

CBPF - CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS
Rio de Janeiro

Ciência e Sociedade

CBPF-CS-010/19

abril 2019

**80 anos da fissão nuclear: a mais abundante fonte de energia
disponível para a humanidade**

Odilon A. P. Tavares

80 anos da fissão nuclear: a mais abundante fonte de energia disponível para a humanidade

Conteúdo

Resumo e Abstract	19
Prólogo	19
Partindo o núcleo atômico	20
Antecedentes à descoberta da fissão nuclear	20
Descobrimos a fissão nuclear	21
A reação de fissão nuclear em cadeia	22
O modelo da gota para a fissão nuclear	22
O núcleo atômico parte-se espontaneamente	23
A Segunda Guerra Mundial avança implacável	23
O Projeto Manhattan	24
Como o núcleo atômico se parte	25
Fragmentos, produtos e a energia da fissão nuclear	26
O bom uso da fissão nuclear	27
Geração de nucleoeletricidade	27
Aplicações na medicina	28
Outras aplicações decorrentes da fissão nuclear	28
O Brasil na era nuclear	29
Epílogo	31
Agradecimentos	32
Sobre o autor	32
Referências citadas	32

80 anos da fissão nuclear: a mais abundante fonte de energia disponível para a humanidade

80 years of nuclear fission: the most abundant source of energy available to humanity

Odilon A. P. Tavares*

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF/MCTIC,

Rua Dr. Xavier Sigaud 150,

Rio de Janeiro, RJ – 22290-180, Brasil

Submetido: 31/03/2019

Aceito: 18/04/2019

Resumo: Raramente uma descoberta científica trouxe consequências tão profundas para a história das nações e o bem-estar das pessoas quanto a da fissão do núcleo atômico. O ano de 2019 celebra o octogésimo aniversário das investigações que conduziram ao conhecimento da existência do fenômeno da fissão nuclear, segundo o qual núcleos atômicos de elementos pesados na natureza (urânio e tório), quando bombardeados com nêutrons, podem se quebrar em dois fragmentos de tamanhos e massas comparáveis com liberação de uma gigantesca quantidade de energia jamais observada.

O presente artigo relembra, ainda que de forma breve, como foi caracterizado o fenômeno, os personagens envolvidos na descoberta e suas consequências, os efeitos sobre o andamento e término da 2ª guerra mundial, e as inúmeras aplicações para o bem no campo da saúde e na geração de energia elétrica que tanto têm trazido desenvolvimento humano com conforto e bem estar a boa parte das populações.

Palavras chave: descoberta da fissão nuclear; Segunda Guerra Mundial; energia nuclear; produtos de fissão; aplicações na medicina e indústria.

Abstract: Rarely a scientific discovery has had such profound consequences for the history of the nations and the well-being of people as the fission of the atomic nucleus. The year of 2019 celebrates the 80th anniversary of the investigations that led to the knowledge of the phenomenon of nuclear fission, according to which atomic nuclei of heavy elements in nature (uranium and thorium), when bombarded with neutrons, can break into two fragments of comparable sizes and masses with the release of a giant amount of energy never seen before.

Although briefly, the present article recalls how the phenomenon was characterized, the personages involved in the discovery and its consequences, the effects on continuation and ending of the Second World War, and the innumerable applications for good in the field of health and generation of electric energy that have brought so much human development with comfort and well-being to a significant part of the populations.

Keywords: discovery of nuclear fission; Second World War; nuclear energy; fission products; applications to medicine and industry.

Prólogo

O corrente ano de 2019 traz à lembrança uma série de descobertas relacionadas à física nuclear, e que estão separadas exatamente pelo intervalo de uma década. Recorde-

mos que em 2019 completam-se: *i)* os 120 anos do estabelecimento, por via experimental, da lei da desintegração radioativa pelos físicos alemães Julius Elster (1854–1920) e Hans Geitel (1855–1923) [1]; *ii)* os 110 anos da identificação das partículas alfa pelo físico neozelandês *sir* Ernest Rutherford (1871–1937) [2]; *iii)* os 100 anos da descoberta do próton, também por *sir* Ernest Rutherford [3] *iv)* os 90 anos da invenção do ciclotron pelo físico norte-americano Ernest O. Lawrence (1901–1958) [4]; *v)* os 80 anos da

*Electronic address: oaptavares@cbpf.br

descoberta e caracterização do fenômeno da fissão nuclear pelos químicos alemães Otto Hahn (1879–1978) e Fritz Strassmann (1902–1980) [5–7], pela física austríaca Lise Meitner (1878–1968) [8–9] e pelo físico austríaco Otto Frisch (1904–1979); e vi) os 70 anos do modelo da estrutura nuclear em camadas e os “números mágicos” de prótons e nêutrons pela física alemã-norte-americana Maria G. Mayer (1906–1972) [10] e, de forma independente, pelo grupo formado pelos físicos alemães J. Hans D. Jensen (1907–1998) e Otto Haxel (1907–1973) e o físico austríaco-norte-americano Hans E. Suess (1909–1993) [11,12] — esse último feito vindo a coincidir com os 70 anos da fundação do CBPF no Rio de Janeiro.

Dentre todos esses acontecimentos marcantes da ciência nuclear, sem dúvida o fenômeno da fissão do núcleo atômico se destaca pelo impacto de suas inúmeras aplicações, proporcionando a cerca de dois bilhões de pessoas mundo afora conforto, saúde e bem estar todos os dias. Mas, afinal, o que vem a ser a fissão nuclear e como se chegou à sua descoberta? Por que ela é de importância singular? Que benefícios a fissão nuclear tem proporcionado às populações?

