

Wolfgang Pauli e o Princípio de Exclusão



Material associado ao programa de mestrado profissional em química em rede nacional (PROFQUI) e à dissertação de mestrado de José Allan Carlos e Silva.

RECIFE PE
2022

APRESENTAÇÃO

Ensinar é sempre uma atividade desafiadora, por isso, é preciso estar sempre se atualizando, seja melhorando o currículo, atualizando às práticas pedagógicas ou buscando novos conhecimentos. Desse modo, esse trabalho tem como finalidade ajudar o professor na sua busca de novos conhecimentos sobre um tema muito importante para a Química: o Princípio de Exclusão descoberto pelo físico austríaco Wolfgang Pauli.

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

Considerado pelo físico alemão Albert Einstein como seu sucessor, a história de Pauli é extremamente interessante, não só pela sua inteligência, mas também pelo seu comportamento curioso. Pauli foi um dos físicos mais produtivos da época áurea do surgimento das bases da Teoria Quântica, sendo chamado 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 de exclusão.

Neste produto educacional, apresentamos um pouco da História da Teoria Quântica e o trabalho de Pauli com a sua grande descoberta que foi o princípio de exclusão, que inclusive lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física de 1929, mostrando que os cientistas também possuem uma vida tão comum quanto qualquer outra pessoa. Sendo assim, vamos embarcar nessa história fantástica e verificar como o princípio de Exclusão de Pauli contribuiu para a organização da tabela 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

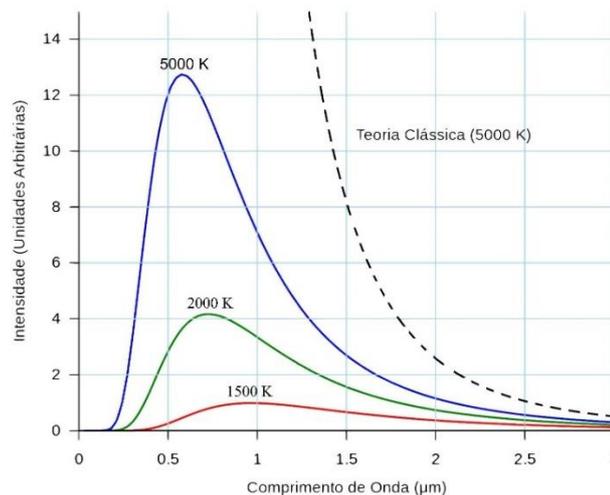
In memoriam: O autor dos versos acima, o Professor José Tavares de Sousa, da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Campus Campina Grande, faleceu em 06/08/2022. Fica aqui registrado o nosso agradecimento ao Prof. Tavares.

Uma breve história da quântica

1. Planck e a radiação do corpo negro

Começo com um questionamento, porque 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 de acordo com o aquecimento que o corpo sofre. A forma como a energia emitida se distribui em diversos comprimentos de onda só foi explicado corretamente pelo físico alemão Max Planck através do que ficou conhecido como “experimento do corpo negro” (BAKER, 2015, p. 14; ATKINS, 2012, p. 8-9; BRADY 2009 p. 258). 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.

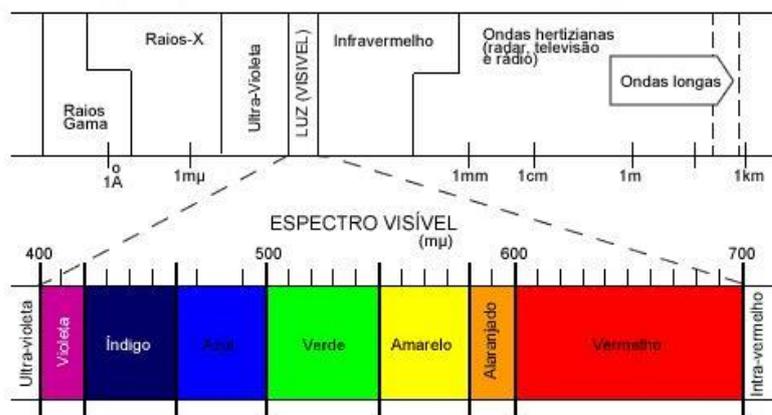


Fonte: Livro ondas e partículas p. 40

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, p. 8-9; FERREIRA, SORIANO, KRAMER, 1971, p. 40) 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 p. 213; BRADY 2009 p. 258)

Figura 2: Espectro eletromagnético.



Fonte: Site Só física.

