



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VII – GOVERNADOR ANTÔNIO MARIZ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E SOCIAIS APLICADAS – CCEA
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA**

SAMUEL BATISTA LOPES

**PANORAMA DA RADIOATIVIDADE: DA DESCOBERTA ATÉ AS APLICAÇÕES
ATUAIS**

**PATOS-PB
2020**

SAMUEL BATISTA LOPES

**PANORAMA DA RADIOATIVIDADE: DA DESCOBERTA ATÉ AS APLICAÇÕES
ATUAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento do Curso de Licenciatura Plena em Física da Universidade Estadual da Paraíba como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Área de concentração: Física.

Orientador: Prof. Dr. Everton Cavalcante

**PATOS-PB
2020**

SAMUEL BATISTA LOPES

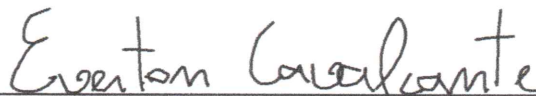
**PANORAMA DA RADIOATIVIDADE: DA DESCOBERTA ATÉ AS APLICAÇÕES
ATUAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento do Curso de Licenciatura Plena em Física da Universidade Estadual da Paraíba como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

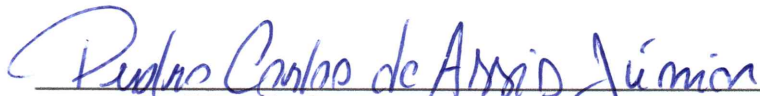
Área de concentração: Física.

Aprovada em: 02/12/2020

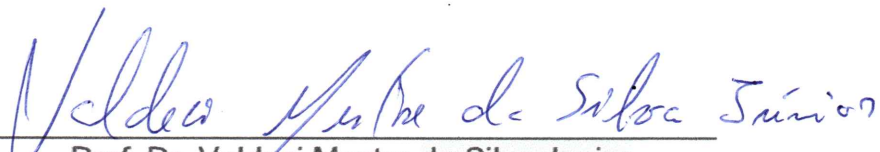
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Everton Cavalcante
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Pedro Carlos de Assis Júnior
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Valdeci Mestre da Silva Junior
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente aos meus pais, Ana e Damião, por me possibilitarem seguir nos meus estudos e todo o suporte que me deram. As minhas duas irmãs, Silmara e Damares, pelo apoio e a minha família de uma forma geral.

Ao professor Dr. Everton Cavalcante por ter aceitado ser meu orientador e me orientar como prosseguir com o desenvolvimento do trabalho, assim como os ensinamentos passados em sala de aula.

Aos meus amigos Geraldo Soares Leite Junior e Alâne Soares Cavalcante por todo o apoio e amizade durante esse caminho. E as minhas amigas e colegas Valeska Fernandes, Alexia Thais, Jaqueline Kelly e Janekelly Gomes que fazem parte do meu grupo, lembro com carinho todos os momentos que estivemos juntos compartilhando experiências. De modo geral, agradeço a todos os amigos e colegas pelos momentos que estivemos juntos aprendendo uns com os outros.

A todos os meus professores durante a graduação que passaram os seus conhecimentos e contribuíram para minha evolução.

Agradeço também ao professor Dr. Valdeci Mestre, juntamente com a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que por meio do projeto da Residência Pedagógica, no qual fui bolsista do projeto, obtive uma grande evolução como professor, a todos os amigos e colegas que fiz durante esse projeto, os conhecimentos adquiridos foram imensos, recordo com muita felicidade os momentos vividos durante o projeto que proporcionou uma troca muito significativa de conhecimentos.

Por fim, agradeço a UEPB por ter me proporcionado todas essas vivências e experiências que levarei para vida.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução dos modelos atômicos	14
Figura 2 – Gráfico do número de nêutrons N em função do número de prótons Z para os nuclídeos conhecidos. Os pontos indicam os 257 nuclídeos estáveis. A região entre as linhas irregulares representa os nuclídeos instáveis conhecidos com um tempo de vida maior que um milissegundo. A linha contínua que passa pelo meio dos nuclídeos estáveis é chamada linha de estabilidade.	18
Figura 3 – Decaimento alfa do nuclídeo instável do rádio $^{226}_{88}\text{Ra}$	19
Figura 4 – Serie de decaimentos do ^{238}U	22
Figura 5 – Modelo da gota no processo de fissão.....	25
Figura 6 – Diagrama esquemático da reação em cadeia de uma fissão nuclear	26
Figura 7 – Radiografia de uma fratura no úmero (osso do braço).....	29
Figura 8 – Posicionamento de um paciente em um aparelho de tomografia computadorizada, vista lateral com deslocamentos da mesa e vista posterior com movimento giratório do tubo de raios X em torno do paciente	30
Figura 9 – Sessão de Ressonância Magnética	31
Figura 10 – Diagrama esquemático de uma usina nuclear que gera energia elétrica	33
Figura 11 – Reator experimental de fusão nuclear do ITER	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
DNA	Ácido Desoxirribonucleico (do inglês deoxyribonucleic acid)
EAST	Experimental Advanced Superconducting Tokamak
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
MRI	Magnetic Resonance Imaging
RBMK	Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalnyy
TNP	Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares
TNT	Trinitrotolueno
Tokamak	тороидальная камера с магнитными катушками
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 UM POUCO DA HISTÓRIA	10
2.1 A Descoberta dos Raios X	10
2.2 A Hipótese de Poincaré e Novas Descobertas	11
2.3 Os Estudos de Becquerel	11
2.4 As Pesquisas de Schmidt e Curie	12
2.5 Anos Seguintes	13
3 FUNDAMENTOS FÍSICOS DA RADIOATIVIDADE	14
3.1 Propriedades do Núcleo	14
3.2 Ligação Nuclear e Estrutura Nuclear	16
3.3 Estabilidade Nuclear e Radioatividade	17
3.4 Atividade e Meia-Vida	22
3.5 Reações Nucleares	23
3.6 Fissão Nuclear	24
3.7 Fusão Nuclear	26
4 APLICAÇÕES	28
4.1 Radioatividade na Medicina	28
4.2 Energia Nuclear	32
4.3 Uso Militar	35
4.4 Datação Radioativa	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
6 CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS	40

PANORAMA DA RADIOATIVIDADE: DA DESCOBERTA ATÉ AS APLICAÇÕES ATUAIS

PANORAMA OF RADIOACTIVITY: FROM DISCOVERY TO CURRENT APPLICATIONS

Samuel Batista Lopes¹
Prof. Dr. Everton Cavalcante²

RESUMO

A radioatividade não é uma área que recebe grande destaque nos estudos acadêmicos, apenas para quem segue a pesquisa nesse campo. Assim, muito do que se conhece dela é através dos grandes desastres que ocorreram na história, como a bomba atômica usada na Segunda Guerra Mundial e acidentes nucleares como o ocorrido em Chernobyl. Mas, a radioatividade vai muito além disso, ao longo da história vários pesquisadores contribuíram para o seu estudo, e em pouco tempo das descobertas já se iniciaram aplicações diretas na sociedade como o caso dos raios X, utilizados na medicina. Suas aplicações, atualmente, são em diversas áreas como na medicina que é utilizada para diagnósticos e tratamentos, podendo ser vital para uma pessoa com câncer. Assim como, na produção de energia nuclear que abastece a matriz energética de alguns países, tendo a possibilidade de ser no futuro uma energia limpa através da fusão nuclear. Entretanto, deve-se ter cuidado na sua utilização pois os materiais radioativos liberam radiação que pode causar graves danos ao corpo humano, inclusive pode levar a morte. Então, a radioatividade é uma área que precisa ser conhecida, pois muitas coisas do nosso cotidiano estão diretamente ligadas a ela.

Palavras-Chave: Radioatividade. Física Nuclear. Energia Nuclear. Raios X.

¹ Estudante do curso de Licenciatura Plena em Física pela Universidade Estadual da Paraíba Campus VII, samuelbatistalopes@gmail.com

² Professor do curso de Licenciatura Plena em Física pela Universidade Estadual da Paraíba Campus VII, evertonacademico@gmail.com

ABSTRACT

Radioactivity is not an area that receives great prominence in academic studies, only for those who follow the research in this field. So much of what is known about it is through the great disasters that occurred in history, such as the atomic bomb used in World War II and nuclear accidents like the one in Chernobyl. However, radioactivity goes far beyond that, throughout history, several researchers contributed to its study, and in a short time since the discoveries, direct applications in society have started, such as the case of X-rays, used in medicine. Currently, its applications are in several areas, such as medicine, which is used for diagnoses and treatments, and can be vital for a person with cancer. As well as in the production of nuclear power that supplies the energy matrix of some countries, with the possibility of being clean energy in the future through nuclear fusion. However, care must be taken in its use, as radioactive materials release radiation that can cause serious damage to the human body, including death. So, radioactivity is an area that needs to be known, as many things in our daily lives are directly linked to it.

Keywords: Radioactivity. Nuclear Physics. Nuclear Power. X-ray.

1 INTRODUÇÃO

A radioatividade ainda não é muito conhecida em todo o seu amplo espectro para a maioria das pessoas. Pois, ficou muito conhecida por graves problemas que causou na sociedade, como a bomba atômica usada na Segunda Guerra Mundial e em acidentes nucleares como o de Chernobyl. Em ambos os casos as regiões onde ocorreram esses desastres sofreram as consequências da exposição à radiação. Assim, muitas pessoas já olham com medo quando se fala em radioatividade. Porém, em toda a nossa volta existe radioatividade, mas não a percebemos, pois a radioatividade não é uma coisa que se pode ver com os olhos. E ela vai muito além desses casos que causaram danos a sociedade, inclusive até dentro do nosso corpo existe radioatividade [1].

A história da radioatividade, não é muito longa, suas descobertas iniciaram a partir dos estudos feitos por Röntgen, em 1895, e posteriormente tendo a contribuição de vários pesquisadores como Marie Curie, Rutherford entre outros. Sendo caracterizada como uma área que permeou vários campos das ciências como: a Física, Química, Biologia e Geologia. E cada uma dessas áreas trouxe uma contribuição significativa para seus estudos.

Foi através desses conhecimentos que tivemos várias tecnologias desenvolvidas com a utilização da radioatividade. Os raios X, assim que foram descobertos por Röntgen, em pouco tempo já se estava tendo a sua aplicação através das radiografias, que mudou radicalmente a medicina. E até hoje já houveram várias outras aplicações tendo destaque na medicina e em outros campos como a produção de energia, o uso na indústria, na agricultura, na paleontologia entre outras. Na produção de energia, por exemplo, a energia nuclear é de extrema importância na matriz energética que abastece alguns países, que neste caso é através da fissão nuclear. Mas, existem tecnologias a base da radioatividade que estão sendo produzidas atualmente, seja para aprimoramento das que já existem, ou para produção de novas tecnologias como a geração de energia a partir da fusão nuclear, que está em fase de estudos experimentais, caso essa tecnologia se torne comercialmente viável, possibilitará gerar energia limpa e em grande abundância para a sociedade.

Contudo, o uso da radioatividade deve ser feito com cuidado, pois os materiais radioativos liberam radiação, essa radiação se absorvida em grandes quantidades por uma pessoa pode trazer vários danos a sua saúde, como o desenvolvimento de câncer ou até a morte.

Esse trabalho se baseia em um estudo teórico, levando em consideração vários campos da radioatividade como: a história, os fundamentos físicos e as aplicações. Para assim podermos ver um panorama da radioatividade e conhecer essa grande área.

Iniciaremos com o capítulo sobre a história da radioatividade para compreender como foi o contexto que as descobertas foram sendo realizadas, assim como em que ano e quem foram os pesquisadores que realizaram os primeiros estudos. Em seguida, teremos o capítulo sobre os fundamentos físicos que estruturam a radioatividade para compreender-se como os elementos radioativos emitem radiação, qual o tipo de radiação liberada nos processos de decaimento que transformam um elemento em outro, e entender a jornada que alguns elementos trilham no caminho para se tornarem estáveis. Depois teremos o capítulo sobre as aplicações onde veremos as principais aplicações que a radioatividade teve na sociedade, inclusive tecnologias que estão em desenvolvimento. E finalizaremos com o capítulo de resultados e discussões onde é abordado alguns usos que a radioatividade teve e, principalmente, os efeitos biológicos que a radiação pode causar no corpo humano. Que assim, possibilitará conhecer essa área que é tão importante para a sociedade.

2 UM POUCO DA HISTÓRIA

Para proporcionar uma melhor compreensão dos estudos que levaram a descoberta da radioatividade, será feita uma breve descrição desde a descoberta dos raios X até os estudos iniciais com os fenômenos da radioatividade.

2.1 A Descoberta dos Raios X

Em 8 de novembro de 1895, Wilhelm Conrad Röntgen descobriu os raios X. Ele realizou um experimento com raios catódicos, motivado pelos trabalhos de Hertz e Lenard. Nesse experimento, ele observou que uma tela coberta de um material fluorescente, *platinocianeto de bário*, que estava próximo a um tubo de raios catódicos (tubo de Hittorf-Crookes ou Lenard) emitia um brilho, mesmo com o tubo coberto com papel opaco. Após esse experimento Röntgen ficou se perguntando como esse brilho acontecia. Logo, em seguida, passou semanas investigando esses raios que provocavam essa luminescência. E por ser um raio ainda não descoberto o nomeou como raios X, por sua natureza desconhecida [2]. Nas semanas seguintes realizou vários experimentos para observar os fenômenos e estudar suas propriedades, onde testou a interação dos raios X com outros objetos e substâncias como a passagem dos raios por lâminas finas de madeira, papel e estanho. Se era possível observar os raios com o olho próximo ao tubo de descarga. E também realizou testes com substâncias como compostos de cálcio, vidro de urânio, calcita; a interação a partir da distância da tela de papel coberta por *platinocianeto de bário* em relação ao tubo de descarga, de alguns centímetros chegando à 2 metros. Além disso, realizou testes ópticos para ver se tinha alguma relação com a luz. Que serão descritos em seguida.

Em poucas semanas conseguiu descrever muitas propriedades dessa radiação. Os raios se propagavam em linha reta, eles penetravam alguns materiais de grande espessura, o chumbo os absorvia fortemente. Sensibilizava chapas fotográficas, produzia luminescência em certos materiais, era invisível ao olho humano, não observou reflexão, nem refração e nem polarização dos mesmos [3].