Celebrando os 80 anos da descoberta da fissão nuclear, o autor preparou o presente artigo como contribuição à divulgação de assunto de grande relevância científica, aproveitando a esperada e habitual presença de número expressivo de jovens estudantes e professores na XII Escola do CBPF em julho do presente ano, evento que se insere nas comemorações dos 70 anos de fundação do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas-CBPF, marco do desenvolvimento das ciências físicas no Rio de Janeiro e no Brasil.

Partindo o núcleo atômico

A palavra fissão tem o significado de ruptura, quebra, cisão, partição, divisão; nuclear, aqui, diz respeito ao núcleo (ou parte central) do átomo. Fissão nuclear, por conseguinte, é o nome atribuído ao fenômeno físico segundo o qual o núcleo atômico se parte em fragmentos (em geral dois) de tamanhos comparáveis (Fig. 1). A fissão ocorre mais facilmente quando núcleos atômicos de maior massa (como tório e urânio) são atingidos por nêutrons, e bem mais

raramente de forma espontânea. Em ambos os casos uma gigantesca quantidade de energia é disponibilizada por evento de fissão. Em termos energéticos, a fissão nuclear de 20 g de urânio (que ocupa aproximadamente o volume de um cubo de 1 cm de aresta) equivale à combustão de 40 mil litros de óleo diesel.

Antecedentes à descoberta da fissão nuclear

As investigações científicas que precederam à descoberta da fissão nuclear tiveram lugar na Europa na primeira metade da década de 1930. Logo após a descoberta do nêutron (o “próton neutro”, isto é, sem carga elétrica positiva, no dizer de *sir* Ernest Rutherford) pelo físico inglês James Chadwick (1891–1974) em fevereiro de 1932 [13], o físico italiano Ettore Majorana (1905–1938) concluiu imediatamente, em março seguinte, que os núcleos atômicos são constituídos por prótons e nêutrons.

Outro notável físico italiano, Enrico Fermi (1901–1954), e sua equipe começaram nos primeiros meses de 1934 a produzir novas espécies nucleares bombardeando com nêutrons vários elementos ao longo da Tabela Periódica [14]. Em maio daquele ano, quando usaram urânio como elemento alvo, eles concluíram (equivocadamente) que haviam produzido novos elementos, acima do urânio, o de número atômico 92, último elemento que pode ser encontrado na natureza [15].

Em setembro do mesmo ano, em Berlim, a química alemã Ida Noddack (1896–1978) contestou a conclusão de Fermi sobre a produção de “transurânicos”, e chegou a mencionar pela primeira vez ser concebível a núcleos de urânio quando bombardeados por nêutrons dividirem-se em fragmentos de massa intermediária [16]. O físico húngaro Leó Szilárd (1898–1964) deu crédito a Ida Noddack, desse modo contestando também a interpretação de Fermi em ter produzido elementos transurânicos.

Por outro lado, na América do Norte, o físico canadense-norte-americano Arthur J. Dempster (1886–1970), trabalhando na Universidade de Chicago, havia aperfeiçoado nos anos 1920 o instrumento por ele criado, conhecido como espectrômetro de massa, de grande precisão, com o qual obteve a composição isotópica de um grande número de elementos [17]. O espectro de massa era resultante das variações de massa dos diferentes núcleos de um mesmo elemento (isótopos), justamente por eles possuírem diferentes números de nêutrons.

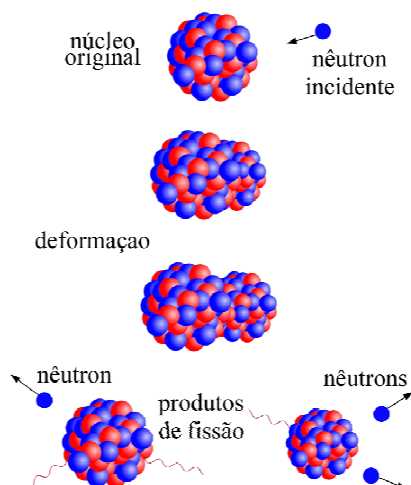


Fig. 1. Bipartição de um núcleo pesado (urânio ou tório) por incidência de um nêutron.

Núcleo Atômico

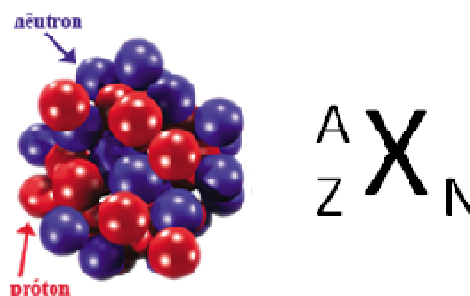


Tabela 1. Composição isotópica do urânio natural.

Nº Atômico Z	Nº de Massa A	Nº de Nêutrons N	% de átomos	
			Nier, 1938 [19]	Valor atual
92	234	142	0,0058	0,0054
92	235	143	0,71	0,7204
92	238	146	99,28	99,27

Paralelamente às pesquisas que se faziam na Europa, Dempster obteve pela primeira vez, em 1935, a composição isotópica do elemento urânio, descobrindo o isótopo de número de massa 235 (o conhecido ²³⁵U), o qual comparecia no urânio natural na proporção de apenas 0,4% de átomos, predominando o isótopo ²³⁸U com a fração 99,6% [18]. Três anos depois, medidas de qualidade ainda melhor feitas pelo físico norte-americano Alfred O. C. Nier (1911–1994) indicaram a proporção de 0,71% para ²³⁵U e 99,28% para ²³⁸U [19] (Tabela 1). Em meados de 1939 ficaria compreendido que a fissão do urânio bombardeado com nêutrons era o resultado da absorção de nêutrons lentos pelo isótopo ²³⁵U.

