

# Instituto de Física Universidade Federal do Rio de Janeiro

Licenciatura em Física



## **A Física Nuclear e Suas Aplicações: Uma Abordagem Voltada o Ensino Médio.**

Por

**Leonardo Raduan de Felice Abeid**

Orientador: Carlos Renato de Carvalho

**Maio de 2004**

**Instituto de Física**  
**Universidade Federal do Rio de Janeiro**

Licenciatura em Física

**A Física Nuclear e suas aplicações: uma  
abordagem voltada para o ensino médio.**

Por

**Leonardo Raduan de Felice Abeid**

**Orientador: Carlos Renato de Carvalho**

Maio de 2004

## ***Resumo***

Apresentamos uma proposta para se abordar a física nuclear e suas aplicações no ensino médio. Trata-se de um texto para ser trabalhado em sala de aula ou utilizado como leitura complementar, ou mesmo ser utilizado por professores, já que muitos se queixam por não se sentirem capacitados para ensinar a física moderna, neste nível de ensino.

A motivação para a realização deste trabalho veio de nossa constatação de que o ensino de física moderna no ensino médio, embora defendida e proposta pelos Parâmetros Curriculares Nacionais, ainda não se tornou um fato concreto.

## *Sumário*

<b>Introdução</b>	7
<b>Parte I - Tópicos de Física Nuclear</b>	
<b>1.Evolução da Física Nuclear</b>	9
1.1.A Descoberta do Elétron.	9
1.2.Os Isótopos	10
1.3.A Descoberta da Radioatividade e o Núcleo Atômico	11
1.4.A Fissão Nuclear	13
<b>2.Modelos Atômicos</b>	15
2.1.O Modelo Atômico de Rutherford	15
2.2.O Modelo Atômico de Bohr	17
<b>3.As Propriedades dos Núcleos</b>	19
3.1.Número Atômico, Número de Massa e Isótopos	19
3.2.Massa nuclear e energia de ligação	19
3.3.Dimensões nucleares	22
3.4.Interações Nucleares	22
3.4.1.A Interação Forte	23
3.4.2.A Teoria de Yukawa	24
3.5. Modelos Nucleares	27
3.5.1.O Modelo de Camadas Nucleares	27
3.5.2.O Modelo da Gota Líquida	28
<b>4.Radioatividade</b>	29
4.1.Lei do Decaimento Radioativo	29
4.2.Medidas da Quantidade de Radiação	30
4.3.Decaimento Alfa	31
4.4.Decaimento Beta	31
4.5.Decaimento Gama	32
4.6. Radiações Ionizantes	33
4.6.1.Efeito das Radiações Ionizantes no Homem	34

4.6.2.Dose Equivalente	35
<b>5.Reações Nucleares</b>	37
5.1.O Núcleo Composto	38
<b>6.Fissão e Fusão nuclear</b>	39
6.1.Fissão Nuclear	39
6.1.2.Fissão Induzida	40
6.2.Fusão Nuclear	41
<b>Parte II – Aplicações</b>	
<b>7.As Armas Nucleares</b>	43
7.1.As Bombas de Hiroshima e Nagasaki	44
7.2.A Bomba H	44
7.3.Os Arsenais Nucleares	45
<b>8.Geração de Energia Elétrica</b>	46
8.1.O Reator Nuclear	47
8.2.O Lixo Atômico	47
8.2.1.Tratamento dos Rejeitos Radioativo	48
8.3.Impactos Ambientais	49
8.4.A Segurança dos reatores Nucleares	50
8.5.Acidentes Nucleares	50
8.5.1.O Acidente em Three Mile Island	51
8.5.2.O Acidente em Chernobyl	51
8.6.Por Que Energia Nuclear?	52
<b>9.Datação Por Carbono – 14</b>	53
<b>10.Aplicações na Medicina</b>	54
10.1.Traçadores Radioativos	54
10.2.Radioterapia	56
10.2.1.O Acidente em Goiânia	57
10.2.2.Baquiterapia	58
<b>11.Aplicações na Agricultura e Pesquisa Biológica</b>	59
11.1O Uso de Traçadores	59
11.2.Irradiação de Alimentos	60
<b>12.Aplicações na Indústria</b>	61
12.1Gamagrafia	61

12.2.Medidores de Níveis	61
12.3Esterilização	62
<b>13. Conclusão</b>	64
<b>Referências</b>	65
<b>Créditos das Figuras</b>	66

## ***Introdução***

Num mundo onde os jovens têm cada vez mais acesso à televisão, rádio, jornais e principalmente à internet, a informação viaja com velocidade jamais vista. No entanto, no ensino médio, a abordagem de tópicos relacionados aos avanços da ciência no século XX ainda não se tornou uma realidade. Por que não mostrar os novos horizontes abertos?

De acordo com os parâmetros curriculares nacionais do ensino médio<sup>1</sup> (PCNEM), o ensino de ciências, “deve contribuir não só para o conhecimento técnico, mas também para uma cultura mais ampla, desenvolvendo meios para a interpretação de fatos naturais, a compreensão de procedimentos e equipamentos do cotidiano social e profissional, assim como para a articulação de uma visão do mundo natural e social”.

Em um contexto, onde é cada vez maior a discussão sobre novas fontes de energia; onde a tecnologia contribui de forma significativa para o avanço da medicina e a melhoria da qualidade de vida; e onde o conflito entre as nações traz de volta, após o período da guerra fria, os perigos e o temor do uso de armas atômicas, a física moderna assume papel de destaque, a fim de possibilitar a “visão do mundo natural e social” em que vivemos.

Sabemos que uma das maiores dificuldades do professor, atualmente, é motivar os alunos, o que é no ensino de física é mais acentuado, uma vez os avanços tecnológicos realizados no século XX são pouco abordados. Como lhes mostrar que aquilo à que o estamos apresentando é importante? Como fazer isto, senão abordando temas do seu cotidiano?

Todos nós já lemos, ouvimos falar, vimos pela televisão ou ouvimos pelo rádio, debates sobre o uso ou não da energia nuclear, seus impactos econômicos, sociais e ecológicos; sobre como a Rússia tem tratado o arsenal atômico deixado pela União Soviética, ou mesmo sobre um possível conflito entre Índia e Paquistão, detentores de armas nucleares e que convivem há anos com problemas de fronteira. Isso tudo sem falar na medicina moderna, cheia de avanços tecnológicos e cada vez mais acessíveis.

Defendido como uma necessidade, o ensino de física moderna, ainda não foi incorporado ao nível médio. Por uma série de razões, sua implementação vem sendo sistematicamente adiada.

Neste trabalho, não faremos uma discussão sobre a necessidade e importância do ensino de física moderna, fato que para o próprio ministério da educação já está devidamente comprovado, daremos apenas uma sugestão de como a física nuclear pode ser abordada no ensino médio, de forma clara procurando facilitar a compreensão dos alunos.

Dividimos este trabalho em duas partes. Primeiro, damos uma visão geral do processo histórico de desenvolvimento da física nuclear. Esse conhecimento é importante, porque ajuda o

aluno a desenvolver o seu próprio raciocínio, facilitando o processo de ensino-aprendizagem. Seguimos com alguns tópicos de física nuclear. Na parte final apresentamos algumas de suas aplicações, mostrando que a física é uma ciência intimamente ligada ao nosso dia-a-dia e motivando os estudantes.

Os tópicos abordados foram selecionados seguindo as diretrizes propostas pelo PCNEM<sup>1</sup>. Lembramos algumas das “principais competências em física esperadas ao final da escolaridade básica”, segundo o PCNEM, que achamos importante, aqui destacar. São elas:

- “Consultar, analisar e interpretar textos e comunicações, de ciência e tecnologia, veiculados por diferentes meios”.
- “Analisar, argumentar e posicionar-se criticamente em relação a temas de ciência e tecnologia”.
- “Compreender o conhecimento científico e o tecnológico como resultados de uma construção humana, inseridos em um processo histórico e social”.
- “Compreender a ciência e a tecnologia como partes integrantes da cultura humana contemporânea”.
- “Reconhecer e avaliar o desenvolvimento tecnológico contemporâneo, suas relações com as ciências, seu papel na vida humana, sua presença no cotidiano e seus impactos na vida social”.
- “Reconhecer e avaliar o caráter ético do conhecimento científico e tecnológico e utilizar esse conhecimento no exercício da cidadania”.



## Parte I - Tópicos de Física Nuclear

### *1. Evolução da Física Nuclear*

Por volta do ano 400 a.C o filósofo grego Demócrito<sup>2</sup> sugeriu a idéia de que todos os corpos materiais são formados por minúsculas partículas que ele chamou de átomos (indivisíveis), pois segundo ele tais partículas, que não poderiam ser percebidas pelo olho humano, não poderiam ser divididas em partes menores. Eles seriam de quatro tipos diferentes: os átomos de pedra, os de água, os de ar e os de fogo.

Dando um salto no tempo até o início do século XIX, em 1803, Dalton<sup>3</sup> propôs a existência dos átomos baseando-se nos seguintes postulados:

1. Os elementos químicos constituem-se de partículas discretas de matéria, átomos, que não podem ser subdivididos por nenhum processo químico e que preservam sua individualidade nas reações químicas.
2. Todos os átomos de um mesmo elemento são idênticos em todos os aspectos, em particular no peso ou massa; elementos diferentes têm átomos diferindo no peso. Cada elemento é caracterizado pelo peso do seu átomo.

Desde os tempos antigos o homem tenta compreender a estrutura da matéria, buscando encontrar o seu componente mais elementar e o conceito do átomo evoluiu muito desde a época de Dalton. É preciso ressaltar que, embora possa parecer, a ciência não é feita por apenas algumas pessoas, mas sim de grande número de pesquisadores que trabalham anonimamente para o progresso.

Atualmente sabemos que o átomo não é indivisível. Ele possui um núcleo, de carga positiva, e uma nuvem eletrônica, de carga negativa.

Nas próximas seções veremos como evoluiu o conhecimento a respeito do átomo, e em particular do núcleo atômico.

#### **1.1.A Descoberta do Elétron<sup>2,4</sup>**

Em fins do século XIX, os físicos começaram a investigar a passagem de eletricidade através dos gases. William Crookes, de Londres, mostrou que a passagem da eletricidade pelos gases, normalmente bons isolantes, se dá de maneira tranqüila se a pressão do gás for bastante reduzida, ou seja, se o gás for rarefeito. Em um tubo, com gás rarefeito, onde é aplicada uma alta tensão elétrica,

aparece um feixe de luz claramente definido projetado do catodo para o anodo\*. Colocando um imã perto do tubo, que ficou conhecido como tubo de Crookes, ele observou a deflexão do feixe como se daria no caso de uma corrente elétrica ou de partículas negativamente carregadas saindo o catodo. Na mesma época Jean Perrin, na França, mostrou que uma chapa de metal ficava negativamente carregada ao ser atingida por raios, que ficaram conhecidos como raios catódicos.

Em 1894 o físico alemão Philipp Lenard demonstrou que os raios catódicos podiam penetrar uma peça de folha metálica, logo não eram moléculas de gás.

Joseph John Thomson, natural de Manchester e diretor do Laboratório Cavendish de Cambridge, um dos principais centros de estudos de física contemporânea, estudando o assunto, admitiu a hipótese de que os raios eram formados de partículas com altas velocidades e decidiu medir as grandezas físicas destas partículas, a carga(e) e a massa(m).

Thomson realizou experiências onde media as deflexões, dos raios catódicos, causadas por campos elétricos e magnéticos. Estas deflexões dependem da razão carga/massa (e/m) que ele conseguiu medir. Os resultados eram idênticos para todos os gases, o que o levou a concluir que estava lidando com uma partícula inerente a todos os elementos e, portanto, constituinte dos átomos. Em 1897, Towsend, discípulo de Thomson, conseguiu medir a carga elétrica isoladamente, embora em 1909 Robert Millikan, da Universidade de Chicago, tenha fornecido valores mais precisos. Uma vez conhecida sua carga podia ser determinada sua massa e Thomson constatou que a partícula, que ele chamou de elétron, era cerca de 1840 vezes mais leve que o átomo de hidrogênio. Esta importante descoberta mostrou que os átomos não eram as menores partículas de matéria.

## 1.2.Os Isótopos<sup>2,4</sup>

No início do século XIX, percebeu-se que os elementos químicos apresentavam estranhas características periódicas, quando eram agrupados de acordo com a massa. Embora vários cientistas tenham contribuído para que se chegasse à classificação periódica dos elementos, o trabalho de Dimitri Mendeleev, químico russo, destacou-se. Ele apresentou em 1869 a sua *tabela periódica* dos elementos que, com algumas correções é usada até hoje .

Agora voltemos a falar de J.J. Thomson que, tendo estabelecido a existência do elétron, passou a estudar, em 1907, as partículas que se moviam na direção oposta através dos tubos de descarga elétrica.

---

\* O catodo é o eletrodo negativo e o anodo é o eletrodo positivo.

Nestes estudos ele verificou que átomos de um mesmo elemento possuíam massas diferentes. Ele identificou, por exemplo, átomos de cloro com massa 34,98 *uma*\* e 36,98 *uma*. Esses átomos de um mesmo elemento, porém com massas diferentes foram chamados de *isótopos*.

Então ficamos com a seguinte pergunta:

“De que isótopo, de cada elemento, é a massa que encontramos atualmente na tabela periódica?”

De nenhum em especial, a massa que encontramos é a média aritmética das massas de todos os isótopos, do elemento, encontrados na natureza.

### **1.3.A Descoberta da Radioatividade e o Núcleo Atômico<sup>2,4</sup>**

Sabendo da descoberta dos raios X por Wihelm Konrad Roentgen em novembro de 1895, o físico francês Henri Becquerel decidiu investigar se algo similar também era emitido dos materiais fluorescentes que se sabia incandescer sob a ação de raios de luz incidentes. Becquerel colocou um cristal de uranilo<sup>1</sup>(sulfato duplo de urânio e potássio), um mineral com fortes propriedades fluorescentes, em uma chapa fotográfica enrolada em papel preto, e expôs ao sol. Se o material emitisse raios, como o raios X, eles deveriam marcar a chapa fotográfica, sensível à luz. Após algumas horas a chapa mostrou um ponto escuro no local onde o cristal havia sido colocado.

Becquerel repetiu a experiência várias vezes obtendo o mesmo resultado, entretanto nos dias 26 e 27 de fevereiro de 1896 as condições climáticas de Paris, chuvas e nuvens pesadas não permitiram a realização da experiência e ele então guardou a chapa fotográfica com o cristal, enrolados no papel preto, na gaveta de sua escrivaninha. O sol não voltou até 1º de março. Assim que Becquerel retirou a chapa fotográfica, com o cristal, da gaveta teve uma surpresa. Em vez das impressões escuras obtidas com a exposição a um dia inteiro de sol, havia uma mancha negra no local onde estava o cristal de uranilo. Aparentemente o escurecimento da chapa nada tinha a ver com a exposição ao sol e havia prosseguido durante o tempo em que ela estivera na gaveta da escrivaninha. Ora se os “raios” não eram devidos ao Sol, só poderiam ser inerentes ao próprio cristal, que emitiria radiação constantemente.

Era uma radiação penetrante semelhante aos raios X. Becquerel tentou aquecer, congelar, triturar e dissolver o cristal em ácido, no entanto a radiação permanecia inalterada. Ficou claro que essa nova propriedade da matéria, que ficou conhecida como radioatividade, era uma propriedade do próprio átomo.

---

\* uma – unidades de massa atômica.

Físicos e químicos, do mundo todo, passaram a estudar o fenômeno tentando descobrir se outros elementos também apresentavam o mesmo comportamento radioativo do urânio. A química polonesa Marie Sklodowska Curie, conhecida como madame Curie, e seu marido o físico francês Pierre Curie realizaram testes com todos os elementos químicos para a determinação da radioatividade.

Em 1898, os Curie conseguiram identificar duas substâncias altamente radioativas. Uma chamaram de polônio, em homenagem à terra natal de madame Curie, e a outra, cerca de dois bilhões de vezes mais radioativa que o urânio, que chamaram de rádio.

Madame Curie morreu, aos 67 anos, vítima de leucemia, doença que, sabemos hoje em dia, é provocada pela exposição à radiação penetrante.

Ainda em 1898 Rutherford mudou-se de Cambridge para a universidade McGill, no Canadá, e passou a estudar a radioatividade descobrindo que eram emitidos dois tipos de “raios”,  $\alpha$  e  $\beta$ . Mais tarde, juntamente com o físico britânico Frederick Soddy, ele descobriu que não se tratavam de raios, mas de partículas e em 1903 (pouco antes, em 1900, Paul Villard, físico francês, descobrira que devido à radioatividade também se emitia radiação semelhante aos raios X, porém mais penetrante, conhecida como radiação  $\gamma$ ) eles observaram que os átomos de substâncias radioativas dividiam-se espontaneamente, dando origem a outros elementos.

No ano de 1907, Rutherford foi para a universidade de Manchester e lá, com o físico alemão Hans Geiger, descobriu que as partículas  $\alpha$  eram núcleos de hélio. Experiências posteriores mostraram que as partículas  $\beta$  eram, na verdade, elétrons de alta velocidade.

Estava claro que o átomo não era indivisível, e que haviam partículas ainda mais elementares e os cientistas passaram a estudar sua estrutura.

Thomson, em 1911, propôs o seu modelo atômico, em que os elétrons se distribuíam em uma massa esférica de carga positiva.

Apoiado em dados experimentais Rutherford propôs, em 1911, pela 1ª vez a existência de um núcleo atômico, de carga positiva e em 1912 Niels Bohr, físico dinamarquês, propôs um modelo semelhante que combinava conceitos da física clássica com a nova mecânica quântica.

À época especulava-se sobre que partículas formariam o núcleo atômico. A primeira hipótese era do núcleo ser formado por prótons e elétrons, no entanto ela levava a grandes dificuldades do ponto de vista da física quântica. Bohr e Rutherford sugeriram, então, que o núcleo era formado de prótons e “prótons sem carga elétrica” (nêutrons). Somente em 1932, no Laboratório Cavendish, James Chadwick, aluno de Rutherford, observou o nêutron experimentalmente.

Desde então um grande número de partículas subatômicas foi descoberto. Físicos do mundo todo tentam explicar a estrutura nuclear e as forças que mantêm confinados prótons e nêutrons apesar da repulsão eletrostática, mas ainda hoje, não se desenvolveu um modelo para o núcleo atômico capaz de descrever e explicar todos os fenômenos nucleares.

