

Maria Goeppert-Mayer e o modelo nuclear de camadas: contribuições de uma mulher cientista e implicações para o ensino de Física⁺⁺

Larissa do Nascimento Pires¹

Mestranda em Educação Científica e Tecnológica

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis – SC

Israel Müller dos Santos¹

Felipe Damasio¹

Instituto Federal de Santa Catarina

Araranguá – SC

Resumo

Historicamente, a presença feminina na construção científica ocorreu em meio a inúmeras barreiras, até que as mulheres conquistassem posições de destaque na ciência. Ainda hoje, as láureas concedidas pelo Prêmio Nobel demonstram que a área da Física apresenta uma baixa representatividade de mulheres cientistas. No contexto da educação científica, há um desconhecimento destes exemplos de mulheres cujas contribuições causaram transformações na ciência e na tecnologia. Para contrapor esse contexto no ensino, este artigo pretende apresentar os conhecimentos desenvolvidos pela cientista Maria Goeppert-Mayer que a levaram a ser laureada com o Prêmio Nobel de Física em 1963. A partir do estudo de artigos científicos relacionados com as contribuições da cientista, os resultados apresentam um texto instrucional que poderá ser utilizado por professoras/es em aulas sobre física nuclear. Também, este artigo descreve uma proposta didática, baseada nas Unidades de Ensino Potencialmente Significativas, como sugestão para a abordagem destes conhecimentos no ensino de Física, com ênfase na discussão para alunas e alunos do ensino médio.

⁺⁺ Maria Goeppert-Mayer and the nuclear shell model: contributions of a women scientist and implications to the physics teaching

* Recebido: março de 2020

Aceito: novembro de 2020.

¹ E-mails: larissa.n.pires@hotmail.com; israel.santos@ifsc.edu.br; felipedamasio@ifsc.edu.br

Palavras-chave: *Prêmio Nobel de Física; Mulheres na Ciência; Física Nuclear; Unidades de Ensino Potencialmente Significativas.*

Abstract

Historically, the female presence in the scientific construction occurred amid numerous barriers, until women rose to prominent positions in science. Even today, the Nobel laureates show the area of Physics has a low representation of women scientists. In the context of science education, there is unfamiliarity about examples of women scientists whose contributions caused changes in science and technology. To counteract this context in teaching, this article aims to present the knowledge developed by scientist Maria Goeppert-Mayer that led her to be awarded the Nobel Prize in Physics in 1963. Based on the study of scientific articles that are related to the scientist's contributions, the results present an instructional text that can be used by teachers in physics classes. Also, this article describes a didactic proposal based on Potentially Significant Teaching Units that can serve as a suggestion for approaching this knowledge in physics teaching, with emphasis on the discussion of this theme for high school students.

Keywords: *Nobel Prize in Physics; Women in Science; Nuclear Physics; Potentially Significant Teaching Units.*

I. Introdução

“Do girls only have to learn how to read just to study cook books?”²

Maria Goeppert-Mayer

É considerado um consenso, no campo acadêmico, a desconsideração da participação feminina na ciência. Os estudos feministas, por exemplo, evidenciaram que historicamente se apresentou uma invisibilidade quanto à presença feminina na produção científica (SILVA; RIBEIRO, 2014), implicando que mulheres necessitaram atravessar muitas barreiras para galgarem posições de destaque na ciência (LIMA, 2015). No contexto universitário, por exemplo, as mulheres passaram a ser admitidas como docentes e discentes somente a partir do final do século XIX (CARVALHO; CASAGRANDE, 2011). Ainda assim, mesmo com o resistente acesso das mulheres a essas instituições, cientistas reconhecidas como Marie Curie

² Em português: “As meninas só precisam aprender a ler apenas para estudar livros de culinária?”. Disponível em: <<https://valentinaproject.wordpress.com/2014/03/24/maria-goeppert-mayer-theoretical-physicist/>>. Acesso em: 5 jul. 2019.

(CORDEIRO, 2013) e Lise Meitner (LIMA, 2015) precisaram conviver com situações de discriminação na academia, sendo relegadas ao desenvolvimento de pesquisas científicas de maneira subordinada, em espaços improvisados e sem quaisquer rendimentos.

Embora esses contextos não sejam visíveis nos dias de hoje, considerando o crescente aumento da presença feminina na atividade científica (CORDEIRO, 2013), existem mecanismos que descrevem a presente desproporção entre mulheres e homens na ciência (OLINTO, 2011). Um desses elementos diz respeito às escolhas profissionais sofrerem influência de crenças instituídas socialmente que estabelecem diferentes habilidades para mulheres e homens (CUNHA *et al.*, 2014): a chamada segregação horizontal. Nesse sentido, é possível perceber que “as mulheres são a grande maioria nas ciências da saúde, educação e humanas, ou seja, nas áreas do cuidado, enquanto elas são minoria significativa nas ciências exatas” (CARVALHO; CASAGRANDE, 2011, p. 30). Decorrente desse cenário se apresenta a segregação vertical, que pode ser observada no contexto da ascensão profissional e acadêmica. Esse mecanismo consiste na baixa representatividade feminina nos estágios mais avançados da carreira e em posições de prestígio profissional (SAITOVITCH; LIMA; BARBOSA, 2015). O *efeito tesoura* reflete que menos rostos femininos se apresentam na medida em que se observa a ascensão na carreira científica (OLINTO, 2011).

Reflexões sobre elementos históricos possibilitam problematizar a participação das mulheres no desenvolvimento científico, como as premiações científicas, a exemplo dos Prêmios Nobel (ZAGUETTO; VENANCIO, 2014; VOLPATO; MORAIS, 2019). Os números presentes na página oficial da premiação apresentam que, até 2020, de 934 laureados e 28 organizações, 58 prêmios foram destinados a mulheres. Desde o ano de 1901, vinte e três prêmios foram concedidos para mulheres nas áreas das ciências da natureza: doze em Medicina ou Fisiologia, sete na Química e quatro na Física. Nesta última área, as laureadas foram: Marie Curie (1867-1934), em 1903, por suas pesquisas relativas à natureza atômica das radiações de urânio, que também recebeu a láurea no Prêmio Nobel de Química, em 1911; Maria Goeppert-Mayer (1906-1972), em 1963, cuja pesquisa descreveu um modelo para a estrutura do núcleo atômico; Donna Strickland (1959-), laureada em 2018, por suas contribuições à física dos *lasers*; e a astrônoma Andrea Ghez (1965-), em 2020, que recebeu a láurea pela “descoberta de um objeto compacto supermassivo no centro de nossa galáxia” (NOBEL PRIZE, 2020). Neste sentido, é possível argumentar que os prêmios científicos, como os Prêmios Nobel, ainda evidenciam a ciência, de certo modo, como sendo predominantemente eurocêntrica e patriarcal (LIMA, 2015).

A conjuntura histórica responsável por esta invisibilidade feminina na ciência, presente na história de renomadas cientistas, nas premiações científicas e até de certa forma no panorama científico e acadêmico da atualidade, é um possível reflexo de uma ciência moderna que se construiu associada predominantemente a narrativas masculinas (CHASSOT, 2004; LIMA, 2015). Devido a uma construção histórica e cultural, se compreendeu o empreendimento científico como uma atividade guiada pelos atributos de neutralidade,

racionalidade e objetividade, características socialmente associadas à figura masculina (FIÚZA *et al.*, 2009). Da mesma forma, no cenário da educação científica, se reproduz justamente a ciência como uma atividade salvacionista, elitista, individualista, desenvolvida a partir dos esforços de gênios (GIL-PÉREZ *et al.*, 2001); estas concepções são responsáveis por disseminar uma imagem deformada sobre o trabalho científico. Esse contexto se apresenta como uma possível consequência de uma alfabetização científica baseada na transmissão desarticulada de conhecimentos, que provocam a construção de concepções que consideram a ciência como distante da realidade de meninas e mulheres (CORDEIRO, 2017).

Assim, é importante ressaltar que, no contexto de ensino, antes de modificar essas concepções sobre ciência que são construídas pelas/os alunas/os, há a igual necessidade de modificar o posicionamento das/os professoras/es sobre a ciência (FERNANDEZ *et al.*, 2002), pois garantir “uma noção mais realista da dinâmica científica e uma compreensão epistemológica adequada da Ciência permite ao docente organizar seu saber para um ensino contextualizado, dialógico e tolerante” (HEERDT; BATISTA, 2016, p. 30). Portanto, se apresenta como necessário que as alunas e os alunos, considerando a orientação das/os docentes, construam concepções críticas e articuladas sobre a ciência, que de outra maneira, a coloquem como uma atividade indissociável dos contextos sociais, culturais e históricos de cada época (SILVA; RIBEIRO, 2014) e construída a partir da contribuição de diferentes pessoas, inclusive de mulheres.

Apesar desse aspecto, as pesquisas em educação em ciências evidenciam que além de uma possível omissão de exemplos de mulheres cientistas em livros didáticos (CORDEIRO; PEDUZZI, 2014), se apresenta uma possível escassez de estudos que abordem, de maneira específica, exemplos de mulheres cientistas no contexto da educação científica (LIMA, 2015). Reconhecendo essa lacuna, objetivando auxiliar a elaboração de práticas de ensino-aprendizagem que possibilitem a discussão, no contexto de sala de aula, de uma ciência que contempla “casualidades, erros, intuições, ações criativas; produção de homens e mulheres” (PEDUZZI; RAICIK, 2020, p. 42), sugere-se a elaboração de propostas didáticas a qual auxiliem as/os docentes na abordagem sobre mulheres cientistas. A partir desse contexto, acredita-se que é possível superar justamente o entendimento da construção científica como um processo puramente neutro, pois “desconstruir a natureza supostamente neutra da ciência tende a dar visibilidade a mulheres que fizeram parte das transformações científicas e tecnológicas” (LIMA; DANTAS; CABRAL, 2017, p. 5608).

Assim sendo, considerando as supracitadas discussões, essa pesquisa pretende descrever aspectos dos conhecimentos desenvolvidos pela cientista Maria Goeppert-Mayer, que, ao lado de Marie Curie e Lise Meitner, fora responsável por uma das contribuições mais significativas para a história da física nuclear (CHASSOT, 1997). De fato, a área da física nuclear “é emblemática em um aspecto inusitado, como em nenhum outro momento anterior na História da Ciência: o protagonismo de cientistas mulheres no desenvolvimento científico” (CORDEIRO; PEDUZZI, 2014, p. 558). O desenvolvimento do modelo nuclear de camadas

(GOEPPERT-MAYER, 1948), considerado possivelmente como a primeira estrutura nuclear descrita por meio da Mecânica Quântica (CORTES, 2018), possibilitou a Maria Goepfert-Mayer ser laureada, no ano de 1963, com o Prêmio Nobel de Física.