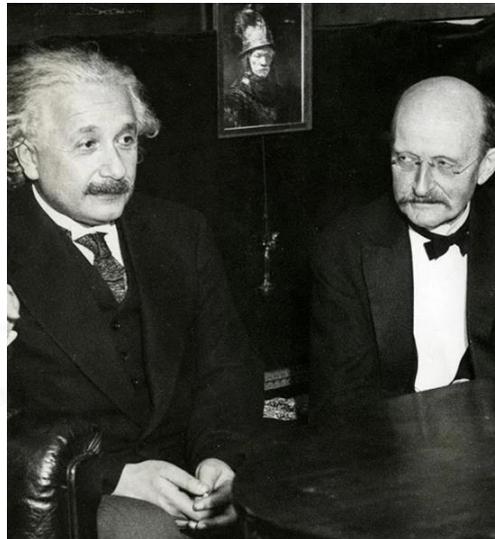
Para reproduzir as curvas experimentais da energia emitida em função dos comprimentos de onda, o físico alemão Max Planck utilizou um argumento nunca antes usado: o corpo negro não podia emitir energia em qualquer quantidade, mas só em quantidades que posteriormente foi batizada de “quantum”: $E = n h \nu$, 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, p. 33, FERREIRA, SORIANO, KRAMER, 1971, p. 40-42; CARUSO, 2016, p. 560)

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 p. 562). 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 Efeito fotoelétrico e a dualidade onda-partícula

Em 1905, Albert Einstein (figura 3) conseguiu, de forma criativa e diferente explicar o efeito fotoelétrico, que é 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, transferem 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, p. 33 CARUSO, 2016 p. 562).

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:

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

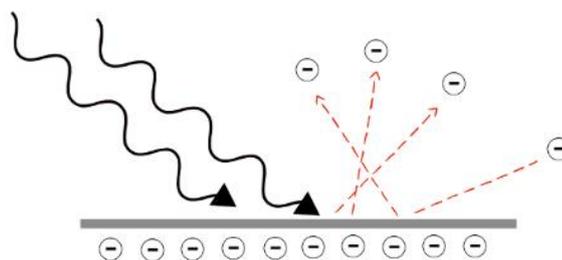
Onde V era a frequência da radiação incidente, que por sua vez é igual ao quociente velocidade da luz / comprimento de onda. Φ representa a energia mínima para arrancar o

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 V_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 fótons do espectro azul ou ultravioleta que possuem frequências mais altas que a vermelha, conseguiam expelir facilmente o elétron. (BAKER, 2015, p. 34)

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, p. 13; BAKER, 2015 p. 34).

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 p. 35; HAWKING, 2011, p. 978-979; HEY, 2011 p.22)

A teoria Quântica e o efeito fotoelétrico levaram os cientistas a novas descobertas, uma das mais importantes para o desenvolvimento da Teoria Quântica 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. Sua teoria sugere 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 p. 14; BAKER, 2015 p. 42), o inverso aconteceria com as partículas subatômicas que possuem massas muito pequenas e por isso possuiriam comprimentos de onda grandes.

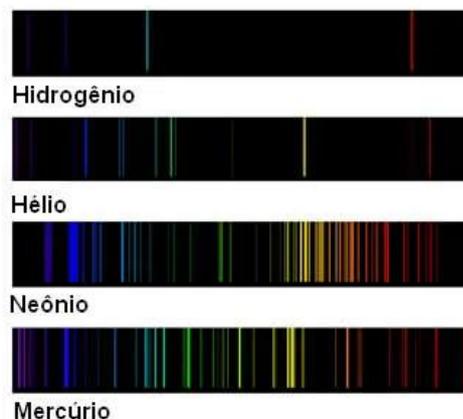
1.2 Modelo atômico de Bohr e efeito Zeeman

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 p. 56; HAWKING, 2011, p. 978-979; HEY, 2011 p.22; ATKINS, 2012, p. 14)

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, p. 09-10)

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 de átomos com vários elétrons como as observadas na Figura 5. (BRUSH, 1983 p. 217-218; BRADY, 2009, p 261; CARUSO, 2016 p. 698-699; LOPES, 1994, p. 547-548)

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, um outro efeito assustava os físicos porque não tinha

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 só veio a ser explicado posteriormente por conta dos avanços da Teoria Quântica. (BAKER, 2015 p. 56)

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 corpo negro e qual sua importância para o surgimento da quântica?
- 2) Como Planck resolveu a questão da catástrofe do ultravioleta?
- 3) Como você explicaria o efeito fotoelétrico e o que são 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 quântica?
- 6) De acordo com 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, 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, p. 01 ; ENZ, 2002, p. 11 ; MILLER, 2009, p. 53). 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, 2002, p. 11; MILLER, 2009, p. 53).

