

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
MNPEF

Renan Schetino de Souza

UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE FÍSICA NUCLEAR
NO ENSINO MÉDIO

Juiz de Fora
2018

Renan Schetino de Souza

UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE FÍSICA NUCLEAR NO ENSINO
MÉDIO

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 24 - UFJF/IF-Sudeste-MG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Matheus Valle

Juiz de Fora
Agosto 2018

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Souza, Renan Schetino de.

UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE FÍSICA NUCLEAR NO ENSINO MÉDIO / Renan Schetino de Souza. -- 2018. 119 f.

Orientador: José Luiz Matheus Valle

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2018.

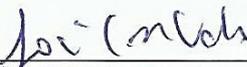
1. Ensino de Física. 2. Sequência didática. 3. Física nuclear. 4. Ensino médio. I. Valle, José Luiz Matheus, orient. II. Título.

Renan Schetino de Souza

UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE FÍSICA NUCLEAR
NO ENSINO MÉDIO

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – Polo 24: Universidade Federal de Juiz de Fora e Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada em 23 de agosto de 2018, por:



Prof. Dr. José Luiz Matheus Valle – Orientador



Prof. Dr. José Abdalla Helayél-Neto – CBPF



Prof. Dr. Thales Costa Soares – IF - Sudeste-MG

Juiz de Fora, MG
Agosto de 2018

Dedicatória

À minha mãe, por toda dedicação e incentivo aos meus estudos.

Agradecimentos

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio incondicional.

Ao meu orientador, José Luiz Matheus Valle, pela paciência e por seus ensinamentos, sem os quais este trabalho não seria possível.

Aos professores desse programa de mestrado, por todo conhecimento compartilhado, imprescindíveis para a produção desta dissertação.

Aos meus alunos, que participaram das aplicações desta sequência didática.

À FAPEMIG pelo apoio de taxa de bancada - Projeto MPR 00703-15.

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

RESUMO

UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE FÍSICA NUCLEAR NO ENSINO MÉDIO

Renan Schetino de Souza

Orientador:
Prof. Dr. José Luiz Matheus Valle

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento e o relato da aplicação de uma sequência didática para o ensino de Física Nuclear, centralizada no conceito de Energia Nuclear, como complemento ao estudo de Física Moderna no Ensino Médio. Tal sequência didática está estruturada em oito aulas regulares de cinquenta minutos e tem como principal fundamentação teórica psicopedagógica a teoria sócio-histórico-cultural de Lev Vygotsky, que considera a aprendizagem uma atividade conjunta, em que relações colaborativas entre os alunos podem e devem ter espaço. Deste modo, foi proposto nessas aulas que os estudantes realizassem as atividades em pequenos grupos, orientados por uma folha-roteiro, e, claro, pelo professor, que desempenha um papel mediador indispensável nessa metodologia. Procurando motivar os estudantes, foi utilizado estratégias distintas, como o uso de textos, figuras, vídeos, gráficos, tabelas e atividades práticas. Para isso, além de adotar uma abordagem mais fenomenológica dos conceitos apresentados, sem deixar de lado a matemática necessária para sua compreensão, foi nosso objetivo também ampliar o senso crítico dos estudantes, discutindo com eles, em forma de seminários, os riscos e benefícios da utilização de elementos ligados à Física Nuclear em nossa sociedade. A partir dos resultados positivos que obtemos, acreditamos que este trabalho possa colaborar com o fomento do ensino de Física Moderna no Ensino Médio.

Palavras-chave: Ensino de Física, sequência didática, física nuclear, ensino médio.

Juiz de Fora
Agosto 2018

ABSTRACT

A DIDACTIC SEQUENCE FOR TEACHING NUCLEAR PHYSICS IN HIGH SCHOOL

Renan Schetino de Souza

Supervisor:
Prof. Dr. José Luiz Matheus Valle

This dissertation presents the development and the report of the application of a didactic sequence for the teaching of Nuclear Physics, centralized in the concept of Nuclear Energy, as a complement to the study of Modern Physics in High School. This didactic sequence is structured in eight regular classes of fifty minutes and has as its main theoretical and psycho-pedagogical foundation the socio-historical-cultural theory of Lev Vygotsky, which considers learning a joint activity, in which collaborative relationships among students can and should have space. In this way, it was proposed in these classes that the students carry out the activities in small groups, guided by a script-sheet, and, of course, by the teacher, who plays an indispensable mediating role in this methodology. In order to motivate the students, different strategies were used, such as the use of texts, figures, videos, graphs, tables and practical activities. For this, besides adopting a more phenomenological approach of the presented concepts, without neglecting the mathematics necessary for their comprehension, it was our objective also to enlarge the critical sense of the students, discussing with them, in seminars form, the risks and benefits of the use of elements related to Nuclear Physics in our society. From the positive results that we obtain, we believe that this work can collaborate with the promotion of the teaching of Modern Physics in High School.

Keywords: Physics education, didactic sequence, nuclear physics, high school.

Juiz de Fora
August 2018

Sumário

Capítulo 1	Introdução	10
Capítulo 2	Referencial Teórico.....	13
2.1	Física Nuclear	13
2.1.1	A teoria atômica.....	13
2.1.2	A descoberta do elétron	14
2.1.3	A descoberta dos Raios X	16
2.1.4	A descoberta da Radioatividade	17
2.1.5	O casal Curie	18
2.1.6	A descoberta das radiações alfa, beta e gama	19
2.1.7	A descoberta do núcleo atômico	20
2.1.8	Descobrimos a constituição do núcleo	22
2.1.9	A estrutura atômica	25
2.1.10	Dimensões nucleares	26
2.1.11	Estabilidade Nuclear	27
2.1.12	Instabilidade Nuclear	28
2.1.13	Emissões radioativas e as Leis da Radioatividade.....	30
2.1.14	Fissão Nuclear	32
2.1.15	Fusão Nuclear	35
2.2	A Teoria de Vygotsky	38
2.2.1	Breve biografia de Lev Vygotsky	38
2.2.2	O construtivismo de Vygotsky	39
2.2.3	Pensamento e Linguagem	40
2.2.4	Formação de Conceitos	41
2.2.5	Zona de desenvolvimento proximal	42
2.2.6	A imitação para Vygotsky	43
2.2.7	Vygotsky e o Ensino	44
Capítulo 3	A Sequência Didática	46
3.1	Planejamento bimestral.....	46
3.1.1	Física Moderna anterior à Sequência Didática	47
3.2	Estrutura da Sequência Didática	48
3.3	Metodologia da Sequência Didática	49
3.4	Planejamento da Aula 01 – O Núcleo Atômico	51
3.4.1	Objetivos	51
3.4.2	Metodologia	51
3.4.3	Resultados esperados	53
3.5	Planejamento da Aula 02 – Estabilidade Nuclear	54
3.5.1	Objetivos	54
3.5.2	Metodologia	54
3.5.3	Resultados esperados	55
3.6	Planejamento da Aula 03 – Instabilidade Nuclear.....	56
3.6.1	Objetivos	56
3.6.2	Metodologia	57
3.6.3	Resultados esperados	58
3.7	Planejamento da Aula 04 – Datação Radioativa	59
3.7.1	Objetivos	59
3.7.2	Metodologia	60

3.7.3 Resultados esperados	61
3.8 Planejamento da Aula 05 – Fissão Nuclear	62
3.8.1 Objetivos	62
3.8.2 Metodologia	62
3.8.3 Resultados esperados	63
3.9 Planejamento da Aula 06 – Fusão Nuclear	65
3.9.1 Objetivos	65
3.9.2 Metodologia	65
3.9.3 Resultados esperados	66
3.10 Planejamento das Aulas 07 e 08 – Seminários	68
3.10.1 Objetivos	68
3.10.2 Metodologia	68
3.10.3 Resultados esperados	69
Capítulo 4 Resultados	71
4.1 Aplicação da Aula 01 – O Núcleo Atômico	71
4.2 Aplicação da Aula 02 – Estabilidade Nuclear	72
4.3 Aplicação da Aula 03 – Instabilidade Nuclear	75
4.4 Aplicação da Aula 04 – Datação Radioativa	77
4.5 Aplicação da Aula 05 – Fissão Nuclear.....	78
4.6 Aplicação da Aula 06 – Fusão Nuclear	80
4.7 Aplicação das Aulas 07 e 08 – Seminários.....	82
Capítulo 5 Considerações finais	85
Referências Bibliográficas	88
Apêndice I AULA 01 – O NÚCLEO ATÔMICO	91
Apêndice II AULA 02 – ESTABILIDADE NUCLEAR	92
Apêndice III AULA 03 – INSTABILIDADE NUCLEAR	93
Apêndice IV AULA 04 – DATAÇÃO RADIOATIVA	95
Apêndice V AULA 05 – FISSÃO NUCLEAR	97
Apêndice VI AULA 06 – FUSÃO NUCLEAR.....	99
Apêndice VII ORIENTAÇÕES PARA OS SEMINÁRIOS DE FÍSICA NUCLEAR	101
Apêndice VIII ORIENTAÇÕES PARA A ATIVIDADE EXPERIMENTAL	102
Apêndice IX – PRODUTO EDUCACIONAL	103

Capítulo 1

Introdução

Uma sociedade marcada pelas transformações científicas e tecnológicas tem levado vários especialistas em ensino a refletir sobre a abordagem de temas atuais no Ensino de Física, onde a inserção da Física Moderna na educação básica torna-se relevante. Porém, de acordo com Machado e Nardi (2006, p.475), a inércia verificada na renovação curricular e práticas pedagógicas, pode acabar deixando os alunos à margem da cultura científica e tecnológica do mundo moderno.

Segundo Ostermann (2000, p.10), a introdução de tópicos de Física Moderna é bastante pertinente, pois desperta a curiosidade dos estudantes e ajuda-os a reconhecer que a Física é de suma importância na sua formação de cidadão.

No entanto, mesmo sendo fundamental essa inserção, alguns de seus temas, como a energia nuclear, originam dúvidas e receios, não apenas nos alunos, mas no público em geral, tornando-se alvo de críticas, de certa maneira pejorativas e sensacionalistas.

Conforme VEIGA (2011, contracapa) destaca:

É comum que, no Brasil, o tema energia nuclear suscite receios, tornando-se objeto de considerações fantasiosas. Deve-se a esse tipo de reação, ainda corrente, a ausência de uma ampla discussão, construtiva e racional, sobre essa fonte de energia [...] No entanto, problemas ambientais e aumentos do preço do petróleo tornam urgente afastar preconceitos infundados e abordar a questão da energia nuclear de forma objetiva.

Assim, tal necessidade de abordagem, aliada à possibilidade de colaborar com o fomento do ensino de Física Moderna no Ensino Médio, nos motivou a produzir uma sequência didática que tratasse do tema Física Nuclear, centralizada na energia nuclear e em suas aplicações.

Todavia, não podemos relegar as dificuldades atualmente encontradas para a execução dessa tarefa.

De todo modo, em nossa realidade educacional, o que mais inquieta o professor, desde que inicia sua atividade em sala de aula, não é a escolha, mas a seleção dos conteúdos, já que, com raras exceções, dificilmente ele tem tempo para apresentar todos os conteúdos escolhidos ou recomendados pelos currículos – além de a carga horária disponível para essa apresentação ser sempre menor do que o necessário, o nível cognitivo dos alunos está, em geral, aquém do desejado e quase sempre obriga o professor a complementar lacunas anteriores, o que reduz ainda mais a possibilidade de cumprir os currículos previstos. (GASPAR, 2014, p. 200)

Conhecedores desses obstáculos, e com o intuito de uma maior abrangência e aplicabilidade de nossa sequência didática, procuramos adaptá-la, na medida do possível, a essas adversidades. Em consequência, julgamos ser necessário que ela se estruturasse em oito aulas regulares de cinquenta minutos, podendo, em casos específicos, e se assim o professor aplicador necessitar, ser estendida conforme a carga horária disponível para sua aplicação.

Ainda assim, de acordo com o professor Marco Antônio Moreira, do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, bem como o reduzido número de aulas, outro obstáculo que se encontra na prática pedagógica é o fato da metodologia no ensino de Física também estar desatualizada. Para ele, o ensino é o tradicional, de sempre. “Centrado no docente, baseado em aulas expositivas e resolução de problemas; treina o aluno para provas e não faz uso de tecnologias de comunicação e informação”¹, coloca o professor.

Diante dessa realidade, além de procurarmos adotar um tratamento mais fenomenológico aos conceitos apresentados, sem deixar de lado a matemática necessária para sua compreensão, nosso trabalho também tem como objetivo ampliar o senso crítico dos estudantes, discutindo com eles os riscos e benefícios da utilização de elementos ligados ao uso da energia nuclear em nossa sociedade.

Para atingirmos nossos propósitos, optamos por utilizar uma abordagem baseada na teoria sociocultural de Lev Semenovitch Vygotsky (1896 - 1934), onde a aprendizagem é uma atividade conjunta, em que relações colaborativas entre alunos podem e devem ter espaço. Deste modo, propomos que em nossas aulas os estudantes realizem as atividades em pequenos grupos (cerca de três alunos), orientados pela folha-roteiro da aula em questão, e, claro, pelo professor, que desempenha um papel mediador indispensável nessa metodologia.

Quanto ao uso de roteiros, não propomos com estes criarmos aulas inflexíveis, estritamente engessadas ao conteúdo, uma vez que concordamos com a posição defendida por Gaspar (2014), aquela em que

Roteiros para a realização de atividade são essenciais, pois é impossível para o professor acompanhar todos os grupos ao mesmo tempo.

Há quem critique esses roteiros, argumentando que eles limitam a iniciativa do aluno. Essa crítica, porém, não se justifica em uma pedagogia de Vygotsky, pois o aluno não aprende o conteúdo teórico da experiência com a

¹ Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/ultimas-noticias/217-1207656570/21225-mestrado-da-novo-significado-a-estrategias-de-ensino-de-fisica>>. Acesso em 20/11/17.

montagem, nem mesmo com a simples realização de medidas ou cálculos, mas com as interações sociais desencadeadas durante sua realização, e essas interações podem também ser organizadas por questões propostas para discussões nesses roteiros. (p. 227)

Cientes também da dificuldade que outro profissional encontra na aplicação de uma proposta pedagógica sequencialmente estruturada, buscamos, quando possível, adicionarmos nesta dissertação comentários ou sugestões que facilitem a adaptação desta sequência didática à realidade deste profissional. Entretanto, evitando-se ao máximo retirar a autonomia que a prática pedagógica requer.

Assim, procuramos da melhor maneira relatar os objetivos e resultados esperados em cada aula, bem como detalharmos minuciosamente o que pretendemos com cada texto ou questão das folhas-roteiro utilizadas em sala.

Em relação à estrutura, esta dissertação se organiza em 5 capítulos, além dos apêndices ao seu final.

No capítulo 2 apresentamos nosso referencial teórico, que está dividido em duas seções: uma contendo um breve resumo da Física Nuclear e outra com a síntese de alguns conceitos essenciais da Teoria de Vygotsky. A sequência didática propriamente dita é descrita no Capítulo 3, e os resultados obtidos em suas duas aplicações são relatados no Capítulo 4. Enquanto o Capítulo 5 foi destinado para nossas considerações finais.

Os Apêndices I ao VI referem-se às folhas-roteiro utilizadas nas seis primeiras aulas da sequência. No Apêndice VII se encontram as informações referentes aos seminários que os alunos devem apresentar nas duas últimas aulas. O Apêndice VIII contém o roteiro e as orientações da atividade experimental a ser realizada pelos estudantes na segunda aula. Por fim, no Apêndice IX, apresentamos o Produto Educacional, fruto deste trabalho.

Capítulo 2

Referencial Teórico

O presente capítulo está estruturado em duas seções. Em sua primeira parte, é feita uma abordagem da Física Nuclear, onde são relatadas importantes descobertas e contribuições proporcionadas a esse campo de estudo. Na segunda etapa, é realizada uma breve introdução à teoria psicopedagógica de Lev Semenovitch Vygotsky (1896 - 1934), ressaltando as posições deste autor que acreditamos irem ao encontro daquelas que defendemos em nosso trabalho.

2.1 Física Nuclear

2.1.1 A teoria atômica

Há muitos séculos, filósofos gregos indagavam-se a respeito da estrutura da matéria, formulando perguntas do tipo: *Do que os objetos são constituídos? O que acontece ao se dividir sucessivamente um material? Existe um pedaço fundamental que constitui todas as coisas?*

Afim de responder a esses questionamentos, foi proposta a teoria atômica, ou do atomismo, sendo Demócrito de Abdera (460 - 370 a.C.) considerado seu grande expoente. Nela, tudo o que existe seria composto por elementos indivisíveis, chamados de átomos². Portanto, o átomo seria a unidade básica da matéria e todos os objetos seriam constituídos por combinações destes elementos. Entretanto, Platão (428 - 347 a.C.) e Aristóteles (384 - 322 a.C.), filósofos muito influentes à época, discordavam desta proposta e defendiam a ideia de que a matéria era contínua, ou seja, não sendo constituída de unidades fundamentais.

Assim, essa última concepção permaneceu por um longo período, com a teoria atômica sendo retomada somente em 1808 pelo cientista inglês John Dalton (1766 - 1844). Baseando-se em fatos experimentais, obtidos em grande parte da observação do comportamento de gases, Dalton propôs alguns postulados para sua teoria atômica, dizendo ser o átomo uma esfera maciça e indivisível, onde os átomos de um mesmo elemento são iguais entre si, bem como seriam diferentes os átomos de elementos distintos. Embora esse modelo tenha sido de grande contribuição à teoria atômica moderna, ainda existiam dúvidas acerca das definições de átomo e

² do grego, "a", negação e "tomo", divisível.

molécula. Tal distinção foi realizada em 1858 por Stanislao Cannizzaro (1826 - 1910), cunhando uma terminologia utilizada ainda hoje.

Assim, molécula designa a menor partícula de uma substância, que não se pode mais dividir sem perder suas propriedades químicas específicas. Elas seriam constituídas por átomos de elementos (eventualmente) diferentes, enquanto os átomos corresponderiam os componentes dos elementos químicos. (GALETTI e LIMA, 2010, p. 16)

2.1.2 A descoberta do elétron

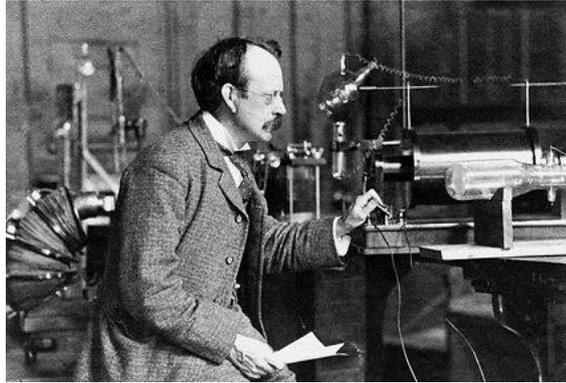
Entre 1868 e 1875, William Crookes (1832 - 1919) realizou experimentos com tubos de vidro, onde em seu interior havia gás rarefeito submetido à alta tensão, através de dois eletrodos em suas extremidades. O feixe de partículas que ejetava do cátodo (eletrodo carregado negativamente) em direção ao ânodo (eletrodo carregado positivamente), ao atravessar o tubo, colidia com as moléculas do gás em seu interior, ionizando-as e provocando luminescência em algumas regiões do tubo. Crookes constatou ainda que se um amperímetro fosse ligado ao experimento, dependendo de certas condições, este acusava a passagem de corrente elétrica pelo gás, mostrando que o feixe possuía carga elétrica. Posteriormente, esses feixes foram chamados de *raios catódicos* e o aparato experimental foi denominado *ampola de Crookes*, embora Crookes não tenha sido o primeiro a produzir experimentos desse tipo.

Em 1838, Faraday realizou uma série de experimentos com descargas elétricas em gases rarefeitos, ligando definitivamente seu nome à descoberta dos raios catódicos. Todavia, devido às dificuldades técnicas com a produção de vácuo de boa qualidade, esses trabalhos só tiveram novo impulso vinte anos depois. (DOS SANTOS, 2004³)

No ano de 1897, o físico inglês Joseph John Thomson (1856 - 1940) efetuou experimentos com esses tubos (figura 1), adaptando ao redor do feixe luminoso, campos elétrico e magnético, perpendiculares entre si (figura 2). Através de mudanças na direção e sentido desses campos, e pela maneira que se desviavam a eles, constatou que esses raios deveriam possuir carga elétrica negativa. Ainda, ao colidirem com um dispositivo previamente colocado no interior do tubo, esse feixe fazia-o girar, mostrando que os raios catódicos também possuíam massa, cerca de um milionésimo da massa do hidrogênio, o menor íon conhecido, e chamou-as de corpúsculos. “O nome *electron* foi novamente proposto para estas partículas pelo físico George Fitzgerald (1851 - 1901), e o nome então ganhou aceitação universal.” (LEICESTER, 1971, p. 221-2)

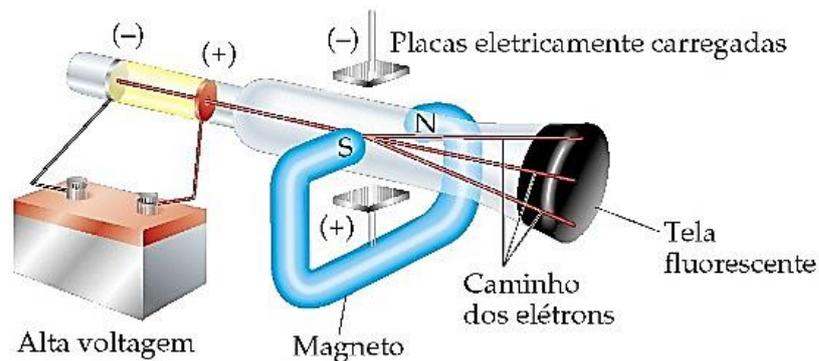
³ Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/oscar2004/mod04/m_s02.html>. Acesso em out. 2017.

Figura 1. J.J. Thomson com instrumentos de seus experimentos.



Fonte: Science & Society Picture Library. Disponível em:
 <<http://www.ssplprints.com/image/90106/sir-joseph-john-thomson-english-physicist-c-1900s>>.
 Acesso em: out. 2017.

Figura 2. Representação esquemática do experimento realizado por J.J. Thomson.



Fonte: Portal São Francisco. Disponível em:
 <<http://www.portalsaofrancisco.com.br/quimica/modelo-atmico-de-thomson>>. Acesso em:
 out. 2017.

Thomson também conseguiu determinar a relação entre a carga e massa⁴ desses corpúsculos, dizendo serem uma das partículas fundamentais da matéria, já que essa relação era independente do gás utilizado. A partir de seus resultados, para explicar a neutralidade da matéria, propôs um modelo atômico conhecido por *pudim de passas*, onde o átomo seria uma esfera de carga positiva, que corresponde a maior parte de sua massa, e os elétrons, mais leves e de carga negativa, estariam uniformemente distribuídos por esta esfera.

⁴ Controlando a intensidade e a direção dos campos elétrico (E) e magnético (B), é possível fazer com que o feixe, acelerado por um potencial V , atravessa o tubo em linha reta, com uma velocidade dada pela razão E/B . Nesta configuração, através de ajustes desses parâmetros, obtém-se a razão entre a carga (e) e a massa (m) dessas partículas, dada por: $\frac{e}{m} = \frac{E^2}{2VB}$

2.1.3 A descoberta dos Raios X

Dando continuidade aos estudos sobre os raios catódicos, os físicos e químicos da época se interessavam cada vez mais a respeito de suas propriedades, dentre elas, alguns efeitos observados em certos materiais quando próximos a esses tubos, como a luminescência gerada em telas envoltas de platinocianeto de bário, ou as impressões formadas em chapas fotográficas. Um fato que os intrigava, era que a luminescência podia ser detectada mesmo se esses materiais estivessem a uma distância de cerca de um metro do aparato experimental, enquanto os raios catódicos aparentavam não conseguir penetrar mais que alguns poucos centímetros no ar.

Após a realização de inúmeros experimentos, utilizando-se para isso de uma ampola de Crookes, uma *bobina de Ruhmkorff*⁵ e uma bomba de vácuo, em 1895, o físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen (1845 - 1923) concluiu que este efeito, de sensibilizar certos materiais à distância, deveria ser causado por algum outro tipo de raios, que não fossem os catódicos. Essa nova radiação passou a ser denominada *Raios X*, devido ao seu até então desconhecimento.

Roentgen observou que os raios X, além de possuírem maior poder de penetração que os raios catódicos, não sofriam deflexão quando submetidos a um campo magnético. Inicialmente, pensou ser esta radiação algo como a luz ultravioleta, mas devido a algumas propriedades constatadas, concluiu que essa hipótese era falsa, e que os raios X eram um tipo de radiação originada pelos raios catódicos, quando colidiam com o tubo de vidro. No ano seguinte, o físico inglês Sir George Stokes (1819 - 1903) mostrou que esses raios são produzidos pela desaceleração de partículas carregadas e com alta energia, quando, por exemplo, um elétron, ao atingir o alvo no qual foi direcionado, sofre uma brusca desaceleração. Atualmente, sabe-se que os raios X são uma forma de radiação eletromagnética, correspondente a uma faixa de frequências que vai de 3×10^{16} Hz a 3×10^{19} Hz. Além disso,

o choque do feixe de elétrons (que saem do catodo com energia de dezenas de KeV) com o anodo (alvo) produz dois tipos de raios X. Um deles constitui o espectro contínuo, e resulta da desaceleração do elétron durante a penetração no anodo. O outro tipo é o raio X característico do material do anodo. Assim, cada espectro de raios X é a superposição de um espectro contínuo e de uma série de linhas espectrais características do anodo. (DOS SANTOS, 2004⁶)

⁵ Também chamada bobina de indução, é um dispositivo capaz de obter alta tensão alternada, utilizando-se da corrente contínua à baixa tensão.

⁶ Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/oscar2004/mod04/m_s07.html>. Acesso em out. 2017.

2.1.4 A descoberta da Radioatividade

No final do século XIX, a luminescência que alguns materiais apresentavam, como o dióxido de urânio, já era de conhecimento dos cientistas. Entretanto, assim como observado nos experimentos realizados por Roentgen, acreditava-se que tal fenômeno estivesse sempre relacionado a um efeito externo, como, por exemplo, o resultado da incidência de determinada radiação sobre esse material. Essa relação fez Jules Henri Poincaré (1854 – 1912) associar a luminescência à emissão dos raios X.

É, portanto, o vidro que emite os raios Roentgen, e ele os emite tornando-se fluorescente. Podemos nos perguntar se todos os corpos cuja fluorescência seja suficientemente intensa não emitiriam, além de raios luminosos, os raios X de Roentgen, qualquer que seja a causa de sua fluorescência. Os fenômenos não seriam então associados a uma causa elétrica. Isso não é muito provável, mas é possível e, sem dúvida, fácil de verificar. (POINCARÉ, 1896, p. 56)

Em 1896, corroborando com essa relação entre os dois fenômenos, o físico francês Antoine Henri Becquerel⁷ (figura 3) realizou alguns experimentos com sulfato duplo de urânio e potássio, envolvendo-os em filme fotográfico com papel preto. Desta forma, observou que o material se sensibilizava, acusando emissão de radiação penetrante, tanto quando iluminado diretamente pelo Sol, quanto ao ser iluminado por luz refletida ou refratada.

Porém, diferentemente do que esperava encontrar, ao guardar esse material durante certo tempo em uma gaveta, sem incidência de luz, constatou que ainda assim o filme ficara manchado.

Insistirei particularmente sobre o seguinte fato, que me parece muito importante e alheio ao domínio dos fenômenos que se poderia esperar observar. As mesmas lamelas cristalinas (de sal de urânio), colocadas junto a chapas fotográficas, nas mesmas condições, isoladas pelos mesmos anteparos, mas sem receber excitação por incidência de radiação e mantidas na obscuridade, ainda produzem as mesmas impressões fotográficas. (BECQUEREL, 1896, p. 501-3)

Assim, Becquerel verificou que essa propriedade não estava associada a luminescência, como se pensavam.

É importante notar que este fenômeno não parece dever ser atribuído às radiações luminosas emitidas por fosforescência, já que após 1/100 de segundo, estas radiações se tornam tão fracas que são quase imperceptíveis. (BECQUEREL, 1896, p. 501-3)

⁷ Laureado em 1903 com o Prêmio Nobel de Física, juntamente com Pierre e Marie Curie, por seus estudos sobre a radioatividade.

Figura 3. Antoine Henri Becquerel (1852 – 1908).



Fonte: Prêmio Nobel. Disponível em:
<https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/becquerel-bio.html>.
Acesso em: jan. 2018.

Portanto, era compreensível que esses resultados fossem oriundos de um novo fenômeno, dependente exclusivamente de propriedades intrínsecas ao material em análise. Becquerel chamou esta nova radiação de *raios urânicos*.

2.1.5 O casal Curie

Estudando as propriedades dos raios urânicos, Marie Skłodowska Curie (1867 – 1934) observou que, assim como o urânio, o tório também apresentava essa radiação. Além disso, verificou que a *pechblenda* (óxido de urânio) e a *calcolita* (fosfato de cobre e uranila) eram mais ativos que o próprio urânio. Isso levava a concluir que nesses compostos deveria haver algum outro elemento, ainda mais ativo que os antecessores. Logo, essa propriedade não era exclusiva do tório e do urânio, os elementos naturais com maior peso atômico conhecidos até então.

Com as contribuições de Gustave Bémont (1857 - 1937) e, principalmente, de seu marido Pierre Curie (1859 - 1906), Marie conseguiu isolar dois novos elementos, o rádio e o polônio, sendo este último assim denominado em homenagem à Polônia, nação onde ela nascera.

Foi Madame Curie quem também cunhou o termo *radioatividade* a essa propriedade, como se pode inferir na seguinte passagem:

Os raios urânicos foram frequentemente chamados raios de Becquerel. Pode-se generalizar esse nome, aplicando-o não apenas aos raios urânicos, mas também (...) a todas as radiações semelhantes. Chamarei de radioativas as substâncias que emitem raios de Becquerel. (CURIE, 1899, p. 41-50)

Figura 4. Pierre e Marie Curie em seu laboratório (Paris).



Fonte: Wikipédia. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Marie_Curie>. Acesso em: out. 2017.

A intensa energia envolvida neste fenômeno, bem como uma aparente inesgotável fonte desta, já que esses materiais emitiam radiação por um tempo extremamente longo, fez com que a radioatividade não conseguisse ser explicada por nenhuma das propriedades químicas conhecidas, pois a intensidade da radiação emitida dependia somente da quantidade de material na amostra, sendo independente da temperatura ou algum fator externo no qual a substância estivesse submetida. Isso levou vários cientistas, dentre eles o casal Curie, a efetuarem inúmeras pesquisas sobre a origem desse fenômeno e, conseqüentemente, da estrutura da matéria.

2.1.6 A descoberta das radiações alfa, beta e gama

Em seus estudos, realizados poucos anos após a descoberta da radioatividade, o físico neozelandês Ernest Rutherford (1871 – 1937), inicialmente, conseguiu identificar dois tipos de radiações emitidas pelo urânio: uma facilmente absorvida e outra bastante penetrante, denominando-as *alfa* e *beta*, respectivamente.

Na mesma época, produzindo experimentos semelhantes, Becquerel e o casal Curie observaram que, quando submetidas a um campo magnético, enquanto a radiação alfa praticamente não se desviava, a radiação beta sofria uma deflexão bem acentuada, que ocorria na mesma direção que se desviavam os raios catódicos. Portanto, devido à enorme semelhança com estes últimos, Rutherford concluiu que essa radiação também deveria possuir carga elétrica negativa, além de uma pequena massa, identificando-as com os elétrons.