A escolha da figura de Maria Goepfert-Mayer se fundamenta por ser uma célebre cientista do século XX cujas contribuições são pouco mencionadas no contexto acadêmico do ensino de Física (CORTES, 2018). Seus conhecimentos são mencionados apenas de maneira pontual na literatura brasileira, como em publicações acadêmicas relativas à história da física nuclear (LEPINE-SZILY, 2005; TAVARES, 2019). Assim, este trabalho objetiva responder aos seguintes questionamentos: *Quem é Maria Goepfert-Mayer? Quais as contribuições desta cientista para a física nuclear que a levaram a ser laureada com o Prêmio Nobel de Física? Considerando a discussão sobre a presença das mulheres na ciência, como seu trabalho pode ser apresentado no contexto do ensino de Física?* Nesse sentido, esta pesquisa se propõe a amenizar possíveis lacunas relativas à ausência de investigações nas quais se abordem os conhecimentos desenvolvidos por mulheres cientistas no contexto de educação científica no ensino de Física. É importante ressaltar que a utilização do Prêmio Nobel como contexto de discussão quanto à participação das mulheres na ciência consiste apenas em um recorte para abordagem dessa temática, pois, além de se considerar que há outras lãureas relevantes que reconhecem pesquisadoras e pesquisadores, é importante reconhecer que essas premiações não fogem de complexos elementos, como influências políticas, que determinam as escolhas das/os laureadas/os (FARIAS, 2001).

Desta maneira, este artigo considera como hipótese que, a partir da elaboração de propostas didáticas que apresentem modelos de mulheres cientistas, é possível se desenvolver, no contexto de sala de aula, ambientes e condições propícios para que as/os discentes possam reconhecer a ciência como uma construção humana. Esses exemplos podem incentivar as meninas e os meninos para que possam se reconhecer como futuros atuantes no meio científico, pois exemplos “que mostram mulheres cientistas podem servir de motivação para as meninas na busca pela profissão científica, pois geram empatia e reconhecimento” (REZNIK *et al.*, 2017, p. 845). Mais do que isso, citando Maria Goepfert-Mayer, é possível demonstrar que meninas podem estudar não somente para lerem livros de receitas.

II. Maria Goepfert-Mayer

Após sessenta anos da premiação de Marie Curie, a cientista teuto-americana Maria Goepfert-Mayer foi a segunda mulher a ser premiada no Nobel de Física, no ano de 1963, sendo também a terceira mulher na história a receber a lãurea em uma categoria relacionada à ciência (SACHS, 1982). Considerando que a cientista vivenciou um contexto social relativo à Segunda Guerra Mundial, estando imersa em um mundo em pleno desenvolvimento tecnológico, sua história e suas respectivas contribuições científicas nesse contexto são pouco reconhecidas na literatura sobre a História da Ciência (PADILHA, 2001).

É possível dizer que a ciência sempre consistiu na temática principal na vida de Maria Goeppert-Mayer (SACHS, 1982), sendo que seu contexto de vida fora fundamental para a construção da sua carreira: Maria Goeppert-Mayer (Fig. 1) pertencia a uma família de pesquisadores e acadêmicos, estando desde muito cedo imersa no ambiente universitário. A figura mais encorajadora em sua vida fora seu pai, cuja preocupação com a carreira de sua filha era tão evidente, que ele sempre a encorajava a ser mais do que uma mulher (MCGRAYNE, 1995): o que significava naquela época, na visão de seu pai, ser somente uma dona de casa.



Fig. 1 –Maria Goeppert-Mayer (Photograph by Louise Barker, courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives).

Maria Gertrud Kate Goeppert nasceu no dia 28 de junho de 1906, na cidade de Katowice na região da Alta Silesia, pertencente então à Alemanha; hoje, a região integra a Polônia. A cientista era filha única de Maria Goeppert-Mayer Wolff e de Friederich Goeppert, este que, em 1905, contribuiu na erradicação da epidemia de meningite ocorrida na região da Silesia (GRZYBOWSKI; PIETRZAK, 2013). Cinco anos depois, esse trabalho científico rendeu ao pai de Maria Goeppert-Mayer uma habilitação para atuar na Universidade de Göttingen como professor de pediatria. Nesse sentido, ela cresceu em um ambiente de fascinação com a ciência, além de possuir o suporte de sua família para seguir na carreira científica. De fato, ela sentiria orgulho de pertencer à sexta geração de professores universitários da família (SACHS, 1982).

Apesar de seu desejo de ingressar na universidade, não havia escolas naquela época para preparação de meninas para este propósito. Em 1921, Maria Goeppert-Mayer deixou a escola pública para estudar em uma pequena escola particular, administrada por mulheres sufragistas, que possuíam a intenção de preparar meninas para os exames de admissão das universidades. No entanto, em consequência de problemas financeiros, a instituição fechou as portas antes que pudesse concluir seu curso. Apesar disso, na primavera do ano de 1924,

Maria Goeppert-Mayer foi admitida como estudante de Matemática na Universidade de Göttingen. Exceto por um período na Universidade de Cambridge, a sua carreira como estudante universitária foi desenvolvida em Göttingen, na Alemanha (SACHS, 1982).

Nessa época, essa instituição estava repleta de grandes nomes da Matemática e da Física; cabe apontar, expressivamente homens. Durante sua vida acadêmica, Maria Goeppert-Mayer veio a conhecer, por exemplo: Arthur Compton, Paul Dirac, Enrico Fermi, Werner Heisenberg, Linus Pauling e Wolfgang Pauli. Os seminários sobre Mecânica Quântica do físico Max Born (JOHNSON, 1986) foram uma das suas influências para que ela adentrasse na Física (BANERJEE, 2007). Max Born (Fig. 2) se tornou próximo da família de Maria Goeppert-Mayer bem como a orientou em seus primeiros trabalhos acadêmicos.



Fig. 2 – Victor Weisskopf, Maria Goeppert Mayer e Max Born (AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection, Gift of Jost Lemmerich).

Seus estudos acerca dos conhecimentos de Mecânica Quântica resultaram no desenvolvimento do seu doutorado, apresentado no ano de 1930. Esse trabalho, considerado por Eugene Wigner (1902-1995) como uma “obra prima de clareza e concretude”, abordou o processo do fóton duplo, que descreve a possibilidade de um elétron sofrer transições eletrônicas a partir da emissão ou absorção simultânea de dois fótons, sendo primeiramente descrito sem qualquer evidência experimental. Após o desenvolvimento dos *lasers* e da óptica não linear nos anos 60, foi possível corroborar experimentalmente essas previsões elaboradas pela cientista (SACHS, 1979; GRZYBOWSKI; PIETRZAK, 2013). Nesse contexto, vale uma observação curiosa: esse trabalho de Maria Goeppert-Mayer foi citado no trabalho de doutorado de Donna Strickland, laureada com o Nobel de Física em 2018.

Após a publicação de seu doutorado, o pai de Maria Goeppert-Mayer veio a falecer. Esse acontecimento agravou a situação financeira da família, que necessitou alugar parte do apartamento em que moravam para estudantes. Um desses estudantes era o químico Joseph Mayer, que posteriormente acabou por se casar com Maria Goeppert-Mayer; juntos tiveram

dois filhos: Marianne, nascida em 1933; e Peter, nascido em 1938 (MCGRAYNE, 1995). Embora seu marido tenha assumido um papel importante na carreira científica de Maria Goeppert-Mayer (JOHNSON, 1986), por sempre encorajá-la e persuadi-la a continuar na ciência, McGrayne (1985) conta que a cientista chegou a relatar a culpa de não poder estar tão presente na vida dos filhos por conta dos compromissos acadêmicos. Durante essa década, Maria Goeppert-Mayer e seu marido se mudaram para a cidade norte-americana de Baltimore, no estado de Maryland. Na Universidade Johns Hopkins, a cientista trabalhava nas atividades científicas da instituição, também lecionando algumas palestras para estudantes de graduação (SACHS, 1982) sem quaisquer remunerações financeiras (MCGRAYNE, 1995). Essa situação era resultado dos problemas salariais durante a Grande Depressão (GRZYBOWSKI; PIETRZAK, 2013), bem como devido à vigência de uma lei contra o nepotismo (BANERJEE, 2007).

Durante a sua estadia em Baltimore, a cientista começou a adentrar na área da física nuclear. Seu primeiro trabalho nessa área abordou o decaimento *double beta-decay*, utilizando a recente teoria de decaimento beta proposta por Enrico Fermi. Publicado no ano de 1935, esse trabalho representara a utilização das mesmas técnicas que havia aplicado em sua tese de doutorado, mas em um contexto completamente diferente. Robert Sachs, que fora aluno de Maria Goeppert-Mayer durante sua graduação (JOHNSON, 1986), descreve que suas palestras eram técnicas e organizadas, além de possuir muita afinidade com elementos de física teórica (SACHS, 1982).

Em 1939, Joseph Mayer e Maria Goeppert-Mayer (Fig. 3) se mudaram para Nova York, onde trabalharam na Universidade de Columbia (SACHS, 1982). Nessa época, a cientista começou a estudar a estrutura eletrônica de elementos transurânicos (GRZYBOWSKI; PIETRZAK, 2013). O casal possuía popularidade entre os alunos, sendo chamados de “Joe e Maria Goeppert-Mayer”. Em 1940 se envolveram na escrita e publicação de um livro chamado *Statistical Mechanics* (BANERJEE, 2007); alguns cientistas da universidade chegaram a desconsiderar Maria Goeppert-Mayer na autoria dessa publicação, sendo reconhecida como somente assistente de seu marido (MCGRAYNE, 1995). No ano seguinte, ela conseguiu, pela primeira vez, uma posição remunerada de meio período na Faculdade Sarah Lawrence, onde pode desenvolver e apresentar um curso de ciência unificada (SACHS, 1982; MCGRAYNE, 1995).