#### 1.4.A Fissão Nuclear

Os estudos sobre a radioatividade e o núcleo atômico prosseguiram e em 1919 Rutherford conseguiu um feito notável. Bombardeando átomo de  ${}^{14}_7N$  com partículas  $\alpha$  ( ${}^4_2He$ ) ele observou que além das partículas  $\alpha$ , dispersadas pelos núcleos de nitrogênio, também se obtinham partículas rápidas de outro tipo, que ele identificou como prótons<sup>2</sup>. Pela primeira vez era feita uma fissão artificial do núcleo atômico.

Embora Rutherford não acreditasse que a energia nuclear pudesse ser usada em grande escala ou para fins militares, o seu trabalho abriu caminho para o desenvolvimento das bombas atômicas e de hidrogênio, assim como das usinas nucleares para geração de energia elétrica.

Em 1939, pouco antes da Segunda guerra, o físico alemão Otto Hahn e seu assistente Fritz Strassman, conseguiram a fissão do urânio<sup>2</sup> bombardeando-o com nêutrons. Na Itália, as pesquisas de Enrico Fermi<sup>5</sup> indicavam ser possível provocar uma reação, de fissão, em cadeia de núcleos de urânio com a liberação de enormes quantidades de energia.

Fermi foi para os Estados Unidos e juntamente com os físicos húngaros Leo Szilard e Eugene Wigner pediram à Albert Einstein<sup>5</sup>, famoso físico alemão, que escrevesse uma carta à Franklin Roosevelt, presidente dos EUA, alertando sobre o perigo da utilização da tecnologia nuclear pelos nazistas.

Einstein era judeu e, por causa da perseguição nazista, abandonou a Alemanha e renunciou a cidadania alemã em 1933, indo para Princeton, nos EUA, onde passou os últimos 22 anos de sua vida<sup>5</sup>.

Persuadido por seus colegas, Einstein acabou escrevendo à Roosevelt em 2 de agosto de 1939<sup>5</sup>. Na carta ele recomendava, ao presidente, a aceleração das pesquisas que levariam à criação da bomba atômica. Sabia-se que os alemães estavam desenvolvendo um projeto semelhante, visto que haviam suspenso a venda de urânio das minas tchecas, então em 1942 os EUA lançaram, sob a direção de Julius Robert Oppenheimer (físico americano), o projeto Manhattan para desenvolver a bomba atômica.

Em 1944 Einstein fez um grande esforço para evitar o uso das armas nucleares, chegando a escrever à mão toda a teoria da relatividade para ser leiloadada. Em 1945 escreveu novamente ao presidente Roosevelt, dessa vez pedindo que não lançasse a bomba sobre o Japão. No entanto, Roosevelt morreu antes de abrir a carta e o novo presidente Harry S. Truman não atendeu ao pedido de Einstein nem de outros físicos<sup>5</sup>.

Em 14 de julho de 1945 era testada, no deserto de Alamogordo, Novo México, a primeira bomba atômica (a bomba de Hidrogênio foi testada em 1954) e nos dias 6 e 9 de agosto de 1945, respectivamente, as cidades de Hiroshima e Nagasaki, no Japão, eram atacadas<sup>4</sup>.

## 2. Modelos Atômicos<sup>2,3,4</sup>

Em 1896 Henri Becquerel descobriu a radioatividade do urânio, mais tarde Marie Curie e

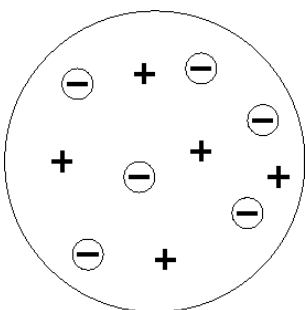


Figura 2.1 O modelo atômico de Tomson.[2.1]

Pierre Curie mostraram que outros elementos também apresentavam o mesmo comportamento e concluíram esta deveria ser uma propriedade dos próprios átomos. Outros estudos mostraram, como já dissemos, que os átomos de um elemento radioativo, devido à emissão de partículas de cargas positivas ou negativas, se transformam em átomos de outros elementos químicos.

Este fato, juntamente com a existência do elétron (provada por John Joseph Thomson em 1897), levaram à idéia de que os átomos eram compostos de cargas positivas e negativas. No entanto, não havia informações de como estas cargas estavam distribuídas no átomo.

Thomson então propôs um modelo, conhecido como pudim de ameixas, segundo o qual o átomo seria uma esfera de carga elétrica positiva e densidade uniforme, onde os elétrons estariam distribuídos. A carga total dos elétrons deveria ser igual à carga positiva, uma vez que os átomos, no seu estado fundamental, são eletricamente neutros.

### 2.1.O Modelo Atômico de Rutherford

Ernest Rutherford, que havia sido aluno de doutorado de Thomson, realizou uma série de experiências onde uma folha, muito fina, de ouro era bombardeada por partículas  $\alpha$  (de carga positiva e que mais tarde descobriu-se que eram núcleos de hélio).

Experiências deste tipo são conhecidas como *experiências de espalhamento*. Elas consistem em incidir um projétil (que pode ser uma partícula ou um outro núcleo) sobre um núcleo-alvo. Analisando o espalhamento do projétil com o núcleo-alvo (probabilidade de ocorrência, ângulo de espalhamento, energia das partículas espalhadas e etc) e as propriedades dos elementos formados após a colisão, podemos obter importantes informações sobre o tipo de interação existente entre as partículas subatômicas. Ainda hoje, estas experiências desempenham um papel fundamental nas pesquisas sobre a estrutura da matéria e física de partículas.



Figura 2.2 O físico neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937) possuía uma habilidade notável para a física e se destacaria nos estudos, recebendo diversos prêmios.[2.5]

As partículas  $\alpha$  deveriam ser espalhadas devido às forças eletrostáticas entre as partículas e as cargas dos átomos. Entretanto, Rutherford verificou que maioria das partículas atravessava a folha de ouro, simplesmente como se ela não existisse, enquanto que algumas outras sofriam grandes desvios, muito maiores do que os propostos pela teoria atômica de Thomson, havendo inclusive partículas rebatidas de volta para atrás, conforme mostra a figura ao lado. Esse resultado indicava que a matéria, em geral, era pouco densa (quase que vazia) mas que continha pequenos pontos com a massa fortemente concentrada. Como as partículas  $\alpha$  são partículas positivas, os grandes desvios observados deveriam estar sendo causados por pontos massivos e positivamente carregados.

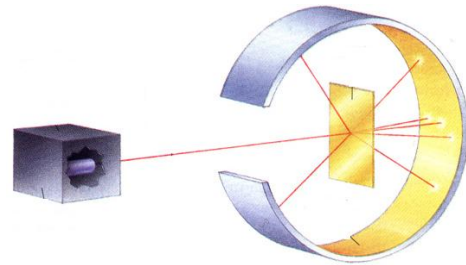


Figura 2.3 – A experiência de Rutherford. O feixe de partículas (em vermelho), atinge a folha de ouro. As partículas, desviadas de sua trajetória, são detectadas ao colidirem com a chapa fluorescente colocada em volta da folha de ouro.[2.3]

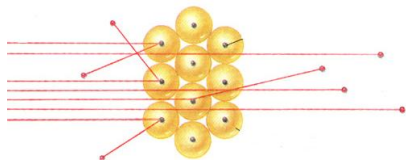


Figura 2.4 – uma visão microscópica sobre o que acontece na experiência de Rutherford. Algumas partículas sofrem um pequeno desvio, enquanto outras eram até mesmo rebatidas de volta.[2.3]

Rutherford, em 1911, propôs então um novo modelo atômico que concordava com as evidências experimentais. Segundo ele o átomo teria um núcleo, muito pequeno, de carga positiva e que concentraria quase toda massa. As cargas negativas seriam elétrons que descreveriam uma órbita circular de raio aproximadamente igual ao raio atômico. Este modelo ficou conhecido como modelo planetário (os elétrons estariam em órbita ao redor do núcleo, assim como os

planetas ao redor do Sol).

Embora a teoria atômica de Rutherford explicasse o espalhamento de partículas  $\alpha$ , ela era incapaz de explicar a estabilidade do átomo.

Segundo a teoria eletromagnética, uma carga elétrica acelerada deve irradiar energia. De acordo com a teoria de Rutherford os elétrons descreveriam uma órbita circular ao redor do núcleo e, portanto, estariam acelerados (aceleração centrípeta) devendo irradiar energia, o que reduziria a energia do sistema e, conseqüentemente, o raio da órbita do elétron. Desse modo o elétron deveria espiralar na direção do

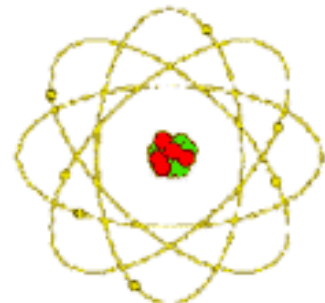


Figura 2.5- O modelo atômico proposto por Rutherford. Os elétrons giram em órbita ao redor do núcleo.[2.4]



núcleo, fato que, como sabemos, não acontece uma vez que os átomos são estáveis.

Além disso, a teoria de Rutherford, não resolvia o problema do espectro dos elementos. O espectro de um material é o conjunto de cores, e suas respectivas intensidades, da radiação (luz) emitida por uma amostra daquele material, quando esta amostra é energizada de alguma maneira, por exemplo, através de uma corrente elétrica. Cada elemento tem seu espectro característico e por isso ele também é chamado de espectro atômico. Assim, a teoria de Rutherford não era capaz de explicar por que um gás, de um elemento específico, ao ser energizado emitia luz com certas cores bem definidas (as quais podiam ser separadas através de um prisma) ao invés de um conjunto contínuo de cores como aquele que se observa na luz solar.

Podemos observar um espectro luminoso, com uma experiência bastante simples. Basta pegar um CD normal, desses de música ou um CD-ROM de computador e olhá-lo na direção de uma lâmpada, inclinándolo de várias maneiras. Você verá um belo padrão de cores bem intensas. Essas cores compõem o espectro visível da radiação eletromagnética da lâmpada que está iluminando o CD.

Outro bom exemplo onde podemos observar um espectro luminoso é o arco-íris. A luz do Sol que parece não ter cor nenhuma, na verdade é uma mistura de várias cores. Quando incide em uma gota d'água numa nuvem, o raio de luz se dispersa em suas cores componentes.

## 2.2.O Modelo Atômico de Bohr

Niels Bohr, em 1913, utilizou a idéia de quantização\* da radiação, introduzida inicialmente por Max Planck e estendida por Albert Einstein, ao modelo atômico de Rutherford e apresentou os seguintes postulados†:

1. Um elétron só pode se mover em certas órbitas, onde não ocorre nenhuma emissão de radiação. Os estados atômicos, quando os elétrons estão nessas órbitas são chamados de estados estacionários do sistema.

---

\* Os termos *quantização* e *quântico* significam discretização e discreto, respectivamente. Por sua vez, discreto aqui não significa recatado ou reservado, mas sim que é relativo a objetos ou conjunto de elementos não contínuos. Por exemplo, o conjunto dos números naturais, ou dos números inteiros, é um conjunto discreto de elementos, enquanto que o conjunto dos números reais é contínuo. O conceito de conjunto discreto e conjunto contínuo é muito importante tanto na Matemática como na Física, e a percepção de que a energia contida na radiação eletromagnética não é contínua, porém discreta, provocou uma grande revolução teórica e tecnológica na ciência.

† Postulado é aquilo que um cientista não sabe justificar e deixa para as gerações futuras o problema de achar uma explicação razoável!

2. Só ocorre emissão ou absorção de radiação quando acontece uma transição entre dois estados estacionários. A frequência<sup>‡</sup>  $\nu$  da radiação emitida ou absorvida é determinada pela relação

$$h\nu = E_1 - E_2 \quad (2.1),$$

onde  $h$  é a constante de Planck, assim chamada em homenagem ao físico alemão Max Karl Ernest Ludwig Planck, que vale é de  $6,626076 \times 10^{-34}$  J.s e,  $E_1$  e  $E_2$  são as energias nos dois estados estacionários.

3. Os estados possíveis para um sistema constituído de um elétron girando ao redor do núcleo positivo são aqueles em que as órbitas são círculos determinados pela relação

$$L = n(h/2\pi) \quad (2.2),$$

onde  $L$  é o momento angular<sup>5</sup> do elétron e  $n$  é um número inteiro positivo, chamado de número quântico. É muito comum nos livros de física moderna o uso de  $\hbar = h/2\pi$ , portanto, a relação acima, diversas vezes, é vista na forma

$$L = n\hbar \quad (2.3).$$



Figura 2.6- Niels Bohr.[2.6]

O problema da estabilidade do átomo foi resolvido simplesmente postulando que a emissão de radiação não existia enquanto o elétron em uma de suas órbitas permitidas. A emissão ou absorção de radiação foi associada ao salto de um estado estacionário para outro.

O modelo atômico de Bohr obteve grande sucesso na explicação de fatos experimentais relacionados com os espectros atômicos. Ainda assim, haviam problemas que não podiam ser enfrentados pela teoria de Bohr. O

avanço da mecânica quântica permitiu a solução de tais problemas.

A discussão sobre o modelo atômico aceito atualmente está fora do alcance deste trabalho. O importante para nós é destacar o modelo de Rutherford como o primeiro a apresentar a existência do núcleo e a teoria de Bohr, como sendo híbrida, contendo aspectos da física clássica e da física quântica, que à época começava a se desenvolver.

---

<sup>‡</sup> A radiação emitida, ou absorvida, pelo átomo quando passa de um estado energético para outro, é uma onda eletromagnética, e portanto tem uma frequência característica.

### 3. As Propriedades dos Núcleos<sup>2,5,6</sup>

#### 3.1. Número Atômico, Número de Massa e Isótopos

Os núcleos são formados por prótons, de carga elétrica +e, e nêutrons, sem carga elétrica. Estas partículas têm aproximadamente a mesma massa e também são chamadas de núcleons. Núcleos leves tendem a ter o mesmo número de prótons e nêutrons, enquanto que em núcleos mais pesados o número de nêutrons tende a ser maior que o número de prótons.

O número de prótons no núcleo, que é característico de cada elemento, é chamado de número atômico (Z), enquanto o número total de núcleons, isto é prótons mais nêutrons (N), é chamado de número de massa (A). Uma espécie nuclear determinada é chamada de nuclídeo e identificada por seu símbolo, que normalmente é o mesmo do elemento químico, com seu número de massa anteposto como índice superior e seu número atômico como índice inferior. Vejamos o exemplo do  ${}^4_2\text{He}$ . He é o símbolo do hélio, seu número atômico é 2 e seu número de massa é 4.

É comum encontrarmos nuclídeos com o mesmo número atômico, mas números de massa diferentes. Estes nuclídeos são chamados de isótopos. O número de isótopos estáveis varia de acordo com cada elemento, alguns podem ter apenas um e outros tem até seis isótopos. O hidrogênio, por exemplo, pode se apresentar de três formas diferentes:  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^3_1\text{H}$ .

Vale ressaltar que o comportamento químico, de um elemento, é o mesmo para todos os isótopos, uma vez que são os elétrons que participam das ligações químicas.

#### 3.2. Massa nuclear e energia de ligação

Se perguntássemos a um estudante do ensino médio, como determinar a massa de um nuclídeo, possivelmente ele responderia:

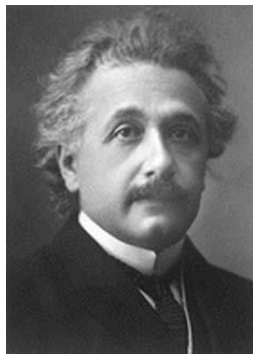


Figura 3.1- Albert Einstein[3.1]

“Ora basta somar as massas de todos os núcleons que compõe o nuclídeo”.

No entanto, na física nuclear as coisas são um pouco mais complicadas. Para entendermos a questão da massa nuclear, precisamos dar uma olhada na teoria da relatividade, desenvolvida por Einstein em 1905. Segundo esta teoria a massa e a energia se relacionam da seguinte forma:

$$E = m_0c^2 \quad (3.1),$$

onde  $E$ , é a energia de repouso da partícula,  $m_0$  é a massa de repouso da partícula e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo, que é constante para qualquer observador e vale aproximadamente  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

Esta equação, que talvez seja a mais “famosa” da física, mostra que a uma dada massa  $m$  corresponde uma energia dada por  $mc^2$ , assim como a uma determinada energia  $E$  corresponde uma massa dada por  $E/c^2$ .

É comum expressar a massa em unidades de energia/ $c^2$ . Na física atômica a unidade de energia usada, normalmente, é o MeV, ao invés do Joule ( $1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J}$ ), uma vez que as energias tratadas são tipicamente dessa ordem de grandeza. A massa das partículas são comumente dadas em  $\text{MeV}/c^2$ .

Voltando para a questão da massa nuclear, vejamos o exemplo do deutério, um isótopo do hidrogênio com  $Z=1$  e  $A=2$ , sua massa deveria ser de  $1877,838 \text{ MeV}/c^2$ , uma vez que a massa do próton é  $938,272 \text{ MeV}/c^2$  e a massa do nêutron é  $939,272 \text{ MeV}/c^2$ . No entanto, quando medimos a massa do deutério encontramos o valor de  $1875,613 \text{ MeV}/c^2$ . A primeira vista parece estranho que parte da massa tenha desaparecido.