Com um considerável estudo das propriedades dos raios X, Röntgen estava seguro para redigir seu primeiro artigo sobre o tema. Assim, em 28 de dezembro de 1895, Röntgen conseguiu que o seu artigo fosse publicado em uma revista da Sociedade Física e Médica de Würzburg, uma revista muito conceituada da região. Antes da publicação na revista, Röntgen imprimiu algumas cópias e enviou pelo correio para uma lista de 92 correspondentes, onde estavam vários pesquisadores influentes da época. E junto da cópia do seu trabalho também haviam 4 radiografias sendo: uma da mão da sua esposa, *Bertha*; uma caixa de madeira com pesos de balança; uma bússola, com caixa metálica; e a amostra de um metal com irregularidades. Essa tática de divulgação teve um impacto imediato, onde em poucos dias o trabalho de Röntgen estava sendo repercutido em toda a comunidade científica [3].

A radiografia foi uma coisa que assustou muitas pessoas. O próprio Röntgen durante suas experiências teve medo que suas observações fossem coisas da sua imaginação, manteve sigilo até de sua própria esposa durante muito tempo, até decidir publicar seu artigo. E o fato de poder observar o interior do corpo sem métodos invasivos foi algo revolucionário para a medicina, logo houve um grande número de pesquisas sobre a radiografia e o seu uso na medicina. Contudo, por a divulgação ter tido um impacto muito grande em pouco tempo o Röntgen obteve reconhecimento por parte dos cientistas, mas também sofreu várias críticas apontando que o fenômeno já tinha sido descoberto antes por outros pesquisadores, houve deturpação da descrição do trabalho de Röntgen, imprecisões nas publicações da imprensa. E essa repercussão acabou atrapalhando o trabalho que o Röntgen vinha desenvolvendo. Mas,

de fato, o primeiro a descrever e publicar o fenômeno dos raios X foi o Röntgen e de forma precisa. Ao todo ele publicou 3 artigos sobre os raios X. Sendo laureado com o Nobel de Física em 1901.

2.2 A Hipótese de Poincaré e Novas Descobertas

O Röntgen em seu primeiro artigo já conseguiu descrever muitas propriedades físicas dos raios X, mas a natureza dessa radiação permaneceu desconhecida por mais alguns anos. E algumas hipóteses foram apresentadas na tentativa de descobrir essa natureza. Em 20 de janeiro de 1896, pela primeira vez, os raios X foram discutidos na Academia Francesa de Ciências, poucas semanas após a publicação do primeiro trabalho do Röntgen. Henri Poincaré que recebeu uma das cópias do trabalho diretamente do Röntgen, assim como cópias de radiografias, apresentou à Academia um relato verbal da descoberta. Ele também apresentou à Academia as primeiras radiografias produzidas em Paris. E se mostrou bastante interessado pelo fenômeno [4].

Na emissão dos raios X, observa-se que a parede do tubo de vidro, na região próxima ao cátodo fica fluorescente. Poincaré observando se haveria alguma relação entre a emissão dos raios X e a fluorescência do vidro, faz um comentário de grande importância em seu artigo publicado em 1896, que diz o seguinte:

Portanto, é o vidro que emite os raios de Röntgen, e ele se torna fluorescente ao emitir. Podemos nos perguntar se todos os corpos que possuem uma fluorescência suficientemente intensa não emitiriam os raios X de Röntgen, além de raios luminosos, seja qual for a causa de sua fluorescência. Nesse caso, o fenômeno não estaria associado a uma causa elétrica. Isso não é muito provável, mas é possível, e sem dúvida é fácil de verificar (POINCARÉ, 1896, p. 56). [4].

Essa hipótese rapidamente foi testada, e trouxe mais algumas descobertas. Houveram vários experimentos realizados por diferentes pesquisadores na busca de diferentes modos de produzir os raios X. Os que mais se destacaram foram os experimentos de Charles Henry e os de Gaston Henri Niewenglowski que testaram diferentes substâncias fluorescentes e suas relações com os raios X. Em alguns experimentos sendo realizados sem o uso tubo de Crookes, mas com essas substâncias sendo excitadas pela luz solar, afirmaram obter radiografias com esse método. E ambas confirmavam a hipótese de Poincaré observando-se a relação entre ambos. Mas, esses resultados não deveriam ter dado o que eles descreveram e aparecem de forma anômala. Pois, atualmente, não se conhece os efeitos descritos por esses dois pesquisadores [4].

Nos Estados Unidos, Carey Lea tomando conhecimento dos experimentos de Henry e da hipótese de Poincaré realizou seus experimentos também, sendo o primeiro a utilizar um composto fluorescente de urânio. Mas não obteve resultados relevantes.

E pelos conhecimentos que temos atualmente, não há relação direta entre os raios X e a fluorescência observada, e mesmo essa hipótese de Poincaré estando errada proporcionou importantes descobertas de outros fenômenos. Além de ter influenciado diretamente Henri Becquerel a realizar suas pesquisas sobre os raios X.

2.3 Os Estudos de Becquerel

Antoine-Henri Becquerel, pertenceu a uma família de cientistas, que fizeram suas contribuições para a ciência, como o seu avô e seu pai. Os seus primeiros estudos estavam ligados as investigações que seu pai tinha realizado acerca da fosforescência. E naquela época, os compostos de urânio eram interessantes para pesquisa sobre luminescência, pois

muitas substâncias fosforescentes diferentes continham urânio e sua fluorescência era consideravelmente forte. Motivado pela hipótese de Poincaré e pelos trabalhos de Henry e Niewenglowski, Becquerel começa a testar os compostos de urânio para verificar se havia relação com os raios X [4].

Becquerel em sua primeira pesquisa sobre a relação entre os raios X e a luminescência, em 1896, realizou experimentos muito semelhantes aos de Henry e Niewenglowski, onde uma chapa fotográfica é embrulhada em duas folhas de papel preto muito espessas, sobre elas é colocado um floco de uma substância fosforescente, no caso, *sulfato duplo de urânio e potássio*, e o conjunto é exposto ao sol por várias horas. Quando a chapa fotográfica é revelada, aparece a silhueta da substância fosforescente em preto, no negativo, e se for colocada uma moeda entre a substância fosforescente e o papel, suas imagens são visíveis no negativo. E, conclui através desses experimentos que esta substância fosforescente emite radiações. Observa-se que esses resultados são parecidos com os descritos por Henry e Niewenglowski, mas com a diferença de ter sido feito com uma nova substância, o *sulfato duplo de urânio e potássio*. [5]

Em um segundo artigo, em 1896, Becquerel descreve, o que ficou conhecido na história como a descoberta da radioatividade, onde realizaria mais uma vez o experimento descrito anteriormente, mas não o faz, esse trecho do artigo que ele publicou relata o ocorrido:

[...] alguns foram preparados na quarta-feira, 26, e na quinta-feira, 27 de fevereiro; e como, nesses dias, o Sol apareceu apenas de modo intermitente, guardei os experimentos que havia preparado e coloquei as chapas com seus envoltórios na obscuridade da gaveta de um móvel, deixando os flocos de sal de urânio em seu lugar. Como o Sol não apareceu novamente nos dias seguintes, no dia 1 de março eu revelei as chapas fotográficas, esperando encontrar imagens muito fracas. Pelo contrário, as silhuetas apareceram com uma forte intensidade. Eu logo pensei que a ação devia ter continuado na obscuridade [...] (BECQUEREL, 1896b). [4]

Inicialmente, o fenômeno era atribuído ao fato da exposição a luz possibilitar que os corpos luminescentes emitissem os raios X. Contudo, Becquerel atribui esse ocorrido a radiações invisíveis emitidas por fosforescência com uma persistência maior que a radiações luminosas emitidas pelos corpos luminosos. Logo, observa-se uma certa insistência dele em descrever esse fenômeno através da fosforescência. Assim, Becquerel realiza experimentos com outros materiais fosforescentes, alguns com compostos de urânio e outros não, mas ainda descreve o mesmo fenômeno. Além de Becquerel, outros pesquisadores também estavam fazendo experimentos semelhantes. Esse fenômeno da fosforescência invisível foi sendo nomeado por Hiperfosforescência [4]. Mas, pelo que sabemos atualmente, não existe nenhuma relação entre a luminescência e a radioatividade. Becquerel depois de algum tempo parece se desinteressar por esse assunto e abandona o seu estudo, indo pesquisar outro fenômeno. [5]

Isso nos mostra que não foi Becquerel quem descreveu um fenômeno novo que estava na sua frente. Quem trouxe uma melhor descrição deste fenômeno das radiações emitidas por compostos de urânio foram Marie Curie e Schmidt, inicialmente.

2.4 As Pesquisas de Schmidt e Curie

Em 1898, Gerhard Carl Nathaniel Schmidt fez uma enorme contribuição para os estudos da radioatividade. O método de estudo não foi através de chapas fotográficas, mas através de uma câmara de ionização, observando a corrente elétrica produzida no ar. Através desse método, percebeu que os materiais fosforescentes comuns não ionizavam o ar, e portanto, não emitiam raios X e nem outra radiação parecida. Verificou que o urânio ionizava

o ar e o fósforo também tinha uma propriedade semelhante, mas observou que o urânio e todos os seus compostos, independente de como se encontrassem, emitiam essas radiações, porém o fósforo emitia apenas em seu estado puro, não ocorrendo o mesmo com os seus compostos. Schmidt verificou outras substâncias que tivessem um efeito semelhante ao urânio, e identificou que o tório também emita radiações penetrantes, capazes de ionizar o ar [6].

Marie Sklodowska Curie, em suas pesquisas iniciais estudou vários materiais, entre eles os minerais de urânio e tório, e como era de se esperar, todos os seus compostos emitiam radiações. Ela utilizava o mesmo método que Schmidt. Realizando outros experimentos com o urânio, conseguiu identificar mais algumas propriedades: (1) o aquecimento do urânio não aumenta a intensidade da sua radiação; (2) iluminação e irradiação com raios X não aumentam a sua radiação. E isso já fez esse fenômeno se distanciar cada vez mais da fosforescência [6].

Em estudos seguintes, examinando outros materiais, entre eles um mineral de urânio chamado *pechblenda*, produziu efeitos semelhantes ao urânio puro, mas a corrente observada da *pechblenda* era maior que o caso do urânio metálico puro, que era considerado o composto de urânio com maior emissão de radiação na época. Isso fez com que Marie Curie realizasse várias vezes esse mesmo experimento para ver se isso estava realmente certo, e estava. Examinando, alguns compostos de urânio e tório, ela notou que a emissão de radiação parecia ser aproximadamente proporcional a quantidade do metal presente, não dependendo da presença de outras substâncias inativas, que apenas atuavam absorvendo a radiação. Marie estava cada vez mais próxima de identificar que essa radiação ionizante era uma propriedade atômica. Então, Marie vendo a possibilidade de encontrar um outro material radioativo, desconhecido, inicia um trabalho de química analítica, separando progressivamente os constituintes da *pechblenda*, testando-os pelo método elétrico, para assim, separar as frações radioativas das inativas. Através de alguns processos químicos conseguiu obter um material (ainda unido ao bismuto) que era 400 vezes mais ativo que urânio puro. Marie juntamente com seu marido Pierre Curie, decidem dar o nome de polônio ao novo elemento encontrado, em homenagem ao país de origem de Marie [5].

Em um novo trabalho, ainda em 1898, pouco tempo depois da descoberta do polônio, os Curie apresentam evidências de um novo elemento químico, também extraído da *pechblenda*, que é 900 vezes mais ativo que o urânio. E, por parecer mais radioativo que qualquer outro elemento conhecido o nomeiam de rádio [5].

Através desse estudo dos elementos radioativos, observaram a existência de um novo tipo de radiação mais penetrante. E foi Marie Curie que introduziu o nome de Radioatividade a esse fenômeno estudado [6].

Marie Curie juntamente com seu marido Pierre Curie e Henri Becquerel receberam o prêmio Nobel de Física em 1903, por suas descobertas acerca das radiações. E, oito anos depois, em 1911, Marie Curie recebe o prêmio Nobel de Química pelo descobrimento dos elementos químicos polônio e rádio.

2.5 Anos Seguintes

Ainda tinha muita coisa a ser compreendida. O nome radioatividade já existia, mas o complexo fenômeno ainda tinham muitas perguntas sem respostas. A natureza e a diversidade das radiações emitidas pelos materiais radioativos foi sendo estabelecida gradualmente. Em 1899, Ernest Rutherford observou que o urânio emitia dois tipos de radiação, uma mais penetrante e outra menos, que nomeou de alfa (a menos penetrante) e beta. Depois o casal Curie verificou que alguns raios eram defletidos por um ímã e outros não. Os que eram defletidos correspondiam a radiação beta de Rutherford. Em 1900, Paul Ulrich Villard

descobriu que os raios que não eram desviados eram dois tipos, os raios alfa (pouco penetrantes) e outros raios que eram muito penetrantes que foram chamados de raios gama. A desintegração dos elementos, em que ocorre a transformação dos elementos radioativos foram descobertas por Rutherford. Identificando assim, que a emissão e o depósito de materiais radioativos rapidamente perdiam sua radioatividade, o que mostrou trata-se de uma mudança atômica gradual. Após esses e outros estudos, Rutherford e Frederick Soddy apresentaram a teoria das transformações radioativas em 5 artigos publicados entre 1902 e 1903 [5].

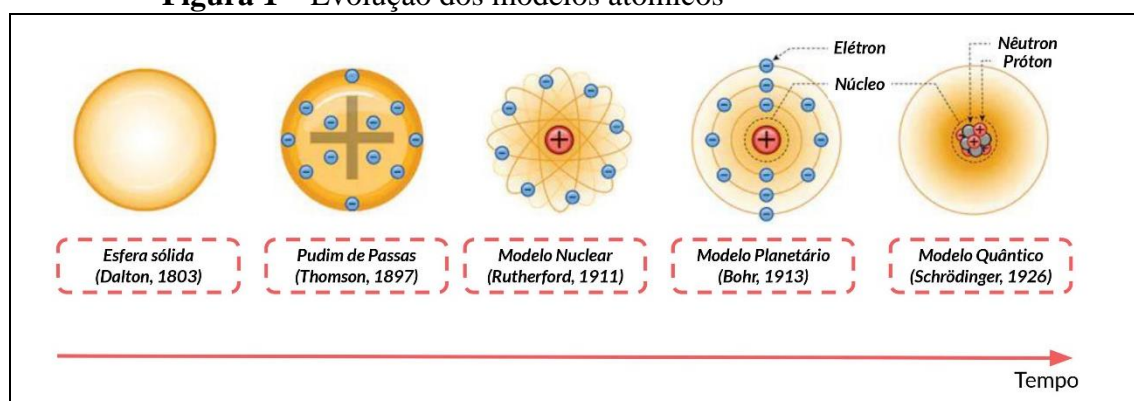
A história restante é longa e muito rica, muitas outras descobertas foram realizadas, com a contribuição de vários pesquisadores para essa grande área que conhecemos como radioatividade.