A carreira de Maria Goeppert-Mayer sofre uma considerável mudança a partir da entrada dos Estados Unidos na Segunda Guerra Mundial (JOHNSON, 1986), pois em 1942, Maria Goeppert-Mayer é convidada, pelo físico Harold Urey (1893-1981), laureado no Prêmio Nobel de Química em 1934 pela obtenção do deutério (SABIROVA, 2016), para cooperar em um grupo secreto no Projeto Manhattan para separação do Urânio-235 a partir do urânio natural, sendo parte do trabalho para o desenvolvimento de uma bomba atômica. Apesar de ser alemã, a cientista não simpatizava com os sentimentos fascistas da Segunda Guerra Mundial. Academicamente, esse momento lhe serviu como uma possibilidade de

utilizar seu conhecimento em físico-química, podendo pesquisar acerca das propriedades termodinâmicas do gás hexafluoreto de urânio. Cabe ressaltar que, no contexto da Segunda Guerra Mundial, houve a utilização do método de ultracentrifugação deste gás para produção de urânio enriquecido (SOUZA; DANTAS; 2010).



Fig. 3 – Joseph Mayer e Maria Goeppert-Mayer (AIP Emilio Segrè Visual Archives, Gift of Maria Stein, Maria Stein Collection).

Depois da Guerra, em 1946, Joseph e Maria Goeppert-Mayer se mudam para a cidade de Chicago. Novamente, a pesquisadora acabou por trabalhar como professora voluntária na Universidade de Chicago, devido às mesmas regras contra o nepotismo, que não permitiam a contratação de casais em cargos acadêmicos (SACHS, 1979). Ao mesmo tempo, Maria Goeppert-Mayer passou a colaborar em pesquisas sobre física nuclear no recém-formado Laboratório Nacional de Argonne (Fig. 4), coordenado por Robert Sachs, um de seus alunos de graduação durante a década de 1930 (JOHNSON, 1986). O apoio financeiro dessa instituição fora crucial para que Maria Goeppert-Mayer pudesse desenvolver sua maior contribuição para o campo da física nuclear (SACHS, 1982).



Fig. 4 – Maria Goeppert-Mayer e colegas no Laboratório Nacional de Argonne (Image courtesy of Argonne National Laboratory).

Igualmente, sua familiaridade com os processos experimentais, apreendida em suas pesquisas anteriores, possibilitou a Maria Goeppert-Mayer contribuir nos estudos acerca do comportamento nuclear: ela percebeu que certos núcleos atômicos de alguns elementos com números específicos de prótons e nêutrons eram mais estáveis do que outros elementos, o que veio a denominar de *números mágicos*. Ainda que essa teoria tenha sido primeiramente proposta, em 1933, pelo físico francês Walter Elsasser (1904-1991), o aprofundamento teórico por parte de Maria Goeppert-Mayer lhe rendeu uma posterior premiação no Nobel de Física (GRZYBOWSKI; PIETRZAK, 2013).

O reconhecimento da propriedade dos núcleos atômicos a partir de um ordenamento seguindo os chamados *números mágicos* (LEPINE-SZILY, 2005) fora também descrita de maneira independente pelo físico alemão Johannes Hans Daniel Jensen (1907-1973). Quando se encontraram na Alemanha em meados da década de 1950, Goeppert-Mayer e Jensen realizaram uma cooperação científica sobre esse modelo nuclear, que culminou na publicação de uma obra acerca do modelo nuclear de camadas, no ano de 1955. Maria Goeppert-Mayer e Hans Jensen receberam a premiação no Nobel de Física em 1963 por suas descobertas relativas à estrutura nuclear, prêmio também compartilhado com Eugene Wigner, responsável por cunhar a definição dos *números mágicos*. Durante a entrega, descreve-se que a cientista proferiu a seguinte frase³: “Ganhar o prêmio não foi tão emocionante quanto fazer o trabalho em si”; entretanto, um dos jornais da localidade veiculou sua láurea da seguinte maneira: “Mãe de San Diego ganha o Prêmio Nobel” (PACHECO, 2019).

Em meados da década de 1960, após a sua láurea, Maria Goeppert-Mayer fora nomeada professora titular de Física na Universidade da Califórnia. Entretanto, após a sua chegada à cidade de San Diego, ela sofreu um derrame, o que fez com que os seus anos seguintes fossem marcados por constantes problemas de saúde. Mesmo assim, Maria Goeppert-Mayer sempre continuou a disseminar e expor os conhecimentos acerca do modelo⁴ nuclear de camadas, publicando uma revisão sobre seu trabalho a partir de uma colaboração com Hans Jensen. Maria Goeppert-Mayer veio a falecer devido a uma embolia pulmonar no início do ano de 1972 (MCGRAYNE, 1995). Como homenagem póstuma, a Sociedade Americana de Física desenvolveu o Prêmio Maria Goeppert-Mayer, objetivando conceder visibilidade a jovens mulheres dedicadas à carreira em Física; também, uma cratera em Vênus fora nomeada em homenagem à cientista (PACHECO, 2019).

III. Física Atômica e Nuclear

Antes de discutir os conhecimentos desenvolvidos por Maria Goeppert-Mayer que a levaram a ser laureada com o Prêmio Nobel de Física, cabe descrever alguns elementos relativos ao contexto histórico da física atômica e nuclear, os quais ajudam a compreender o

³ Em inglês: “Winning the prize wasn't half as exciting as doing the work itself”.

⁴ Em inglês, esse conceito é conhecido como “nuclear shell model”.

ambiente de inserção das suas contribuições científicas. Para tanto, em meio ao contexto do final do século XIX se construiu o cenário para desenvolvimento dos conhecimentos da física atômica e nuclear, a partir das influências de diferentes campos da Física, como o desenvolvimento da Radioatividade e o estabelecimento da Mecânica Quântica. De maneira mais geral, nesse cenário se desenvolveram incontáveis estudos para se compreender a constituição da matéria (MELZER; AIRES, 2015).

Desses estudos, destacam-se as observações sobre a radiação emitida por determinados átomos, desenvolvidas por Henri Becquerel (1852-1908) e por Marie Curie (1867-1934) e Pierre Curie (1859-1906) (SOUZA; DANTAS, 2010). A partir de estudos desenvolvidos por estes e por outros cientistas, as pesquisas vieram indicar a existência da emissão de diferentes formas de radiação dos átomos, como “[...] partículas ou ondas eletromagnéticas emitidas pelo núcleo durante o processo de reestruturação interna” (TAUHATA, 2014, p. 19), que viriam a ser definidas como partículas alfa (α), beta (β) e gama (γ). Inicialmente, apesar de estas partículas terem sido associadas a cargas positivas e negativas por volta de 1899, vale destacar que a compreensão destas emissões ocorreu em diferentes momentos da história: em nível de exemplo, a natureza do decaimento α foi compreendida mediante estudos organizados por Ernest Rutherford (1871-1937), que em 1904, relacionou que estas partículas eram átomos de hélio (CORDEIRO; PEDUZZI, 2011). Sobre o decaimento β^+ , este fenômeno começou a ser mais bem compreendido em meados da década de 1930, com a posterior detecção do pósitron por Carl Anderson (1905-1991) e da identificação do nêutron por James Chadwick (1891-1974) (FIOLHAIS, 1992). Por sua vez, a radiação γ fora identificada por Paul Villard (1860-1934) em 1900 (XAVIER et al, 2007).

Assim, as definições atuais sobre estes conceitos colocam que a liberação dessas partículas permite aos núcleos dos átomos atingirem a estabilidade nuclear: esse processo é chamado de decaimento radioativo. Nesse sentido, uma das formas de decaimento consiste na emissão das partículas alfa (α), constituídas de dois prótons e dois nêutrons (SOUZA; DANTAS, 2010). Já as partículas beta (β) se apresentam na emissão de elétrons ou pósitrons de origem nuclear. Estas partículas podem ser emitidas mediante dois mecanismos: o decaimento β^+ e o decaimento β^- . O decaimento β^+ consiste em na emissão de um pósitron (e^+) – compreendido como uma partícula que apresenta a mesma massa do elétron, porém com carga oposta – além de um neutrino, em situações que um próton dá origem a um nêutron. O decaimento β^- ocorre em situações em que um nêutron dá origem a um próton, mediante a emissão de um elétron (e^-) e de um antineutrino. Por último, a radiação gama (γ) se manifesta na emissão de energia na forma de ondas eletromagnéticas, após a emissão de uma partícula alfa ou beta (TAUHATA, 2014). Esta radiação, diferente das outras, não modifica o número de massa ou o número atômico do respectivo núcleo (PINTO; MARQUES, 2010). Assim, os elementos dados como radioativos emitem radiação nuclear até atingirem a estabilidade; esta é uma relevante evidência que viria a ajudar a corroborar a pesquisa desenvolvida por Maria Goeppert-Mayer.

O entendimento dos fenômenos sobre a radioatividade foi possível mediante o estudo da estrutura dos átomos. Primeiramente, o desenvolvimento do modelo atômico de J. J. Thomson (1856-1940) possibilitou a construção de evidências da existência de partículas com carga elétrica negativa por meio dos estudos do comportamento de feixes luminosos nos tubos de raios catódicos (ALVES; ALANIS; COSTA, 2010); entretanto, o físico inglês Ernest Rutherford pode ser considerado a figura histórica responsável por possivelmente determinar a existência da física nuclear (MARINELLI, 1989), ao possibilitar a determinação da estrutura atômica (SOUZA; DANTAS, 2010) por meio do processo de espalhamento das partículas alfa a partir de seu bombardeamento em lâminas metálicas. Baseando-se nos resultados das experimentações realizadas por Hans Geiger (1882-1945) e Ernest Marsden (1889-1970) que consistiam em experimentos de espalhamento dessas partículas (MARQUES; CALUZI, 2003), Rutherford descreveu, no ano de 1911, que o átomo possuiria uma região central de carga positiva concentrada, sendo rodeado por uma distribuição de carga elétrica oposta (MELZER; AIRES, 2015).

Cabe ressaltar que o modelo atômico proposto por Rutherford, com a definição de um núcleo atômico, havia sido sugerido anteriormente de maneira teórica por outros cientistas. Em nível de exemplo, no ano de 1904, o físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950) descreveu seu modelo como composto por um núcleo extremamente denso e por elétrons distribuídos ao seu redor em um movimento de rotação. No entanto, sua proposta suscitou questionamentos com os quais Rutherford se deparou anos depois: considerando os pressupostos do eletromagnetismo clássico, como explicar a estabilidade dos núcleos formados por prótons que eram submetidos à repulsão coulombiana? (ALVES; ALANIS; COSTA, 2010). Como entender que os elétrons se manteriam em órbitas ao redor do núcleo, se quando eles estão em movimento há a emissão de radiação e a perda de energia, que poderiam acarretar o colapso do átomo? (LONDERO, 2014).