Podemos compreender melhor, o que acontece, fazendo uma analogia com o movimento da Lua em torno da Terra. Todos sabemos que a Lua gira em torno da Terra, e que a força que não permite que ela escape é a força gravitacional, que neste caso funciona como força centrípeta. Nesta situação dizemos que o sistema está ligado. Agora, imagine a situação em que a Lua e a Terra estivessem paradas uma em relação à outra. Elas iriam se atrair devido à gravidade e acabariam se colidindo. Imaginemos, então, uma situação em que colocássemos a Lua muito distante da Terra, de tal forma que a força gravitacional “deixasse” de atuar (lembre-se, que a atração gravitacional diminui com o aumento da distância entre os corpos). Nesta situação dizemos que o sistema não está ligado. Se empurrássemos a Lua em direção à Terra, dando uma certa velocidade inicial  $V_0$ , a uma certa distância a atração gravitacional “voltaria” a atuar. A Lua seria acelerada, ganhando velocidade. Dependendo da direção inicial de  $V_0$  (de fato o problema é bem mais complicado, mas aqui é só para dar uma idéia da coisa) a Lua poderia se chocar com a Terra, caso estivesse em rota de colisão (figura 3.2) ou passaria direto, sofrendo algum desvio, e não voltaria mais, caso não estivesse em rota de colisão (figura 3.3). Para colocar a Lua em órbita, ao redor da Terra, precisaríamos estar no segundo caso e, além disso, precisaríamos freá-la, tirando parte de sua

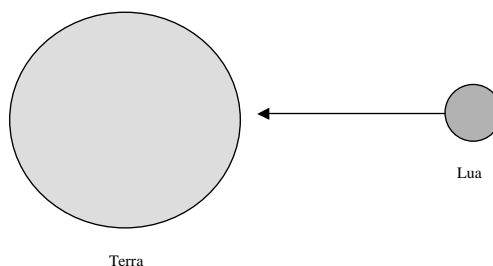


Figura 3.2- A Lua em rota de colisão com a Terra.[3.2]

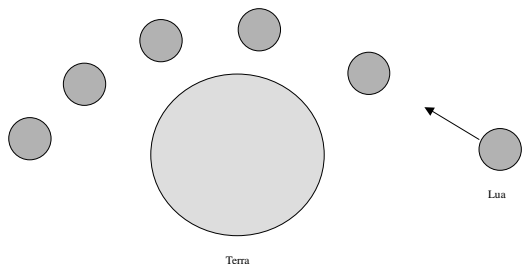


Figura 3.3 - A Lua não está em rota de colisão com a Terra. Ela sofre apenas um desvio em sua trajetória.[3.5]

energia, de forma a impedir que ela se fosse embora. Assim, o sistema formado pela Lua em órbita em torno da Terra (sistema ligado) corresponde a um sistema com menos energia do que aquele formado pela Lua e a Terra, ambas em repouso, e suficientemente separadas de forma a não formarem um sistema ligado. Esta diferença de energia corresponde a uma diferença de massa

entre as duas configurações do sistema. O sistema ligado tem menos energia que o sistema não ligado, logo tem menos massa também. Evidentemente, não se consegue medir experimentalmente isto no caso da Lua e da Terra, mas o análogo envolvendo partículas subatômicas, sim. E, portanto, esta é a razão entre as diferenças de massa mencionadas acima, envolvendo as massas do deutério, próton e nêutron.

Moral da história: partículas que interagem atrativamente entre si podem formar um sistema ligado; um sistema ligado sempre corresponde a uma perda na energia global do sistema, originalmente separado; esta perda de energia se reflete numa diminuição da massa, que no caso de partículas subatômicas pode ser medida ou verificada experimentalmente.

No caso do deutério, os  $2.708 \text{ MeV}/c^2$  que estão faltando são justamente a energia que teve que ser tirada para formar o sistema, o deutério, a partir do próton e do nêutron. Esta energia tirada é chamada de energia de ligação ( $E_L$ ). Da mesma forma se quisermos separá-los, devemos dar esta energia ao sistema, quebrando a ligação e separando os dois núcleons.

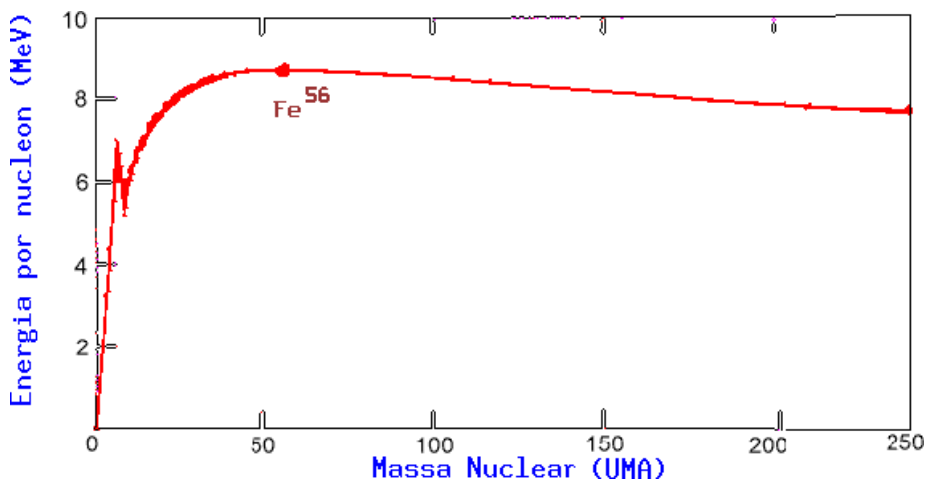


Figura 3.4- Gráfico energia de ligação em função da massa do núcleo.[3.4]

Dados experimentais mostram que a energia de ligação por núcleon é aproximadamente constante, cerca de 8 MeV, exceto para os núcleos mais leves, como o deutério. Conhecendo a energia de ligação de um nuclídeo podemos então determinar sua massa pela equação:

$$M = Zm_p + Nm_n - E_L/c^2 \quad (3.2),$$

onde  $M$  é a massa do nuclídeo,  $m_p$  é a massa do próton e  $m_n$  é a massa do nêutron.

### 3.3. Dimensões nucleares

Com boa aproximação, podemos considerar que os núcleos sejam esféricos. Portanto podemos falar de um raio nuclear. Resultados experimentais apontam uma variação do raio nuclear em função do número de massa ( $A$ ), segundo a relação:

$$R = R_0 A^{1/3} \quad (3.3),$$

onde  $R_0$  é conhecido como constante do raio e vale 1.16 fm (1 fm =  $10^{-15}$  m). Este valor pode ser entendido como o raio médio do volume esférico ocupado por cada núcleon dentro do núcleo, ou seja, cada núcleon ocupa um certo espaço dentro do núcleo. Podemos considerar este espaço como sendo uma esfera e o raio médio desta esfera é  $R_0$ .

Outro resultado experimental importante mostra que a densidade nuclear é aproximadamente a mesma para todos os núcleos, independentemente do número de massa. Lembrando que a densidade ( $\rho$ ) de uma amostra é dada por:

$$\rho = m/v \quad (3.4),$$

onde  $m$  é a massa e  $v$  é o volume da amostra.

O aumento do número de núcleons no núcleo não faz aumentar a densidade, mas apenas o raio nuclear. Olhando para a equação acima podemos então concluir que o aumento do número de núcleons provoca um aumento da massa proporcional ao aumento do volume deste núcleo.

### 3.4. Interações Nucleares

Na natureza, aparentemente, tudo pode ser explicado a partir de quatro interações básicas: eletromagnética, gravitacional, fraca e nuclear ou forte.

Na tabela 3.1 temos uma idéia das intensidades relativas das quatro interações, tomando a interação forte como unidade<sup>7</sup>.

Tipo de Interação	Intensidade
Nuclear	1
Eletromagnética	$10^{-2}$
Fraca	$10^{-5}$
Gravitacional	$10^{-39}$

Tabela 3.1- Intensidades relativas das interações básicas.

Embora tenha uma influência marcante em nossa vida, a força gravitacional é muito pequena quando comparada com qualquer uma das outras interações, podendo ser desprezada no estudo da física nuclear.

### 3.4.1.A Interação Forte

Desde o início aprendemos que as cargas elétricas de mesmo sinal se repelem, devido à força elétrica entre elas. Então deve existir uma outra força, mais forte, que seja capaz de manter os prótons confinados no núcleo. Ela é chamada de força forte. Ainda hoje o nosso entendimento sobre a força forte é apenas parcial. Não existe para a interação nuclear um conjunto de equações fechadas, que descrevam o seu comportamento ou modo de ação, como existem para a gravitação e o eletromagnetismo. Uma das fontes mais comuns de informações sobre as interações entre núcleons são as experiências de espalhamento.

Embora, como já foi dito, o conhecimento a respeito da força forte ainda não seja completo, algumas de suas características, baseadas em dados experimentais, são bem conhecidas, tais como:

- i. A interação nuclear é atrativa e tem curto alcance ( $\approx 1,5 \text{ fm}^7$ ), isto é, a região de atuação da atração nuclear é limitada<sup>7</sup>;
- ii. A interação nuclear tem, a distâncias muito pequenas, um caroço repulsivo. Isto significa que dois núcleons não podem aproximar-se um do outro além do limite dado pelo raio do caroço<sup>6</sup>;
- iii. Ela não parece depender do tipo de núcleon, a mesma força pode ser suposta a qualquer par de núcleons. Ou seja, aparentemente, a força que atua entre dois prótons, é a mesma que atua entre dois nêutrons ou entre um próton e um nêutron.
- iv. O fato da energia de ligação por partícula no núcleo ser aproximadamente constante, indica que há saturação nas interações nucleares, ou seja, cada núcleon interage apenas com um certo número máximo de outros núcleons, independentemente do número de núcleons que estão no núcleo<sup>7</sup>. Esta é uma evidência do curto alcance da força nuclear, que também pode ser verificada em

experiências de espalhamento. Se o núcleon interagisse com todos os outros núcleons, nos núcleos mais pesados, com mais núcleons, a energia de ligação por núcleon deveria ser maior do que nos núcleos leves.

Vejam os exemplos. Imagine um núcleo X com quatro núcleons. Cada um interage com os três (03) outros, ou seja, cada núcleon é atraído por três núcleons. Agora imagine um núcleo Y com oitenta núcleons. Cada um interage com os outros setenta e nove (79), ou seja, cada núcleon é atraído por setenta e nove núcleons. Se tivermos que dar uma determinada energia  $\Delta E$ , para quebrar cada ligação de um núcleon, precisaríamos dar  $3 \times \Delta E$  de energia para retirar um núcleon do núcleo X e  $79 \times \Delta E$  para retirar um núcleon do núcleo Y. No entanto as experiências mostram que a energia necessária para se retirar um núcleon é praticamente a mesma para todos os núcleos, evidenciando que cada núcleon interage apenas com os núcleons que estão mais próximos.

### 3.4.2.A Teoria de Yukawa

A teoria de Yukawa, embora já antiga, será discutida um pouco aqui, pois foi a partir dela que se propôs a existência dos mésons pela primeira vez. Ela tem uma importância histórica, pois a previsão teórica dos mésons – inicialmente pensados como partículas virtuais (que não podem ser observadas) – e sua verificação experimental tiveram um papel fundamental no desenvolvimento da física nuclear. Além disso, para nós brasileiros, a verificação experimental do méson foi um momento crucial para afirmação e consolidação da ciência no Brasil, através da participação do eminente físico brasileiro César Lattes.

Segundo a eletrodinâmica quântica\*, todos os processos elétricos e magnéticos podem ser entendidos a partir da interação fundamental entre dois elétrons, com a troca entre si de um fóton† virtual<sup>5</sup>, assim chamado por não ser possível observá-lo diretamente<sup>7</sup>. A emissão e absorção do fóton



Figura 3.5 -Selo japonês em homenagem a Hideki Yukawa, o físico que previu a existência dos mésons pi.[3.5]

\* O termo eletrodinâmica envolve os fenômenos eletromagnéticos associados a situações em que as grandezas físicas podem estar mudando no tempo. A eletrodinâmica quântica é uma teoria que trata do eletromagnetismo valendo-se dos conceitos de física moderna.

† Em 1905, para explicar o efeito fotoelétrico, Einstein propôs que a energia luminosa não era distribuída continuamente no espaço, mas sim quantizada, como pequenos pulsos, que ele chamou de fótons.



implica numa mudança no momento de cada uma das partículas e esta variação de quantidade de movimento é que é identificada como uma interação elétrica entre as partículas carregadas<sup>5</sup>.

Traduzindo isto, a idéia de força na eletrodinâmica quântica é que ela representa o “impacto” de partículas, no caso o impacto dos fótons virtuais emitidos ou absorvidos. Esses impactos provocam a variação de momento linear ( $\vec{p}$ ) das partículas envolvidas, agora os elétrons. Lembrando que :

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (3.5)$$

Bom, e qual a relação de momento linear e força? Lembrando a 2<sup>a</sup> Lei de Newton, sabemos que

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (3.6)$$

Por sua vez,

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \quad (3.7)$$

O símbolo  $\Delta$  representa variação. Admitindo, para simplificar, que a massa  $m$  é constante e, portanto, não sofre variação, podemos dizer que

$$m\vec{a} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} \quad (3.8)$$

Com isso, podemos estabelecer a relação entre força  $\vec{F}$  e momento linear  $\vec{p}$  :

$$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} \quad (3.9)$$

Portanto, ao emitir ou absorver um fóton, num processo de duração  $\Delta t$ , se o elétron sofre uma variação de momento linear  $\Delta\vec{p}$ , pode-se associar uma força  $\vec{F}$  a este processo de valor igual a  $\frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$ .

Em 1935, o físico japonês H. Yukawa propôs a teoria mesônica da força nuclear, em completa analogia com a teoria das interações eletromagnéticas. Ele propôs colocar no lugar dos elétrons, núcleons, e no lugar do fóton, uma nova partícula que chamou de méson<sup>7</sup>.

Um princípio bastante utilizado, e com grande sucesso, em todos os campos da física, é o da conservação da energia. Segundo este princípio a energia total de um sistema isolado deve se conservar, ou seja, a energia não pode ser criada ou perdida, mas apenas transformada.

Outro princípio muito importante, na física moderna, é o princípio da incerteza<sup>8</sup>, enunciado pela primeira vez por Werner Heisenberg em 1927, dado por

$$\Delta t \approx \frac{\hbar}{\Delta E} \quad (3.10)$$

Ele exprime o fato de que se  $\Delta t$  for o intervalo de tempo disponível para a medição da energia do sistema, a medição da energia terá uma incerteza  $\Delta E$  maior ou igual que  $\hbar/\Delta t$ .

Aqui cabe mais uma observação importante: a noção de incerteza nos valores das grandezas físicas. Quando se mede um valor de uma grandeza, você nunca sabe o valor de forma arbitrariamente (infinitamente) exata. O seu instrumento de medida sempre impõe a você alguma limitação no valor “verdadeiro” da grandeza medida. Pois bem, o que estamos chamando de incerteza no parágrafo acima é justamente a “última” limitação que a Natureza nos impõe na exatidão dos valores medidos: por mais fantásticos, bem projetados e etc que sejam os aparelhos de que dispomos, nós JAMAIS seremos capazes de saber a energia um sistema com exatidão melhor (incerteza menor) do que aquela nos imposta pelo Princípio da Incerteza de Heisenberg!

Voltemos à teoria mesônica de Yukawa. Se a idéia dele era, em analogia com a eletrodinâmica quântica, colocar no lugar dos elétrons, núcleons, e no lugar do fóton, o méson, então a nossa incerteza em medir energia deveria ser maior (ou seja, a exatidão pior) do que o valor associado a energia de repouso desta partícula, o méson. Sim, porque se esta partícula tem massa  $m_0$ , ela tem energia de repouso dada por  $m_0c^2$ , e se ela é virtual, nós não podemos ser capazes de percebê-la, logo nossa incerteza na medida de energia tem que ser  $\Delta E \geq m_0c^2$ . Por quê? Para não violar o princípio de conservação de energia! Afinal a partícula “surge do nada” e se nossa exatidão na medida de energia for muito boa, seremos capazes de perceber uma violação na conservação de energia. Portanto, a fim de não violar nenhum dos dois princípios, o da conservação de energia e o da Incerteza, o méson deveria ter um tempo de vida (intervalo entre a emissão e a absorção)  $\Delta t$  dado pela relação:

$$\Delta t \approx \frac{\hbar}{\Delta E} \approx \frac{\hbar}{m_0c^2} \quad (3.11)$$

Yukawa estimou a massa da “nova” partícula, a partir de uma conta bastante simples. Como sabemos, a distância  $d$ , percorrida por uma partícula com velocidade  $v$  num determinado intervalo de tempo  $\Delta t$  é dada por:

$$d = v \cdot \Delta t \quad (3.12)$$

A distância percorrida será maior, quanto maior for a velocidade. Como nenhuma partícula pode deslocar-se com velocidade superior a  $c$ , a distância máxima que ela pode percorrer é

$$d = c\Delta t = \frac{\hbar}{m_0 c} \quad (3.13)$$

Lembrando que a idéia desta teoria é que os mésons são as partículas que vão “representar” ou “intermediar” a interação entre dois núcleons, indo do primeiro para o segundo e do segundo para o primeiro, a distância que o méson é capaz de percorrer, antes de se desintegrar, deve corresponder ao alcance da interação. Igualando esta distância ao alcance da força nuclear, que é de aproximadamente  $1,5 \times 10^{-15} m$ , Yukawa chegou a uma estimativa da massa  $m_\pi$  da nova partícula, cerca de 130 MeV<sup>8</sup>.

Embora, originalmente, a teoria que previu a existência do méson tenha partido do pressuposto que ele era uma partícula virtual e, portanto, não poderia ser observado, o fato é que o méson  $\pi$ , também chamado de pión, foi observado experimentalmente em 1947, por um grupo de físicos do qual participou o brasileiro César Lattes<sup>6</sup>, e hoje sabemos que sua massa vale, na verdade, aproximadamente 137 MeV<sup>6</sup>.

### 3.5. Modelos Nucleares

Ainda hoje não se conseguiu construir um modelo nuclear teórico que conseguisse conciliar todos os dados experimentais que temos sobre os núcleos atômicos. Propuseram-se vários modelos, cada um baseado num conjunto de hipóteses simplificadoras e úteis de uma maneira limitada. Cada modelo serve para correlacionar uma porção de nosso conhecimento experimental sobre núcleos, usualmente dentro de uma faixa estreita de fenômenos, mas falha quando aplicada a dados fora desta faixa<sup>3</sup>.

Veremos, de maneira simplificada, dois desses modelos que estão entre os mais aceitos e utilizados, o modelo de camadas e o modelo da gota líquida.

#### 3.5.1.O Modelo de Camadas Nucleares

Muitas propriedades nucleares variam periodicamente de um modo similar ao do sistema periódico dos elementos. A maior parte destas propriedades apresentam descontinuidades marcantes perto de certos valores pares do número de prótons e nêutrons. Dados experimentais mostram que um nuclídeo, com número de prótons ou de nêutrons igual a 2, 8, 20, 50, 82 ou 126 é bastante estável. Estes números são chamados de números mágicos.