Descobrimdo a fissão nuclear

No final dos anos 1930, grupos de físicos e químicos na Europa haviam se debruçado sobre a importante e desafiadora conclusão a respeito dos transurânicos colocada por Fermi e contestada por Ida Noddack e Leò Szilárd. Pelo menos três desses grupos se destacaram em desvendar o mistério: o próprio Fermi e sua equipe em Roma, o casal de químicos franceses Frédéric Joliot (1900–1958) e Irène Curie (1897–1956) em Paris, e a física austríaca Lise Meitner (1878–1968), que à época trabalhava em conjunto com os químicos alemães Otto Hahn (1879–1968) e Fritz Strassmann (1902–1980) no Instituto de Química Kaiser Wilhelm em Berlim-Dahlem. O radicalismo do regime nazista implantado pelo líder político austríaco-alemão Adolf Hitler (1889–1945) fez com que Fermi, que era casado com uma judia italiana, Laura Fermi (1907–1977), abandonasse a Itália e, em dezembro de 1938, passou pela Suécia e emigrou com a família para os EUA [20]. O mesmo aconteceu com Lise Meitner (também judia), que em julho do mesmo ano refugiou-se na Suécia. Até então ela trabalhara com Hahn e Strassmann nas investigações das reações de transformação de urânio quando bombardeado com nêutrons [21].

Ao final de 1938, Hahn and Strassman estavam com receio de publicar os resultados dos seus experimentos, os quais mostravam a presença de isótopos de bário como produtos do bombardeamento de urânio com nêutrons. Como não pudessem explicar essa novidade, Hahn comunicou esse resultado intrigante a Meitner, dizendo que ele estava certo quanto ao método radioquímico utilizado, porém não quanto à física envolvida. Meitner encorajou-o dizendo que não havia razão para que aquele resultado fosse impossível.

Durante as férias de Natal de 1938, Meitner e seu sobrinho, Otto Frisch, discutiram sobre esses resultados sur-

preendentes, levando-os à ideia de tratar-se da divisão do núcleo de urânio em dois fragmentos de números atômicos intermediários, dando a esse novo fenômeno físico o nome fissão [8]. Segundo esse processo nuclear, se bário (número atômico 56) era um dos produtos, o complemento deveria ser criptônio (número atômico 36), pois a soma desses números (92) é justamente o número atômico do urânio [22]. Logo depois, Hahn e Strassman confirmaram experimentalmente a presença de criptônio em seus experimentos [7].

Coube aos químicos alemães Otto Hahn e Fritz Strassmann comunicarem, em 22 de dezembro de 1938 (vindo a ser publicado em 06 de janeiro do ano seguinte), a prova insuspeitável da presença de isótopos de bário e lantânio (posteriormente de estrôncio e ítrio) como resultado do bombardeamento de urânio por nêutrons. Era a evidência química de que urânio (e foi visto que tório também), quando bombardeado por nêutrons, produzia elementos identificáveis com números atômicos intermediários (38, 39, 56, 57, e outros) na Tabela Periódica, isto é, cerca de 40% e 60% do número atômico do urânio (92) e tório (90). Eram as primeiras evidências químicas para o novo fenômeno nuclear [5–7].



Químico Alemão
Otto Hahn
(1879 – 1968)



Químico Alemão
Fritz Strassmann
(1902 – 1980)

Lise Meitner, então com 60 anos, foi a personagem central dessa descoberta: ela sugeriu o modelo nuclear da gota para explicar a fissão, e forneceu a correta estimativa de ~ 200 MeV (duzentos milhões de elétron-volt = 3,2×10⁻¹¹ Joule) para a energia liberada no processo em um único núcleo de urânio [8]. Otto Frisch, logo em janeiro de 1939, previu a distribuição de carga, massa e energia cinética dos fragmentos de fissão, e forneceu a evidência física para o novo fenômeno mediante a detecção de uma ionização elevada provocada pelos fragmentos de fissão [9].



Física austríaca
Lise Meitner
(1878 – 1968)



Físico austríaco
Otto Frisch
(1904 – 1979)

A reação de fissão nuclear em cadeia

No período março-abril de 1939, Fermi e Szilárd nos EUA, a equipe Joliot-Curie em Paris, e outros grupos de pesquisa, concluíram de seus experimentos que havia emissão de 2 a 3 nêutrons por evento de fissão [23, 24]. Nessas circunstâncias, e o que é extraordinário, os cientistas concluíram que os nêutrons de fissão poderiam provocar, num período de tempo curtíssimo, novas fissões em átomos vizinhos numa massa de urânio, de tal forma que uma reação em cadeia poderia ter lugar com liberação de uma quantidade gigantesca de energia (Fig. 2).