Posteriormente, devido a sua grande massa, constatou que a radiação alfa podia sofrer pequenos desvios, ocasionados tanto por um campo elétrico, quanto magnético. Pela análise dessas deflexões, constatou que esse tipo de radiação consistia-se de partículas de carga positiva, se tratando do núcleo do átomo de hélio. Por fim, conseguiu identificar um terceiro tipo de radiação, com um poder de penetração extremamente elevado e que não sofria deflexões por esses campos, possuindo características semelhantes aos raios X, denominando-as radiação *gama*.

É importante destacar também que, neste período, o casal Curie havia observado o fato de o elemento rádio ser capaz de tornar radioativo alguns corpos próximos a ele. Além disso, Rutherford e Friedrich Ernst Dorn (1848 – 1916), de maneira independente, observaram que o radônio⁸ era produzido pela emissão radioativa do tório, o que fez surgir os primeiros estudos a respeito da transformação dos elementos radioativos, destacando-se os artigos publicados em 1902 por Rutherford e Frederick Soddy (1877 -1956), mostrando que tais elementos se desagregam em uma série de outros elementos⁹.

Por essas e outras contribuições, Ernest Rutherford foi laureado com o Nobel de Química em 1908, por suas investigações sobre a desintegração dos elementos e a química das substâncias radioativas.

2.1.7 A descoberta do núcleo atômico

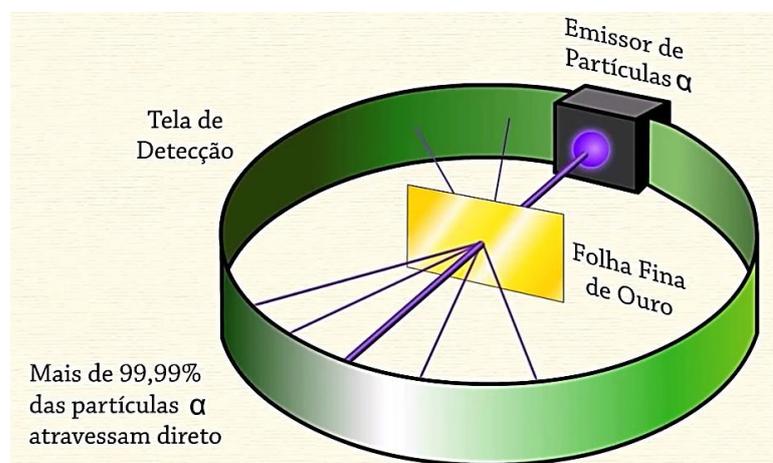
Em um experimento realizado em 1909, no laboratório de Física da Universidade de Manchester (Reino Unido), Johannes Wilhelm Hans Geiger (1882 – 1945) e Ernest Marsden (1889 – 1970), sob a supervisão de Ernest Rutherford, verificaram que ao se incidir um feixe colimado de partículas alfa, geradas pelo decaimento radioativo do radônio, sobre uma fina lâmina de ouro, estas praticamente atravessavam a lâmina sem sofrerem desvios, exceto em ocasionais momentos, onde algumas eram refletidas como se colidissem com algo extremamente denso e maciço, fato que podia ser verificado pela cintilação causada por essas partículas ao incidirem em uma tela de sulfeto de zinco que envolvia o aparato experimental (figura 5).

Quando Marsden descreveu essa observação a Rutherford, o professor fez com que ele repetisse a experiência. Os grandes desvios o surpreendeu. Mais tarde ele declarou que foi como se alguém lhe tivesse dito que, ao atirar em uma folha de papel, a bala tivesse ricocheteadado! (SEGRÈ, 1980, p.108)

⁸ Elemento descoberto por Dorn durante esses experimentos.

⁹ Os decaimentos radioativos são analisados mais detalhadamente na subseção 2.1.13.

Figura 5. Representação esquemática do experimento realizado por Rutherford e colaboradores. Captura de tela do vídeo Os Primeiros Modelos Atômicos (Dalton, Thomson, Rutherford, Bohr).

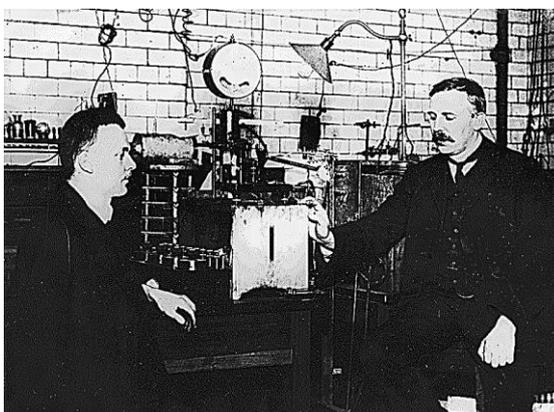


Fonte: SOCRATICA. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kT2sHBF9Q3k>>. Acesso em: out. 2017.

Desse modo, constataram que esse resultado somente seria possível se adotassem um sistema onde a maior parte da massa do átomo estivesse concentrada em um núcleo minúsculo, carregado com carga elétrica positiva. Tal modelo, com um núcleo central, ficou posteriormente conhecido como *modelo planetário do átomo*, por sua semelhança ao sistema planetário, onde os elétrons, girando ao redor do núcleo, desempenham papel análogo aos planetas orbitando o Sol.

Observaram também que esses desvios ocorriam numa proporção de aproximadamente 1 em 20.000, e ao se utilizar folhas de outros materiais, quanto maior a massa atômica do material que a constituísse, maior era o desvio angular sofrido pelas partículas.

Figura 6. Hans Geiger (esquerda) e Ernest Rutherford (direita) no Laboratório Von McGill.



Fonte: PhysicsOpenLab. Disponível em: <<http://physicsopenlab.org/2017/04/11/the-rutherford-geiger-marsden-experiment/>>. Acesso em: out. 2017.

À essa época, devido a alguns trabalhos, destacando-se dentre eles o estudo realizado por Albert Einstein (1879 – 1955) sobre o *movimento Browniano*¹⁰¹¹, a dimensão do átomo já era conhecida (da ordem de 10^{10} m) e a natureza atômica da matéria amplamente reconhecida.

Em vista disso, com os resultados obtidos nos espalhamentos, Rutherford e seus colaboradores conseguiram estipular a dimensão do núcleo atômico¹² como sendo da ordem de 10^{-14} m. Além disso, ajudaram a mostrar que estes fenômenos, recém descobertos e altamente energéticos, estavam relacionados a um novo campo de estudo, em ascensão, associado às propriedades e constituição do núcleo atômico.

2.1.8 Descobrendo a constituição do núcleo

É preciso ressaltar que, em 1886, realizando estudos com descargas elétricas em uma ampola de Crookes, o físico Gotthilf-Eugen Goldstein (1850 – 1930) já observara que algumas descargas ocorriam em um sentido contrário àquele seguido pelos raios catódicos, mostrando que elas deveriam possuir uma carga oposta à destes últimos, denominando-as *raios canais*. Entretanto, Goldstein não atribuiu significado ao ocorrido. Somente em 1898 Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864 – 1928), ao submeter essas descargas a um campo eletrostático bem mais intenso, concluiu que esses raios eram constituídos de hidrogênio ionizado.

Em 1904, Rutherford confirmou a presença e a origem dessas partículas, constatando que os raios canais possuíam a menor carga positiva conhecida até então. Posteriormente, verificou que o hidrogênio podia ser extraído do núcleo de nitrogênio por colisão. Então, supôs que outros núcleos poderiam ser formados por tais partículas. “No entanto, apenas em 1919, Ernest Rutherford publica os seus estudos acerca da desintegração artificial e, conseqüentemente, a conclusão inequívoca da descoberta do próton.” (INFOESCOLA, 2017¹³)

Deste modo, a natureza corpuscular da matéria era conhecida, bem como duas de suas partículas fundamentais: o elétron e o próton. Entretanto, ainda restavam algumas dúvidas, que podem ser sintetizadas nas seguintes questões:

¹⁰ Movimento aleatório que as partículas executam quando suspensas na superfície de um fluido, devido às colisões com as moléculas ou átomos rápidos desse fluido. Recebeu essa denominação em homenagem ao botânico Robert Brown (1773 - 1858), quem primeiramente estudou esse fenômeno.

¹¹ Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Movimento_browniano>. Acesso em out. 2017.

¹² Esse valor é referente à dimensão do núcleo de ouro.

¹³ Disponível em: <<https://www.infoescola.com/fisica-nuclear/proton/>>. Acesso em out. 2017.

- *Por que o átomo não entrava em colapso, com os elétrons emitindo energia ao descreverem suas órbitas, até que a cedessem completamente e colidissem sobre o núcleo?*
- *Por que ao se realizar medidas da razão carga/massa com espectrômetros de massa, os valores encontrados levavam a crer na existência de um número maior de constituintes que aquele previsto para estes núcleos?*

Com o intuito de resolver a primeira dessas dúvidas, em 1913, o físico dinamarquês Niels Henrik David Bohr (1885 – 1962) formulou um novo modelo atômico, baseado na recente proposição de quantização da energia¹⁴. Nele, Bohr enunciou alguns postulados, que podem assim serem resumidos:

- Os elétrons se movem ao redor do núcleo em um número limitado de órbitas bem definidas, sendo chamadas órbitas estacionárias.
- Movendo-se em uma órbita estacionária, o elétron não emite nem absorve energia.
- Ao saltar de uma órbita para outra, o elétron emite ou absorve uma quantidade bem definida de energia.

Desta maneira, Bohr continua adotando um modelo de átomo com um núcleo central, que contém toda sua carga positiva. Porém, diferentemente de seus antecessores, em seu modelo atômico, o elétron possui órbitas específicas nas quais ele não absorve nem emite energia, exceto em transições bem definidas entre elas. Logo, mesmo sem explicar a causa deste comportamento, ele consegue responder o porquê do átomo não se colapsar.

Entretanto, para que houvesse um maior conhecimento da estrutura do núcleo, ainda faltava aos cientistas compreender o motivo da diferença entre os valores teóricos e os resultados encontrados nos espectrômetros de massa.

Para entender como tal questão foi elucidada, é preciso retornar a alguns resultados já obtidos por Frederick Soddy, quando de seu estudo sobre os decaimentos radioativos.

¹⁴ Em 1900, o físico alemão Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858 – 1947) propôs que a energia radiante por um elétron só poderia ser emitida ou absorvida em quantidades discretas, denominadas por ele de *quantum*. O quantum pode ser entendido como “um pacote de energia” que é transportado por uma partícula denominada *fóton*. Assim, a emissão ou absorção de um fóton corresponde a uma variação de energia do sistema em estudo de 1 quantum.

Conforme já relatado¹⁵, juntamente com Rutherford, Soddy observou que o comportamento anômalo dos elementos radioativos se dava por estes se transformarem em outros, podendo com isso emitir radiações alfa, beta ou gama. Assim, mostrou que o peso atômico de um elemento podia se alterar, dependendo do tipo de radiação que ele emitisse. Indo além, demonstrou também a existência de isótopos, elementos químicos de mesmo número atômico, pois observara que os elementos, tanto os radioativos ou não, poderiam possuir mais de um peso atômico, sem, contudo, apresentarem propriedades distintas.

Tais resultados fizeram Ernest Rutherford supor a presença de uma terceira partícula fundamental da matéria, que seria formada pela união de um próton com um elétron, possuindo carga nula e uma massa próxima à do primeiro, pois, em seus estudos sobre o espalhamento de partículas alfa, havia constatado o fato do próton possuir uma massa bem superior à do elétron, cerca de 2.000 vezes maior.

Todavia, o fato do elétron estar confinado em um espaço diminuto, como o ocupado pelo núcleo, mostrava-se incompatível com os recentes resultados obtidos pela Mecânica Quântica, especialmente com o *Princípio da Incerteza de Heisenberg*¹⁶¹⁷.

Apesar disso, mesmo existindo certas incompatibilidades, a ideia de uma nova partícula no núcleo se revelava coerente para a compreensão do conceito de isótopos e, principalmente, para a existência da estabilidade nuclear, já que se mostrava incompreensível a concepção de um núcleo estável, constituído exclusivamente de prótons, partículas que se repelem eletrostaticamente.

Em 1932, bombardeando o elemento berílio com partículas alfa, o físico britânico James Chadwick (1891 – 1974) observou que quando os núcleos desses elementos se desintegravam, emitiam uma radiação até então desconhecida, inicialmente confundida com os raios gama. A partir de uma posterior análise, concluiu que tais emissões se tratavam das partículas previstas por Rutherford e denominou-as *nêutrons*, já que possuíam carga elétrica nula, além de uma massa ligeiramente maior que a do próton.

¹⁵ Ver subseção 2.1.6

¹⁶ Formulado em 1927 pelo físico alemão Werner Heisenberg (1901 – 1976), tal princípio dá um caráter probabilístico a uma medida, ao afirmar que quando se observa duas variáveis complementares (por exemplo: posição e momento linear; ou então, energia e o intervalo de medição), quanto maior a precisão em uma dessas variáveis, maior a incerteza na medida da outra.

¹⁷ Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Princ%C3%ADpio_da_incerteza_de_Heisenberg>. Acesso em 05/11/17.

Portanto, com esta configuração do átomo, os resultados anteriormente obtidos tornaram-se mais compreensíveis. A transmutação radioativa pôde ser melhor detalhada, assim como a estabilidade nuclear foi melhor entendida pela presença do nêutron, que por ter carga nula, equilibra a repulsão eletrostática entre os prótons.

Contudo, ainda faltava explicar qual a força responsável pela união dos núcleons¹⁸, e também, qual a sua origem.

2.1.9 A estrutura atômica

Conforme visto na subseção anterior, o núcleo atômico é constituído de prótons, partículas de carga positiva, e nêutrons, partículas com dimensões semelhantes aos prótons, mas de carga nula. A soma destes constituintes (os núcleons) é denominada número de massa, sendo representada pela letra A , assim como o número de prótons de um átomo é representado pela letra Z e recebe o nome de número atômico. Além disso, é comum também representar por N o número de nêutrons, que é, conseqüentemente, igual a diferença entre A e Z .

Deste modo, para representar um átomo, costuma-se escrever seu símbolo químico, com seu número atômico no índice inferior e o número de massa no índice superior, da seguinte maneira:



Em relação às massas dos átomos, rotuladas de M , estas são comparadas segundo uma escala em que um isótopo de carbono-12 tem uma massa de exatamente 12. Dessa forma, a massa atômica do próton é 1,007277, e a do nêutron 1,008665, sendo a diferença entre elas de apenas 0,1%; enquanto a massa do elétron vale 0,000549. Por conseguinte, a unidade de massa atômica (simbolizada por u), definida como 1/12 da massa do carbono-12, corresponde a uma massa real de $1,66 \times 10^{-24}$ g. “Este valor é obtido dividindo-se 1 g pelo número de Avogadro¹⁹.” (MURRAY, 2004, p.20)

Assim, para se determinar a massa real de um átomo, basta multiplicar sua massa, em unidades de massa atômica, por $1,66 \times 10^{-24}$ g. Isto resulta, para o próton,

¹⁸ Nome que se dá aos prótons e nêutrons, as partículas pesadas que compõem o núcleo atômico.

¹⁹ Também conhecida como constante de Avogadro, em homenagem a Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro (1776 - 1856). É definida como sendo o número de átomos por mol de uma determinada substância. Seu valor é aproximadamente $6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

em uma massa de aproximadamente $1,67 \times 10^{-24}$ g, sendo praticamente igual à massa do nêutron, mas cerca de 1836 vezes maior que a do elétron. Portanto, em termos dessa unidade, a massa do elétron é praticamente nula, e a massa do próton, por ter seu valor bem próximo de uma unidade de massa atômica (1 u) é adotada como massa de referência em Física Nuclear.

De outro lado, em relação à carga elétrica, o próton tem uma carga, em módulo, igual a do elétron, porém, de sinais contrários. Esta carga, simbolizada por e , é chamada carga elétrica elementar²⁰, sendo a carga utilizada como referência. Por fim, conforme já citado, o nêutron tem carga nula. Resumidamente, tem-se:

Tabela 1 - Características das três principais partículas subatômicas.

Partícula	Representação	Carga relativa (e)	Massa relativa (u)	Carga efetiva (C)	Massa efetiva (kg)
Próton	1_1p	+1	1	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$1,67 \cdot 10^{-27}$
Nêutron	1_1n	0	1	0	$1,67 \cdot 10^{-27}$
Elétron	${}^0_{-1}e$	-1	1/1836	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$9,11 \cdot 10^{-31}$

Fonte: próprio autor.

2.1.10 Dimensões nucleares

Em seus experimentos, Rutherford havia constatado que as dimensões dos núcleos são muito menores que as dos átomos. Enquanto o raio do átomo de hidrogênio tem aproximadamente $0,53 \times 10^{-10}$ m, seu núcleo, constituído por apenas um próton, tem um raio de cerca de 10^{-15} m. Logo, para expressar tais valores, é conveniente descrever as dimensões nucleares na unidade *fermi*, ou *fentômetro* (fm), definida por $1 \text{ fm} = 10^{-15}$ metros.

Considerando o núcleo uma esfera maciça, uma regra prática para se determinar o seu raio é dada pela expressão

$$R = R_0 A^{1/3}$$

onde R_0 é uma constante de valor próximo a 1,2 fm. Desta forma, vê-se que o raio do núcleo é proporcional ao seu número de núcleons.

²⁰ A carga do elétron foi medida mais cuidadosamente em 1909 pelos físicos Robert Andrews Millikan (1868 - 1953) e Harvey Fletcher (1884 - 1981), na famosa *experiência da gota de óleo*. Esse experimento usou um campo elétrico para prevenir uma gota de óleo carregada de cair pela ação da gravidade. O valor encontrado foi, em módulo, de aproximadamente $1,6022 \times 10^{-19}$ C. Essa carga é considerada indivisível, sendo uma das constantes fundamentais da Física. (THOMSON, 1897)

Indo além, considerando que ele seja constituído de partículas densamente agrupadas (núcleons de massa m_N), pode-se estimar sua densidade ρ , por

$$\rho = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}} = \frac{m_N A}{\frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{m_N A}{\frac{4}{3} \pi R_0^3 A} = \frac{3 m_N}{4 \pi R_0^3}$$

o que resulta em um valor de aproximadamente $2 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$, ou seja, um núcleo extremamente denso. Portanto:

... a densidade do núcleo é uma constante, exatamente como ocorre nos líquidos. O núcleo atômico é, de um lado, um sistema ligado de prótons e nêutrons, cujo movimento dentro do núcleo pode ser individualizado, e de outro, várias das propriedades dos núcleos mais pesados podem ser descritas imaginando-os uma gota de líquido incompressível e eletricamente carregado. (GALETTI e LIMA, 2010, p. 41)

O modelo descrito acima é conhecido como *modelo da gota líquida*²¹, onde algumas propriedades nucleares são analisadas de maneira análogas àquelas encontradas em uma gota de líquido.

2.1.11 Estabilidade Nuclear

Devido à reduzida dimensão do núcleo atômico, a intensidade da força eletrostática de repulsão entre os prótons, que varia de maneira inversamente proporcional à distância entre as cargas, possui um elevado valor. Sendo assim, para que seja possível a existência do núcleo, é necessário que haja também uma força muito intensa de natureza atrativa, que equilibre essa relação. Além disso, essa força deve possuir um alcance restrito ao núcleo, pois, caso contrário, não seria viável a constituição da matéria conforme a conhecemos.

Essas restrições levam a conclusão de que o núcleo possui uma energia potencial de ligação associada a seus constituintes, que dá origem a esta força, denominada *força nuclear forte*, ou simplesmente, *força forte*.

A próxima questão que se forma é: “Qual a origem dessa energia?”

Para tentar respondê-la é preciso utilizar a relação de equivalência entre massa e energia, proposta em 1905 por Albert Einstein. Esta relação mostra que massa (m) e energia (E) estão estritamente relacionadas pela famosa expressão

$$E = mc^2$$

²¹ Ver subseção 2.1.14.

onde $c = 299\,792\,458$ m/s é a velocidade da luz no vácuo. Consequentemente, um pequeno valor de matéria é capaz de gerar uma quantidade enorme de energia²².

A relação proposta por Einstein é capaz de explicar o porquê do valor da massa de um núcleo ($M_{\text{núcleo}}$) ser sempre menor que aquele obtido quando se soma a massa de seus núcleons isoladamente, uma vez que a diferença entre essas massas é convertida em energia de ligação (B), necessária para manter os núcleons unidos, podendo ser expressa por

$$B = (Zm_{\text{prótons}} + Nm_{\text{nêutrons}} - M_{\text{núcleo}})c^2$$

É importante acentuar que na expressão anterior foi desprezada qualquer energia de ligação atômica ou química.

2.1.12 Instabilidade Nuclear

Como já citado na subseção 2.1.8, o equilíbrio do núcleo está sujeito à influência dos nêutrons.

Em geral, nos núcleos mais leves, há aproximadamente tantos prótons quanto nêutrons, de tal forma que a relação massa/carga é aproximadamente dois, em acordo com as medidas. Mas, à medida que o número de prótons cresce, para contrabalançar a repulsão de carga e tornar o núcleo estável, devemos ter mais nêutrons que prótons. E ainda mais, quando o número de prótons é maior que 83, adicionar mais nêutrons não resolve o problema da estabilidade. Ou seja, todos os elementos com mais prótons que o bismuto são instáveis. (GALETTI e LIMA, 2010, p. 25-26)

Por esse motivo, os núcleos instáveis tendem a procurar alcançar a estabilidade através da emissão de partículas e/ou energia, processo denominado *desintegração* ou *decaimento nuclear*. Quando isto ocorre, caso o núcleo instável emita uma partícula e seu número atômico se altere, este se transforma em um nuclídeo²³ diferente.

Ao observar o decaimento de uma dada amostra radioativa, constata-se que, além de estatístico, o número de partículas que decaem por unidade de tempo é proporcional ao número total (N) de partículas na amostra. Se essa taxa de variação for expressa na forma diferencial, tem-se

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

²² Tomando como exemplo: caso uma massa de 1 g fosse integralmente convertida em energia, ela seria da ordem de 10^{14} J, o equivalente ao consumo anual de energia elétrica de 1 milhão de pessoas.

²³ Nome dado a um núcleo caracterizado por um número atômico (Z) e um número de massa (A).

onde λ é a *constante de decaimento*, que mede a probabilidade de decaimento de um dado nuclídeo por segundo, e o sinal negativo significa que a quantidade de material na amostra diminui com o tempo.

Portanto, o decaimento radioativo obedece a uma lei exponencial do tipo

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

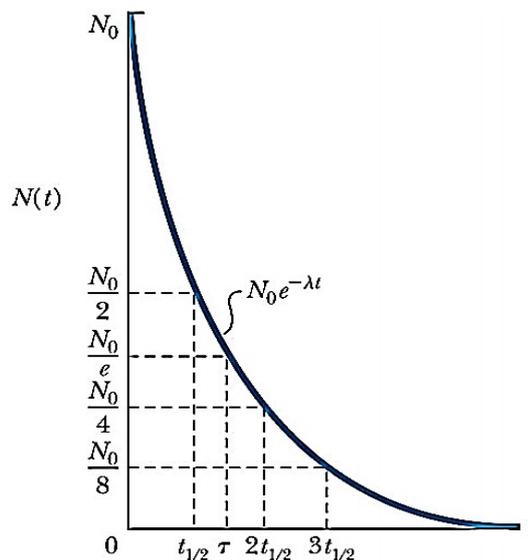
em que N_0 é o número de partículas radioativas no instante $t = 0$ e τ é a *vida média*, ou seja, o tempo médio que uma partícula da amostra leva para decair, sendo o inverso da constante de desintegração.

Uma forma usual para se medir a rapidez de uma desintegração é dada pelo tempo de *meia-vida* ($t_{1/2}$), ou *período de semidesintegração*, definido como o tempo necessário para desintegrar a metade dos átomos radioativos existentes em uma dada amostra. Logo, a meia-vida e a vida média se relacionam por

$$t_{1/2} = \tau \ln 2$$

A figura 7 mostra a *curva exponencial de decaimento*, que relaciona o número de partículas restantes na amostra em função do tempo decorrido.

Figura 7. Decaimento exponencial.



Fonte: Márcia Russman Gallas. Disponível em: http://www.if.ufrgs.br/~marcia/FN_aula2.pdf. Acesso em nov. de 2017.

É necessário ressaltar, que a meia-vida é uma característica de cada radioisótopo e independe da pressão, temperatura e do composto químico no qual ele esteja presente. Sua determinação fornece informações importantes sobre esse

isótopo, sendo útil para algumas aplicações da radioatividade, como a datação radiométrica²⁴, ou até mesmo na proteção contra a radiação.

Dentre as centenas de radioisótopos conhecidos, os valores de meia-vida variam de frações de segundos a bilhões de anos, como se pode ver na figura 8.

Figura 8. Radiação emitida e tempo de meia-vida de diferentes átomos radioativos.

Elemento	Meia-vida, $t_{1/2}$	Tipo de radiação emitida
²³⁸ U (urânio, z = 92)	4,5 bilhões de anos	
²³⁴ Th (tório, z = 90)	24,1 dias	α
²³⁴ Pa (protactínio, z = 91)	1,17 min	β
²³⁴ U(urânio, z = 92)	245 mil anos	β
²³⁰ Th (tório, z = 90)	8 mil anos	α
²²⁶ Ra (rádio, z = 88)	1620 anos	α
²²² Rn (radônio, z = 86)	3,8 dias	α
²¹⁸ Po(polônio, z = 84)	3,1 min	α
²¹⁴ Pb (chumbo, z = 82)	26,8 min	α
²¹⁴ Bi (bismuto, z = 83)	19,7 min	β
²¹⁴ Po(polônio, z = 84)	0,2 ms	β
²¹⁰ Pb (chumbo, z = 82)	22,3 anos	α
²¹⁰ Bi (bismuto, z = 83)	5,0 dias	β
²¹⁰ Po (polônio, z = 84)	138,4 dias	α
²⁰⁶ Pb (chumbo, z = 82)	ESTÁVEL	

Fonte: Ana Maria da Costa Ferreira. Disponível em <http://www.crq4.org.br/quimicaviva_energianuclear>. Acesso em nov. de 2017.

2.1.13 Emissões radioativas e as Leis da Radioatividade

Consoante ao que foi relatado na subseção 2.1.6, as principais emissões nucleares estudadas são as radiações alfa, beta e gama, sendo que as duas primeiras, por possuírem massa, podem também serem denominadas partículas.

As partículas alfa são núcleos de átomo de hélio, sendo relativamente lentas e pesadas. Por ter uma maior carga, seu poder de penetração é o menor das três emissões mencionadas; normalmente uma folha de papel as detém. Entretanto, e por isso mesmo, são as que possuem maior poder ionizante.

²⁴ Também conhecida por datação radioativa, é o procedimento utilizado para o cálculo da idade absoluta de uma rocha ou mineral que contenha certos radioisótopos, realizado através da medida da radiação emitida por esses materiais.

As partículas beta são elétrons (beta menos) e pósitrons²⁵ (beta mais) atirados em altíssima velocidade (próximas à velocidade da luz). Como possuem menor carga que as partículas alfa, são menos ionizantes e mais penetrantes que estas, conseguindo atravessar, por exemplo, uma folha de alumínio de alguns milímetros. Geralmente, ocorrem no decaimento de nuclídeos ricos em nêutrons.

A radiação gama, ou raios gama, são fótons emitidos em uma transição nuclear de um estado excitado para um estado de mais baixa energia. Como não possuem carga e nem massa, têm o maior poder de penetração das emissões, conseguindo penetrar cerca de 5 cm no chumbo ou concreto. Além disso, por serem ondas eletromagnéticas, sua emissão não altera o número atômico e o número de massa do elemento. Normalmente acompanham as emissões alfa e beta.

Tabela 2. Emissões radioativas e suas características.

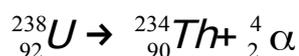
Nome da Radiação	Representação	Constituição	Carga relativa (e)	Massa relativa (u)	Poder de ionização	Poder de penetração
Alfa	${}^4_2\alpha$	2 prótons 2 nêutrons	+2	4	elevado	baixo
Beta	${}^0_{-1}\beta$	1 elétron	-1	0	moderado	moderado
Gama	${}^0_0\gamma$	onda eletromagnética	0	0	nulo ²⁶	elevado

Fonte: próprio autor.

Em vista das características apresentadas, o decaimento radioativo fica descrito pelas *Leis da Radioatividade*, que podem ser enunciadas da seguinte forma:

- 1ª Lei da Radioatividade ou 1ª Lei de Soddy: quando um átomo emite uma partícula alfa, seu número atômico diminui de duas unidades e sua massa atômica diminui de quatro unidades.

Para compreendê-la, tomemos como exemplo uma etapa da série de decaimento do urânio. Ao emitir uma partícula alfa, ele é transmutado a tório.



²⁵ O decaimento beta é mediado pela força nuclear fraca e também pode ser um pósitron (e^+ ou β^+), antipartícula do elétron, possuindo mesma massa que este, porém, carga positiva. Neste trabalho iremos nos limitar a analisar esse tipo de radiação somente como um elétron.

²⁶ Raios gama não ionizam diretamente outros átomos, mas podem fazer com que alguns átomos emitam outras partículas, causando ionização.

- 2ª Lei da Radioatividade ou 2ª Lei de Soddy (também conhecida por Lei de Fajans e Russel): quando um átomo emite uma partícula beta, seu número atômico aumenta de uma unidade e seu número de massa permanece inalterado.

Para exemplo, usaremos a série de decaimento anterior. Caso o tório venha a emitir uma partícula beta, formará o elemento protactínio, conforme a reação



Faz-se necessário salientar, que no decaimento β^- , o número atômico do elemento aumenta de uma unidade porque um nêutron se transforma: em um próton, que permanece no núcleo; em um elétron, que é a própria partícula beta; e também em um antineutrino do elétron, a antipartícula do neutrino do elétron, que possui carga nula e massa ínfima, mas que juntamente com o elétron são atirados com elevada energia²⁷ para fora do átomo.

A reação que descreve a transformação descrita acima é



2.1.14 Fissão Nuclear

O fato do nêutron possuir carga nula o torna muito eficaz para penetrar no núcleo, transpor sua energia de ligação e, conseqüentemente, produzir uma variedade de isótopos. Portanto, para romper um núcleo e separá-lo em seus constituintes, deve-se fornecer energia externa a ele. Essa energia pode ser obtida bombardeando-o com nêutrons. Uma posterior absorção de um nêutron por esse núcleo, origina uma energia interna extra ao conjunto, pois, conforme visto na subseção 2.1.11, a soma das massas das duas partículas interagentes é maior que a do núcleo que se forma.

Consciente disso, durante a década de 1930, o físico italiano Enrico Fermi (1901 - 1954) realizou experiências com nêutrons, partículas recém descobertas, obtendo importantes medidas e resultados.

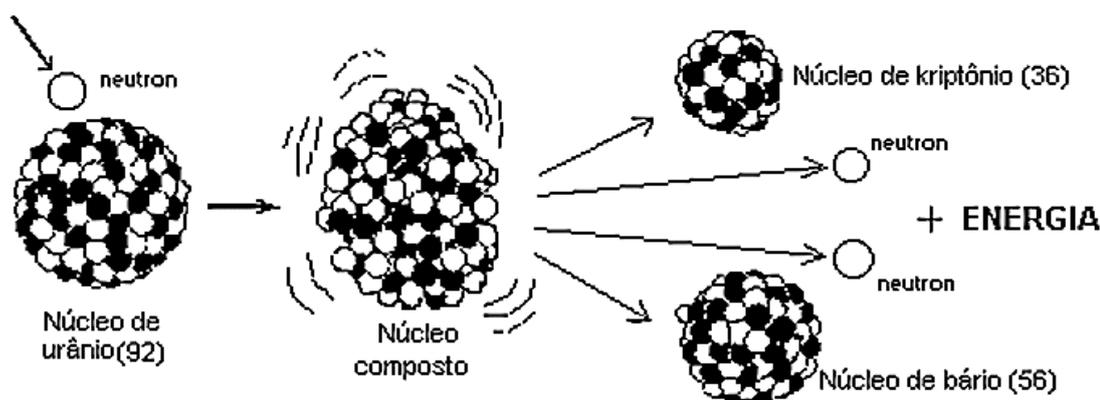
Em 1939, Otto Hahn (1879 – 1968) e Friedrich Wilhelm Strassmann (1902 -1980) relataram ter obtido o elemento bário após bombardear o urânio com nêutrons. Otto Robert Frisch (1904 – 1979) e Lise Meitner (1878 – 1968) interpretaram que essa “divisão” do urânio foi a responsável em originar um elemento com metade do seu peso, usando a expressão *fissão nuclear* para interpretar esse resultado.