Os números mágicos de prótons e nêutrons são interpretados como formando camadas

Camada	Subcamadas
1	s
2	s p
3	s p d
4	s p d f
5	s p d f
6	s p d
7	s p

Figura 3.6- A distribuição dos elétrons em níveis de energia[3.6]

fechadas, análogas às camadas eletrônicas dos átomos. Os átomos apresentam os seus elétrons distribuídos em camadas e orbitais de diferentes níveis de energia, com um número máximo de 7 camadas de estabilidade, numeradas de 1 a 7 (números quânticos das camadas), chamadas de K, L, M, N, O, P, Q, respectivamente com número máximo de elétrons de 2, 8, 18, 32, 32, 18 e 2. As camadas dos nêutrons e prótons parecendo ser independentes, uma da outra<sup>3</sup>. Esta idéia levou à formulação do modelo de camadas nucleares.

Cada camada é limitada a um certo número de máximo de prótons ou nêutrons. Quando uma camada é preenchida, a configuração resultante é particularmente estável.

Este modelo supõe que cada núcleon move-se em como uma partícula independente. O princípio da exclusão de Pauli\* deve ser aplicado tanto aos prótons quanto aos nêutrons; ele impede que dois prótons ocupem o mesmo estado quântico e que dois nêutrons tenham os mesmos números quânticos.

### 3.5.2.O Modelo da Gota Líquida

Este modelo aproxima o núcleo como sendo uma espécie de gota líquida, em virtude das fortes analogias existentes entre eles. Vejamos. A energia que precisamos dar ao sistema para retirar uma partícula do núcleo é aproximadamente constante, assim como o calor de vaporização da gota líquida, ou seja a energia que precisamos dar à gota para retirar uma molécula, é constante. A densidade nuclear independe do número de massa, bem como a densidade da gota líquida independe do tamanho da gota<sup>6</sup>.

O modelo da gota líquida explica o comportamento do núcleo como um todo. Diz-se que ele descreve o comportamento coletivo do núcleo, a excitação do núcleo sendo tratada como oscilações de superfície, vibrações elásticas, e outros modos de movimentos coletivos.

\* As partículas que obedecem à este princípio não podem estar, simultaneamente, no mesmo estado quântico, ou seja, com todas as mesmas grandezas físicas, ou propriedades, iguais. Elas têm que diferir em alguma propriedade. Para que possamos ter dois elétrons, por exemplo, em um mesmo nível de energia em um átomo é necessário que eles tenham "algo" diferente e esse algo é o seu spin (a discussão do conceito de spin está além do objetivo deste texto). Um dos elétrons deverá apresentar um spin  $-1/2$  e o outro deverá ter um spin  $1/2$ . Isso quer dizer que as orientações dos seus spins apresentam sentidos contrários. Só desse modo podemos ter dois elétrons em um mesmo nível de energia

## 4. Radioatividade<sup>3,6,7,8</sup>

Henri Becquerel, em 1896, descobriu que núcleos, em seu estado natural, podem emitir radiação. Devido à dualidade onda-partícula o termo radiação pode ser usado tanto para o caso de partículas quanto para ondas eletromagnéticas. Todo e qualquer processo de emissão de radiação por parte de um nuclídeo recebe o nome de desintegração ou decaimento nuclear<sup>7</sup>. Em 1919 Rutherford conseguiu provocar a primeira desintegração nuclear artificial.



Figura 4.1-Henri Becquerel.[4.1]

Os principais processos de decaimento são: decaimento alfa (emissão de partícula alfa), decaimento beta (emissão de partícula beta) e decaimento gama (emissão de partícula gama)<sup>5</sup>.

### 4.1. Lei do Decaimento Radioativo

O decaimento radioativo obedece a uma lei bastante simples, deduzida por E. Von Schweidler, em 1905, sem nenhuma hipótese especial sobre a estrutura dos átomos radioativos ou sobre o mecanismo da desintegração<sup>5</sup>. Ele supôs que o decaimento de um núcleo radioativo está sujeito às leis da probabilidade, e que a probabilidade de que um núcleo decaia num certo intervalo de tempo é independente da história passada do núcleo e é a mesma para todos os núcleos do mesmo tipo<sup>3</sup>.

Para entender melhor o que isto quer dizer, vejamos um exemplo bastante simples. Imagine que tenhamos um punhado de milho de pipoca. A primeira vista todos os grãos de milho parecem iguais. Agora experimente colocá-los numa panela e levá-la ao fogo. Logo você perceberá que alguns grãos ‘estouram’ rapidamente, outros demoram um pouco mais, e alguns ainda mais. Ao retirar a pipoca do fogo poderemos verificar que alguns grãos nem chegam a ‘estourar’. Assim ocorre com os núcleos radioativos, não temos como saber quando um núcleo, de uma determinada amostra, decairá, apenas calculamos a probabilidade de que isso aconteça.

A lei do decaimento radioativo é dada por :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (4.1),$$

onde  $N(t)$  é o número de núcleos que ainda não decaíram,  $N_0$  é o número de núcleos quando  $t = 0$  e  $\lambda$  é a constante de proporcionalidade conhecida como constante de desintegração.

Todos os processos de decaimento dependem apenas da constante do decaimento  $\lambda$ , que deve ser diferente para diferentes processos e deve ser função das propriedades do núcleo radioativo<sup>6</sup>.

A radioatividade também pode ser descrita por duas outras quantidades, a meia-vida e a vida média.

A meia-vida  $t_{1/2}$ , é definida como o tempo em que a amostra do material radioativo se reduz à metade do seu valor inicial<sup>6</sup>. Veja o seguinte exemplo, se tivermos uma amostra de cerca de mil núcleos, de uma determinada espécie radioativa, passado um intervalo de tempo igual a uma meia-vida terão restado apenas quinhentos núcleos, ou seja a metade terá decaído. Decorrido um período de meia-vida, temos que

$$N(t) = N_0 / 2 \quad (4.2),$$

podemos então obter  $t_{1/2}$  em função de  $\lambda$ ,

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (4.3).$$

A vida média  $\tau$  é a média ponderada dos tempos de vida de cada núcleo da amostra.  $\tau$  é definida da seguinte forma,

$$\tau = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \quad (4.4).$$

A vida média é simplesmente o inverso da constante de desintegração, ou seja,

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (4.5).$$

Dessa forma vemos que um nuclídeo radioativo pode ser caracterizado pela razão na qual se desintegra, e qualquer uma das três quantidades, a constante de desintegração, a meia-vida, ou a vida média, pode ser usada para este propósito<sup>3</sup>.

## 4.2. Medidas da Quantidade de Radiação

Os núcleos instáveis de uma mesma espécie (mesmo elemento químico) e de massas diferentes, denominados *radioisótopos*, não decaem todos ao mesmo tempo, como já vimos. As emissões de radiação são feitas de modo imprevisível e não se pode adivinhar o momento em que um determinado núcleo irá emitir radiação<sup>7</sup>.

Entretanto, para a grande quantidade de átomos existente em uma amostra é razoável esperar-se um certo número de emissões em cada segundo, que é chamado de *atividade da amostra*<sup>7</sup>. Sua unidade de medida é o Becquerel (Beq). 1 Beq corresponde a uma desintegração por segundo. Outra unidade utilizada é o Curie (Ci), que corresponde a  $3,7 \times 10^{10}$  Beq.

Muitas vezes é importante medir a quantidade de energia absorvida por um material quando exposto à radiação. A energia média cedida pela radiação à matéria por unidade de massa desta é chamada de *Dose*<sup>9</sup>, e sua unidade é o gray (Gy). 1 Gy corresponde a um joule por quilograma (J/Kg).

### 4.3. Decaimento Alfa

Neste processo o núcleo emite uma partícula alfa (núcleo de hélio). Núcleos pesados, com número de massa<sup>6</sup> da ordem de 150, são instáveis diante da desintegração alfa, uma vez que a massa do núcleo original é maior que a soma das massas dos produtos da desintegração<sup>8</sup>.

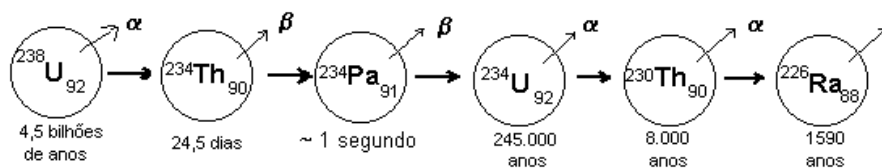
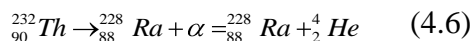


Figura 4.2- Exemplo de decaimento radioativo. O  $^{238}\text{U}$  se 'transforma' no  $^{226}\text{Ra}$ . [4.2]

Vejamos um exemplo, a desintegração do  $^{232}_{90}\text{Th}$ , dada pela equação



Quando um núcleo emite uma partícula alfa, os dois números N e Z diminuem de duas unidades cada, e o número de massa diminui de quatro unidades.

Ora, se todos os núcleos pesados são alfa-instáveis, por que ainda é possível encontrá-los na natureza? A resposta para esta pergunta está no fato de que a vida média de muitos núcleos alfa-emissores ser extremamente grande, maior inclusive do que a idade estimada do universo que é ~ 14 bilhões de anos<sup>6</sup>.

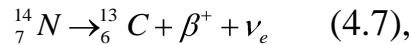
### 4.4. Decaimento Beta

Ocorre em núcleos que têm excesso ou falta de nêutrons para ter estabilidade. Ele pode ser  $\beta^+$ , onde o próton se transforma em um nêutron com a emissão de um pósitron ou  $\beta^-$ , onde um nêutron se transforma em um próton com a emissão de um elétron.

Quando se começou a estudar o decaimento beta um fato intrigou os cientista, a não conservação da energia e do momento angular. A fim de explicar tal fato, Pauli, em 1931<sup>6</sup>, sugeriu a existência de uma nova partícula, mais tarde chamada de neutrino por Fermi, que também seria

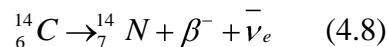
emitida no decaimento beta. A existência neutrino, que deveria ter carga elétrica nula, spin igual a  $\frac{1}{2}$  e massa igual ou aproximadamente igual a zero, permitiria mostrar que na realidade tanto a energia quanto o momento angular se conservam no decaimento beta. O neutrino só foi observado experimentalmente em 1956.

Um exemplo de decaimento  $\beta^+$  pode ser dado pela equação



onde  $\nu_e$  é o neutrino do elétron.

O decaimento  $\beta^-$  pode ser exemplificado pela equação



onde  $\bar{\nu}_e$  é o antineutrino do elétron.

Os elétrons ou pósitrons emitidos na desintegração  $\beta$  não existem no interior do núcleo, são criados no processo de desintegração<sup>7</sup>.

#### 4.5. Decaimento Gama

Todos os núcleos, à exceção de deuteron (núcleo do deutério), apresentam estados excitados\*. Tais estados têm uma certa vida média. Portanto o destino derradeiro, mais tempo ou menos tempo, de todo estado excitado é o de decair para estados de energia mais baixa<sup>7</sup>. Neste processo de decaimento o núcleo elimina o excesso de energia, sob a forma de radiação eletromagnética, até atingir seu estado fundamental. Esta radiação, altamente energética é chamada de radiação gama.

A emissão de raios gama ocorre, normalmente, com muita rapidez (a meia-vida dos núclídeos para o decaimento gama é muito pequena quando comparada com a meia-vida para o decaimento beta ou alfa), e só se observa por suceder, em geral, a emissão de  $\alpha$  ou  $\beta$ <sup>7</sup>.

---

\* Quando um núcleo se encontra num estado em que sua energia é maior do que a energia do seu estado fundamental, dizemos que ele está num estado excitado.



## 4.6. Radiações Ionizantes

As radiações são denominadas de *ionizantes* quando produzem íons, radicais livres\* e elétrons livres na matéria que sofreu a interação. A ionização se deve ao fato das radiações possuírem altas energias, o suficiente para quebrar as ligações químicas ou expulsar elétrons dos átomos após colisões<sup>9</sup>.

As radiações eletromagnéticas do tipo X e gama são as mais penetrantes e, dependendo de sua energia, podem atravessar vários centímetros do tecido humano até metros de blindagem de concreto. Por isso são muito utilizadas para a obtenção de radiografias e para controlar níveis de materiais contidos em silos de paredes espessas.

A radiação beta é pouco penetrante, em relação às anteriores. Dependendo de sua energia, pode atravessar milímetros e até centímetros de tecido humano. Já as partículas alfa possuem um poder de penetração muito pequeno. Mesmo radiações com 5 MeV, não conseguem atravessar a espessura de uma folha de papel. Entretanto, o seu poder de ionização é muito grande.

A interação das radiações ionizantes com a matéria é um processo que se passa em nível atômico. Ao atravessarem um material, estas radiações transferem energia para as partículas que forem encontradas em sua trajetória. Caso a energia transferida seja superior à energia de ligação do elétron com o restante da estrutura atômica, este é ejetado de sua órbita. O átomo é momentaneamente transformado em um íon positivo. O elétron arrancado (íon negativo) desloca-se no meio, impulsionado pela energia cinética adquirida neste processo. Esta energia é dissipada através da interação do elétron com elétrons e núcleos de outros átomos, eventualmente encontrados em sua trajetória. Novos íons podem, assim, serem introduzidos na matéria. O processo é interrompido quando, tendo sua energia dissipada em interações (choques), os elétrons acabam capturados por moléculas do meio.

Vejam um exemplo que irá deixar isto um pouco mais claro, vamos ‘brincar’ de bola de gude. Desenhe no chão, usando um pedaço de giz, um pequeno círculo, de cerca de 30 cm de raio, e nele coloque algumas bolinhas de gude. Se você agora pegar uma bolinha, e usá-la como projétil, atirando-a na direção do círculo, você verá que algumas bolinhas serão atingidas e outras não. Algumas serão arrancadas do círculo, outras mudarão de posição, mas continuarão dentro do círculo e outras

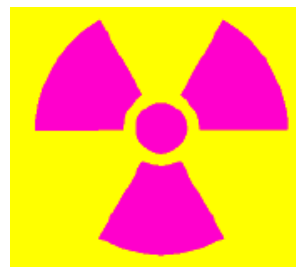


Figura 4.3-Símbolo que indica a presença de radiação.

---

\* Radicais livres são entidades químicas, altamente reativas em decorrência da presença de átomos cuja última camada não apresenta o número de elétrons que conferiria estabilidade à estrutura.

permanecerão no mesmo lugar. Quando a radiação atinge um átomo, alguns elétrons podem ser arrancados ou simplesmente passar para um nível mais alto de energia, dependendo da quantidade de energia que a radiação transfira para o átomo.

Ao arrancarem, aleatoriamente, elétrons das camadas eletrônicas de átomos, as radiações ionizantes contribuem para romper, mesmo que momentaneamente, o equilíbrio entre as cargas positivas e negativas do átomo. À introdução de cargas elétricas livres em um meio irradiado segue-se um rearranjo eletrônico que pode envolver elétrons de outros átomos e moléculas. Este rearranjo de elétrons tem como consequência o restabelecimento do equilíbrio perdido.

Com exceção dos átomos dos gases nobres, os átomos dos elementos existentes na natureza apresentam a última camada eletrônica incompleta. Esta situação faz com que a estrutura atômica seja instável. Esta instabilidade é contornada através da interação entre diferentes átomos, de modo que cada átomo envolvido no processo tenha, na sua última camada eletrônica, os oito elétrons (ou dois, no caso do átomo de Hidrogênio) que conferem estabilidade à estrutura atômica. Cada elemento possui propriedades químicas que refletem a configuração da última camada eletrônica de seus átomos. Da interação dos átomos surgem as moléculas. Quando um átomo perde elétrons toda a estrutura molecular pode ficar comprometida pelo rearranjo instantâneo de elétrons, na busca de uma configuração mais estável. Esta busca pode resultar numa perda de identidade química para a molécula envolvida e na geração, no sistema irradiado, de moléculas estranhas a ele.

#### **4.6.1.Efeito das Radiações Ionizantes no Homem**

Muitas pessoas têm medo quando falamos de radiatividade e de elementos radioativos, no entanto poucos sabem qual o efeito que a exposição à radiação pode causar no organismo. Na seção anterior vimos como a radiação interage com a matéria e agora veremos de forma simplificada como isso se dá no homem.

O efeito das radiações ionizantes em um indivíduo depende basicamente da dose absorvida (alta/baixa), da taxa de exposição (crônica/aguda) e da forma da exposição (corpo inteiro/localizada). Qualquer dose absorvida, inclusive das doses provenientes de radiação natural, pode induzir câncer ou matar células. A questão é de probabilidade de dano, probabilidade de mutações precursoras de câncer e número de células mortas. Quanto maiores as taxas de dose e as doses absorvidas, maiores as probabilidades de dano, de mutações precursoras de câncer e de morte celular. Quando falamos de probabilidade estamos falando da chance de que um determinado evento ocorra. Quando falamos que a probabilidade da ocorrência de danos aumenta com o aumento da

FORMA	DOSE ABSORVIDA	SINTOMATOLOGIA
Infra-clínica	Inferior a 1 Gy	Ausência de sintomatologia na maioria dos indivíduos.
Reações gerais leves	1-2 Gy	Astenia, náuseas, vômitos (3 a 6 hs. Após a exposição; sedação em 24 hs.)
Hematopoiética leve	2-4 Gy	Função medular atingida: linfopenia, leucopenia trombopenia, anemia; recuperação em 6 meses.
Hematopoiética grave	4-6 Gy	Função medular gravemente atingida.
DL <sub>50</sub>	4-4,5 Gy	Morte de 50% dos indivíduos irradiados
Gastro-intestinal	6-7 Gy	Diarréia, vômitos, hemorragias, morte 5 ou 6 dias.
Pulmonar	8-9 Gy	Insuficiência respiratória aguda, coma e morte entre 14 e 36 h.
Cerebral	superior a 10 Gy	Morte em poucas horas por colapso

Figura 4.4- Efeitos da radiação no homem.[4.4]

dose absorvida, o que queremos dizer é que quanto maior for a quantidade de radiação absorvida pelo organismo, maior será a chance de que esse organismo sofra algum dano.

