secretaria de Educação Média e Tecnológica. Parâmetros Curriculares Nacionais: ensino médio**. Brasília: MEC/SEMTEC, 1999.
- CARVALHO, A. M. P. et al. **Ensino de Ciências: unindo a pesquisa e a prática**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.
- DEBOER, G. E. Historical Perspectives on Inquiry Teaching in Schools In Flick, L. D. and Lederman, N. G. (Ed.), **Scientific Inquiry and Nature of Science, Netherland, NED**, Springer, p.17-35, 2006.
- DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A.; Pernambuco, M. M. **Ensino de ciências: fundamentos e métodos**. São Paulo: Cortez, 2011.
- DURVAL, Ana Clara R. M. L., **Sentidos da formação continuada: uma construção sob o olhar de professores do ensino médio – 2016**. 174f. Dissertação (Mestrado) – Universidade

Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Educação Contemporânea, 2016.

ENZ, C. P. **No Time to be Brief: A Scientific Biography of Wolfgang Pauli**. [S.l.]: [s.n.], 2003.

ENZ, C. P. **Of Matter and Spirit**. [S.l.]: WORLD SCIENTIFIC, 2009.

FAGUNDES, D. S. **Criação, aplicação e avaliação de uma sequência didática para o curso de cuidadores de idosos apoiada na metodologia da problematização**. Belo Horizonte, 2015. 136 p. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática, 2015.

FARMELO, G. **The Strangest Man The Hidden Life of Paul Dirac, Mystic of the Atom**. New York: Basic Books, 2009.

FREIRE, P. **Pedagogia da Esperança: um reencontro com a Pedagogia do Oprimido**. Rio de Janeiro: Paz e Terra. 16 ed. 2009.

GIL, A. C.. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

Hall, P. J. The pauli exclusion principle and the foundations of chemistry. **Reidel Publishing Company**., 1986. v. 69, p. 267–272.

JEWETT, J. W. J.; Serway, R. A. **Física para cientistas e engenheiros: Volume 4 – Luz, óptica e física moderna**. 8ª : Vol. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

KAPLAN, I. G. The Pauli Exclusion Principle. Can It Be Proved? **Foundations of Physics**, 2013. v. 43, n. 10, p. 1233–1251.

KUMAR, M. **QUANTUM EINSTEIN, BOHR AND THE GREAT DEBATE ABOUT THE NATURE OF REALITY**. 1st Americ ed. New York/London: W. W. NORTON & COMPANY, 2010.

LAKATOS, E.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2010.

LEDERMAN, N. G. Syntax of Nature of Science within Inquiry and Science Instruction. In: FLICK, L. B. e LEDERMAN, N. G. (Ed.). **Scientific Inquiry and Nature of Science**. Dordrecht: Springer, 2006. p.301-317.

LINDORFF, D. **pauli and Jung: The meeting of Two Great Minds**. segunda ed. Wheaton:

Theosophical Publishing House, 2009.

LOPES, J. L. **Do átomo pré-socrático às partículas elementares: a estrutura quântica da matéria**. 1º edição ed. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 1992.

MARTINS, J. B. **O Spin, o momento supremo de Paul Ehrenfest**. São Paulo: Livraria da física, 2014.

MÉHEUT, M. Teaching-learning sequences tools for learning and/or research. In: BORESMA, K; et al (eds.) **Research and Quality of Science Education**. Holanda: Spring, 2005, p. 195-207.

MILLER, A. I. **137: Jung, Pauli, and the Pursuit of a Scientific Obsession**. [S.l.]: [s.n.], 2010.

MINAYO, M. C. S. **O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde**. São Paulo: Hucitec/ABRAS-CO, 1992.

MINAYO, M. C. S. Introdução. In: MINAYO, M. C. S.; ASSIS, S. G.; SOUZA, E. R. (Org.). **Avaliação por triangulação de métodos: Abordagem de Programas Sociais**. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2010. p. 19-51.

MOREIRA, H.; CALEFFE, L. G. **Metodologia de pesquisa para o professor pesquisador**. 2. ed. Rio de Janeiro: Lamparina, 2008.

PAULI, W. **Pauli Wolfgang - Escritos Sobre Física Y Filosofia**. Madrid: Debate Pesamento, 1996.

SÁ, E. F.; MAUÉS, E. R. C.; MUNFORD, D. **Ensino de Ciências com caráter investigativo I**. In: CASTRO, Emília Caixeta de; Martins, Carmen Maria de Caro; MUNFORD, Danusa (orgs.). **Ensino de Ciências por Investigação – ENCI: Módulo I**. Belo Horizonte: UFMG/FAE/CECIMIG, 2008.

SILVA, C. D. C.; BINOTI, V. H. N.; DILEM, B. B. Estrelas: propriedades e ciclo de vida. **Cadernos de Astronomia**, 2023. v. 4, n. 1, p. 143–155.

SILVA, V. Um ideal de ciência: José Leite Lopes e a história da física no Brasil. **Ciência e Sociedade**, 2019. v. 6, n. 2, p. 35–47.

VALLETTA, D. E-book no Ensino de Tecnologia Educacional: uma investigação sobre o uso de Apps na produção escrita. **Educação Por Escrito**, v. 6, n. 2, p. 278-292, 2015.

VIEIRA, C. L. **História da física: artigos, ensaios e resenhas**. 1^o edição ed. Rio de Janeiro: CBPF70 Anos, 2015.

ZABALA, A. **A Prática Educativa. Como ensinar**. Tradução: Ernani F. da F. Rosa. Porto Alegre: ARTMED, 1998.

APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
MESTRADO PROFISSIONAL EM QUÍMICA EM REDE NACIONAL PROFQUI**

**WOLFGANG PAULI, O PRINCÍPIO DA EXCLUSÃO E A
CLASSIFICAÇÃO PERIÓDICA DOS ELEMENTOS**

MATERIAL DE APOIO PARA PROFESSORES

Material associado à dissertação de
mestrado de José Allan Carlos e
Silva

Wolfgang Pauli e o Princípio da Exclusão



Material associado à dissertação de José Allan Carlos e Silva no Mestrado Profissional em Ensino de Química em Rede (PROFQUI) sob a orientação do Prof. Dr. Luciano de Azevedo Soares Neto.

APRESENTAÇÃO

Ensinar é sempre uma atividade desafiadora que exige uma constante atualização do professor, principalmente na sua prática pedagógica. Este trabalho tem como finalidade ajudar o professor na sua busca de novos conhecimentos sobre um tema muito importante para a Química: o Princípio da Exclusão descoberto pelo genial físico austríaco Wolfgang Pauli.

Este produto educacional é parte da dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Química em Rede (PROFQUI-UFRPE), para ajudar docentes de química em um tema fundamental para o estudo da estrutura do átomo e consequentemente para toda a Química.

Considerado pelo físico alemão Albert Einstein como seu sucessor, a história de Pauli é extremamente interessante, não só pela sua genialidade, mas também pelo seu comportamento curioso. Pauli foi um dos físicos mais produtivos da época áurea do surgimento das bases da Teoria Quântica, também chamada de Mecânica Ondulatória, sendo apelidado pelos colegas de “a consciência da Física”. No entanto, muita coisa sobre sua vida só foi tornada pública por volta do ano 2000 com a publicação da mais completa biografia dele escrita pelo também físico Charles Enz que foi o último assistente do Pauli e que recebeu da sua segunda esposa todo material deixado por ele.

A Teoria Quântica é pouco abordada no ensino médio, apesar dela hoje fazer parte do organizador curricular do novo ensino médio em Pernambuco, o que reforça o estímulo para levar ao professor de Química e aos estudantes do Ensino Médio mais informações sobre o grande cientista que foi Wolfgang Pauli e sobre o princípio da exclusão, ponto fundamental para se entender o comportamento dos átomos.

Neste produto educacional, apresento um pouco da História da Teoria Quântica e o trabalho de Pauli com a sua grande descoberta que foi o Princípio da Exclusão, que inclusive lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física de 1929. Sendo assim, vamos embarcar nessa história fantástica e verificar como o princípio da exclusão de Pauli contribuiu para o entendimento das propriedades dos elementos químicos e para a organização dos mesmos na classificação periódica.

Dessa forma, sintam-se à vontade para explorar este material.

Grato, Allan Carlos.

Wolfgang Pauli, O genial.

Wolfgang Ernst Pauli, o genial,
Físico que viveu no século vinte.
Sobre átomo disse ele o seguinte:
Dois elétrons em cada orbital,
Dois spins opostos, soma total.
E será sempre essa a limitação.
No modelo da configuração,
O sistema demonstra com clareza.
A lei fundamental da natureza
É mesmo o princípio da exclusão.

Átomos agrupados formam vidas.
Sem perder esse princípio excludente,
Funcionam sistematicamente.
Pra moléculas, células providas.
De massa energética difundidas,
Nos sistemas vivos de circulação.
É essa a mais nobre compreensão,
Da física quântica em profundidade.
A lei fundamental da natureza
É mesmo o princípio da exclusão.

Autor: Professor Dr. José Tavares de Sousa

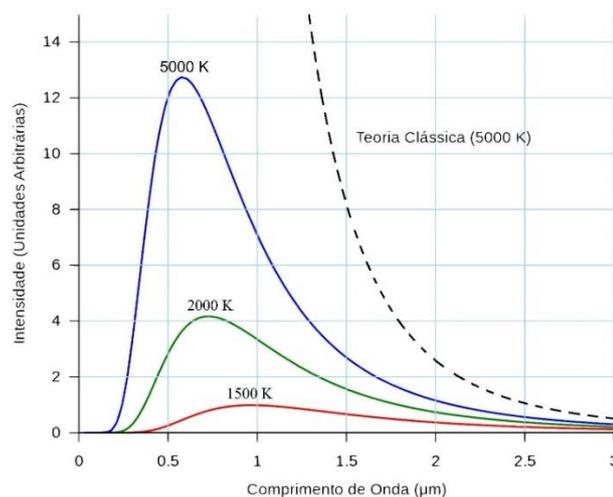
In memoriam: O autor dos versos acima, o Professor José Tavares de Sousa, da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Campus Campina Grande, faleceu em 06/08/2022. Fica aqui registrada a nossa gratidão ao Prof. José Tavares, que com seu talento conseguiu expressar em rima a importância do Princípio da Exclusão de Wolfgang Pauli.