A dúvida que pairava nas mentes dos físicos da época consistia no entendimento da estabilidade nuclear e atômica. Sabendo que o núcleo se apresenta como constituído por cargas somente positivas, entende-se que a força eletromagnética existente na estrutura nuclear possibilitaria a repulsão dos prótons. Após a identificação do nêutron por James Chadwick no ano de 1932, ao refazer experiências relativas ao bombardeio de núcleos de átomos de Berílio com partículas alfa (TOLENTINO; ROCHA FILHO, 2000), o físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981) desenvolveu a hipótese da existência da força nuclear forte, sugerindo que, de maneira análoga aos fótons que aparecem na interação eletromagnética, os prótons e os nêutrons interagem entre si no interior do núcleo atômico por meio de partículas denominadas mésons (MENEZES, 2002), mantendo prótons e nêutrons estáveis no interior do núcleo (LEPINE-SZILY, 2005). Apesar disso, esta força apresenta um caráter repulsivo em curtas distâncias, pelo fato da existência da interação coulombiana existente entre os prótons. Se for comparada com outras forças, considera-se que a força nuclear forte é de curto alcance (MENEZES, 2002). Além disso, a força nuclear forte é

compreendida como “aproximadamente duas mil vezes mais intensa que a força eletromagnética que caracteriza a interação do elétron com os constituintes nucleares” (MARINELLI, 1989, p. 236).

Todavia, o desenvolvimento da física atômica e nuclear também sofreu influência dos conhecimentos da Mecânica Quântica. Na verdade, “a teoria quântica surgiu para descrever a física dos átomos e de seus núcleos” (LEPINE-SZILY, 2005, p. 76). Nesse sentido, o cientista dinamarquês Niels Bohr (1885-1962), dentre outras contribuições, argumentou quanto à necessidade do desenvolvimento de novos conceitos físicos para compreensão de certos fenômenos que a Física Clássica não conseguiria explicar (MELZER; AIRES, 2015). Dentre esses fenômenos, se insere o processo de estabilidade atômica, uma vez que o modelo atômico de Rutherford apresentava uma instabilidade perante o eletromagnetismo clássico. À vista disso, objetivando explicar o questionamento relativo à estabilidade atômica, Niels Bohr se baseou não somente nos pressupostos do modelo atômico de Rutherford, mas também no efeito fotoelétrico de Einstein e principalmente nos construtos teóricos de Planck: como resultado, em 1913, Bohr postulou um modelo atômico (LONDERO, 2014), considerando o conceito de quantização de energia proposta por Max Planck (1858-1947) em 1900. Ao entender a existência de uma possível “relação entre as energias dos elétrons em suas órbitas atômicas e as correspondentes frequências” (LONDERO, 2014, p. 16), no modelo atômico de Bohr, descreve-se que “os elétrons giram ao redor do núcleo em um número limitado de órbitas circulares e bem definidas” (LONDERO, 2014, p. 16). Dessa maneira, os elétrons se movimentariam somente em determinadas órbitas permitidas sem quaisquer emissões de energia e sem se colapsar com o núcleo atômico (ALVES; ALANIS; COSTA, 2010). No entanto, as emissões de energia poderiam ocorrer somente quando os elétrons migrassem de um estado estacionário para o outro. Essa quantidade de energia E não seria emitida de maneira contínua, mas sim, seria emitida em pacotes chamados de *quanta* (LONDERO, 2014), descritos matematicamente pela Equação 1, onde ν é a frequência de emissão do quantum e h é a constante de Planck:

$$E = h\nu \quad (1)$$

O modelo atômico proposto por Niels Bohr se manteve durante o processo inicial de desenvolvimento da teoria quântica. Entretanto, em meio aos estudos sobre as propriedades dos elétrons, compreendidos por meio do conceito de uma nuvem de probabilidade, começou a ser desenvolvido o modelo atômico que hoje é conhecido como modelo atômico de Schroedinger. Além disso, em meio a esse contexto, muitos esforços foram direcionados para o entendimento do núcleo dos átomos, por meio de elaborações tanto teóricas quanto experimentais (SILVA, 2016). Um dos modelos nucleares que fora proposto é o modelo de gota líquida, idealizado por Niels Bohr em 1935, o qual descreve a estabilidade dos prótons e nêutrons por meio da existência da força nuclear forte (ACEVEDO-DIAZ *et al.*, 2017). Esse modelo possibilitou a interpretação do processo de fissão nuclear, observado em 1939 por Lise Meitner (1878-1968), Otto Hahn (1879-1968) e Fritz Strassmann (1902-1980), por meio

da irradiação de urânio com nêutrons que produziam elementos químicos mais leves (CORDEIRO; PEDUZZI, 2014).

Entretanto, com o passar do tempo se apresentou a ausência de uma construção teórica que pudesse explicar o comportamento da estrutura nuclear em sua completude ou que conseguisse conciliar todos os dados experimentais já obtidos sobre os núcleos atômicos (ABEID, 2004). Nesse sentido, “vários modelos foram desenvolvidos, cada qual correlacionando os dados experimentais de um conjunto mais ou menos limitado de fenômenos nucleares” (PALANDI *et al.*, 2010, p. 15). Entre os modelos propostos, além do modelo de gota líquida, está o modelo nuclear de camadas. Este, em específico, apontava argumentos que demonstravam a estabilidade de alguns núcleos com determinados números de prótons e nêutrons.

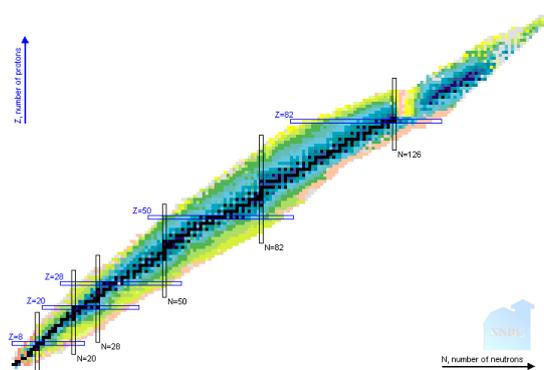


Fig. 5 – Carta de Nuclídeos (National Nuclear Data Center, information extracted from the NuDat 2 database, <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2>).

As cartas de nuclídeos (Fig. 5), que consistem na espécie de um gráfico o qual organiza os elementos químicos conforme seus números de nêutrons e prótons, ajudam a compreender o modelo proposto pela cientista. Segundo Maria Goeppert-Mayer, a abundância de elementos não estava baseada em sua periodicidade apresentada na Tabela Periódica, mas sim, poderia estar vinculada a estabilidade nuclear (PACHECO, 2019). Nesse contexto, inserem-se as contribuições da cientista, desenvolvidas em meados da década de 1940.

IV. Modelo Nuclear de Camadas e Números Mágicos

Diversos modelos nucleares foram desenvolvidos ao decorrer da história, os quais definiram o núcleo dos átomos de maneiras diferentes. Por exemplo, o núcleo atômico pode ser compreendido como uma massa homogênea de material, como descrito pelo modelo de gota líquida. Em outra perspectiva, pode ser entendido como um conjunto de partículas discretas: este princípio é o que baseia o modelo nuclear de camadas, desenvolvido por Maria Goeppert-Mayer. Neste modelo, prótons e nêutrons, reconhecidos como núcleons, se

movimentam no núcleo em um potencial produzido pela ação dos demais prótons e nêutrons (FIOLHAIS, 1991; LEPINE-SZILY, 2005) de maneira independente, possuindo níveis de energia, spins e momentos angulares próprios (ABEID, 2004). De maneira análoga às camadas eletrônicas para os elétrons descritas pelo modelo atômico de Bohr, os núcleons ocupam “invólucros” nucleares (DEAN, 2007) que, quando preenchidos completamente em um determinado número de núcleons resultam em um átomo estável (GOEPPERT-MAYER, 1948; 1963).

Durante sua estadia na Universidade de Chicago como professora voluntária, a cientista se debruçou sobre estudos sobre a origem dos elementos químicos (JOHNSON, 2004), existentes devido aos dados experimentais obtidos no contexto da Segunda Guerra Mundial (TALMI, 2018). Nesse contexto, o primeiro projeto que Maria Goeppert-Mayer (Fig. 6) começou a pesquisar, com o incentivo do físico teórico Edward Teller (1908-2003), dizia respeito ao desenvolvimento de uma listagem sobre a abundância dos elementos químicos disponíveis na época (JOHNSON, 1986). A partir da análise desses dados, alguns padrões surgiram: a cientista percebeu a existência de certa regularidade associada a determinados elementos químicos com maior estabilidade e abundância (WIECKOWSKI, 2019).



Fig. 6 – Maria Goeppert-Mayer em meados dos anos 1950 (Hanna Holborn Gray Special Collections Research Center, University of Chicago Library).

Durante sua pesquisa, Maria Goeppert-Mayer reconheceu as sugestões elaboradas por Walter Elsasser (1904-1991), no ano de 1933, quanto à existência dos chamados *números mágicos* (GOEPPERT-MAYER, 1963). Realizando um estudo sistemático em termos das características dos elementos químicos (SPRADLEY, 1989), como energias de ligação e momentos magnéticos, a cientista encontrou evidências que apontavam que os números mágicos poderiam ser cruciais para se compreender a estrutura dos núcleos atômicos (SACHS, 1979). Suas primeiras conclusões foram publicadas no ano de 1948 (Fig. 7) pela

cientista na revista *Physical Review* (GOEPPERT-MAYER, 1948). Na época, os cientistas assumiam o conceito de números mágicos de maneira depreciativa, como se a estrutura proposta por Maria Goeppert-Mayer fosse um tanto improvável (SACHS, 1982). Apesar da aceitação do modelo de gota líquida que explicava satisfatoriamente a recente descoberta da fissão nuclear, Maria Goeppert-Mayer persistiu no desenvolvimento do seu modelo nuclear.

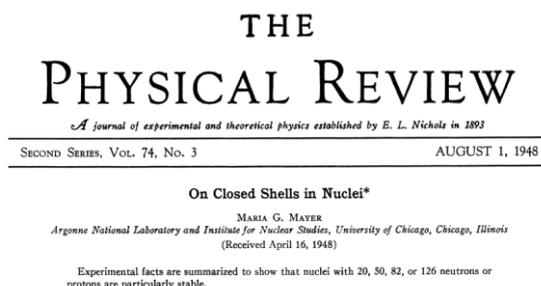


Fig. 7 – Artigo On Closed Shells in Nuclei (Goeppert-Mayer, 1948).