Danos podem ser reparados; mutações podem tanto representar falhas nos mecanismos de reparo como

mecanismos de eliminação de células inviabilizadas pelo dano. A morte celular, resultante de quebras na molécula de DNA, da mesma forma que a eliminação de células mutantes, pode ser encarada como um mecanismo de eliminação de produtos inviabilizados pela presença de danos. A questão passa a envolver o número de células destruídas, o momento em que a morte celular ocorre, considerado o estágio de desenvolvimento do ser (célula-ovo, embrião, feto, criança, adolescente, adulto, velhice), e o sexo do indivíduo irradiado. Na figura 4.4 estão relacionados sintomas induzidos por exposições de corpo inteiro, em um indivíduo adulto. Em todos os casos de desenvolvimento de sintomatologia clínica o processo reflete a morte de um número significativo de células com comprometimento de órgão e/ou tecidos<sup>10</sup>.

#### 4.6.2.Dose Equivalente

Para que se pudessem estabelecer normas de proteção que recomendassem a dose máxima de radiação à qual poderíamos se submetidos sem que a probabilidade de dano à saúde fosse significativa, formulou-se o conceito de *dose equivalente*<sup>9</sup>, isso porque as diferentes partes do

organismo reagem de forma diferente aos diferentes tipos de radiação. Para isso criou-se um fator de qualidade, que reflete o fato de que quanto maior o número de ionizações maior o dano ao tecido.

Normas internacionais recomendam que se atribua um fator de qualidade 25 para a radiação  $\alpha$ , um fator 2 para a radiação  $\beta$  com energia inferior a 30 KeV, um fator 1 para a radiação  $\beta$  com energia superior a 30 KeV e para a radiação  $\gamma$ <sup>9</sup>.

A unidade de dose equivalente é o siver (Sv), que está relacionada à dose e ao fator de qualidade pela relação<sup>9</sup>:

$$1Sv = dose (Gy) . fator de qualidade \quad (4.9)$$

A sensibilidade dos diferentes tipos de tecidos à radiação varia bastante, assim como o dano causado por uma dose equivalente varia para cada parte do corpo, ou seja, algumas partes do corpo são mais vulneráveis à exposição à radiação do outras. Podemos dizer que o risco que corremos depende de que parte do corpo é atingida pela radiação. Estatisticamente, é possível estabelecer um fator de risco para mortalidade para cada tipo de tecido. Sua definição é:

$$risco de morte = fator de risco . dose equivalente$$

Veja a tabela<sup>9</sup> 4.1 com alguns fatores de risco referentes ao corpo humano:

Tecido/Órgão	Fator de Risco
gônadas	0.0040
mamas	0.0025
medula óssea	0.0020
pulmão	0.0020
tireóide	0.0005
osso	0.0005
restante	0.0050

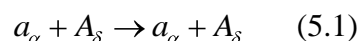
Tabela 4.1- Fatores de risco referentes ao corpo humano.

Diversas pesquisas têm tentado estabelecer qual a quantidade de radiação a que podemos ficar expostos sem prejuízos à saúde. Atualmente a Comissão Internacional de Proteção Radiológica recomenda uma dose equivalente menor que 0.05 Sv/ano<sup>9</sup>.

## 5. Reações nucleares<sup>3,6</sup>

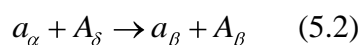
O estudo das reações nucleares, como já dissemos, tem sido uma fonte considerável de informações sobre os núcleos.

Uma colisão nuclear, usualmente, apresenta no estágio inicial um projétil  $a$  num certo estado quântico  $\alpha$ , incidindo sobre um núcleo-alvo  $A$  num certo estado quântico  $\delta$ . A colisão é chamada de espalhamento elástico se os núcleos antes da colisão forem iguais aos núcleos depois da colisão, preservando os seus respectivos estados quânticos e diferindo apenas nas direções de seus movimentos<sup>6</sup>. Podemos representá-la por:



Freqüentemente, o projétil  $a$  é um núcleo leve, tal como próton ou uma partícula alfa, mas pode também ser uma partícula tal como o nêutron.

Se devido à colisão o núcleo-alvo for colocado num estado quântico  $\beta$  diferente do original, então, estamos diante de um espalhamento inelástico, podemos representá-lo por:



Exemplo típico de um espalhamento inelástico é quando o núcleo-alvo ganha energia, às custas do projétil que perde energia cinética, e é deixado num de seus estados excitados. O núcleo produto excitado geralmente decai muito rapidamente para o estado fundamental com a emissão de raios gama.

Voltando ao exemplo das bolinhas de gude, podemos fazer também uma analogia com as reações nucleares. Imagine agora que tenhamos duas bolinhas e jogamos uma contra a outra. Se após a colisão as duas bolinhas apenas tiverem sua trajetória alterada, mantendo suas características como o formato ou o tamanho, podemos dizer que houve um espalhamento elástico. Porém se além de sua trajetória uma delas, ou até mesmo as duas, tenha uma de suas características alterada, por exemplo, se uma for deformada e a outra for partida em dois pedaços, então, podemos dizer que houve um espalhamento inelástico.

Em geral, se a colisão produzir dois ou mais componentes finais, em que pelo menos um deles é diferente dos componentes originais, então temos uma reação nuclear.

### 5.1.O Núcleo Composto

Em 1936, Niels Bohr propôs a teoria do núcleo composto, que descreve a colisão entre um projétil e um núcleo-alvo em duas etapas distintas. As duas etapas propostas por Bohr foram:

- i. A partícula incidente é absorvida pelo núcleo-alvo, formando o que chamamos de núcleo composto. A energia do projétil é repartida entre todos os constituintes do núcleo-alvo, que fica com uma energia de excitação  $E_c$  igual à soma da energia cinética mais a energia de ligação da partícula incidente<sup>3,6</sup>.
- ii. O núcleo composto decai, emitindo uma partícula (próton, nêutron, alfa, etc.), ou um raio gama, deixando o núcleo final ou produto.

Bohr supôs também que o modo como o núcleo composto decai é independente da maneira pela qual ele é formado, dependendo apenas de suas propriedades, tais como sua energia e momento angular<sup>3</sup>.

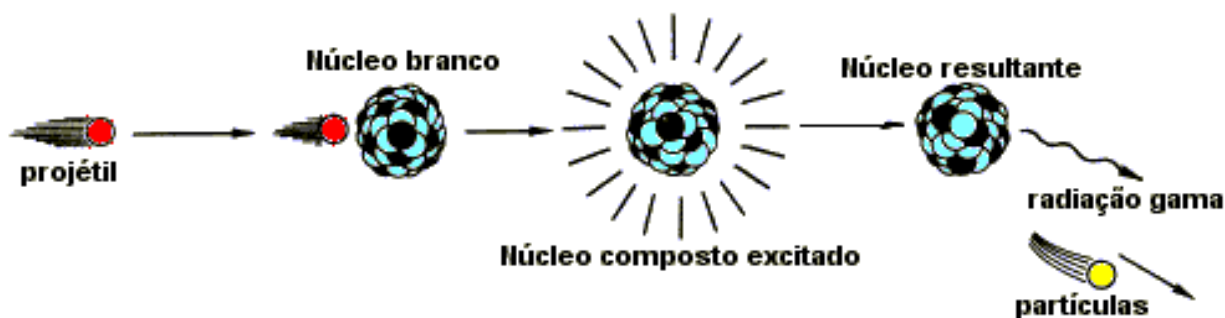


Figura 5.1- exemplo de reação usando o conceito do núcleo composto.[5.1]

## 6.Fissão e Fusão Nuclear<sup>3,6,7</sup>

Fissão e Fusão nuclear são dois processos que agem em sentidos opostos. Enquanto na fissão, um núcleo pesado se “divide” em dois núcleos mais leves, na fusão, dois núcleos leves “se unem”, formando um núcleo mais pesado. Entretanto, os dois conduzem a um mesmo resultado e que os tornam áreas de grande interesse estratégico: uma grande liberação de energia.

### 6.1.Fissão Nuclear

A descoberta da fissão nuclear ocorreu em meio aos trabalhos visando à produção de elementos transurânicos\*.

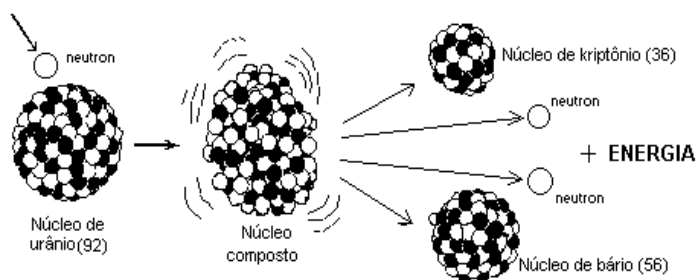


Figura 6.1- Fissão do urânio.[6.3]

Examinando fragmentos residuais provenientes de experimentos de irradiação de núcleos, com nêutrons como projéteis, descobriu-se que o bombardeio de urânio por nêutrons dava origem a núcleos de massa intermediária. Propôs-se então que a

absorção de nêutrons deixava os núcleos de urânio instáveis, levando-os a dividirem-se em dois fragmentos de massas aproximadamente iguais. Em analogia com o processo de divisão celular, o fenômeno foi batizado de fissão nuclear<sup>6</sup>.

Núcleos pesados ( $Z > 92$ ) estão sujeitos à fissão espontânea<sup>7</sup>. Os núcleons do núcleo se afastam uns dos outros, formando um estrangulamento que cresce e provoca a total separação do núcleo inicial em dois fragmentos, como mostra a figura ao lado. O ponto onde essa completa separação ocorre é conhecido como ponto de cisão<sup>6</sup>.

Podemos estimar, de modo bem elementar, o total de energia liberada num processo de fissão nuclear. Vejamos o caso em que um núcleo, com  $A = 240$ , se divide em dois núcleos, com  $A = 120$  cada. De acordo com o resultado experimental da curva da energia de ligação por nucleon, suas energias são respectivamente, 7,6 e 8,5 MeV, a energia total liberada pode ser calculada por<sup>6</sup>:

$$Q \cong 240 (8,5 - 7,6) = 216 \text{ MeV} \quad (6.1)$$

Isto representa, neste caso, a liberação de aproximadamente 1 MeV/núcleon. Esta é uma quantidade enorme de energia, se comparada, por exemplo, com a reação química de combustão onde a energia liberada por molécula de oxigênio consumida é da ordem de 4 eV<sup>7</sup>.

A fissão, em geral, produz fragmentos em estados excitados, que decaem emitindo gamas, betas e nêutrons, estes retardados (em relação ao decaimento beta).

### 6.1.2.Fissão Induzida

Alguns núcleos podem sofrer fissão pela captura de nêutrons. O  $^{235}\text{U}$ , por exemplo, fica excitado pela captura de um nêutron e se divide em outros dois núcleos, emitindo diversos nêutrons. A descoberta desta emissão de nêutrons, durante o processo de fissão, levou à investigação da possibilidade de esses nêutrons emitidos provocarem outras fissões. No caso do  $^{235}\text{U}$ , cada evento de fissão libera em média 2,5 novos nêutrons, que podem ser capturados por outros núcleos de urânio e com isto gerar mais nêutrons para novos processos, dando origem à chamada **reação em cadeia**, com grande produção de energia<sup>6,7</sup>.

Isto quer dizer que se tivermos uma quantidade razoável de urânio, se um dos núcleos sofrer uma fissão, isso poderá provocar a fissão de outros núcleos, que por sua vez também provocarão a fissão de outros núcleos, e assim sucessivamente. A quantidade de urânio necessária para que ocorra a reação em cadeia é chamada de massa crítica. No entanto como o urânio encontrado na natureza é em sua grande maioria composto pelo isótopo  $^{238}\text{U}$ , que não sofre fissão, para se provocar uma reação em cadeia é preciso utilizar urânio enriquecido\*. A descoberta da possibilidade de se provocar uma reação em cadeia levou a humanidade a desenvolver as bombas e as usinas nucleares.

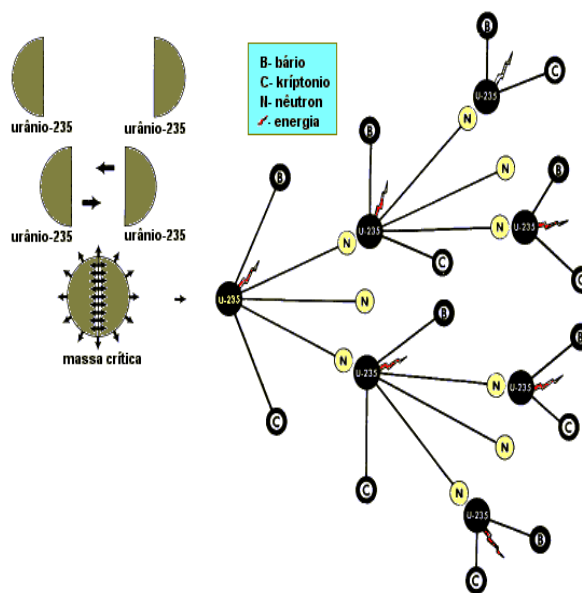


Figura 6.2- reação em cadeia.[6.2]

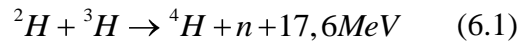
\* Elementos Transurânicos- Elementos com número atômico maior do que 92, portanto, elementos após o urânio na Tabela Periódica. A maioria destes elementos é instável e têm meias-vidas curtas.

\* Urânio enriquecido: urânio com uma concentração de  $\text{U}^{235}$  maior que a encontrada na natureza. A quantidade de urânio-235 na natureza é muito pequena: para cada 1.000 átomos de urânio, 7 são de urânio-235 e 993 são de urânio-238 (a quantidade dos demais isótopos é desprezível).



## 6.2.Fusão Nuclear

A fusão nuclear é um processo oposto à fissão, onde dois núcleos leves, como por exemplo os de deutério ( $^2\text{H}$ ) e de trítio ( $^3\text{H}$ ), se fundem para formar um núcleo maior. Um bom exemplo de reação de fusão é:



Pela curva de energia de ligação por partícula (figura 3.4), observamos que, assim como ocorre na fissão, no processo de fusão nuclear há também grande liberação de energia. Na reação mostrada a cima, são liberados 3,52 MeV por núcleon, o que representa aproximadamente 3,5 vezes

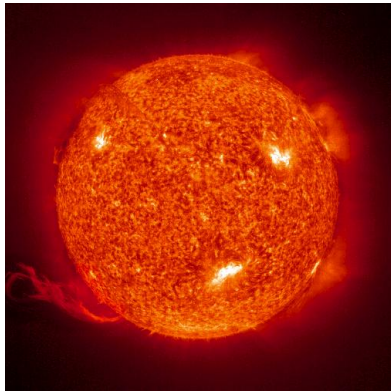


Figura 6.3 – A fonte de energia do Sol é a fusão nuclear.[6.3]

o valor obtido na reação de fissão que usamos como exemplo na seção 6.1. Ora se a fusão nuclear libera tanta energia, por que não a utilizamos na geração de energia elétrica, assim como fazemos com a fissão? Vejamos alguns fatores que fazem com que isso ainda não ocorra.

Para que aconteça a fusão, além de estarem bastante próximos, os núcleos de hidrogênio precisam ter energia suficiente para superar a forte repulsão coulombiana, que neste caso é de cerca de 1MeV. Quando essa energia é de origem

térmica o processo é conhecido como fusão termonuclear.

Para se provocar a fusão do hidrogênio, temos que submeter a amostra a altíssimas temperaturas, da ordem de  $10^6$  K. Mas não basta conseguir estas temperaturas, precisamos manter os núcleos muito próximos uns dos outros, ou seja, eles devem estar confinados em um espaço reduzido. Um problema prático encontrado quando se tenta provocar a fusão nuclear é justamente este, como confinar amostras com temperaturas tão altas.

Existem dois métodos, principais, de confinamento: o confinamento magnético, através de fortes campos magnéticos; e o confinamento inercial, provocado por um intenso feixe de raio laser que esquenta e comprime a amostra num intervalo de tempo tão curto que possibilita a fusão antes dela se separar sem nenhuma reação.

Apesar dos esforços empenhados, ainda não se desenvolveu a tecnologia necessária para tornar a fusão uma fonte prática de energia. Ainda hoje, se injeta mais energia do que aquela que se pretende extrair do próprio processo.

A fusão nuclear é a principal fonte de energia do Sol. No seu interior, no núcleo, a temperatura é da ordem de  $10^7$  K, além disso, os íons são confinados pelo seu enorme campo gravitacional. Nestas condições a fusão ocorre de maneira simples e farta<sup>7</sup>.

## Parte II - Aplicações

Como vimos na seção 6, os processos de fissão e fusão nuclear liberam grandes quantidades de energia e, desde que tal fato é conhecido, diversos pesquisadores buscam maneiras de aproveitá-la, primeiro com objetivos militares, com a construção de armas nucleares, e depois para fins pacíficos, na geração de energia elétrica. Na medicina e na indústria, por exemplo, os radioisótopos, vem sendo cada vez mais utilizados. Veremos alguns exemplos, que mostram como a física nuclear tem influenciado nossas vidas, desde o século XX.

### *7.As Armas Nucleares<sup>9,11,12</sup>*

As bombas atômicas e nucleares baseiam-se na liberação da enorme quantidade de energia contida no interior do núcleo num curtíssimo intervalo de tempo ( $\approx 10^{-6}$ s), gerando uma onda de choque, calor e radioatividade de grande poder destrutivo<sup>9</sup>.

As bombas atômicas, atualmente consideradas rudimentares, baseiam-se no princípio da fissão nuclear. Acondiciona-se numa mesma carcaça diversos volumes de material físsil\*, normalmente urânio altamente enriquecido (em mais de 90%)\*\* ou plutônio (um material que não existe naturalmente). Nenhum deles tem, isoladamente, massa de material físsil suficiente para que a reação em cadeia ocorra. Ao ser detonada a bomba, os volumes são comprimidos, formando a massa crítica e originando a reação em cadeia. A temperatura e a pressão dentro da carcaça aumentam rapidamente, levando à explosão da mesma. As bombas nucleares, ou bombas H, baseiam-se no princípio da fusão<sup>9</sup>.

Os Estados Unidos (EUA) foram o primeiro país a desenvolver a bomba atômica e o único a utilizá-la, no final da Segunda Guerra Mundial. O inédito poder de destruição das bombas lançadas em 1945, nas cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki, provocou o interesse mundial por explosivos militares<sup>11</sup>. Países europeus, como Inglaterra e França, utilizaram o desenvolvimento de armas nucleares como uma das formas de diminuir a supremacia norte americana após a segunda guerra.