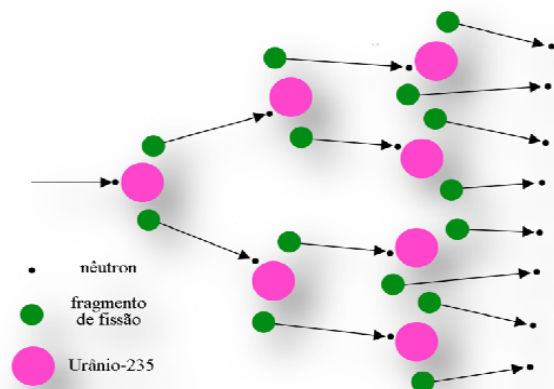


Fig. 2. Esquema das reações de fissão nuclear em cadeia.

Quando não controlada, poder-se-ia ter uma grande explosão, como uma bomba de alto poder de destruição. Porém, quando a reação em cadeia fosse controlada de forma adequada, poder-se-ia produzir energia útil para consumo (como nas usinas nucleares de produção de eletricidade que podem ser vistas hoje em dia).

De fato, e surpreendentemente, a descrição detalhada de uma reação de fissão em cadeia fora divulgada pelo físico alemão Siegfried Flügge (1912–1997) em julho de 1939 [25], criando a suspeita e o temor, nos cientistas refugiados e nos que se sentiam ameaçados, de que os alemães pudessem fabricar um artefato baseado na fissão de núcleos de urânio.

Ainda em julho, os cientistas estabelecidos nos EUA e liderados por Leò Szilárd redigiram uma carta a ser endereçada ao Presidente norte-americano Franklin D. Roosevelt (1882–1945), alertando-o e pedindo providências e apoio do governo norte-americano para combater o inimigo, pois os cientistas na Inglaterra e nos EUA tinham receio de que os alemães pudessem fabricar uma arma de alto poder destrutivo. A carta foi assinada pelo notável físico de origem alemã Albert Einstein (1879–1955) em 02 de agosto, após o que Einstein disse: “...pela primeira vez na história o homem usará energia que não aquela proveniente do Sol”. Um mês depois, em 1º de setembro, Hitler invade a Polônia dando início à Segunda Guerra Mundial [26].



**Físico alemão
Albert Einstein
(1879-1955)**

O modelo da gota para a fissão nuclear

A primeira interpretação dada e os fundamentos teóricos para explicar o novo fenômeno foram apresentados de forma independente pelo físico dinamarquês Niels Bohr (1885–1962), em fevereiro de 1939 [27], e pelo físico soviético Yakov I. Frenkel (1894–1952) no mês seguinte [28], ambos com base no modelo nuclear da gota como havia sido sugerido por Lise Meitner em janeiro daquele ano [8]. Finalmente, em junho de 1939, Niels Bohr, em parceria com o físico norte-americano John Wheeler (1911–2008), encaminharam para divulgação pelo prestigioso periódico *Physical Review* o famoso artigo contendo a explicação detalhada do mecanismo da fissão nuclear, ocasião em que ficou claro que a fissão do urânio era decorrente da absorção de nêutrons lentos pelo isótopo ^{235}U [29].



**Físico dinamarquês
Niels Bohr
(1885 – 1962)**



**Físico soviético
Yakov Frenkel
(1894 – 1952)**

Basicamente, o modelo da gota para o núcleo atômico considera a energia total do núcleo como sendo devida à energia de superfície (tensão superficial da gota) e à energia de repulsão eletrostática (repulsão coulombiana entre as cargas elétricas positivas dos prótons). A mútua repulsão entre os prótons tende a deformar o núcleo em direção a rompê-lo, enquanto que a tensão superficial tende a fazê-lo voltar à configuração normal. Essa oscilação nuclear decorrente da competição entre repulsão e atração pode eventualmente levar o núcleo a partir-se em dois fragmentos [uma imagem

bastante fiel do fenômeno da fissão pode ser obtida colocando um pouco de mercúrio (metal líquido de densidade $13,5\text{ g/cm}^3$) num pires, formando uma grande gota, a qual representa o núcleo “fissionante”, isto é, o que irá experimentar a fissão; provocando vibrações no pires, de forma moderada e na direção horizontal, a gota se partirá em duas outras, de tamanhos comparáveis, como se fossem os fragmentos da fissão].

O núcleo atômico parte-se espontaneamente

Dois físicos soviéticos jovens, Georgy N. Flerov (1913–1990) e Konstantin A. Petrzhak (1907–1998), tendo tomado conhecimento da descoberta da fissão do urânio induzida por nêutrons, e a pedido do orientador deles, o físico soviético Igor V. Kurchatov (1903–1960), começaram já nos meados de 1939 a fazer uma série de experimentos com a finalidade de confirmar aquela descoberta surpreendente e estranha. Para tanto, eles desenvolveram uma câmara de ionização bastante sensível para registrar e contar os pulsos elétricos gerados pelos fragmentos de fissão.

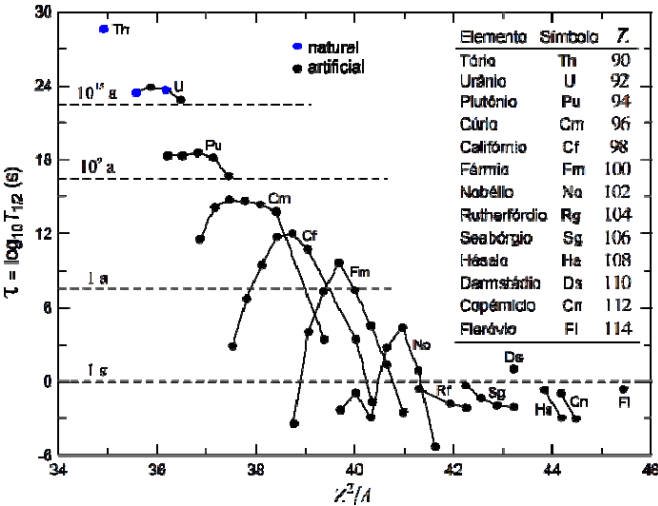


Fig. 3. Meia-vida por fissão espontânea de núcleos pesados da natureza (urânio e tório) e artificiais (dados extraídos de [36]).