Para compreendermos como esse fenômeno acontece e a sua natureza será descrito no próximo capítulo os fundamentos que estruturam a radioatividade.

3 FUNDAMENTOS FÍSICOS DA RADIOATIVIDADE

Para compreender o fenômeno da radioatividade vamos abordar os fundamentos da Física Nuclear. Todo esse processo para entendermos o átomo e os fenômenos associados a ele se deve a evolução dos modelos físicos sobre a estrutura do átomo. A figura 1, sintetiza os principais modelos propostos ao longo do tempo.

Figura 1 – Evolução dos modelos atômicos



Fonte: Autoria própria.

No modelo de Dalton, o átomo era uma esfera maciça e indivisível. No modelo de Thomson, o átomo era uma esfera positiva com esferas menores e negativas contidas em seu interior. Já nos modelos de Rutherford e de Bohr, agora o átomo é constituído por um núcleo positivo com os prótons no seu centro e envolta do núcleo temos a eletrosfera com os elétrons. E no mais recente, o modelo de Schrödinger, temos o núcleo constituído por prótons e nêutrons e envolta do núcleo uma nuvem onde orbitam os elétrons. Assim, todo átomo contém em seu centro um núcleo com carga positiva. E esse núcleo é muito menor que o átomo como um todo. Entretanto, a maior parte da massa total do átomo se concentra no núcleo. Agora, já tendo em mente como é a estrutura do átomo vamos analisar as propriedades mais importantes ligadas ao núcleo do átomo.

3.1 Propriedades do Núcleo

A primeira medida do raio nuclear foi feita por Rutherford em uma experiência usando o espalhamento de partículas alfa, verificando que o raio do núcleo é dezenas de milhares de vezes menor que o raio do átomo. E através de experimentos envolvendo o espalhamento de

prótons, elétrons, nêutrons e partículas alfa mostraram que podemos ter um modelo de um núcleo como uma esfera de raio R que depende do **número de núcleons** (prótons e nêutrons) existentes no núcleo. E os raios de quase todos os núcleos podem ser representados através da seguinte equação [7]:

$$R = R_0 A^{1/3} \quad (\text{raio do núcleo}) \quad (3.1)$$

onde R_0 é uma constante definida experimentalmente [7]:

$$R_0 = 1,2 \times 10^{-15} \text{ m} = 1,2 \text{ fm}$$

E o número de núcleons A , também é denominado como **número de massa**, sendo o número inteiro mais próximo da massa do núcleo medida em unidade de massa atômica (u).

Também, pelo fato do raio ser proporcional a $A^{1/3}$, o volume do núcleo é proporcional a A . E como a massa do núcleo também é aproximadamente proporcional a A , isso nos mostra que a densidade de todos os núcleos são aproximadamente iguais.

O núcleo do átomo é constituído por prótons e nêutrons. Em um átomo neutro, para cada próton existe um elétron orbitando o núcleo. As massas dessas respectivas partículas são:

Próton:	$m_p = 1,007276 \text{ u} = 1,672622 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Elétron:	$m_e = 1,008665 \text{ u} = 1,674927 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Nêutron:	$m_n = 0,000548580 \text{ u} = 9,10938 \times 10^{-31} \text{ kg}$

O número de prótons do núcleo é denominado **número atômico** representado por Z . O número de nêutrons é denominado **número de nêutrons** representado por N . O número de núcleons representado por A é dado pela soma do número de prótons Z e pelo número de nêutrons N :

$$A = Z + N \quad (3.2)$$

Um **nuclídeo** é um determinado núcleo com valores definidos de Z e N . A informação da estrutura eletrônica de um átomo é dada pela carga Ze do núcleo.

A notação usual para os nuclídeos individuais é feita da seguinte forma: o símbolo do elemento com o índice superior esquerdo indicando o número de massa A e o índice inferior esquerdo indicando o número atômico. Assim, a notação geral fica ${}^A_Z\text{El}$ e ${}_Z\text{El}$. Como exemplo, temos o elemento cloro com $Z = 17$ e $A = 35$, assim ${}^{35}\text{Cl}$ e ${}_{17}\text{Cl}$.

Existem também os nuclídeos que são chamados de **isótopos** de um elemento, ou seja, é um nuclídeo com o mesmo número atômico, porém com diferentes números de nêutrons. Um exemplo é o hidrogênio, que tem três isótopos, o prótio que é o isótopo mais comum do hidrogênio e com uma abundância por volta de 99,98% encontrado na natureza, possui apenas um próton e nenhum nêutron. O segundo isótopo é o deutério com uma pequena porção menor que 1% do hidrogênio encontrado na natureza, possui um próton e um nêutron. E o terceiro é o trítio com um próton e dois nêutrons sendo extremamente pouco encontrado na natureza. Uma curiosidade é que o hidrogênio é o único elemento que seus isótopos recebem nomes diferentes. O cloro que tem dois isótopos $A = 35$ e $A = 37$ são conhecidos, respectivamente, como “cloro 35” e “cloro 37” sua notação fica assim ${}^{35}\text{Cl}$ e ${}^{37}\text{Cl}$ [9].

3.2 Ligação Nuclear e Estrutura Nuclear

Para manter os núcleons unidos no interior do núcleo existe o que se chama de **energia de ligação** E_b . E, para separarmos os prótons e os nêutrons do núcleo é preciso fornecer essa energia. A energia de ligação de um núcleo com Z prótons e N nêutrons é dada por [8]:

$$E_b = (ZM_H + Nm_n - M_A) c^2 \quad (3.3)$$

onde M_H é a massa de um átomo de hidrogênio, m_n é a massa de um nêutron, M_A é a massa do átomo e c é a velocidade da luz.

Note que as massas dos Z elétrons se cancelam, pois estão incluídas tanto no valor de M_H como no valor de M_A . Observamos que a massa de repouso do núcleo é sempre menor que a massa de repouso total dos núcleons por causa exatamente da energia de ligação do núcleo. E essa “perda de massa” é representada no termo em parênteses.

Quando analisamos o núcleo do átomo, percebemos que pela repulsão elétrica dos prótons o átomo deveria se desintegrar, mas não é isso que acontece. Logo, existe uma força que mantém os núcleons unidos, deve ser atrativa e muito maior que a força de Coulomb, já que os nêutrons são eletricamente neutros, mas os prótons, como vimos, estão sujeitos a força eletrostática repulsiva. Não é possível atribuir essa estabilidade dos núcleos a atração gravitacional, pois a força gravitacional entre dois prótons no interior do núcleo é muito menor que a força eletrostática. Assim, surge o que chamamos de **força nuclear**.

Vamos ver algumas características dessa força. Em primeiro lugar, ela independe da carga, pois ela atua de forma indistinta tanto em prótons como em nêutrons e a força de ligação é a mesma em ambas as partículas. Segundo, ela possui curto alcance, atuando até distâncias da ordem de grandeza do diâmetro do núcleo, ou seja, cerca de 10^{-15} m. E, dentro desse intervalo, a força nuclear é muito mais forte que a força eletrostática, possibilitando a estabilidade do núcleo. Terceiro, ela é saturada, pois a densidade aproximadamente constante da matéria nuclear e a energia de ligação por núcleon aproximadamente constante dos núclídeos grandes mostram que um núcleon individual não pode interagir simultaneamente com todos os outros núcleons dentro do núcleo, somente com aqueles poucos que estão em suas imediatas vizinhanças, e essa limitação de interações é chamada de saturação, podemos até fazer uma analogia com a limitação das ligações covalentes que um átomo pode fazer com outros átomos. E em quarto, a força nuclear é dependente do spin, pois a força nuclear proporciona a ligação de pares de prótons ou de nêutrons com spins opostos e a formação de pares de pares, ou seja, um par de prótons juntamente com um par de nêutrons, cada par com spins opostos.

A análise da estrutura nuclear é mais complexa que a análise da estrutura atômica. Pois, temos dois tipos diferentes de interações, a elétrica e a nuclear, e a força nuclear ainda não está muito bem definida. Entretanto, podemos analisar a estrutura nuclear a partir de modelos simples. Abaixo vamos discutir muito brevemente sobre os principais modelos, já avançando para o que é mais interessante para nós nesse trabalho. Que é a questão da estabilidade nuclear.

Modelo da Gota e o Modelo de Camadas

O **modelo da gota** foi proposto pelo físico russo George Gamow, em 1928, sendo mais tarde expandido por Niels Bohr. Sendo sugerido pela observação que todos os núcleos têm densidade aproximadamente constante, os núcleons individuais são análogos a moléculas de um líquido, mantidas unidas pelas interações de curto alcance e por efeitos de tensão

superficial. De modo, que pode ser desenvolvida uma equação da energia de ligação nuclear. E, a partir da definição das constantes medidas experimentalmente podemos chegar em uma fórmula semi-empírica para a massa do átomo dada por [7]:

$$M_A = ZM_H + Nm_n - \frac{E_b}{c^2} \quad (3.4)$$

observe que esta eq. (3.4) é uma variação da eq. (3.3).

Então, o modelo da gota, é a fórmula da massa deduzida. Sendo muito importante para se obter estimativas das massas nucleares. A descrição deste modelo é muito breve, pois a matemática para o desenvolvimento dela é longa e não compreende esse destaque neste trabalho. Sendo apresentado a sua definição qualitativa, pois ela foi um instrumento importante para explicar processos de decaimento. Entretanto, outros aspectos são melhor descritos com o modelo das camadas.

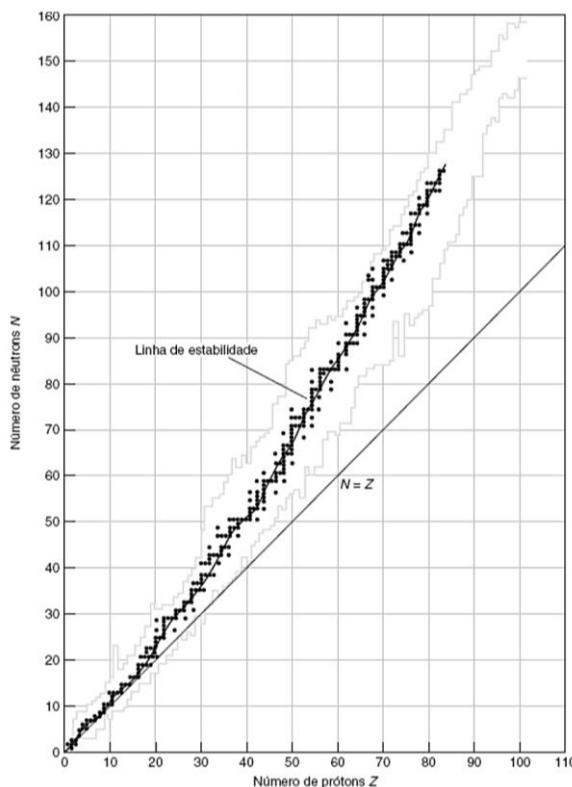
O **modelo de camadas** da estrutura nuclear é semelhante a aproximação de campo central usado na Física. No qual, partindo de uma aproximação os níveis de energia dos elétrons são preenchidos de forma sucessível, ou seja, partindo de níveis mais baixos de energia até os níveis de energia mais alta. Essa analogia, é feita em relação a energia de ligação do núcleo.

De modo que podemos usar os conceitos de camadas e subcamadas cheias e suas relações com a estabilidade. Na estrutura atômica, verifica-se, que quando o número de prótons ou o número de nêutrons é igual a 2, 8, 20, 28, 50, 82 ou 126 a estrutura nuclear resultante é particularmente estável, indicando uma energia de ligação excepcionalmente grande. (O nuclídeo com $Z = 126$ ainda não foi observado na natureza). Esses números são chamados de números mágicos. Nuclídeos nos quais Z é um número mágico tendem a apresentar isótopos estáveis.

3.3 Estabilidade Nuclear e Radioatividade

Dos mais de 3000 nuclídeos conhecidos, existem apenas 257 que nos estados fundamentais são estáveis. Todos os outros possuem estados fundamentais instáveis e, portanto, sofrem algum tipo de decaimento radioativo, transformando-se em outros nuclídeos. O tempo que leva esse processo de decaimento pode variar desde uma fração de microssegundos até bilhões de anos. A figura 2 mostra um gráfico do número de nêutrons N em função do número de prótons Z para nuclídeos estáveis e para nuclídeos instáveis conhecidos cujo o tempo de vida é maior que um milissegundo.

Figura 2 – Gráfico do número de nêutrons N em função do número de prótons Z para os nuclídeos conhecidos. Os pontos indicam os 257 nuclídeos estáveis. A região entre as linhas irregulares representa os nuclídeos instáveis conhecidos com um tempo de vida maior que um milissegundo. A linha contínua que passa pelo meio dos nuclídeos estáveis é chamada linha de estabilidade.



Fonte: Referência [8].

Analisando o gráfico, é perceptível que a partir de $Z = 20$ a estabilidade dos nuclídeos cresce com uma maior quantidade de nêutrons, se distanciando de $N = Z$. Isso se deve ao fato do crescente aumento da influência da interação elétrica de repulsão entre os prótons, impedindo a estabilidade. E nesses casos, a repulsão ganha e o núcleo se divide. Para os nuclídeos que possuem um número muito grande de nêutrons em relação ao número de prótons, a energia de ligação associada aos nêutrons não é equilibrada em relação a associada aos prótons, e os nuclídeos decaem em um processo que converte nêutrons em prótons. Um caso excepcional de estabilidade acontece com o número mágico ${}^4_2\text{He}$, que possui um par de prótons e um par de nêutrons, e não tem nenhum interesse em receber uma quinta partícula em sua estrutura nuclear mantendo sua estabilidade.

Foi observado que existe uma tendência dos núcleons para formar pares com núcleons iguais. Tanto que dos 257 nuclídeos estáveis, 150 têm um número par de nêutrons e de prótons, 54 têm número par de prótons e um número ímpar de nêutrons, 48 têm um número ímpar de prótons e um número par de nêutrons e apenas 5 têm um número ímpar de nêutrons e de prótons. E, também, foi verificado que os núcleos com $Z = 20, 28, 50, 82$ possuem um número de isótopos maior que a média. O estanho, por exemplo, com $Z = 50$, tem 10 isótopos estáveis.

Radioatividade

Temos mais 2800 isótopos radioativos conhecidos, que sofrem decaimento e se transformam em outros núclídeos. Eles podem decair pelo menos de nove formas diferentes, no entanto, a maioria dos decaimentos acontece de um, ou ocasionalmente, dois, dos seguintes modos: alfa, beta e gama. Os decaimentos restantes acontecem através de mecanismos menos comuns, como a emissão de um próton, a emissão de um nêutron e a fissão espontânea. Alguns poucos podem decair através de processos extremamente raros como o duplo decaimento beta. Um ponto muito importante é que os processos de decaimento obedecem as mesmas leis de conservação que se aplicam todos os processos físicos. Nas quais destacamos a conservação: (1) massa-energia relativística; (2) carga elétrica; (3) momento linear; (4) momento angular; (5) número de núcleons e (6) número de léptons. Vamos discutir os três processos de decaimento mais comuns a seguir.