Em 1950, praticamente todos os países industrializados e muitos do “terceiro mundo”, atualmente chamados de países em desenvolvimento, já possuíam seus “projetos nucleares”<sup>11</sup>. A União Soviética (URSS) adquiriu armas nucleares quatro anos depois de Hiroshima, em 1949, no

---

\* Material Físsil – material sujeito à fissão.

\*\* Urânio contendo mais de 90% do isótopo <sup>235</sup>U.

caso da bomba atômica, e nove meses depois dos EUA, em 1953, no caso da bomba de hidrogênio<sup>12</sup>. Os britânicos conseguiram bombas próprias em 1952, os franceses e os chineses na década de 1960. Nas décadas de 1970 e 1980, outros países conseguiram a capacidade de fazer armas nucleares, notadamente Israel e África do Sul<sup>12</sup>. Mais recentemente houve a nuclearização da Índia e do Paquistão e, além disso, a Coreia do Norte anunciou, em 2003, que retomara seu projeto nuclear.

### 7.1.As Bombas de Hiroshima e Nagasaki

À época da segunda guerra mundial, os Estados Unidos desenvolveram dois tipos de bombas, da ordem de 15 Kton cada.

Uma, à base de urânio, foi batizada de Little Boy e lançada em Hiroshima, e outra, à base de plutônio, foi batizada de Fat Boy e lançada em Nagasaki<sup>9</sup>.



Figura 7.1- Mais à frente está a Little Boy e mais atrás a Fat Boy.[7.1]

Podemos ter uma idéia do poder de destruição dessas bombas, examinando alguns dados relativos à bomba que explodiu em Nagasaki: raio de destruição total = 1.6 Km; raio de danos severos = 2 Km; e raio de danos moderados = 3 Km<sup>9</sup>.

As cidades japonesas foram atacadas, nos dias 6 (Hiroshima) e 9 (Nagasaki) de agosto de 1945, matando 132 mil<sup>9</sup> pessoas. Certamente uma delas seria suficiente para que o Japão aceitasse a rendição incondicional, que ocorreu<sup>11</sup> em 14 de agosto de 1945. A utilização das duas foi apenas penas, um teste comparativo entre as duas tecnologias<sup>9</sup>.

### 7.2.A Bomba H

A bomba H se baseia no princípio da fusão nuclear. Como já dissemos este processo é a principal fonte da energia solar. Para se obter a altíssima temperatura, necessária para que ocorra a fusão, são usadas bombas atômicas como disparadores do processo<sup>9</sup>.

As bombas atômicas são colocadas ao redor da câmara central, que contém um isótopo do hidrogênio (deutério), sob pressão.

A explosão das bombas eleva a pressão e a temperatura na câmara, iniciando o processo de fusão. A energia liberada causa a explosão do invólucro, que é construído com urânio, produzindo enormes quantidades de radiação.

Se compararmos a bomba H com a bomba utilizada em Nagasaki, teremos uma noção do seu enorme poder de destruição. Veja a tabela<sup>9</sup> 7.1:

	Bomba de Nagasaki	Bomba H
	≈Dez mil ton	≈Dezenas de megatons
Raio de destruição total	1,6 km	14 km
Raio de danos severos	2 km	17,5 km
Raio de danos moderados	3 km	29 km
Raio de danos leves	5,6 km	48 km

Tabela 7.1- Comparação entre o poder de destruição da bomba de nagasaki e a bomba H.

### 7.3.Os Arsenais Nucleares

Passada mais de uma década do fim da guerra fria ainda existem 30.000 armas nucleares no planeta. Embora aconteçam conferências de desarmamento anuais na ONU nenhuma negociação de peso aconteceu após 1995. O parlamento da Rússia, temendo a expansão da OTAN (uma organização militar nuclear de nações ocidentais liderada pelos Estados Unidos), não ratifica tratados de redução dos arsenais nucleares submetidos há vários anos. Mesmo se os novos tratados propostos entre a Rússia e os Estados Unidos fossem ratificados, existiriam 10.000 armas nucleares no ano de 2007, e os arsenais se estabilizariam com 2.000 armas cada um após essa data. A posição atual do governo norte-americano é de preservação de seu arsenal nuclear e de desenvolvimento de novos artefatos<sup>11</sup>.

A posição atual brasileira pelo desarmamento é respaldada pelo veto constitucional à armas nucleares, e pela resolução do congresso nacional, em 1998, de que o endosso ao TNP (Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares) estaria vinculado a iniciativas do governo brasileiro pró eliminação global das bombas atômicas<sup>12</sup>.

## 8. Geração de Energia Elétrica<sup>8,9,10,12,13,14</sup>

O princípio de geração da energia elétrica, propriamente dito, é o mesmo tanto para usinas termelétricas, hidroelétricas e nucleares, quanto para usinas baseadas em fontes alternativas, como o vento ou a energia solar<sup>9</sup>.

Vejam melhor como isto funciona. Se tivermos uma espira (um fio em formato de círculo, por exemplo), podemos induzir uma corrente elétrica nela fazendo um ímã atravessá-la num movimento de vai e vem ou, equivalentemente, girar a espira na presença do campo magnético. Este fenômeno, o de gerar corrente elétrica a partir de campos magnéticos, foi descoberto pelo físico inglês Michael Faraday na segunda metade do Séc. XIX.

A geração da energia elétrica que consumimos baseia-se neste princípio. Coloca-se uma turbina acoplada a um gerador. O gerador é composto basicamente de um conjunto de espiras fixas num eixo de rotação na presença de um campo magnético. Uma turbina é constituída de um eixo, dotado de pás. Numa usina hidroelétrica, por exemplo, as pás são acionadas por água corrente e, então, o seu eixo entra em rotação e move a parte interna do gerador, induzindo uma corrente elétrica nos fios que formam as espiras, ou seja a energia mecânica, da corrente d'água é transformada em energia elétrica.

O que diferencia os diversos tipos de usinas geradoras, termelétricas, hidroelétricas e nucleares e etc, é a forma como cada uma faz a turbina girar, acionando o gerador.

Se as pás forem movidas por passagem de vapor, obtido por aquecimento de água, como se fosse uma grande chaleira, tem-se, então, uma usina termelétrica.

O calor pode ser gerado pela queima de óleo combustível, carvão ou gás.

As usinas nucleares são parecidas com as termelétricas, no entanto, elas utilizam como fonte de calor a fissão nuclear, numa reação em cadeia controlada. Por essa razão elas também são chamadas de usinas termonucleares.

O combustível “queimado” nas usinas nucleares é o urânio enriquecido a 3,2%<sup>14</sup>, isto é de todo urânio, apenas 3,2% provém do isótopo  $U^{235}$ , que é o isótopo com alta probabilidade de fissão<sup>10</sup>.

A grande vantagem de uma central nuclear é a enorme quantidade de energia que pode ser gerada, ou seja, a potência gerada, para pouco material usado (o urânio).

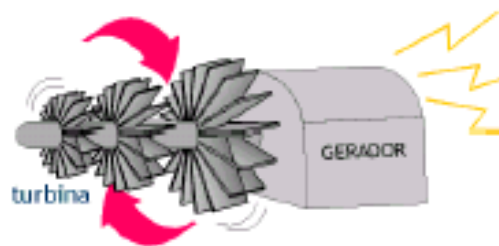


Figura 8.1- Uma turbina e o gerador[8.1]

Veja uma tabela comparando as quantidades necessárias, de urânio, carvão e óleo, para a geração da mesma quantidade de energia<sup>14</sup>.

U <sup>235</sup>	10g
óleo	700kg
carvão	1200kg

Tabela 8.1

### 8.1.O Reator Nuclear

Vejamos, como exemplo, um reator do tipo PWR (Pressurized Water Reactor = Reator a Água Pressurizada), porque contém água sob alta pressão. Reactores deste tipo foram construídos nas usinas<sup>12</sup> de Angra 1 e Angra 2.

O reator consiste num vaso metálico no qual se localiza o combustível. O urânio fica imerso em água (circuito primário), que, aquecida pela energia liberada através da fissão, irá circular, aquecendo o circuito de água secundário, cuja circulação, por sua vez, moverá o gerador<sup>9</sup> (figura 8.2).

### 8.2.O Lixo Atômico

Os materiais radioativos produzidos em instalações nucleares (reatores nucleares, usinas de beneficiamento de minério de urânio e tório, etc.), laboratórios e hospitais nas formas sólida, líquida ou gasosa, que não têm utilidade, não podem ser simplesmente jogados fora ou no lixo, por causa das radiações que emitem. Esses materiais, que não são utilizados em virtude dos riscos que apresentam, são chamados de *rejeitos radioativos*.

Na realidade, a expressão lixo atômico é um pleonismo, porque qualquer lixo é formado por átomos e, portanto, é atômico. Ele passa a ter essa denominação popular, quando é radioativo<sup>8</sup>.

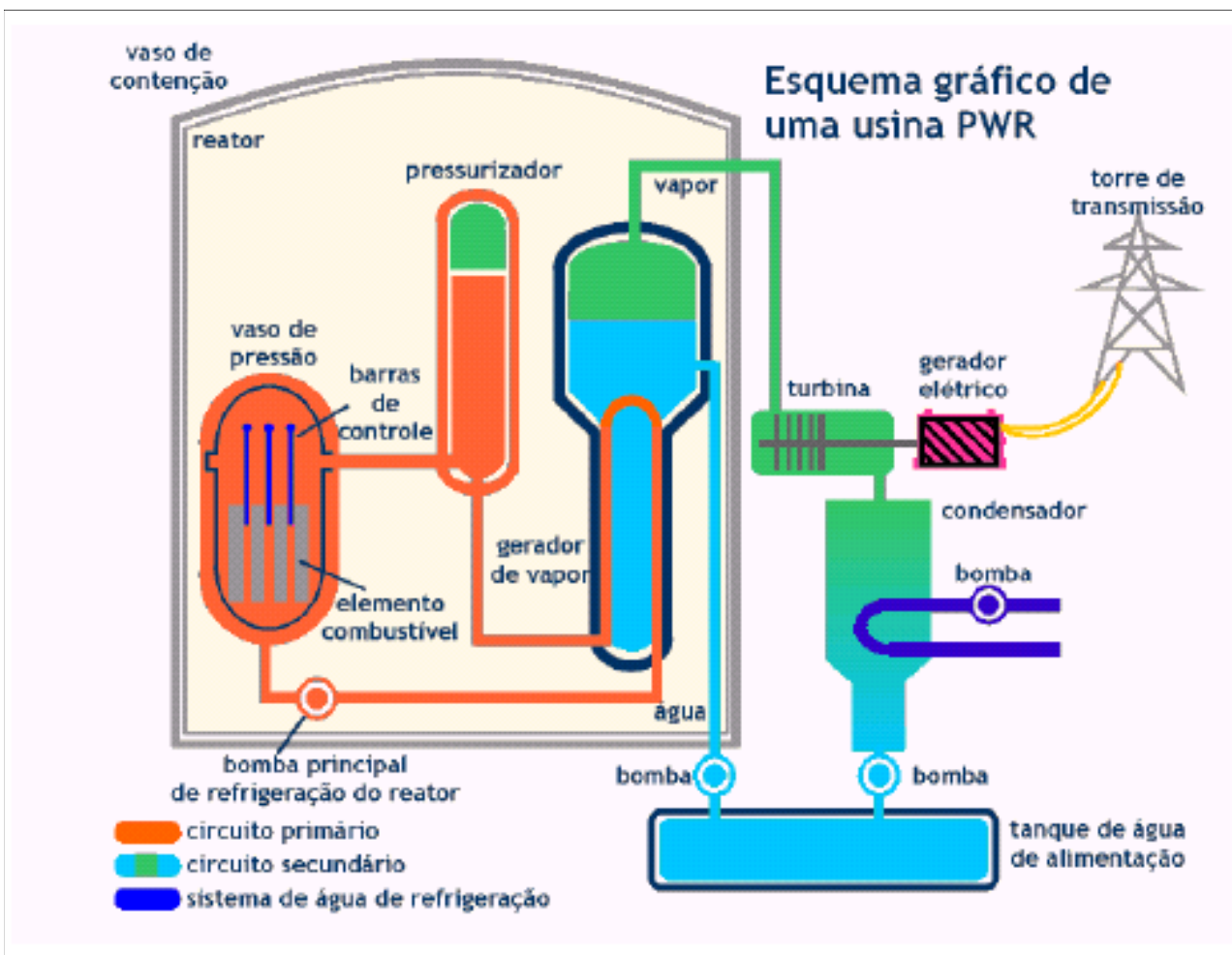


Figura 8.2- Ilustração de uma usina nuclear PWR.[8.2]

### 8.2.1. Tratamento dos Rejeitos Radioativo

Os rejeitos radioativos precisam ser tratados, antes de serem liberados para o meio ambiente, se for o caso. Eles podem ser liberados quando o nível de radiação é igual ao do meio ambiente e quando não apresentam toxidez química. Rejeitos sólidos, líquidos ou gasosos podem ser, ainda, classificados, quanto à atividade, em rejeitos de baixa, média e alta atividade.

Os rejeitos de meia-vida curta são armazenados em locais apropriados (preparados), até sua atividade atingir um valor semelhante ao do meio ambiente, podendo, então, ser liberados. Esse critério de liberação leva em conta somente atividade do rejeito. Evidente que materiais de atividade ao nível ambiental, mas que apresentam toxidez química para o ser humano, ou que são prejudiciais ao ecossistema, não podem ser liberados sem um tratamento químico adequado. Rejeitos sólidos de baixa atividade, como partes de maquinaria contaminadas, luvas usadas, sapatilhas e aventais contaminados, são colocados em sacos plásticos e guardados em tambores ou caixas de aço, após classificação e respectiva identificação. Os produtos de fissão, resultantes do combustível nos reatores nucleares, sofrem tratamento especial em usinas de reprocessamento, onde são separados e comercializados, para uso nas diversas áreas de aplicação de radioisótopos. Os materiais radioativos



restantes, que não têm justificativa técnica e/ou econômica para serem utilizados, sofrem tratamento químico especial e são vitrificados, guardados em sistemas de contenção e armazenados em depósitos de rejeitos radioativos<sup>8</sup>.

O tratamento e armazenamento do lixo atômico são fortemente criticados por ambientalistas contrários à construção de usinas nucleares. A queima do urânio resulta em plutônio e em produtos de fissão, alguns deles com meia vida de até trinta anos. O plutônio pode ser reprocessado e usado novamente em reatores, mas, mesmo nesse processo, são gerados resíduos radioativos. O tempo estimado para que esses resíduos, contando-se com os isótopos de urânio, deixem de ser perigosos é longo, cerca de 24 mil anos<sup>9</sup>.

O lixo atômico constitui-se ainda num problema tecnológico, uma vez que não se sabe onde guardá-lo. Existem planos mirabolantes para jogar esses resíduos no espaço ou no fundo do mar, aterrá-los ou, até mesmo, armazená-los em países subdesenvolvidos. Estas soluções não são definitivas, apenas empurram o problema para as futuras gerações<sup>9</sup>.

### **8.3. Impactos Ambientais**

Um dos principais fatos atacados pelos que são contrários ao uso da tecnologia nuclear são os impactos ambientais por ela gerados. No entanto devemos lembrar que todos os processos de geração de energia apresentam riscos e benefícios.

As usinas hidrelétricas tendem a alagar áreas extensas, modificando o comportamento dos rios barrados. A biota\* e os ecossistemas podem ser alterados. A vegetação submersa pode se decompor dando origem a gases como o metano, que impacta no chamado "efeito estufa" causando mudança no clima. Cidades e povoados podem ser deslocados pela construção da barragem. O novo lago pode afetar o comportamento da bacia hidrográfica, pode mais tarde vir a assorear e, em conjunto com outros fatores, causar mudanças na qualidade da água.

As usinas térmicas a carvão, óleo e gás natural podem causar diversos tipos de poluição ambiental. Estas usinas emitem uma série de gases que contribuem para o efeito estufa, tais como o dióxido de carbono e metano. No caso das usinas térmicas a carvão e óleo, também há emissão de óxidos de enxofre e nitrogênio, que na atmosfera, dão origem às chuvas ácidas que prejudicam a agricultura, as florestas.

---

\* Conjunto de seres vivos, animais e vegetais, de uma região.

Além dos problemas relacionados ao lixo atômico, as usinas nucleares apresentam risco de acidentes, com vazamento de radiação para o meio ambiente.

#### **8.4.A Segurança dos Reatores Nucleares<sup>13</sup>**

Apesar de um reator nuclear não poder explodir como uma bomba atômica (lembre-se que numa bomba é usado urânio enriquecido em mais de 90% e as usinas usam urânio enriquecido à pouco mais de 3%) isso não quer dizer que não seja possível ocorrer um acidente em uma central nuclear. Por esse motivo, a construção de uma usina nuclear envolve vários aspectos de segurança, desde a fase de projeto até a construção civil, montagem dos equipamentos e operação.

A filosofia de segurança dos reatores nucleares é dirigida no sentido de que as usinas nucleares sejam projetadas, construídas e operadas com os mais elevados padrões de qualidade e que tenham condições de alta confiabilidade.

Na fase de projeto, são imaginados diversos acidentes que poderiam ocorrer em um reator nuclear, assim como a forma de contorná-los, por ação humana ou, em última instância, por intervenção automática dos sistemas de segurança projetados com essa finalidade. São, ainda, avaliadas as conseqüências em relação aos equipamentos, à estrutura interna do reator e, principalmente, em relação ao meio ambiente.

Fenômenos da natureza, como tempestades, vendavais e terremotos, e outros fatores de risco, como queda de avião e sabotagem, são também levados em consideração no dimensionamento e no cálculo das estruturas.

#### **8.5.Acidentes Nucleares**

Um acidente é considerado nuclear, quando envolve uma reação nuclear ou equipamento onde se processe uma reação nuclear<sup>13</sup>.

Em uma usina nuclear os riscos estão, em sua maioria, relacionados à manipulação da enorme quantidade de energia produzida durante o processo de fissão, associadas à falhas humanas ou do equipamento. A ocorrência de um acidente, como o de Chernobyl, em abril de 1986 na Rússia, implica a inutilização de vastas regiões por centenas de anos, tempo necessário para que a radiação chegue a níveis nos quais os riscos sejam desprezíveis.