Aconteceu que Flerov e Petrzhak observaram um pequeno número de pulsos na ausência de uma fonte de nêutrons usada para induzir a fissão no urânio. Eles pensaram então tratar-se de fragmentos “espontâneos” da fissão do urânio. Decidiram então tomar todas as providências em novos experimentos de controle para se certificarem do que estava acontecendo. Entre outras, para demonstrar que os pulsos “espontâneos” não estavam sendo causados por indução da radiação cósmica, eles fizeram medidas no subsolo do metrô de Moscou a 50 m de profundidade. Eles verificaram que, mesmo sendo ali a intensidade da radiação cósmica reduzida de 40 vezes, a presença dos pulsos “espontâneos” era a mesma que na superfície. Concluíram de suas observações que se tratava efetivamente do fenômeno da fissão espontânea do urânio [30] (a história completa dessa descoberta está relatada por Petrzhak e Flerov em [31]).

Por essa época, Bohr e Wheeler haviam chamado a atenção para a possibilidade de acontecer a fissão espontânea em núcleos pesados, e estimaram para urânio uma taxa de

desintegração por fissão espontânea extremamente pequena ($\sim 0,18$ fissões/(g.ano) [29]. Entretanto, as medidas pioneiras de Petrzhak e Flerov indicaram um valor ~ 240 mil vezes maior, exatos 44 fissões/(mg.ano), o que é equivalente à meia-vida 4×10^{16} anos [31] (o valor atual é $0,82 \times 10^{16}$ anos [32], e o fenômeno é devido ao isótopo par-par mais abundante, ^{238}U).

Na mesma ocasião, Petrzhak e Flerov investigaram também o caso do tório, porém nenhum efeito fora observado. Eles indicaram apenas um limite inferior de 10^{19} anos para a meia-vida parcial do tório por fissão espontânea [31]. Mais de 15 anos depois (1955, 1958), com o aperfeiçoamento das câmaras de ionização, esse limite inferior foi aumentado para 10^{21} anos [33,34].

Somente em meados da década de 1990 um grupo de pesquisadores italianos e russos, utilizando detectores dielétricos de traços nucleares com exposição a amostras de tório no Laboratório Subterrâneo do Gran Sasso d’Italia, conseguiu obter pela primeira vez o valor $1,22 \times 10^{21}$ anos para a meia-vida do ^{232}Th por fissão espontânea (isso corresponde a uma atividade de $\sim 1,5$ fissões/(g.ano) [35]). Embora de frequência rara para os isótopos ^{238}U e ^{232}Th encontrados na natureza, a fissão espontânea, hoje se sabe, é um dos modos frequentes de desintegração observado em grande número de isótopos dos elementos transurânicos (Pu, Am, Cm, Cf e outros), competindo, ou mesmo superando, o decaimento alfa (Fig. 3).

A Segunda Guerra Mundial avança implacável

Voltando aos acontecimentos que assolava a Europa no início dos anos 1940, o receio de que os alemães avançassem nas pesquisas em direção à fabricação de uma arma de grande potência destruidora com base na fissão do urânio não era para ser desprezado.

Tabela 2. Valor energético da combustão de materiais fósseis e da fissão de núcleos pesados.

Material	Valor energético (MJ/kg)	Valor energético relativo	Equivalência energética
Urânio e/ou Plutônio	80 M	3,3 M	1 kg
Gasolina	47,3	2,0	2,2ML
Óleo Diesel	44,8	1,9	2,0ML
Carvão Preto	32,5	1,3	2400 ton
Lenha	24,2	1,0	3300 ton

De fato, os cientistas na Inglaterra e nos EUA já haviam percebido que a quantidade de energia a ser disponibilizada numa reação de fissão em cadeia com urânio (Fig. 2) alcançaria valores milhões de vezes maiores do que com o uso dos combustíveis convencionais (óleo, gasolina, carvão; ver Tabela 2 com valores atualizados). Esta é, aliás, a grande característica para fins práticos do processo de fissão: a altíssima concentração de energia a ser liberada quando comparada aos processos de combustão química com com-

bustíveis de origem fóssil.



Físico alemão-britânico
Rudolf Peierls
(1907 – 1995)

No início de 1940, Otto Frisch, então naturalizado inglês, e o físico alemão Rudolf Peierls (1907–1995), também radicalizado na Inglaterra, haviam chegado à conclusão de que era factível a fabricação de um artefato bélico com base na gigantesca quantidade de energia liberada no processo da fissão do urânio. Eles concluíram que a reação em cadeia explosiva seria possível com a fissão ^{235}U e nêutrons energéticos. Esse estudo de viabilidade fazia parte do conteúdo do famoso Memorando Frisch-Peierls, de março de 1940, documento que convenceu seus colegas norte-americanos e britânicos de que a construção de uma bomba atômica era possível [37].