²⁷ Em média, o neutrino leva 2/3 da energia e o elétron 1/3. (MURRAY, 2004, p.23)

Fermi, então, supôs que a fissão pudesse emitir, além da energia de ligação acumulada na formação daquele núcleo, outros nêutrons, podendo desencadear sucessivos processos de fissão. Essa possibilidade de uma reação em cadeia, gerando enorme quantidade de energia, foi de especial importância neste período da história, já que, em 1939, a Segunda Guerra Mundial começara e o desenvolvimento de seus fatos culminou na produção de artefatos nucleares.²⁸

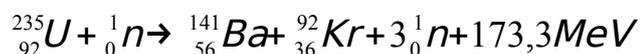
Estudos posteriores permitiram descrever melhor o processo de fissão, revelando que em alguns elementos pesados, como o urânio e o plutônio, essa interação provoca o rompimento do núcleo em dois outros núcleos menores, de massas semelhantes, acompanhado pela emissão imediata de um ou mais nêutrons, e seguido pelo decaimento beta dos fragmentos de fissão, além de uma quantidade enorme de energia, cerca de 200 MeV por núcleo (figura 9).

Figura 9. Exemplo de fissão do urânio.



Fonte: Seara da Ciência - UFC. Disponível em <http://www.seara.ufc.br/donafifi/curiemeitner/curiemeitner7.htm>. Acesso em nov. 2017.

Uma típica reação de fissão envolvendo o urânio é a seguinte:

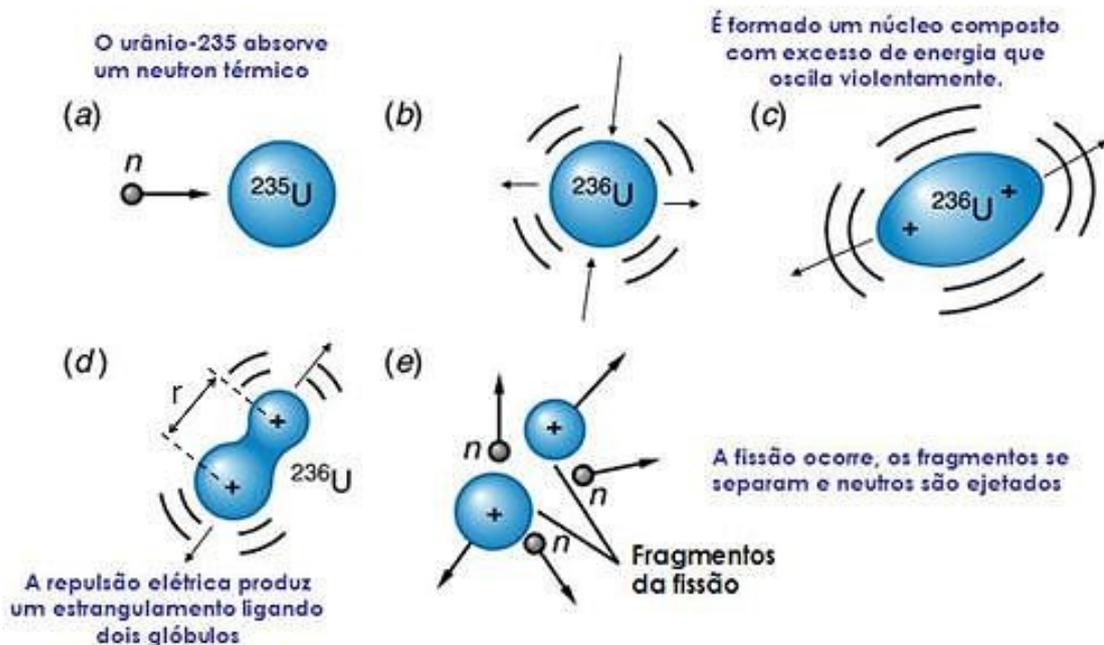


²⁸ A informação de que certos elementos como o plutônio, subproduto da fissão do urânio, pudessem servir como matéria prima para a produção de armas nucleares, aliada a hipótese de que o exército nazista estivesse na iminência de construí-las, fez com que cientistas proeminentes – como Szilard, Wigner, Sachs e Einstein – alertassem o então presidente dos Estados Unidos da América, Franklin Delano Roosevelt da necessidade de se conseguir produzi-las o quanto antes. Essa urgência resultou em um enorme projeto de pesquisa e desenvolvimento, denominado *Projeto Manhattan*, liderado pelo exército e marinha dos Estados Unidos, contando com o esforço e colaboração de cientistas de vários países, ao custo de U\$ 2 bilhões à época. Tal corrida fez com que, já em 1942, Fermi e seus colaboradores, em instalações da Universidade de Chicago, conseguissem realizar a primeira reação nuclear em cadeia. Entretanto, o primeiro teste de uma arma nuclear ocorreria somente em 1945.

A figura 10 mostra os estágios do processo de fissão, de acordo com o modelo baseado em uma analogia entre o núcleo e uma gota líquida eletricamente carregada, utilizado por Bohr e John Wheeler (1911 - 2008). Segundo esse modelo,

quando um nêutron colide com um núcleo de urânio e é absorvido, o núcleo de urânio começa a vibrar e sofre distorções. Esta vibração continua até que a distorção se torna tão grande que a interação nuclear não é suficiente para compensar a repulsão eletrostática entre os prótons do núcleo. Nesse ponto, o núcleo se parte em fragmentos, que são ejetados com uma energia cinética considerável. Esta energia estava contida no núcleo original principalmente na forma de energia potencial elétrica. (IGGE, 2017²⁹)

Figura 10. Etapas de um processo típico de fissão.



Fonte: Instituto Galileo Galilei para a Educação (IGGE). Disponível em: http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/bitstream/handle/mec/16306/open/file/05_teor%C3%ADa_frame.htm. Acesso em: nov. 2017.

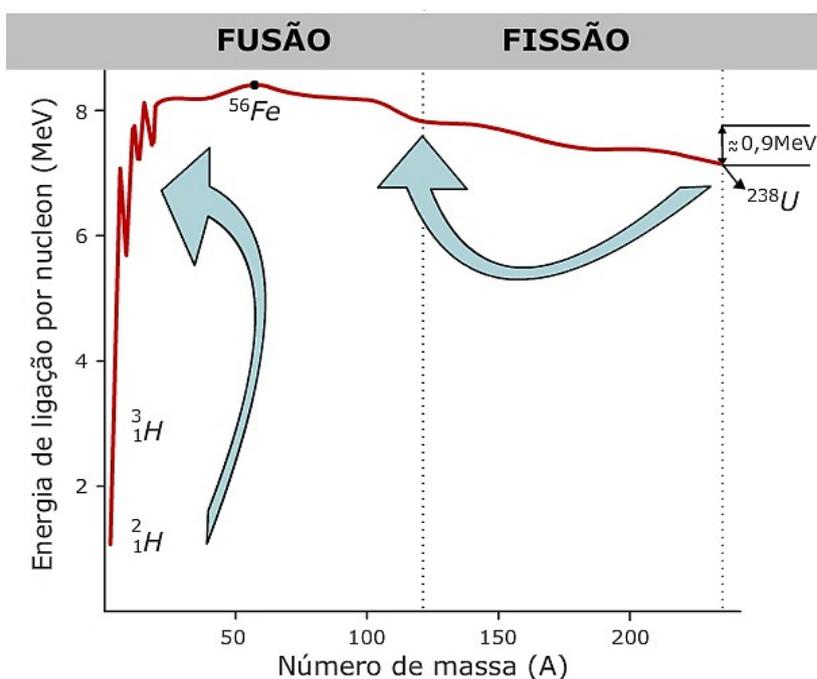
A maioria dos isótopos pesados, como por exemplo, o urânio-238, requer uma grande energia de excitação para levar o núcleo ao nível energético necessário para a fissão. Neste caso, a energia extra vem da própria energia cinética dos nêutrons incidentes, conhecidos como *nêutrons rápidos*, sendo da ordem de 1 MeV. Entretanto, alguns materiais originam a fissão com nêutrons de baixa energia (*nêutrons lentos* ou *térmicos*), sendo chamados de *materiais físséis*, como é o caso do urânio-235, um isótopo raro, na proporção de 7 para 1000 em relação ao U-238.

Para que o urânio seja utilizado como combustível na geração de energia em usinas nucleares, é preciso aumentar a proporção de U-235 para 3 a 5% da amostra. No caso de armas nucleares, esta proporção pode superar 90%. Tal processo é denominado *enriquecimento de urânio*, e industrialmente é realizado basicamente por dois métodos: a ultracentrifugação e a difusão gasosa.

2.1.15 Fusão Nuclear

De acordo com o apresentado na subseção 2.1.11, a energia de ligação é obtida da diferença entre a massa do núcleo e massa dos núcleons que o constitui. Contudo, uma grandeza mais conveniente para descrever a estabilidade de um núcleo é sua energia de ligação por núcleon, simplificada representada na figura 11.

Figura 11. Energia de ligação por núcleon em função do número de massa.



Fonte: Instituto Galileo Galilei para a Educação (IGGE). Disponível em:
http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/bitstream/handle/mec/16306/open/file/05_teorias_frame.htm.
 Acesso em: nov. 2017.

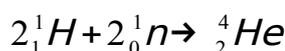
Em sua análise, é possível observar que o Fe-56 possui uma elevada energia de ligação por núcleon, sendo um dos núcleos mais estáveis na natureza. Além disso, observa-se que, caso algum núcleo à direita dele se divida em dois menores (fissão), os elementos resultantes serão mais estáveis que o núcleo fissionado, pois terão maior energia de ligação. O mesmo ocorre caso dois núcleos à esquerda do Fe-56 se juntem para formar um núcleo maior, em um processo

denominado *fusão nuclear*, onde dois núcleos mais leves se juntam para formar um núcleo mais pesado. Assim, da fusão podem resultar núcleos mais estáveis que àqueles interagentes.

Em relação à energia envolvida nesse processo,

as reações de fusão nuclear podem emitir ou absorver energia. Se os núcleos de fusão têm uma massa menor do que o ferro, a energia é liberada. Inversamente, se os núcleos atômicos que fundem são mais pesados do que o ferro, a reação nuclear absorve a energia. (ENERGIA NUCLEAR, 2018 ³⁰)

Para se ter uma dimensão da energia liberada, suponha que dois núcleos de hidrogênio se juntem com dois nêutrons para se formar um núcleo de hélio.



A diferença entre as massas dos interagentes e a do núcleo resultante será

$$2.1,007825u + 2.1,008665u - 4,002603u = 0,030377u$$

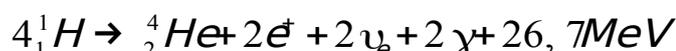
Lembrando que uma unidade de massa atômica ($1u$) vale $1,66 \cdot 10^{-27}$ kg, e utilizando a equação da equivalência massa-energia ($E=mc^2$), essa energia será de incríveis 28,3 MeV.

Como é possível constatar, a energia liberada nesse processo é enorme. No entanto, para que ele ocorra, é preciso uma energia que supere a fortíssima repulsão eletrostática entre as partículas. Classicamente, este evento seria impossível. Porém,

um dos resultados mais espetaculares da então nascente mecânica quântica foi obtido em 1928 por George Gamow, um físico russo radicado nos Estados Unidos. Ele derivou uma expressão matemática mostrando que era diferente de zero a probabilidade de duas partículas carregadas vencerem a repulsão coulombiana, chegarem muito próximas e fundirem. (GALETTI e LIMA, 2010, p. 76)

Atualmente, sabe-se que esses processos ocorrem no interior das estrelas, em razão de estas disporem de condições necessárias para que tais reações ocorram, como elevada temperatura e a gravidade para confinar e manter em ritmo constante essas reações.

No Sol, por exemplo, a fusão do hidrogênio ocorre primariamente segundo uma cadeia de reações chamada *cadeia próton-próton*, podendo ser resumida por



³⁰ Disponível em: <<https://pt.energia-nuclear.net/que-e-a-energia-nuclear/fusao-nuclear>>. Acesso em 28/01/18.

Diferentemente das estrelas, as reações de fusão são obtidas na Terra de duas maneiras: bombardeando o alvo com partículas carregadas e de alta energia, ou elevando a temperatura de um gás a um valor altíssimo, para que as condições necessárias sejam alcançadas.

Em relação à primeira hipótese, os aceleradores modernos conseguem obter partículas com energias da ordem de megaelétron-volt (MeV). Entretanto, a quantidade de energia requerida para isto excede a energia de fusão recuperável.

O segundo método, mais promissor, consiste do plasma, um meio elétrico altamente ionizado, com temperaturas da ordem de $4 \cdot 10^6$ K. Este plasma deve ser mantido, através de campos elétricos e magnéticos, por um tempo suficiente para que ocorram um número significativo de reações nucleares, o que é extremamente difícil, já que o plasma não pode encostar nas paredes do equipamento, pois inexistem dispositivos que não se fundam a uma temperatura tão elevada.

Até o momento, a humanidade conseguiu obter a fusão em *bombas de hidrogênio*³¹ (também conhecida por *bomba-H*), ou de maneira controlada em dispositivos como o Tokamak³², porém, somente em escala de laboratório, valendo-se para isso de métodos como o *confinamento magnético* e o ainda experimental, *confinamento inercial*³³. Entretanto, tais técnicas ainda têm se mostrado ineficazes.

De qualquer forma, mesmo com essas dificuldades, a fusão nuclear demonstra-se uma fonte de combustível mais limpa em relação à fissão, além de praticamente inesgotável. Ademais, como existe uma demanda cada vez maior por energia, o destino energético da humanidade parece ser inextricável dela.

Apesar disso, para que esse enorme potencial possa ser utilizado na produção de energia elétrica, conforme destaca GALETTI e LIMA (2010, p. 87),

é necessário, portanto, buscar mecanismos que mantem o plasma sem encostar nas paredes e que impeçam os produtos da fusão de atingi-las. A Natureza encontrou seu próprio jeito: o confinamento gravitacional. Mas, Ela tem a seu dispor grandes massas, espaço, tempo... e paciência.

³¹ Artefatos nucleares capazes de liberar energia da ordem de megatoneladas de TNT. Utiliza-se da energia liberada na explosão de uma bomba atômica (que funciona pela fissão nuclear) para alcançar a temperatura necessária para que ocorra a fusão do hidrogênio.

³² Reator experimental de fusão com um campo magnético toroidal.

³³ Resumidamente, é uma técnica que utiliza lasers ou feixe de íons pesados incidindo simetricamente sobre mini esferas, contendo deutério (²H) e trítio (³H), controlando a fusão desses elementos.

2.2 A Teoria de Vygotsky

2.2.1 Breve biografia de Lev Vygotsky

Lev Semenovitch Vygotsky (figura 12) nasceu em 17 de novembro de 1896, na cidade de Orsha, na Bielorrússia. Filho de uma família de origem judia, cresceu e viveu por um longo período em Gomel, na companhia de seus pais e de seus sete irmãos. Casou-se aos 28 anos com Roza Smekhova, com quem teve duas filhas.

Figura 12. Lev Semenovitch Vygotsky.



Fonte: Wikipedia. Disponível em <https://en.wikipedia.org/wiki/Lev_Vygotsky>. Acesso em 06/02/2018.

Sua educação, até os 15 anos, procedeu-se em casa, na companhia de tutores. Desde essa época, Vygotsky demonstrou-se um estudante dedicado e ávido por informações, além de possuir um grande interesse por temas de distintos campos do conhecimento, o que, juntamente com o aprendizado de diferentes línguas³⁴, permitiu que entrasse em contato com materiais de diversas procedências.

Em 1914, matriculou-se no curso de medicina da Universidade de Moscou, embora tenha se formado em Direito no ano de 1917, por essa mesma universidade. Durante o seu período acadêmico estudou simultaneamente História e Filosofia na Universidade Popular de Shanyavskii. Após a graduação, retornou para Gomel, onde, no período de 1917 a 1923, lecionou e proferiu palestras em várias instituições, sobre temas ligados a literatura, ciência e psicologia, além de escrever críticas literárias.

Causou grande surpresa e admiração após realizar uma palestra no II Congresso de Psicologia em Leningrado, sendo com isso convidado a trabalhar no Instituto de Psicologia de Moscou, convite do qual aceitou, se mudando para essa cidade. A partir deste momento, Vygotsky apresenta uma intensa produção intelectual.

³⁴ Vygotsky chegou a estudar alemão, latim, hebraico, francês e inglês. (REGO, 1995, p. 20)

De 1924 até o ano de sua morte, apesar da doença e das frequentes hospitalizações, Vygotsky demonstrou um ritmo de produção intelectual excepcional. Ao longo desses anos, além de amadurecer seu programa de pesquisa, continuou lecionando, lendo, escrevendo e desenvolvendo importantes investigações. Liderou também um grupo de jovens cientistas, pesquisadores da psicologia e das anormalidades físicas e mentais. (REGO, 1995, p. 24)

Apesar de ter morrido precocemente de tuberculose, aos 37 anos de idade, em 11 de junho de 1934, Vygotsky deixou uma grande herança teórica, que só veio de fato a ser conhecida e divulgada³⁵ no ocidente quando da primeira tradução de seu livro, *Pensamento e Linguagem*, lançado em 1962 nos Estados Unidos.

2.2.2 O construtivismo de Vygotsky

Diferentemente de outras teorias construtivistas, a ideia básica da teoria de Vygotsky reside no fato de as estruturas de pensamento do ser humano não serem genéticas, mas construídas ao longo de todo o seu desenvolvimento, por meio das relações sociais que este realiza no ambiente em que se insere.

Não é através do desenvolvimento cognitivo que o indivíduo torna-se capaz de socializar, é através da socialização que se dá o desenvolvimento dos processos mentais superiores. (DRISCOLL, 1995, p. 229)

Portanto, na perspectiva de Vygotsky, o desenvolvimento cognitivo é a conversão de relações sociais em funções mentais.

No desenvolvimento cognitivo de uma criança, toda função aparece duas vezes – primeiro em nível social e, depois, em nível individual – primeiro entre pessoas (interpessoal, interpsicológica) e depois se dá no interior do própria criança (intrapessoal, intrapsicológica). A interação social é o veículo fundamental para a transmissão dinâmica (de inter para intrapessoal) do conhecimento construído. Para Vygotsky, todas as funções mentais superiores se originam como relações entre seres humanos. (MOREIRA, 2009, p. 20)

Em outras palavras, essas relações configuram o meio pelo qual as conquistas culturais da espécie humana se transferem para as características próprias de cada indivíduo. Deve-se observar que

essa interação implica um mínimo de duas pessoas intercambiando significados; implica também um certo grau de reciprocidade e bidirecionalidade entre os participantes desse intercâmbio, trazendo a eles diferentes experiências e conhecimentos, tanto em termos qualitativos como quantitativos. (MOREIRA, 2009, p. 20)

³⁵ Vygotsky foi acusado de idealismo político pelo Comitê Central do Partido Comunista da URSS, tendo suas obras proibidas e, deste modo, tornando-se *persona non grata* – postumamente – nos círculos acadêmicos por quase duas décadas.

À vista disso, é necessário enfatizar a importância da interação social para Vygotsky, pois, é através dela que ocorre a aquisição de significados e a pessoa pode certificar-se de que compartilha dos significados socialmente aceitos para os signos³⁶ em questão. Portanto, e por isso mesmo, os significados são contextuais.

2.2.3 *Pensamento e Linguagem*

De acordo com VIGOTSKI (2001, p. 409), o pensamento não existe independentemente da palavra, mas sim porque a palavra existe. “O pensamento não se exprime na palavra, mas nela se realiza”.

Vygotsky aponta que é a existência da palavra – som com significado – e do pensamento – estrutura lógica de palavras que possibilita a comunicação entre os indivíduos – o que nos diferencia dos animais. Conseqüentemente, para ele, a fala é extremamente importante no desenvolvimento da linguagem. Por isso, considera que um momento essencial no desenvolvimento cognitivo da criança ocorra por volta dos dois anos de idade, quando ela descobre que cada coisa tem o seu nome.

[...] Ao ver o novo objeto, a criança pergunta: “como isso se chama?”. A própria criança necessita da palavra e procura ativamente assimilar o signo pertencente ao objeto, signo esse que lhe serve para nomear e comunicar.
[...] É como se a criança descobrisse a função simbólica da linguagem.
(VYGOTSKI, 2001, p. 273)

Em vista disso, Vygotsky define dois conceitos de inteligência: a prática e a abstrata. A primeira se refere ao uso de instrumentos; a segunda - da qual a linguagem faz parte - à utilização de signos e sistemas de signos.

Embora a inteligência prática e a fala se desenvolvam separadamente nas primeiras fases da vida da criança, elas convergem. A primeira manifestação dessa convergência ocorre quando a criança começa a falar enquanto resolve um problema prático. No entanto, para Vygotsky a fala egocêntrica é o uso da linguagem para controlar e regular o comportamento da criança e não reflete o pensamento egocêntrico. (GARTON, 1992, p. 93)

Assim, Vygotsky entende que o fenômeno da linguagem egocêntrica e toda sua evolução, no sentido da abreviação³⁷ e fragmentação, seja o instrumento de transição da linguagem exterior (a do meio que a criança vive) para a linguagem interior, tornando possível a realização do pensamento verbal da criança. É neste

³⁶ Como MOREIRA (2009, p. 19) define, um instrumento é algo que pode ser usado para fazer alguma coisa; um signo é algo que significa alguma coisa.

³⁷ Vygotsky utiliza o termo *predicalização* para essa abreviação da fala egocêntrica, que ocorre com maior frequência pouco antes de ela se extinguir na criança. Nesta etapa, ela cada vez mais faz uso da fala egocêntrica. Entretanto, e para isso, quase não utiliza-se de verbos, mas de predicados em demasia, atitude que acredita ser inerente ao processo cognitivo de interiorização da linguagem.

momento que as curvas da evolução do pensamento e da fala, até então separadas, cruzam-se e se superpõem.

Em síntese, pode-se dizer que

o desenvolvimento da linguagem no ser humano vai da fala social (linguagem como comunicação) para a fala egocêntrica (linguagem como mediadora) e desta para a fala interna. Esta, por sua vez, reflete uma independência cada vez maior em relação ao contexto extralingüístico que se manifesta através da abstração que leva à conceitualização de objetos e eventos do mundo real. A internalização da fala leva à independência em relação à realidade concreta e permite o pensamento abstrato flexível, independente do contexto externo (GARTON, 1992, p. 92-3).

2.2.4 Formação de Conceitos

De certo modo, pode-se definir conceito como o significado de uma palavra.

As palavras, portanto, como signos mediadores na relação do homem com o mundo são, em si, generalizações: cada palavra refere-se a uma classe de objetos, consistindo num signo, numa forma de representação dessa categoria de objetos, desse conceito. (LA TAILLE, 1992, p.28)

Logo, do ponto de vista de Vygotsky, os conceitos são construções culturais, internalizadas pelo indivíduo ao longo do seu processo de desenvolvimento.

Partindo dessa ótica, Vygotsky pôde estabelecer três fases principais do processo de desenvolvimento de conceitos no cérebro humano, denominando e enumerando-as, na seguinte ordem: 1ª) *amontoados* ou *agregações sincréticas*, que se inicia na época mais precoce da infância, onde a criança agrupa objetos desiguais de maneira ordenada; 2ª) *pensamento por complexos*, a mais longa, onde além de agrupar os objetos, a criança obtêm relações entre eles; 3ª) *conceitos potenciais*, fase que requer a abstração de algum traço em comum entre diferentes objetos.

É preciso destacar o papel fundamental que a palavra desempenha em todas essas etapas para Vygotsky, como se pode verificar na seguinte afirmação:

é precisamente com ela que a criança orienta arbitrariamente a sua atenção para determinados atributos, com a palavra ela os sintetiza, simboliza o conceito abstrato e opera com ele como lei suprema entre todos aquelas criadas pelo pensamento humano. (VYGOTSKI, 2001, p.226)

Como resume GASPAR (2014, p. 118), “Vygotsky conclui que a formação do ‘verdadeiro conceito’ na criança só ocorre à medida que ela adquire o domínio dos conceitos potenciais e, ao mesmo tempo, desenvolve o pensamento por complexos.” Ainda, “só na adolescência a criança chega ao pensamento por conceitos e conclui o terceiro estágio da evolução do seu intelecto”. (VYGOTSKI, 2001, p.228)

Em relação aos conceitos, Vygotsky os classifica em duas categorias: espontâneos - aqueles que a criança adquire na sua vivência cotidiana - , e científicos (não espontâneos), aqueles que não são assimilados em sua forma já pronta, mas por um processo de desenvolvimento, como no ensino formal.

Mesmo possuindo origens distintas, Vygotsky defende que há uma interdependência entre eles, decorrente das relações existentes entre o conceito científico e o objeto. Além disso, acredita que a aprendizagem de conceitos científicos só ocorre quando há o domínio dos conceitos espontâneos correlatos.

Embora os conceitos científicos e espontâneos se desenvolvam em sentidos opostos, os dois processos estão intimamente ligados. O desenvolvimento de um conceito espontâneo deve atingir certo nível para que a criança seja capaz de assimilar o conceito científico a ele relacionado. [...] No seu lento trabalho ascendente, o conceito espontâneo abre caminho para o desenvolvimento descendente do conceito científico. Ele cria uma série de estruturas necessárias [...] que lhe dão corpo e vitalidade. Os conceitos científicos, por sua vez, fornecem estruturas para o desenvolvimento ascendente em direção à sua conscientização e uso deliberado. (VYGOTSKY, 1986, p. 194)

2.2.5 Zona de desenvolvimento proximal

Vygotsky define como zona de desenvolvimento proximal (ZDP)³⁸

a distância entre o nível de desenvolvimento cognitivo real do indivíduo, tal como medido por sua capacidade de resolver problemas independentemente, e o seu nível de desenvolvimento potencial, tal como medido através da solução de problemas sob orientação de alguém (um adulto, no caso de uma criança) ou em colaboração com companheiros mais capazes. (VYGOTSKY, 1988, p.97)

Com este conceito, Vygotski (2001, p. 328) defende sua tese, “segundo a qual a criança orientada, ajudada e em colaboração sempre pode fazer mais e resolver tarefas mais difíceis do que quando sozinha”.

Os resultados obtidos em suas pesquisas reforçam essa convicção.

Tendo verificado que a idade mental de duas crianças era, digamos, de oito anos, nós apresentamos em seguida, a cada uma, problemas que elas não seriam capazes de resolver sozinhas e oferecemos alguma assistência: o primeiro passo para a solução, uma questão orientadora, ou outra forma de ajuda. Nós descobrimos que uma criança pode, em cooperação, resolver problemas destinados a uma criança de doze anos, enquanto a outra não vai além de problemas dirigidos a crianças de nove anos. A defasagem entre a idade mental real da criança e o nível que ela atinge resolvendo problemas com assistência indica a zona de seu desenvolvimento proximal; em nosso exemplo, essa zona é de quatro anos para a primeira criança e de um para a segunda. (VYGOTSKY, 1986, p. 187)

³⁸ Também referida por alguns autores como zona de desenvolvimento imediato (ZDI).

Contudo, Vygotsky ressalta que o professor não precisa descobrir ou tentar avaliar qual a ZDP de seus alunos, já que elas não possuem limites tão nítidos, pois, além de serem individuais, são dependentes também do conteúdo apresentado.

Dessa maneira, o professor que adota a ZDP como referencial teórico, deve apresentar conteúdos que estejam imediatamente adiante dessas estruturas. Assim, para atingir todos os seus alunos, basta que ele trabalhe um pouco além do que avalia ser o estágio atual de desenvolvimento deles. Porém, sem relegar a importância de se avançar em relação ao nível de conhecimento já atingido, pois, o ensino, quando orientado para aquilo que os alunos já sabem ou são capazes de fazer, é inútil para seu desenvolvimento cognitivo. (GASPAR, 2014, p.198)

O ensino seria totalmente desnecessário se pudesse utilizar apenas o que já está maduro no desenvolvimento, se ele mesmo não fosse fonte de desenvolvimento e surgimento do novo. (VYGOTSKI, 2001, p. 334)

2.2.6 A imitação para Vygotsky

Mesmo indo de encontro à posição defendida por muitos pesquisadores de ensino, Vygotsky acredita que é pela imitação que a criança consegue, em cooperação, ir além do que iria se estivesse estudando sozinha.

[...] Para imitar é necessário possuir os mesmos meios para pensar de algo que se sabe para conhecer algo novo. Com assistência, toda criança pode fazer mais do que faz por si só – mas só dentro dos limites do seu nível de desenvolvimento. (VYGOTSKY, 1986, p. 187-8)

Entretanto, como se pode notar, Vygotsky deixa claro que há um limite no desenvolvimento cognitivo nesta cooperação.

Se a imitação não tivesse limites, qualquer criança seria capaz de resolver qualquer problema com a assistência de um adulto. Mas não é o caso. A criança é mais bem sucedida resolvendo aqueles problemas que estão próximos daqueles que ela consegue resolver sozinha; à medida que as dificuldades crescem, ao atingir certo nível, a criança fracassa, qualquer que seja a assistência fornecida. (VYGOTSKY, 1986, p. 187-8)

Para ele, diferentemente do que ocorre nos animais, a imitação nos humanos não é puramente uma atividade mecânica, uma vez que promove o seu desenvolvimento cognitivo e, conseqüentemente, conduz à aprendizagem.

O mais inteligente dos animais é incapaz de desenvolver-se intelectualmente por imitação. No desenvolvimento da criança, ao contrário, imitação e ensino desempenham o papel principal. Fazem emergir qualidades especificamente humanas da mente e levam a criança a novos níveis de desenvolvimento. Na aprendizagem da fala, assim como dos conteúdos escolares, a imitação é indispensável. O que a criança pode fazer hoje em cooperação ela poderá fazer sozinha amanhã. (VYGOTSKY, 1986, p. 188)

Portanto, na perspectiva de Vygotsky, para que o professor consiga interiorizar no aluno uma nova estrutura de pensamento, com o aluno tornando-se capaz de fazer o que o professor faz, é preciso que o professor se deixe imitar. Assim, para que haja aprendizagem é importante que este conduza sua prática pedagógica no sentido de poder ser imitado. (GASPAR, 2014, p.189)

Para Vygotsky, a imitação não reduz a criatividade ou a imaginação nos alunos justamente por considerar ser esta última uma função vital necessária nos humanos. Considera que em razão da plasticidade cerebral, o cérebro conserva a experiência anterior, facilitando sua reprodução.

O cérebro não é apenas o órgão que conserva e reproduz nossa experiência, mas também o que combina e reelabora, de forma criadora, elementos de experiência anterior erigindo novas situações e novo comportamento. Se a atividade do homem se restringisse à mera reprodução do velho, ele seria um ser voltado somente para o passado, adaptando-se ao futuro apenas na medida em que este reproduzisse aquele. É exatamente a atividade criadora que faz do homem um ser que se volta para o futuro, erguendo-o e modificando o seu presente. (VYGOTSKI, 2009, p. 14)

Ainda em relação à imaginação, Vygotsky destaca também que esta não surge do vazio e que as experiências anteriores contribuem na sua formação.