Uma breve história da Teoria Quântica

1. Planck e a radiação do corpo negro.

Começo com um questionamento, por que a brasa do carvão é avermelhada e quando está muito quente fica quase branca? Apesar de ser uma pergunta simples, sua explicação foi um tormento para muitos cientistas, até o início do século XX. Diversos materiais possuem grande eficiência em transmitir e absorver calor, quanto mais eles se aquecem, mais emitem radiação, em forma de luz, com frequências que aumentam conforme o aquecimento que o corpo sofre. A forma como a energia emitida se distribui em diversos comprimentos de onda, só foi explicada corretamente pelo físico alemão Max Planck através do que ficou conhecido como “experimento do corpo negro” (Baker, 2015; Atkins, 2012; Brady 2009). Corpo negro é como os físicos chamam os corpos que absorvem praticamente toda radiação que incidem sobre ele, ou seja, a radiação incidente praticamente não é refletida.

Figura 1: Intensidade relativa da radiação emitida por um sólido aquecido.

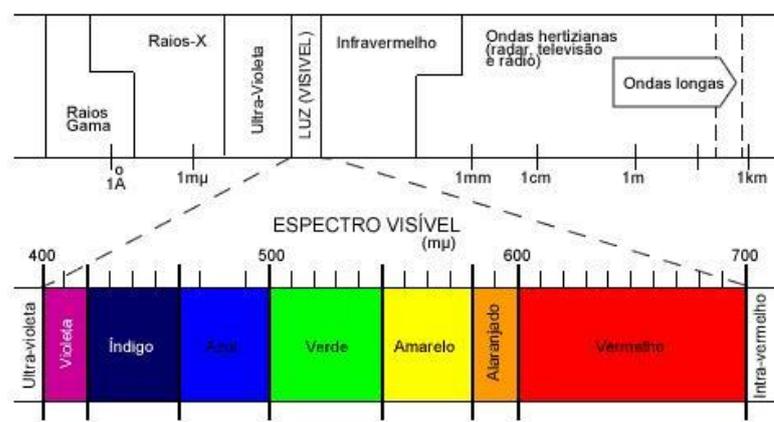


Fonte: Livro ondas e partículas p. 40

A Figura 1 mostra como a energia (intensidade relativa) emitida por um corpo aquecido (corpo negro) se distribuía em diversos comprimentos de onda. As curvas das temperaturas de 1500 K, 2000 K e 5000 K são construídas com dados experimentais. A linha pontilhada mostra como os cientistas previam o comportamento da mesma energia na temperatura de 1500 K,

claramente as curvas dos dados experimentais e da previsão não eram concordantes. (Atkins, 2012; Ferreira, Soriano, Kramer, 1971) Claramente percebe-se que a falha da curva pontilhada se dava quando os comprimentos de onda eram menores, com a curva inclusive tendendo ao infinito, essa discordância foi chamada de “catástrofe do ultravioleta”, lembrando que o ultravioleta corresponde a radiações com comprimento de onda abaixo da região conhecida como “visível” do espectro eletromagnético como mostra a figura 2 abaixo. (Atkins, 2012; Brady, 2009).

Figura 2: Espectro eletromagnético.



Fonte: Site Só física.

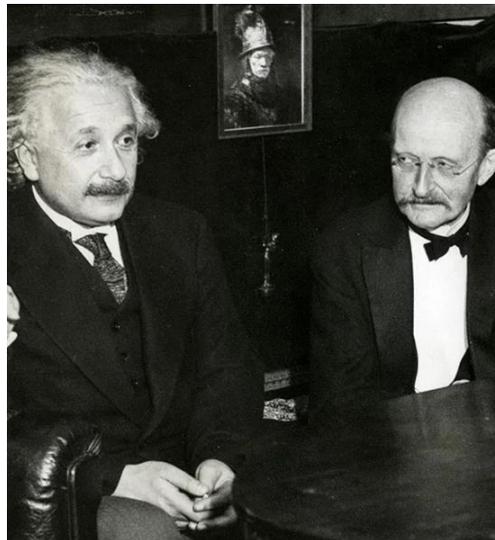
Para reproduzir as curvas experimentais da energia emitida em função dos comprimentos de onda, o físico alemão Max Planck utilizou um argumento nunca usado: o corpo negro não podia emitir energia em qualquer quantidade, mas só em quantidades que posteriormente foi batizada de “quantum”: $E = n h \nu$, onde $n = 1, 2, 3, \dots$, h passou a ser chamado de “constante de Planck” e a letra “ ν ” representa a frequência da radiação emitida. Assim, em 1900, com a proposta inovadora de Planck, começa a Teoria Quântica. (Baker, 2015; Ferreira, Soriano, Kramer, 1971; Caruso, 2016)

A hipótese de Planck representou uma grande mudança para a física porque até então se acreditava que a energia era absorvida ou emitida de forma contínua, nunca em quantidades discretas. Com Planck a energia passou a ser “quantizada”, ou seja, possuía “quantidade” que passou a se chamar “quantum” e o seu plural “quanta”. No início o próprio Planck não acreditou na sua descoberta (Caruso, 2016). A primeira aplicação da hipótese de Planck veio com a explicação do efeito fotoelétrico dada por Albert Einstein cinco anos depois de Planck anunciar a sua descoberta da quantização da energia.

1.1 O Efeito Fotoelétrico e a Dualidade Onda-Partícula.

Em 1905, Albert Einstein (figura 3) conseguiu, de forma criativa e diferente, explicar o efeito fotoelétrico, sendo a emissão de elétrons de uma superfície metálica quando ela está exposta a uma radiação ultravioleta. Einstein propôs, utilizando os conhecimentos sobre o quantum de Planck, que a luz possui pacotes de energia, que seriam os quanta de Planck, posteriormente esses pacotes de quanta de energia da luz passou a ser chamado de “fóton”. Com isso, os quanta de luz agiam como projéteis e quando atingiam o metal transferiam energia para os elétrons fazendo com que eles fossem expelidos. Os fótons possuem uma quantidade de energia de acordo com sua frequência de radiação, assim fótons com menores frequências possuíam energia maior. (Baker, 2015; Caruso, 2016).

Figura 3: À direita Max Planck, à esquerda Einstein.



Fonte: Site Linda Hall Library.

Era sabido que cada metal que apresentava o efeito fotoelétrico possuía uma frequência mínima abaixo da qual o efeito fotoelétrico não acontecia. Acima desse valor mínimo da frequência o elétron era arrancado ganhando mais energia cinética. A equação proposta por Einstein para explicar o efeito fotoelétrico foi a seguinte:

$$E = h \cdot V = \phi + E_c$$

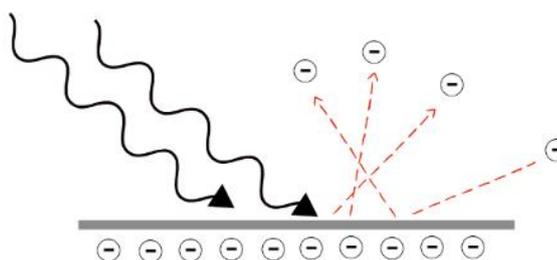
Onde V era a frequência da radiação incidente, que por sua vez é igual ao quociente velocidade da luz / comprimento de onda. Φ representa a energia mínima para arrancar o

elétron, ora, essa energia mínima possuía a sua frequência característica já que a energia é calculada pelo produto $h\nu$. A frequência associada à energia ϕ era chamada de ν_0 .

Com essa descoberta, pode se explicar muitas coisas, como os fótons da parte vermelha do espectro, por mais forte que fosse a intensidade da luz, não tinham energia suficiente para retirar um elétron, enquanto os fótons do espectro azul ou ultravioleta que possuem frequências mais altas que a vermelha, conseguiam expelir facilmente o elétron. (Baker, 2015).

Sendo assim, o estudo de Planck sobre o corpo negro levou à quantização da radiação eletromagnética e o efeito fotoelétrico de Einstein (figura 4) confirmou sua hipótese, trazendo evidências de que as ondas eletromagnéticas também podem ser em sua natureza partículas. (Atkins, 2011; Baker, 2015).

Figura 4: Efeito fotoelétrico.



Fonte: Brasil Escola.

Devido ao estudo sobre o efeito fotoelétrico, Einstein recebeu seu único prêmio Nobel em física em 1921 e Max Planck recebeu seu prêmio Nobel em 1918, dessa forma, Planck, hoje é considerado o pai da Teoria Quântica. (Baker, 2015; Hawking, 2011; Hey, 2011)

A Teoria Quântica e o efeito fotoelétrico levaram os cientistas a novas descobertas, uma das mais importantes seria a dualidade onda-partícula, proposta por Louis de Broglie, na sua tese de doutorado em 1924, que o levou a ganhar o prêmio Nobel em 1929. De Broglie propôs que qualquer partícula ou objeto tem uma onda associada e determinou que quanto maior a massa do objeto, menor seria o comprimento da onda associada. Desse jeito, objetos macroscópicos possuem comprimento de onda muito pequeno e por isso, não seria possível observá-los se comportando como onda (Atkins, 2012; Baker, 2015), o inverso aconteceria com as partículas subatômicas que possuem massas muito pequenas e por isso possuiriam comprimentos de onda grandes.

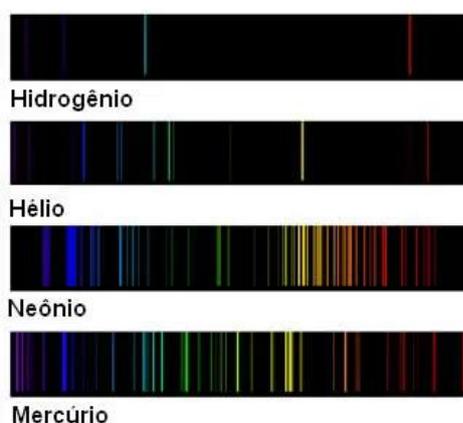
1.2 O Modelo Atômico de Niels Bohr e o Efeito Zeeman.

Em 1913, o cientista dinamarquês Niels Bohr apresentou seu modelo atômico, o primeiro baseado na Teoria Quântica. No modelo de Bohr o elétron possuiria uma órbita estacionária e circular onde ele não emitiria energia, seria estável. Quando recebesse energia, o elétron “saltaria” para uma órbita de mais energia, quando retornasse às órbitas inferiores o elétron emitiria energia. Dessa forma Bohr conseguiu explicar as emissões do átomo de hidrogênio, as chamadas “linhas espectrais”. (Baker, 2015; Hawking, 2011; Hey, 2011; Atkins, 2012).

No modelo de Bohr a energia do elétron era descrita em função do nível de energia “ n ”. O número n passou a ser chamado como o número quântico principal. O modelo de Bohr falha quando é aplicado a átomos com vários elétrons. Uma modificação importante do modelo de Bohr foi introduzida pelo físico alemão Arnold Sommerfeld, que inclusive orientou vários outros físicos importantes como Werner Heisenberg e Wolfgang Pauli, entre outros. (Pauli, 1996).