As conclusões contidas no Memorando Frisch-Peierls provocou grande mobilização dos cientistas em direção às pesquisas sobre a fissão nuclear, o que levou à descoberta dos elementos transurânicos. Em dezembro de 1940, estavam sendo produzidos pela primeira vez neptúncio (Np, $Z = 93$) e plutônio (Pu, $Z = 94$). Logo se viu que o isótopo ^{239}Pu sofria fissão quando bombardeado com nêutrons lentos, do mesmo modo como acontecia com o ^{235}U . ^{239}Pu havia sido identificado em dezembro de 1940, mas devido ao sigilo imposto pelas circunstâncias da guerra, só foi dado a conhecer em 1946. Esse isótopo resultava como subproduto do bombardeamento de ^{238}U com nêutrons (principalmente nêutrons lentos) com formação do composto ^{239}U o qual, por dois decaimentos β^- sucessivos (transformação do nêutron em próton com emissão de um elétron e um antineutrino) resultava em ^{239}Pu [38]. Esse isótopo foi usado, cinco anos mais tarde, como matéria prima na preparação da primeira bomba atômica, o chamado teste Trinity.

Ao mesmo tempo, o avanço das tropas nazistas seguia obstinadamente, sem piedade. Naquele ano de 1940 a Noruega, Dinamarca, Holanda, Bélgica e França foram tomadas pelas forças nazistas. Juntaram-se às forças de Adolf Hitler, as de Benito Mussolini (1883–1945) e as do imperador Hiroito (1901–1989) para formarem o EIXO ALEMANHA-ITÁLIA-JAPÃO, e começaram em setembro os bombardeios sobre Londres, que se estenderam até maio do ano seguinte. Também em 1941, a Iugoslávia e a Grécia foram tomadas pelas tropas nazistas.

No Pacífico, em decorrência do ataque-surpresa à base naval norte-americana em Pearl Harbor (Havaí) pelos japoneses em dezembro, os EUA declararam guerra ao Japão e, em consequência, a Alemanha e a Itália declararam guerra

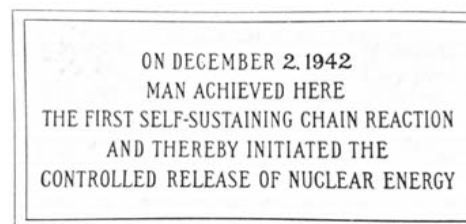
aos EUA. Entretanto, em 1942, ficara formada a frente dos Aliados, inclusive com a incorporação do Brasil, para combater as tropas inimigas na Europa.

O Projeto Manhattan

De posse das informações contidas no Memorando Frisch-Peierls os cientistas sediados nos EUA conseguiram convencer o governo norte-americano a apoiá-los, sendo criado no início de 1942 o que ficou conhecido como Projeto Manhattan, com o objetivo de construir a bomba atômica.



Fig. 4. Inauguração da “era nuclear” com entrada em operação do 1º reator nuclear: liberação controlada da energia nuclear com reação de fissão em cadeia autossustentada.



Físico Italiano
Enrico Fermi
(1901-1954)

Um passo fundamental para o sucesso de tal empreendimento foi a demonstração, com êxito, da primeira reação em cadeia autossustentada com liberação de energia nuclear controlada. O feito foi conseguido na tarde de 02 de dezembro de 1942 por Enrico Fermi e sua equipe, ocasião em que fizeram funcionar, nas dependências da Universidade de Chicago, o primeiro reator nuclear que atingira modestos 200 W. Este foi o acontecimento ímpar da história recente da humanidade, com o qual se inaugurou a chamada era nuclear (Fig. 4).

O Projeto Manhattan mobilizou mais de 100 mil pessoas por cerca de três anos, e consumiu algo como 30 bilhões de dólares em valores atuais. Fora, até então, o maior empreendimento científico-tecnológico-inovador que o homem desenvolveu. Cerca de noventa cientistas, entre físicos, químicos e profissionais de várias outras áreas, bem como um grande número de engenheiros de diferentes especialidades, tomaram parte do Projeto. A maioria dos cientistas tinha na época entre 30 e 35 anos de idade, e a média não passava dos 40 anos. Além de norte-americanos, um grande

número deles era proveniente de várias nações da Europa, imigrantes que haviam procurado acolhida fugidos do regime nazista [39].

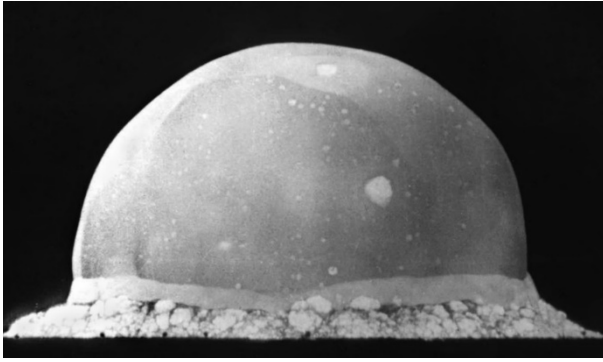


Fig. 5. Imagem da detonação da 1ª bomba atômica (o Teste Trinity) acionada em 16 de julho de 1945 em Alamogordo (Novo México, EUA); construída à base de ^{239}Pu , liberou 23 GWh.