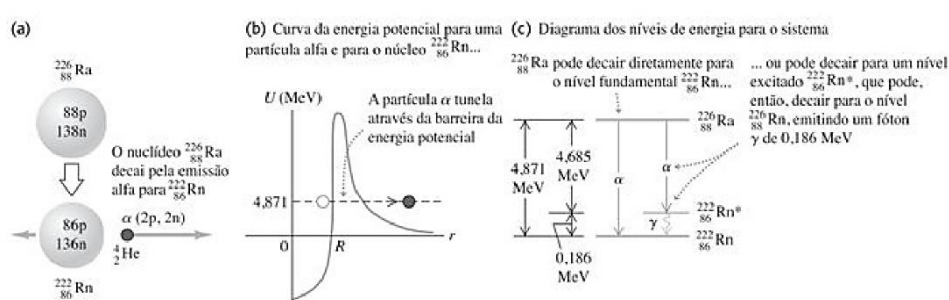
Decaimento alfa

A emissão alfa ocorre geralmente para núcleos pesados demais para se manterem estáveis. Assim, quando um núcleo emite uma partícula alfa, seus números de Z e N diminuem em duas unidades e A diminui de quatro unidades, fazendo o núcleo se aproximar da região de estabilidade. Uma **partícula alfa** (α) é um núcleo de ${}^4\text{He}$ com dois prótons e dois nêutrons unidos e de spin total igual a zero. Podemos observar um exemplo que acontece com o rádio ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ (Figura 3-a), onde a energia cinética da partícula alfa é igual a 4,8 MeV.

As partículas alfa são sempre emitidas com uma energia cinética bem definida, determinada pela lei de conservação da energia e pela lei da conservação do momento linear. E essas partículas alfa são de curto alcance, ou seja, devido as colisões pode percorrer alguns centímetros no ar ou alguns décimos de milímetros no interior de um sólido.

É importante destacar que no decaimento alfa, a partícula α tunela através de uma barreira de energia potencial como podemos ver na figura 3-b.

Figura 3 – Decaimento alfa do nuclídeo instável do rádio ${}^{226}_{88}\text{Ra}$



Fonte: Referência [7].

Decaimento beta

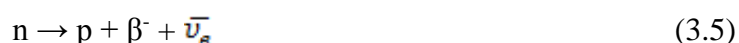
Existem três tipos diferentes de decaimento beta: beta negativo, beta positivo e captura de elétrons. Cada um deles tem suas características e serão descritos a frente. Contudo, este é um processo que é caracterizado por sua complexidade alguns mecanismos, como veremos, podem parecer estranhos, mas é como conseguimos explicar esse processo.

Uma **partícula beta negativa** (β^-) é um elétron. Muito embora seja estranho como um núcleo pode emitir um elétron quando não existe nenhum elétron no núcleo. Entretanto, a emissão de uma partícula β^- envolve a transformação de um nêutron em um próton juntamente

com um elétron e uma partícula chamada antineutrino. É uma característica das partículas beta é o fato de suas velocidade serem muito próximas a velocidade da luz e seu movimento sendo relativístico.

O *neutrino* foi uma partícula que foi descrita na teoria de Enrico Fermi, em 1933, para o decaimento beta. Os neutrinos foram observados pela primeira vez em laboratório em 1956, em um experimento realizado por Clyde Cowan e Frederick Reines. Atualmente, sabe-se que existem seis neutrinos, um (ν_e) associado ao elétron, um (ν_μ) associado aos múons e um (ν_τ) associado aos táuons e as antipartículas correspondentes representados, respectivamente, pelos símbolos $\bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_\mu$, $\bar{\nu}_\tau$. Os elétrons, os múons e os táuons juntamente com os neutrinos formam uma família de partículas chamadas léptons³.

O decaimento de um nêutron livre pode ser expresso pela seguinte equação:



Observa-se que geralmente o decaimento de partículas beta negativa ocorre em núclídeos que a razão nêutrons-prótons é grande demais para manter a estabilidade, ou seja, tem um excesso de nêutrons. E nesse tipo de decaimento N diminui 1, Z aumenta 1 e A não varia.

No decaimento beta positivo ocorre um processo inverso do decaimento beta negativo, ou seja, quando a razão nêutrons-prótons é pequena demais para manter a estabilidade, e tem um excesso de prótons. Assim, há a emissão de um pósitron, a antipartícula do elétrons, idêntica ao elétron, porém, com carga positiva. Logo, o processo de **decaimento beta positivo** (β^+) pode ser expresso pela seguinte equação:



onde β^+ é um pósitron e ν_e é o neutrino do elétron.

O único emissor β^+ natural conhecido é o ^{40}K que também pode decair por emissão de β^- e por captura eletrônica, e isso é notável.

Nesse tipo de decaimento N aumenta 1, Z diminui 1 e A não varia.

O terceiro tipo de decaimento beta a **captura de elétrons** ocorre geralmente quando a emissão de β^+ não é energeticamente possível, mas um elétron orbital (geralmente na camada K e em alguns casos na camada L) pode se combinar com um próton do núcleo dando origem a um nêutron e um neutrino. De modo que o nêutron permanece no núcleo e o neutrino é emitido. Logo, o processo de captura de elétrons pode ser expresso pela seguinte equação:



Nesse tipo de decaimento N aumenta 1, Z diminui 1 e A não varia.

Ainda devemos observar que os elétrons e os pósitrons não podem existir dentro do núcleo antes de um decaimento, assim como os fótons são criados quando um átomo sofre transição para um estado de menor energia, essas partículas são criadas pela conversão de energia em massa, durante o processo de decaimento. Outro ponto importante é que para explicar o decaimento beta, temos que admitir a existência de um novo tipo de interação. E como o tempo de vida associado ao decaimento beta é muito maior que o tempo característico dos fenômenos nucleares, precisamos de uma interação que deve agir durante um longo tempo para produzir o decaimento. E assim, observamos uma interação mais fraca que a

³ Os léptons podem ser melhor compreendidos no estudo de Física de Partículas.

interação entre os núcleons, sendo denominada de *interação fraca*⁴. Existindo, portanto, duas interações nucleares distintas: a interação forte e a interação fraca. Ambas são de curto alcance.

Decaimento gama

Um núcleo típico apresenta um conjunto de níveis de energia, um estado fundamental (estado de mais baixa energia) assim como diversos estados excitados. No decaimento gama (γ) um núcleo no estado excitado decai para um estado de menor energia do mesmo isótopo por emissão de um fóton, também conhecido como **raios gama**. É muito comum estar associada a um decaimento que levou o isótopo do decaimento para um estado excitado, e o mesmo emite raios gama para ir para o estado fundamental. Vejamos o exemplo das partículas alfa emitidas pelo rádio ^{226}Ra que quando decai para o radônio ^{222}Rn têm energias de ligação correspondentes de 4,871 MeV e 4,685 MeV. Quando ocorre a emissão da partícula alfa com menor energia, o núcleo do ^{222}Rn passa para um estado excitado. Em seguida, ele decai para o estado fundamental emitindo um raio gama. Podemos observar esse processo na figura 3-c.

Um detalhe que é interessante a ser comentado é quando um processo de decaimento produz um núcleo no estado excitado uma alternativa para a emissão de raios gama é o processo de conversão interna, que a energia em excesso no núcleo é transferida para um elétron orbital, que está na camada K ou camada L, e sendo ejetado do átomo.

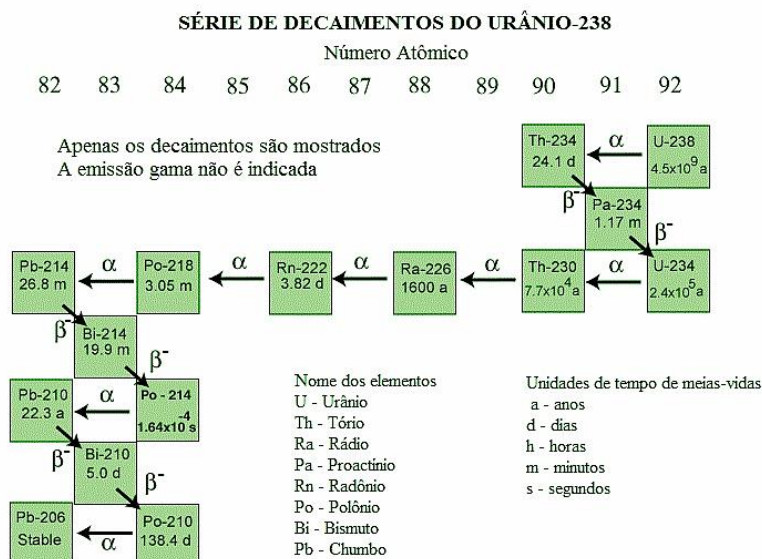
Portanto, nos decaimentos α e β , o valor de Z varia e o núcleo de um elemento se transforma no núcleo de outro elemento diferente. Já no decaimento γ o elemento não se transforma, apenas passa de um estado mais excitado para um estado menos excitado. Outra observação é a respeito do poder de penetração dessas partículas, no caso das partículas alfa tem curto alcance, devido as colisões, viajando poucos centímetros no ar ou décimos de milímetros no interior de um sólido, sendo barradas por uma folha de papel. Já as partículas beta tem um poder de penetração muito maior que as partículas alfa, quando passam por um meio material perdem energia, podendo, ionizar os átomos que encontrar pelo caminho, podendo ser barradas por um tronco de madeira, por exemplo. Enquanto que os raios gama tem alto poder de penetração e quando atravessam um composto, ioniza os átomos que encontrar pelo caminho sendo barradas por uma parede de concreto, por exemplo.

Radioatividade Natural

Observando o processo da radioatividade, o núcleo original que sofre o decaimento é chamado de núcleo-pai e o núcleo resultante do decaimento é chamado núcleo-filho. E quando ocorre o decaimento o núcleo-filho também pode ser instável. Nesse caso, ocorre uma série de decaimentos sucessivos até chegar em uma configuração estável. Muitas séries de decaimento são conhecidas, vamos destacar uma que acontece na natureza, começando pelo isótopo comum do ^{238}U e terminando com o ^{206}Pb , vejamos esse processo na figura 4:

⁴ A interação fraca pode ser melhor compreendida no estudo de Física de Partículas.

Figura 4 – Série de decaimentos do ^{238}U



Fonte: Autoria própria.

Assim observamos a série de decaimentos que o ^{238}U sofre até se transformar no elemento final da série que é o nuclídeo ^{206}Pb , que é estável. Os tempos são dados em meias-vidas, que será discutido na próxima seção.

3.4 Atividade e Meia-Vida

Foi observado que a taxa de emissão da radiação por parte de uma amostra de uma substância radioativa não é constante, mas diminui exponencialmente com o tempo. Essa variação exponencial com o tempo é uma característica dos fenômenos que envolvem a radioatividade evidenciando se tratar de um processo estatístico.

No caso de um decaimento estatístico (no qual o decaimento de um núcleo em particular é um evento aleatório) o número de núcleos que decaem em um intervalo de tempo dt é proporcional a dt e o número de núcleons presentes. Se $N(t)$ é o número de núcleos radioativos no instante t , podemos definir $-dN$ o número de núcleos que decaem no intervalo dt (o sinal negativo é necessário, pois N diminui), temos [8]:

$$-dN = \lambda N dt \quad (3.8)$$

onde a constante λ é conhecida como constante de decaimento, podendo ainda ser interpretada como a probabilidade por unidade de tempo para que um dos núcleos sofra decaimento. A solução da equação (3.8), é [8]:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3.9)$$

onde N_0 é o número de núcleos no instante $t = 0$.

Fazendo uma relação entre a eq. (3.8) e a eq. (3.9) podemos definir a **taxa de decaimento** ou **atividade** da amostra, assim temos [8]:

$$R = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\lambda t} \quad (3.10)$$

Note que tanto o número de núcleos quanto a atividade diminuem exponencialmente com o tempo. É a diminuição da atividade que é medida experimentalmente.

Podemos definir a **meia-vida** $T_{1/2}$ que é o tempo necessário para que o número de núcleos radioativos iniciais N_0 se reduza pela metade. Através da eq. (3.9), assim [8]:

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad \text{ou} \quad e^{\lambda t_{1/2}} = 2$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (3.11)$$

Após um intervalo de uma meia-vida, tanto o número de núcleos que restam na amostra quanto a atividade se reduziram a metade do valor inicial. E esse processo pode ser sucessivo, por exemplo, na medida que a atividade inicial R_0 decai para $R_0/2$ após uma meia-vida, $R_0/4$ após transcorrido duas meia-vidas, e assim por diante.

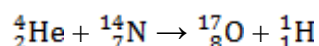
O tempo de vida médio $T_{\text{méd}}$ de um núcleo ou partícula instável, geralmente chamado de **vida-média** sendo proporcional a meia-vida é [8]:

$$T_{\text{méd}} = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} = \frac{T_{1/2}}{0,693} \quad (3.12)$$

Assim, podemos estabelecer a relação entre a radioatividade e o tempo.

3.5 Reações Nucleares

Conforme vimos anteriormente, o decaimento de núcleos instáveis através da emissão de partículas α ou β , algumas vezes com emissão γ , que aconteciam espontaneamente, ou seja, sem provocarmos o seu início ou controlarmos, em um processo que ocorre naturalmente. Agora, estudaremos o processo de radioatividade artificial, em que ocorrem reações nucleares, rearranjo dos constituintes do núcleo provocadas por colisões forçadas feitas por bombardeamento de partículas. Caso a energia seja um valor adequado a partícula penetra o núcleo bombardeado formando um novo núcleo. Um exemplo clássico, foi a realização de Rutherford ao bombardear o nitrogênio ^{14}N com partículas α e obter um núcleo de oxigênio ^{17}O e um próton, conforme vemos o processo:



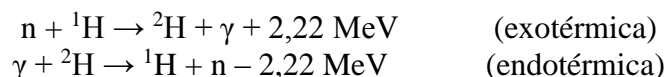
Onde Rutherford usou partículas alfa provenientes de fontes radioativas naturais.

Todos os processos de reações nucleares obedecem as leis de conservação. Quando dois núcleos interagem a conservação da carga exige que a soma dos números atômicos antes da interação seja o mesmo que a soma dos números atômicos depois que ela ocorre. Pela lei de conservação do número de núcleons, a soma dos números de massa antes é igual à soma dos números de massa depois da reação. Porém, em geral, como a colisão envolvida não é elástica, a massa total inicial não é a mesma da massa total final.