Acidentes graves implicam a perda de controle da reação em cadeia, liberando uma grande quantidade de energia que pode superaquecer o reator. Isto implica num aumento da pressão no vaso do reator, causando uma explosão mecânica, não nuclear, que espalhará uma nuvem de partículas

radioativas por uma vasta área. Dependendo dos ventos essa nuvem pode viajar por centenas de quilômetros até que se precipite na forma de chuva radioativa. No local da usina o combustível descontrolado produzirá tanto calor que perfurará paredes e rochas, penetrando cada vez mais no solo. Ao atingir lençóis d'água subterrâneos ele provocará novas explosões e contaminações<sup>9</sup>.

### 8.5.1.O Acidente em Three Mile Island

Duzentos e quarenta e dois reatores nucleares do tipo Angra (PWR) já foram construídos e estão em operação, ocorrendo em apenas um deles um acidente nuclear grave, imaginado em projeto, sem conseqüências para o meio ambiente. Foi o acidente de Three Miles Island (TMI), nos Estados Unidos, ocorrido em março de 1979. Nesse acidente, vazaram água e vapor do Circuito Primário (figura 8.2), mas ambos ficaram retidos na Contenção. Com a perda da água que fazia a refrigeração dos elementos combustíveis, estes esquentaram demais e fundiram parcialmente, mas permaneceram confinados no vaso de pressão do reator. Houve evacuação parcial (desnecessária) da cidade. O Governador recomendou a saída de mulheres e crianças, que retornaram às suas casas no dia seguinte. Ao contrário do esperado, muitas pessoas quiseram ir ver o acidente de perto, sendo contidas por tropas militares e pela polícia<sup>14</sup>.

Embora o Reator Angra 1 seja do mesmo tipo do de TMI, ele não corre risco de sofrer um acidente semelhante, porque já foram tomadas as medidas preventivas que impedem a repetição das falhas humanas causadoras daquele acidente. O mesmo acidente não poderia ocorrer em Angra 2, porque o projeto já prevê essas falhas e os meios de evitar que elas aconteçam<sup>13</sup>.

### 8.5.2.O Acidente em Chernobyl

O Reator de Chernobyl é de um tipo diferente dos de Angra.

O reator estava parando para manutenção periódica anual. Estavam sendo feitos testes na parte elétrica com o reator quase parando, isto é, funcionando à baixa potência. Para que isso fosse possível, era preciso desligar o sistema automático de Segurança, caso contrário, o reator poderia parar automaticamente durante os testes, o que eles não desejavam. Os operadores da sala de controle do reator, que não eram treinados segundo as normas internacionais de segurança, não obedeceram aos



Figura 8.3- Usina nuclear de Chernobyl.[8.3]

cuidados mínimos, e assim, acabaram perdendo o controle da operação. A temperatura aumentou rapidamente e a água que circulava nos tubos foi total e rapidamente transformada em vapor, de forma explosiva. Houve, portanto, uma explosão de vapor, que arrebentou os tubos e os elementos combustíveis e. A explosão foi tão violenta que deslocou a tampa de concreto e destruiu o teto do prédio, que não foi previsto para agüentar tamanho impacto, deixando o reator aberto para o meio ambiente<sup>14</sup>.

Seguiu-se um grande incêndio, arremessando para fora grande parte do material radioativo que estava nos elementos combustíveis, danificados na explosão de vapor.

### **8.6. Por Que Energia Nuclear ?**

A geração nucleoeleétrica permite a obtenção de muita energia em um espaço físico relativamente pequeno e a instalação de usinas perto dos centros consumidores, reduzindo o custo de distribuição de energia. Outras fontes de energia, como solar ou eólica, são de exploração cara e capacidade limitada, ainda sem utilização em escala industrial. Os recursos hidráulicos também apresentam limitações, além de provocar, como vimos, grandes impactos ambientais.

Embora exista sempre o risco, o número de acidentes fatais é pequeno (não chegam a quinhentos durante quase cinquenta anos de existência deste tipo de usina, enquanto o número de acidentes em outros tipos de usinas certamente ultrapassa a casa dos milhares). Em Chernobyl houve o registro de menos de dez mortes por radiação, pelo menos em curto prazo. Em Three Miles Island nenhuma perda humana foi registrada<sup>10</sup>. Por isso, a energia nuclear torna-se mais uma opção para atender com eficácia à demanda energética no mundo moderno.

## ***9.Datação Por Carbono – 14<sup>7,14</sup>***

O isótopo radioativo  $^{14}\text{C}$  é formado na atmosfera superior, em reações nucleares provocadas por raios cósmicos. O comportamento químico dos átomos de carbono com núcleo de  $^{14}\text{C}$  é igual ao comportamento dos átomos ordinários<sup>7</sup>, com núcleo de  $^{12}\text{C}$ .

Esse isótopo radioativo do carbono combina -se com o oxigênio, formando o  $\text{CO}_2$ . Uma vez que os organismos vivos trocam continuamente  $\text{CO}_2$  com a atmosfera, a razão entre o  $^{14}\text{C}$  e o  $^{12}\text{C}$ , num organismo, é igual a razão do equilíbrio destes dois isótopos na atmosfera, que é de cerca<sup>8</sup> de  $1,3 \times 10^{-12}$ . Em caso de morte, o organismo não absorve mais  $^{14}\text{C}$  e a razão entre o  $^{14}\text{C}$  e o  $^{12}\text{C}$  cai continuamente em virtude da desintegração radioativa do  $^{14}\text{C}$ .

O  $^{14}\text{C}$ , cuja meia-vida é de 5.600 anos<sup>14</sup>, apresenta uma atividade de 15 desintegrações por minuto e por grama de carbono num organismo vivo. Medindo o número de desintegrações por minuto e por grama de carbono, em uma amostra de morta de osso ou madeira, por exemplo, podemos determinar a idade da amostra. Por exemplo, se a atividade medida for de 7,5 desintegrações por minuto e por grama, a idade da amostra seria de uma meia-vida, ou seja, 5600 anos<sup>13</sup>. Foi assim, por exemplo, que se determinou a idade dos Pergaminhos do Mar Morto<sup>14</sup>.

A datação, com carbono-14, mais polêmica foi a do Santo-Sudário. Os resultados indicaram uma idade correspondente à Idade Média, e não de 2000 anos atrás, época da morte de Cristo. Alguns defensores argumentaram que a datação foi dos fungos e produtos de contaminação do sudário e não das fibras do tecido de linho. Outros pesquisadores acreditam que foi um elemento elaborado na Idade Média, época em que era muito comum a fabricação e venda de lembranças de eventos importantes, inclusive para fins de manipulação religiosa e comercial.

## 10. Aplicações na Medicina<sup>8,9,11,12,13,14,15</sup>

Os *isótopos radioativos* ou *radioisótopos*, devido à propriedade de emitir radiações, têm vários usos. As radiações podem atravessar a matéria ou ser absorvidas por ela; isso possibilita múltiplas aplicações<sup>15</sup>.

Radioisótopos são utilizados tanto no diagnóstico, quanto no tratamento de algumas doenças. A radiação, por eles emitida, tanto para a observação do funcionamento de alguns órgãos do corpo humano, quanto para destruir células ou microorganismos nocivos.

### 10.1. Traçadores Radioativos

*Traçadores Radioativos* são radioisótopos que, usados em pequeníssimas quantidades, podem ser acompanhados por detectores de radiação<sup>14</sup>. O uso de traçadores se baseia no fato de que os diferentes materiais apresentam transparências\* diversas à passagem da radiação<sup>9</sup>.

As radiações emitidas pelos radioisótopos são percebidas onde estiverem, por instrumentos de medida apropriados, denominados *detectores de radiação*. Dessa forma, o deslocamento de um radioisótopo pode ser acompanhado e seu percurso ou caminho ser traçado num mapa do local<sup>14</sup>.

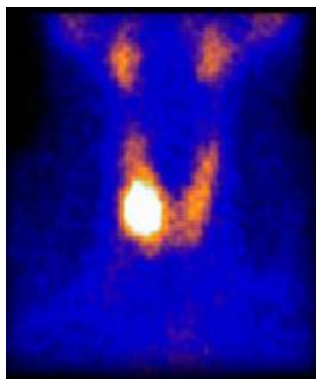


Figura 9.1- Exemplo de radiodiagnóstico da tireóide, utilizando-se o iodo-131. A região mais brilhante indica maior concentração do radioisótopo.[9.1]

Os traçadores são bastante utilizados, tanto na medicina, quanto no estudo de animais e plantas e até mesmo em estudos geológicos, onde possibilitam o acompanhamento da trajetória de águas subterrâneas<sup>8</sup>. É possível citar alguns exemplos.

Na medicina, os radioisótopos são usados para fazer diagnósticos.

Na radiografia de contraste o paciente ingere (ou recebe uma injeção de) um material radioativo, que irá fluir pelo aparelho digestivo ou circulatório. O radioisótopo emitirá radiação dentro do corpo do paciente e, com detectores de radiação apropriados, podemos acompanhar o seu caminho pelo organismo. Caso haja alguma obstrução no sistema digestivo ou circulatório do paciente, isso poderá ser indicado no monitor, do detector, pela descontinuidade do movimento<sup>9</sup>.

\* Se dois materiais diferentes forem atingidos pela mesma quantidade de radiação, possivelmente um absorverá mais radiação do que o outro, assim como um deixará passar mais radiação do que o outro, isto por que cada material interage de forma diferente com a radiação. Dessa forma, por exemplo, conhecendo a quantidade de radiação que um determinado material absorve, é possível determinar com que tipo de material estamos lidando.

Para diagnóstico de tireóide, por exemplo, o paciente ingere uma solução de iodo-131, o elemento iodo é absorvido pelo organismo humano preferencialmente pela glândula tireóide, onde se concentra. A maneira como a glândula absorve o iodo pode ser um indicativo de como ela está funcionando. É importante lembrar que, como já dissemos, o isótopo radioativo apresenta as mesmas características químicas dos isótopos não radioativos do elemento, assim o iodo radioativo será absorvido pela glândula da mesma que o iodo não radioativo. O iodo-131 emite partículas beta e radiação gama e tem meia-vida de oito dias. O funcionamento da tireóide depende de como o iodo é absorvido pela glândula. Quando passa um detector pela frente do pescoço do paciente, observa-se se o Iodo foi muito ou pouco absorvido e como se distribui na glândula<sup>14</sup>.

O detector é associado a um mecanismo que permite obter um desenho ou mapeamento, em preto e branco ou colorido, da tireóide. Um diagnóstico, no caso um radiodiagnóstico, é feito por comparação com um mapa padrão de uma tireóide normal. A mesma técnica é usada para mapeamento de fígado e de pulmão.

O iodo-131 também pode ser usado em terapia para eliminar lesões, identificadas nos radiodiagnósticos da tireóide, aplicando-se, no caso, uma dose maior do que a usada nos diagnósticos. O iodo radioativo apresenta as características ideais para aplicação em medicina, tanto em diagnóstico como em terapia<sup>14</sup>:

- Tem meia-vida curta;
- É absorvido preferencialmente por um órgão (a tireóide);
- É eliminado rapidamente do organismo;
- A energia da radiação gama é baixa.

A meia-vida curta garante que em pouco tempo grande parte do material radioativo decairá e os níveis de radiação emitidos não prejudicarão o organismo. O fato de ele ser absorvido preferencialmente pela tireóide possibilita um melhor estudo sobre ela, além de diminuir, juntamente com o fato do iodo ser rapidamente eliminado, a agressão aos outros órgãos.

O radioisótopo tecnécio-99 (Tc-99m), disponibilizado por meio de um gerador portátil, é usado para a composição de diversos radiofármacos, os quais são utilizados, seguindo o mesmo princípio do uso do iodo, para obtenção de mapeamentos (cintilografia) de diversos órgãos:

- cintilografia dos rins, do cérebro, do fígado, do pulmão e dos ossos;
- diagnóstico do infarto agudo do miocárdio, anomalias no coração, e em estudos de circulação sanguínea;
- cintilografia de placenta.

Nestes exames, a irradiação da pessoa é inevitável, mas deve-se cuidar para que ela seja a menor possível. A dose de radiação é proporcional à atividade administrada que deve ser a suficiente para ser bem detectada externamente, nunca excessiva. O paciente fica emitindo radiação enquanto a atividade administrada nele for significativa. Por isso devem ser usados radioisótopos de meia-vida curta e tempo de residência pequeno, de tal forma que ele seja eliminado pelo paciente rapidamente. Os enfermeiros e pessoas que se aproximam também ficam sujeitos à irradiação.

## 10.2. Radioterapia

Consiste em eliminar tumores malignos (cancerígenos) utilizando radiação gama, raios X ou feixes de elétrons. O princípio básico é eliminar as células cancerígenas e evitar sua proliferação, e estas serem substituídas por células saudáveis<sup>14</sup>.

A radioterapia teve origem na aplicação do elemento Rádio, pelo casal Curie, para destruir células cancerosas, e foi inicialmente conhecida como Curieterapia. Posteriormente, outros radioisótopos passaram a ser usados, apresentando um maior rendimento<sup>14</sup>.

O tratamento consiste na aplicação programada de doses elevadas de radiação, com a finalidade de “matar” as células alvo (células de tumores são mais sensíveis à radiação do que os tecidos normais<sup>14</sup>) e causar o menor dano possível aos tecidos saudáveis intermediários ou adjacentes. Como as doses aplicadas são muito altas, os pacientes sofrem danos orgânicos significativos e ficam muito debilitados. Por isso são cuidadosamente acompanhados por terapeutas e psicólogos, recebendo apoio quimioterápico e de medicação.

Deve ficar bem claro que um objeto ou o próprio corpo, quando irradiado (exposto à radiação) por uma fonte radioativa, não ficam radioativos<sup>13</sup>. Assim os pacientes irradiados podem ser manipulados e carregados normalmente.

Um dos aparelhos de radioterapia mais conhecidos é a *Bomba de Cobalto* (figura 9.2). Trata-se de uma fonte radioativa de cobalto-60 (Co-60), encapsulada, hermeticamente fechada, e blindada, para impedir a passagem de radiação. Até bem pouco tempo, para este fim, eram utilizadas fontes de céσιο-137, que foram substituídas pelas de cobalto-60, que, entre outras razões técnicas, apresentam maior rendimento terapêutico<sup>14</sup>.

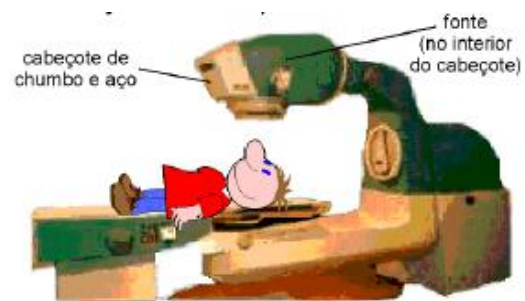


Figura 9.2- Bomba de Cobalto.[9.2]



O equipamento deve ser operado por técnicos bem treinados e em salas especiais, dotadas de dispositivos de segurança para paciente, operador e toda a instalação. Uma fonte destas, exposta ao ar livre pode causar exposições muito elevadas, no público, inclusive mortes. Entretanto, pela sua constituição e funcionamento, ela nunca pode “explodir” e tem baixa probabilidade de causar danos ambientais, uma vez que a fonte é constituída de pastilhas metálicas de Co-60, insolúveis e de alta resistência mecânica ao fracionamento.

### **10.2.1.O Acidente em Goiânia**

O acidente de Goiânia, ocorrido em setembro de 1987, envolveu uma contaminação radioativa, isto é, existência de material radioativo em lugares onde não deveria estar presente.

Uma fonte radioativa de césio-137 era usada em uma clínica da cidade de Goiânia, para tratamento de câncer<sup>9</sup>. Nesse tipo de fonte, o césio-137 fica encapsulado, na forma de um sal altamente solúvel de cloreto de césio<sup>8</sup>, semelhante ao sal de cozinha, e guardado em um recipiente de chumbo, usado como uma blindagem contra as radiações.

A clínica foi transferida para novas instalações, mas o material radioativo não foi retirado, contrariando a norma da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Toda firma que usa material radioativo, ao encerrar suas atividades em um local, deve solicitar o cancelamento da autorização para funcionamento, informando o destino a ser dado a esse material. A simples comunicação do encerramento das atividades não exime a empresa da responsabilidade e dos cuidados correspondentes, até o recebimento pela CNEN<sup>8</sup>.

Dois pessoas retiraram sem autorização o equipamento do local abandonado, que servia de abrigo e dormitório para mendigos. A blindagem foi destruída, deixando à mostra um pó azul brilhante, muito bonito, principalmente no escuro. E o pó brilhante foi distribuído para várias pessoas, inclusive crianças<sup>8</sup>.

O material que servia de blindagem foi vendido a um ferro velho. O material radioativo foi-se espalhando pela vizinhança e várias pessoas foram contaminadas. A CNEN foi chamada a intervir e iniciou um processo de descontaminação de ruas, casas, utensílios e pessoas<sup>9</sup>.

O acidente radioativo de Goiânia resultou na morte de quatro pessoas, dentre as 249 contaminadas. As demais vítimas foram descontaminadas e continuaram em observação, não tendo sido registrados, até o momento, efeitos tardios provenientes do acidente<sup>8</sup>.

Móveis e objetos pessoais, casas (pisos e paredes) e até parte da rua foram contaminados com céσιο-137. No caso das pessoas, procedeu-se a um processo de descontaminação, interna e externamente, o que foi feito com sucesso com exceção das quatro vítimas fatais imediatas.

Quanto aos objetos (móveis, eletrodomésticos etc.), foram tomadas providências drásticas, em razão da expectativa altamente negativa e dos temores da população. Móveis e utensílios domésticos foram considerados rejeitos radioativos e como tal foram tratados. Casas foram demolidas e seus pisos, depois de removidos, passaram também a ser rejeitos radioativos. Parte da pavimentação das ruas foi retirada. Estes rejeitos radioativos sólidos foram temporariamente armazenados em embalagens apropriadas, enquanto se aguardava a construção de um depósito adequado<sup>8</sup>.