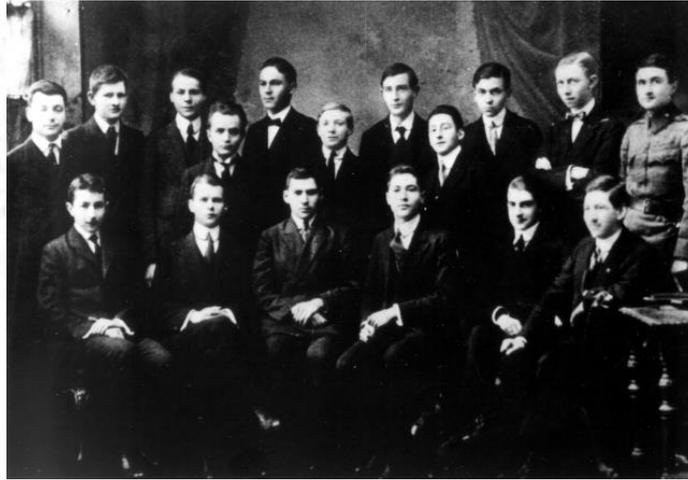
Figura 6: Wolfgang Pauli com 9 meses e sua mãe Bertha.



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 de idade, 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, p. 26; 2009, p. 29.)

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, p. 9).

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, p. 10).

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, p. 10).

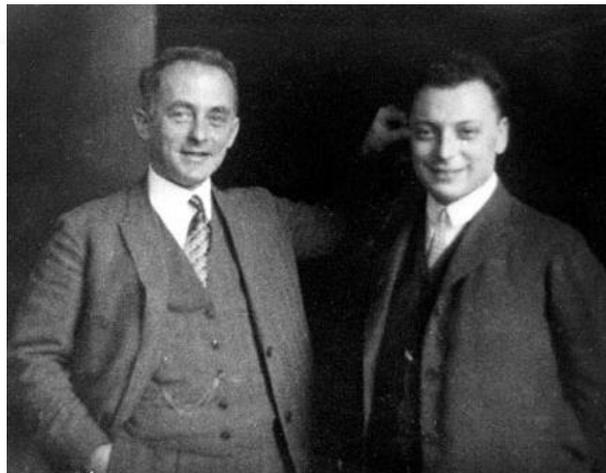
Figura 8: Pauli e Einstein, fotografia tirada por e Ehrenfest.



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 a 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, p. 33).

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, p. 33).

O seu estudo sobre o efeito Zeeman resultou no famoso artigo sobre o princípio de exclusão que foi submetido em 16 de janeiro de 1925, que o levou a ganhar o prêmio Nobel de Física de 1929. Em um discurso no Instituto de Estudos Avançados de Princeton, durante o jantar em sua homenagem por ter recebido o prêmio Nobel daquele ano, Pauli falou: “a premiação desse ano me lembra os meus dias de estudo em Munique”. (ENZ, 2009, p. 34 - 35).

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, p. 85).

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 junto com sua esposa Franca, em uma viagem difícil pela Europa para chegar aos Estados Unidos em 1940. (BASSALO; CARUSO, 2013, p. 3; ENZ, 2002, p. 281; PAULI, 1996, p. 14).

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 1929, com indicação de ninguém menos que Albert Einstein, pelo seu trabalho sobre o princípio de exclusão que é comumente chamado de princípio de exclusão de Pauli, no qual revela a existência do quarto número quântico, o Spin. Foi em dezembro de 1929 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, p. 395; 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 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, devido ao fato de 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 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, p. 533; 2009, p. 55).

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 a 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” ou “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. Isso posto, 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, p. 3; PAULI, 1996, p 14). Boa parte da correspondência entre eles foi publicada só em 2001 no livro *Atom and Archetype* (MEIER, 2001, capa), ver Figura 13.

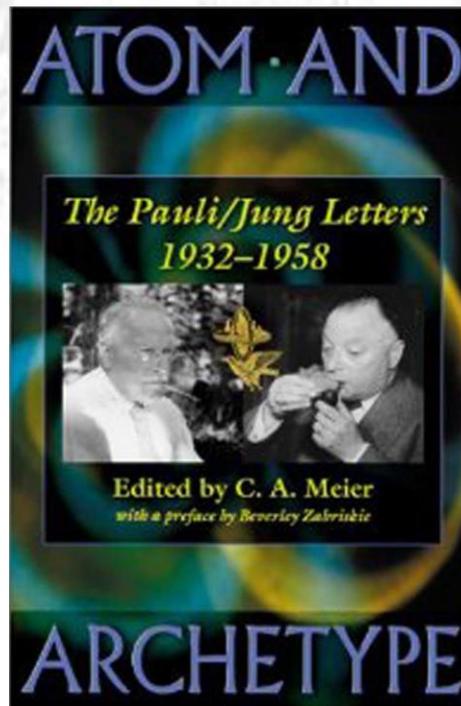
Figura 12: Carl Gustav Jung.