Isso é caracterizado pela **energia da reação** que é dada pela diferença entre as massas antes e depois da reação, obtida de acordo com a relação massa-energia, $E = mc^2$. De modo que, quando partículas iniciais A e B interagem e formam partículas finais C e D, a energia da reação Q é dada por [7]:

$$Q = (M_A + M_B - M_C - M_D) c^2 \quad (3.13)$$

É observado que quando Q é positivo, a massa total diminui e a energia cinética aumenta, sendo conhecida como reação exotérmica ou exoenergética. E quando o Q é negativo, a massa total aumenta e a energia cinética diminui, sendo conhecida como reação endotérmica ou endoenergética. Para o caso da reação endoenergética, a reação só pode ocorrer quando a energia cinética inicial no sistema de referência do centro de massa é maior do que $|Q|$. Logo, nesse caso existe uma energia limite, ou seja, uma energia cinética mínima para que uma reação endotérmica se desencadeie. Vejamos dois exemplos desses tipos de reação:

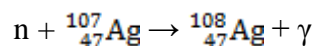


Para uma partícula carregada, tal como um próton ou uma partícula α , poder penetrar no núcleo de outro átomo e produzir uma reação, ela deve ter, geralmente, energia cinética suficiente para vencer a barreira de energia potencial produzida pelas forças eletrostáticas.

Absorção de nêutrons

A absorção de nêutrons pelos núcleos é uma parte bastante importante das reações nucleares. Núcleos pesados quando bombardeados por nêutrons em uma reação nuclear podem absorver os nêutrons e sofrerem processos de decaimento. É importante destacar que alguns *elementos transurânicos*, aqueles que possuem Z maior que 92, são produzidos através desse processo. Sendo que esses elementos não foram encontrados na natureza, sendo muitos identificados em laboratório.

Vamos analisar o seguinte exemplo, quando um nêutron de baixa energia colide com um núcleo, a reação mais provável é a captura, seguida da emissão de um raio γ pelo nuclídeo excitado,



E como a energia de ligação de um nêutron é da ordem de 6 a 10 MeV, muito maior que a energia cinética do nêutron, a energia de excitação do núcleo composto também é da ordem de 6 a 10 MeV, e esta energia é liberada na forma de raios γ .

A técnica analítica chamada de análise de ativação de nêutrons tem um processo de reação similar. Quando bombardeados por nêutrons muitos nuclídeos absorvem um nêutron se tornando instáveis e, em seguida, sofrem um decaimento β^- . As energias das emissões β^- e γ depende do nuclídeo instável e fornecem um meio de identificá-lo, assim como, identificar o nuclídeo estável original.

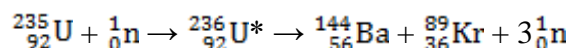
Ainda temos outros dois processos de reações nucleares de grande importância, que são a fissão e a fusão nuclear.

3.6 Fissão Nuclear

A **fissão nuclear** é um processo de decaimento no qual um núcleo instável se divide em dois fragmentos de massas comparáveis. Nesse processo os dois fragmentos de massa são chamados fragmentos de fissão e juntamente com eles, geralmente, aparecem dois ou três nêutrons livres e em raras ocasiões um nuclídeo leve tal como o ${}^3\text{H}$.

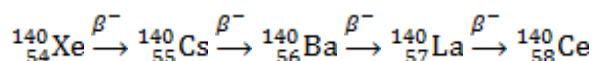
A fissão produzida pela absorção de nêutrons é chamada de fissão induzida. Entretanto, alguns nuclídeos podem sofrer uma fissão espontânea sem absorção inicial de nêutrons, mas sendo bastante raro. Vamos analisar o exemplo do urânio, que tem um isótopo

comum ^{238}U (99,3%) e um isótopo incomum ^{235}U (0,7%) ambos podem ser divididos através de um bombardeio de nêutrons. Quando o ^{235}U absorve um nêutron, o nuclídeo $^{236}\text{U}^*$ resultante está em um estado altamente excitado e quase que instantaneamente se divide em dois fragmentos. O processo de fissão obedece as leis de conservação da carga e do número de núcleon. Vamos analisar um exemplo a seguir:



A maioria dos fragmentos da fissão tem número de massa compreendidos entre 90 e 100 e entre 135 e 145, sendo dois fragmentos com massas aproximadamente iguais pouco provável.

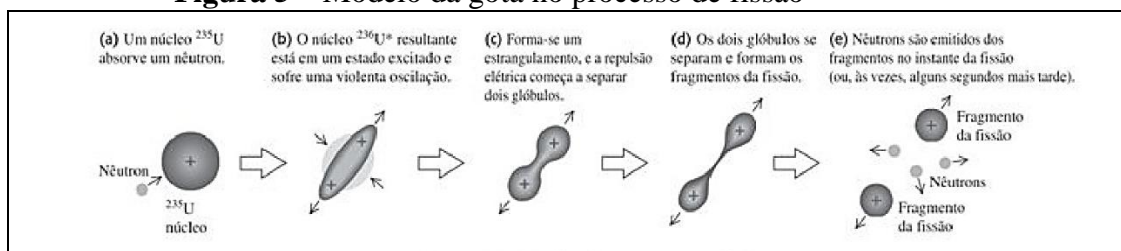
A energia cinética total dos fragmentos da fissão é enorme, e está diretamente relacionado a energia de ligação do núcleo. Os fragmentos da fissão sempre possuem nêutrons demais para se manterem estáveis, e em geral, eles respondem a esse excesso de nêutrons sofrendo uma série de decaimentos β^- (onde Z aumenta 1 e N diminui 1) até chegar em um valor estável para a razão N/Z. Vamos analisar um exemplo típico:



Onde o nuclídeo ^{140}Ce é estável. E nessa série de decaimentos β^- é produzida ainda mais energia cinética adicional ao processo de fissão. O excesso de nêutrons dos fragmentos da fissão também explica o motivo de termos dois ou três nêutrons livres sendo liberados durante a fissão.

Usando o modelo da gota podemos analisar como o processo de fissão ocorre. Na figura 5, é indicado esse processo com base em uma gota de carga elétrica. Lembrando que essa é uma ilustração para entender o processo.

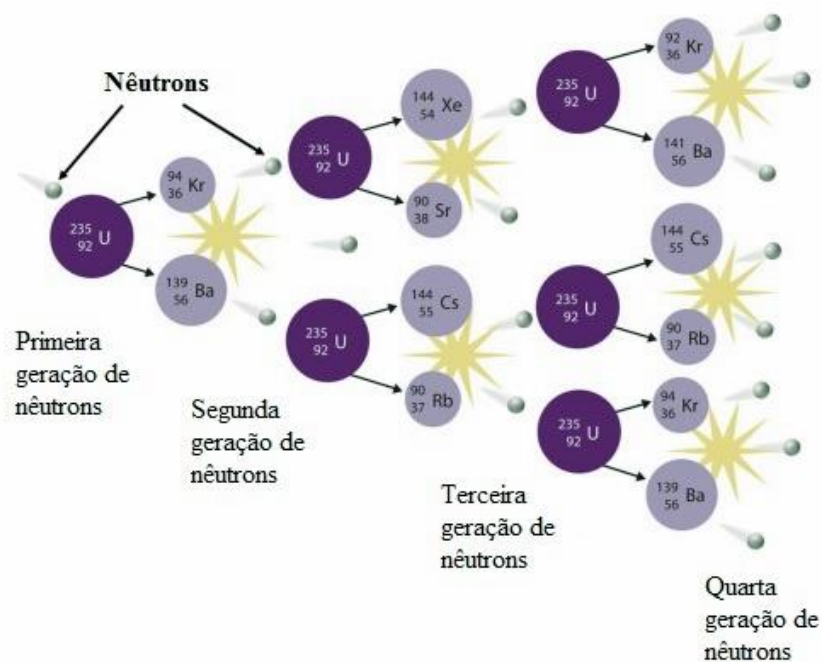
Figura 5 – Modelo da gota no processo de fissão



Fonte: Referência [7].

Outro ponto importante de destacar é a **reação em cadeia**. Em uma fissão de urânio, desencadeada pelo bombardeio com nêutrons, há a liberação de nêutrons livres que podem desencadear outras fissões, promovendo o que se chama de reação em cadeia. Esse processo pode ser lento e controlado como em um reator nuclear ou pode ser explosivo como uma bomba atômica. Vejamos esse processo na figura 6:

Figura 6 – Diagrama esquemático da reação em cadeia de uma fissão nuclear

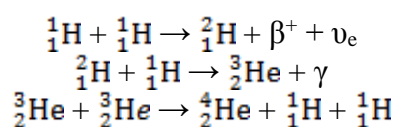


Fonte: Autoria própria.

Observe que a cada geração a quantidade de nêutrons aumenta, provocando as reações de fissão em uma quantidade maior que a anterior. Por isso em um reator de fissão é essencial ter um controle da reação com o moderador de nêutrons.

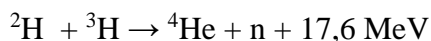
3.7 Fusão Nuclear

A **fusão nuclear** é um processo em que dois ou mais pequenos núcleos leves se aglutinam, ou se fundem, formando um núcleo maior. As reações de fusão liberam energia pelo mesmo princípio das reações de fissão, ou seja, a energia de ligação por núcleon depois da reação é maior do que antes. Além de ser observado que a massa total dos produtos é menor que a massa total das partículas iniciais. Vejamos três exemplos de reações de fusão que liberam energia, escrita em função dos átomos neutros:



Onde, na primeira reação, dois prótons se combinam e formam um dêuteron (${}^2\text{H}$), com emissão de um próton, de um pósitron (β^+) e de um neutrino do elétron. Na segunda, um dêuteron se combina com um próton e formam um núcleo do isótopo leve de hélio, com emissão de um raio gama. E na terceira, dois núcleos do isótopo leve de hélio se combinam formando uma partícula alfa (${}^4\text{He}$) e dois prótons. O conjunto dessas reações de fusão constitui um processo que se chama de *cadeia próton-próton*. Observando que elas acontecem uma seguida da outra com liberação de energia nesses processos.

Agora, vamos analisar um outro exemplo, uma reação típica de fusão de dois núcleos leves como o deutério (${}^2\text{H}$) e o trítio (${}^3\text{H}$) que se fundem para formar um núcleo mais pesado:



O que foi observado é que a reação de fusão libera muito mais energia que a reação de fissão. O combustível necessário para fazer fusão é muito abundante. Porém, ainda falta tecnologia para fazer da fusão nuclear uma fonte usual de energia pelas condições que ela exige.

Para que dois núcleos sofram fusão é necessário fazer eles se aproximarem, porém pela repulsão eletrostática os núcleos tendem a se afastarem, mas se conseguirem se aproximar o suficiente para o alcance que predominam as forças nucleares a fusão pode ocorrer, mas para isso é preciso eles terem uma energia cinética muito elevada, da ordem de 1 MeV. Para se obter energias dessa ordem de grandeza existem duas formas que se destacam, a primeira é através de um acelerador de partículas, entretanto, nesse procedimento é muito mais provável que aconteça o espalhamento do que a fusão, além disso o bombardeio de um núcleo por outro em um acelerador acaba consumindo mais energia do que produzindo. Assim, o procedimento mais apropriado para obter energia através da fusão é aumentando a temperatura dos núcleos, o suficiente para que as reações de fusão ocorram em consequência de colisões aleatórias. Para se obter um número adequado de reações de fusão e contando que a concentração de partículas não seja muito baixa, a temperatura tem que ser da ordem de 10^8 K. Temperaturas dessa ordem são encontradas no interior das estrelas, onde as reações de fusão são mais comuns de acontecerem. Nessas temperaturas, a matéria existe na forma de um gás de elétrons livres e íons positivos chamados de *plasma*. Contudo, um dos maiores problemas dos reatores de fusão são em manter o plasma por um tempo suficiente para que as reações aconteçam. No interior de uma estrela como o Sol, por exemplo, o plasma é confinado pelo seu enorme campo gravitacional. Porém, na Terra, o confinamento é um problema difícil de resolver.

Tendo em vista a análise dos reatores de fusão, o físico inglês J. D. Lawson, em 1957, realizando estimativas sobre a eficiência de vários reatores de fusão hipotéticos chegou a uma relação entre a concentração e o tempo de confinamento, ficando conhecido como critério de Lawson:

$$n \tau > 10^{20} \text{ s} \cdot \text{partícula/m}^3$$

Se o critério de Lawson é alcançado a uma pequena margem, a energia térmica dos íons é suficiente para que as reações de fusão aconteçam e, a energia produzida pelo reator de fusão é igual a energia necessária para fazê-lo funcionar, é quando se chega ao que é chamado de ponto de equilíbrio. Evidentemente, que para um reator de fusão seja comercialmente viável a energia produzida tem que ser um valor muito maior que esse.

Dois métodos estão sendo bastante investigados atualmente para se conseguir o processo de confinamento do plasma. O primeiro, pelo *confinamento magnético*, onde um campo magnético é usado para confinar o plasma. Este método será melhor descrito no próximo capítulo, onde será abordada a produção de energia a partir da fusão nuclear.

O segundo método, é o *confinamento inercial*, onde uma bolinha contendo uma mistura de deutério e trítio congelados é bombardeada por todas as direções por pulsos de laser com energia da ordem de 10^6 J e uma duração menor que 10^{-8} s. Ainda pode ser utilizado íons e elétrons no lugar de pulsos luminosos. Através de simulações em computador, o momento transferido para os núcleos de hidrogênio pode ser suficiente para fazer a com que a densidade da bolinha aumente para um valor de 10000 vezes maior que o normal e a temperatura aumente para um valor maior que 10^8 K. Assim, seria possível produzir cerca de 10^6 J de energia de fusão em 10^{-10} s, sendo um intervalo de tempo tão curto que a própria inércia já seria o suficiente para manter o confinamento do plasma. E em teoria, depois que o pulso de energia de fusão fosse absorvido por um fluido de transferência de calor, como o lítio

líquido, outra bolinha seria injetada na confluência dos pulsos e o processo poderia ser repetido diversas vezes.

Depois de termos estudado os fundamentos físicos da radioatividade será apresentando algumas das aplicações realizadas através dos conhecimentos sobre a radioatividade que tiveram grande impacto na sociedade.

4 APLICAÇÕES

A radioatividade é uma área que abrange diversos campos da atividade humana, onde destacam-se as linhas de pesquisa básica nas áreas de Física, Química, Biologia e Geologia, assim como as aplicações tecnológicas em usinas de produção de energia, na indústria, na agricultura, na medicina, etc. Tendo em vista isso, nesse capítulo abordaremos brevemente as principais aplicações que observamos na sociedade, sendo: o uso na medicina, na produção de energia, no uso militar e na datação radioativa.