A imaginação origina-se exatamente desse acúmulo de experiência. Sendo as demais circunstâncias as mesmas, quanto mais rica é a experiência, mais rica também deve ser a imaginação. (VYGOTSKI, 2009, p. 22)

2.2.7 Vygotsky e o Ensino

Segundo Vygotsky, o ensino está sempre à frente do desenvolvimento cognitivo. Conforme GASPAR (2014, p. 138) coloca,

Em síntese, mais uma vez, as pesquisas realizadas por Vygotsky mostraram esta mesma relação temporal: a aprendizagem sempre precede o desenvolvimento. Ao contrário do que a teoria de Piaget propõe, para Vygotsky é inútil esperar que uma estrutura de pensamento se concretize na mente de uma criança para que seja possível ensinar-lhe determinado conteúdo, pois é o ensino, ou melhor, a aprendizagem que promove o desenvolvimento dessa estrutura de pensamento.

Dessa forma, além de evidenciar a precedência do ensino sobre o desenvolvimento, Vygotsky propõe que uma criança só pode desenvolver as estruturas de pensamento que lhe permitem aprender determinado conteúdo, quando lhe ensinarem este conteúdo.

No entanto, aponta que não se pode ignorar o tempo necessário para que essa estruturação ocorra.

Quando a criança estuda alguma operação aritmética ou algum conceito científico, o desenvolvimento dessa operação ou desse conceito apenas começa; a curva do desenvolvimento não coincide com a curva da instrução escolar; em geral, a instrução precede o desenvolvimento. (VYGOTSKY, 1986, p.185)

Sendo assim, é possível inferir, pelas concepções de Vygotsky, que não é errado ensinar conceitos prontos a partir de sua definição, visto que o ensino de novos conteúdos deve antecipar-se à existência das estruturas necessárias a sua aprendizagem.

Nosso estudo experimental provou que não só é possível ensinar as crianças a empregar conceitos, mas que tal “interferência” pode influenciar favoravelmente o desenvolvimento de conceitos que tenham sido formados pelo próprio estudante. Mas o mesmo estudo mostra que introduzir novos conceitos significa apenas iniciar o processo de sua apropriação. A introdução deliberada de novos conceitos não exclui o seu desenvolvimento espontâneo, mas mapeia os novos caminhos para isso. (VYGOTSKY, 1986, p.152)

Para Vygotsky, todos os conteúdos podem estimular o desenvolvimento cognitivo, não havendo diferenças significativas no processo de ensino e aprendizagem em decorrência da natureza da disciplina ou do modo de apresentá-la. “Todos os conteúdos básicos do ensino escolar atuam como uma disciplina formal, cada um facilitando a aprendizagem dos outros”. (VYGOTSKY, 1986, p.186)

Por fim, é preciso enfatizar o papel de mediador indispensável nas interações sociais que o professor desempenha na teoria de Vygotsky, pois, ele representa a figura de quem já internalizou significados socialmente compartilhados. Assim, o aluno deve, de alguma maneira, devolver ao professor o significado que captou, verificando se este também é aceito socialmente. Desse modo, a interação social pode ser interpretada como um *intercâmbio de significados*, fundamental para a aprendizagem e, conseqüentemente, para o desenvolvimento cognitivo.

Conforme MOREIRA (2009, p. 23) destaca,

sem interação social, ou sem intercâmbio de significados, dentro da zona de desenvolvimento proximal do aprendiz, não há ensino, não há aprendizagem e não há desenvolvimento cognitivo. Interação e intercâmbio implicam, necessariamente, que todos envolvidos no processo ensino-aprendizagem devam falar e tenham oportunidade de falar.

Capítulo 3

A Sequência Didática

Neste capítulo é descrito a estrutura e metodologia da sequência didática. Porém, antes dessa descrição, apresentamos um modelo de planejamento bimestral que consideramos adequado para a realização deste trabalho. Para reforçarmos esta posição, expomos também algumas justificativas pela nossa escolha em se abordar certos tópicos de Física Moderna antes da aplicação da sequência didática.

3.1 Planejamento bimestral

Em um planejamento de ensino tradicional, o conteúdo de Física Moderna tende a ocupar uma carga horária correspondente a um bimestre de duas aulas semanais, sendo geralmente o quarto bimestre do terceiro ano do ensino médio. Como agravante, é habitual que este último bimestre seja o mais dinâmico de todos eles, frequentemente possuindo o menor número de aulas disponíveis, devido principalmente às atividades inerentes ao final do ano letivo.

Inserida nessa realidade, esta sequência didática pressupõe que alguns conteúdos típicos de Física Moderna para o ensino médio sejam abordados anteriormente a sua aplicação (tabela 3). Entretanto, a anterior abordagem desses tópicos não deve ser interpretada como uma exigência, mas sim, como uma sugestão, podendo ocorrer tanto antes quanto depois do tema Física Nuclear ser abordado, sem comprometer assim sua aplicação. Portanto, tal escolha se dará conforme preferência e/ou disponibilidade do professor aplicador.

Na tabela 3 se encontra uma proposta de distribuição de aulas para um bimestre baseado nas condições expostas anteriormente.

Assim, dentro do planejamento bimestral que sugerimos, as primeiras seis aulas destinam-se a uma breve revisão do assunto Ondas Eletromagnéticas, bem como a abordagem de tópicos de Física Quântica e Relatividade Especial, adaptados ao nível de tratamento dessa etapa de ensino. As demais aulas são reservadas à sequência didática (8 aulas) propriamente dita e às eventuais avaliações (2 aulas) a serem aplicadas ao longo do bimestre.

Tabela 3. Cronograma para um bimestre de 16 aulas³⁹. Foram reservadas 2 aulas para eventuais avaliações.

TÓPICOS	CRONOGRAMA
<p><u>I. NOÇÕES DE FÍSICA QUÂNTICA E RELATIVIDADE</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Ondas Eletromagnéticas • Radiação do Corpo Negro <ul style="list-style-type: none"> • Efeito Fotoelétrico • Modelo Atômico de Bohr • Dualidade Onda-Partícula e Princípio da Incerteza <ul style="list-style-type: none"> • Relatividade Especial 	6 aulas
AVALIAÇÃO I	1 aula
<p><u>II. FÍSICA NUCLEAR</u> (SEQUÊNCIA DIDÁTICA)</p> <ul style="list-style-type: none"> • O Núcleo Atômico • Estabilidade Nuclear • Instabilidade Nuclear • Datação Radioativa <ul style="list-style-type: none"> • Fissão Nuclear • Fusão Nuclear • Seminários de Física Nuclear 	8 aulas
AVALIAÇÃO II	1 aula

Fonte: próprio autor.

3.1.1 Física Moderna anterior à Sequência Didática

Nossa preferência pela abordagem de tópicos de Física Quântica e Relatividade Especial antecedendo à sequência didática serão justificados a seguir. Neste ponto, é importante destacar que se baseando nos resultados obtidos durante as aplicações (Capítulo 4), tal escolha mostrou-se bastante adequada, embora, como enfatizado, não seja obrigatória para a realização deste trabalho.

³⁹ Diante das dificuldades relatadas e outras que por ventura possam surgir durante a prática pedagógica, apresentamos aqui um planejamento bimestral de somente dezesseis aulas, número que consideramos acessível de se obter em grande parte das instituições de ensino, e que julgamos necessário para uma satisfatória aplicação deste trabalho.

Uma aula para se rever (caso já tenha sido tratado) o conteúdo de Ondas Eletromagnéticas, juntamente com alguns conceitos básicos de eletromagnetismo (como noções de campos elétrico e magnético), demonstra-se útil para introduzir o tema Física Moderna, pois, desta forma, os estudantes conseguem perceber a radiação térmica como fruto da oscilação de cargas elétricas, além de recordarem conceitos de ondulatória importantes para o entendimento de Física Moderna, como frequência e comprimento de onda. Ainda em relação a esses últimos itens, facilitam também a compreensão da quantização da energia, proposta em 1901 por Max Planck, bem como a explicação do Efeito Fotoelétrico dada por Albert Einstein em 1905.

A abordagem do modelo atômico proposto por Niels Bohr (1913), anteriormente à descoberta do núcleo atômico por Ernest Rutherford (1911), assunto abordado na Aula 01 – O núcleo atômico (*Seção 3.4*), mesmo que cronologicamente errada, mostra-se eficaz para um melhor entendimento a respeito do núcleo atômico pelos estudantes, por deixar de maneira mais nítida a distinção entre o átomo e ele, já que uma parcela significativa dos alunos apresentam uma tendência errônea em associar o elétron à estrutura do núcleo, fato constatado durante as aplicações da Aula 01 (*Seção 4.1*).

O tema Relatividade Especial, conjunto à equação de equivalência massa-energia ($E = mc^2$) de Albert Einstein, quando abordados anteriormente à sequência didática, contribuem para uma melhor compreensão dos estudantes da diferença entre a massa do núcleo atômico e a massa de seus constituintes, tomados separadamente. Consequentemente, ajuda-os a compreenderem melhor a origem da energia responsável por manter o núcleo coeso.

3.2 Estrutura da Sequência Didática

Conforme apresentado (tabela 3), nossa sequência didática está estruturada em oito aulas regulares de cinquenta minutos. As seis primeiras aulas destinam-se aos conteúdos de Física Nuclear que consideramos essenciais a serem abordados nesta etapa de ensino, enquanto as duas aulas finais são reservadas às apresentações de seminários pelos estudantes sobre assuntos relacionados à Física Nuclear, previamente escolhidos por eles.

A distribuição abaixo apresenta, juntamente com o título, os principais tópicos trabalhados em cada uma destas aulas.

- Aula 01 – O Núcleo atômico: apresentação; sua estrutura e dimensão.
- Aula 02 – Estabilidade nuclear: sua origem; relação entre os constituintes do núcleo.
- Aula 03 – Instabilidade nuclear: revisão de estrutura atômica; introdução à radioatividade e emissões radioativas.
- Aula 04 – Datação Radioativa: apresentação do conceito de meia-vida; análise quantitativa e aplicações da datação radioativa.
- Aula 05 – Fissão Nuclear: origem da energia nuclear e a fissão como um processo em usinas termonucleares.
- Aula 06 – Fusão Nuclear: introdução; a natureza nuclear da energia do Sol; origem dos elementos químicos.
- Aulas 07 e 08 – Seminários apresentados pelos estudantes sobre o uso e aplicações da física nuclear na sociedade.

3.3 Metodologia da Sequência Didática

Procurando motivar o máximo possível os estudantes, buscamos utilizar estratégias distintas, tais como o uso de textos, vídeos, gráficos, tabelas e atividades práticas. Procuramos também explorar a interação social entre eles, fazendo com que trabalhassem em pequenos grupos (cerca de três alunos), a fim de discutirem entre si e entre os grupos, possíveis soluções para as atividades propostas.

Em nossas aplicações, as escolhas dos grupos foram feitas livremente pelos alunos, muito em função da afinidade existente entre eles. Porém, ressaltamos que tais constituições ficam a critério do professor, levando-se em consideração, por exemplo, a quantidade de alunos e de material disponível. Recomendamos que nestas seis primeiras aulas os grupos não excedam quatro estudantes, uma vez que, caso isso ocorra, acreditamos comprometer esse intercâmbio de significados, devido ao tempo limitado que possuem para a realização das atividades.

Com exceção dos seminários (Aulas 07 e 08), em cada aula foi entregue aos estudantes uma folha-roteiro (Apêndices I ao VI), contendo os textos e questões propostas para a referida aula, além dos espaços necessários para as respectivas respostas. Ao final dessas aulas, era pedido que uma das folhas-roteiro do grupo fosse entregue ao professor, para que este pudesse fazer a análise e o acompanhamento das atividades. Ainda em relação a essa abordagem, em todas as nossas aulas foi utilizado um projetor (*data show*) para a exibição de vídeos e imagens, e também para

que o professor realizasse a leitura dos textos e questões junto aos alunos. Desta forma, durante a leitura, é possível adicionar informações que se considere convenientes para ajudá-los a atingirem os objetivos propostos. Além disso, o uso de apresentações mostra-se um excelente temporizador, com o professor pré-determinando o intervalo de mudança que julgue necessário entre a troca dos *slides*.

Ao início de cada aula, excetuando-se as duas últimas, em formato de seminários, foi direcionado à turma uma pergunta, denominada “*Questão Introdutória*”, a qual, além de funcionar como ponto de partida para uma pequena discussão do tema da aula, pode fornecer uma breve concepção dos conhecimentos prévios dos estudantes acerca do assunto em pauta.

De maneira semelhante, ao final das cinco primeiras aulas, era lançada uma pergunta, chamada “*Para pensar!!!*”, cujas respostas eram discutidas com a classe no início da aula seguinte ⁴⁰. Com essa estratégia, pretendemos despertar a curiosidade dos estudantes e manter um vínculo com o conteúdo da próxima aula, justamente pelo fato de tal questão finalizadora funcionar como questão introdutória da aula subsequente. Ademais, é uma forma encontrada de se utilizar do tempo extraclasse do estudante, ou seja, dar um maior tempo para ele aprender o conteúdo, o que do ponto de vista da teoria de Vygotsky é fundamental para que se formem as estruturas necessárias para a sua aprendizagem.

Neste ponto, vale destacar, que não enxergamos como problema caso alguns dos grupos cheguem às aulas seguintes com respostas prontas, obtidas de alguma fonte externa, como, por exemplo, da internet. Pois, entendemos que o principal objetivo desta estratégia é o de tentar estimular a curiosidade dos estudantes acerca do tema em estudo. Portanto, o simples fato do aluno ir à pesquisa de uma resposta à questão proposta, a nosso ver, pode ser interpretado como sinal de um mínimo interesse ao tema. Ainda, caso esta procura não ocorra de forma espontânea (por exemplo, originária de uma forma de avaliação), ao menos, dessa maneira, um pequeno vínculo com o conteúdo da aula anterior estará estabelecido, criando-se assim, uma condição necessária para que haja sequência ao assunto em estudo.

⁴⁰ Neste caso, o professor irá optar em cobrar ou não, como forma de avaliação, a entrega dessas respostas. Em nossas aplicações atribuímos uma pequena pontuação a elas. De certo modo, nosso objetivo foi criar um comprometimento dos estudantes com a sequência didática.

3.4 Planejamento da Aula 01 – O Núcleo Atômico

3.4.1 Objetivos

O principal objetivo desta primeira aula é introduzir os estudantes ao tema Física Nuclear, apresentando-os aos constituintes do núcleo atômico e a sua escala de dimensão, algo bem distante do senso comum dos alunos. Espera-se que ao final dessa aula os estudantes sejam capazes de:

- descrever qualitativamente a composição do núcleo atômico;
- operar com Algarismos Significativos e potências na base 10;
- calcular grandezas que envolvam valores da escala nuclear à astronômica;
- comparar, de forma relativa, a dimensão do núcleo atômico à de outros corpos.

3.4.2 Metodologia

Por se tratar da primeira aula, é interessante que o professor comece-a fazendo uma breve explicação para os alunos da metodologia a ser adotada na sequência didática. Tal atitude pode representar uma economia de tempo nas demais aulas, por deixá-los cientes do procedimento e comportamento a serem seguidos.

Realizada a apresentação, é entregue a folha-roteiro (Apêndice I), com a turma sendo dividida em pequenos grupos. Em seguida, é lançada à classe a questão: “*O quão pequeno é o núcleo atômico e qual sua constituição?*”. Dado certo tempo para responderem (cerca de 5 minutos), pede-se que os grupos leiam suas respostas.

Feita as leituras, é apresentado um pequeno vídeo⁴¹, produzido pelo Canal Socratica, sobre os primeiros modelos atômicos, o qual foi editado para ser exibido apenas a parte em que destaca a experiência realizada por Rutherford, que resultou na descoberta do núcleo atômico (do instante 2:32 ao 4:20). Cessada a exibição, pede-se para os estudantes responderem à questão 2, onde devem encontrar a razão entre as dimensões do átomo e do núcleo atômico, a partir da análise da razão entre os valores em porcentagem das partículas que atravessavam diretamente a lâmina de ouro e aquelas que colidiam com os núcleos dos átomos do material. A seguir, é pedido que anotem este valor no lugar apropriado da tabela na folha-roteiro. Dado

⁴¹ Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kT2sHBF9Q3k>>. Acessado em julho de 2016.

aproximadamente 10 minutos para resolverem a questão, pede-se para um dos grupos, utilizando o quadro, justificar sua resposta.

Na sequência, é exibido o vídeo do astrofísico Danail Obreschkow⁴², mostrando as dimensões de alguns corpos, desde o núcleo, ao universo observável. Ao seu término, é apresentado à classe a tabela da folha-roteiro (Tabela 4 abaixo).

Tabela 4 – Ordem de grandeza (em metros) dos mais variados “objetos” do universo.

Ordem de Grandeza	Prefixo	Símbolo	Objeto	Ordem de Grandeza	Prefixo	Símbolo	Objeto
10 ⁻¹⁷	-----	-----	Elétron	10 ⁰	-----	-----	Pessoa
10 ⁻¹⁵	femto	f	Próton	10 ¹	deca	da	Poste
? ?	-----	-----	NÚCLEO	10 ²	hecto	h	Arranha-céu
10 ⁻¹⁰	ångström	Å	Átomo	10 ³	quilo	k	Morro da Urca
10 ⁻⁹	nano	n	Molécula DNA	10 ⁴	-----	-----	Ponte Rio-Niterói
10 ⁻⁸	-----	-----	Vírus	10 ⁶	mega	M	Lua
10 ⁻⁷	-----	-----	Bactéria	10 ⁷	-----	-----	Terra
10 ⁻⁶	micro	μ	Cromossomo	10 ⁸	-----	-----	Júpiter
10 ⁻⁵	-----	-----	Célula humana	10 ⁹	giga	G	Sol
10 ⁻⁴	-----	-----	Ácaro	10 ¹³	-----	-----	Sistema Solar
10 ⁻³	mili	m	Piolho	10 ¹⁵	peta	P	Nebulosa da Raia
10 ⁻²	centi	c	Formiga	10 ²¹	zetta	Z	Via Láctea
10 ⁻¹	deci	d	Laranja	10 ²⁶	-----	-----	Universo observável

Fonte: próprio autor.

Dando continuidade, pede-se para os alunos responderem à questão 3, onde devem escolher dois objetos da tabela acima que, comparando suas ordens de grandeza, melhor preencham as lacunas da seguinte frase: “Se o átomo fosse do tamanho _____, o núcleo seria do tamanho _____.
Justifique sua escolha.”

Aguardado em torno de 5 minutos para que respondam, é pedido para os grupos lerem sua resposta, comparando-a com as da turma.

Na última parte da aula, lança-se a questão: “Se o núcleo é constituído exclusivamente de cargas positivas, que se repelem, por que ele permanece unido?”, onde os alunos deverão trazer a resposta para a próxima aula.

⁴² Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=jfSNxVqprvM>>. Acessado em julho de 2016.

3.4.3 Resultados esperados

Acreditamos que a primeira questão levantada à turma: *“O quão pequeno é o núcleo atômico e qual sua constituição?”*; funciona como um bom ponto de partida, podendo fornecer ao professor os conhecimentos prévios dos estudantes acerca do núcleo atômico. Assim, o educador poderá analisar qual a dimensão nuclear imaginada pelos alunos, assim como sua constituição. É provável que o professor encontre respostas variáveis e vagas, como *“muito pequeno”*; *“menor que um grão de areia”*; e também respostas incompatíveis: *“do tamanho de uma célula”*; *“feito de prótons, nêutrons e elétrons”*; etc.

A exibição do vídeo sobre o experimento de Rutherford, seguido da questão 2, tem como objetivo explicar ou relembrar aos estudantes que o átomo possui um núcleo minúsculo, onde concentra-se sua carga positiva e quase toda sua massa. Espera-se que os estudantes percebam pelos resultados do experimento, que o núcleo deve possuir uma dimensão de apenas 0,01% da dimensão do átomo. Portanto, devem encontrar a razão de 10^4 entre suas dimensões, ou seja, que o átomo é cerca de 10.000 vezes maior que o núcleo.

O vídeo do astrofísico Danail Obreschkow vem para causar certo impacto visual nos estudantes sobre as diversas ordens de grandeza encontradas no universo, do micro ao macro. Serve também para demonstrar a pequenez do núcleo e a existência de um grande “vazio” entre este e o átomo.

Na questão 3, espera-se que os estudantes consigam comparar a razão das dimensões do átomo e do núcleo à razão da dimensão de dois outros corpos que se encontram na tabela 1 da folha-roteiro. Interpretamos o fato de que, ao se dar liberdade para os estudantes escolherem os dois corpos, ao invés de se fornecer uma comparação já determinada, como comumente se é adotado em materiais da área, facilite tanto para que compreendam a diferença entre os tamanhos do átomo e do núcleo, quanto para avaliar se conseguiram ou não operar com estes valores, expressos em potências na base 10.

Na última parte da aula, a questão intitulada *“Para pensar!!!”*, funciona como uma situação-problema, servindo para estimular a curiosidade dos estudantes no assunto e manter um vínculo para a próxima aula.

3.5 Planejamento da Aula 02 – Estabilidade Nuclear

3.5.1 Objetivos

Nesta segunda aula, dando continuidade à questão finalizadora da aula anterior, que indagava sobre o motivo do núcleo ser coeso, é abordado com os alunos a origem da estabilidade nuclear, bem como a relação entre seus núcleons, além de apresentar aos estudantes, na forma de uma atividade experimental com bolinhas de isopor, fita adesiva e molas, um modelo teórico para o núcleo atômico. Modelo este que, mesmo em um primeiro momento aparentando ser lúdico, demonstra-se eficiente (Seção 4.2) para que os estudantes consigam alcançar os objetivos abaixo:

- descrever a relação entre a força forte e a força elétrica;
- compreender a função do nêutron no núcleo atômico;
- analisar a relação entre o número de prótons e o número de nêutrons com a estabilidade nuclear;
- compreender a curva de estabilidade nuclear.

3.5.2 Metodologia

A aula inicia-se com os grupos apresentando suas respostas à pergunta finalizadora da aula anterior, a saber: *“Se o núcleo é constituído exclusivamente de cargas positivas, que se repelem, por que ele permanece unido?”*.

Realizadas as leituras, a turma novamente é dividida em pequenos grupos, para a realização da atividade experimental (Apêndice VIII), que consiste na construção de um modelo de núcleo atômico, utilizando-se para isso: bolinhas de isopor (com aproximadamente 5 cm de diâmetro); pequenas molas (pedaços de espirais plásticos usados em encadernações, com aproximadamente 4 centímetros de comprimento); fita adesiva dupla face. Dependendo das condições, como o número de alunos e a disponibilidade de material, pode-se utilizar mais bolinhas na atividade para a representação do núcleo atômico, ou então, grupos com mais ou menos alunos. Entretanto, julgamos ser suficiente o uso de apenas três bolinhas de isopor por grupo: duas para representar os prótons e uma para representar o nêutron. Além disso, acreditamos que o uso de grupos com apenas 3 alunos, evita-se com que alguns estudantes fiquem sem participar da atividade.

O principal objetivo desta prática é que os alunos possam perceber a importância do nêutron na estabilidade nuclear. Em um primeiro momento, pede-se

para os estudantes ligarem somente duas bolinhas, que representam os dois prótons. Para isso, é preciso que utilizem, necessariamente, uma mola e um pedaço de fita adesiva. A mola deve ser fixada nos “polos” das bolinhas⁴³. A fita adesiva é fixada de tal maneira a juntá-las, na posição em que o estudante preferir. Na etapa seguinte é pedido para inserirem o nêutron na ligação. Para isso, devem utilizar dois pedaços de fita adesiva no nêutron, um para cada próton ligado a ele. O tempo estimado para a execução de toda a atividade experimental é de 15 a 20 minutos.

Após as montagens experimentais, é distribuído a folha-roteiro (Apêndice II) e os estudantes devem responder a sua questão 1, que se refere aos constituintes do núcleo atômico, contendo perguntas nas quais as respostas baseiam-se nos resultados obtidos durante a atividade prática, o que deve levar cerca de 5 minutos.

Em seguida, é pedido que os alunos respondam a sua questão 2, onde é apresentada uma representação gráfica (*Curva de estabilidade nuclear*), a partir da qual eles têm de analisar a relação existente entre o número de prótons e o número de nêutrons com a estabilidade nuclear. Estima-se que os estudantes a respondam em no máximo 10 minutos.

Na última parte da aula, é lançado à classe a seguinte questão finalizadora: “*Como um núcleo instável pode se tornar estável?*”. Os alunos devem trazer a resposta para a próxima aula.

3.5.3 Resultados esperados

A introdução com a leitura das respostas da questão finalizadora da aula anterior, funciona, de certo modo, como um vínculo aos conteúdos trabalhados na presente aula. Conforme já relatamos, não interpretamos como um problema caso os estudantes apresentem respostas obtidas de alguma fonte externa, pois, o objetivo essencial neste momento da aula, é o de despertar o interesse dos alunos no porquê de um núcleo atômico ser estável, já que há uma enorme força de repulsão eletrostática entre os prótons, além também de prepará-los para a atividade prática que será realizada na sequência.

⁴³ Para que haja uma repulsão nas bolinhas (prótons) provocada pela mola (espiral), é necessário que esta esteja ou comprimida, ou esticada na ligação. Novamente, com o intuito de se evitar um maior uso de materiais, optamos por utilizar pequenos pedaços de mola. Em virtude disto, e do tamanho das bolinhas (5 cm), foram usados pedaços de espiral de aproximadamente 4 cm, para que, desta forma, ao serem fixados nos polos das bolinhas, ficassem levemente esticados, forçando as bolinhas a descolarem e, conseqüentemente, provocando uma instabilidade na ligação.

Espera-se que a montagem experimental consiga responder à pergunta inicial sobre a origem da estabilidade nuclear. A expectativa é que os estudantes notem que a configuração com apenas prótons não é estável, mesmo sendo possível; e que a montagem do núcleo ficará mais fácil, estável e coesa ao se adicionar o nêutron na ligação. A questão 1, com perguntas a respeito dos constituintes do núcleo, serve para tentar verificar se os alunos compreenderam essas relações entre eles.

É provável que os estudantes cheguem a questão de número 2, sobre a curva de estabilidade, já com uma resposta sólida acerca da origem da estabilidade nuclear e da relação entre o número de prótons e o número de nêutrons ($Z \times N$), obtida em grande parte durante a atividade experimental. Portanto, espera-se que, principalmente no seu item b), os alunos percebam que à medida que se aumenta o número de prótons, é preciso uma maior presença de nêutrons para que o equilíbrio (estabilidade) do núcleo seja alcançado.

Por fim, a questão *“Como um núcleo instável pode se tornar estável?”*, serve como um vínculo para a próxima aula.

3.6 Planejamento da Aula 03 – Instabilidade Nuclear

3.6.1 Objetivos

Intimamente ligada à aula anterior, sobre a estabilidade nuclear, a terceira aula da sequência didática apresenta as consequências da instabilidade do núcleo, introduzindo os estudantes ao conceito de Radioatividade Natural, além de brevemente lembrá-los alguns conceitos de estrutura atômica, como número de massa, número atômico, carga elementar e isótopos. Também é apresentada as principais características das emissões radioativas: alfa, beta e gama.

Após as citadas introdução e revisão, é esperado que ao seu final os estudantes saibam:

- compreender os conceitos de número de massa, número atômico e isótopo;
- compreender os conceitos de carga e massa relativas;
- descrever o fenômeno da radioatividade natural;
- analisar a constituição e as principais características das emissões alfa, beta e gama.

3.6.2 Metodologia

No primeiro momento da aula, é pedido para os grupos lerem sua resposta da questão finalizadora da aula anterior: “*Como um núcleo instável pode se tornar estável?*”. Após as leituras, distribui-se a folha-roteiro (Apêndice III) à turma, onde é apresentado o texto I, intitulado *Cargas e massas relativas*, que como o nome indica, revisa alguns conceitos básicos como carga e massa relativas, assim como alguns valores fundamentais, entre eles, a carga do elétron e a massa do próton. Em seguida, devem resolver a questão 1, em que é necessário completar uma tabela (*Massas e cargas relativas*) com os valores relativos da carga e massa do nêutron e do elétron. Estima-se que a leitura do texto e a resolução desta questão leve em torno de 10 minutos.

Na etapa seguinte, é apresentado o texto II (*Estrutura atômica*), que faz uma revisão de alguns conceitos básicos, como número de massa, número atômico e isótopos. Após sua leitura, os estudantes respondem à questão 2, que pede para se determinar o número de nêutrons dos seguintes isótopos: urânio-235 e urânio-238. Os alunos não devem levar mais que 8 minutos para concluir esta etapa.

Na sequência, é apresentado o texto III (*Radioatividade*), que define de maneira sucinta o que é Radioatividade e como ocorre este fenômeno. Na sequência, exibe-se um vídeo de autoria da CCEAD/PUC-RJ ⁴⁴, de aproximadamente 2 minutos de duração, o qual foi editado a fim de se destacar a parte histórica da Radioatividade, como sua descoberta e algumas contribuições de Marie Curie e Henri Becquerel a essa área de estudo. Em seguida, é apresentada a tabela (*Emissões radioativas*), inicialmente incompleta, contendo algumas características das emissões radioativas, a qual os estudantes devem preenchê-la à medida que se pede nos três exercícios seguintes. Na questão de número 3, por exemplo, é solicitado que os estudantes a completem com a constituição da radiação alfa e com a carga e massa relativa das emissões apresentadas.

Na questão 4, os estudantes devem classificar essas radiações quanto ao seu poder de ionização, além de completar as lacunas da figura (*Desvios sofridos pelas radiações no experimento realizado por Ernest Rutherford*) com o respectivo nome da emissão que ali incide, após atravessar uma região de campo elétrico. Dando continuidade, na questão 5, é pedido para classificar essas emissões, na coluna

⁴⁴ Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=tO3QMbiAhRI>>. Acessado em agosto de 2016.

adequada da tabela, quanto ao seu poder de penetração, bem como completar as lacunas da figura (*Poder de penetração das radiações*), com o nome da radiação correspondente. Todo esse processo (resolução das questões 3, 4 e 5) deve levar cerca de 20 minutos.

Por fim, é apresentada à turma a questão: “*Como é determinada a idade de um fóssil?*”; cuja resposta deve ser entregue pelos alunos na aula seguinte.

3.6.3 Resultados esperados

Como ao final da aula anterior foi lançada uma pergunta a respeito da instabilidade nuclear, é de se esperar que os alunos cheguem a esta aula trazendo dúvidas a respeito das condições de um núcleo atômico alcançar sua estabilidade, mesmo se já possuírem alguma resposta que consideram como certa.

A inclusão do texto I fez-se necessária para que, em um momento posterior da aula, os alunos consigam compreender a representação e a constituição das radiações citadas, principalmente a radiação alfa, por ser a única destas três a possuir uma massa relativa diferente de zero. A questão 1 foi colocada para analisar se os estudantes compreenderam a relação existente entre a massa e a carga do próton, quando comparadas aos correspondentes valores para o elétron, conforme descrito no texto I. Espera-se que os alunos percebam que como a massa do próton e do nêutron são muito maiores (aproximadamente 1836 vezes) que a do elétron, ela é utilizada como massa de referência. Analogamente, como os nêutrons não possuem carga e a carga do próton e do elétron são iguais em módulo, utiliza-se essa intensidade como carga elétrica de referência.

A questão 2 vem para constatar se os estudantes compreenderam os conceitos de número de massa, número atômico e isótopos, apresentados no texto II, além de verificar se são capazes de representar ou identificar um núcleo atômico qualquer.