Os números mágicos de prótons e nêutrons observados pela cientista, que ilustravam uma possível estabilidade nuclear, eram os seguintes: 2, 8, 20, 28, 50, 82 e 126 (GOEPPERT-MAYER, 1963). De maneira a ilustrar essa organização, a Fig. 8 esquematiza os núcleos em termos do seu número atômico no eixo vertical *versus* número de nêutrons no eixo horizontal, nos quais as regiões em preto denotam os elementos estáveis; os isótopos radioativos que foram produzidos e os isótopos radioativos que ainda não foram observados são representados pelas regiões em amarelo e verde, respectivamente; e por último, as linhas tracejadas correspondem aos números mágicos. Todavia, cabe destacar que o círculo em vermelho ilustra a detecção, desenvolvida por Jones *et al.* (2010), de que o isótopo de estanho radiativo ^{132}Sn possui características duplamente mágicas: 50 prótons e 82 nêutrons (COTTLE, 2010).

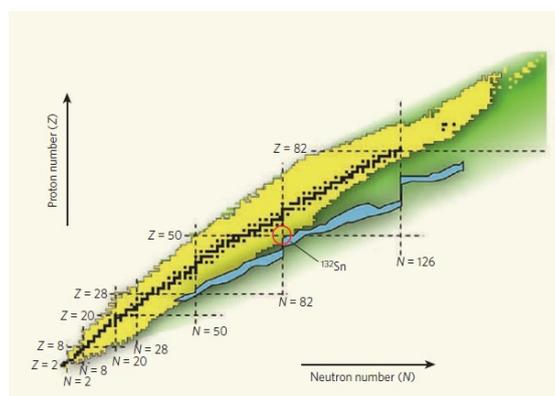


Fig. 8 – Números mágicos nas cartas de nuclídeos (Cottle, 2010).

Algo semelhante acontece com outros elementos químicos, estudados extensivamente por sessenta anos (COTTLE, 2010): núcleos de hélio com número de massa 4 são duplamente mágicos ao possuírem dois prótons e dois nêutrons; duplamente mágicos também são os núcleos de oxigênio 16 que possuem 8 prótons e 8 nêutrons e cálcio 40, possuindo 20 prótons e 20 nêutrons. O maior núcleo estável é o de chumbo com número de massa 208, com seus 82 prótons e 126 nêutrons. É interessante mencionar que este elemento “[...] é o produto final de três séries de decaimento radioativos, e o seu mais abundante isótopo é exatamente aquele com $N = 126$ ” (FREITAS; BONAGAMBA, 1999, p. 16). A Fig. 8 apresenta a listagem dos elementos químicos estáveis observados pela cientista organizada com base em sua construção teórica:

Não somente a estabilidade desses elementos, relacionada à energia de ligação, a pesquisa de Goepfert-Mayer indicou a existência de uma possível abundância dos elementos químicos mágicos. Segundo Freitas e Bonagamba (1999, p. 15), “quanto maior for a energia de ligação de um determinado núcleo, mais estável ele será e, portanto maior deverá ser a abundância natural relativa dessa espécie nuclear”. Dessa maneira, a quantidade de isótopos ou isótonos estáveis indicam a existência dos números mágicos; em termos de exemplos, enquanto existem seis isótopos para o cálcio 20, os isótopos vizinhos apresentam apenas dois. Como observado na Fig. 9, o estanho 50 é o que apresenta a maior quantidade de isótopos estáveis (GOEPPERT-MAYER, 1948).

Number of protons	2	8	20	28	50	82	126
⁴ He	¹⁶ O	⁴⁰ Ca	⁵⁸ Ni	¹¹² Sn	²⁰⁴ Pb		
	¹⁷ O	⁴² Ca	⁶⁰ Ni	¹¹⁴ Sn	²⁰⁶ Pb		
	¹⁸ O	⁴³ Ca	⁶¹ Ni	¹¹⁵ Sn	²⁰⁷ Pb		
		⁴⁴ Ca	⁶² Ni	¹¹⁶ Sn	²⁰⁸ Pb		
		⁴⁶ Ca	⁶⁴ Ni	¹¹⁷ Sn			
		⁴⁸ Ca		¹¹⁸ Sn			
				¹¹⁹ Sn			
				¹²⁰ Sn			
				¹²² Sn			
				¹²⁴ Sn			
Number of neutrons	2	8	20	28	50	82	126
⁴ He	¹³ N	¹⁶ S	⁴⁸ Ca	⁸⁶ Kr	¹³⁶ Xe	²⁰⁸ Pb	
	¹⁶ O	³⁷ Cl	⁵⁰ Ti	⁸⁷ Rb	¹³⁸ Ba	²⁰⁹ Bi	
		³⁸ Ar	⁵¹ V	⁸⁸ Sr	¹³⁹ La		
		³⁹ K	⁵² Cr	⁸⁹ Y	¹⁴⁰ Ce		
		⁴⁰ Ca	⁵⁴ Fe	⁹⁰ Zr	¹⁴¹ Pr		
				⁹² Mo	¹⁴² Nd		
					¹⁴⁴ Sm		

Fig. 9 – Números mágicos e exemplos de átomos (Goepfert-Mayer, 1963).

E os núcleos que não possuem números mágicos? Nos casos de núcleos cujos números imediatamente superiores ou inferiores aos números mágicos, as ligações nos núcleos atômicos deixavam de ser estáveis, como ocorre de maneira similar com a estrutura eletrônica dos átomos (BATHISTA; NOGUEIRA, 2001). Sendo assim, “os núcleos mágicos são particularmente estáveis sendo a sua energia de ligação maior do que a dos seus vizinhos com mais ou menos um núcleon” (FIOLHAIS, 1991, p. 29). Ou seja, elementos compostos por números mágicos de prótons ou nêutrons possuíam valores de energia de ligação que

eram consideravelmente superiores em comparação a outros elementos sem essa característica, de maneira análoga com o que ocorre com os gases nobres (FREITAS; BONAGAMBA, 1999).

Para compreensão do conceito de números mágicos, é preciso considerar que os núcleons se movem livremente, como os elétrons de um átomo, devido à existência de um potencial esfericamente simétrico no núcleo atômico (VELUSAMY, 2007). Apesar de reconhecer que essas partículas se movimentam individualmente em suas órbitas por conta do momento angular orbital, Maria Goeppert-Mayer não conseguiu explicar, em princípio, a existência dos números mágicos maiores, como 50, 82, e 126.

A solução para essa problemática surgiu em meados de 1949, quando a cientista estava discutindo essa questão com o físico italiano Enrico Fermi (1901-1954) (Fig. 10). Ele sugeriu a Goeppert-Mayer que o *spin* dos prótons e nêutrons poderia interferir de alguma maneira com as órbitas dos núcleons. Em outras palavras, a sugestão de Fermi à Goeppert-Mayer fora de considerar a dependência da interação spin-órbita como uma possível explicação para a movimentação dos núcleons (BANERJEE, 2007).



Fig. 10 – Enrico Fermi e Maria Goeppert-Mayer em Michigan, EUA (AIP Emilio Segrè Visual Archives, Goudsmit Collection).

Nesse sentido, ainda que o modelo de camadas que descreve a estrutura dos elétrons, desenvolvido por Bohr seja semelhante ao modelo nuclear de camadas, há algumas diferenças, justamente como “a presença de um termo importante de interação spin-órbita e a existência de dois tipos de núcleons, prótons e nêutrons” (SILVEIRA, 2004, p. 10). Nesse sentido, conhecimentos de Mecânica Quântica se apresentam, pois o comportamento desses núcleons pode ser descrito por meio da Equação de Schroedinger estacionária, que em suas variáveis, apresenta a interação spin-órbita, relativa à relação entre o momento angular orbital \vec{l} e o spin do núcleon \vec{s} (BARROZO, 2012).

Essas partículas preenchem as camadas mediante o Princípio de Exclusão de Pauli (WIECKOWSKI, 2019), o qual descreve que “um nível energético individual não pode ser

ocupado por mais do que dois férmions” (FIOLHAIS, 1991, p. 23). Assim, o comportamento de partículas, como núcleons, pode ser descrito por meio de um conjunto de números quânticos: número quântico principal n , que corresponde ao nível de energia ocupado pelo núcleon; momento angular total j , que consiste na soma do momento angular orbital l e o spin do núcleon, que pode assumir dois valores ($s = \pm 1/2$). Cabe ressaltar que o *spin* é “uma propriedade intrínseca de uma partícula, análoga à rotação interna de uma partícula clássica, mas cuja justificação é apenas quântica” (FIOLHAIS, 1991, p. 23). O número quântico orbital l corresponde aos estados (s, p, d, f...) que podem ser ocupados pelos núcleons dentro de um nível de energia, de maneira similar aos estados de elétrons de um átomo (BARROZO, 2012). Como dito anteriormente, ao ser somado com o spin resulta no número quântico de momento angular $j = l + s$, em que cada nível de energia está associado a um número de núcleons ocupantes (WIECKOWSKI, 2019), igual a $2j + 1$. A Fig. 11 demonstra que determinados níveis de energia se agrupam na forma de camadas que, quando completamente preenchidas correspondem a núcleos com números mágicos; cabe destacar que isso se aplica para camadas de prótons e para as camadas de nêutrons.

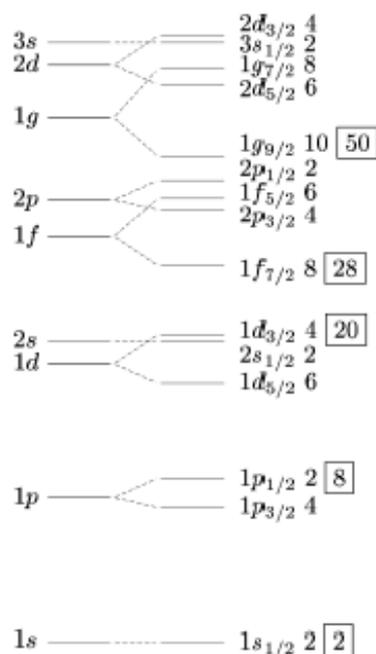


Fig. 11 – Níveis de energia de núcleons agrupados em camadas (Barrozo, 2012).