4.1 Radioatividade na Medicina

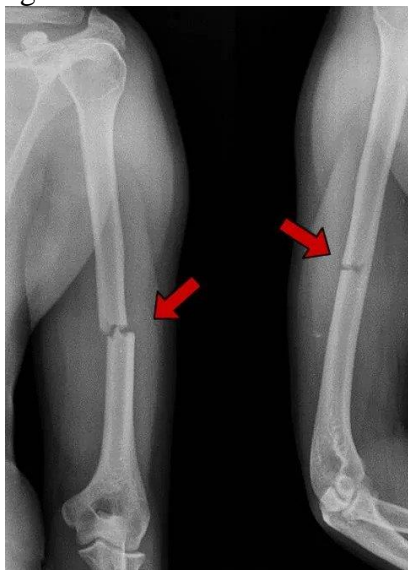
Na medicina, a radioatividade é empregada com a finalidade de diagnóstico e terapia, por existirem diversas vertentes dentro da medicina vamos abordar apenas as aplicações mais básicas que possibilitaram vários diagnósticos, tratamentos de câncer e de outras doenças.

Radiologia

A **radiografia** causou um grande impacto desde a sua descoberta feita por Röntgen, e rapidamente já foi sendo utilizada na medicina, sendo considerada uma das técnicas de maior importância na história da medicina. Conforme, a tecnologia foi avançando os aparelhos de radiografia foram sendo aprimorados, mas o seu funcionamento básico ainda continua sendo o mesmo. A geração controlada de raios X é feita através do bombardeamento de uma superfície metálica por um feixe de elétrons. No caso de aparelhos que geram imagens diagnósticas, o feixe de raios X é feita utilizando um tubo do tipo Coolidge, o tubo de raios X, que é o dispositivo que realiza a transformação da energia elétrica em radiação eletromagnética, sendo constituído de uma ampola de vidro a vácuo com dois eletrodos. O tubo, ao ser alimentado por energia elétrica em corrente contínua e alta tensão, produz uma corrente eletrônica que sai de um dos eletrodos e colide com o outro gerando radiação eletromagnética e calor. A quantidade de raios X produzidos em um tubo depende do número de elétrons que saem do eletrodo que libera os elétrons, sendo assim, o controle é feito a partir da fonte fornecedora de energia elétrica [10].

Durante o exame radiográfico, os raios X interagem com os tecidos do corpo humano, a densidade e a composição de cada área determina a quantidade de absorção dessa radiação. De modo que, os raios X quando emitidos por um feixe, atingem em uma região bem definida do corpo, atravessando os tecidos dessa região e depois sendo capturados por um detector (pode ser um filme fotográfico ou um detector digital), produzindo uma representação em duas dimensões de todas as estruturas superpostas. Pode-se distinguir as estruturas e tecidos na imagem revelada, pois os tecidos mostram tonalidades diferentes na escala de cor cinza, conforme a densidade, os tecidos apresentam cores diferentes numa radiografia. Podemos observar isso na figura 7, que vemos a seguir.

Figura 7 – Radiografia de uma fratura no úmero (osso do braço)

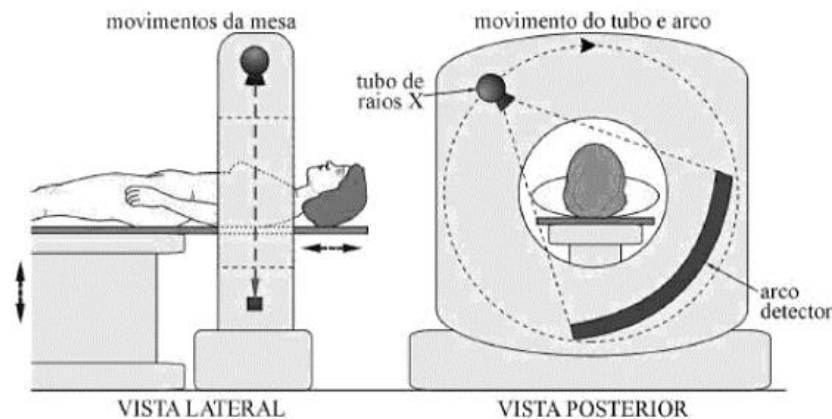


Fonte: Referência [11].

A radiografia dos ossos é a forma mais comum a ser usada, detecta fraturas, tumores, distúrbios de crescimento e desvios na postura dos ossos. O uso da radiografia nos pulmões possibilita o diagnóstico da pneumonia e do câncer. Em ferimentos causados por armas de fogo, a radiografia é capaz de localizar o projétil dentro do corpo da pessoa, possibilitando uma remoção mais eficiente do projétil. Ainda pode ser utilizada para detecção de cáries nos dentes, a falta de minerais no ossos, que causam a osteoporose, entre outras. É importante destacar que como as radiografias são uma emissão de radiação é necessário seguir determinados procedimentos de segurança, para que uma técnica muito importante como esta seja usada de forma benéfica para a sociedade. Logo, além de ser um meio que revolucionou a medicina ainda possibilitou o surgimento de outras tecnologias.

A **tomografia computadorizada** é uma das tecnologias que avançaram a partir da radiografia. O seu funcionamento é a base dos raios X, mas os aparelhos tem características que melhoraram a qualidade das imagens do interior do corpo em relação as radiografias. Assim, na tomografia computadorizada a pessoa é colocada em uma mesa que se movimenta para o interior de um anel, e o mesmo tem um tubo de raios X, que emitem radiação enquanto se move em círculo ou semicírculo, envolta do paciente. Do lado oposto ao tubo encontra-se o detector que capta essa radiação que passa pelo paciente, fazendo fatias da região que foi planejada para realização da tomografia [12]. Podemos entender melhor esses detalhes na figura 8, que veremos a seguir.

Figura 8 – Posicionamento de um paciente em um aparelho de tomografia computadorizada, vista lateral com deslocamentos da mesa e vista posterior com movimento giratório do tubo de raios X em torno do paciente



Fonte: Referência [12].

Os dados coletados por esses detectores são convertidos em sinal digital e enviados ao computador, que processa e reconstrói esses dados na forma de imagens. As imagens também mostram os tecidos em uma escala cinza de cores tendo uma grande variedade de acordo com cada tecido. Inclusive, podemos ter a geração de imagens em 3D, através da sobreposição dos cortes. E assim, temos imagens que a percepção espacial é mais nítida e que permite distinguir tecidos diferentes, se mostrando melhor que a radiografia convencional, entretanto este procedimento emite mais radiação que a radiografia convencional, mesmo que seja um valor considerado baixo, deve-se ter cuidados com sua utilização.

A terceira técnica para diagnóstico por imagem é através da **Ressonância Magnética**, conhecida como Imagem de Ressonância Magnética (MRI, sigla em inglês de Magnetic Resonance Imaging). Nessa técnica é possível ver com muito mais detalhes os tecidos internos do corpo humano. O seu funcionamento ocorre da seguinte forma, o aparelho de ressonância magnética usa campos magnéticos fortes, emissões de ondas de rádio e gradientes de campo para gerar imagens dos órgãos do corpo. Ao contrário da tomografia computadorizada, a ressonância magnética não usa os raios X, mas baseia-se no fato de determinados núcleos atômicos serem capazes de absorver e emitir energias de frequências de rádio quando induzidas por um campo magnético externo. E para o corpo humano, o átomo escolhido é o hidrogênio, por ser um elemento com grande abundância na composição do mesmo e sua estrutura simples (com um próton apenas). Assim, a energia de um campo magnético oscilante temporariamente é aplicado no paciente, em uma frequência de rádio específica. Na sequência, os átomos de hidrogênio excitados emitem um sinal de radiofrequência, sendo medido por uma bobina receptora. O contraste entre os diferentes tecidos é determinado pela taxa em que os átomos excitados retornam para o estado de equilíbrio. Através desse processo é possível visualizar as imagens que são processadas e codificadas por um computador. Na maioria dos aparelhos são usados campos magnéticos muito fortes com intensidade, medida em teslas, de 1,5 T [10]. Podemos observar este aparelho na figura 9, vejamos abaixo:

Figura 9 – Sessão de Ressonância Magnética



Fonte: Referência [13].

É importante observar que pessoas com implantes médicos com metal não removível dentro do corpo são incapazes de se submeter aos exames de ressonância magnética de forma segura. Além disso, essa técnica leva mais tempo que uma tomografia computadorizada e em um ambiente estreito que o paciente fica confinado, podendo ser desconfortável. Mas, é um processo que não há exposição à radiação ionizante. Logo, é uma ferramenta muito útil, mas deve-se ter cuidados em relação a sua utilização.

Radioterapia e Medicina Nuclear

A **radioterapia** é um tratamento que utiliza radiação ionizante para combater tumores, em que as células constituintes do tumor são destruídas pela absorção da energia da radiação. Podendo ser feitas de duas formas, a primeira é a **braquiterapia** que é uma terapia em que materiais radioativos são inseridos dentro do corpo do paciente, em um local bem definido, de forma temporária ou permanente. Geralmente, tem formas de semente ou cápsulas, sendo que essas cápsulas impedem que o material radioativo entre em contato com os tecidos do corpo do paciente, liberando gradualmente radiação em uma região bem definida do corpo. O segundo, é a **radioterapia externa** ou **teleterapia**, que é a terapia no qual o paciente recebe radiação ionizante de uma fonte externa, a uma distância de 30 à 150 cm. A fonte de radiação pode ser proveniente de dois meios diferentes, a partir de radioisótopos como o cobalto-60, ou através de aceleradores de partículas que geram raios X [10].

Por ser um tratamento feito com radiação ionizante, deve-se levar em consideração que esse tratamento deve superar os efeitos colaterais, sendo uma terapia bastante agressiva, mas que já contribui bastante nos tratamentos de câncer.

A **medicina nuclear** é definida como a especialidade médica que usa materiais radioativos com finalidade de diagnóstico ou tratamento. Mais especificamente, são utilizados radiofármacos. Na medicina nuclear diagnóstica, os radiofármacos entram no corpo do paciente por inalação, injeção ou ingestão; e funcionam basicamente como marcadores, pois estes radiofármacos produzem raios gama que podem chegar a detectores externos, fornecendo informações de como está o funcionamento de determinado órgão. Já na medicina nuclear terapêutica, os radiofármacos são usados para o tratamento de tumores, como o tumor de tireoide em que é empregado o radioisótopo iodo-131, a características desses radiofármacos é que eles possuem uma atividade maior e podem tratar um órgão específico [14].

Os radiofármacos possuem dois componentes essenciais, um rádionuclídeo que é responsável pela liberação da radiação, e uma molécula orgânica que se liga em um determinado tecido ou órgão. A importância dos radiofármacos é por eles, apesar de serem radioativos, possuírem meias-vidas relativamente curtas, alguns com meias-vidas de horas ou dias, o iodo-131, por exemplo, tem meia-vida de 8 dias. Além de ser um meio que durante o diagnóstico e o tratamento, o paciente tem uma menor exposição à radiação do que em uma radiografia [14].

4.2 Energia Nuclear

Atualmente, existem duas formas de produção de energia nuclear conhecidas sendo por fissão e por fusão. Vamos abordar cada uma a seguir.

Energia Nuclear por Fissão

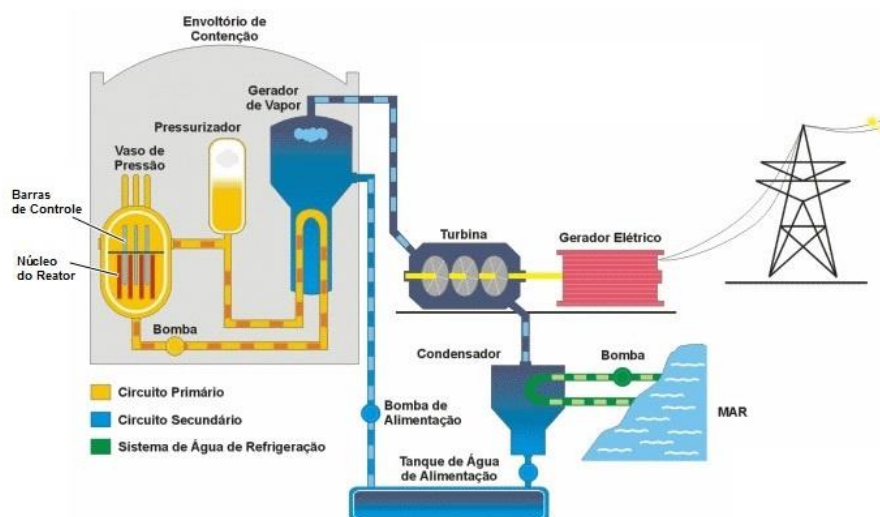
É a forma de produção de energia nuclear que é usada comercialmente em vários países do mundo, o surgimento dos reatores de fissão, para produção de energia, aconteceu logo após a Segunda Guerra Mundial, onde alguns países investiram em programas para geração de energia a partir da fissão. Desde o seu surgimento até os modelos usados recentemente houve uma evolução, principalmente, nos mecanismos de segurança.

A produção da energia nuclear por fissão é feita em usinas nucleares ou centros nucleares, que funcionam a base de um reator nuclear que é simplesmente uma câmara blindada de radiação onde ocorre uma reação nuclear em cadeia mantida sob controle para liberar energia. Embora existam reatores com características diferentes no seu funcionamento, vamos abordar apenas o modelo mais comum usado atualmente e o modelo RBMK⁵ que foi usado na usina nuclear de Chernobyl, na Ucrânia.

No modelo de reator mais comum, temos uma câmara onde ficam o núcleo do reator, que é composto pelo combustível, em sua maior utilização é com ^{235}U , que a partir da absorção de nêutrons inicia o processo de fissão, já descrito na seção 3.6. Para que a reação nuclear em cadeia esteja sob controle os nêutrons com energia elevada, liberados na fissão, são freados através de colisões com material circulante, chamado de *moderador*, que na maioria dos reatores atualmente é água. Nesse processo de reação nuclear há a liberação de muita energia, para este caso, muito calor que faz aquecer a água a altas temperaturas. Em contato com a câmara geradora de vapor, como o nome já diz é onde há a formação do vapor de água que faz as turbinas girarem, e sendo depois feita a conversão em energia elétrica através de um gerador. Por ser um sistema que trabalha com temperaturas muito elevadas, o sistema de refrigeração é fundamental para que o reator funcione adequadamente. Para segurança no processo de reação ainda existem as barras de controle, constituídas por boro ou cádmio, essas barras absorvem os nêutrons e conseqüentemente ajudam no controle da reação em cadeia. Contudo, a própria água funciona tanto como moderador quanto absorvedor de nêutrons sendo um elemento essencial para o funcionamento do reator nuclear em segurança [7]. Podemos observar mais detalhadamente na figura 10, que vemos a seguir.