Sommerfeld introduziu as “órbitas elípticas” dos elétrons, ao contrário das órbitas circulares. No modelo Bohr-Sommerfeld a energia do elétron passou a ser descrita em função de mais dois números quânticos além do n : o número quântico secundário “ l ” e o número quântico magnético “ m ”. Com o modelo Bohr-Sommerfeld era mais fácil explicar as linhas espectrais dos átomos com vários elétrons como as observadas na Figura 5. (Brush, 1983; Brady, 2009; Caruso, 2016; Lopes, 1994).

Figura 5: Linhas espectrais.



Fonte: Site Escola Brasil.

Um pouco antes de 1900, portanto até antes da hipótese dos quanta de Planck na explicação da radiação do corpo negro, outro efeito assustava os físicos porque não tinham uma

explicação plausível. Esse efeito era chamado “efeito Zeeman”, nome dado devido ao seu descobridor: o físico holandês Pieter Zeeman. O efeito Zeeman era o desdobramento observado em uma linha espectral emitida por um elemento químico quando exposto a um campo magnético. Esse efeito somente foi explicado posteriormente por conta dos avanços da Teoria Quântica. (Baker, 2015)

Explicar o Efeito Zeeman era um dos principais objetivos dos físicos no início do século XX. Não foram poucos os cientistas que estudaram o Efeito Zeeman até que o físico austríaco Wolfgang Pauli resolveu encarar o desafio e estudou a fundo o problema, como veremos adiante.

Perguntas:

- 1) O que é o corpo negro e qual sua importância para o surgimento da Teoria Quântica?
- 2) Como Planck resolveu a questão da catástrofe do ultravioleta?
- 3) Como você explicaria o efeito fotoelétrico e o que são os quantas?
- 4) Se uma luz azul consegue arrancar elétrons de um metal, uma luz vermelha conseguiria?
Explique sua resposta.
- 5) O que seria dualidade onda-partícula e qual sua importância para o desenvolvimento da Teoria Quântica?
- 6) Conforme o texto, como são formadas as linhas espectrais e como isso está ligado ao efeito Zeeman?

2. Quem foi Wolfgang Pauli?

Considerado pelo próprio Albert Einstein como seu sucessor, Wolfgang Ernst Friedrich Pauli nasceu em 25 de abril de 1900 em Viena, na Áustria, filho de Wolfgang Josef Pascheles e Bertha Camila Schütz (figura 6). Wolfgang Pascheles cursou Medicina com Ludwig, filho mais velho do famoso físico Ernst Mach, que era professor de física experimental e influenciou muito a personalidade de Pauli e seu gosto pela física e matemática (Bassalo; Caruso, 2013; Enz, 2003; Miller, 2010). A grande amizade e consideração que Pascheles tinha por Mach o levou a convidá-lo para ser o padrinho de seu filho Wolfgang Pauli e homenageá-lo com o nome do meio sendo Ernst, o nome Friedrich também foi uma homenagem a seu avô Friedrich Schütz, pai de sua mãe Bertha Camila Schütz, primeira esposa de Pascheles, com quem teve dois filhos, Wolfgang Ernst Friedrich Pauli e Hertha Ernestina Pauli, fato curioso que o nome do meio Ernestina, também foi uma homenagem a Ernest Mach. (Enz, 2003; Miller, 2010).

Figura 6: Wolfgang Pauli com 9 meses e sua mãe Bertha.

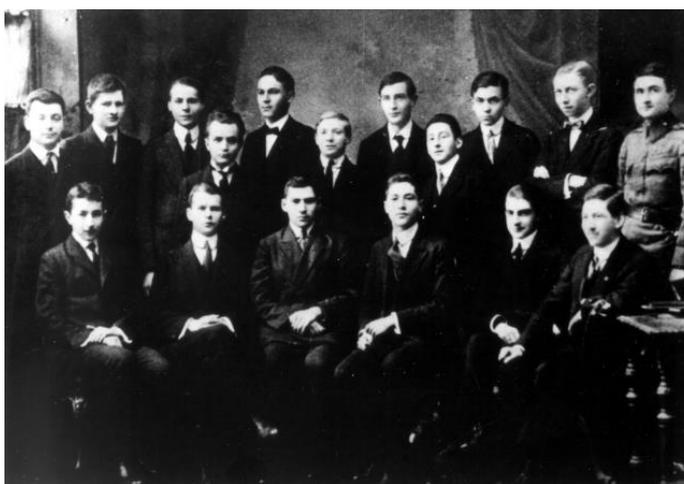


Fonte: Centro Europeu para Pesquisa Nuclear, CERN.

Quase um ano depois do casamento de seus pais, nascia aquele que seria considerado um gênio da física moderna. Pauli nasceu na Áustria, herdou a religião católica de seus pais, na qual foi batizado e teve como padrinho o famoso cientista Ernst Mach, que foi parte

fundamental para seu desenvolvimento intelectual e de sua personalidade forte, aconselhou e guiou no caminho da Física e Matemática desde criança, Pauli frequentava muito o laboratório de seu padrinho e adorava ver sua avó tocar piano. Aos seis anos, nasceu sua irmã Hertha Ernestina Pauli. Aos dez anos Pauli iniciou os estudos no Döblinger Gymnasium, na Áustria; aos quatorze anos já sabia cálculo e já era incentivado pelo seu padrinho Mach na escolha de leituras científicas, mostrava muita aptidão para a Física e Matemática e graduou-se aos dezoito anos com louvor. A classe de Pauli ficou conhecida como a classe dos gênios, Pauli é o primeiro em pé da esquerda para a direita na figura 7. (Enz, 2002; 2009).

Figura 7: Classe nomeada com “a classe dos gênios”, primeiro em pé à esquerda.



Fonte: Centro Europeu para Pesquisa Nuclear, CERN.

Com uma evidente vocação para a física teórica, Pauli decidiu ir estudar com ninguém menos que Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld, em Munique, na Alemanha, que era uma autoridade na nova Física Quântica. O próprio Pauli admitiu anos depois que o encorajamento recebido de Sommerfeld e de seus discípulos tinham sido fundamentais para seu desenvolvimento científico. (Pauli, 1996).

Em 1921, Pauli defendeu sua tese sobre a investigação do íon da molécula de hidrogênio, um marco na teoria quântica de Bohr - Sommerfeld, e com isso recebeu seu diploma de doutor pela Universidade de Munique. Foi nessa época que Pauli conquistou grandes amizades, uma delas foi com Werner Karl Heisenberg, que também era aluno de Sommerfeld. Essa amizade se perpetuou por toda sua vida (Pauli, 1996).

O que realmente chamou a atenção durante o tempo que estudou em Munique com Sommerfeld foi o artigo que Pauli escreveu e foi publicado em 1921 sobre a teoria da relatividade, de tão bem escrito que encantou o próprio Einstein (figura 8), que disse “ninguém

estudando esta obra madura e grandiosamente concebida acreditaria que o autor é um homem de vinte e um anos”. (Pauli, 1996).

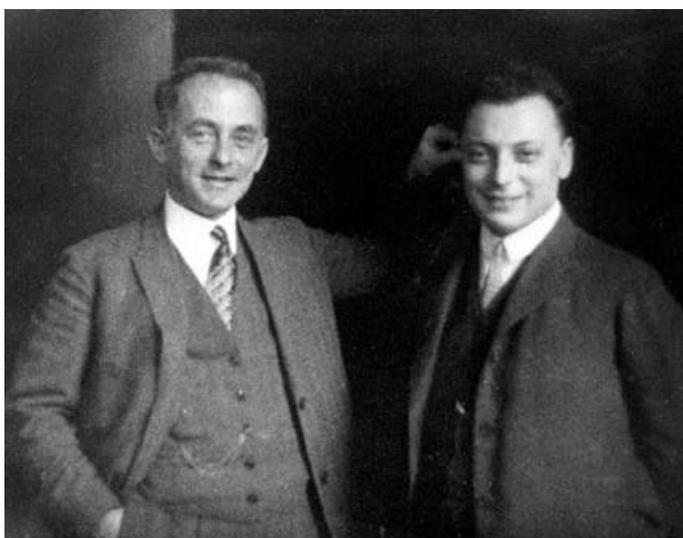
Figura 8: Pauli e Einstein, fotografia tirada por e Ehrenfest.



Fonte: Enz 2002, p. 34.

Durante a passagem de ano entre 1921 e 1922, Pauli foi assistente de Max Born (figura 9) em Gottinger. Foi nesse período que Pauli recebeu um convite do famoso cientista dinamarquês Niels Bohr para passar um ano trabalhando com ele em Copenhague. Com muita surpresa e irreverência, o jovem Pauli respondeu a Bohr: “dificilmente acho que as exigências científicas que você fará de mim vão me causar alguma dificuldade, mas o aprendizado de um idioma estrangeiro como o dinamarquês supera e muito minhas habilidades” (Enz, 2009).

Figura 9: Max Born puxando a orelha de Pauli.



Fonte: Miller 2009, p. 179.

Esse intercâmbio com Niels Bohr foi muito importante para a vida e desenvolvimento científico de Pauli. Durante sua estada em Copenhague, ele recebeu a tarefa de estudar o efeito

Zeeman, estudo esse que o levou à descoberta do quarto número quântico, logo associado ao spin do elétron. Foi no seu terceiro artigo sobre as anomalias do efeito Zeeman, publicado em 2 de dezembro de 1924, que Pauli introduziu, de forma disfarçada, o que seria o quarto número quântico do elétron (Enz, 2009).

O seu estudo sobre o efeito Zeeman resultou no famoso artigo sobre o princípio da exclusão que foi submetido em 16 de janeiro de 1925, que o levou a ganhar o prêmio Nobel de Física de 1945. Em um discurso no Instituto de Estudos Avançados de Princeton, durante o jantar em sua homenagem por receber o prêmio Nobel daquele ano, Pauli falou: “a premiação desse ano me lembra os meus dias de estudo em Munique”. (Enz, 2009).

Em uma carta de 4 dezembro de 1930, enviada para Lise Meitner e Hans Geiger, Pauli informou sobre outra descoberta teórica, a possível existência de uma nova partícula, partícula que Fermi, em 1934, nomeou de neutrino. (Bassalo; Caruso, 2013).