Mas no que consiste o acoplamento spin-órbita, que descreve o comportamento dos números mágicos? Para que pudesse explicar isso à sua filha, Maria Goeppert-Mayer utilizou a seguinte analogia: imagine uma sala onde há vários casais valsando e que se movem ao redor da sala em círculos concêntricos. Analogamente, cada círculo corresponde a um nível energético, onde cada casal, além de orbitar, descreve um movimento de rotação, como um

pião. Então, imagine que enquanto orbitam (ou valsam pelo salão) no sentido anti-horário, alguns destes casais giram em torno de si mesmos no sentido horário, e outros, no sentido anti-horário (JOHNSON, 1986). Segundo a cientista, estes últimos se movimentarão mais facilmente do que aqueles que se movem no sentido oposto. Desta forma, observando determinado círculo de dançarinos, a energia necessária para cada casal realizar o seu movimento em órbita será diferente a depender do seu sentido de rotação.

De maneira análoga, ao considerar os casais como sendo os núcleons, a quantidade de energia de cada núcleon dependerá do sentido do spin \vec{s} em relação ao seu momento angular orbital \vec{l} (BATHISTA; NOGUEIRA, 2001), que pode assumir dois valores de momento angular total $j = l \pm 1/2$, a depender se o spin é paralelo) ou antiparalelo ao momento angular orbital. Neste sentido, os níveis cujos valores de momento orbital \vec{l} e spin \vec{s} são paralelos, a energia de ligação dos núcleons é considerada mais baixa em comparação aos níveis cujos valores são antiparalelos, que possuem energias mais altas (MENEZES, 2002). De fato, ao retornar aos exemplos dos casais, considerando que estes estejam orbitando em determinado círculo no sentido anti-horário, é mais fácil que eles também rotacionem no sentido anti-horário do que no sentido horário.

Desta forma, a interação spin-órbita possibilitou definir os números mágicos mais altos, como 28, 50, 82 e 126, embora os elementos que possuam os números mágicos 2, 8 e 20, que haviam sido apresentados nas pesquisas de Elsasser, podem ser compreendidos sem considerar esta interação (BASDEVANT; RICH; SPIRO, 2005). Além disso, a inserção deste fenômeno nos pressupostos do modelo nuclear de camadas possibilitou a sua aceitação perante o modelo de gota líquida, prevendo, por exemplo, que “núcleos com números mágicos de prótons e nêutrons sejam esféricos e que núcleos com camadas abertas sejam, mais ou menos, deformados” (FIOLHAIS, 1991, p. 28). Em relação a esse aspecto, além de descrever características de elementos já conhecidos, a pesquisa de Goepfert-Mayer possibilitou descrever a existência de elementos que seriam identificados futuramente, como o caso do isótopo radioativo do níquel ^{56}Ni : a esfericidade desse isótopo, com 28 prótons e 28 nêutrons fora confirmada no ano de 1998 (COTTLE, 2010).

A publicação da sua explicação sobre a existência dos números mágicos ocorreu no final do ano de 1949. Aparentemente, Maria Goepfert-Mayer aguardara outros cientistas que pudessem propor uma possível explicação: um grupo de cientistas alemães, dentre eles Hans Jensen, submeteu um artigo independentemente com explicações semelhantes. Ao invés de disputar com Jensen sobre a autoria do modelo desenvolvido, a cientista propôs que pudessem compartilhar suas pesquisas, o que resultou na publicação do livro *Elementary Theory of Nuclear Shell Structure*, que veio a estabelecer suas reputações como cientistas importantes para o desenvolvimento do modelo nuclear de camadas (MCGRAYNE, 1995). Por último, cabe ressaltar as implicações da pesquisa de Goepfert-Mayer e colaboradores para a área da física nuclear: uma dessas implicações consiste na compreensão do processo do fenômeno de ressonância magnética nuclear (FREITAS; BONAGAMBA, 1999), tendo em vista que este

processo se baseia no comportamento dos supracitados spins nucleares, que podem ser compreendidos mediante o modelo de camadas.

V. Modelo Nuclear de Camadas e Números Mágicos no Ensino de Física

A partir dos aspectos conceituais apresentados nas seções anteriores, serão apresentados alguns aspectos de uma proposta⁵ de ensino-aprendizagem, desenvolvida com base no aporte metodológico descrito pelas Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (MOREIRA, 2011; 2012). Essa proposta objetiva utilizar o exemplo da cientista Maria Goeppert-Mayer, laureada no Prêmio Nobel de Física de 1963, como elemento motivador para discussão de conceitos sobre física nuclear, desde aspectos relativos à física nuclear e as características dos elementos químicos, até a exposição do modelo nuclear desenvolvido por Goeppert-Mayer. Além disso, a sugestão também considera discussões *sobre* ciência, ao possibilitar, em determinados momentos da proposta, a abordagem sobre o contexto de reconhecimento de diferentes cientistas na comunidade científica, como mulheres. Diante disso, a proposta intenciona articular estes conhecimentos no contexto do ensino de Física na educação básica, com enfoque para o ensino médio. Esta proposta foi construída com o auxílio de vídeos educativos e textos de divulgação científica, além de momentos de produção individual ou coletiva de atividades que contribuam para a ocorrência de aprendizagem significativa.

V.1 Tópico específico a ser abordado

O assunto principal a ser abordado diz respeito aos conceitos de física nuclear, com um enfoque no modelo nuclear de camadas, desenvolvido pela cientista Maria Goeppert-Mayer, laureada com o Prêmio Nobel de Física em 1963. Não somente a abordagem desses aspectos, a proposta também descreve elementos para discussões *sobre* ciência, que podem ser exemplificadas como as implicações sociais do desenvolvimento da física nuclear, bem como de questões relativas à ascensão e ao reconhecimento de mulheres na comunidade científica.

V.2 Situações iniciais: concepções dos alunos sobre física nuclear

Além de objetivar que as/os discentes manifestem os seus conhecimentos prévios, os momentos de situações iniciais intencionam que alunas e alunos reconheçam alguns elementos contextualizados referentes à física nuclear. Assim, a proposta apresenta a utilização de alguns recursos como organizadores prévios. O primeiro deles consiste na

⁵ A proposta, que é oriunda de um Trabalho de Conclusão de Curso, pode ser acessada na íntegra, entre as páginas 48 e 52 da monografia, no seguinte link: <<https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/1302>>. Acesso em: 13 ago. 2020.

apresentação da música⁶ Enola Gay, lançado no ano de 1980, de autoria da banda *Orchestral Manoeuvres In The Dark*, que problematiza a história do bombardeiro que lançou a bomba atômica sobre a cidade de Hiroshima em agosto de 1945. A partir deste recurso, as seguintes perguntas podem ser apresentadas para as/os discentes: (a) Quais elementos ou palavras presentes na música lhe chamaram a atenção? Por quê? (b) Analisando o vídeo e a letra dessa música, você saberia explicar o nome da música? Você já ouviu falar sobre o bombardeiro Enola Gay? (c) Analisando a letra da música, você saberia indicar o posicionamento apresentado pela letra da música sobre o bombardeiro Enola Gay? Se sim, qual é?

Outro recurso que pode ser utilizado consiste em textos de divulgação científica que possibilitem a discussão sobre o entendimento sobre elementos de física nuclear por parte dos discentes; os dois artigos selecionados para a proposta consistem no texto⁷ *Um avião chamado Enola*, que elucida o contexto de desenvolvimento das bombas atômicas e suas implicações na história e excertos do material⁸ *Energia Nuclear e suas aplicações: aprendendo com o nuclídeo*, desenvolvido pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, que apresenta alguns exemplos das aplicações relativas à física nuclear. Mediante estes materiais, algumas perguntas podem ser elaboradas: (a) O que você entende por física nuclear? Qual sua opinião sobre as aplicações da física nuclear que você conhece? (b) Quais são as características dos cientistas que desenvolveram ou desenvolvem essa área da física? (c) Você acredita que a ciência e tecnologia abordadas nas bombas atômicas podem ser relacionadas em aplicações benéficas?

Para finalizar esta etapa, pode-se solicitar uma redação das/os discentes sobre suas impressões acerca desse campo da Física e suas características. É relevante ressaltar que tais respostas não necessitam estar de acordo com o que é cientificamente aceito, pois elas servirão como ponto de partida para a/o docente prosseguir com as seguintes etapas.

V.3 Situações-problemas: Quem são as/os cientistas da física nuclear?

As situações-problemas podem ser exploradas por meio de recursos didáticos como vídeos educacionais, mas especialmente pela elaboração e apresentação de uma pesquisa desenvolvida pelas/os discentes. Em um primeiro momento, a apresentação do vídeo⁹ *Se os elementos químicos fossem pessoas* possibilitará que as alunas e os alunos discorram suas concepções sobre os elementos químicos e a Tabela Periódica, por meio de perguntas norteadoras, tais como: (a) De onde vêm os elementos químicos? (b) Quais são as características que diferem elementos químicos? Quais são os elementos químicos que você

⁶ Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=d5XJ2GiR6Bo>>.

⁷ Disponível em: <<http://www.clickideia.com.br/portal/conteudos/c/32/18836>>.

⁸ Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/apostila-educativa-aplicacoes.pdf>>.

⁹ Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=NUoqlghM_1U>.

considera mais abundantes na natureza? (c) Por que existem elementos considerados estáveis e outros elementos que são instáveis? Na sequência, a/o docente solicitará que cada discente pesquise acerca de cientistas que desenvolveram contribuições relevantes para a área da física atômica e nuclear, necessitando apresentar os resultados da sua pesquisa na forma de cartazes. O objetivo dessa atividade é demonstrar a ciência como resultado de uma construção coletiva, desenvolvida por meio de diferentes cientistas, homens e mulheres. Na apresentação destas pesquisas, as seguintes perguntas podem ser elaboradas: (a) Quais os cientistas que estudaram os conhecimentos sobre física nuclear? (b) Algum desses cientistas recebeu algum prêmio como forma de reconhecimento de suas pesquisas? Se sim, quais? Além disso, objetivando discutir a baixa representatividade de mulheres cientistas, se considera importante questionar: (c) Quais as características dos cientistas que contribuíram na área da física nuclear? Quantos deles são homens? E quantos deles são mulheres? (d) Você acha que existe diferença entre homens e mulheres em conseguir ascender na carreira científica? Vocês perceberam alguma discussão como essa durante suas pesquisas?