⁵ Sigla em russo de “Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalnyy”, que em tradução livre significa “Reator Canalizado de Alta Potência”.

Figura 10 – Diagrama esquemático de uma usina nuclear que gera energia elétrica



Fonte: Autoria própria.

Por ter como fonte de combustível um material altamente radioativo, ser induzida uma reação nuclear em cadeia, com grande liberação de energia, existem um conjunto de procedimentos de segurança para que uma importante fonte de produção de energia não vire um grande problema.

Os reatores RBMK, usados na usina nuclear de Chernobyl, são reatores que são muito instáveis em baixos níveis de força. Uma série de fatores contribuíram para a explosão de um dos reatores nucleares de Chernobyl, que causou um dos maiores desastres nucleares da história. Contudo, foi um evento que proporcionou muitos conhecimentos acerca do funcionamento dos reatores nucleares e várias medidas de segurança foram estabelecidas depois desse ocorrido. Um dos problemas desses reatores começa já na estrutura na qual foi elaborado o modelo, que é a utilização de grafite como moderador, analisando o esquema que vimos na figura 10, que tem algumas semelhanças com o reator RBMK, o grafite era usado como moderador junto da água, e se o nível da água abaixar a reação ainda pode continuar acontecendo por causa do grafite. E nesses reatores uma das principais funções não era apenas a geração de energia, mas também a produção de um subproduto da fissão que é o plutônio, usado para armas nucleares. Assim, desde o modelo, um conjunto de decisões erradas, além dos problemas que o próprio reator já tinha acumulado, como o envenenamento por xenônio, contribuíram para essa tragédia que liberou radiação por diversos lugares do planeta, tornando a cidade de Pripyat, cidade onde a usina estava instalada, inabitável [15].

A energia nuclear é uma fonte de energia elétrica de muita importância na matriz energética de alguns países. Em 2019, por volta de 10% de toda a energia elétrica produzida no mundo foi através da energia nuclear. O país que teve a maior produção de energia nuclear, neste mesmo ano, foi os Estados Unidos com 809,4 TWh, mas em relação a toda a energia produzida no país esse número compreendeu 19,7%, sendo a maior parte da energia produzida através de combustíveis fósseis, principalmente, o carvão e o gás natural. Já a França, teve uma produção de 382,4 TWh, porém em relação a toda a energia produzida no país esse número corresponde a 70,6%, logo é visto de longe como o país que mais utiliza as

fontes nucleares como principal meio de produção de energia elétrica para abastecer o país. Todos esses dados apresentados podem ser vistos com mais detalhes na referência [16].

Entretanto, alguns países estão seguindo o caminho contrário, como a Alemanha que está com um programa para reduzir cada vez mais a produção da energia nuclear, optando por fontes renováveis como a energia solar e a energia eólica.

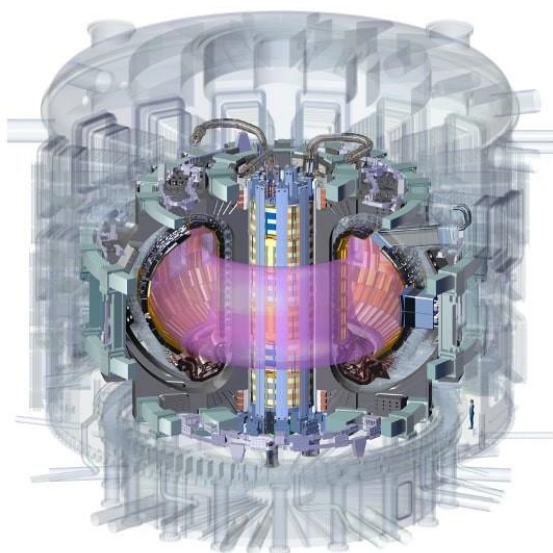
Contudo, a energia nuclear através da fissão é ainda mal vista, por causa dos desastres que aconteceram em reatores nucleares, expondo a região envolta a radiação, destacando os ocorridos em Chernobyl, em 1986, e em Fukushima, no Japão, em 2011. Outro grande problema associado a energia nuclear de fissão são os subprodutos da reação nuclear que ainda permanecem radioativos, tendo que ser armazenado em um local isolado da sociedade. Assim, outra forma de produção de energia nuclear está sendo desenvolvida que é a partir da fusão nuclear, que não traz esses problemas mencionados nos de fissão.

Energia Nuclear por Fusão

A energia nuclear por fusão ainda não tem funcionamento comercial, existem alguns projetos que foram desenvolvidos para estudos experimentais. Conforme já foi descrito como funciona a fusão nuclear e os problemas associados ao mesmo na seção 3.7, vamos abordar o confinamento magnético através do tokamak e os dois principais projetos que estão em desenvolvimento que são o projeto ITER, na França, e o projeto EAST, na China.

O tokamak⁶ é um sistema definido para confinar plasma de altas temperaturas no seu interior. A sua estrutura é formada por um grande toróide que produz um campo magnético intenso. Assim, o plasma fica confinado pela associação do campo magnético produzido pela corrente nos enrolamentos do toróide e o campo magnético produzido pelo movimento do próprio plasma [8]. Podemos observar sua estrutura na figura 11, que vemos abaixo.

Figura 11 – Reator experimental de fusão nuclear do ITER



Fonte: Referência [17].

Nesta ilustração observamos que o plasma está confinado dentro do toróide e em movimento. É um dos componentes da base do projeto ITER.

⁶ O termo tokamak vem de um acrônimo russo “тороидальная камера с магнитными катушками” que em tradução livre significa “câmara toroidal com bobinas magnéticas”.

O projeto ITER (sigla em inglês de International Thermonuclear Experimental Reactor) é um grande projeto de fusão nuclear que tem uma cooperação internacional de países, envolvendo a China, União Europeia, Índia, Japão, Coreia do Sul, Rússia e Estados Unidos, sob o patrocínio da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) [17].

Teve o início das atividades em 2007, e sua construção ainda se encontra em desenvolvimento, tendo a previsão da sua primeira operação em 2025. Entretanto, o funcionamento completo do reator está previsto para 2035, ou seja, um processo gradual para ir testando o seu funcionamento. O orçamento total do projeto está, atualmente, estimado em pouco mais de 20 bilhões de euros divididos entre os países membros. Embora a instalação seja na França, todos os países envolvidos terão direito aos dados obtidos nas pesquisas [17].

Na China, o EAST (sigla em inglês de Experimental Advanced Superconducting Tokamak), foi o primeiro tokamak a usar enrolamentos supercondutores, considerados fundamentais para produção contínua de energia, começou a operar em 2006, quando alcançou o primeiro plasma e desde então vem em contínua pesquisa e testes para aprimorar o seu funcionamento [8].

Algumas das características associadas a esses reatores de fusão é que o produto da reação é a liberação de hélio, um gás inerte. E a outra é que se não conseguir manter a reação de fusão o que acontece é que o plasma resfria e a reação para, ao contrário da reação de fissão que tem a reação em cadeia.

Quando olhamos em números, a energia produzida pela fissão de 1 kg de Urânio equivale a aproximadamente 3 milhões de vezes mais energia que a produção pela queima de 1 kg de carvão. Enquanto que a energia produzida a partir da fusão é 10 vezes maior que a produção através da fissão, ou seja, a fusão de 1 kg de hidrogênio libera 30 milhões de vezes a energia liberada pela queima de 1 kg de carvão. Isso é muita energia [18].

Assim, a fusão nuclear é uma forma muito promissora para se obter energia limpa e em grandes quantidades. Entretanto, temos que acompanhar como as pesquisas evoluem, e se será possível torná-la comercialmente viável.

4.3 Uso Militar

Embora a primeira utilização da radioatividade no ambiente militar tenha sido na Primeira Guerra Mundial, para uso médico como os aparelhos móveis de raios X, sendo promovidos por Marie Curie [19], as suas utilizações subsequentes não foram para tratamento de feridos, mas para utilização como armas nucleares. E quando se fala em radioatividade é muito fácil associá-la rapidamente as bombas nucleares usadas durante a Segunda Guerra Mundial. Porém, existe mais de um tipo de bomba nuclear, assim serão muito brevemente descritos quatro tipos diferentes para compreender-se o tipo de destruição que cada uma pode gerar.

O primeiro tipo de bomba nuclear é a **bomba de fissão**, que utiliza a fissão nuclear, onde os núcleos atômicos de elementos como o urânio-235 ou o plutônio se desintegram formando elementos mais leves quando bombardeados por nêutrons, conforme vimos na figura 6 da seção 3.6. Essa reação em cadeia gera uma enorme explosão, com liberação de muita energia e radiação.

O segundo tipo de bomba nuclear é a **bomba de fusão**, que usa a fusão nuclear, onde núcleos leves de hidrogênio e hélio combinam-se para formar elementos mais pesados. São também conhecidas como bombas de hidrogênio ou bombas-H. Para a fusão nuclear iniciar é preciso temperaturas muito elevadas, então essas bombas tem um sistema que inicia com a fissão nuclear que fornece essa temperatura necessária e depois começa a reação de fusão. Essas bombas de fusão liberam muita energia, sendo muito mais potente que as bombas de fissão [20].

O terceiro tipo é a **bomba suja** ou dirty bomb, conhecida por esse nome por ser uma arma radioativa, ou seja, uma bomba não nuclear que dispersa material radioativo que fica armazenado no seu interior. Quando explode, dispersa o material radioativo por toda a região a sua volta. E ao contrário das duas citadas anteriormente, essa tem o objetivo de contaminação radioativa de uma área e causar doenças por exposição à radiação nas pessoas. Essas bombas podem deixar uma área inabitável por décadas [21].

O quarto tipo é a **bomba de nêutrons**, que é uma variante da bomba atômica. Nessa bomba tem um dispositivo que faz com que os nêutrons liberados durante uma reação de fusão não sejam absorvidos no interior da bomba, permitindo que eles escapem. Com isso, é liberado uma grande quantidade de raios X e nêutrons de alta energia. Esses nêutrons são mais penetrantes que os raios gama, de modo que são eficientes para ultrapassar barreiras que bloqueiam a radiação gama. A característica das bombas de nêutrons é sua ação em destruir organismos vivos [22].

Entretanto, a bomba suja e a bomba de nêutrons nunca foram usadas. E as bombas de fusão nunca foram usadas em guerras, apenas em testes nucleares. Oficialmente, a bomba de fusão mais poderosa já testada foi a bomba conhecida como “Tsar Bomba”, em um teste realizado pela URSS (União Soviética) em 1961. O seu poder de destruição atingiu 57 Megatons, que equivale a 57 milhões de toneladas de TNT (trinitrotolueno). Embora tenha sido originalmente projetada para atingir 100 Megatons, o projeto reduziu o valor pela metade. Sendo, definida como uma bomba limpa, pois 97% da explosão foi a base de fusão nuclear, sua explosão aconteceu em uma região isolada da Rússia [23].

Apenas duas bombas nucleares foram utilizadas durante uma guerra, que foram as utilizadas pelos Estados Unidos para bombardear duas cidades japonesas no final da Segunda Guerra Mundial, elas eram bombas de fissão. Em 6 de agosto de 1945, uma bomba de fissão de urânio, nomeada de “Little Boy”, foi detonada na cidade japonesa de Hiroshima. A explosão teve uma força de 15 Kilotons, que equivale a 15 mil toneladas de TNT. A explosão causou uma onda de calor de mais de 4500°C em um raio de cerca de 4,5 km. A cidade foi devastada pela explosão e estima-se que entre 50 mil e 100 mil pessoas morreram no dia da explosão, a maioria civis. E em apenas três dias, em 9 de agosto, uma bomba de fissão de plutônio, nomeada de “Fat Man”, foi explodida na cidade japonesa de Nagasaki. O plutônio não era puro, mas ainda teve uma força de 21 Kilotons. A cidade também ficou devastada e estima-se que entre 28 mil e 49 mil pessoas tenham morrido no dia da explosão. Embora não tenha um número exato de quantas pessoas morreram no total existe uma estimativa que entre 100 mil a 210 mil pessoas morreram, em decorrência da explosão, dos ferimentos causados pela explosão e da radiação, sendo a maioria civis. Em 2 de setembro de 1945, o Japão se rendeu, e a Segunda Guerra Mundial chegou ao seu fim. Porém, os japoneses dessas regiões tiveram ainda que lidar com os efeitos da bomba atômica que são a explosão, a energia térmica (calor), a liberação de radiação (raios X, gama e nêutrons) e o pulso eletromagnético. Sendo que a exposição à radiação pode durar por décadas e provocar doenças [24].

Devido ao grande poder militar que estes tipos de armas pode gerar para quem possuir, o controle político das armas nucleares tem uma função muito importante. Devido a isso, foi formulado um acordo internacional, o Tratado de não proliferação de armas nucleares, também chamado de TNP, que foi aberto para assinatura em 1968 e entrou em vigor em 1970. Atualmente, conta com a adesão de 191 países [25]. Incluindo os cinco países dos quais reconhecem serem detentores de armas nucleares: Estados Unidos, Rússia, Reino Unido, França e China. Esses cinco países são detentores de 90% das armas nucleares, o restante sendo distribuído entre Índia, Paquistão, Coreia do Norte e Israel, que não são signatários do tratado. Observa-se que a União Soviética foi sucedida como potência nuclear pela Rússia. E, que embora Israel não tenha confirmado que desenvolve armas nucleares ele é creditado como um dos países que tem esse tipo de armamento [26].

4.4 Datação Radioativa

Uma aplicação muito interessante da radioatividade consiste na datação de amostras arqueológicas e geológicas baseado na concentração de isótopos radioativos. O exemplo mais comum é a datação por carbono. Onde o isótopo instável ^{14}C , produzidos por reações nucleares que ocorrem na atmosfera através das colisões com raios cósmicos, dá origem a uma pequena proporção de ^{14}C no CO_2 da atmosfera. As plantas que obtém o carbono desta fonte acabam absorvendo esse isótopo ficando com a mesma proporção da atmosfera. Quando a planta morre, ela deixa de absorver carbono e a concentração de ^{14}C sofre decaimento β^- transformando-se em ^{14}N com meia-vida igual a 5730 anos. Medindo a concentração de ^{14}C dos núcleos restantes, podemos determinar em que ano o organismo morreu [7].