Com o começo da Segunda Guerra em 1939, Pauli sentiu muita dificuldade em permanecer em sua terra natal. Com seus contatos no tempo em que trabalhou em Princeton, Pauli recebeu um convite para ser professor titular no instituto de física avançada (IFA), no qual o principal cientista era Einstein, que já trabalhava lá. Pauli teve que praticamente fugir com sua esposa Franca, em uma viagem difícil pela Europa para chegar aos Estados Unidos em 1940. (Bassalo; Caruso, 2013; Enz, 2002; Pauli, 1996).

Durante esse período que morou nos Estados Unidos, Pauli orientou o doutorado do físico brasileiro José Leite Lopes (figura 10), físico pernambucano, que foi um desbravador no desenvolvimento da Física Brasileira. Também foi nesse período que Pauli foi agraciado com o prêmio Nobel, em 1945, com indicação de ninguém menos que Albert Einstein, pelo seu trabalho sobre o princípio da exclusão, que é comumente chamado de princípio da exclusão de Pauli, no qual revela a existência do quarto número quântico, o Spin. Foi em dezembro de 1945 em Princeton, durante uma reunião em comemoração à conquista do Prêmio Nobel, que Einstein fez questão de dizer que via em Pauli o seu sucessor. (Enz, 2002; Silva, 2019).

Figura 10: Pauli com, Ning Hu, José Leite Lopes e Maria Jauch.



Fonte: Enz 2002, p. 396

No ano agitado de 1946, Pauli se tornaria membro permanente da Universidade de Princeton e cidadão americano, ou seja, foi naturalizado norte-americano. Nesse mesmo ano, com o final da guerra, voltaria para Zurique, na Suíça, no seu antigo posto no ETH, realizou e participou de diversas palestras e encontros pela Europa, por ser ganhador do Nobel do ano anterior. Em dezembro de 1946, Pauli estava presente na cerimônia do Nobel, onde fez seu discurso de ganhador do ano anterior e em 1949 foi naturalizado suíço. (Bassalo; Caruso, 2013).

Figura 11: Charles Enz, o último assistente de Pauli.



Fonte: Enz 2002, p. 311.

Pauli trabalhou muito durante esse tempo e em 1958 descobriu que estava com câncer no pâncreas. Fez uma operação no dia 13 de dezembro, mas no dia 15 de dezembro de 1958 faleceu. Morria um dos homens mais geniais do século XX, que possuía uma fixação pela

constante do seu professor Sommerfeld, a constante de estrutura fina era aproximadamente $1/137$, o que levou nos últimos momentos de sua vida pedir para que seu último assistente (figura 11) o transferisse para o quarto no hospital de número 137, onde passou os últimos instantes de sua vida. Em 20 de dezembro, seu corpo foi cremado em uma cerimônia com apenas os membros da família e seus amigos. (Enz, 2002; 2009).

Algumas curiosidades sobre Pauli.

- Pauli tinha uma vida boêmia muito agitada.
- Sua mãe Bertha se suicidou em 1927, o que influenciou Pauli a deixar o catolicismo e beber com mais frequência.
- Pauli se casou duas vezes, seu primeiro casamento foi com a dançarina de cabaré Käthe Deppner (Kate), em 1929, não chegou a durar um ano.
- Devido à separação e a morte de sua mãe, Pauli se tornou alcoólatra e fumante compulsivo.
- Pauli possuía uma personalidade muito forte e era implacável em seus argumentos, por isso ficou conhecido como a “consciência da física” e “chicote de Deus”, apelidos dados pelos seus amigos e cientistas da época.

Perguntas:

- 1) Quem foi o padrinho de Pauli? Ele influenciou Pauli de que forma para os estudos?
- 2) O que Pauli estudou em Copenhague? E o que ele descobriu com esses estudos?
- 3) Pauli foi contemplado com o prêmio Nobel em qual área? E qual sua relação com o físico brasileiro Leite Lopes?

3. Pauli, Jung e a Alquimia.

Apesar de sua genialidade, Pauli vivia de forma boêmia. Depois da morte de sua mãe e do divórcio com sua primeira esposa, começou a ter problemas com a bebida e se tornou fumante compulsivo. Pauli começou a dar vexames, o que levou a ter um grande colapso nervoso. Isso fez com que seu pai propusesse um tratamento psicológico com o famoso psicanalista Carl Gustav Jung (figura 12), em Zurique, com quem Pauli faria uma bela e grande amizade que permaneceria por toda sua vida. Essa amizade resultou em uma intensa troca de cartas e em textos escritos conjuntamente (Bassalo; Caruso, 2013; Pauli, 1996). Boa parte da correspondência entre eles foi publicada só em 2001 no livro *Atom and Archetype* (Meier, 2001, capa), ver Figura 13.

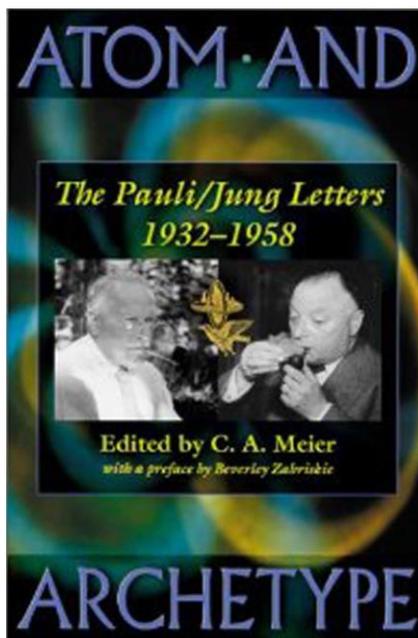
Figura 12: Carl Gustav Jung.



Fonte: Site Wikipédia.

No começo do seu tratamento, Pauli se consultava com uma discípula de Jung chamada Erma Rosenbaum. Contudo, o interesse de Jung pelo conteúdo dos sonhos relatados por Pauli levou o próprio Jung a consultar Pauli depois. Dessa forma, ele descobriu nos sonhos de Pauli conteúdos ligados à Alquimia, como veremos adiante. A análise dos sonhos de Pauli resultou na publicação do livro *Psychology and alchemy*. No livro Jung não dizia de quem eram os sonhos.

Figura 13: Capa do livro *Aton and Archetype*.



Fonte: Capa do livro *Aton and Archetype*.

No livro *Pauli and Jung the meeting of two great minds* o autor cita que Jung pediu a Pauli para utilizar a descrição de seus sonhos para escrever um artigo, Pauli ficou feliz em saber que seus sonhos possuíam valor científico, ele aceitou com a condição de preservar seu anonimato (Lindorff, 2009). Dessa forma, Jung descreve a existência de uma relação entre as imagens dos sonhos de Pauli com a física e a psicologia (Lindorff, 2009):

“Usando a carta como uma oportunidade para informar Jung sobre os novos desenvolvimentos em seus sonhos, Pauli explicou que a noção que ele havia mencionado antes de uma relação entre física e psicologia havia sido trazida à sua atenção por meio de um sonho recente... Ele finalmente percebeu que não eram os indivíduos do sonho, mas seu trabalho específico que era importante, e que seu trabalho estava de alguma forma relacionado à psicologia... As imagens estavam relacionadas à física, mas também estavam associadas a fenômenos psíquicos. Apenas dois dias depois, Jung agradeceu a Pauli por sua carta, assegurando-lhe que realmente queria observar o progresso de seus sonhos. Pauli havia tocado em uma área de particular interesse para Jung, a relação entre psique e matéria, e isso tornava os sonhos duplamente interessantes para ele.” (Lindorff, 2009, p. 50-51).

Além de uma relação com a física, os sonhos de Pauli também tinham forte ligação com a alquimia, Jung (1991) em seu livro *Psychology and alchemy*, descreve o seguinte: “o material que disponho consiste em mais de mil sonhos e impressões visuais de um homem ainda jovem cuja formação científica deve ser sublinhada”. Nessa mesma parte, Jung mantém o anonimato

de Pauli e aborda que a princípio deixou a cargo da sua aluna o começo do tratamento para ele não influenciar no processo que nos últimos 45 sonhos, durante o tratamento, aconteceram com a sua observação e pontua que não precisou fazer notas das interpretações porque o paciente possuía um grande talento além da excelente formação acadêmica. Em agradecimento, Jung escreve: “sinto-me feliz portanto em exprimir minha gratidão ao “autor”, pelo serviço que prestou à ciência.” (Jung, 1991, p. 50-52).

Esse sigilo permaneceu durante cinquenta anos até que Carl Meier, que era amigo e editor dos livros de Pauli, revelou que ele havia feito análise com Rosenbaum, que era assistente de Jung na época. Logo depois, a assistente pessoal de Jung, Aniel Jaffé, confirmou que os sonhos que Jung costumava discutir e mencionar eram de fato de Pauli. (Miller, 2009).

Sobre isso, Emílio Segrè, físico italiano e Prêmio Nobel de Física de 1959, também contemporâneo de Pauli, afirmou: “Pauli tinha também interesse permanente pela psicologia e se correspondia com Carl Gustav Jung, tendo até mesmo escrito artigos sobre temas psicológicos, esse outro aspecto de sua personalidade, embora aparentemente importante para ele, foi mantido em relativo segredo” (Segrè, 1987, p. 145-148). Essa afirmação de Emílio Segrè é muito importante porque mostra que esse lado do Pauli não era divulgado, em bora fosse do conhecimento de muita gente.

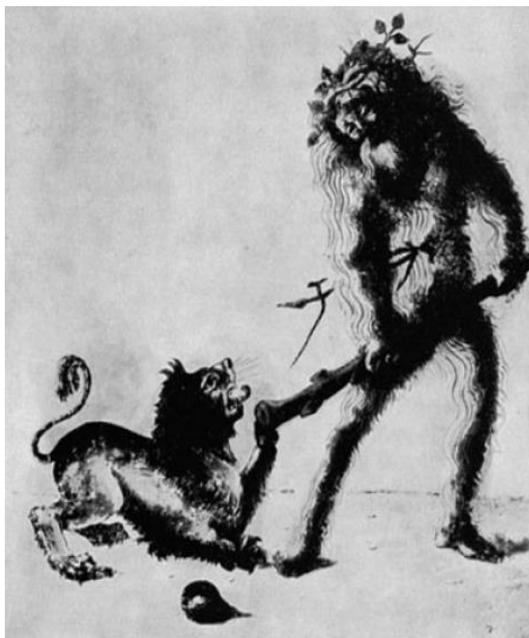
Jung, analisando os sonhos de Pauli, descobriu que imagens simbólicas dos sonhos se associavam a símbolos de textos alquímicos do século XVII e anteriores. Jung sustentou que as imagens dos símbolos alquímicos e dos sonhos modernos relatados por Pauli eram semelhantes e davam credibilidade para a sua hipótese do inconsciente coletivo, no qual ele dizia “ser o alicerce a partir do qual a consciência pessoal evolui.” (Lindorff, 2009, p. 28).