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, p. 51). Dessa forma, Jung descreve a existência de uma relação entre as imagens dos sonhos de Pauli com a física e a psicologia descritos por Lindorff (2009) dessa forma:

“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 alquímia, 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 a 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 e que os 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 o sucessor de Jung, na universidade onde ele trabalhava, Carl A. Meier, revelou que Pauli havia feito análise com Rosenbaum, que era assistente de Jung na época. Logo depois, a assistente pessoal de Jung, Aniela Jaffé, confirmou que os sonhos que Jung costumava discutir e mencionar eram de fato de Pauli. (MILLER, 2009, p. 167-168)

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).

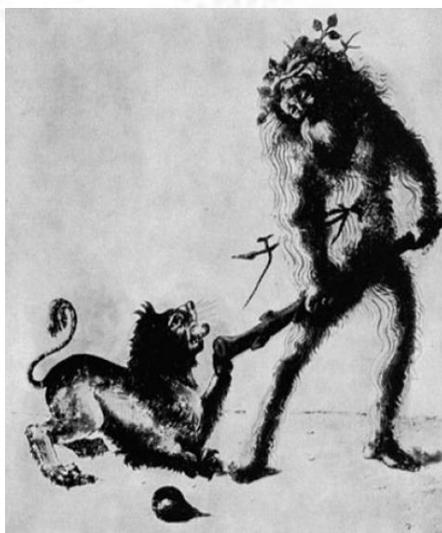
Jung, analisando os sonhos de Pauli, descobriu que imagens simbólicas dos sonhos se associavam a símbolos de textos alquímicos do século XVII e anteriores. Jung sustentou que as imagens dos símbolos alquímicos e dos sonhos modernos relatados por Pauli eram semelhantes e davam credibilidade para a sua 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, p. 169).

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, p. 186). 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 de 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, p. 236).

A análise feita por Jung do material onírico de Pauli é muito valiosa. Recentemente já encontramos estudos que afirmam que o Princípio de 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 20 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, p. 236). Além do mais, 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, p. 36).

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, p. 2; ENZ, 2009, p. 152).

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, por causa do efeito Pauli, já que quem presenciava dizia que parecia um processo quase mágico. O próprio Pauli acreditava em seu efeito, um 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, p. 101; ENZ, 2009, p. 152 LINDORFF, 2009, p. 12 - 13).

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 de 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, que 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, p. 547 - 548).

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, p. 162).

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, p. 163; MILLER, 2009, p. 86). 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, p. 93). 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, p. 376).

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, p. 426). 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, p. 103). Segundo Sommerfeld em seu livro já citado (SOMMERFELD, 1931 p. 155) a distribuição dos elétrons nas camadas eletrônicas era feita de forma errada mesmo por Bohr. A segunda camada que todos sabia possui 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 conseqüentemente 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 de exclusão é determinante para a classificação periódica no formato atual (BAKER, 2015, p. 61; KUMAR, 2010, p.163).

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 de exclusão de Pauli afirma que não existem dois elétrons com 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 de 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, p. 279; ATKINS, 2012, p.30; LEITE, 1992, p. 547-548).

Isso explica muita coisa como por exemplo, somente dois elétrons podem ocupar simultaneamente o orbital $1s$. dessa maneira o princípio de 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.