E para os animais, esse processo ocorre devido a cadeia alimentar, ou seja, um herbívoro se alimenta da planta, um carnívoro do herbívoro; e essa concentração de ^{14}C no corpo se mantém conforme o organismo vivo se alimenta, logo, quando ele morre, ele deixa de absorver o isótopo e essa concentração apenas diminui pelo processo de decaimento. Outro detalhe muito importante é que a concentração de ^{14}C na atmosfera é constante ao longo do tempo, que possibilita a datação sabendo quanto é a concentração na atmosfera e a concentração no fóssil a ser datado, fazendo o cálculo de meia-vida [27].

Contudo, existe um limite para a datação de organismos vivos que é cerca de 10 meias-vidas, ou seja, algo entre 50 mil e 60 mil anos, depois disso acaba-se tendo um ruído muito grande e uma maior imprecisão dos pesquisadores. Assim, uma alternativa para fazer datações mais antigas é através da datação das rochas, pois é possível determinada a idade da rocha a partir da concentração de isótopos [27]. Entre, os processos radioativos para datação de rochas temos: $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ e a razão dupla $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$. O rubídio, Rb, por exemplo, tem uma meia-vida de aproximadamente 49 bilhões de anos até sofrer decaimento β^- para forma o estrôncio, Sr [8].

Assim, através da radioatividade podemos conhecer um pouco mais sobre a história e os seres que habitavam o nosso planeta no passado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Logo após a descoberta dos raios X e da radioatividade, houve uma grande utilização dos raios X e de materiais radioativos, acabou virando sinônimo de moda. Como o produto chamado “Radithor”, comercializado por volta de 1925 e 1930, era anunciado como um potente tônico para restaurar a energia sexual e a vitalidade, um composto a base de isótopos de rádio dissolvidos em água, acabou ganhando notoriedade pela utilização de um milionário americano chamado Eben Byers, que afirmou ter consumido o produto diariamente durante mais de um ano. Como consequência do consumo deste produto teve uma morte horrível, por um grande acúmulo de rádio nos ossos perdeu a mandíbula e teve a desintegração de alguns dos seus ossos [28].

Porém, esse não foi um caso isolado, houveram outros produtos como: um creme dental radioativo, cosméticos radioativos, chocolate que continha rádio e até um brinquedo chamado “Gilbert U-238 atomic energy lab”, um minilaboratório nuclear que continha amostras de urânio [29].

Não durou muito tempo para se perceber que os raios X e os materiais radioativos causavam efeitos nocivos ao corpo humano. E isso acontece por causa da radiação ionizante, que pode ser entendida como energia em trânsito, essa radiação tem o poder de arrancar elétrons dos elementos que encontrar pelo caminho, ou seja, quando passam por um meio material elas perdem energia, quebrando ligações químicas e produzindo íons. O efeito

também varia conforme a força de ligação entre os elétrons e o núcleo, no corpo humano a radiação ionizante que tem esse poder são os raios X e os raios gama. Nesse fenômeno de arrancar elétrons, causam problemas no corpo humano por quebrar ligações químicas de moléculas que estavam estáveis, inclusive os fragmentos dessas moléculas podem se ligar, formando uma nova molécula que não existia, podendo causar um grande problema. Entretanto, o principal problema está nos danos causados ao DNA, que podem ser diretas e indiretas. Nas diretas, acontece a quebra de ligações dos nucleotídeos que estruturam o DNA. Nas indiretas, reagem com a água contida no corpo, se tornando um componente reativo, com a liberação de radicais livres. Como consequência desse dano ao DNA, essas reações podem causar dois efeitos. O primeiro, são as reações teciduais, que causam a morte celular, que depende da quantidade de radiação absorvida, em doses altas ocorre a morte dos tecidos, em baixas doses a morte de células por necrose, e em intensas doses de radiação ocorre a síndrome aguda da radiação, que pode levar de horas até dias acontecendo a morte das células do corpo, foi o que ocorreu com os bombeiros do acidente de Chernobyl. O segundo, são as reações estocásticas, que ocorrem a longo prazo, tem como característica a mutação do DNA, que está diretamente ligado ao câncer. É visto como um processo estatístico, por ser um evento aleatório que depende da reprodução das células que sofrera mutação, assim pode se levar anos até o desenvolvimento de câncer. A leucemia, em média, leva oito anos entre a exposição e a detecção. Além do câncer, também existe o efeito hereditário, que foi observado em plantas e insetos que nas gerações posteriores aos que tiveram grande exposição à radiação sofreram mutações [30].

Contudo, isso é referente a grandes doses de radiação, a unidade de dose de radiação absorvida é o Gray (Gy). E para a exposição a 1 Gy, produziria efeitos leves de radiação em uma pessoa, sendo que 1 Gy equivaleria a aproximadamente 50 mil raios X do peito. De 3-5 Gy, produziria hemorragia e sintomas moderados, mas para doses de aproximadamente 10 Gy ou mais, causaria danos graves ao corpo, levando a morte. Entretanto, 10 Gy equivale a aproximadamente 500 mil raios X do peito. Mas, doses de 5 Gy já podem ser letais [30].

É perceptível que existem riscos com a utilização da radiatividade, mas ela também possibilitou vários benefícios, principalmente, na medicina, como vimos nas aplicações do capítulo anterior. E, neste caso, os benefícios superam os riscos. Além disso, temos um conhecimento muito maior da radioatividade atualmente do que tínhamos no início de 1900, existe nos hospitais o controle de qualidade dos equipamentos, assim como, o planejamento de qual procedimento utilizar para um diagnóstico ou tratamento. Em outras áreas como a produção de energia também existe um controle de qualidade e procedimentos de segurança. E, não se tem o uso de produtos com amostras significativas de materiais radioativos como se teve no passado.

Além disso, no corpo humano também se encontram elementos radioativos, provenientes do próprio ambiente, que na maioria das vezes acaba entrando no corpo através da alimentação, isótopos radioativos como o potássio, carbono e hidrogênio; que são indispensáveis para a matéria viva, que assim, naturalmente, a torna radioativa. Assim como elementos radioativos pesados como o chumbo, rádio, entre outros, que não tem papel na constituição do organismo, apenas se acumulam no corpo, trazendo prejuízos. O rádio, por exemplo, acaba se fixando nos ossos, por ter semelhança com o cálcio. Isso acaba nos mostrando que até mesmo no corpo humano encontramos a radioatividade [1].

6 CONCLUSÃO

Ao longo da história da radioatividade, desde suas primeiras descobertas, houveram muitos pesquisadores que contribuíram para o seu estudo. Desde a descoberta dos raios X,

que nas tentativas de descrever a natureza do fenômeno, assim como ele acontece, houveram muitas pesquisas que descreviam fenômenos, que pelo conhecimento que temos hoje, não deveriam ter ocorrido, sendo considerados casos anômalos. E, que apesar de Becquerel ter sido creditado como quem descobriu a radioatividade, quem realmente conseguiu descrever como esse fenômeno acontecia foram Marie Curie juntamente com seu marido Pierre Curie e, principalmente, o Ernest Rutherford com a colaboração de outros pesquisadores. Por se tratar de um fenômeno complexo suas descobertas aconteceram gradualmente, ao longo de décadas.

Os fundamentos que estruturam a radioatividade estão ligados, principalmente, a estabilidade dos núcleos. Em que, dos mais de 3000 núclídeos conhecidos apenas 257 são estáveis. Todos os outros sofrem processos de decaimentos para se tornarem estáveis, pois a natureza busca a estabilidade. E nesse processo, há a liberação de partículas alfa, beta, nêutrons, raios gama, de forma associada os raios X. Além da radioatividade que acontece naturalmente em compostos encontrados na natureza, também se desenvolveu a radioatividade artificial, no qual a partir de reações nucleares induzidas é possível formar novos núcleos. Através da radioatividade, foi possível conhecer melhor a estrutura dos átomos, além de proporcionar o surgimento de estudos em outras áreas como a Física de Partículas.

O seu estudo não ficou apenas no laboratório, mas foi consideravelmente utilizado em aplicações na sociedade, se destacando na medicina onde proporcionou o diagnóstico e tratamento de várias doenças, na produção de energia nuclear que abastece a matriz energética de vários países como a França, que 70,6% de toda energia produzida provem da energia nuclear; existindo ainda a possibilidade de se tornar uma fonte de energia limpa e em grande abundância através da fusão nuclear. É através da radioatividade que podemos identificar quando determinados fósseis, como humanos ou animais antigos, viveram em nosso planeta. Mas, também mostrou os perigos que ela pode trazer, como as armas nucleares que podem causar destruição em massa.

E o seu uso precisa ser com cuidado, pois alguns produtos que continham amostras de materiais radioativos foram comercializados e tidos como inofensivos a saúde. Contudo, sabemos os efeitos biológicos que a exposição à radiação pode trazer desde danos causados nos tecidos como queimaduras podendo levar a morte, além de estar associado ao desenvolvimento de câncer.

Então, a radioatividade acabou ficando conhecida através do mau uso dela, através de armas nucleares e de acidentes nucleares horríveis como o acontecido em Chernobyl, mas ela não se resume a isso, ela pode ter grandes utilizações na sociedade, na medicina os benefícios superam os riscos, para pessoa com câncer pode ser fundamental no seu tratamento. Esse estudo nos mostrou que temos um grande poder em nossas mãos, mas ele precisa ser utilizado de maneira correta e prudente, como seu uso na medicina que está literalmente salvando vidas.

REFERÊNCIAS

- [1] Brückmann, M. E.; Fries, S. G. Radioatividade. Porto Alegre: Instituto de Física – UFRGS, 1991.
- [2] Glasser, Otto. Wilhelm Conrad Röntgen and the Early History of Röntgen Rays. San Francisco: Norman Publishing, 1993.
- [3] Martins, Roberto de Andrade. A descoberta dos raios X: O primeiro comunicado de Röntgen. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.20, n. 4, p. 373-391, 1998.
- [4] Martins, Roberto de Andrade. Hipóteses e interpretação experimental: a conjectura de Poincaré e a descoberta da hiperfosforescência por Becquerel e Thompson. Ciência & Educação, v.10, n.4, p. 501-516, 2004.
- [5] Martins, Roberto de Andrade. Como Becquerel não descobriu a radioatividade. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 7, p. 27-45, 1990.
- [6] Martins, Roberto de Andrade. As primeiras investigações de Marie Curie sobre elementos radioativos. Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 29-41, 2003.
- [7] Young, H. D.; Freedman, R. A. Sears & Zemansky Física IV: ótica e física moderna. 12ª edição. São Paulo: Addison Wesley, 2009.
- [8] Tipler, P. A.; Llewellyn, R. A. Física Moderna. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- [9] Sardella, Antônio. Curso Completo de Química, Volume único. 3ª Edição. São Paulo: Editora Ática, 2002.
- [10] Mourão, A. P.; Oliveira, F. A. Fundamentos de Radiologia e Imagem. São Caetano do Sul, SP: Difusão Editora, 2009.
- [11] Fratura do úmero (fratura do braço) – diagnóstico, tratamento e cirurgia. In: Ortopedia e ombro. Disponível em: <<https://ortopediaeombro.com.br/fratura-do-umero-fratura-do-braco/>>. Acessado em 13 novembro 2020.
- [12] Mourão, A. P. Tomografia Computadorizada: tecnologias e aplicações. São Caetano do Sul, SP: Difusão Editora, 2017.
- [13] Ressonância Magnética. In: Cercil. Disponível em: <<https://www.cerdil.com.br/exame-ressonancia-magnetica>>. Acessado em 13 novembro 2020.
- [14] Ziessman, H. A. et al. Medicina Nuclear. Tradução de Spada, S. M. 4ª edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- [15] RBMK Reactors – Appendix to Nuclear Power Reactors. In: World Nuclear Association. 2019. Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/appendices/rbmk-reactors.aspx>>. Acessado em 13 novembro 2020.

- [16] World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements. In: World Nuclear Association. 2020. Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>>. Acessado em 13 novembro 2020.
- [17] ITER Project. In: ITER. Disponível em: <<https://www.iter.org/>>. Acessado em 13 novembro 2020.
- [18] A Fusão Nuclear Explicada: Energia do Futuro. In: Ciência Todo Dia. 2019. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=cXarvv2j9WI>>. Acessado em 20 novembro 2020.
- [19] Marie Curie: a cientista dos Raios-X. In: History Passion. Disponível em: <<https://gamepassion.blogs.sapo.pt/marie-curie-a-cientista-dos-raios-x-26233>>. Acessado em 14 novembro 2020.
- [20] Section 2.0 Introduction to Nuclear Weapon Physics and Design. In: The Nuclear Weapon Archive. Disponível em: <<http://www.nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq2.html#nfaq2.2>>. Acessado em 14 novembro 2020.
- [21] Backgrounder on Dirty Bombs. In: United States Nuclear Regulatory Commission, U.S.NRC. Disponível em: <<http://web.archive.org/web/20200225163940/https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/fs-dirty-bombs.html>>. Acessado em 14 novembro 2020.
- [22] Section 1.0 Types of Nuclear Weapons. In: The Nuclear Weapon Archive. Disponível em: <<http://www.nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq1.html>>. Acessado em 14 novembro 2020.
- [23] Big Ivan, The Tsar Bomba (“King of Bombs”). In: The Nuclear Weapon Archive. Disponível em: <<http://www.nuclearweaponarchive.org/Russia/TsarBomba.html>>. Acessado em 14 novembro 2020.
- [24] Hiroshima e Nagasaki: como foi o 'inferno' no qual morreram milhares por causa das bombas atômicas. In: BBC News Mundo. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/resources/idt-a05a8804-1912-4654-ae8a-27a56f1c2b8a>>. Acessado em 14 novembro 2020.
- [25] Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons (NPT). In: United Nations. Disponível em: <<https://www.un.org/disarmament/wmd/nuclear/npt/>>. Acessado em 14 novembro 2020.
- [26] Status of World Nuclear Forces. In: Federation Of American Scientist. Disponível em: <<https://fas.org/issues/nuclear-weapons/status-world-nuclear-forces/>>. Acessado em 14 novembro 2020.
- [27] Como Funciona a Datação por Carbono. In: Ciência Todo Dia. 2018. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=lvQa9aGDC_I&list=LLHYSEQeLCDeCJxPBekL7ayg&index=2032>. Acessado em 14 novembro 2020.

[28] Radithor (ca. 1928). In: Oak Ridge Associated Universities (ORAU). Disponível em: <<https://www.ornl.gov/PTP/collection/quackcures/radith.htm>>. Acessado em 18 novembro 2020.

[29] Produtos pseudoterapêuticos com material radioativo. In: Estácio web aula. Disponível em: <<http://estacio.webaula.com.br/cursos/go0064/aula10.html>>. Acessado em 18 novembro 2020.

[30] Como a Radiação Mata. In: Ciência Todo Dia. 2020. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=xFxRQdb1s5c>>. Acessado em 18 novembro 2020.