No farto material onírico de Pauli, Jung, que era uma pessoa de vasta cultura, encontrou fortes evidências de conteúdos relacionados com a Alquimia. Segundo o físico teórico brasileiro Mário Schemberg (1914-1990) “a obra de Jung teve o mérito de aproximar a Psicologia e a Alquimia” (Schemberg, 1984, p. 83). Jung analisou com muita atenção as imagens descritas dos sonhos de Pauli e verificou a semelhança dessas imagens com imagens de livros de Alquimia (Miller, 2009).

Em vários sonhos descritos por Pauli aparecia a figura de um monstro que ele chamava de “ape-man”, homem macaco reproduzido na Figura 14. Jung mostrou a Pauli que a mesma figura aparece em um texto de Alquimia escrito quatrocentos anos antes (Miller, 2009). Dessa forma, Pauli convenceu-se dos argumentos de Jung sobre a Alquimia que estava presente nos seus sonhos. Jung na sua análise dos sonhos de Pauli não buscava explicações sobre o que levava Pauli a ter ideias tão originais, como, por exemplo, a do Princípio da exclusão. O fato

de Jung ter identificado o conteúdo de Alquimia nos sonhos de Pauli se deveu principalmente à sua vasta cultura e conhecimento de literatura antiga.

Figura 14: Ape-man.



Fonte: Miller 2009, p. 186.

Além dos conteúdos relacionados com a Alquimia, vários sonhos de Pauli continham coisas mais complexas e que segundo Jung podem ter inspirado Pauli em temas originais e intrigantes da Física Quântica como a complementaridade e quem sabe poderia até ter levado Pauli ao quarto número quântico que resultou no Princípio da Exclusão (Miller, 2009).

A análise feita por Jung do material onírico de Pauli é muito valiosa. Recentemente já encontramos estudos que afirmam que o Princípio da exclusão, na forma como foi apresentado por Pauli, não poderia ser provado (Kaplan, 2013). Ora, se isso for realmente verdade, fica a pergunta, como Pauli descobriu o Princípio da Exclusão? Como já dissemos, a correspondência trocada entre Pauli e Jung só foi publicada cerca de 22 anos atrás (2001) o que demonstra que muita coisa ainda será motivo para estudo desse farto material.

Nas análises de Jung, fica claro que o inconsciente de Pauli pode ter influenciado em seus trabalhos (Miller, 2009). Além disso, não devemos esquecer que várias descobertas importantes na Química tiveram a participação dos sonhos de forma determinante. É só lembrar os casos de Kekulé sobre a estrutura do Benzeno, de Mendeleev sobre a estrutura da Tabela Periódica dos elementos e a descoberta de Werner da estrutura de complexo de cobalto (Farias; Neves, 2011).

As contribuições de Pauli ao desenvolvimento da Teoria Quântica foram fundamentais e a revelação da interação dele com o Psiquiatra suíço Carl Jung sem dúvida mostra um lado extremamente importante da mente desse grande cientista e mais ainda lança também uma luz sobre o que se sabe sobre a Alquimia. Jung inclusive chegou a afirmar que dentre os cientistas que iniciaram a teoria quântica “unicamente Pauli tinha o pensamento alquímico em alta estima” (Fanning, 2015, p. 240).

Quando perguntaram a Pauli sobre qual a opinião dele do porquê os físicos estudarem a natureza, ele respondeu citando a Alquimia:

“Por que nós físicos exploramos a natureza? A alquimia diz “para nos redirmos”, como o expressado por meio da produção da pedra-filosofal. Formulado em termos junguianos, isso seria a produção de uma “consciência de eu”. Agora isso não é só luz, mas também escuridão, e deve como totalidade conter também “a vontade de poder sobre a natureza”, que interpreto como um tipo de lado maligno das ciências naturais, e que não pode ser eliminado. Mas a resposta para essa pergunta será sempre aquela que para o racionalista é uma expressão odiosa, o “caminho da salvação”, contra o qual o homem luta em vão”.

3.1 O “efeito Pauli”

O “efeito Pauli”, que era assim que os amigos chamavam os acontecimentos misteriosos que coincidentemente aconteciam sempre que Pauli estava por perto. Começou na época que Pauli estava em Hamburgo, físicos experimentais diziam que coisas estranhas aconteciam devido à presença de Pauli, acreditava-se que apenas sua presença em um laboratório ou perto dele produzia estranhos problemas. Existem relatos de várias situações inusitadas, como quando o equipamento estourou em vários pedaços, no Instituto de Física da Universidade de Göttingen, sem explicação nenhuma. Depois descobriram que o trem que levava Pauli, de Zurique para Copenhague, tinha feito uma pequena parada na estação de Göttingen no mesmo momento do ocorrido. Outro fato do efeito Pauli ocorreu quando o ciclotron da Universidade de Princeton incendiou-se, em 1950, justamente quando Pauli fazia uma visita à Universidade. (Bassalo; Caruso, 2013; Enz, 2009).

Esses acontecimentos do efeito Pauli, fizeram com que seu amigo Otto Stern, famoso cientista da época, não o deixasse entrar em seu Instituto. Chamavam-no até de mago da matéria, devido ao efeito Pauli, já que quem presenciava dizia que parecia um processo quase

mágico. O próprio Pauli acreditava em seu efeito, outro caso do efeito Pauli, ocorreu durante a lua de mel do seu segundo casamento. Na ocasião, o motor do seu carro falhou quando ele o dirigia, sem nenhuma explicação aparente. Seu amigo Carl Jung, mais tarde descreveu o efeito Pauli como um fenômeno sincrístico, foi uma forma de tentar entender o tal efeito. (Bassalo; Caruso, 2013; Enz, 2009; Lindorff, 2009).

Perguntas

- 1) O que levou Pauli a fazer buscar um tratamento com o psicanalista Jung?
- 2) Os sonhos de Pauli possuem uma ligação com sua intuição aguçada para fenômenos da natureza? Explique sua resposta.
- 3) O efeito Pauli pode ser descrito de forma psicológica? Como?

4. Princípio da exclusão e tabela periódica.

Para explicar essa relação teremos que voltar um pouco na história. No início do século XX, Niels Bohr, (figura 15) cientista dinamarquês, que havia trabalhado com Joseph Thomson, resolveu estudar o modelo atômico com núcleo de seu antigo professor Ernest Rutherford. Bohr começou a estudar as raias espectrais, a qual são a base da espectroscopia de emissão. Sabia-se que quando um gás recebe uma descarga de muita energia (luz) observa-se a emissão também de luz com cores brilhantes em um fundo escuro (Vieira, 2015, Jewett; Serway, 2013).

Figura 15: Niels Bohr.



Fonte: Wikipédia.

Bohr conhecia as ideias de Max Planck sobre a energia quantizada, e com isso, ele considerou que os elétrons possuíam vibrações que absorviam e liberavam energia de forma quantizada, ou seja, em pequenos pacotes (Vieira, 2015). Com isso, Bohr publicou um artigo em 1913 sobre o seu modelo atômico quântico, no qual apresenta o elétron em uma órbita estável, em um estado que ele chamou de “estacionário”, nesse estado o elétron não caía no núcleo. Segundo Bohr, quando o elétron recebe energia, ele passa para outro estado, seria um “estado excitado”. Nesse caso o elétron se mostra instável e sai da sua órbita para outra de mais alta energia, depois libera esse excesso de energia em forma de luz e volta para sua órbita de origem, podendo passar por outras órbitas de energia menor até retornar à sua órbita de origem, dessa forma voltando ao seu estado inicial. Bohr conseguiu descrever muito bem o átomo de

hidrogênio, calculando os comprimentos de onda das emissões correspondentes. O átomo de hidrogênio só possui um elétron, para átomos com mais de um elétron, o modelo de Bohr já não conseguia reproduzir as emissões observadas com a mesma precisão das observadas para o átomo de hidrogênio (Lopes, 1992).

Nesse momento, entra em cena, Arnold Sommerfeld, (figura 16) físico teórico respeitado, professor na Universidade de Munique e orientador de vários físicos que se tornaram famosos por ganharem o Prêmio Nobel de Física como Wolfgang Pauli e Werner Heisenberg. Sommerfeld acrescentou no modelo de Bohr as órbitas elípticas para o elétron. Com essa alteração, o modelo de Bohr que só possuía um número quântico para o elétron, passou a ter 3: o principal (n), o secundário (ℓ) e o magnético (m_ℓ) (Kumar, 2010).

Figura 16: Sommerfeld e Pauli.



Fonte: Miller 2009, p. 182

Em 1923, Pauli, voltava para Hamburgo, porém triste por ainda não ter conseguido avançar em nada sobre a explicação do efeito Zeeman (Kumar, 2010; Miller, 2009). Em 1924, Pauli praticamente já havia desistido de explicar o efeito Zeeman, contudo, sempre estava lendo artigos sobre o assunto, quando se deparou com a quarta edição do livro do seu orientador Sommerfeld, *Atomic Structure and Spectral Lines*, que tinha no prefácio a citação de um artigo da revista *Philosophical Magazine* de autoria de Edmund Stoner, aluno de Rutherford. O título do artigo de Stoner era: “*The Distribution of Electrons Between Atomic Levels*”, em tradução livre, “a distribuição de elétrons em níveis atômicos”. (Sommerfeld, 1931, p. 473). Neste trabalho, Stoner sugeriu que o elétron da camada de valência de um átomo alcalino tem vários

estados de energia para assumir igualmente os elétrons da última camada fechada do gás nobre em sequência na tabela periódica (Kumar, 2010, p. 161).

Usando o argumento de Stoner, Pauli concluiu que o número de elétrons em cada camada correspondia a $2n^2$, o mesmo número proposto por Bohr com outros argumentos (Miller, 2009). Stoner não conseguiu avançar mais no sentido de explicar o número de estados previstos pelos desdobramentos das linhas espectrais que eram observados para diversos átomos devido ao efeito Zeeman. Ao ler o trabalho de Stoner, Pauli teve a inspiração que lhe faltava para explicar o efeito Zeeman e ver que havia algo novo ainda escondido.

Pauli aplicou um quarto número quântico que possuísse valores de $+1/2$ e $-1/2$ para cada elétron. Dessa forma, o trabalho de Stoner levou Pauli a perceber que os estados possíveis para cada elétron poderiam ser explicados não por 3, mas por 4 números quânticos e que nenhum elétron poderia assumir os mesmos 4 números. Foi então que Pauli publicou seu artigo em 1925 onde propôs o Princípio da Exclusão (Miller, 2009).