O produto final imediato do Projeto Manhattan foram três bombas atômicas acionadas em 1945: a primeira em 16 de julho, o chamado teste Trinity, no deserto do Novo México (Fig. 5), e outras duas, em 6 e 9 de agosto, respectivamente sobre Hiroshima e Nagasaki no Japão (a guerra na Europa já havia terminado com o suicídio de Hitler em 02 de maio e a subsequente rendição da Alemanha aos aliados cinco dias depois), pondo fim à 2ª Guerra Mundial com a rendição dos japoneses em 14 de agosto, e formalmente reconhecida em 2 de setembro daquele ano.

Embora a energia proveniente da fissão nuclear tivesse sido obtida pela primeira vez de forma controlada no primeiro reator nuclear em Chicago (dezembro de 1942), as circunstâncias da guerra fizeram com que ela fosse utilizada de maneira totalmente descontrolada e brutal, com finalidade bélica, nas primeiras explosões nucleares do final da Segunda Guerra mundial [40].

Como o núcleo atômico se parte

Tão logo terminado o grande conflito, os cientistas retornaram às suas atividades de praxe em seus laboratórios e escritórios e à atividade acadêmica nas universidades. Físicos e químicos se debruçaram, entre outras, nas investigações sobre o mecanismo da fissão nuclear induzida por nêutrons, sobretudo a dos núcleos pesados, notadamente os isótopos físeis de urânio e plutônio (^{233}U , ^{235}U e ^{239}Pu), como também a fissão espontânea de actinídeos pesados (urânio e tório) e transurânicos (plutônio, califórnio e outros).

O processo de bipartição de um núcleo pesado pode ser mais facilmente compreendido dividindo-o em três etapas, como mostrado na figura 6. Na primeira etapa, o núcleo é atingido (ou não, no caso da fissão espontânea) por um nêutron lento que prontamente é absorvido, provocando no núcleo composto uma oscilação levando-o a se deformar. Quando o grau de deformação é tal que não seja mais possível retornar à forma original, o núcleo, agora com certa energia de excitação, parte-se, originando dois fragmentos nascentes primários de massas comparáveis e excitados, que se separam em sentidos opostos pela repulsão eletrostática.

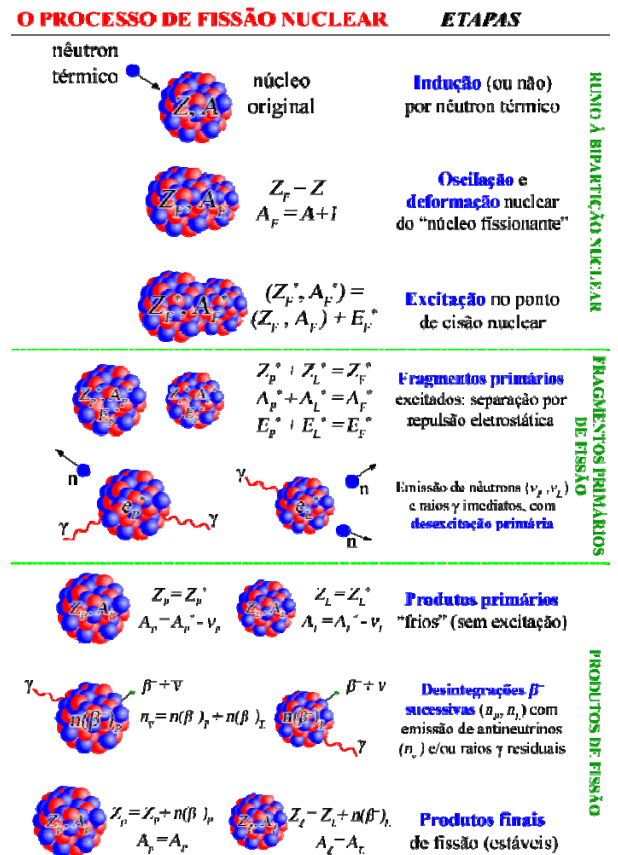


Fig. 6. Etapas do processo de bipartição nuclear (extraído de [41]).

O núcleo "fissionante" (o que está se partindo), (Z_F, A_F) , chega ao ponto de separação dos fragmentos com certa energia de excitação, E_F^* , ou seja, $(Z_F^*, A_F^*) = (Z_F, A_F) + E_F^*$ (Z representa o número atômico, A o número de massa, e o asterisco indica excitação).

Na segunda etapa, os fragmentos primários excitados, (Z_P^*, A_P^*) e (Z_L^*, A_L^*) (os subíndices P e L designam o fragmento pesado e leve, respectivamente) procuram descarregar seus excessos de energia, E_P^* e E_L^* (com $E_P^* + E_L^* = E_F^*$), emitindo nêutrons e raios gama (são os nêutrons e gamas prontos ou imediatos), resultando assim os produtos primários de fissão, "frios", $(Z_P = Z_P^*, A_P = A_P^* - n_p)$ e $(Z_L = Z_L^*, A_L = A_L^* - n_L)$, porém ainda com excesso de nêutrons em relação aos correspondentes isótopos estáveis (aqui n_p e n_L representam o número de nêutrons imediatos emitidos pelo fragmento pesado e leve, respectivamente).