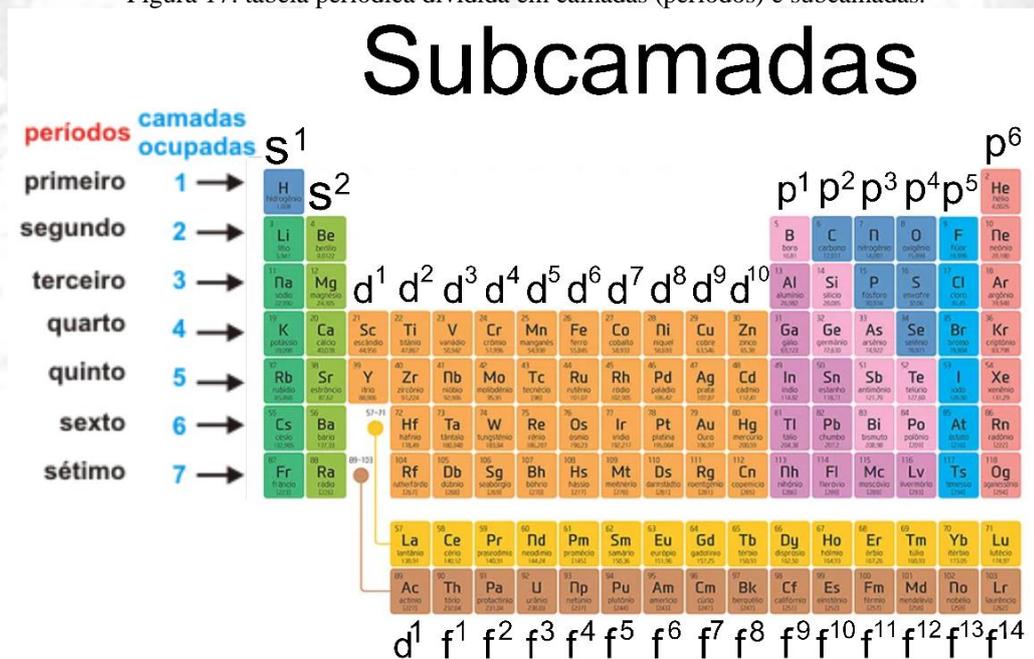
Tabela 3: limite de elétrons por camadas.

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 de exclusão de Pauli, corrige a forma 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.



Fonte: própria.

O spin

Na mesma época que Pauli desenvolvia o princípio de 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 através de 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, p.61; 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, p. 86).

Figura 18: Pauli e Ehrenfest rindo de uma piada.



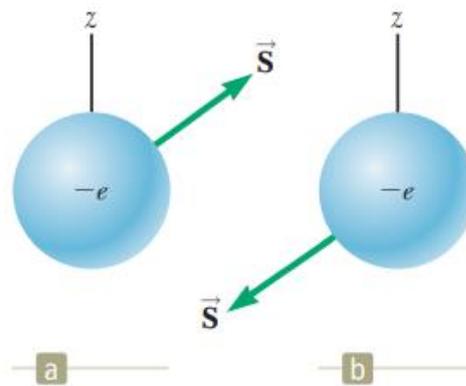
Fonte: Miller 2009, p. 180.

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 de 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, p. 92).

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. Depois, 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

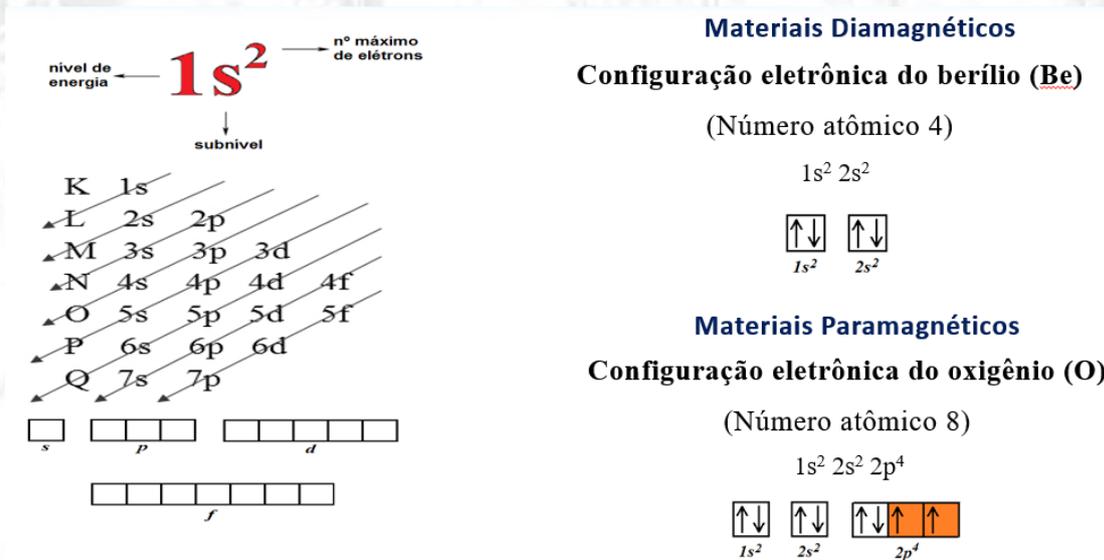


Fonte: Jewett & Serway (2013, p. 247).

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, 2009, p. 86).

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 e 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, p. 279; 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 junto com a distribuição eletrônica dele, obedecendo o Princípio de Exclusão de Pauli, consegue-se classificar os materiais em diamagnéticos ou paramagnéticos. (BRADY, 2016, p. 279; 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 de 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 de 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. Virtuoso 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.

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, Rafael. "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, Mário. **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.