O vídeo exibido é uma forma de se introduzir, por uma abordagem histórica, o fenômeno da radioatividade, assim como dois dos principais personagens desta história, Marie Curie e Henri Becquerel. Além disso, espera-se que tal vídeo seja capaz de mostrar a natureza nuclear e não química deste fenômeno, como é comum dos alunos erroneamente associarem.

O texto III, sobre a radioatividade, faz uma breve introdução ao conceito, e a tabela em sua sequência, intencionalmente incompleta, apresenta algumas

características das emissões alfa, beta e gama. Tal atitude foi tomada para verificar se os alunos são capazes de completá-la utilizando os conhecimentos adquiridos nos textos anteriores (textos I, II e III), e à medida que novas informações vão sendo fornecidas nos enunciados dos exercícios decorrentes (questões 3 a 5).

Assim, na questão 3, espera-se que a partir da análise dos textos I e II, os estudantes sejam capazes de completarem as colunas correspondentes à constituição da radiação alfa, bem como a carga e massa relativas das três radiações. Julgamos necessário já termos preenchido as células relativas à constituição das radiações beta e gama, por não ser intuitivo tal preenchimento pelos alunos utilizando-se somente das informações fornecidas a eles.

Na questão 4, espera-se que os estudantes sejam capazes de associar o poder de ionização ao módulo da carga elétrica da radiação, em que, para isso, aborda-se uma figura representando o experimento realizado por Rutherford, onde os alunos devem associar a trajetória seguida por cada radiação, com o sinal da carga elétrica (se existente) que ela transporta.

De maneira semelhante, na questão 5, é esperado que os estudantes percebam o poder de penetração da radiação como inversamente proporcional ao módulo de sua carga elétrica. Para isso, utiliza-se de uma figura, onde mostra-se três distintas radiações atravessando diferentes objetos (papel, alumínio e chumbo).

A questão finalizadora: *Como é determinada a idade de um fóssil?*; por aparentar aos estudantes se tratar de um assunto tão distinto dos conteúdos vistos até o presente momento da sequência didática, pode despertar grande curiosidade nos alunos no porquê de sua presença, o que deve motivá-los na procura de uma resposta à pergunta proposta.

3.7 Planejamento da Aula 04 – Datação Radioativa

3.7.1 Objetivos

Diferentemente das aulas anteriores, voltadas aos conceitos e fundamentos teóricos, a quarta aula da sequência didática possui um foco maior nas aplicações e no uso da energia nuclear, sem, contudo, deixar de fazer uma abordagem de alguns conceitos matemáticos, como a progressão geométrica e a curva de decaimento exponencial. Dessa forma, espera-se que ao seu final, os estudantes sejam capazes de:

- compreender o conceito de meia-vida ou período de semidesintegração;
- analisar a curva e a lei do decaimento radioativo;
- descrever a datação radioativa;
- compreender algumas aplicações do uso de radioisótopos.

3.7.2 Metodologia

Ao início da aula, os estudantes devem ler as respostas à questão finalizadora da aula anterior: “*Como é determinada a idade de um fóssil?*”. Em seguida, assim como nas aulas anteriores, são divididos em pequenos grupos e é realizada com a turma a leitura do texto I da folha-roteiro (Apêndice IV), que contém a definição de meia-vida, e de uma tabela com o valor de meia-vida de alguns elementos, que serão úteis no decorrer da aula. Após serem apresentados a essas informações, deverão responder as questões de 1 a 3.

Na questão 1 é pedido que os alunos completem uma tabela que relaciona a quantidade restante (em %) na amostra a cada intervalo de meia vida decorrida. Em seguida, na questão 2, os estudantes devem completar a curva de decaimento radioativo, utilizando os valores obtidos na questão anterior. Na sequência, a questão 3 pede que os alunos completem uma tabela, relacionando a fração de material radioativo restante na amostra (A) à quantidade de amostra inicial (A_0) em cada intervalo de meia-vida decorrida. Além disso, devem encontrar uma expressão que forneça a quantidade restante na amostra após decorrido um número n qualquer de meias-vidas. Estima-se que os estudantes levem aproximadamente 20 minutos para a resolução dessas questões, juntamente com a leitura do texto I.

Posteriormente, os alunos farão a leitura do texto II, extraído e adaptado da revista *Mundo Estranho*⁴⁵, explicando como é determinada a idade de um fóssil. Em seguida, devem responder à questão 4, onde é pedido para completarem uma tabela com o radioisótopo que é melhor indicado para a realização de cada procedimento citado. É esperado que toda essa etapa seja resolvida em cerca de 15 a 20 minutos.

Por último, serão apresentados à questão finalizadora “*De onde vem a energia que mantém o núcleo unido?*”, a ser entregue na próxima aula.

⁴⁵ Disponível em: <<http://mundoestranho.abril.com.br/materia/como-e-determinada-a-idade-de-um-fossil>>. Acessado em agosto de 2016.

3.7.3 Resultados esperados

A questão finalizadora da aula anterior: “*Como é determinada a idade de um fóssil?*”, por se tratar de uma pergunta envolvendo uma aplicação prática de determinado conceito, deve despertar a curiosidade dos estudantes em descobrir o que um assunto aparentemente tão diferente, possa ter relação com a sequência didática centrada no tema Física Nuclear. Por ser a datação radioativa um tema incomum à grande maioria dos estudantes de ensino médio, espera-se que aqueles alunos que não obtiveram uma resposta diretamente de alguma fonte, como a internet, tragam respostas baseadas, por exemplo, no estado de decomposição do fóssil.

A tabela com a meia-vida de alguns elementos, juntamente com a definição desse conceito apresentada no texto I, funcionam como referência para a resolução das questões que se seguem, principalmente da questão 4. Espera-se que essas informações sejam necessárias para que os alunos consigam: completar a tabela com a quantidade restante na amostra a cada meia-vida (questão 1); “visualizar” a curva de decaimento radioativo (questão 2); chegar à expressão matemática do decaimento radioativo (questão 3).

Em relação a essa última questão, caso o professor julgue necessário que os estudantes adquiram, além dos conceitos anteriormente abordados, também uma boa compreensão quantitativa da datação radioativa, pode-se adicionar alguma outra pergunta ou exercício que envolva o uso desta expressão matemática.

O texto II sobre o carbono-14 será usado como fonte de informação para a questão 4, bem como parâmetro de referência para que o aluno compare com sua resposta dada à questão introdutória. Espera-se que os estudantes associem o uso do radiocarbono na datação de alguns fósseis, como o do *Homo sapiens*, ao fato do carbono ser um dos principais componentes dos seres vivos, além de seu período de meia-vida ser compatível com a idade dos fósseis geralmente encontrados para essa espécie (algumas dezenas de milhares de anos).

Esta relação entre a ordem de grandeza da idade do fóssil, com a meia-vida dos radioisótopos apresentados na primeira tabela, deve ser estabelecida também na escolha do urânio-238 na datação de rochas (determinação da idade da Terra), onde julga-se ser conhecido pelos estudantes, provavelmente das aulas de ciências, o fato do nosso planeta possuir alguns bilhões de anos. Espera-se ainda que os alunos associem a escolha do iodo-131 na realização de exames de cintilografia

da tireoide a sua baixa meia-vida e também em virtude deste radioisótopo ser absorvido pela glândula tireoide, estando presente na composição da tiroxina, um hormônio sintetizado por essa glândula, cuja carência pode provocar o hipotireoidismo, uma doença provavelmente já estudada pelos estudantes nas aulas de biologia.

A questão finalizadora: “*De onde vem a energia do núcleo?*”, além de instigar a curiosidade dos alunos e manter um vínculo com a aula seguinte, como esperado nas questões homônimas que a antecedeu, vem para retomar o foco da sequência didática às questões teóricas a respeito do tema Física Nuclear.

3.8 Planejamento da Aula 05 – Fissão Nuclear

3.8.1 Objetivos

A quinta aula da sequência didática retorna à questão da estabilidade nuclear, assunto já tratado na segunda aula. Entretanto, diferentemente da primeira abordagem, esta aula aprofunda-se na origem da energia responsável pela coesão do núcleo atômico, dando enfoque à equivalência massa-energia, tendo como plano de abordagem o processo de fissão nuclear, além de sua principal utilização, a geração de energia elétrica.

Após essas relações, espera-se que os estudantes saibam:

- compreender e utilizar a equivalência massa-energia;
- trabalhar com unidades distintas de energia;
- compreender o empacotamento nuclear;
- descrever o processo de fissão nuclear;
- descrever o processo de geração de energia elétrica em uma usina nuclear.

3.8.2 Metodologia

A aula inicia-se com a leitura das respostas da questão finalizadora da aula anterior: *De onde vem a energia que mantém o núcleo unido?*

Feita as leituras, os estudantes serão apresentados ao texto I da folha-roteiro (Apêndice V) que defini sucintamente a equivalência massa-energia, além de apresentar a equação $E = mc^2$, proposta em 1905 por Albert Einstein, relacionando essas duas grandezas. Em seguida, irão responder às questões 1 e 2. Na primeira

dessas questões, é pedido que os estudantes encontrem qual seria a energia liberada, em joule e em quilowatt-hora, se uma massa de 1 kg fosse integralmente transformada em energia. Na segunda, é perguntado qual seria o número de brasileiros que esse valor de energia seria capaz de abastecer anualmente, baseado em um consumo médio anual de energia elétrica de um brasileiro ($2,5 \cdot 10^3$ kWh). É estimado que esta etapa, leitura do texto I e resolução das questões 1 e 2, seja executada pelos estudantes em torno de 15 minutos.

Na sequência, os alunos farão a leitura dos textos II e III. O primeiro deles (*Empacotamento nuclear*) é sobre a diferença da massa do núcleo em relação a massa de seus constituintes, quando tomados separadamente. O segundo (*Fissão nuclear*), apresenta de forma simplificada esse processo.

Realizadas as leituras, será exibido à turma um vídeo, intitulado *Energia Nuclear em 2 minutos*⁴⁶, de autoria da empresa Eletrobras Eletronuclear. Como o próprio nome sugere, trata-se de um pequeno vídeo resumindo o processo de produção de energia elétrica em uma usina nuclear. Após sua exibição, os alunos devem responder à questão 3, onde, utilizando a equação da equivalência massa-energia, devem determinar qual porcentagem da massa de urânio se transforma em energia, quando 1 kg desse material sofre um processo de fissão nuclear.

A seguir, os estudantes responderão à questão 4, em que, ao compararem alguns valores de energia envolvidos nos processos atômicos e nucleares, precisam determinar quantas vezes esses últimos são mais energéticos que os primeiros. Espera-se que os estudantes resolvam esta etapa, constituída dos textos II e III, e das questões 3 e 4, em aproximadamente 20 minutos.

Na última parte da aula é lançada a questão finalizadora: “*De onde vem a energia do Sol?*”; a qual os grupos devem trazer sua resposta para a próxima aula.

3.8.3 Resultados esperados

A questão introdutória “*De onde vem a energia que mantém o núcleo unido?*”, retoma uma discussão mais teórica do assunto Física Nuclear, diferentemente da aula anterior, focada mais na aplicabilidade do tema. Assim, a leitura das respostas a essa questão pode funcionar também como um breve resumo dos assuntos já trabalhados até o momento.

⁴⁶ Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=OzxiQdmTD58>>. Acessado em agosto de 2016.

A escolha em se discutir a equivalência massa-energia, anteriormente à diferença entre a massa do núcleo e a soma das massas de seus constituintes, foi proposital, pois, desta forma, os estudantes primeiro compreendem que massa pode ser transformada em energia - e vice-versa -, para que depois possam entender de onde surgiu a energia necessária para manter o núcleo unido e, posteriormente, relacionar de onde vem a energia liberada nos processos nucleares.

A questão 1, além de mostrar o quanto enorme é a energia contida em uma pequena massa (1 kg), recorda também a unidade de energia quilowatt-hora, muito utilizada no cotidiano. A questão 2 corrobora com sua antecessora, ao mostrar que esse valor de energia é equivalente ao consumo médio anual de energia elétrica de uma quantidade expressiva de brasileiros, a saber, 10 milhões.

O texto sobre o empacotamento nuclear (texto II), além de responder à questão da origem da energia de ligação do núcleo, reforça também nos alunos o quanto o conceito de massa e energia estão estritamente relacionados. Em seguida, acreditamos que a breve definição de fissão nuclear apresentada no texto III seja suficiente para os estudantes compreenderem que, neste processo, há a quebra de um núcleo maior em outros dois núcleos menores, com grande liberação de energia, armazenada na formação daquele núcleo fissionado.

Na questão 3, espera-se que a discrepância entre o valor da energia liberada pela fissão total de 1 kg de urânio, expresso em seu enunciado ($9 \cdot 10^{13}$ J), com aquele encontrado anteriormente na solução da questão 1 ($9 \cdot 10^{16}$ J), atente nos estudantes que apenas uma pequena parte da massa (aproximadamente 0,1%) é convertida em energia nesse processo nuclear, e que essa diferença de energia é aquela acumulada na formação do núcleo, responsável por sua ligação.

A questão 4 trata-se de uma estimativa para mostrar aos estudantes o quanto mais energéticos (cerca de 10^7 vezes) são os processos nucleares em relação aos processos atômicos. Reforça também o fato da sequência didática abordar processos que envolvem propriedades distintas das propriedades químicas, muito provavelmente já estudada pelos alunos.

Por fim, esperamos que a questão finalizadora “*De onde vem a energia do Sol?*”, desperte nos estudantes o desejo em querer saber a origem da energia solar, responsável pela manutenção da vida em nosso planeta, além de quererem entender qual a relação de tal pergunta com o tema Física Nuclear.

3.9 Planejamento da Aula 06 – Fusão Nuclear

3.9.1 Objetivos

A sexta e última aula da sequência didática, antes das apresentações dos seminários sobre Física Nuclear pelos alunos, faz uma breve introdução à fusão nuclear, abordando a origem de elementos químicos e, principalmente, a origem da energia do Sol. Para obter êxito, além de textos e vídeo, são propostas questões envolvendo cálculos que corroboram a origem nuclear e não química da energia dessa estrela. Assim, ao final da aula, espera-se que os estudantes saibam:

- analisar dados a respeito do Sol;
- resolver proporções e operações com potências na base 10;
- descrever o processo de fusão nuclear;
- reconhecer a origem nuclear da energia do Sol;
- relacionar a fusão nuclear à origem de elementos químicos.

3.9.2 Metodologia

A aula inicia-se com a leitura das respostas à questão proposta ao final da aula anterior: “*De onde vem a energia do Sol?*”. Em seguida, distribui-se a folha-roteiro (Apêndice VI) à turma e é apresentado o texto I (*O Sol*), onde é informado alguns dados sobre esta estrela, como sua idade e constituição. Após sua leitura, pede-se para os alunos responderem às questões de 1 a 3, em que é suposto a energia do Sol ser de origem química, como, por exemplo, a energia extraída da queima de carvão.

Na primeira dessas questões, após ser fornecido em seu enunciado a energia liberada na queima de 1 kg de carvão e a luminosidade média do Sol, pede-se para os estudantes determinarem quantos quilos por segundo desse combustível (carvão) o Sol deveria consumir para manter sua luminosidade.

Na questão posterior, dada a massa do Sol e utilizando-se do resultado obtido na questão anterior, os alunos devem determinar, em anos, o tempo que essa estrela levaria para esgotar seu combustível.

Dando continuidade, na terceira questão, os estudantes precisam comparar o resultado encontrado na segunda questão com a idade do Sol fornecida no texto I, justificando se é possível que sua energia seja de origem química.

A expectativa é que a turma realize a leitura do texto I e resolva as questões de 1 a 3 em cerca de 20 minutos.

A próxima etapa consiste na leitura do texto II, onde, como o próprio nome sugere, é definido o processo de fusão nuclear. Feita a sua leitura, os alunos devem responder às questões 4 e 5, em que, diferentemente das anteriores, trata as reações de fusão como responsáveis pela origem nuclear da energia do Sol.

Na questão 4, após ser fornecido a massa de hidrogênio do Sol e o consumo por segundo desse elemento em reações de fusão no interior dessa estrela, é pedido que os alunos determinem, em bilhões de anos, o tempo que levaria para que todo o seu hidrogênio se extinguisse, caso fosse mantido constante este consumo. Em seguida, a quinta questão pede para os estudantes compararem o resultado obtido na questão 4 com o valor da idade do Sol fornecida no texto I, justificando se faz sentido que sua energia seja de origem nuclear. A resolução dessas duas questões, juntamente com a leitura do texto II, deve levar por volta de 15 minutos.

Na última parte da aula, é mostrado um pequeno vídeo didático (*Rock Star e a origem do Meta*⁴⁷), do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, de aproximadamente 3 minutos, que trata da formação dos elementos químicos no interior das estrelas. Após assisti-lo, os estudantes devem responder de maneira sucinta à questão 6, comentando o porquê de se poder afirmar que somos poeira das estrelas. Tal resposta deve levar aproximadamente 5 minutos.

3.9.3 Resultados esperados

A vinculação proposta com a pergunta final da aula anterior “*De onde vem a energia do Sol*” servirá, primeiramente, para despertar a curiosidade dos estudantes em o que as estrelas têm em comum com o assunto Física Nuclear. Posteriormente, poderá ajudá-los a perceber como o tema em estudo está mais presente em certos fenômenos do que poderiam imaginar. Na sequência, o texto I, intitulado *O Sol*, serve para informar e, possivelmente, lembrar aos estudantes algumas informações importantes sobre essa estrela.

Na questão 1, onde é feita a hipótese de a energia do Sol ser de origem química, espera-se que os alunos percebam a proporção entre sua luminosidade ($4,0 \cdot 10^{26}$ J/s) e a energia liberada ($3,0 \cdot 10^7$ J) na queima de 1 kg de carvão, para que consigam obter um valor de aproximadamente $1,33 \cdot 10^{19}$ kg desse combustível queimados por segundo, necessários para manter essa luminosidade. De modo

⁴⁷ Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=wIEhSl1oEI>>. Acessado em setembro de 2016.

análogo, na segunda questão, os estudantes devem analisar a proporção entre a massa do Sol ($2,0 \cdot 10^{30}$ kg) e o valor obtido na questão anterior, para encontrarem o resultado de $1,5 \cdot 10^{11}$ segundos, que na sequência deverá ser convertido, resultando em 5000 anos o tempo que o Sol levaria para consumir esse combustível.

Assim, é esperado que na questão 3 os estudantes compreendam que o valor encontrado na questão 2 é muito inferior a idade do Sol apresentada no texto I (5 bilhões de anos), não sendo possível que sua energia possa ser de origem química, como, por exemplo, aquela extraída da queima de carvão.

O texto II é uma breve introdução à fusão nuclear, onde decidimos apresentar a ideia fundamental desse processo e a sua ocorrência no interior das estrelas, esperando que os alunos interpretem esse fenômeno como a junção de dois núcleos menores para a formação de um maior, com liberação de grande energia.

As questões 4 e 5 servem para constatar a origem nuclear e não química da energia do Sol. Dessa forma, os alunos devem perceber na quarta questão a relação de proporção entre a massa de hidrogênio do Sol ($1,8 \cdot 10^{30}$ kg) e o consumo por segundo ($6 \cdot 10^{11}$ kg/s) desse elemento em processos de fusão no seu interior, obtendo ser de 100 bilhões de anos o tempo para que todo hidrogênio se extinguisse, caso fosse mantido constante esse consumo. Portanto, na quinta questão, ao comparar esse resultado obtido, com a idade do Sol fornecida no Texto I, é esperado que os estudantes percebam a compatibilidade entre tais valores, ambos sendo da ordem de bilhões de anos.

Na última parte da aula, a exibição do vídeo *Rock Star e a origem do metal* é uma forma descontraída e interessante de mostrar aos alunos por que é comum escutarmos a expressão “*Somos poeira das estrelas.*”. Deste modo, na questão 6, é esperado que os alunos saibam justificar, de forma sucinta, o porquê de tal afirmação, valendo-se para isso de argumentos apresentados no vídeo, apontando a origem dos elementos químicos no interior das estrelas (com exceção do hélio e do hidrogênio).

Portanto, acreditamos que a presente aula possa forneça aos estudantes os conhecimentos necessários para uma melhor compreensão da importância do processo de fusão nuclear, tanto na produção de energia, quanto na formação de elementos químicos, e que também funcione como fonte de consulta e inspiração a algum grupo que futuramente escolha como tema de seu seminário essa relação entre Astronomia e Física Nuclear.

3.10 Planejamento das Aulas 07 e 08 – Seminários

3.10.1 Objetivos

As duas últimas aulas, realizadas em forma de seminários, promove uma discussão entre os estudantes a respeito dos benefícios e malefícios do uso na sociedade de elementos ligados à Física Nuclear. Espera-se que nelas, os estudantes façam uma síntese do que foi compreendido durante as aulas anteriores.

São também objetivos dos seminários:

- ampliar o senso crítico dos estudantes;
- discutir com os alunos os riscos e benefícios da utilização de elementos ligados à Física Nuclear em nossa sociedade;
- desenvolver e estimular a capacidade dos estudantes em expressarem seus argumentos;
- analisar, na medida do possível, o que foi compreendido pelos alunos durante as aulas da sequência didática.

3.10.2 Metodologia

Para a realização desta atividade, a turma se divide em grupos, com cerca de 6 estudantes⁴⁸. Fica à critério do professor como se dará essa divisão.

Os grupos têm no mínimo 10 e no máximo 12 minutos para se apresentarem⁴⁹. Após cada apresentação, é aberto à turma um breve intervalo de aproximadamente 3 minutos, para perguntas e dúvidas direcionadas ao grupo que se apresentou. Caso nenhuma pergunta seja feita, o professor fará as colocações que considerar pertinentes.

É de livre escolha dos grupos as ferramentas e recursos didáticos a serem utilizados, como, por exemplo, o uso de: imagens, vídeos (máximo de 3 minutos, somando-se todos os vídeos que façam parte da apresentação), quadro de giz, cartazes ou projetor.

⁴⁸ É importante destacar que nossa escolha por grupos constituídos de 6 estudantes foi devido à média de 35 alunos nas turmas em que realizamos estes seminários, resultando assim em três apresentações por aula. Entretanto, competirá ao professor aplicador delimitar o tamanho das equipes e o número de apresentações, conforme a disponibilidade que este possua.

⁴⁹ Sugerimos que o tempo de apresentação não seja inferior ao aqui disponibilizado, para evitar com que os grupos realizem apresentações com uma abordagem demasiadamente superficial, ou ainda, de forma muito acelerada.

Cada grupo fica livre também para a escolha dos tópicos a serem abordados em sua apresentação, não se restringindo às sugestões propostas abaixo. Entretanto, devem se limitar ao tema Física Nuclear.

A seguir, algumas sugestões de tema e assuntos correlacionados:

- Medicina nuclear: tipos de radiação e radiofármacos utilizados; traçadores radioativos; cintilografia; tomografia por emissão de pósitrons (PET); ressonância magnética nuclear.
- Efeitos das radiações nos seres humanos: efeitos físicos, químicos e biológicos; tempo de exposição; intensidade da radiação.
- Energia nuclear na agricultura e na indústria: traçadores radioativos; autorradiografia; esterilização; gamagrafia; controle de qualidade.
- Acidentes e desastres nucleares: efeitos ambientais e rejeitos radioativos; acidente de Chernobyl; acidente radiológico de Goiânia (Césio-137); acidente de Fukushima.
- Usinas nucleares: tipos de reatores; funcionamento e viabilidade das usinas termonucleares; usinas nucleares no Brasil; vantagens e desvantagens.
- Armas nucleares: enriquecimento de urânio; bomba atômica; bomba de hidrogênio, bomba de nêutrons; Projeto Manhattan.
- Fusão nuclear: o Sol como principal fonte energética da Terra; ciclo de vida das estrelas; origem dos elementos químicos; reator de fusão nuclear; a fusão como alternativa energética.
- Energia nuclear e Geopolítica: participação da energia nuclear na matriz energética; política de energia nuclear do Brasil; a energia nuclear e a soberania nacional; conflitos armados; administração, controle e legislação da tecnologia nuclear.

3.10.3 Resultados esperados

Espera-se que durante a pesquisa e elaboração do material a ser apresentado, os estudantes façam uma revisão do que foi abordado nas aulas anteriores, dirimindo, se possível, e com a ajuda do professor, quaisquer dúvidas que ainda possam existir dos tópicos escolhidos por eles.

Em vista disso, acreditamos ser prudente dar aos alunos a liberdade de escolha desses assuntos, obedecendo, contudo, ao critério de que tal escolha esteja inserida no tema Física Nuclear. Desta maneira, mesmo que existam tópicos repetidos nas apresentações, os estudantes sentem-se livres para apresentarem assuntos de seus interesses, contribuindo com isso para uma maior qualidade dos trabalhos.

Ao limitarmos em três minutos o tempo que os grupos possuem para exibir os vídeos que por ventura façam parte de sua apresentação, desejamos assim, evitar reduzir ainda mais o intervalo disponibilizado para os estudantes se expressarem, impedindo que dessa forma a exibição de longos vídeos omita a participação de algum integrante do grupo.

Esperamos também, que dentro do curto intervalo de tempo que possuem, os grupos optem pelo uso de projeções como recurso didático, otimizando e organizando dessa forma o tempo para apresentarem seus trabalhos.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo apresentamos os resultados obtidos nas duas aplicações que realizamos da sequência didática. Ambas ocorreram em turmas regulares de terceiro ano do ensino médio, de uma escola estadual do bairro Benfica, na cidade de Juiz de Fora, localizada na região da Zona da Mata Mineira. Os alunos que frequentam a escola são, em sua maioria, moradores de bairros adjacentes, oriundos de famílias do comércio, construção civil, indústria e serviço público, constituindo turmas bastante homogêneas.

A primeira dessas aplicações ocorreu no quarto bimestre do ano letivo, entre novembro e dezembro de 2016, em três turmas de aproximadamente 35 alunos. A segunda aconteceu no segundo bimestre, no período de junho a julho de 2017, em duas turmas com aproximadamente o mesmo número de estudantes das anteriores.

A seguir, discriminamos os relatos de cada aula.

4.1 Aplicação da Aula 01 – O Núcleo Atômico

Inicialmente, por se tratar da primeira aula, os alunos foram informados a respeito da metodologia e do funcionamento da sequência didática, recebendo bem essas informações. Foi acordado com as turmas que as folhas-roteiro das seis primeiras aulas seriam avaliadas, assim como os seminários a serem apresentados por eles nas duas últimas aulas.

As variadas respostas acerca da questão 1: *“O quão pequeno é o núcleo atômico e qual sua constituição?”*, funcionou como um breve organizador-prévio, mostrando que os alunos possuem muita dificuldade em definir o quanto pequeno é o núcleo, surgindo respostas como: *“2x menor que um grão de feijão”*, *“Trilhões de vezes menor que uma plaqueta”*, *“Menor que um grão de areia”*, etc. O mesmo ocorrendo nas respostas sobre sua constituição: *“É constituído de oxigênio”*, *“Constituído por prótons, nêutrons e elétrons”*, etc. Um dado interessante desta última resposta, é o fato de muitos grupos citarem o elétron na constituição nuclear, o que nos mostra a dificuldade de parte dos alunos em diferenciarem o núcleo do átomo. Fato concordado com a outra parte da resposta, em que comparavam o tamanho do núcleo a apenas *“levemente menor que o átomo”*.

Na primeira aplicação, durante a questão 2, onde era pedido que os estudantes calculassem a relação entre o tamanho do núcleo e o tamanho do átomo, proposta após assistirem a um vídeo sobre o experimento de Rutherford, mostrou que parte dos alunos sentiram muita dificuldade, tanto na interpretação, quanto nas operações, que em sua maioria envolviam potências na base de 10. Por esta razão, muitos não perceberam o fato do núcleo ocupar cerca de 0,01% do espaço do átomo e com isso possuir aproximadamente 0,0001 do tamanho deste. Por tais motivos, a questão foi alvo de correções para sua segunda aplicação, de modo a deixar mais claro o que se é pedido em seu enunciado. Dessa forma, na nova aplicação, a maioria dos estudantes souberam transformar matematicamente este resultado em uma potência de base 10, e encontraram o valor de 10^{-14} m para a dimensão do núcleo atômico, além de conseguirem interpretar este resultado.

Na questão 3, onde era pedido que os alunos completassem a frase comparativa das dimensões do núcleo e do átomo a outros objetos da tabela na folha-roteiro (Apêndice I), houve uma grande diversidade entre as duplas de objetos escolhidos pelos grupos, não convergindo todos a uma única comparação, mostrando que o mais importante, a relação do átomo ser da ordem de 10^4 vezes maior que o núcleo, foi obtida quase que na totalidade das respostas.⁵⁰

Por fim, os estudantes se mostraram curiosos em saber qual a resposta da última pergunta: *“Para pensar!!! Se o núcleo é constituído exclusivamente de cargas positivas, que se repelem, por que ele permanece unido?”*, sentindo-se um pouco frustrados ao saberem que tal resposta não seria revelada naquele momento, mas que deveriam trazê-la na aula seguinte.

4.2 Aplicação da Aula 02 – Estabilidade Nuclear

A segunda aula fluiu mais naturalmente em relação à primeira, com os alunos compreendendo as instruções de uma maneira mais simples. De um modo geral, tiveram uma maior facilidade na resolução das tarefas/questões propostas. Em parte, pela maior facilidade do conteúdo desta aula. Também por uma crescente aceitação em um modelo de aula mais participativa.

⁵⁰ É importante destacar que, mesmo estando explícito no enunciado da referida questão que o objetivo era encontrar quantas vezes o átomo é maior que o núcleo, ainda assim, em certas respostas, alguns estudantes inverteram a ordem desta razão, encontrando o valor de 10^4 , ou seja, que o núcleo é 10000 vezes menor que o átomo. No entanto, consideramos também correto esse resultado, já que, a nosso ver, o mais importante dessa questão era os alunos perceberem a grande diferença entre suas dimensões, o que conseguimos constatar nas respostas da questão seguinte (questão 4).

As respostas à última pergunta da aula anterior “*Se o núcleo é constituído exclusivamente de cargas positivas, que se repelem, por que ele permanece unido?*” foram lidas no início da aula. Como alguns alunos não a trouxeram, aproveitamos para criar uma breve discussão com a turma, que durou cerca de 5 minutos, envolvendo as respostas dos alunos que as trouxeram e as opiniões formuladas *in loco* daqueles que se esqueceram de trazê-la.

Ainda em relação à essa pergunta, os estudantes se mostraram surpresos em nunca terem se indagados a respeito, concordando ser intrigante tal questão. Pôde-se perceber que grande parte dos alunos que tiveram que formular uma resposta no momento da aula, possuíam as interações eletromagnéticas associadas à estabilidade nuclear, conforme é possível perceber em respostas do tipo: “*Isso acontece por causa da força magnética.*”. Assim, outros integrantes dessa parcela de estudantes argumentaram a existência de uma força para manter o núcleo unido; alguns citaram a presença da carga negativa do elétron ao seu redor como fator determinante para neutralizá-lo e, com isso, mantê-lo unido.

Na segunda parte da aula, que consistia na atividade experimental (Apêndice VIII), os alunos não tiveram grande dificuldade na montagem do modelo de núcleo atômico, utilizando-se para isso das bolinhas de isopor, da mola (espiral de caderno) e da fita adesiva. Muitos conseguiram montar um núcleo coeso utilizando apenas dois prótons e nenhum nêutron. Entretanto, principalmente pelas respostas dadas à questão 1, na sequência, foi possível concluir que praticamente todas as turmas perceberam que a montagem desta forma é coesa, porém, instável, e que se adicionando o nêutron na ligação o núcleo tornou-se bem mais estável.

Figura 13. Modelo de núcleo atômico montado pelos alunos.



Fonte: próprio autor.