V.4 Conhecimento abordado: conceitos de física atômica e nuclear

Após os momentos de situações iniciais e situações-problema, prossegue-se a proposta com a discussão dos conceitos mais gerais que possibilitarão compreender a pesquisa desenvolvida por Maria Goeppert-Mayer que lhe concedeu a láurea no Prêmio Nobel de Física em 1963. Por meio de uma diferenciação progressiva, sugere-se apresentar os conhecimentos mais gerais, como alguns conceitos relativos à física atômica e física nuclear, com base em elementos da História da Ciência. Alguns conhecimentos que podem ser revistos são as definições acerca dos isótopos, os modelos atômicos e a distribuição eletrônica de Linus-Pauling, este último que será relevante como uma possível analogia para o modelo nuclear de camadas. Também, a abordagem de conceitos relativos à radioatividade, como decaimento radioativo, é relevante para o posterior entendimento da estabilidade dos núcleos atômicos a luz do modelo nuclear de camadas.

V.5 Conhecimento em maior complexidade: a física de Maria Goeppert-Mayer

Após a abordagem dos conceitos relativos ao entendimento do átomo, cabe nesta etapa adentrar no entendimento do núcleo atômico, por meio da abordagem dos aspectos do modelo nuclear de camadas, desenvolvido por Maria Goeppert-Mayer. Dessa forma, esta discussão será permeada por elementos da História da Ciência, de maneira a demonstrar o contexto no qual a cientista desenvolveu sua pesquisa. Para tanto, serão apresentados exemplos de Cartas de Nuclídeos que representam outra maneira de representação dos elementos químicos, que puderam fazer com que Goeppert-Mayer evidenciasse a relação da abundância dos elementos químicos com os números dos núcleons presentes nos átomos.

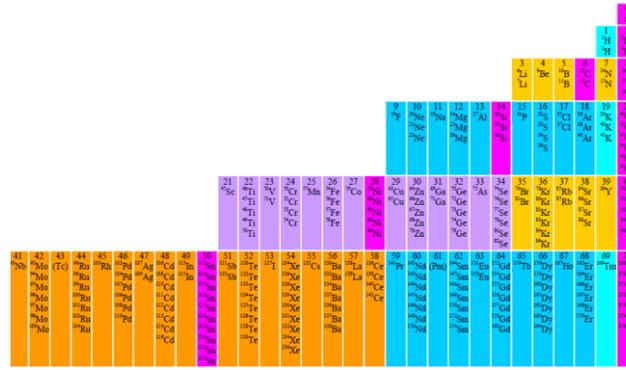


Fig. 12 – Tabela de isótopos organizados pelo número atômico (Wieckowski, 2019).

Além disso, esquemas como o apresentado na Fig. 12 poderão ser abordados para ilustrar a abundância de determinados elementos químicos a depender dos seus números de prótons ou nêutrons. A ilustração apresenta, na cor roxa, além dos gases nobres na última coluna à direita, os números 28 e 50, que são alguns dos números mágicos indicados por Goepfert-Mayer, os quais apresentam elementos de maior abundância em relação aos números imediatamente maiores ou menores. Após essa discussão, serão explicitados elementos do modelo nuclear de camadas, por meio da abordagem de conceitos de números quânticos e princípio de exclusão de Pauli. Neste momento, cabe ressaltar que é possível estabelecer uma analogia entre o modelo proposto por Goepfert-Mayer e a organização dos elétrons por meio do diagrama de Linus-Pauling. Por último, o fechamento dessa etapa poderá ser desenvolvido mediante a discussão de um trecho do livro *A Colher Que Desaparece*, mediante as seguintes perguntas: (a) De que maneira Maria Goepfert-Mayer conseguiu ascender na carreira científica? Quais dificuldades essa cientista enfrentou até ser reconhecida como uma cientista importante na área da Física Nuclear? (b) A partir de quais problemas presentes nos estudos de física nuclear que Maria Goepfert-Mayer desenvolveu seu modelo nuclear? E a pergunta mais relevante, para fechamento da aula: (c) Quais são as características da estrutura nuclear apresentada por Maria Goepfert-Mayer?

V.6 Revisão integrativa dos conteúdos

Nesse momento, de maneira a desenvolver uma integração dos conhecimentos abordados durante as aulas será elaborada uma discussão em grande grupo sobre aspectos do desenvolvimento da física nuclear, como a relevância das mulheres para o desenvolvimento dessa área, bem como as implicações da pesquisa desenvolvida por Maria Goepfert-Mayer para o entendimento do núcleo atômico. Para tanto, é importante se desenvolver uma retomada dos questionamentos elaborados nas aulas anteriores, além de se oportunizar uma devolutiva dos momentos de avaliação formativa, como a produção de textos e pesquisas, além das possíveis dúvidas quanto à avaliação somativa.

V.7 Avaliação da aprendizagem dos alunos

A avaliação individual somativa será composta por perguntas discursivas, relativas aos conceitos físicos abordados nas aulas para a compreensão do modelo nuclear de camadas e sobre aspectos históricos e sociais presentes no desenvolvimento da física nuclear. Alguns exemplos são: (a) Quais são as relações que você estabeleceria entre a área da física nuclear com a pesquisa desenvolvida por Maria Goeppert-Mayer? (b) Considerando os conhecimentos científicos e os acontecimentos históricos que você estudou, de quais maneiras o empreendimento científico se desenvolve? Cabe ressaltar que, nestes questionamentos, se deve propor situações que promovam a mobilização dos conhecimentos em diferentes contextos. Entretanto, não são somente os momentos de avaliação somativa que constituem a avaliação da aprendizagem das/os alunas/os; a avaliação formativa constitui a consideração de todas as demais atividades desenvolvidas pelas/os discentes, seja individual ou coletivamente, conforme preconizado por Moreira (2011).

V.8 Avaliação da unidade de ensino

Como a proposta didática apenas terá êxito se o desempenho das/os discentes demonstrar indícios de aprendizagem significativa (MOREIRA, 2011), questionários podem ser entregue às alunas e aos alunos, de maneira que possam apresentar suas impressões sobre os momentos desenvolvidos em sala de aula, mas também possam refletir acerca de seu posicionamento e participação durante as aulas.

VI. Considerações Finais

Este artigo objetivou apresentar uma das contribuições científicas de Maria Goeppert-Mayer para a área da física nuclear: o modelo nuclear de camadas. Como percebido, embora a pesquisa desta cientista possua enorme relevância para a física nuclear, não se encontram pesquisas substanciais na educação científica que abordem as contribuições de Goeppert-Mayer, aspecto também observado por Cortes (2018). Além disso, cabe destacar que se percebe a importância de desenvolver materiais e propostas didáticas que envolvam elementos históricos vinculados ao ensino de Física no contexto de educação básica, de maneira a possibilitar que professoras/es e posteriormente alunas/os possam entender os pormenores e os percalços vivenciados por cientistas durante a construção de suas pesquisas.

De fato, a trajetória acadêmica de Maria Goeppert-Mayer possibilita entender a ciência como um construto mais complexo do que a simples elaboração de princípios e conceitos. Nesse sentido, para que suas ideias fossem desenvolvidas, a cientista necessitou da contribuição científica de outros cientistas e de um ambiente acadêmico favorável; mas, apesar de possuir tais condições, Johnson (1986) e McGrayne (1995) elencam que Goeppert-Mayer vivenciou embargos durante sua ascensão acadêmica, como a atuação voluntária e sem remuneração nas universidades, além das dificuldades de conciliar sua vida acadêmica e o

cuidado de seus filhos, embora possuísse o apoio de seu esposo. Estes aspectos não devem passar despercebidos durante as discussões sobre as mulheres na ciência desenvolvidas em sala de aula, para que, corroborando Cordeiro e Peduzzi (2014), não se reproduzam implicitamente estereótipos de que apenas mulheres muito especiais participam e participaram da atividade científica.

Ademais, a atenção especial dada à área de física nuclear também pode promover discutir questões que estão diretamente relacionadas com o desenvolvimento científico por meio de seus contextos sociais e culturais. Neste caso, em específico, é possível abordar a influência da cientista no desenvolvimento do Projeto Manhattan, além de evidenciá-la como uma das mulheres responsáveis pela consolidação desse campo da Física, juntamente com Marie Curie e Lise Meitner. Como recentemente descrito por Wieckowski (2019), as contribuições de Goepfert-Mayer possibilitam entender os elementos químicos em suas características, como a estabilidade nuclear, por meio de conhecimentos como a Carta de Nuclídeos, que vão além dos tradicionalmente abordados somente com a apresentação da Tabela Periódica, o que possibilita uma visão diferenciada sobre os elementos químicos e da física nuclear.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio financeiro concedido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para o desenvolvimento desta pesquisa, além das instituições que permitiram a utilização das imagens; em especial, a American Institute of Physics (AIP). Também, gostaríamos de agradecer às/aos pareceristas e às/aos editoras/es pelas valiosas contribuições sugeridas para a melhor redação do artigo.

Referências Bibliográficas

ABEID, L. R. F. A física nuclear e suas aplicações: uma abordagem voltada para o ensino médio. 2004. 67 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Física) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

ACEVEDO-DÍAZ, J. A. *et al.* Modelos científicos: significado y papel en la práctica científica. **Revista Científica**, v. 30, n. 3, p. 155-166, 2017.

ALVES, M. F. S.; ALANIS, D.; COSTA, L. G. Um mapa conceitual sobre a evolução do conceito do átomo: uma introdução à Física de partículas elementares para o Ensino Médio. In: **Simpósio Nacional de Ensino de Ciência e Tecnologia**, 2, 2010, Ponta Grossa. Atas... Ponta Grossa, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010.

BANERJEE, B. Maria Goepfert Mayer. **Resonance**, v. 12, n. 12, p. 6-11, 2007.

BARROZO, P. Modelos Nucleares. In: BARROZO, P. **Introdução à Física Nuclear e de Partículas Elementares**. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2012.

BASDEVANT, J. L.; RICH, J.; SPIRO, M. **Fundamentals In Nuclear Physics: From Nuclear Structure to Cosmology**. New York: Springer, 2005.

BATHISTA, A. L. B. S.; NOGUEIRA, J. S. Elementos históricos de ressonância magnética nuclear. In: **Encontro de Ressonância Magnética Nuclear**, 9., 2001, Maringá. Atas... Maringá, Associação de Usuários de Ressonância Magnética Nuclear, 2001.

CARVALHO, M. G.; CASAGRANDE, L. S. Mulheres e ciência: desafios e conquistas. **Revista Interthesis**, v. 8, n. 2, p. 20-35, 2011.

CHASSOT, A. A ciência é masculina? É, sim senhora!... **Revista Contexto e Educação**, v. 19, n. 71, p. 9-28, 2004.

CHASSOT, A. Nomes que fizeram a química (e quase nunca lembrados). **Química Nova na Escola**, n. 5, p. 21-23, 1997.