Em seu discurso quando recebeu o Prêmio Nobel em 1945, Pauli confirmou que realmente leu o trabalho de Stoner e que a partir daí teria chegado no Princípio da Exclusão (Hawking, 2011). Eis as palavras de Pauli no seu discurso de premiação do Nobel: “At this time a paper of the English physicist, Stoner, appeared which contained, besides improvements in the classification of electrons in subgroup...” (Hawking, 2011, p. 426). A descoberta por Pauli do quarto número quântico e do Princípio da Exclusão foi fundamental para explicar a organização da tabela periódica como conhecemos hoje, inclusive, o termo “Princípio da Exclusão” foi criado pelo físico britânico que sempre destacava a importância do trabalho de Pauli (Farmelo, 2009). Segundo Sommerfeld (1931, p. 155) em seu livro já citado: “a distribuição dos elétrons nas camadas eletrônicas era feita de forma errada mesmo por Bohr. A segunda camada, que todos sabiam possuir 8 elétrons, eram distribuídas por Bohr em $4 + 4$ elétrons. A terceira camada, que possui 18 elétrons, era organizada por Bohr como $6 + 6 + 6$.” Graças a Stoner e Pauli hoje sabemos que a distribuição é $2 + 6$ na primeira camada e $2 + 6 + 10$ elétrons na terceira camada. Esse fato descrito por Sommerfeld ilustra bem a consequência do Princípio da Exclusão na organização da Classificação Periódica e consequentemente no entendimento das propriedades químicas dos elementos.

A descoberta de Pauli foi fantástica porque explicava vários fenômenos ainda não explicados como, por exemplo, o efeito Zeeman, o átomo de Bohr, o porquê da primeira camada só possui 2 elétrons e a segunda 8 e a terceira 18. Por estar totalmente relacionado com a organização dos elétrons, o princípio da exclusão é determinante para a classificação periódica no formato atual (Baker, 2015; Kumar, 2010).

Embora fosse muito amigo de Pauli, logo após a sua morte, Bohr chegou a afirmar que: “Pauli era absolutamente maravilhoso, mas havia absolutamente nenhuma palavra que seja nova no princípio de Pauli”. Para Bohr o Princípio da Exclusão poderia realmente ser chamado de “Princípio de Stoner.” (Miller, 2009, p. 348). No entanto, Miller (2009, p. 348) também afirma: “na verdade, embora Stoner estivesse perto de descobrir o princípio da exclusão, ele foi incapaz de dar o salto final. Com uma compreensão mais profunda do problema, Pauli fez.”

O princípio da exclusão de Pauli afirma que não existem dois elétrons de um átomo com valores idênticos em seus quatro números quânticos. Para entender isso de forma simples, se o átomo possui sua configuração eletrônica $1s^2$, os números quânticos seriam distribuídos como mostra na tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Distribuição dos números quânticos para o orbital $1s^2$.

1º elétron.	2º elétron.
n; número quântico principal, corresponderia ao 1	n; número quântico principal, corresponderia ao 1
ℓ ; número quântico secundário, corresponderia a 0	ℓ ; número quântico secundário, corresponderia a 0
m_ℓ ; número quântico magnético, corresponderia a 0	m_ℓ ; número quântico magnético, corresponderia a 0

Fonte: Própria.

Dessa forma, é nítido que tanto o primeiro elétron quanto o segundo possuem os mesmos números quânticos. Contudo, o princípio da exclusão exige que os números quânticos sejam diferentes, desse modo um quarto número quântico se faz necessário, nesse momento entra a sacada de Pauli, que propôs um quarto número quântico que seria depois chamado de spin (m_s), história que contaremos a seguir. O quarto número quântico serviria justamente para diferenciar os elétrons, ou seja, o primeiro elétron vai ter o $m_s = +1/2$ e o segundo $m_s = -1/2$. (Brady, 2016; Atkins, 2012; Leite, 1992).

Isso explica muita coisa, como, por exemplo, somente dois elétrons podem ocupar simultaneamente o orbital $1s$. Dessa maneira o princípio da exclusão de Pauli diz que somente dois elétrons podem ocupar um mesmo orbital no máximo e quando isso ocorrer os dois elétrons devem possuir os spins opostos e isso também limita as populações máximas de elétrons nas camadas e subcamadas como mostrado na tabela 2 e 3:

Tabela 2: Limite de elétrons por subcamada.

Subcamada	Número de orbitais	Número máximo de elétrons
<i>s</i>	1	2
<i>p</i>	3	6
<i>d</i>	5	10
<i>f</i>	7	14

Fonte: Brady, p. 279.

Tabela 3: Limite de elétrons por camadas.

Camada	Subcamadas	Máximo de elétrons por camada
1	<i>1s</i>	2
2	<i>2s 2p</i>	8 (2+6)
3	<i>3s 3p 3d</i>	18 (2+6+10)
4	<i>4s 4p 4d 4f</i>	32 (2+6+10+14)

Fonte: Brady, p. 279.

Dessa forma, o princípio da exclusão de Pauli, corrigido como Bohr e até outros cientistas dividiram os elétrons em camada e subcamadas (subníveis), organiza toda a tabela em períodos (camadas) e subcamadas (figura 17), isso explica alguns fenômenos como o efeito Zeeman. (Brady, 2016, p. 279; Atkins, 2012, p.30; Leite, 1992, p. 547-548).

Figura 17: Tabela periódica dividida em camadas (períodos) e subcamadas.

Subcamadas

The figure shows a periodic table with the following subshell labels:

- Camadas ocupadas (Occupied shells):** S¹, S², p¹, p², p³, p⁴, p⁵, p⁶.
- Subcamadas (Subshells):** d¹, d², d³, d⁴, d⁵, d⁶, d⁷, d⁸, d⁹, d¹⁰; f¹, f², f³, f⁴, f⁵, f⁶, f⁷, f⁸, f⁹, f¹⁰, f¹¹, f¹², f¹³, f¹⁴.

Fonte: própria.

4.1 O spin

Na mesma época que Pauli desenvolvia o princípio da exclusão, dois jovens sob a orientação do Paul Ehrenfest, também estudavam o efeito Zeeman. Eles descobriram que aquele fenômeno ocorria devido a uma propriedade do elétron, o Spin, denominada por Goldsmith e Uhlenbeck, que consideraram a hipótese em que um elétron age como uma bola eletricamente carregada que gira formando assim um campo eletromagnético, semelhante ao giro que o planeta Terra faz em seu próprio eixo, o próprio nome Spin significa giro. Com isso, pode-se comprovar mediante um experimento que o elétron possui duas direções para girar, uma contrária a outra, essas direções do elétron explicavam as divisões das linhas espectrais do efeito Zeeman (Baker, 2015; Hall, 1986; Kaplan, 2013; Martins, 2014).

A descoberta do Spin é cheia de curiosidades. Goldsmith e Uhlenbeck eram jovens na época que propuseram a hipótese do Spin do elétron. Eles foram orientados por Paul Ehrenfest (figura 18), cientista mais liberal na concepção das ideias e muito amigo de Einstein. Contudo, Kronig, assistente de Pauli, consentiu da mesma ideia do Spin, um pouco antes que Goldsmith

e Uhlenbeck e associava ela ao quarto número quântico. Porém, Pauli rejeitou a proposta de Kronig, e afirmava que havia muitas inconsistências. Goldsmith e Uhlenbeck, ficaram sabendo da rejeição de Pauli que já possuía uma fama na época, contudo, apesar disso, Ehrenfest já tinha mandado o artigo sobre a hipótese do Spin, para publicação em uma revista de Física, para surpresa de todos o artigo não foi recusado e as críticas de Pauli, sobre o Spin, foram consideradas injustas, em pouco tempo o artigo foi publicado em duas importantes revistas, sendo uma delas a Nature no ano de 1926 (Martins, 2014; Miller, 2009).

Figura 18: Pauli e Ehrenfest rindo de uma piada.



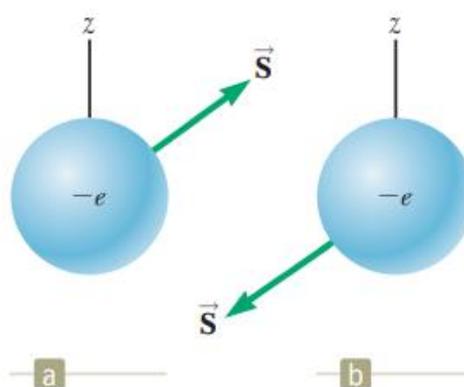
Fonte: Miller 2009, p. 180.

Contudo, um problema surgiria para Goldsmith e Uhlenbeck, o giro do elétron só poderia ocorrer de duas formas spin *up* e spin *down*, o que nos leva ao spin quântico, que é uma propriedade intrínseca da partícula, no caso o elétron, no qual os físicos descrevem como setas para cima e para baixo e para o elétron tem o valor de $\frac{1}{2}$ podendo ser negativo e positivo. Neste ponto, Pauli entra na história. Ele não aceitava a ideia de spin. Seu assistente Kronig, já havia escrito algo parecido com o spin e o associando ao quarto número quânticos, que dava origem ao princípio da exclusão. Pauli rejeitou dizendo “realmente uma ideia espirituosa” (Miller, 2009, p. 90), não contente Kronig, foi a Copenhague e visitou Bohr que também rejeitou a proposta dizendo “muito interessante” (Miller, 2009, p. 90). Depois disso, Kronig, desistiu de publicar o artigo (Martins, 2014; Miller, 2009).

No entanto, Goldsmith e Uhlenbeck, muito pouco tempo depois, publicaram o artigo sobre o Spin (figura 19), em 20 de novembro de 1925. Muitas críticas apareceram. Um fato interessante foi o de Bohr que viajou para o Leiden, para as comemorações do 50º aniversário do doutorado de Lorentz. Quando chegou em Hamburgo, logo se encontrou com Pauli, que foi logo perguntando o que ele achava do artigo sobre Spin do elétron. Bohr desaprovava. Achava

que tinha algum defeito e seguiu viagem para Leiden. Quando chegou, deu logo de cara com Einstein e Ehrenfest. Bohr então já foi despejando todas as suas objeções sobre o campo magnético, contudo Einstein, já havia resolvido todos os problemas utilizando a Teoria da Relatividade. Depois de toda a explicação, Bohr aceitou e afirmou que foi uma revelação completa sobre o spin do elétron. Em seguida, lamentou profundamente pela rejeição do Spin do elétron quando Kronig estava em Copenhague argumentado sobre o assunto com ele. (Martins, 2014).