A CNEN estabeleceu, em 1993, uma série de procedimentos para a construção de dois depósitos com a finalidade de abrigar, de forma segura e definitiva, os rejeitos radioativos decorrentes do acidente de Goiânia. O primeiro, denominado Contêiner de Grande Porte (CGP), foi construído em 1995, dentro dos padrões internacionais de segurança, para os rejeitos menos ativos. O segundo depósito, visando os rejeitos de mais alta atividade, concluído em 1997, deverá ser mantido sob controle institucional da CNEN por 50 anos, coberto por um programa de monitoração ambiental, de forma a assegurar que não haja impacto radiológico no presente e no futuro<sup>8</sup>.

### **10.2.2. Baquiterapia**

É uma radioterapia localizada para tipos específicos de tumores e em locais específicos do corpo humano. As fontes são colocadas próximas aos tumores, por meio de aplicadores, durante cada sessão de tratamento. Sua vantagem é afetar mais fortemente o tumor, devido à proximidade da fonte radioativa, e danificar menos tecidos e órgãos próximos<sup>14</sup>.

## 11. Aplicações na Agricultura e Pesquisa Biológica<sup>8,13</sup>

### 11.10 Uso de Traçadores

Os traçadores também são usados em estudos do meio ambiente. Muitas pesquisas biológicas são desenvolvidas utilizando radioisótopos.

É possível utilizá-los para acompanhar o metabolismo das plantas, verificando o que elas precisam para crescer, o que é absorvido pelas raízes e folhas, e onde um determinado elemento químico fica retido<sup>14</sup>.

Fertilizantes marcados com fósforo-32 radioativo, por exemplo, podem indicar a velocidade de captação dos nutrientes do solo pelas plantas e avaliar o desempenho de cada tipo.

Uma planta que absorveu um traçador radioativo pode, também, ser radiografada, permitindo localizar o radioisótopo. Para isso, basta colocar um filme, semelhante ao usado em radiografias e abreugrafias, sobre a região da planta durante alguns dias e revelá-lo. Obtém-se o que se chama de *auto-radiografia* da planta<sup>14</sup>.

O impacto ambiental, provocado pelo uso de agrotóxico, também pode ser avaliado, se ele estiver marcado com um elemento radioativo. Pode-se determinar se ele fica retido nos alimentos ou quanto vai para o solo, para a água e para a atmosfera<sup>14</sup>.

A técnica do uso de traçadores radioativos também possibilita o estudo do comportamento de insetos, como abelhas, formigas e cupins. Ao ingerirem radioisótopos, os insetos ficam marcados, porque passam a emitir radiação, e seu raio de ação pode ser acompanhado. No caso de formigas e cupins, descobre-se onde fica o formigueiro e o local do ninho, respectivamente, no caso de abelhas, até as flores de sua preferência<sup>9,14</sup>.

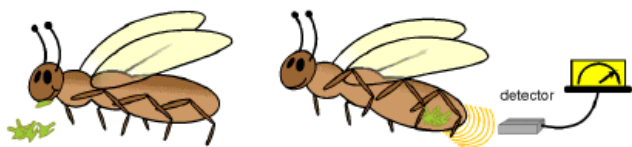


Figura 10.2- O uso de traçadores possibilita o rastreamento de insetos e a conseqüente determinação do local do ninho.[10.2]

inseticidas tóxicos.

Quando um predador se alimenta de um inseto, que ingeriu um radioisótopo, ele também passa a emitir radiação. Dessa forma, podemos identificar, qual predador se alimenta do inseto que desejamos eliminar<sup>14</sup>.

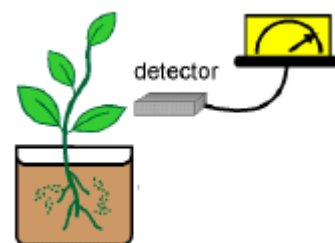


Figura 10.1- A planta absorve um radioisótopo e passa a ser monitorada.[10.1]

No caso de insetos, muitas vezes o que se deseja é encontrar uma forma eficaz de eliminá-los, sem a necessidade do uso de

Em geologia, os traçadores podem ser usados para acompanhar as trajetórias de águas subterrâneas, bastando para isso que se injete um pouco de material radioativo na água, que passa a ser seguida com o uso de um monitor de radiação<sup>9</sup>.

### 11.2. Irradiação de Alimentos

A irradiação de alimentos é uma técnica eficiente para eliminar ou reduzir microorganismos, parasitas e pragas, sem causar qualquer prejuízo ao alimento ou ao consumidor. Um processo que retarda o apodrecimento, reduz o grande volume de perdas de produção, as transmissões que

afetam a saúde da população e atende às rígidas normas de exportação<sup>14</sup>.



Figura 10.3- a irradiação diminui as perdas na produção de alimentos.[10.3]

## 12. Aplicações na Indústria<sup>14</sup>

### 12.1 Gamagrafia

O controle de qualidade de textura e soldas de tubulações, chapas metálicas e peças fundidas é realizado com frequência com o uso de radiografia obtidas com raios X de alta energia ou radiação gama de média e alta energia<sup>14</sup>.

Para a obtenção de radiografias em frentes móveis, como por exemplo, o controle das soldas

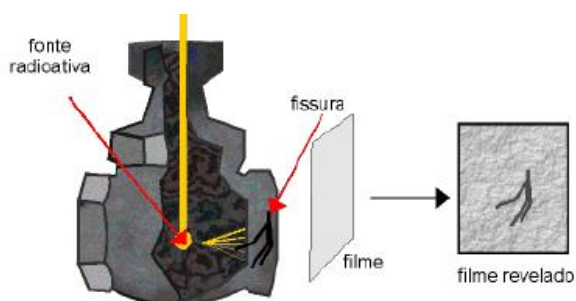


Figura 11.1- Exemplo da utilização da gamagrafia no controle de qualidade da produção de válvulas.[11.1]

de oleodutos, gasodutos, tubulações de grande extensão, que estão em implementação no campo, utilizam-se fontes de radiação gama, como o irídio-192, céσιο-137 e cobalto-60. Estas radiografias são denominadas de *gamagrafias*<sup>15</sup>. Os fabricantes de válvulas usam a gamagrafia, na área de controle da qualidade, para verificar se há defeitos ou rachaduras no corpo das peças (figura 11.1). As

empresas de aviação fazem inspeções freqüentes nos aviões, para verificar se há fadiga nas partes metálicas e soldas essenciais sujeitas a maior esforço (por exemplo, nas asas e nas turbinas) usando a gamagrafia.

### 12.2. Medidores de Níveis

Para se ter indicação de nível de um líquido em um tanque, coloca-se uma fonte radioativa em um dos lados e, no lado oposto, um detector ligado a um dispositivo de indicação ou de medição. Quando o líquido alcança a altura da fonte, a maior parte da radiação emitida é absorvida por ele e deixa de chegar ao detector, indicando que o líquido atingiu o nível. Para indicar um nível mínimo

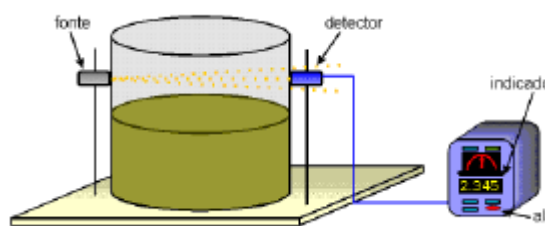


Figura 11.3- Medidor de nível.[11.3]

de líquido desejado, a fonte e o detector (figura 11.3) são colocados na posição adequada e, quando o líquido atingir esse ponto, deixará de absorver a radiação, que chegará ao detector com maior intensidade. Em geral, acrescenta-se um sistema de alarme para soar ao ser atingido esse nível<sup>14</sup>.

Um bom exemplo da aplicação desta técnica vem dos fabricantes de bebidas. Para realizar o controle do nível correto de uma bebida embalada numa lata de alumínio, por exemplo, utiliza-se

uma fonte radioativa de baixa atividade (100 mCi) e um detector. As latinhas, enfileiradas numa correia transportadora de alta velocidade, interceptam o feixe de radiação que sai da fonte e é registrado no detector. Se o líquido estiver acima do nível estabelecido, o feixe será atenuado bastante em comparação com a presença só de gás, quando um pouco vazia. Quando não preencher o requisito, uma pequena alavanca retira a lata do roteiro de empacotamento. O mesmo princípio de variação brusca da atenuação do feixe de radiação que atravessa as paredes do invólucro e do material de preenchimento é utilizado, para controle de níveis de silos de grande porte para grãos, refinarias, usinas de processamento de coque e materiais para altofornos<sup>14</sup>.

Alguns dispositivos possuem uma fonte que emite a radiação em direção ao material sob controle e colhem, num detector, a radiação espalhada ou induzida por fluorescência. Com isto, se pode avaliar o teor de umidade de um material ou a sua densidade. Nestes medidores, a fonte e os detectores estão montados num único equipamento portátil e devidamente blindado. São utilizados, por exemplo, na avaliação do nível de compactação durante o processo de concretagem de barragens em construção<sup>14</sup>.

### **12.3 Esterilização**

É aplicada em larga escala, em materiais e alimentos que necessitam de esterilização biológica, modificação de algumas de suas propriedades físico-químicas ou impedimento de brotação ou apodrecimento<sup>15</sup>.

A indústria farmacêutica utiliza fontes radioativas de grande porte para esterilizar seringas, luvas cirúrgicas, gaze e material farmacêutico descartável, em geral. Seria praticamente impossível esterilizar, pelos métodos convencionais, que necessitam de altas temperaturas, tais materiais, que se deformariam ou se danificariam de tal forma que não poderiam ser mais utilizados<sup>15</sup>.

O processo de esterilização é constituído da aplicação de doses elevadas de radiação nas caixas e containeres, cheios dos materiais, que passam durante um intervalo de tempo defronte ao feixe movidos por uma esteira transportadora. As caixas são irradiadas de um lado e do outro para garantir a homogeneidade das doses aplicadas<sup>15</sup>.

A fonte é constituída de várias varetas de aço inox, dispostas num arranjo semelhante ao de um secador de roupa de apartamento, contendo pastilhas empilhadas de Co-60 metálico, em seu interior. Quando recolhida, fica no fundo de uma piscina cheio de água, que funciona como blindagem retendo a radiação e preservando os operadores no processo de manutenção e ajustes. Durante a irradiação, a fonte é elevada até o nível de percurso das caixas em movimento contínuo na esteira.

Todo o sistema é controlado de fora, uma vez que tudo deve ser extremamente blindado devido a altíssima atividade da fonte<sup>15</sup>.

Uma pessoa exposta por um segundo, num feixe deste tipo, morreria em poucos segundos. Com tudo isto, trata-se de uma instalação bastante segura, com poucos acidentes ocorridos no mundo<sup>15</sup>.

Estes irradiadores podem que, dependendo da dose radiação aplicada, inibem a brotação em tubérculos (batata), bulbos (cebola e alho); destruir tênia, trichinella em carnes; matar e esterilizar insetos em cereais, farinha, frutos frescos e secos; esterilizar larvas e reduzir a população de fungos em frutos e vegetais; destruir salmonella em carnes, frango, ovos; reduzir a população de micróbios em ingredientes e especiarias e preservar alimentos perecíveis, por longo período, sem refrigeração<sup>15</sup>.

### ***13. Conclusão***

O trabalho apresentado destina-se a estudantes do ensino médio, que têm pouco ou quase nenhum contato com a física moderna. Sendo assim, procuramos construir um texto com uma linguagem fácil, tentando tratar os temas da maneira simples e, sempre que possível, fazendo analogias entre a física nuclear, muitas vezes abstrata, já estamos falando de coisas que não podemos ver ou tocar, e situações cotidianas.

Destacamos duas delas que achamos particularmente interessantes. Primeiro, aquela feita entre o decaimento radioativo e o estouro das pipocas (seção 4.1) e depois a outra feita entre a interação da radiação com a matéria e as bolinhas de gude (seção 4.6).

Nosso esforço foi no sentido de ter uma visão mais qualitativa, priorizando os conceitos físicos, já que a matemática envolvida foge do alcance dos estudantes do ensino médio. Apesar disso em algumas seções apresentamos algumas equações, como na seção 4.1 onde a lei do decaimento radioativo é expressa.

Procuramos utilizar as figuras de maneira complementar ao texto, como na seção 8.1, onde apresentamos uma figura que permite ao leitor uma melhor compreensão do que se tivéssemos descrito detalhadamente um reator nuclear.

Apresentamos alguns tópicos de física nuclear, sem nos aprofundarmos em virtude da complexidade de muitos temas, que vão além da compreensão exigida de um aluno do ensino médio, de forma a dar ao leitor uma visão geral do núcleo atômico e suas propriedades e de que formas (aplicações) elas são aproveitadas.

Embora hajam outras aplicações além das citadas no texto, procuramos destacar às que acreditamos estarem mais relacionadas ao cotidiano do aluno, como a energia elétrica, por todos consumida, a radioterapia, o uso de traçadores e a baquiterapia. Outra preocupação nossa foi a de diversificá-las, apresentando aplicações na indústria bélica e na geração de energia, na datação de objetos antigos, na agricultura e pesquisa biológica, na medicina e na indústria de um modo geral.

Finalmente, esperamos estimular outros professores de física a escreverem textos de física moderna voltados para o ensino médio, contribuindo para que o ensino de física moderna passe a ser uma realidade. Além disso, acreditamos que o nosso trabalho possa auxiliar aqueles que, já trabalhando com o ensino de física, necessitem melhorar seus conhecimentos em relação à física nuclear.



## *Referências*

1. MEC, Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio.
2. G. Gamow: *Biografia da Física*, Harper & Brothers Publishers, Nova York, 1962.
3. I. Kaplan: *Física Nuclear*, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1962.
4. C.A Ronan: *História Ilustrada da Ciência Volume IV: A Ciência Nos Séculos XIX e XX*, 1984.
5. *Einstein, a Revolução da Física* – Série Culturas, História & Mitos nº 4, Editora Escala (www.escala.com.br, São Paulo, SP).
6. K.C. Chung: *Introdução À Física Nuclear*, EdUERJ, Rio de Janeiro, 2001.
7. P. A. Tipler: *Física Para Cientistas e Engenheiros: Volume 4, Ótica e Física Moderna*, LTC Editora, 1982.
8. E.M. Cardoso: *Radioatividade*, Apostila Educativa, <http://www.cnen.gov.br>, Comissão Nacional de Energia Nuclear
9. O. D. Gonçalves: *Radiação: Princípios Básicos, Aplicações e Riscos*, Cadernos Didáticos, UFRJ, 1994
10. Y. Nouailhetas: *Radiações Ionizantes e a Vida*, Apostila Educativa, <http://www.cnen.gov.br>, Comissão Nacional de Energia Nuclear.
11. F. S. Barros: *As Bombas Atômicas e o Brasil*, Cadernos Didáticos, UFRJ, 2002.
12. E. Hobsbawm: *Era Dos Extremos: O Breve Século XX, 1914 – 1991*, Companhia Das Letras, São Paulo, 1995.
13. E.M. Cardoso: *Energia Nuclear*, Apostila Educativa, <http://www.cnen.gov.br>, Comissão Nacional de Energia Nuclear.
14. E.M. Cardoso: *Aplicações da Energia Nuclear*, Apostila Educativa, <http://www.cnen.gov.br>, Comissão Nacional de Energia Nuclear.
15. E.M. Cardoso: *Radiações ionizantes: Aplicações e Cuidados*, Apostila Educativa, <http://www.cnen.gov.br>, Comissão Nacional de Energia Nuclear.

## Créditos das Figuras

- [2.1]- <http://canario.iqm.unicamp.br/CURSOS/Curso6-23RASBQ/node5.html>
- [2.2]- <http://www.sobiografias.hpg.ig.com.br/ErneRuth.htm>
- [2.3]- <http://www.if.ufrgs.br/historia/rutherford.html>
- [2.4]- <http://www.if.ufrgs.br/historia/rutherford.html>
- [2.5]- <http://www.comciencia.br/reportagens/modelagem/mod14.htm>
- [2.6]- <http://www.coltec.ufmg.br/coltec/ensino/fisica/fisicos/bohr.htm>
- [3.1]- <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/PictDisplay/Einstein.html>
- [3.4]- <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node12.htm>
- [3.5]- <http://www2.uol.com.br/cienciahoje/perfis/lattes/lattes4.htm>
- [3.6]- <http://geocities.yahoo.com.br/paradoxosdafisica/mecanicaquantica.htm>
- [4.1] - <http://www.fisica.ufc.br/donafifi/curiemeitner/curiemeitner2.htm>
- [4.3] - E.M. Cardoso: Energia Nuclear, Apostila Educativa
- [4.4] - Y. Nouailhetas: Radiações Ionizantes e a Vida, Apostila Educativa
- [5.1]- [http://www.feiradeciencias.com.br/sala23/23\\_MA06.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala23/23_MA06.asp)
- [6.1]- <http://www.fisica.ufc.br/donafifi/curiemeitner/curiemeitner7.htm>
- [6.2] - [http://www.feiradeciencias.com.br/sala23/23\\_MA06.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala23/23_MA06.asp)
- [6.3] - <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>
- [7.1] - <http://www.fissaonuclear.hpg.ig.com.br/>
- [7.2]- <http://planeta.terra.com.br/arte/mundoantigo/guerrafria/3.htm>
- [7.3] - <http://planeta.terra.com.br/arte/mundoantigo/guerrafria/3.htm>
- [8.1] - E.M. Cardoso: Energia Nuclear, Apostila Educativa
- [8.2] - E.M. Cardoso: Energia Nuclear, Apostila Educativa
- [8.3] - [http://www.greenpeace.org.br/nuclear/nuclear.php?conteudo\\_id=624&sub\\_campanha=0&img=15](http://www.greenpeace.org.br/nuclear/nuclear.php?conteudo_id=624&sub_campanha=0&img=15)
- [9.1] - E.M. Cardoso: Aplicações da Energia Nuclear, Apostila Educativa
- [9.2] - E.M. Cardoso: Aplicações da Energia Nuclear, Apostila Educativa
- [10.1] - E.M. Cardoso: Aplicações da Energia Nuclear, Apostila Educativa
- [10.2] - E.M. Cardoso: Aplicações da Energia Nuclear, Apostila Educativa
- [10.3] - E.M. Cardoso: Aplicações da Energia Nuclear, Apostila Educativa
- [11.1] - E.M. Cardoso: Aplicações da Energia Nuclear, Apostila Educativa

[11.2] - E.M. Cardoso: Aplicações da Energia Nuclear, Apostila Educativa

[11.3] - E.M. Cardoso: Aplicações da Energia Nuclear, Apostila Educativa