CORDEIRO, M. D. Questões de gênero na ciência e na educação científica: uma discussão centrada no Prêmio Nobel de Física de 1903. In: **Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências**, 9., 2013, Águas de Lindóia. Atas... Águas de Lindóia, Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, 2013.

CORDEIRO, M. D. Mulheres na Física: um pouco de história. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 3, p. 669-672, 2017.

CORDEIRO, M. D.; PEDUZZI, L. O. Q. Aspectos da natureza da ciência e do trabalho científico no período inicial de desenvolvimento da radioatividade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, 2011.

CORDEIRO, M. D.; PEDUZZI, L. O. Q. Entre os transurânicos e a fissão nuclear: um exemplo do papel da interdisciplinaridade em uma descoberta científica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 31, n. 3, p. 536-563, 2014.

CORTES, M. R. Mulher na ciência: “Ciência também é coisa de mulher!”. 2018. 128 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Licenciatura em Física) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.

COTTLE, P. Doubly magic tin. **Nature**, v. 465, p. 430-431, 2010.

CUNHA, M. B. *et al.* As mulheres na ciência: o interesse das estudantes brasileiras pela carreira científica. **Educación Química**, v. 25, n. 4, p. 407-417, 2014.

DEAN, D. J. Beyond the nuclear shell model. **Physics Today**, v. 60, n. 11, p. 48-53, 2007.

FARIAS, R. F. As mulheres e o Prêmio Nobel de Química. **Química Nova na Escola**, n. 4, p. 28-30, 2001.

FERNANDEZ, I. *et al.* Visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 20, n. 3, p. 477-488, 2002.

FIOLHAIS, C. Dos núcleos aos agregados atômicos: campo médio e movimentos colectivos. **Colóquio Ciências: Revista de Cultura Científica**, n. 9, p. 22-42, 1991.

FIOLHAIS, C. **Pré-história e história da física nuclear**. 1992. Disponível em: <<https://estudogeral.sib.uc.pt/handle/10316/41235>>. Acesso em: 05 nov. 2020.

FIÚZA, A. L. C. *et al.* Difusão de tecnologia e sexismo nas Ciências Agrárias. **Ciência Rural**, v. 39, n. 9, p. 2614-2620, 2009.

FREITAS, J. C. C.; BONAGAMBA, T. J. **Os núcleos atômicos e a RMN**. In: Fundamentos e Aplicações da Ressonância Magnética Nuclear. Rio de Janeiro: AUREMN, 1999.

GIL-PÉREZ, D. *et al.* Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.

GOEPPERT-MAYER, M. On closed shells in nuclei. **Physical Review**, v. 74, n. 3, p. 235-239, 1948.

GOEPPERT-MAYER, M. **The shell model**: Nobel Lecture. 1963. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1963/mayer/lecture>>. Acesso em: 26 nov. 2019.

GRZYBOWSKI, A.; PIETRZAK, K. Maria Goeppert-Mayer (1906–1972): two-photon effect on dermatology. **Clinics in Dermatology**, v. 31, n. 2, p. 221-225, 2013.

HEERDT, B; BATISTA, I, d. L. Questões de gênero e da natureza da ciência na formação docente. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 21, n. 2, p. 30-51, 2016.

JOHNSON, K. E. Maria Goeppert Mayer: Atoms, Molecules and Nuclear Shells. **Physics Today**, v. 39, n. 9, p. 44-49, 1986.

JOHNSON, K. E. From natural history to the nuclear shell model: Chemical thinking in the work of Mayer, Haxel, Jensen, and Suess. **Physics in Perspective**, v. 6, n. 3, p. 295-309, 2004.

JONES, K. L. *et al.* The magic nature of ^{132}Sn explored through the single-particle states of ^{133}Sn . **Nature**, v. 465, p. 454-457, 2010.

LEPINE-SZILY, A. Rumos da física nuclear. **Revista USP**, n. 66, p. 74-79, 2005.

LIMA, I. P. C. Lise Meitner e a fissão nuclear: uma visão não eurocêntrica da ciência. **Revista Gênero**, v. 16, n. 1, p. 51-65, 2015.

LIMA, L. V. S.; DANTAS, J. M.; CABRAL, C. C. “Cientista, como é?”: concepções de estudantes do ensino médio sobre gênero e natureza da ciência. In: **Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias**, 10., 2017, Sevilla. Atas... Sevilla, Revista Enseñanza de las Ciencias, 2017.

LONDERO, L. O modelo atômico de Bohr e as abordagens para seu ensino na escola média. **Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias**, v. 9, n. 1, p. 13-37, 2014.

MARINELLI, J. R. Enxergando o núcleo atômico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 6, n. 3, p. 234-240, 1989.

MARQUES, D. M.; CALUZI, J. J. Ensino de química e história da ciência: o modelo atômico de Rutherford. In: **Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências**, 4., 2003, Bauru. Atas... Bauru, Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, 2003.

MCGRAYNE, S. B. Maria Goeppert Mayer. **The Physics Teacher**, v. 33, n. 424, p. 424-429, 1995.

MELZER, E. E. M.; AIRES, J. A. A história do desenvolvimento da teoria atômica: um percurso de Dalton a Bohr. **Revista de Educação em Ciências e Matemática**, v. 11, n. 22, p. 62-77, 2015.

MENEZES, D. P. **Física Nuclear e de Partículas**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2002.

MOREIRA, M. A. Unidades de Ensino Potencialmente Significativas – UEPS. **Aprendizagem Significativa em Revista**, v. 1, n. 2, p. 43-63, 2011.

MOREIRA, M. A. O que é afinal aprendizagem significativa. **Revista Currículum**, v. 25, 2012.

NOBEL PRIZE. **Nobel Prize Awarded Women**. 2020. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/lists/nobel-prize-awarded-women>>. Acesso em: 29 out. 2020.

OLINTO, G. A inclusão das mulheres nas carreiras de ciência e tecnologia no Brasil. **Inclusão Social**, v. 5, n. 1, p. 68-77, 2011.

PACHECO, M. A. L. Marie Goeppert-Mayer: una mujer excepcional. **Universitario Potosinos: Revista de Divulgación Científica**, v. 15, n. 233, p. 36-37, 2019.

PADILHA, M. L. C. Las mujeres y la Ciencia: en el centenario de los Premios Nobel de Física: semblanzas de Marie Curie y María Göppert-Mayer. **Revista 100cias@uned**, v. 4, p. 75-80, 2001.

PALANDI, J. *et al.* **Física Nuclear**. Universidade Federal de Santa Maria: Grupo de Ensino de Física. 2010. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/gef/arquivos/fisinuc.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

PEDUZZI, L. O. Q.; RAICIK, A. C. Sobre a natureza da ciência: asserções comentadas para uma articulação com a história da ciência. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 25, n. 2, p. 19-55, 2020.

PINTO, G. T.; MARQUES, D. M. Uma proposta didática na utilização da História da Ciência para a primeira série do ensino médio: a radioatividade e o cotidiano. **Revista História da Ciência e Ensino**, v. 1, p. 27-57, 2010.

REZNIK, G. *et al.* Como adolescentes apreendem a ciência e a profissão de cientista? **Estudos Feministas**, v. 25, n. 2, p. 829-855, 2017.

SABIROVA, F. M. Study of the contribution of Nobel Prize winners to the development of atomic and nuclear physics in pedagogical universities. **European Journal of Science and Theology**, v. 12, n. 1, p. 69-80, 2016.

SACHS, R. G. Maria Goeppert Mayer. In: NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. **Biographical Memoirs**: Volume 50. Washington: National Academies Press, 1979. p. 310-328.

SACHS, R. G. Maria Goeppert-Mayer – two-fold pioneer. **Physics Today**, v. 35, n. 2, p. 46-51, 1982.

SAITOVITCH, E. B.; LIMA, B. S.; BARBOSA, M. C. Mulheres na Física: uma análise quantitativa. In: SAITOVITCH, E. M. B. et al. (Orgs.). **Mulheres na física**: casos históricos, panorama e perspectivas. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.

SILVA, F. F.; RIBEIRO, P. R. C. Trajetórias de mulheres na ciência: “ser cientista” e “ser mulher”. **Ciência & Educação**, v. 20, n. 2, p. 449-466, 2014.

SILVA, U. U. Estudo do espalhamento e transferência elástica para o sistema ${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$. 2016. 117 f. **Dissertação** (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SILVEIRA, M. A. G. ${}^{58}\text{Co}$: estudo de um núcleo ímpar-ímpar na camada pf. 2004. 149f. **Tese** (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

SOUZA, M. A. M.; DANTAS, J. D. Fenomenologia nuclear: uma proposta conceitual para o ensino médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 27, n. 1, p. 136-158, 2010.

SPRADLEY, J. L. Women and the elements: the role of women in element and fission discoveries. **The Physics Teacher**, v. 27, n. 656, p. 656-662, 1989.

TALMI, I. The nuclear shell model: simplicity from complexity. **Frontiers in Physics**, v. 13, n. 6, p. 1-17, 2018.

TAUHATA, L. *et al.* **Radioproteção e Dosimetria**: Fundamentos. 10. ed. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2014.

TAVARES, O. A. P. 80 anos da fissão nuclear: a mais abundante fonte de energia disponível para a humanidade. **Ciência e Sociedade**, v. 2, n. 6, p. 19-34, 2019.

TOLENTINO, M.; ROCHA FILHO, R. C. Sobre a estrutura do núcleo atômico antes da descoberta do nêutron. **Educación Química**, v. 11, n. 3, p. 315-318, 2000.

VELUSAMY, R. Mayer-Jensen shell model and magic numbers. **Resonance**, v. 12, n. 12, p. 12-24, 2007.

VOLPATO, G.; MORAIS, J. L. A invisibilidade das mulheres na ciência: história e conjuntura atual. In: **Seminário de Filosofia e Sociedade**, 9., 2019, Criciúma. Atas... Criciúma, Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2019.

WIECKOWSKI, A. B. Periodic table of nuclides based on the nuclear shell model. **Romanian Journal of Physics**, v. 64, n. 303, p. 1-19, 2019.

XAVIER, A. M. et al. Marcos da história da radioatividade e tendências atuais. **Química Nova**, v. 30, n. 1, p. 83-91, 2007.

ZAGUETTO, A. P.; VENANCIO, T. Os percalços do Nobel: deslizes e polêmicas do grande prêmio. **ComCiência**, n. 164, 2014.



Direito autoral e licença de uso: Este artigo está licenciado sob uma [Licença Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).