A fim de comprovarmos esta coesão, foi deixado em duas salas de aula um desses modelos de núcleo atômico, para, no próximo encontro, constatarmos se ainda permaneceriam unidos. Fato que não pôde ser comprovado, pois, na aula seguinte, os núcleos não mais se encontravam nas paredes em que foram afixados, muito provavelmente por terem sido removidos por estudantes de ensino fundamental do turno da tarde, que devem ter achado curioso tal aparato experimental.

Figura 14. Estudantes durante a atividade experimental.



Fonte: próprio autor.

Na questão 2, que consistia da análise gráfica da relação do número de prótons (Z), pelo número de nêutrons (N), a chamada *curva de estabilidade nuclear*, praticamente todos os alunos concordaram que em a), o número atômico do último núcleo estável desta curva se encontra entre 80 e 90, - a saber, o bismuto ($Z = 83$) é o último elemento que tem isótopo estável⁵¹ -, assim como o número de nêutrons se situa entre 120 e 140. Aqueles poucos que por ventura erraram, assim o fizeram por inverter estes valores, provavelmente por confundir a orientação dos eixos. Foi possível constatar também que no item b), quase a totalidade dos grupos concordaram que à medida que se aumenta o número de prótons, há uma maior repulsão eletrostática e mais instável o núcleo tende a se tornar, produzindo respostas do tipo: “*Com o aumento dos prótons há mais energia, com isso é preciso de mais nêutrons, e a mesma quantidade de nêutrons não é o suficiente e chega um ponto que é preciso mais nêutrons que prótons*”.

⁵¹ GALETTI e LIMA, 2010, p. 26.

Entretanto, nenhum grupo citou em sua resposta a tendência dos “quadrinhos” que representam os núcleos atômicos nesta curva se deslocarem cada vez mais para a direita, à medida que o número de prótons aumenta. O que nos leva a acreditar que tal percepção gráfica seja um pouco complexa para este momento da sequência didática, ou nível de ensino.

Na última parte da aula, ao ser lida a questão “*Para pensar!!! Como um núcleo instável pode se tornar estável?*”, alguns alunos, prontamente, baseados em conclusões da presente aula, responderam que para esta estabilidade ser alcançada seriam necessários somente mais nêutrons, concordando com nossa conclusão anterior de que os estudantes perceberam que à medida que o número de prótons aumenta é preciso um maior número de nêutrons para estabilizá-lo. Porém, não observaram que há um limite para essa estabilidade, dado pelo último elemento estável identificado no item a), e que, a partir desse valor, mesmo com um aumento no número de nêutrons, o núcleo não mais consegue se manter estável.

Em vista do que aqui foi relatado, acreditamos que a simples ligação inicial do aparato experimental, com somente dois prótons, causando certa instabilidade, conseguiu mostrar aos estudantes a relação entre a força nuclear forte e a força elétrica. A posterior inserção do nêutron na ligação também se mostrou suficiente para que percebessem sua função de equilibrar essa relação, contribuindo para a estabilidade nuclear.

4.3 Aplicação da Aula 03 – Instabilidade Nuclear

Esta terceira aula precisou acontecer em um ritmo mais acelerado das anteriores, devido ao seu grande número de textos (três), tabelas (duas) e questões (cinco). Nenhuma destas informações ou resoluções exigiam um longo tempo de dedicação, entretanto, os intervalos de tempo gastos nas transições entre estes itens, quando somados, precisam ser considerados.

A última pergunta da aula anterior “*Para pensar!!! Como um núcleo instável pode se tornar estável?*” foi debatida no início da aula. Mesmo aqueles alunos que trouxeram uma resposta à pergunta proposta, mostraram-se surpresos ao descobrirem que tal estabilidade é alcançada quando o núcleo emite partes e ou energia de si, transformando-se em outros núcleos, até alcançar a estabilidade.

Na questão 1, onde era pedido que os alunos completassem a tabela 1 da folha-roteiro (Apêndice III) com a carga e massa relativa do nêutron e do elétron,

praticamente todos os grupos a preencheu corretamente. No entanto, nota-se uma quase obrigatoriedade de alguns estudantes em dar somente a resposta considerada “exata”, fazendo com que alguns grupos, desnecessariamente, completassem o campo destinado a massa do elétron não como sendo nula, já que seu valor pode ser considerado desprezível frente a massa dos núcleons, mas com praticamente seu valor exato ($m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg), mostrando que talvez não compreenderam o principal objetivo dessa tabela, a de simplificar o estudo em Física Nuclear.

Os estudantes quase não tiveram dificuldades em relação à questão 2. Todos encontraram o número de nêutrons dos isótopos citados (U-235 e U-238). Isso mostra que os alunos não possuem dificuldades em representar um elemento químico. Fato concordado nas questões seguintes, como, por exemplo, na questão 3, em que era pedido a constituição da radiação alfa e a carga e massa relativa das radiações alfa, beta e gama. Novamente, os alunos praticamente não apresentaram problemas para concluir tal questão.

No entanto, na questão de número 4, relativa à classificação do poder de ionização das radiações, inicialmente, muitos estudantes demonstraram dúvidas quanto a carga negativa da radiação beta ser menos ou mais ionizante que a radiação gama, que não possui carga elétrica. É provável que isso tenha ocorrido por ignorarem o módulo de sua carga, que por ser negativa, fez com que os alunos acreditassem ser a menor das três radiações citadas. Um dado interessante a respeito dessa questão, foi que em sua segunda aplicação, ocorrida no 2º bimestre, antes do conteúdo de Eletricidade ser abordado, alguns alunos encontraram certa dificuldade em preencher as lacunas de sua figura, relativas aos desvios sofridos pelas radiações, em função de sua respectiva carga, ao atravessarem uma região de campo elétrico. Talvez por neste momento ainda não terem uma base sólida em relação ao conceito de atração e repulsão entre cargas elétricas. Sanada as dúvidas, tomando-se o devido cuidado para não se revelar as respostas, os alunos completaram corretamente a coluna relativa ao poder de ionização.

Por conseguinte, as dúvidas levantadas na questão 4 levaram parte desses estudantes a também cometerem erros na questão posterior (questão 5), onde era pedido para completarem a coluna relativa ao poder de penetração das emissões radioativas, assim como as lacunas de sua figura, que trata deste assunto. Como tal questão também depende de conceitos relacionados à carga elétrica das emissões radioativas, já que o poder de penetração de uma radiação é inversamente

proporcional à sua carga⁵², alguns alunos confundiram a ordem com que deveria ser preenchida a coluna referente a essa propriedade na tabela 2 (Apêndice III).

Por fim, pudemos depreender que esta aula atingiu seus objetivos, embora demonstrou-se relativamente longa, com muitos textos e informações, fazendo com que as duas últimas questões (4 e 5) fossem resolvidas em um tempo menor que o qual acreditamos ser necessário para um melhor entendimento dos conceitos nelas apresentados. Também foi possível notar, que de todas as aulas da sequência didática, foi nesta que alguns tópicos básicos de eletricidade, como cargas elétricas, se mostraram relevantes para o entendimento de certos assuntos em Física Nuclear.

4.4 Aplicação da Aula 04 – Datação Radioativa

A quarta aula da sequência didática gerou resultados distintos em suas duas aplicações. Embora em ambas os estudantes não sentiram dificuldades ao responderem às questões 1 e 2, relativas à tabela e curva de decaimento radioativo, respectivamente, bem como na interpretação do texto I, sobre meia-vida, o mesmo não se pôde constatar nas questões 3 e 4. Portanto, decidimos discriminar, sempre que necessário, as diferenças encontradas nessas aplicações.

Na questão 1, a maioria dos grupos completaram corretamente a tabela com a quantidade restante (em %) na amostra a cada meia-vida decorrida. Creditamos parte deste bom resultado ao fato de apresentarmos já preenchidas as duas primeiras células da tabela, o que, de certa forma, induz os estudantes a completarem-na corretamente, já que, assim, a inserção de um valor incorreto destoaria mais nitidamente dos demais. Tal êxito pôde ser notado também na tabela posterior, fato descrito mais adiante, no relato da terceira questão.

Alguns poucos grupos traçaram errado a curva de decaimento radioativo, apresentando uma tendência em ligar os pontos do gráfico através de pequenos segmentos de reta, mas não comprometendo significativamente o seu entendimento.

Na questão 3, em que seu enunciado recordava brevemente o conceito de uma progressão geométrica de razão $1/2$, era pedido que os estudantes obtivessem a expressão da lei do decaimento radioativo. Durante a primeira aplicação, nenhum dos grupos conseguiu obtê-la corretamente, obrigando assim ao professor ter que revelá-la para que a aula tivesse sequência. Em vista dessa dificuldade, foi preciso que em

⁵² OKUNO, 2007, p. 11.

sua segunda aplicação modificássemos seu enunciado, acrescentando à questão uma tabela, a ser completada pelos estudantes com a fração restante na amostra a cada meia-vida decorrida. Assim, analogamente ao que foi feito na tabela anterior, algumas células já vinham preenchidas com termos da progressão geométrica, ocasionando um resultado positivo, com os estudantes obtendo corretamente uma expressão que fornecesse a quantidade restante na amostra após decorrido um número n qualquer de meias-vidas. É preciso destacar que, dessa forma, a questão ficou mais clara e objetiva, porém, com um nível matemático de exigência reduzido.

Após lerem o texto II, os estudantes compreenderam o método de datação pelo carbono-14, e com isso, na questão 4, todos os grupos escolheram corretamente este radioisótopo como aquele utilizado para a determinação da idade de um fóssil de *Homo sapiens*. A maioria dos grupos acertou também um dos radioisótopos utilizados para a determinação da idade da Terra (o urânio-238), mostrando que os estudantes, em sua maior parte, sabem que o planeta possui alguns bilhões de anos. Contudo, alguns escolheram equivocadamente o céscio-137 como sendo o radioisótopo utilizado no exame de cintilografia da tireoide. Talvez por associarem o seu valor de meia-vida (30 anos) à idade de um ser humano, desconsiderando com isso os riscos que um longo tempo de exposição à radiação pode provocar à saúde humana.

Foi possível observar também que, ao justificarem as escolhas desta última questão, os estudantes praticamente levaram em consideração um único fator: o tempo de meia-vida que fosse mais coerente a cada aplicação citada. Portanto, poucos associaram conceitos ou conhecimentos de outras disciplinas que fossem pertinentes as escolhas realizadas. Acreditamos que tal fato se deu provavelmente por uma pouca experiência dos alunos na realização de trabalhos interdisciplinares, fazendo com que sintam dificuldade em relacionar conceitos de áreas aparentemente distintas.

4.5 Aplicação da Aula 05 – Fissão Nuclear

De todas as aulas da sequência didática, foi nesta quinta aula onde constatamos as maiores divergências na comparação dos resultados obtidos durante as duas aplicações. Talvez em parte por exigir um maior uso de conceitos matemáticos, como proporções, conversão de unidades e porcentagens. Portanto, tal como relatado na descrição da aula anterior, julgamos ser imprescindível, sempre que necessário, expormos estas diferenças.

Durante a leitura das respostas à questão finalizadora da aula anterior, “*De onde vem a energia que mantém o núcleo unido?*”, foi possível realizarmos uma breve revisão dos conteúdos abordados até o momento, uma vez que a resposta a tal pergunta retoma e complementa alguns conceitos já discutidos sobre estabilidade nuclear na segunda aula.

Em ambas as aplicações, os estudantes compreenderam o texto I, sobre a equivalência massa-energia. Entretanto, durante a primeira aplicação, na questão 1, sentiram certa dificuldade para encontrar o valor correto, em quilowatt-hora, gerado caso uma massa de 1 kg fosse integralmente transformada em energia. Muito em função de não associarem o joule à unidade dessa grandeza no Sistema Internacional de Unidades (SI). Por esse motivo, achamos prudente alterar tal questão em sua segunda aplicação, colocando de forma explícita em seu enunciado que, primeiramente, ao se aplicar diretamente a fórmula da equivalência massa-energia, o resultado obtido estará em joule, e que, posteriormente, deverão convertê-lo em quilowatt-hora. Após essa alteração, os alunos também resolveram a questão 2, dependente da primeira, de forma mais rápida e fácil, encontrando corretamente que a energia obtida na questão anterior é equivalente ao consumo anual de energia elétrica de aproximadamente 10 milhões de brasileiros.

Os estudantes assimilaram relativamente bem os textos II e III, entendendo os conceitos neles envolvidos, como empacotamento nuclear, fissão nuclear e reação em cadeia. Também compreenderam o fato de que a origem da energia nuclear pode ser depreendida da diferença entre a massa do núcleo e a soma das massas de seus constituintes.

Durante a primeira aplicação, na resolução da questão 3, onde era pedido aos estudantes para que comparassem os valores energéticos dos processos químicos com os processos nucleares, os alunos se depararam com a mesma dificuldade já relatada na questão 1, a conversão de unidades. Desta forma, em sua segunda aplicação, para que pudessem comparar corretamente os valores fornecidos, foi necessário que colocássemos no enunciado da questão as massas das duas substâncias envolvidas (dióxido de urânio e óleo diesel) já na mesma unidade de medida, o grama. Bem como ocorrido anteriormente, feita essas alterações, os estudantes encontraram maior facilidade em sua resolução, sendo possível ouvir de alguns, imediatamente após a leitura do enunciado, algo como: “*Aí é só dividir um valor pelo outro!*”.

Na questão 4, era informado aos estudantes o fato de nem toda massa de dióxido de urânio ser convertida em energia no processo de fissão. Como na primeira aplicação foi proposto para os estudantes justificarem o porquê de tamanha diferença, o que praticamente não ocorreu, achamos necessário, na segunda realização, inserir em seu enunciado tal justificativa. Com isso, os grupos não tiveram dificuldade em encontrar o valor da massa (10^3 kg) transformada em energia de ligação, assim como o percentual (0,1%) que este valor corresponde à massa total envolvida no processo. Aqueles poucos que erraram, assim o fizeram, principalmente, por dificuldades na passagem do valor encontrado para a forma de porcentagem.

Mesmo a grande maioria desconhecendo a resposta correta à questão finalizadora “*De onde vem a energia do Sol?*”, pôde-se notar nos estudantes certa curiosidade no porquê da presença dessa pergunta neste momento da sequência didática. A partir das repostas daqueles que de imediato se propuseram a respondê-la, foi possível perceber que alguns, erroneamente, ainda utilizam em suas descrições dos processos nucleares, a presença de conceitos referentes às propriedades químicas dos materiais, como a combustão dos gases.

Deste modo, pudemos concluir das duas aplicações desta aula, que grande parcela dos estudantes possui elevada dificuldade na resolução de questões que envolvam transformação de unidades. Tal dificuldade torna-se mais acentuada em situações como a da presente sequência didática, onde o fator tempo demonstra-se o maior obstáculo na resolução das questões. Desta forma, fica a critério do professor aplicador a decisão de já fornecer ou não, expressas na mesma unidade de medida, as grandezas envolvidas nos enunciados das questões. Tal decisão deve-se levar em consideração, além de outros fatores, o nível de proficiência em matemática da turma, bem como o tempo disponível para tais soluções.

4.6 Aplicação da Aula 06 – Fusão Nuclear

Por ser a última aula da sequência didática, antes dos seminários a serem apresentados pelos alunos, os cinco minutos iniciais foram reservados para reforçar nas turmas a metodologia das apresentações. Após o reforço, foram lidas as respostas à questão proposta ao final da aula anterior: “*De onde vem a energia do Sol?*”. A maioria das respostas daqueles grupos que as trouxeram relacionava essa origem às reações de fusão ocorrida no interior dessa estrela. Entretanto, o conhecimento da existência de tal resposta não se revelou como garantia de certeza,

por parte desses estudantes, de uma não conclusão inequívoca que essa energia seja de origem química. Fato demonstrado mais adiante no relato da questão 3 desta aula.

Os grupos compreenderam bem o texto I e não encontraram muitas dificuldades na resolução das questões 1 e 2, com praticamente todas as turmas respondendo-as corretamente. Na primeira questão, era pedido que os estudantes encontrassem o consumo por segundo de carvão que o Sol deveria ter caso sua fonte energética fosse de origem química. Após a análise da primeira aplicação, julgamos ser necessário acrescentar em seu enunciado uma sugestão para que os alunos deixassem a resposta na forma de fração. Dessa forma, em sua segunda aplicação, além de evitar que tais respostas resultassem em dízimas periódicas, comprometendo assim o entendimento das questões seguintes, evitou-se que os estudantes levassem tempo em demasia nesta questão. Um dado interessante, possível de ser observado nessas duas primeiras questões é que, talvez por suas resoluções serem parecidas às das questões propostas na aula anterior, suas soluções saíram de forma mais rápida e simples, comparadas a suas antecessoras, mesmo quando foi preciso uma conversão de unidades (de segundos em anos), como realizado na questão 2.

Em relação à questão 3, alguns poucos grupos responderam ser possível que a energia do Sol fosse de origem química, não por achar que o resultado na questão anterior fosse coerente com a idade do Sol informada no texto I, mas sim por associarem a reação de fusão a um processo de origem química, como pode ser notado em uma destas respostas: “*Sim, porque depende de agentes externos para formar reações químicas.*”. Uma pequena minoria dos grupos, para justificar não ser possível tal origem, utilizaram-se de informações do texto seguinte, (*Texto II: Fusão nuclear*), dizendo não ser coerente esses valores pelo fato do processo de geração de energia no Sol ser oriundo da fusão nuclear. A alternativa realizada por esses grupos não nos é interpretada como um problema, já que, devido à questão finalizadora da aula anterior, é esperado que os estudantes ingressem nesta aula cientes da origem nuclear desse processo. Logo, o principal propósito dessas três primeiras questões é mostrar a incompatibilidade da origem química dessa energia.

Na questão 4, os estudantes não tiveram dificuldade em encontrar o tempo que, mantido o consumo de hidrogênio informado, o Sol levaria para esgotar todo esse combustível. Foram necessárias apenas pequenas dicas que os auxiliaram na passagem do valor encontrado para bilhões de anos, conforme era pedido em seu

enunciado. Optamos por exigir dos alunos que expressassem assim este resultado, para deixá-lo mais compreensível, inclusive na resposta da questão seguinte.

Outro ponto importante a se observar, foi o ocorrido na questão 5, onde uma parcela considerável dos grupos achou não ser coerente o tempo de vida do Sol obtido na questão anterior (100 bilhões de anos), com o valor apresentado no texto I (cerca de 10 bilhões de anos), fornecendo respostas do tipo: “*Não. Pois a diferença entre eles (5 bilhões e 100 bilhões) é muito grande.*”. Tais respostas nos levam a interpretar algumas justificativas para isso, como talvez o fato de associarem a palavra “coerentes” à “semelhantes”; ou ainda, por esperarem um valor exato àquele fornecido pelo texto I, não se atentando ao fato de estar no próprio enunciado da questão que esse valor se daria caso fosse mantido esse ritmo de consumo.

A questão 6, proposta logo após a exibição do vídeo *Rock Star e a Origem do Metal*, foi rapidamente respondida pelos grupos, com praticamente todas as respostas citando o porquê de se poder afirmar que somos poeira das estrelas, pelo motivo da maioria dos elementos que nos constituírem terem se originados de uma Supernova.

Assim, mesmo a atual aula sendo mais extensa que as anteriores em relação ao número de questões, a atividade conseguiu ser realizada praticamente no tempo estipulado. Acreditamos que tal êxito tenha sido alcançado pelo fato dos alunos, a este momento da sequência didática, já terem se adaptados à sua metodologia, e também, se familiarizados com a resolução de questões que envolvam potências expressas na base 10, assim como proporções, geralmente resolvidas por eles via “regra de três”.

4.7 Aplicação das Aulas 07 e 08 – Seminários

As duas últimas aulas da sequência didática, apresentadas pelos estudantes em formato de seminários, superaram nossas expectativas. Os alunos cumpriram os objetivos propostos, discutindo de maneira crítica, os riscos e benefícios da utilização de elementos ligados à Física Nuclear em nossa sociedade.

Em todos os seminários os estudantes utilizaram-se de projeções. Entretanto, o tempo de 10 a 12 minutos reservado para cada grupo se mostrou insuficiente, fazendo com que os intervalos entre as apresentações transcorressem de maneira acelerada, quase não podendo existir perguntas ou questionamentos entre elas.

Em vista desse fato, como a segunda aplicação da sequência didática ocorreu no segundo bimestre, o qual geralmente na rede pública de ensino possui um maior número de aulas que o quarto, período em que aconteceu a primeira aplicação, optamos por reservar 3 aulas para os seminários em sua segunda realização, diferentemente das duas aulas anteriormente planejadas. Desta forma, o tempo destinado a cada equipe aumentou, sendo de 12 a 18 minutos, o que resultou na apresentação de apenas dois grupos por aula. Ainda assim esse tempo se mostrou insuficiente, fazendo com que alguns grupos extrapolassem em alguns minutos suas apresentações, mas nada que comprometesse as aulas, já que tais excessos eram compensados nos minutos excedentes, previamente reservados para esta finalidade.

Houve escolhas de temas repetidos, principalmente do tópico *Armas Nucleares*, devido a um notável interesse dos alunos a esse assunto, comumente já abordado em revistas, jornais, cinema, etc., provavelmente até em alguma outra disciplina cursada por eles. Entretanto, essa repetição não prejudicou nenhuma das apresentações, pois, devido à complexidade do assunto, mesmo grupos com temas ou tópicos iguais, apresentaram trabalhos distintos, e, às vezes, complementares, como certas equipes, que ao abordarem o tema supracitado, aproveitaram para fazer uma abordagem histórica, relacionando-o à *Segunda Guerra Mundial* e também aos efeitos das radiações nos seres humanos.

Figura 15. Estudantes durante apresentação de seminário.



Fonte: próprio autor

De um modo geral, as turmas se mostraram interessadas, produzindo e apresentando materiais de boa qualidade e em alguns momentos até profundos, densos de conteúdo, mesmo com o reduzido tempo para se apresentarem.

Vale aqui destacarmos a apresentação de um grupo, relacionada ao acidente com césio-137 em Goiânia (ocorrido no ano de 1987), onde os estudantes utilizaram no verso da folha de apoio com o texto para leitura que mantinham em mãos, uma imagem da arte *O Grito* de Edvard Munch, modificada com o símbolo trifólio, que expressa a presença de elemento radioativo; além de apresentarem o assunto na forma de uma narrativa, com as imagens/desenhos relacionados ao acidente sendo transpostas à medida que a narração se prosseguia, tudo isso aliado a uma trilha sonora de suspense ao fundo, dando um clima muito criativo e interessante a apresentação (figura 16).

Figura 16. Apresentação de seminário pelos estudantes.



Fonte: próprio autor.

Nas considerações finais feita pelo professor, foi possível perceber por partes dos estudantes a aceitação ao tema Física Nuclear, onde os próprios concordaram que o tempo para as apresentações se mostrou insuficiente e que gostariam que fosse disponibilizado até mesmo toda uma aula para cada grupo, pois, assim, poderiam trazer vídeos, curiosidades ou outros materiais relacionados ao tema do trabalho. Portanto, deixamos tal pedido como sugestão para aqueles que forem utilizar essa metodologia.

Capítulo 5

Considerações finais

Conforme relatado, realizamos duas aplicações da sequência didática, ambas em turmas de terceiro ano do ensino médio, porém, em diferentes períodos do ano letivo. Tal escolha foi intencional, pois, desse modo, pudemos analisar seus resultados quando aplicada em momentos distintos: tanto no quarto bimestre (2016), após a apresentação de praticamente todo o conteúdo de física do ensino médio, como comumente se é adotado em muitas escolas; quanto no segundo bimestre (2017), após o conteúdo de ondulatória já ter sido trabalhado, mas antes de eletricidade e magnetismo serem abordados.

A partir dos resultados obtidos, pudemos constatar que o bimestre no qual a aplicação ocorreu não foi um fator determinante para o seu êxito ou não. Em nossa interpretação, o melhor resultado obtido em sua segunda realização se deu mais em função de eventuais correções e modificações efetuadas após a análise de sua primeira aplicação, que por qualquer influência na anterior abordagem ou não de determinado assunto.

Esse resultado vai ao encontro da posição que defendemos, aquela em que os conteúdos de eletricidade e magnetismo não são pré-requisitos à aplicação desta sequência didática. Entretanto, certos conceitos de ondulatória, como frequência e comprimento de onda, assim como tópicos básicos de eletricidade, como cargas elétricas e a Lei de Du Fay, que descreve o comportamento dessas cargas, mostraram-se importantes para a compreensão de alguns tópicos de Física Moderna e, posteriormente, úteis no ensino de Física Nuclear.

Como prevíamos, inicialmente, os estudantes tiveram grande dificuldade em se adaptar a nossa metodologia, centralizada nas interações sociais. Pudemos observar, em ambas as aplicações, que o principal obstáculo encontrado esteve na resistência em adotarem um modelo de aula com participação ativa, ocasionando assim uma tendência em prolongarem além do necessário o tempo de execução de algumas tarefas. Em parte, por não possuírem tal prática como hábito, fazendo com que em certos momentos ficassem inativos, como se esperando que o professor lhes trouxesse a resposta certa, ou até mesmo lhes explicassem inúmeras vezes o que deveria ser feito.

No entanto, e como também esperado, os alunos foram se adaptando à medida que as aulas aconteciam, inclusive pedindo para que os próximos conteúdos a serem tratados ao término da sequência didática também fossem abordados utilizando-se dessa metodologia.

Conscientes também da falta de tempo hábil para a resolução de certas atividades, frequentemente provocada por atrasos na troca de professores entre as aulas, ou até mesmo por imprevistos inerentes ao funcionamento das escolas de educação básica, como interrupções para eventuais avisos pedagógicos e outros do tipo, na segunda aplicação da sequência didática, modificamos algumas questões, de modo a exigirem um menor tempo para sua solução. Entretanto, tal atitude deixou-as, de certa maneira, com um enunciado mais objetivo, e com isso, facilitando-as ou reduzindo suas possibilidades de resoluções pelos alunos. Portanto, caberá ao professor aplicador equilibrar esta relação, conforme este deseja.

De um modo geral, obtemos desempenhos satisfatórios e homogêneos, tanto nas atividades em sala, quanto nos testes e avaliações somativas realizadas, não existindo nenhuma turma que divergisse em seus resultados perante as demais.

Durante os seminários ministrados pelos estudantes, foi claramente possível perceber a curiosidade e interesse deles acerca do tema Física Nuclear.

Ainda em relação ao seminários, consideramo-os o ápice de toda a sequência didática, com os estudantes sintetizando bem em suas apresentações grande parte dos assuntos abordados. A opção em deixá-los livres para escolherem (dentro do tema Física Nuclear) os tópicos de seus interesses, fez com que produzissem e apresentassem excelentes trabalhos. Em seu final, o fato dos grupos serem unânimes ao sugerirem um maior tempo de apresentação do que o disponibilizado a eles corrobora com nossa opinião.

Dessa forma, em vista de tudo o que foi exposto nesta dissertação, acreditamos que a sequência didática apresentada, juntamente com o modelo de planejamento bimestral proposto, sejam aplicáveis tanto na rede pública quanto na rede privada de ensino. Isso se deve, a nosso ver, justamente, e intencionalmente, por não necessitarem de um grande número de aulas, tornando-se com isso devidamente adequados a estas diferentes realidades, uma vez que sua metodologia é acessível e suas questões e atividades, além de despertarem a curiosidade nos estudantes e darem significado aos assuntos abordados, também são flexíveis, sendo

possível o professor aplicador adaptá-las ao grau de complexidade que almeja alcançar.

Para concluir, destacamos novamente a importância para os estudantes da inserção da Física Moderna no Ensino Médio pelos docentes, pois ajuda-os a entenderem o mundo atual, bem como contribui para a formação de um cidadão consciente e participativo, que atue nesse mundo. Assim, pelo o que foi aqui apresentado, esperamos que nossa sequência didática possa contribuir de alguma forma para colaborar com essa inserção.

Referências Bibliográficas

BECQUEREL, H. *Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents*. 122 ed. Comptes Rendus, p. 501-503, 1986.

CURIE, M.S. *Les rayons de Becquerel et le polonium*. 10 ed. Révue Générale des Sciences, p. 175-178, 1899.

DANAIL OBRESCHKOW. *Image worth spreading: Cosmic Eye (Original in HD)*. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=jfSNxVqprvM>>. Acessado em julho de 2016.

DOS SANTOS, C.A. *Física Moderna: Leituras Complementares*. Notas de aula. UFRGS, 2004. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/oscar2004/mod04/>>. Acesso em out. 2017.

DRISCOLL, M.P. *Psychology of learning and instruction*. Boston, MA: Allyn and Bacon, 1995. 409p.

ELETOBRAS ELETRONUCLEAR. *Energia nuclear em 2 minutos*. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=OzxiQdmTD58>>. Acessado em agosto de 2016.

ENERGIA NUCLEAR. *Fusão Nuclear*. Disponível em: <<https://pt.energia-nuclear.net/que-e-a-energia-nuclear/fusao-nuclear>>. Acesso em 28/01/18.

GALETTI, Diógenes; LIMA, Celso L. *Energia Nuclear: com fissões e com fusões*. Coleção Paradidáticos. São Paulo: Editora UNESP, 2010.

GARTON, A.F. *Social interaction and the development of language and cognition*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1992.

GASPAR, Alberto. *Atividades experimentais no ensino de física: uma nova visão baseada na teoria de Vigotski*. Coleção contextos da ciência. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.

IGGE. *Banco Internacional de Objetos Educacionais. Física Vivencial. Fissão Nuclear*. Disponível em: <http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/bitstream/handle/mec/16306/open/file/05_teororia_frame.htm>. Acesso em 15/11/17.

INFOESCOLA. *Próton*. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/fisica-nuclear/proton/>>. Acessado em outubro de 2017.

LA TAILLE, Yves de; KOHL, Marta O; DANTAS, Heloísa. *Piaget, Vygotsky e Wallon. Teorias Psicogenéticas em discussão*. 19 ed. São Paulo: Summus editorial, 1992.

LEICESTER, H.M. *The Historical Background of Chemistry*. Nova Iorque: Courier Dover, 1971.

MACHADO, D. I; NARDI, R. *Construção de conceitos de física moderna e sobre a natureza da ciência com o suporte da hipermídia*. Revista Brasileira de Ensino de Física, 28 (4), p. 473-485, dez. 2006.

MOREIRA, M.A. *Comportamentalismo, Construtivismo e Humanismo*. Subsídios Teóricos para o Professor Pesquisador em Ensino de Ciências. Porto Alegre, 2009.

MUNDO ESTRANHO. *Ciência: Como é determinada a idade de um fóssil*. Disponível em: <<http://mundoestranho.abril.com.br/materia/como-edeterminada-a-idade-de-um-fossil>>. Acessado em agosto de 2016.

MURRAY, R. L. *Energia Nuclear*. São Paulo: Hemus, 2004.

OLIVEIRA, Maurício Pietrocola de. et al. *Física: conceitos e contextos: pessoal, social e histórico, eletricidade e magnetismo, ondas eletromagnéticas, radiação e matéria*. 1 ed. São Paulo: FTD, 2013.

OKUNO, Emico. *Radiação: Efeitos, riscos e benefícios*. São Paulo: HARBRA, 2007.

OSTERMANN, F. *Tópicos de física contemporânea em escolas de nível Médio e na formação de professores de física*. Doutorado. UFRGS, 2000.

POINCARÉ, H. *Les rayons cathodiques et les rayons Roentgen*. 7 ed. Revue Générale des Sciences, p. 52-59, 1896.

PUC-RJ. CCEAD. *Tudo se transforma: Marie Curie*. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=tO3QMblAhRI>>. Acessado em agosto de 2016.

REGO, Teresa Cristina. *Vygotsky: uma perspectiva histórico-cultural da educação*. Petrópolis: Vozes, 1995. 138 p.