Figura 19: representação dos spins dos elétrons

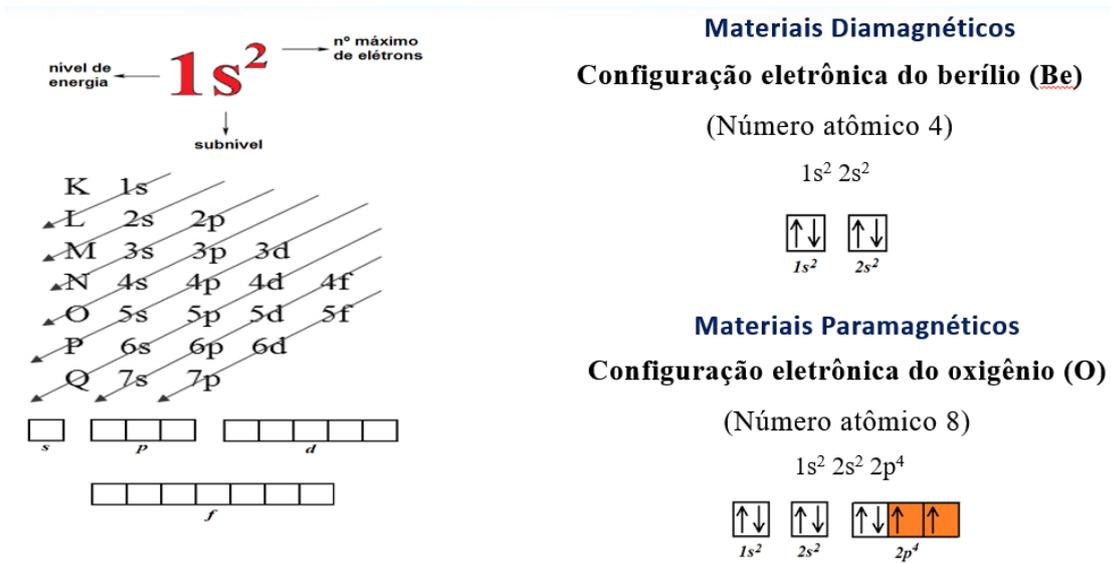


Fonte: Jewett & Serway (2013, p. 247).

Contudo, Pauli demorou mais a aceitar o conceito de Spin e associá-lo como sendo o quarto número quântico. O Spin do elétron era realmente uma característica intrínseca ao elétron. Depois que todos os pontos que faziam Pauli rejeitar o Spin quântico foram resolvidos e esclarecidos. Pauli cedeu e aceitou o Spin, o que levou a se sentir muito culpado por desencorajar Kronig, que teve essa ideia primeiro. (Martins, 2014; Miller, 2010).

Um conceito associado ao quarto número quântico (o spin) é sobre o magnetismo dos materiais, isso ocorre devido ao emparelhamento ou não dos elétrons, lembrando que devido ao princípio de Pauli somente dois elétrons podem ocupar o mesmo orbital que o spin possui um campo eletromagnético, isso gera polos. Quando os elétrons estão emparelhados, um elétron anula o campo eletromagnético do outro e dizemos que esse material é diamagnético. Quando ocorre o contrário e os elétrons estão desemparelhados, ou seja, os efeitos magnéticos não se cancelam, então dizemos que o material é paramagnético. Veja o exemplo do berílio e do oxigênio. (Brady, 2016; Barreto; Barros, 2019.)

Figura 20: Configuração eletrônica de spin do Berílio e do Oxigênio.



Fonte: Barreto e Barros, 2019.

Como podemos observar no exemplo, a distribuição eletrônica do berílio nos orbitais os elétrons são representados pela setinha para cima e para baixo que indica se o spin é positivo ou negativo, dessa forma eles estão emparelhados um para cima e outro para baixo, anulando assim o campo eletromagnético dos elétrons e tornando o berílio um material diamagnético. Contudo, no oxigênio ocorre um desemparelhamento dos elétrons, como mostra a figura 20, mantendo o campo magnético dos elétrons, dessa forma classificamos como um material paramagnético e chegamos à conclusão que quando se conhece a susceptibilidade magnética do material com a distribuição eletrônica dele, obedecendo ao Princípio da exclusão de Pauli, consegue-se classificar os materiais em diamagnéticos ou paramagnéticos. (Brady, 2016; Barreto; Barros, 2019.)

Perguntas

- 1) O modelo de Borh é considerado um modelo quantico? Justifique sua resposta.
- 2) Como Sommerfeld ajudou Bohr em seu modelo atômico?
- 3) Quais são os 3 números quânticos? E o que seria o princípio da exclusão de Pauli?
- 4) De que forma o princípio da exclusão ajudou a organizar a tabela periódica?
- 5) O Spin pode ser considerado o 4º número quântico? Explique sua resposta.

REFERÊNCIA

ATKINS, P.; JONES, L.; **Princípios de Química, questionando a vida moderna e o meio ambiente**; 5ª Ed, Bookman Companhia Ed., 2011.

ATKINS, P. W. PAULA, J. de. **Físico-Química**, volume 1. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

BAKER, J. **50 ideias de física quântica, que você precisa conhecer**. 1ª Edição ed. São Paulo: Planeta, 2015.

BARRETO, P. G.; BARROS, A. E. A. Os principais tipos de materiais magnéticos e o princípio da exclusão de Pauli. Anais do I Encontro Regional do MNPEF Centro-Oeste/Norte Brasília, DF. V. 3, n. especial: **Revista do Professor de Física**, 2019.

BASSALO, J. M. F.; CARUSO, F. **Pauli**. 1ª ed. São Paulo: [s.n.], 2013.

BRADY, J. E.; SENESE, F. **Química matéria e suas transformações volume 1**. 5ª ed. Rio De Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.-LTC, 2009.

BRUSH, S. G. **Statistical Physics and the Atomic Theory of Matter From Boyle and Newton to Landau and Onsager**. 1ª edição. Ed. Princeton University Press Princeton, New Jersey, 1983.

CARUSO, F; OGURI, V. **Física modernas origens clássicas e fundamentos quânticos**. 2ª edição. Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. Rio de Janeiro, RJ. 2016.

COR E FREQUÊNCIA EM SÓ FÍSICA. Virtuous Tecnologia da Informação, 2008-2022. acessado em 01/10/2022 às 15:12. Disponível na Internet em: http://www.sofisica.com.br/conteudos/Otica/Refracaodaluz/cor_e_frequencia.php

ENZ, C. P. **No Time to be Brief: A Scientific Biography of Wolfgang Pauli**. [S.l.]: [s.n.], 2002.

_____. **Of Matter and Spirit**. [S.l.]: WORLD SCIENTIFIC, 2009.

FANNING, P. A. **Isaac Newton e a Transmutação da Alquimia. Uma Visão Alternativa da Revolução Científica**. Balneário Camboriú (SC): ed. Livraria Danúbio, 2015.

FARIAS, R. F.; NEVES, L. S. **História da química: um livro-texto para a graduação**. 2. ed. Campinas: Átomo, 2011.

FARMELO, G. **The Strangest Man The Hidden Life of Paul Dirac, Mystic of the Atom**. New York: Basic Books, 2009.

FERREIRA, R.; SORIANO, A.; KRAMER, R. **Partículas ou ondas?** Recife, 1971.

FOGAÇA, J. R. V. **Espectros Eletromagnéticos e Estrutura do átomo**; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/espectros-eletromagneticos-estrutura-atomo.htm>. Acesso em 12 de outubro de 2022.

HAWKING, S. **The Dreams That Stuff Is Made Of: The Most Astounding Papers of Quantum Physics and How They Shook the Scientific World**. 1ª edição. Ed. Running Press; Philadelphia – London, 2011.

HALL, P. J. The Pauli exclusion principle and the foundations of chemistry. **Reidel Publishing Company.**, 1986. v. 69, p. 267–272.

HELERBROCK, R. "O que é efeito fotoelétrico?"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-efeito-fotoeletrico.htm>. Acesso em 02 de novembro de 2022.

HEY, T.; WALTERS, P. **The New Quantum Universe**. 7ª edição. Ed. United Kingdom at the University Press, Cambridge- UK, 2011.

JEWETT, J. W. J.; SERWAY, R. A. **Física para cientistas e engenheiros: Volume 4 – Luz, óptica e física moderna**. 8ª: Vol. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

JUNG, C. G. **Psicologia e alquimia**. 4ª edição. Ed. Vozes. Petrópolis, Rio de Janeiro, 1991.

KAPLAN, I. G. The Pauli Exclusion Principle. Can It Be Proved? **Foundations of Physics**, 2013. v. 43, n. 10, p. 1233–1251.

KUMAR, M. **Quantum einstein, bohr and the great debate about the nature of reality**. 1st Americ ed. New York/London: W. W. NORTON & COMPANY, 2010.

LINDA HALL LIBRARY MAX PLANCK, acessado em 01/10/2022. Disponível na Internet em: <https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/max-planck>

- LINDORFF, D. **Pauli and Jung: The meeting of Two Great Minds**. segunda ed ed. Wheaton: Theosophical Publishing House, 2009.
- LOPES, J. L. **Do átomo pré-socrático às partículas elementares: a estrutura quântica da matéria**. 1o edição ed. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 1992.
- MARTINS, J. B. **O Spin, o momento supremo de Paul Ehrenfest**. São Paulo: Livraria da física, 2014.
- MEIER, C.A. **ATOM AND ARCHETYPE The Pauli/Jung Letters, 1932-1958**. New Jersey, Princeton University. Ed. Princeton University Press; Revised ed, 2001.
- MILLER, A. I. **137: Jung, Pauli, and the Pursuit of a Scientific Obsession**. [S.l.]: [s.n.], 2009.
- PAULI, W. **Pauli Wolfgang - Escritos Sobre Física Y Filosofia**. Madrid: Debate Pesamento, 1996.
- SCHENBERG, M. **Pensando a Física**. São Paulo, Brasiliense, 1984.
- SEGRÈ, E. **Dos raios x aos quarks**. Brasília. Editora Universidade de Brasília, 1987.
- SILVA, V. Um ideal de ciência: José Leite Lopes e a história da física no Brasil. **Ciência e Sociedade**, 2019. v. 6, n. 2, p. 35–47.
- SOMMERFELD, A. **Atomic structure and spectral lines**. 1ª edição. Ed. E. P. Dutton and Company inc. New York, 1934.
- VIEIRA, C. L. **História da física: artigos, ensaios e resenhas**. 1o edição ed. Rio de Janeiro: CBPF70 Anos, 2015.

APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO ENVIADO AOS PROFESSORES

Produto educacional

Este questionário servirá para avaliar o E-book intitulado “Wolfgang Pauli e o Princípio da exclusão” desenvolvido pelo mestrando José Allan com a orientação do professor Luciano de Azevedo. Para responder este questionário é imprescindível que você aprecie o material que foi enviado juntamente com este questionário.

As questões a seguir servirão para traçar um perfil dos professores participantes da pesquisa.

1. Nível de escolaridade:

R:

2. Disciplina(s) que leciona:

R:

3. Tipo de Instituição (ou instituições) de ensino que atua: (pode marcar mais de uma opção)

a) Municipal.

b) Estadual

c) Federal

d) Privada

4. Nível de escolaridade que você atua como professor:

a) Ensino fundamental

b) Ensino médio

c) Ensino superior

As questões a seguir servirão para análise do E-book, por isso a importância de se ter apreciado o mesmo.

Q1: O que você achou da inclusão de introdução à química quântica, no novo conteúdo curricular de Pernambuco do novo ensino médio?

- a) Bom
- b) Ruim
- c) Interessante
- d) Difícil

Q2: O conteúdo "introdução a química quântica" está de acordo com o programático para a série/nível de ensino, ou seja, 3º ano do ensino médio?

- a) Sim
- b) Não
- c) Parcialmente

Q3: Você considera o estudo da Teoria Quântica um tema relevante para ser discutido no ensino médio?

- a) Sim
- b) Não
- c) Parcialmente

Q4: Você já ministrou aulas sobre a Teoria Quântica? Se sim, já conhecia a história do Princípio da Exclusão?

- a) Sim
- b) Não
- c) Parcialmente

Q5: Você considera o Princípio da Exclusão um tema relevante para ser discutido no ensino médio?

- a) Sim

- b) Não
- c) Parcialmente

Q6: Você achou o conteúdo do E-book relevante para suas aulas?

- a) Sim
- b) Não
- c) Parcialmente

Q7: O conteúdo do E-book está de acordo com a linguagem para os alunos de ensino médio?

- a) Sim
- b) Não
- c) Parcialmente

Q8: Você tinha conhecimento de que o Princípio da Exclusão foi formulado por Pauli sem ele utilizar o SPIN do elétron?

- a) Sim
- b) Não

Q9: Você utilizaria o E-book em suas aulas?

- a) Sim
- b) Não

Q10: Quais tipos de metodologias você utilizaria (pode marcar mais de uma opção).

- Ensino por investigação.
- Utilização de TICs
- Aprendizado por problemas
- Estudo de casos
- Sala de aula invertida
- Seminários e discussões
- Outros

Aqui você pode comentar sobre as questões ou sobre o material e sugerir algo que precisa ser reavaliado ou acrescentado ao E-book.

APÊNDICE C - LINHA DO TEMPO DA VIDA DE WOLFGANG PAULI

Esta linha do tempo tem como finalidade organizar a ordem de acontecimentos importantes na vida de Wolfgang Pauli, acontecimentos estes relevantes para este trabalho. Considerou-se o livro de Charles Enz, *No Time to be Brief* e o livro de Bassalo e Carruso intitulado Pauli.

- 1869 - Wolfgang Joseph Pascheles, pai de Wolfgang Pauli, nasce em Praga;
- 1878 - Nascimento da mãe de Pauli, Bertha Camilla Schütz;
- 1898 - O pai de Pauli (Wolfgang Joseph Pascheles) recebe permissão para mudar seu nome para Pauli;
- 1899 - O pai de Pauli se converte de judeu a católico-romano em março, pouco antes seu casamento com Camilla Schütz;
- 1900 - Nascimento de Wolfgang Ernst Friedrich Pauli em 25 de abril;
- 1906 - A irmã mais nova de Pauli, Hertha Ernestina Pauli, nasce em 4 de setembro;
- 1910 - Pauli se matricula no Döbling Gymnasium, faz cursos de clássicos e segue as ciências naturais sob a direção de seu pai;
- 1911 - Os pais Wolfgang e Bertha Pauli deixam a Igreja Católica, por motivo desconhecido;
- 1914 - Pauli visita se padrinho Mach, pela última vez;
- 1916 - Pauli descobre que é descendente de judeus e seu padrinho Ernst Mach morre;
- 1918 - Pauli se forma no Döbling Gymnasium, na "classe de gênios", se matricula na Universidade de Munique sob orientação de Sommerfeld e submete seu primeiro trabalho para publicação tratando de um tema em relatividade geral e teoria de campo, antes de sair de Viena;
- 1919 Heisenberg se matricula em Munique e conhece Pauli e formam uma amizade que dura pela vida toda.
- 1921 - O artigo sobre a teoria da relatividade que Pauli escreveu é publicado. Pauli se forma pela Ludwig-Maximilian University em Munique, com louvor. A tese de doutorado de Pauli sob Sommerfeld contém a primeira prova de que a velha teoria quântica de Bohr e Sommerfeld havia atingido seus limites. Sua tese é sobre as limitações da antiga teoria quântica de Bohr e Sommerfeld quando aplicado ao íon

- molecular de Hidrogênio. Pauli torna-se assistente de Max Born em Göttingen para o período de inverno 1921-1922. Pauli e Born usam a teoria da perturbação astronômica em problemas atômicos. Pauli conhece Niels Bohr, que o convida para ir a Copenhague;
- 1922 - Após um verão em Hamburgo como assistente de William Lenz e passando ano letivo de 1922-1923, em Copenhague, com Niels Bohr, Pauli trabalhou no efeito Zeeman, enquanto ajudava Bohr em vários outros assuntos;
 - 1923 - Pauli aceita emprego em Hamburgo, onde fica até ir para Zurique em 1928. O modelo central para o efeito Zeeman é desenvolvido. Pauli recua do problema anômalo do efeito Zeeman porque é muito estressante. O "efeito Pauli" se origina enquanto Pauli está em Hamburgo;
 - 1924 - Pauli começa a escrever seu Antigo Testamento sobre a velha teoria quântica e sofre frustração com a física teórica;
 - Fevereiro: Laporte descobre uma nova regra de seleção no espectro do ferro. Isto é referido por Pauli e outros por algum tempo como "assinatura" e só mais tarde como "paridade";
 - Agosto: a teoria da estrutura hiperfina de Pauli A regra de Stoner para o sistema periódico é publicada;
 - Novembro: Pauli escreve a Landé que a complexidade da estrutura fina não reside no núcleo do átomo. Pauli logo publica seu raciocínio, que aparece em início de 1925;
 - Dezembro: Pauli reconhece um valor duplo das propriedades quânticas dos elétrons de valência. Pauli escreve para Bohr em 12 de dezembro dando seu raciocínio e conclusões sobre o Princípio da exclusão. Heisenberg lê a carta de Pauli, no qual ele defende uma nova mecânica quântica com energia e momento sendo mais fundamentais do que órbita, o que contribui para os pensamentos de Heisenberg sobre mecânica matricial. Pauli visita seus pais em Viena durante as férias de Natal;
 - 1925/ janeiro: os dois artigos de Pauli, o primeiro sobre a dualidade e o segundo sobre seu Princípio da exclusão são publicados. Kronig pensa no spin do elétron e discute o conceito com Pauli, mas Pauli desencoraja Kronig de publicar a ideia.
 - Maio: Pauli está frustrado e escreve a um colega que "deseja ser um comediante" em vez de ser um físico teórico;
 - Agosto: Uhlenbeck e Goldsmit introduzem o Spin (números quânticos) semi-integrais para o átomo de Hidrogênio;

- Novembro: Goudsmit e Uhlenbeck propõem o Spin do elétron com um artigo. Pauli está frustrado trabalhando em seu longo resumo dos princípios da velha teoria quântica;
- 1926/janeiro: Derivação de Pauli do espectro discreto de hidrogênio por métodos matriciais;
- Julho: Pauli finalmente aceita o Spin do elétron, depois de muita relutância;
- 1927/maio: Pauli introduz funções de onda não relativísticas "spinor" de dois componentes na mecânica quântica para abordar o spin do elétron;
- Novembro: a mãe de Pauli comete suicídio;
- 1928 - Pauli se muda para a ETH em Zurique. O pai de Pauli se casa novamente;
- 1929 - Pauli deixa a Igreja Católica por razões desconhecidas. Pauli se casa com Kate Deppner;
- 1930/novembro: o divórcio de Pauli de Kate Deppner;
- 1º de dezembro: Em uma carta a Pauli, Heisenberg se refere ao postulado do "nêutron" de Pauli;
- 4 de dezembro: Pauli anuncia publicamente sua hipótese sobre o neutrino;
- 1931 - Pauli quebra o braço em um episódio de bebedeira. Recebeu a medalha Lorentz;
- 1932/janeiro: o pai de Pauli recomenda para que ele faça consultas com Carl Gustav Jung;
- Jung pede para Pauli se consultar com uma mulher analista, em vez dele mesmo, devido à natureza das questões de relacionamento de Pauli com as mulheres. Pauli, em seu primeiro contato com sua analista Erna Rosenbaum, da Clínica Jung, foi na forma de uma carta datada de 3 de fevereiro. Jung se interessa pelos sonhos de Pauli e passa a consultá-lo pessoalmente. Pauli interpreta Mefistófeles e Gretchen representa o neutrino;
- 1933 - Pauli conhece Franca Bertram, que logo se torna sua segunda esposa. Pauli leva sua noiva para a casa de seu pai e madrasta em Viena no Natal;
- 1934 - 4 de abril: Pauli se casa com Franca Bertram;
- 1935 - Jung publica uma coleção dos sonhos de Pauli sem identificar sua fonte. Pauli se tornou professor visitante do instituto de física avançada (IFA), na Universidade de Princeton até 1936;
- 1938 - Pauli tornou-se cidadão alemão;
- 1940 - Pauli migrou para o Estados Unidos, tornou-se professor titular a convite da Universidade de Princeton;

- 1945 -Pauli recebe o prêmio Nobel de física pelo Princípio da Incerteza, sendo indicado por Einstein. Voltou para Zurique após o término da Segunda Guerra. Orientou a tese de doutorado do físico brasileiro José Leite Lopes;
- 1952 - Recebeu a medalha Franklin;
- 1958 - Recebeu a medalha Max Planck. Morreu em 15 de dezembro, vítima de câncer no pâncreas, no hospital da Cruz Vermelha em Zurique, no quarto 137.