SCHENINI, Fátima. *Mestrado dá novo significado a estratégias de ensino de física*. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/ultimas-noticias/217-1207656570/21225-mestrado-da-novo-significado-a-estrategias-de-ensino-de-fisica>>. Acesso em 20/11/17.

SOCRATICA. *Física/ Química: Os Primeiros Modelos Atômicos (Dalton, Thomson, Rutherford, Bohr)*. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kT2sHBF9Q3k>>. Acessado em julho de 2016.

SEGRÈ, Emilio. *Dos raios X aos quarks*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1980.

THOMSON, J.J. *Cathode Rays*. Philosophical Magazine, v. 44, n. 269, p. 293-316, 1897.

USP. IAG. *Rockstar e a origem do metal*. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=wIEhSl1oEI>>. Acessado em setembro de 2016.

VYGOTSKI, L. S. *A construção do pensamento e da linguagem*. São Paulo: Martins Fontes, 2001.

_____. *Imaginação e criação na infância*. Apresentação e comentários de Ana Luiza Smolka. São Paulo: Ática. 2009

VYGOTSKY, L. S. *Thought and Language*. Cambridge: The MIT Press, 1986.

_____, L.S. *A formação social da mente*. 2a ed. brasileira. São Paulo: Martins Fontes. 1988.

WIKIPEDIA. *Elétron*. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Elétron>>. Acesso em 11/11/17.

_____. *Experimento de Geiger-Marsden*. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Geiger-Marsden>. Acesso em outubro de 2017.

_____. *Fissão Nuclear*. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Fiss%C3%A3o_nuclear>. Acesso em 15/11/17.

_____. *Frederick Soddy*. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Frederick_Soddy>. Acesso em 04/11/17.

_____. *Fusão Nuclear*. Disponível em:
<https://pt.wikipedia.org/wiki/Fus%C3%A3o_nuclear>. Acesso em 15/11/17.

_____. *Movimento Browniano*. Disponível em:
<https://pt.wikipedia.org/wiki/Movimento_browniano>. Acesso em 20/10/17.

_____. *Nêutron*. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Nêutron>>. Acesso em 06/11/17.

_____. *Princípio da Incerteza de Heisenberg*. Disponível em:
<https://pt.wikipedia.org/wiki/Princ%C3%ADpio_da_incerteza_de_Heisenberg>. Acesso em 05/11/17.

_____. *Próton*. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Próton>> Acesso em 04/11/17.

Apêndice I

AULA 01 – O NÚCLEO ATÔMICO

Nome(s): _____ N°: _____ Turma: _____

1 – O quão pequeno é o núcleo atômico e qual sua constituição?

2 – No experimento realizado por Rutherford, mais de 99,99% das partículas α , que possuem carga positiva, não encontravam obstáculos e atravessavam direto os átomos da lâmina de ouro. Ou seja, menos de 0,01% eram refletidas ao colidirem com os núcleos dos átomos. Isto significa que a maior parte da massa do átomo está concentrada em um núcleo minúsculo, carregado positivamente, que possui cerca de 0,01% da dimensão do átomo. Sabendo-se que o átomo possui dimensão da ordem de 10^{10} m, determine a ordem de grandeza do núcleo. Anote esse valor na tabela 1. Em seguida, calcule a razão entre as dimensões do átomo e do núcleo, ou seja, quantas vezes o átomo é maior que o núcleo.

Tabela – Ordem de grandeza (em metros) dos mais variados objetos do universo

Ordem de Grandeza	Prefixo	Símbolo	Objeto	Ordem de Grandeza	Prefixo	Símbolo	Objeto
10^{-17}	-----	-----	Elétron	10^0	-----	-----	Pessoa
10^{-15}	femto	f	Próton	10^1	deca	da	Poste
? ?	-----	-----	NÚCLEO	10^2	hecto	h	Arranha-céu
10^{-10}	ångström	Å	Átomo	10^3	quilo	k	Morro da urca
10^{-9}	nano	n	Molécula DNA	10^4	-----	-----	Ponte Rio-Niterói
10^{-8}	-----	-----	Vírus	10^6	mega	M	Lua
10^{-7}	-----	-----	Bactéria	10^7	-----	-----	Terra
10^{-6}	micro	μ	Cromossomo	10^8	-----	-----	Júpiter
10^{-5}	-----	-----	Célula humana	10^9	giga	G	Sol
10^{-4}	-----	-----	Ácaro	10^{13}	-----	-----	Sistema Solar
10^{-3}	mili	m	Piolho	10^{15}	peta	P	Nebulosa da Raia
10^{-2}	centi	c	Formiga	10^{21}	zetta	Z	Via Láctea
10^{-1}	deci	d	Laranja	10^{26}	-----	-----	Universo observável

3 – A partir de suas respostas à questão anterior, complete a frase abaixo escolhendo dois objetos da tabela 1 que, comparando suas ordens de grandeza, melhor representam a razão entre o tamanho do átomo e o tamanho do núcleo:

“Se o átomo fosse do tamanho _____, o núcleo seria do tamanho _____.” Justifique sua escolha.

PARA PENSAR!!! “Se o núcleo é constituído exclusivamente de cargas positivas, que se repelem, por que ele permanece unido?”

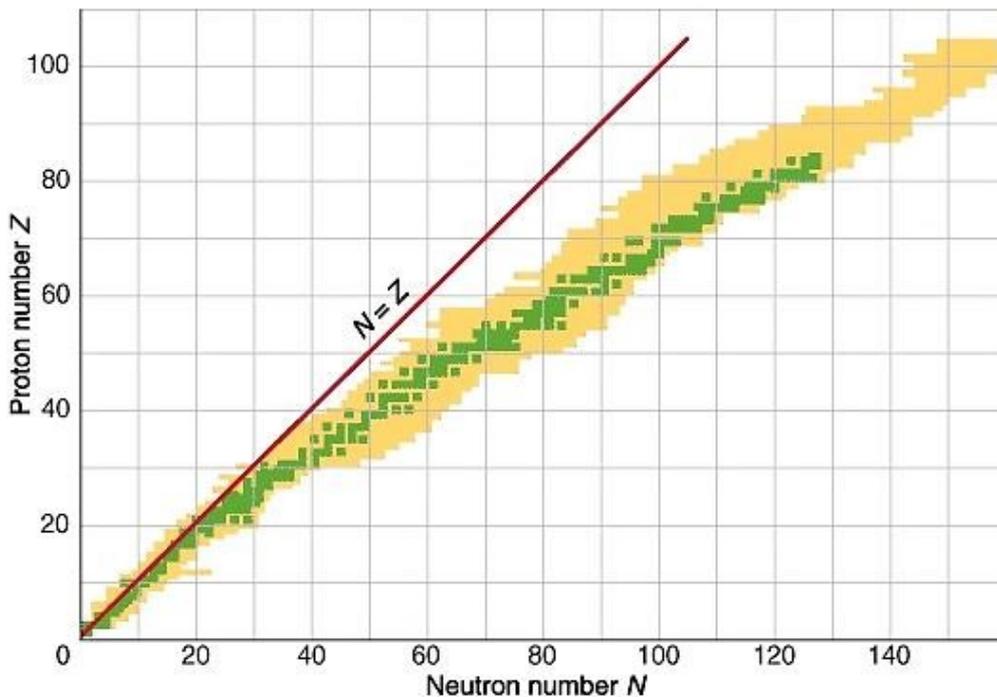
Apêndice II

AULA 02 – ESTABILIDADE NUCLEAR

Nome(s): _____ Nº: _____ Turma: _____

1 – A partir dos resultados obtidos na montagem experimental, responda às seguintes perguntas: É possível montar um núcleo estável somente com prótons? Por quê? Qual a função do nêutron na montagem experimental do núcleo?

2 – Cada elemento químico possui um número específico de nêutrons em seu núcleo. Se fizermos um gráfico do número de prótons (Z) contra o número de nêutrons (N) dos elementos, teremos a chamada *Curva de Estabilidade Nuclear* (Figura 1). Os quadradinhos verdes representam os núcleos estáveis e os quadradinhos amarelos os núcleos instáveis. A linha vermelha é uma linha imaginária, que representa os pontos em que o número de prótons é igual ao número de nêutrons ($Z = N$). Observe que os quadradinhos praticamente coincidem com a linha vermelha para valores pequenos de Z , ou seja, para núcleos pequenos.



Copyright 1998 by John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

Figura - Curva de Estabilidade Nuclear

- Qual é, aproximadamente, o número de prótons (Z) e o número de nêutrons (N) do último elemento estável? Em quanto difere esses dois valores?
- À medida que Z aumenta, ou seja, o núcleo aumenta, os quadradinhos e a linha vermelha vão se separando cada vez mais. O que isso significa?

PARA PENSAR!!! “Como um núcleo instável pode se tornar estável?”

Apêndice III

AULA 03 – INSTABILIDADE NUCLEAR

Nome(s): _____ Nº: _____ Turma: _____

Texto I: Cargas e massas relativas

Conforme visto anteriormente, o átomo possui um núcleo minúsculo, constituído por prótons e nêutrons, onde concentra-se sua carga positiva e praticamente toda sua massa.

A massa do próton vale $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg e é praticamente igual a massa do nêutron, mas cerca de 1836 vezes maior que a massa do elétron. Seu valor corresponde a uma unidade de massa atômica (1 u) e é adotada como massa de referência. Portanto, em unidades de massa atômica, a massa do elétron é praticamente nula. Já a carga do próton é em módulo (valor absoluto) igual à carga do elétron, porém, de sinais contrários. Essa carga, simbolizada por e ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C) é chamada carga elétrica elementar, sendo a carga elétrica de referência. Por fim, conforme já observado, a carga do nêutron é nula.

1 – Em Física Nuclear, devido à valores muito pequenos, é conveniente trabalharmos com as cargas e massas relativas das partículas. Assim, conforme o Texto I, complete a tabela abaixo com as cargas e massas relativas das partículas:

Tabela 1 - Massas e cargas relativas

Partícula	Massa relativa (u)	Carga elétrica relativa (e)
Próton	1	+1
Nêutron		
Elétron		

Texto II: Estrutura atômica

Os núcleos podem ser caracterizados por seu número de prótons (Z), também chamado de número atômico, e pelo número de nêutrons (N). O número de núcleons (prótons e nêutrons) em um núcleo é chamado de *número de massa*, sendo representado pela letra A ($A = Z + N$). Assim, para representar um núcleo, usa-se o símbolo do elemento químico correspondente, com seu número de prótons e número de massa ao lado, da seguinte maneira:



2 – Determine o número de nêutrons dos seguintes *isótopos** do urânio: ${}^{235}_{92}U$ e ${}^{238}_{92}U$. *Isótopos** são átomos de um mesmo elemento químico (mesmo número de prótons), mas com número de nêutrons diferentes.

Texto III: Radioatividade

Os núcleos instáveis tendem a procurar alcançar a estabilidade através da emissão de partículas e/ou energia, o que é chamado de *Radioatividade Natural*. Assim, emitem partículas e/ou radiação (ondas eletromagnéticas) de seu interior, transformando-se em outros núcleos. Esse processo é chamado de *decaimento radioativo*.

As principais emissões radioativas naturais são: alfa (α), beta (β) e gama (γ), e algumas de suas características são dadas na seguinte tabela (a ser completada):

Tabela 2 - Emissões radioativas

Nome da Radiação	Representação	Constituição	Carga relativa (e)	Massa relativa (u)	Poder de ionização	Poder de penetração
Alfa	${}^4_2\alpha$					
Beta	${}^0_{-1}\beta$	1 elétron*				
Gama	${}^0_0\gamma$	Onda eletromagnética				

* A radiação β também pode ocorrer pela emissão de um pósitron, antipartícula do elétron.

3 – Complete a tabela acima com a constituição da radiação alfa. Em seguida, complete também as colunas referentes à carga relativa e à massa relativa de cada radiação.

4 – Quando a radiação possui energia suficiente para arrancar elétrons orbitais de átomos neutros do meio, diz-se que ela é ionizante. Assim, o poder de ionização está diretamente relacionado à carga da radiação. Desta forma, complete com: *baixo*, *moderado*, ou *alto*, a coluna da tabela 2, relativa ao *Poder de ionização*. Depois, complete as lacunas da figura abaixo com o nome da radiação que incide naquele ponto da placa fotográfica, conforme o desvio sofrido por ela ao passar pelas placas eletricamente carregadas.

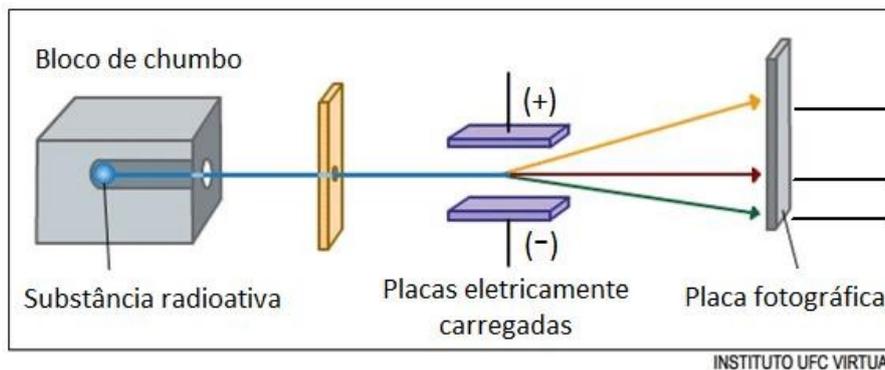


Figura 1 - Desvios sofridos pelas radiações no experimento realizado por Ernest Rutherford

5 – Ao atravessar um meio, as radiações ionizam os átomos que encontram em seu caminho e vão perdendo (depositando) energia até parar. Ao quanto a radiação consegue percorrer no meio dá-se o nome de *poder de penetração*, sendo inversamente proporcional ao seu poder de ionização. Portanto, complete com: *baixo*, *moderado*, ou *alto*, a coluna da tabela 2, relativa ao *Poder de penetração*. Em seguida, complete as lacunas da figura abaixo com o nome da radiação correspondente.

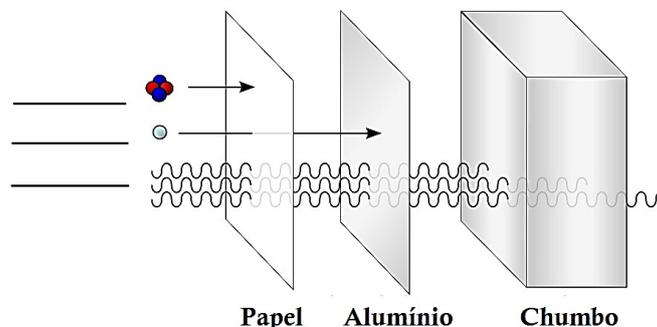


Figura 2 - Poder de penetração das radiações

PARA PENSAR!!! “Como é determinada a idade de um fóssil?”

Apêndice IV

AULA 04 – DATAÇÃO RADIOATIVA

Nome(s): _____ Nº: _____ Turma: _____

Texto I: Meia-vida ou período de semidesintegração

É o tempo necessário para desintegrar a metade dos átomos radioativos existentes em uma dada amostra. Ou seja, é o tempo que uma amostra radioativa leva para se reduzir à metade. É uma característica de cada radioisótopo e independe da pressão, temperatura e do composto químico no qual o radioisótopo esteja presente.

Tabela 1 - Meia-vida de alguns radioisótopos

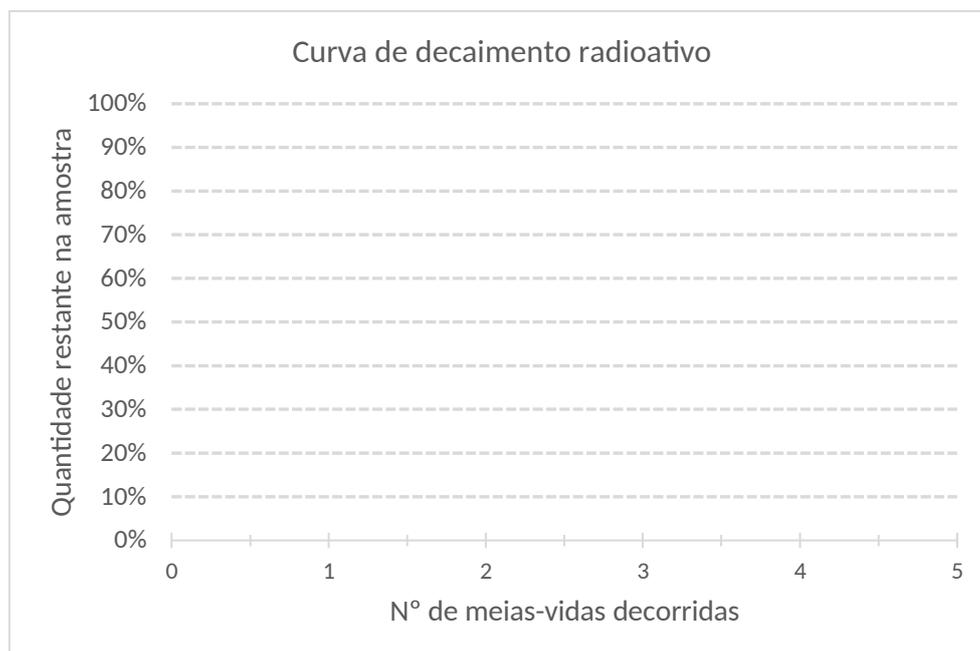
Radioisótopo	Meia-vida	Tipo de decaimento
Urânio-238	4,5 bilhões de anos	alfa
Carbono-14	5730 anos	beta
Césio-137	30 anos	beta
Iodo-131	8,05 dias	beta

1 – Uma amostra contém inicialmente determinada quantidade de material radioativo. Complete a tabela abaixo relacionando a quantidade restante (em %) na amostra a cada intervalo de meia-vida decorrida.

Tabela 2

Nº de meias-vidas	0	1	2	3	4	5
Quantidade restante (em %)	100	50				

2 – Utilizando a tabela do exercício anterior, esboce a curva que relaciona a quantidade restante (em %) na amostra em função do número de meias-vidas decorridas. (Essa curva é denominada *curva de decaimento radioativo*)



3 – Observe que a cada meia-vida, a fração de material radioativo na amostra se reduz à metade, ou seja, forma uma progressão geométrica (P.G.) de razão $1/2$ ($1, 1/2, 1/4, \dots, 1/64, \dots$), onde o expoente n desta razão será o número de meias-vidas decorridas. Assim, complete a tabela abaixo relacionando a quantidade restante na amostra (A) à quantidade de amostra inicial (A_0), em cada intervalo de meia-vida. Na última coluna, encontre uma expressão que forneça a quantidade restante na amostra após decorrido um número n qualquer de meias-vidas. (Essa expressão é conhecida como *Lei do decaimento radioativo*)

Tabela 3

N° de meias-vidas	0	1	2	3	4	5	6	...	n
Quantidade restante na amostra (A)	A_0	$\frac{A_0}{2}$					$\frac{A_0}{64}$...	

Texto II: A variação na massa atômica do carbono permite calcular a idade de organismos mortos há dezenas de milênios

O carbono-14 forma-se naturalmente nas camadas superiores da atmosfera, quando átomos de nitrogênio-14 são bombardeados por nêutrons presentes nos raios cósmicos. O carbono-14 combina-se com o oxigênio do ar para formar gás carbônico. Assim como o carbono-12, ele é absorvido pelas plantas por meio da fotossíntese. Os animais se alimentam das plantas, fazendo com que o carbono-14 entre na cadeia alimentar. Assim, a proporção de carbono-12 e carbono-14 nos seres vivos permanece constante durante toda sua vida. Após a morte, porém, essa proporção começa a ser alterada pela radioatividade. A cada 5.730 anos, metade do carbono-14 presente nos restos mortais vira carbono-12. Esse período de tempo (chamado de meia-vida) serve de referência para determinar a idade de um fóssil. Depois de descobertos, os fósseis têm de ser levados a um laboratório, onde as massas de carbono-12 e carbono-14 podem ser identificadas com precisão e usadas no cálculo final de sua idade (...).

Adaptado de < <http://mundoestranho.abril.com.br/materia/como-edeterminada-a-idade-de-um-fossil> >. Acessado em 15/08/16.

4 – A partir da análise do texto II e consultando a tabela 1, complete a tabela com o radioisótopo que é melhor indicado para a realização de cada procedimento abaixo. Justifique cada escolha.

Tabela 4

Procedimento	Radioisótopo	Justificativa
Datação de um fóssil de <i>Homo sapiens</i> *		
Exame de cintilografia** da tireoide		
Determinação da idade da Terra***		

* Nome dado à espécie dos seres humanos.

** Exame que avalia o funcionamento da glândula tireoide, localizada no pescoço, no qual o paciente deve ingerir uma substância radioativa, que também pode ser injetada diretamente na veia, para ajudar a formar imagens e facilitar a avaliação do médico.

*** Esta idade é baseada em datação de meteoritos e é consistente com as idades das mais antigas amostras terrestres e lunares.

PARA PENSAR!!! “De onde vem a energia que mantém o núcleo unido?”

Apêndice V

AULA 05 – FISSÃO NUCLEAR

Nome(s): _____ N°: _____ Turma: _____

Texto I: A equivalência massa-energia

A equação da equivalência massa-energia de Albert Einstein mostra que massa (m) e energia (E) estão estritamente relacionadas, ou seja, massa pode ser transformada em energia e energia pode ser transformada em massa, da seguinte maneira:

$$E = mc^2$$

Onde $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo.

Observe que o valor de c^2 é absurdamente grande. Logo, uma pequena quantidade de massa pode ser transformada em uma grande quantidade de energia.

1 – Imagine que uma massa de 1 kg fosse integralmente transformada em energia. Determine, em joule (J), essa energia. Em seguida, transforme-a em quilowatt-hora (kWh). Use que $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6$ J.

2 – O consumo anual de energia elétrica de um brasileiro é cerca de $2,5 \cdot 10^3$ kWh. A energia encontrada na questão anterior é equivalente ao consumo anual de quantos brasileiros?

Texto II: Empacotamento nuclear

A massa de um núcleo é menor que a soma das massas das partículas que o constituem (prótons e nêutrons).

$$M_{\text{núcleo}} < M_{\text{prótons}} + M_{\text{nêutrons}}$$

Isso significa que quando se mede a massa de um núcleo, encontra-se um valor menor do que quando se é somada as massas de cada um dos seus constituintes separadamente. A diferença entre essas massas foi convertida em energia de ligação, necessária para manter unidas as partículas que constituem o núcleo. Pela equivalência massa-energia, esta relação pode ser escrita como:

$$\text{Energia}_{\text{ligação}} = (M_{\text{constituintes}} - M_{\text{núcleo}})c^2$$

Texto III: Fissão Nuclear

Neste processo, ao ser bombardeado por partículas de alta energia, como um nêutron, por exemplo, um núcleo de massa grande se divide em dois núcleos menores. A energia liberada simplesmente é a energia de ligação acumulada na formação daquele átomo. Após a primeira fissão, os nêutrons liberados podem atingir outros núcleos, provocando fissões sucessivas, ocasionando assim uma reação em cadeia.

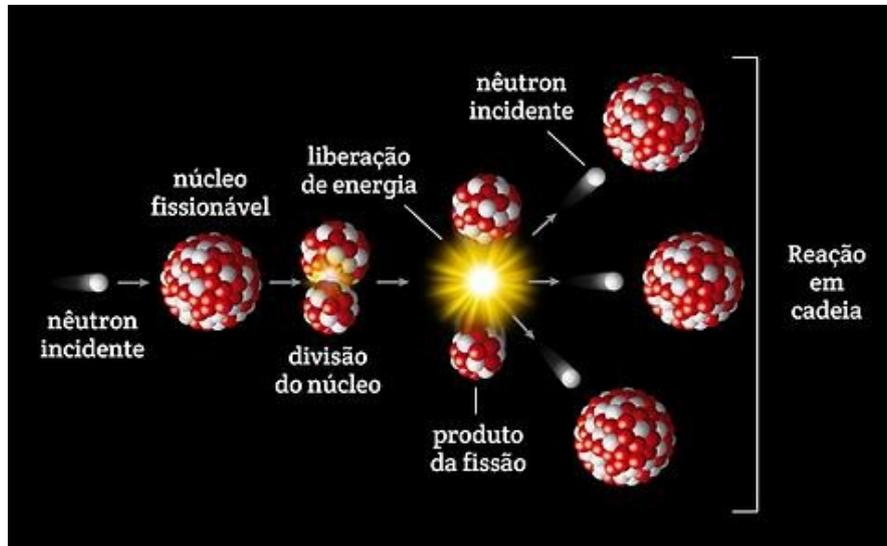


Figura - Reação em cadeia

3 – Em um processo de fissão total, uma massa de 1 kg de urânio libera uma energia de $9 \cdot 10^{13}$ J. Esse valor é diferente do encontrado na questão 1. Isso mostra que na formação de um núcleo, apenas parte de sua massa se transforma em energia de ligação. Utilizando a equação da equivalência massa-energia, determine qual a massa de urânio transformada em energia no processo acima. Esse valor corresponde a quantos % da massa total (1 kg)?

4 – Suponha que toda energia obtida na queima do óleo diesel seja de origem química (atômica) e que a energia obtida pela fissão do urânio de origem nuclear. Sabendo-se que em uma usina nuclear, uma pastilha de 20 g de dióxido de urânio (UO_2) é capaz de produzir a mesma energia que 500.000.000 g de óleo diesel, determine quantas vezes os processos nucleares são mais energéticos que os processos atômicos.

PARA PENSAR!!! “De onde vem a energia do Sol?”

Apêndice VI

AULA 06 – FUSÃO NUCLEAR

Nome(s): _____ Nº: _____ Turma: _____

Texto I: O Sol

“... Essa lanterna que ilumina nossas manhãs é responsável pelo aparecimento e manutenção da vida na Terra. O Sol formou-se a partir da condensação, induzida pela gravidade, de uma nuvem gasosa constituída basicamente de hidrogênio (90%) e hélio (9%)... O Sol é uma estrela já na meia-idade: tem cinco bilhões de anos e estima-se que viverá ainda outro tanto. Ao longo de todos esses anos de vida, o Sol forneceu energia constantemente e uma questão que intrigou a mente dos seres humanos durante séculos é a origem da energia dessa usina cósmica...”

GALETTI, Diógenes; LIMA, Celso L. **Energia Nuclear: com fissões e com fusões**. São Paulo: UNESP, 2010. Pág. 73.

Nas questões de 1 a 3, suponha que a energia extraída do Sol fosse de origem química, como, por exemplo, a energia extraída da queima de carvão.

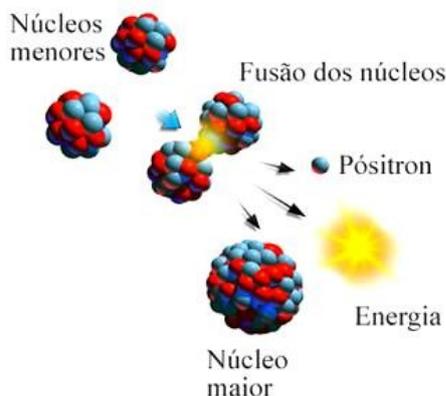
1 – Sabendo-se que ao queimar 1kg de carvão é liberada uma energia de aproximadamente $3,0 \cdot 10^7$ J e que a luminosidade do Sol é cerca de $4,0 \cdot 10^{26}$ J/s, determine quantos quilos desse combustível o Sol deveria consumir por segundo para manter essa luminosidade. (*Sugestão: deixe a resposta na forma de fração*)

2 – Sabendo-se que a massa do Sol é de aproximadamente $2,0 \cdot 10^{30}$ kg e utilizando o valor obtido na questão anterior, determine em quantos segundos o Sol levaria para esgotar seu combustível. Em seguida, transforme sua resposta em anos. Use que $1 \text{ ano} = 3 \cdot 10^7$ s.

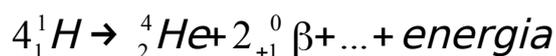
3 – Comparando o resultado encontrado na questão anterior com a idade do Sol fornecida no texto I, é possível que a energia do Sol possa ter origem química? Justifique.

Texto II: Fusão nuclear

Neste processo, dois núcleos atômicos menores são fundidos para se criar um núcleo atômico maior. Mas, pelo efeito de empacotamento, a massa do núcleo formado será menor que a soma das massas dos seus componentes separadamente, ocorrendo assim grande liberação de energia.



Esta reação é a que ocorre no interior das estrelas, onde, por exemplo, quatro prótons se fundem para formar um átomo de hélio, produzindo adicionalmente dois pósitrons* e dois neutrinos**, conforme reação abaixo:



* Pósitron é a antipartícula do elétron. Apresenta carga + 1 e sua massa é a mesma do elétron.

** Neutrino é uma partícula subatômica sem carga e de massa desprezível.

4 – Para manter a atual produção de energia do Sol, cerca de $1,8 \cdot 10^{19}$ kg de hidrogênio por ano estão sendo transformados em hélio. Supondo que existam $1,8 \cdot 10^{30}$ kg de hidrogênio no Sol, determine em quantos anos, caso fosse mantido esse ritmo, levaria para que todo seu hidrogênio se extinguísse. Transforme em bilhões de anos. Use que 1 bilhão = 10^9 .

5 – Comparando o resultado encontrado na questão anterior com a idade do Sol fornecida no texto I, faz sentido que a energia do Sol seja de origem nuclear? Justifique.

6 – Após assistir ao vídeo “*Rock Star e a origem do Metal*”, responda de maneira sucinta: Por que se pode dizer que somos poeira das estrelas?

Apêndice VII

ORIENTAÇÕES PARA OS SEMINÁRIOS DE FÍSICA NUCLEAR

Objetivo

Realizar com os estudantes, em forma de seminários, uma discussão à respeito dos benefícios e malefícios do uso de elementos ligados à Física Nuclear na sociedade.

Metodologia

A turma deverá se dividir em grupos, com cerca de 6 estudantes.

Cada grupo terá no mínimo 10 e no máximo 12 minutos para sua apresentação. Após cada apresentação, será aberto à turma um tempo de 3 minutos para perguntas direcionadas ao grupo. Caso nenhuma pergunta seja feita, o professor fará as perguntas.

Cada grupo ficará livre para a escolha do(s) tema(s) a serem abordados, não se restringindo às sugestões abaixo. Entretanto, limitando-se ao tema física nuclear. Será de livre escolha dos grupos também, as ferramentas e recursos didáticos a serem utilizados, como, por exemplo, o uso de: imagens, vídeos (máximo de 3 minutos, somando-se todos os vídeos que façam parte da apresentação), quadro negro, cartazes ou projetor.

Avaliação

Serão analisados: apresentação; domínio de conteúdo; participação nos seminários.

Sugestões de temas e assuntos relacionados

- Medicina nuclear: tipos de radiação e radiofármacos utilizados; traçadores radioativos; cintilografia; tomografia por emissão de pósitrons (PET); ressonância magnética nuclear;
- Efeitos das radiações nos seres humanos: efeitos físicos, efeitos químicos; efeitos biológicos; tempo de exposição; intensidade da radiação.
- Energia nuclear na agricultura e na indústria: traçadores radioativos; autorradiografia; esterilização; gamagrafia; controle de qualidade.
- Acidentes e desastres nucleares: efeitos ambientais e rejeitos radioativos; acidente de Chernobyl; acidente radiológico de Goiânia (Césio-137); acidente de Fukushima.
- Usinas nucleares: tipos de reatores; funcionamento e viabilidade das usinas termonucleares; usinas nucleares no Brasil; vantagens e desvantagens.
- Armas nucleares: enriquecimento de urânio; bomba atômica; bomba de hidrogênio, bomba de nêutrons; Projeto Manhattan.
- Fusão nuclear: o Sol como principal fonte de energia da Terra; ciclo de vida das estrelas; origem dos elementos químicos; reator de fusão nuclear; a fusão como alternativa energética.
- Energia nuclear e Geopolítica: participação da energia nuclear na matriz energética; política de energia nuclear do Brasil; a energia nuclear e a soberania nacional; conflitos armados; administração, controle e legislação da tecnologia nuclear.

Apêndice VIII

ORIENTAÇÕES PARA A ATIVIDADE EXPERIMENTAL

Atividade experimental: Construção de um modelo de núcleo atômico

A atividade experimental consiste na criação de um modelo de núcleo atômico, produzido a partir da ligação de bolinhas de isopor (de aproximadamente 5 cm de diâmetro), utilizando-se para isso de pequenas molas (espiral de plástico usado em encadernação, com cerca de 4 cm de comprimento) e fita adesiva dupla face.

Assim como ocorre no núcleo, as bolinhas de isopor devem ser ligadas de tal modo a se manterem estáveis e coesas. Para isso, a montagem deve ser feita da seguinte forma:

- A força forte, que viabiliza a existência do núcleo, será representada por uma fita adesiva dupla face e deverá ser usado apenas um pequeno pedaço na ligação entre cada bolinha.
- A força elétrica de repulsão entre os prótons será representada pela mola, que será usada somente na ligação entre os prótons.

Roteiro

1. Divida a turma em pequenos grupos (cerca de 3 estudantes).
2. Distribua para cada grupo: duas bolinhas marcadas com a letra P (prótons), um pequeno pedaço de fita adesiva e uma mola.
3. Peça aos alunos para ligarem os dois prótons. Para isso, a mola deverá ser fixada nos “polos” da bolinha. A fita adesiva deve ser fixada entre os prótons, na posição em que o estudante preferir.
4. Espere a montagem (cerca de 5 minutos). Pergunte aos grupos se foi possível realizar a ligação. Caso algum consiga (o que é provável), pergunte-os se ela é estável ou não.
5. Em seguida, peça-os para inserirem o nêutron na ligação. Para isso, devem utilizar dois pedaços de fita adesiva, um em cada próton ligado ao nêutron.
6. Espere a montagem (cerca de 5 minutos). Pergunte a turma se a ligação se tornou mais fácil e estável com a introdução do nêutron.

Apêndice IX – PRODUTO EDUCACIONAL

UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE FÍSICA NUCLEAR NO ENSINO MÉDIO

Neste apêndice apresentamos, na íntegra, o produto educacional desenvolvido para fins deste trabalho.

Introdução

Prezado(a) Professor(a):

O presente trabalho consiste de uma sequência didática para o ensino de Física Nuclear no Ensino Médio, aplicada em turmas regulares de terceiro ano do ensino médio da rede estadual de ensino, na cidade de Juiz de Fora – MG, ocorrida nos anos de 2016 e 2017. Tal trabalho é fruto da necessidade geralmente encontrada em se abordar esse tema de maneira crítica e racional, aliada também à possibilidade de colaborar com o fomento do ensino de Física Moderna na educação básica.

Com o intuito de uma maior abrangência e aplicabilidade desta sequência didática, julgamos ser necessário que ela se estruturasse em apenas 8 aulas regulares de cinquenta minutos, inserida em um planejamento bimestral de 16 aulas⁵³, podendo, em casos específicos, e se assim o professor aplicador necessitar, ser estendida conforme a carga horária disponível para sua aplicação.

Portanto, dentro do planejamento bimestral que sugerimos, as primeiras seis aulas destinam-se a uma breve revisão do assunto Ondas Eletromagnéticas, bem como à abordagem de tópicos de Física Quântica e Relatividade Especial, adaptados ao nível de tratamento desta etapa de ensino. As demais aulas são reservadas à sequência didática (8 aulas) propriamente dita e às eventuais avaliações (2 aulas) a serem aplicadas ao longo do bimestre. Ressaltamos que a anterior abordagem desses tópicos de Física Moderna não deve ser interpretada como uma exigência, mas sim, como uma sugestão, podendo ocorrer tanto antes quanto depois do tema Física Nuclear ser apresentado, sem comprometer assim sua aplicação.

A metodologia de ensino-aprendizagem adotada varia de acordo com o número de complexidade e adaptabilidade dos temas. Para isso, são utilizadas estratégias distintas, tais como: o uso de textos, vídeos, gráficos, tabelas e atividades

⁵³Ver tabela 1, p. 105.

práticas. Ainda em relação a essa abordagem, recomendamos o uso de um projetor (*data show*) para a exibição de vídeos e imagens, e também para se realizar a leitura dos textos e questões junto aos alunos.

Procuramos empregar um tratamento mais fenomenológico aos conceitos apresentados, sem deixar de lado a matemática necessária para sua compreensão. Para atingir esse propósito, optamos por utilizar uma abordagem baseada na teoria sociocultural de Lev Semenovitch Vygotsky (1896 - 1934), onde a aprendizagem é uma atividade conjunta, em que relações colaborativas entre alunos podem e devem ter espaço. Deste modo, é proposto que nessas aulas os estudantes realizem as atividades em pequenos grupos (cerca de três alunos), orientados pela folha-roteiro da aula em questão (com exceção das Aulas 07 e 08, em formato de seminários), e, claro, pelo professor, que desempenha um papel mediador indispensável nessa metodologia.

Cientes também da dificuldade que outro profissional encontra na aplicação de uma proposta pedagógica sequencialmente estruturada, procuramos, de modo a facilitar essa tarefa, detalhar o planejamento de cada uma dessas aulas.

Esperamos que este trabalho possa ser útil em sua prática pedagógica.

Planejamento Bimestral

Tabela 1. Cronograma para um bimestre de 16 aulas⁵⁴. Foram reservadas 2 aulas para eventuais avaliações.

TÓPICOS	CRONOGRAMA
<p><u>I. NOÇÕES DE FÍSICA QUÂNTICA E RELATIVIDADE</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Ondas Eletromagnéticas • Radiação do Corpo Negro <ul style="list-style-type: none"> • Efeito Fotoelétrico • Modelo Atômico de Bohr • Dualidade Onda-Partícula e Princípio da Incerteza <ul style="list-style-type: none"> • Relatividade Especial 	6 aulas
AVALIAÇÃO I	1 aula
<p><u>II. FÍSICA NUCLEAR</u> (SEQUÊNCIA DIDÁTICA)</p> <ul style="list-style-type: none"> • O Núcleo Atômico • Estabilidade Nuclear • Instabilidade Nuclear • Datação Radioativa <ul style="list-style-type: none"> • Fissão Nuclear • Fusão Nuclear • Seminários de Física Nuclear 	8 aulas
AVALIAÇÃO II	1 aula

Fonte: próprio autor.

⁵⁴ Diante das dificuldades que por ventura possam surgir durante a prática pedagógica, apresentamos aqui um planejamento bimestral de somente dezesseis aulas, número que consideramos acessível de se obter em grande parte das instituições de ensino, e que julgamos necessário para uma satisfatória aplicação deste trabalho.

Planejamento da Aula 01 – O Núcleo Atômico

Objetivos

O principal objetivo desta primeira aula é introduzir os estudantes ao tema Física Nuclear, apresentando-os aos constituintes do núcleo atômico e a sua escala de dimensão, algo bem distante do senso comum dos alunos. Espera-se que ao final dessa aula os estudantes sejam capazes de:

- descrever qualitativamente a composição do núcleo atômico;
- operar com Algarismos Significativos e potências na base 10;
- calcular grandezas que envolvam valores da escala nuclear à astronômica;
- comparar, de forma relativa, a dimensão do núcleo atômico à de outros corpos.

Metodologia

Por se tratar da primeira aula, é interessante que o professor comece-a fazendo uma breve explicação para os alunos da metodologia a ser adotada na sequência didática. Tal atitude pode representar uma economia de tempo nas demais aulas, por deixá-los cientes do procedimento e comportamento a serem seguidos.

Realizada a apresentação, é entregue a folha-roteiro (Apêndice I), com a turma sendo dividida em pequenos grupos. Em seguida, é lançada à classe a questão: “*O quão pequeno é o núcleo atômico e qual sua constituição?*”. Dado certo tempo para responderem (cerca de 5 minutos), pede-se que os grupos leiam suas respostas.

Feita as leituras, é apresentado um pequeno vídeo⁵⁵, produzido pelo Canal Socratica, sobre os primeiros modelos atômicos, o qual foi editado para ser exibido apenas a parte em que destaca a experiência realizada por Rutherford, que resultou na descoberta do núcleo atômico (do instante 2:32 ao 4:20). Cessada a exibição, pede-se para os estudantes responderem à questão 2, onde devem encontrar a razão entre as dimensões do átomo e do núcleo atômico, a partir da análise da razão entre os valores em porcentagem das partículas que atravessavam diretamente a lâmina de ouro e aquelas que colidiam com os núcleos dos átomos do material. A seguir, é pedido que anotem esse valor no lugar apropriado da tabela na folha-roteiro. Dado

⁵⁵ Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kT2sHBF9Q3k>>. Acessado em julho de 2016.

aproximadamente 10 minutos para resolverem a questão, pede-se para um dos grupos, utilizando o quadro, justificar sua resposta.

Na sequência, é exibido o vídeo do astrofísico Danail Obreschkow⁵⁶, mostrando as dimensões de alguns corpos, desde o núcleo, ao universo observável. Ao seu término, é apresentado à classe a tabela da folha-roteiro (Tabela 2 abaixo).

Tabela 2 – Ordem de grandeza (em metros) dos mais variados “objetos” do universo.

Ordem de Grandeza	Prefixo	Símbolo	Objeto	Ordem de Grandeza	Prefixo	Símbolo	Objeto
10^{-17}	-----	-----	Elétron	10^0	-----	-----	Pessoa
10^{-15}	femto	f	Próton	10^1	deca	da	Poste
? ?	-----	-----	NÚCLEO	10^2	hecto	h	Arranha-céu
10^{-10}	ångström	Å	Átomo	10^3	quilo	k	Morro da Urca
10^{-9}	nano	n	Molécula DNA	10^4	-----	-----	Ponte Rio-Niterói
10^{-8}	-----	-----	Vírus	10^6	mega	M	Lua
10^{-7}	-----	-----	Bactéria	10^7	-----	-----	Terra
10^{-6}	micro	μ	Cromossomo	10^8	-----	-----	Júpiter
10^{-5}	-----	-----	Célula humana	10^9	giga	G	Sol
10^{-4}	-----	-----	Ácaro	10^{13}	-----	-----	Sistema Solar
10^{-3}	mili	m	Piolho	10^{15}	peta	P	Nebulosa da Raia
10^{-2}	centi	c	Formiga	10^{21}	zetta	Z	Via Láctea
10^{-1}	deci	d	Laranja	10^{26}	-----	-----	Universo observável

Fonte: próprio autor.

Dando continuidade, pede-se para os alunos responderem à questão 3, onde devem escolher dois objetos da tabela acima que, comparando suas ordens de grandeza, melhor preencham as lacunas da seguinte frase: “Se o átomo fosse do tamanho _____, o núcleo seria do tamanho _____”. Justifique sua escolha.”.

Aguardado em torno de 5 minutos para que respondam, é pedido para os grupos lerem sua resposta, comparando-a com as da turma.

Na última parte da aula, lança-se a questão: “Se o núcleo é constituído exclusivamente de cargas positivas, que se repelem, por que ele permanece unido?”, onde os alunos deverão trazer a resposta para a próxima aula.

⁵⁶ Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=jfSNxVqprvM>>. Acessado em julho de 2016.

Planejamento da Aula 02 – Estabilidade Nuclear

Objetivos

Nesta segunda aula, dando continuidade à questão finalizadora da aula anterior, que indagava sobre o motivo do núcleo ser coeso, é abordado com os alunos a origem da estabilidade nuclear, bem como a relação entre seus núcleons, além de apresentar aos estudantes, na forma de uma atividade experimental com bolinhas de isopor, fita adesiva e molas, um modelo teórico para o núcleo atômico. Modelo este que, mesmo em um primeiro momento aparentando ser lúdico, demonstra-se eficiente para que os estudantes consigam alcançar os objetivos abaixo:

- descrever a relação entre a força forte e a força elétrica;
- compreender a função do nêutron no núcleo atômico;
- analisar a relação entre o número de prótons e o número de nêutrons com a estabilidade nuclear;
- compreender a curva de estabilidade nuclear.

Metodologia

A aula inicia-se com os grupos apresentando suas respostas à pergunta finalizadora da aula anterior, a saber: *“Se o núcleo é constituído exclusivamente de cargas positivas, que se repelem, por que ele permanece unido?”*.

Realizadas as leituras, a turma novamente é dividida em pequenos grupos, para a realização da atividade experimental (Apêndice VIII), que consiste na construção de um modelo de núcleo atômico, utilizando-se para isso: bolinhas de isopor (com aproximadamente 5 cm de diâmetro); pequenas molas (pedaços de espirais plásticos usados em encadernações, com aproximadamente 4 centímetros de comprimento); fita adesiva dupla face. Dependendo das condições, como o número de alunos e a disponibilidade de material, pode-se utilizar mais bolinhas na atividade para a representação do núcleo atômico, ou então, grupos com mais ou menos alunos. Entretanto, julgamos ser suficiente o uso de apenas três bolinhas de isopor por grupo: duas para representar os prótons e uma para representar o nêutron. Além disso, acreditamos que o uso de grupos com apenas 3 alunos, evita-se com que alguns estudantes fiquem sem participar da atividade.

O principal objetivo desta prática é que os alunos possam perceber a importância do nêutron na estabilidade nuclear. Em um primeiro momento, pede-se

para os estudantes ligarem somente duas bolinhas, que representam os dois prótons. Para isso, é preciso que utilizem, necessariamente, uma mola e um pedaço de fita adesiva. A mola deve ser fixada nos “polos” das bolinhas⁵⁷. A fita adesiva é fixada de tal maneira a juntá-las, na posição em que o estudante preferir. Na etapa seguinte é pedido para inserirem o nêutron na ligação. Para isso, devem utilizar dois pedaços de fita adesiva no nêutron, um para cada próton ligado a ele. O tempo estimado para a execução de toda a atividade experimental é de 15 a 20 minutos.

Após as montagens experimentais, é distribuído a folha-roteiro (Apêndice II) e os estudantes devem responder a sua questão 1, que se refere aos constituintes do núcleo atômico, contendo perguntas nas quais as respostas baseiam-se nos resultados obtidos durante a atividade prática, o que deve levar cerca de 5 minutos.

Em seguida, é pedido que os alunos respondam a sua questão 2, onde é apresentada uma representação gráfica (*Curva de estabilidade nuclear*), a partir da qual eles têm de analisar a relação existente entre o número de prótons e o número de nêutrons com a estabilidade nuclear. Estima-se que os estudantes a respondam em no máximo 10 minutos.

Na última parte da aula, é lançado à classe a seguinte questão finalizadora: “*Como um núcleo instável pode se tornar estável?*”. Os alunos devem trazer a resposta para a próxima aula.

⁵⁷ Para que haja uma repulsão nas bolinhas (prótons) provocada pela mola (espiral), é necessário que esta esteja ou comprimida, ou esticada na ligação. Novamente, com o intuito de se evitar um maior uso de materiais, optamos por utilizar pequenos pedaços de mola. Em virtude disto, e do tamanho das bolinhas (5 cm), foram usados pedaços de espiral de aproximadamente 4 cm, para que, desta forma, ao serem fixados nos polos das bolinhas, ficassem levemente esticados, forçando as bolinhas a descolarem e, conseqüentemente, provocando uma instabilidade na ligação.

Planejamento da Aula 03 – Instabilidade Nuclear

Objetivos

Intimamente ligada à aula anterior, sobre a estabilidade nuclear, a terceira aula da sequência didática apresenta as consequências da instabilidade do núcleo, introduzindo os estudantes ao conceito de Radioatividade Natural, além de brevemente relembra-los alguns conceitos de estrutura atômica, como número de massa, número atômico, carga elementar e isótopos. Também é apresentada as principais características das emissões radioativas: alfa, beta e gama.

Após as citadas introdução e revisão, é esperado que ao seu final os estudantes saibam:

- compreender os conceitos de número de massa, número atômico e isótopo;
- compreender os conceitos de carga e massa relativas;
- descrever o fenômeno da radioatividade natural;
- analisar a constituição e as principais características das emissões alfa, beta e gama.

Metodologia

No primeiro momento da aula, é pedido para os grupos lerem sua resposta da questão finalizadora da aula anterior: “*Como um núcleo instável pode se tornar estável?*”. Após as leituras, distribui-se a folha-roteiro (Apêndice III) à turma, onde é apresentado o texto I, intitulado *Cargas e massas relativas*, que como o nome indica, revisa alguns conceitos básicos como carga e massa relativas, assim como alguns valores fundamentais, entre eles, a carga do elétron e a massa do próton. Em seguida, devem resolver a questão 1, em que é necessário completar uma tabela (*Massas e cargas relativas*) com os valores relativos da carga e massa do nêutron e do elétron. Estima-se que a leitura do texto e a resolução desta questão leve em torno de 10 minutos.

Na etapa seguinte, é apresentado o texto II (*Estrutura atômica*), que faz uma revisão de alguns conceitos básicos, como número de massa, número atômico e isótopos. Após sua leitura, os estudantes respondem à questão 2, que pede para se determinar o número de nêutrons dos seguintes isótopos: urânio-235 e urânio-238. Os alunos não devem levar mais que 8 minutos para concluir esta etapa.

Na sequência, é apresentado o texto III (*Radioatividade*), que define de maneira sucinta o que é Radioatividade e como ocorre esse fenômeno. Na sequência, exibe-se um vídeo de autoria da CCEAD/PUC-RJ ⁵⁸, de aproximadamente 2 minutos de duração, o qual foi editado a fim de se destacar a parte histórica da Radioatividade, como sua descoberta e algumas contribuições de Marie Curie e Henri Becquerel a essa área de estudo. Em seguida, é apresentado a tabela (*Emissões radioativas*), inicialmente incompleta, contendo algumas características das emissões radioativas, a qual os estudantes devem preenchê-la à medida que se pede nos três exercícios seguintes. Na questão de número 3, por exemplo, é solicitado que os estudantes a completem com a constituição da radiação alfa e com a carga e massa relativa das emissões apresentadas.

Na questão 4, os estudantes devem classificar essas radiações quanto ao seu poder de ionização, além de completar as lacunas da figura (*Desvios sofridos pelas radiações no experimento realizado por Ernest Rutherford*) com o respectivo nome da emissão que ali incide, após atravessar uma região de campo elétrico. Dando continuidade, na questão 5, é pedido para classificar essas emissões, na coluna adequada da tabela, quanto ao seu poder de penetração, bem como completar as lacunas da figura (*Poder de penetração das radiações*), com o nome da radiação correspondente. Todo esse processo (resolução das questões 3, 4 e 5) deve levar cerca de 20 minutos.

Por fim, é apresentada à turma a questão: “*Como é determinada a idade de um fóssil?*”; cuja resposta deve ser entregue pelos alunos na aula seguinte.

⁵⁸ Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=tO3QMbiAhRI>>. Acessado em agosto de 2016.

Planejamento da Aula 04 – Datação Radioativa

Objetivos

Diferentemente das aulas anteriores, voltadas aos conceitos e fundamentos teóricos, a quarta aula da sequência didática possui um foco maior nas aplicações e no uso da energia nuclear, sem, contudo, deixar de fazer uma abordagem de alguns conceitos matemáticos, como a progressão geométrica e a curva de decaimento exponencial. Desta forma, espera-se que ao seu final, os estudantes sejam capazes de:

- compreender o conceito de meia-vida ou período de semidesintegração;
- analisar a curva e a lei do decaimento radioativo;
- descrever a datação radioativa;
- compreender algumas aplicações do uso de radioisótopos.

Metodologia

Ao início da aula, os estudantes devem ler as respostas à questão finalizadora da aula anterior: “*Como é determinada a idade de um fóssil?*”. Em seguida, assim como nas aulas anteriores, são divididos em pequenos grupos e é realizada com a turma a leitura do texto I da folha-roteiro (Apêndice IV), que contém a definição de meia-vida, e de uma tabela com o valor de meia-vida de alguns elementos, que serão úteis no decorrer da aula. Após serem apresentados a essas informações, deverão responder as questões de 1 a 3.

Na questão 1 é pedido que os alunos completem uma tabela que relaciona a quantidade restante (em %) na amostra a cada intervalo de meia vida decorrida. Em seguida, na questão 2, os estudantes devem completar a curva de decaimento radioativo, utilizando os valores obtidos na questão anterior. Na sequência, a questão 3 pede que os alunos completem uma tabela, relacionando a fração de material radioativo restante na amostra (A) à quantidade de amostra inicial (A_0) em cada intervalo de meia-vida decorrida. Além disso, devem encontrar uma expressão que forneça a quantidade restante na amostra após decorrido um número n qualquer de meias-vidas. Estima-se que os estudantes levem aproximadamente 20 minutos para a resolução dessas questões, juntamente com a leitura do texto I.

Posteriormente, os alunos farão a leitura do texto II, extraído e adaptado da revista *Mundo Estranho*⁵⁹, explicando como é determinada a idade de um fóssil. Em seguida, devem responder à questão 4, onde é pedido para completarem uma tabela com o radioisótopo que é melhor indicado para a realização de cada procedimento citado. É esperado que toda essa etapa seja resolvida em cerca de 15 a 20 minutos.

Por último, serão apresentados à questão finalizadora “*De onde vem a energia que mantém o núcleo unido?*”, a ser entregue na próxima aula.

⁵⁹ Disponível em: <<http://mundoestranho.abril.com.br/materia/como-eterminada-a-idade-de-um-fossil>>. Acessado em agosto de 2016.

Planejamento da Aula 05 – Fissão Nuclear

Objetivos

A quinta aula da sequência didática retorna à questão da estabilidade nuclear, assunto já tratado na segunda aula. Entretanto, diferentemente da primeira abordagem, esta aula aprofunda-se na origem da energia responsável pela coesão do núcleo atômico, dando enfoque à equivalência massa-energia, tendo como plano de abordagem o processo de fissão nuclear, além de sua principal utilização, a geração de energia elétrica.

Após essas relações, espera-se que os estudantes saibam:

- compreender e utilizar a equivalência massa-energia;
- trabalhar com unidades distintas de energia;
- compreender o empacotamento nuclear;
- descrever o processo de fissão nuclear;
- descrever o processo de geração de energia elétrica em uma usina nuclear.

Metodologia

A aula inicia-se com a leitura das respostas da questão finalizadora da aula anterior: *De onde vem a energia que mantém o núcleo unido?*

Feita as leituras, os estudantes serão apresentados ao texto I da folha-roteiro (Apêndice V) que defini sucintamente a equivalência massa-energia, além de apresentar a equação $E = mc^2$, proposta em 1905 por Albert Einstein, relacionando essas duas grandezas. Em seguida, irão responder às questões 1 e 2. Na primeira dessas questões, é pedido que os estudantes encontrem qual seria a energia liberada, em joule e em quilowatt-hora, se uma massa de 1 kg fosse integralmente transformada em energia. Na segunda, é perguntado qual seria o número de brasileiros que esse valor de energia seria capaz de abastecer anualmente, baseado em um consumo médio anual de energia elétrica de um brasileiro ($2,5 \cdot 10^3$ kWh). É estimado que esta etapa, leitura do texto I e resolução das questões 1 e 2, seja executada pelos estudantes em torno de 15 minutos.

Na sequência, os alunos farão a leitura dos textos II e III. O primeiro deles (*Empacotamento nuclear*) é sobre a diferença da massa do núcleo em relação a

massa de seus constituintes, quando tomados separadamente. O segundo (*Fissão nuclear*), apresenta de forma simplificada esse processo.

Realizadas as leituras, será exibido à turma um vídeo, intitulado *Energia Nuclear em 2 minutos*⁶⁰, de autoria da empresa Eletrobras Eletronuclear. Como o próprio nome sugere, trata-se de um pequeno vídeo resumindo o processo de produção de energia elétrica em uma usina nuclear. Após sua exibição, os alunos devem responder à questão 3, onde, utilizando a equação da equivalência massa-energia, devem determinar qual porcentagem da massa de urânio se transforma em energia, quando 1 kg desse material sofre um processo de fissão nuclear.

A seguir, os estudantes responderão à questão 4, em que, ao compararem alguns valores de energia envolvidos nos processos atômicos e nucleares, precisam determinar quantas vezes esses últimos são mais energéticos que os primeiros. Espera-se que os estudantes resolvam esta etapa, constituída dos textos II e III, e das questões 3 e 4, em aproximadamente 20 minutos.

Na última parte da aula é lançada a questão finalizadora: “*De onde vem a energia do Sol?*”; a qual os grupos devem trazer sua resposta para a próxima aula.

⁶⁰ Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=OzxiQdmTD58>>. Acessado em agosto de 2016.

Planejamento da Aula 06 – Fusão Nuclear

Objetivos

A sexta e última aula da sequência didática, antes das apresentações dos seminários sobre Física Nuclear pelos alunos, faz uma breve introdução à fusão nuclear, abordando a origem de elementos químicos e, principalmente, a origem da energia do Sol. Para obter êxito, além de textos e vídeo, são propostas questões envolvendo cálculos que corroboram a origem nuclear e não química da energia dessa estrela. Assim, ao final da aula, espera-se que os estudantes saibam:

- analisar dados a respeito do Sol;
- resolver proporções e operações com potências na base 10;
- descrever o processo de fusão nuclear;
- reconhecer a origem nuclear da energia do Sol;
- relacionar a fusão nuclear à origem de elementos químicos.

Metodologia

A aula inicia-se com a leitura das respostas à questão proposta ao final da aula anterior: “*De onde vem a energia do Sol?*”. Em seguida, distribui-se a folha-roteiro (Apêndice VI) à turma e é apresentado o texto I (*O Sol*), onde é informado alguns dados sobre essa estrela, como sua idade e constituição. Após sua leitura, pede-se para os alunos responderem às questões de 1 a 3, em que é suposto a energia do Sol ser de origem química, como, por exemplo, a energia extraída da queima de carvão.

Na primeira dessas questões, após ser fornecido em seu enunciado a energia liberada na queima de 1 kg de carvão e a luminosidade média do Sol, pede-se para os estudantes determinarem quantos quilos por segundo desse combustível (carvão) o Sol deveria consumir para manter sua luminosidade.

Na questão posterior, dada a massa do Sol e utilizando-se do resultado obtido na questão anterior, os alunos devem determinar, em anos, o tempo que essa estrela levaria para esgotar seu combustível.

Dando continuidade, na terceira questão, os estudantes precisam comparar o resultado encontrado na segunda questão com a idade do Sol fornecida no texto I, justificando se é possível que sua energia seja de origem química.

A expectativa é que a turma realize a leitura do texto I e resolva as questões de 1 a 3 em cerca de 20 minutos.

A próxima etapa consiste na leitura do texto II, onde, como o próprio nome sugere, é definido o processo de fusão nuclear. Feita a sua leitura, os alunos devem responder às questões 4 e 5, em que, diferentemente das anteriores, trata as reações de fusão como responsáveis pela origem nuclear da energia do Sol.

Na questão 4, após ser fornecido a massa de hidrogênio do Sol e o consumo por segundo desse elemento em reações de fusão no interior desta estrela, é pedido que os alunos determinem, em bilhões de anos, o tempo que levaria para que todo o seu hidrogênio se extinguísse, caso fosse mantido constante esse consumo. Em seguida, a quinta questão pede para os estudantes compararem o resultado obtido na questão 4 com o valor da idade do Sol fornecida no texto I, justificando se faz sentido que sua energia seja de origem nuclear. A resolução destas duas questões, juntamente com a leitura do texto II, deve levar por volta de 15 minutos.

Na última parte da aula, é mostrado um pequeno vídeo didático (*Rock Star e a origem do Meta*⁶¹), do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, de aproximadamente 3 minutos, que trata da formação dos elementos químicos no interior das estrelas. Após assisti-lo, os estudantes devem responder de maneira sucinta à questão 6, comentando o porquê de se poder afirmar que somos poeira das estrelas. Tal resposta deve levar aproximadamente 5 minutos.

⁶¹ Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=wIEhSl1oEI>>. Acessado em setembro de 2016.

Planejamento das Aulas 07 e 08 – Seminários

Objetivos

As duas últimas aulas, realizadas em forma de seminários, promove uma discussão entre os estudantes a respeito dos benefícios e malefícios do uso na sociedade de elementos ligados à Física Nuclear. Espera-se que nelas, os estudantes façam uma síntese do que foi compreendido durante as aulas anteriores.

São também objetivos dos seminários:

- ampliar o senso crítico dos estudantes;
- discutir com os alunos os riscos e benefícios da utilização de elementos ligados à Física Nuclear em nossa sociedade;
- desenvolver e estimular a capacidade dos estudantes em expressarem seus argumentos;
- analisar, na medida do possível, o que foi compreendido pelos alunos durante as aulas da sequência didática.

Metodologia

Para a realização desta atividade, a turma se divide em grupos, com cerca de 6 estudantes⁶². Fica à critério do professor como se dará essa divisão.

Os grupos têm no mínimo 10 e no máximo 12 minutos para se apresentarem⁶³. Após cada apresentação, é aberto à turma um breve intervalo de aproximadamente 3 minutos, para perguntas e dúvidas direcionadas ao grupo que se apresentou. Caso nenhuma pergunta seja feita, o professor fará as colocações que considerar pertinentes.

É de livre escolha dos grupos as ferramentas e recursos didáticos a serem utilizados, como, por exemplo, o uso de: imagens, vídeos (máximo de 3 minutos, somando-se todos os vídeos que façam parte da apresentação), quadro de giz, cartazes ou projetor.

⁶² É importante destacar que nossa escolha por grupos constituídos de 6 estudantes foi devido à média de 35 alunos nas turmas em que realizamos estes seminários, resultando assim em três apresentações por aula. Entretanto, competirá ao professor aplicador delimitar o tamanho das equipes e o número de apresentações, conforme a disponibilidade que este possua.

⁶³ Sugerimos que o tempo de apresentação não seja inferior ao aqui disponibilizado, para evitar com que os grupos realizem apresentações com uma abordagem demasiadamente superficial, ou ainda, de forma muito acelerada.

Cada grupo fica livre também para a escolha dos tópicos a serem abordados em sua apresentação, não se restringindo às sugestões propostas abaixo. Entretanto, devem se limitar ao tema Física Nuclear.

A seguir, algumas sugestões de tema e assuntos correlacionados:

- Medicina nuclear: tipos de radiação e radiofármacos utilizados; traçadores radioativos; cintilografia; tomografia por emissão de pósitrons (PET); ressonância magnética nuclear.
- Efeitos das radiações nos seres humanos: efeitos físicos, químicos e biológicos; tempo de exposição; intensidade da radiação.
- Energia nuclear na agricultura e na indústria: traçadores radioativos; autorradiografia; esterilização; gamagrafia; controle de qualidade.
- Acidentes e desastres nucleares: efeitos ambientais e rejeitos radioativos; acidente de Chernobyl; acidente radiológico de Goiânia (Césio-137); acidente de Fukushima.
- Usinas nucleares: tipos de reatores; funcionamento e viabilidade das usinas termonucleares; usinas nucleares no Brasil; vantagens e desvantagens.
- Armas nucleares: enriquecimento de urânio; bomba atômica; bomba de hidrogênio, bomba de nêutrons; Projeto Manhattan.
- Fusão nuclear: o Sol como principal fonte energética da Terra; ciclo de vida das estrelas; origem dos elementos químicos; reator de fusão nuclear; a fusão como alternativa energética.
- Energia nuclear e Geopolítica: participação da energia nuclear na matriz energética; política de energia nuclear do Brasil; a energia nuclear e a soberania nacional; conflitos armados; administração, controle e legislação da tecnologia nuclear.