Finalmente, na terceira etapa, os produtos primários de fissão experimentam desintegrações β^- sucessivas acompanhadas da emissão de antineutrinos ($\bar{\nu}$) e, eventualmente, raios gama residuais, com a formação dos produtos intermediários de fissão em sequência até se transformarem nos produtos de fissão finais, estáveis, (Z_P, A_P) e (Z_L, A_L) . Como para cada desintegração β^- um antineutrino é emitido, ao mesmo tempo em que o número atômico da espécie nuclear aumenta de uma unidade ($Z \rightarrow Z + 1$), segue-se que $Z_P = Z_P + n(\beta^-)_P$ e $A_P = A_P$, e também $Z_L = Z_L + n(\beta^-)_L$ e $A_L = A_L$ (aqui $n(\beta^-)_P$ e $n(\beta^-)_L$ representam o total de desintegrações β^- (ou o total de antineutrinos produzidos) a partir dos produtos primários

leve e pesado, respectivamente).

Nenhuma teoria física havia previsto o fenômeno da fissão nuclear. Foi uma descoberta surpreendente, casual. O que mais chamou a atenção dos pesquisadores envolvidos (Otto Hahn, Fritz Strassmann, Lise Meitner e Otto Frisch) em janeiro de 1939 foi a enorme quantidade de energia disponibilizada no processo. Depois, duas outras características do processo de fissão não menos importantes foram identificadas: *i*) a emissão de 2–3 nêutrons imediatos a partir dos fragmentos primários formados, e *ii*) a grande variedade de espécies nucleares radioativas criadas como produtos de fissão primários e intermediários, e os produtos finais estáveis.

Fragmentos, produtos e a energia da fissão nuclear

Desde o início dos anos 1950 já estavam conhecidos ~80 produtos primários de fissão, mais de 150 produtos intermediários e outros ~80 produtos finais de fissão estáveis. Todos esses com número atômico no intervalo 30–68 e número de massa entre 72 e 161, sendo possíveis cerca de 50 modos distintos de bipartição. A distribuição de massa dos fragmentos de fissão pode ser vista na fig. 7, onde se observa a predominância dos fragmentos mais leves no intervalo de massa 85–105, e a dos mais pesados no intervalo 130–145, evidenciando uma forte assimetria de massa (e também de carga elétrica) no processo de bipartição nuclear.

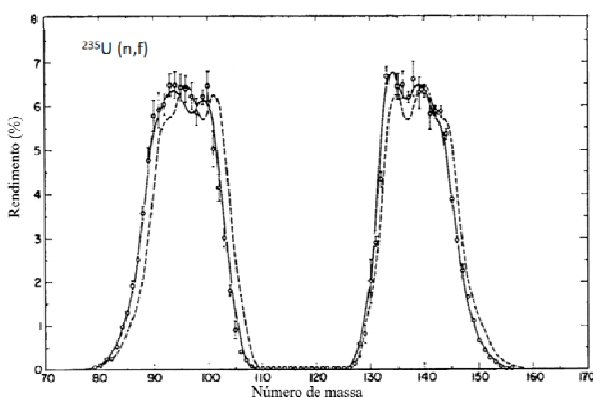


Fig. 7. Distribuição de massa de fragmentos primários — *i. e.*, antes da emissão imediata de nêutrons— (curva tracejada) e de produtos de fissão—*i. e.*, após a emissão de nêutrons—(curva contínua) na fissão de ^{235}U induzida por nêutrons (adaptado de [42]).

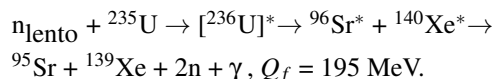
Um par típico de fragmentos primários formado na fissão do ^{235}U induzida por nêutrons lentos (um dos modos mais comuns de fissão que ocorre nos reatores nucleares em geral) é a dupla $^{96}\text{Sr} + ^{140}\text{Xe}$. A enorme quantidade de energia disponibilizada no processo vem do fato de que a soma das massas do nêutron incidente e do núcleo alvo ^{235}U é maior do que a soma das massas dos fragmentos primários ^{96}Sr e ^{140}Xe formados.

Assim, na transformação $n + ^{235}\text{U} \rightarrow ^{96}\text{Sr} + ^{140}\text{Xe}$ há uma perda de 0,209 unidades de massa atômica (u ; $1u = 931,494 \text{ MeV}$), portanto equivalente a ~195 MeV para a fissão de um único núcleo composto ^{236}U . Agora, se tivermos 1 kg de ^{235}U (o qual ocupa um volume ~50 cm^3 (o de uma xícara de cafezinho!)), isso equivale a se ter $2,56 \times 10^{24}$

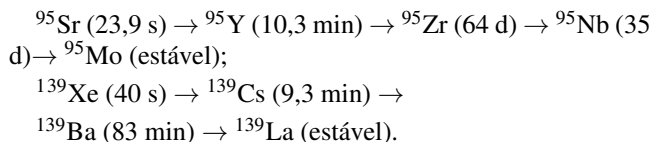
núcleos de ^{235}U . A fissão de todos esses núcleos atômicos produz $\sim 5 \times 10^{26} \text{ MeV}$ de energia. Como $1 \text{ MeV} = 4,45 \times 10^{-20} \text{ kWh}$, ter-se-iam ~22 milhões de kWh disponíveis. Com um aproveitamento de metade desse valor para produzir eletricidade para consumo, a cifra seria suficiente para atender as necessidades de energia elétrica de uma cidade com uma população de ~250 mil pessoas durante um mês, substituindo o equivalente a 2 milhões de litros de óleo diesel, ou ainda 2400 toneladas de carvão.

A energia primária total no processo de fissão manifesta-se principalmente (~87%) como energia cinética na separação dos fragmentos nascentes em sentidos opostos, devido à ação da repulsão eletrostática entre eles. Num reator de potência essa energia mecânica transforma-se em energia térmica, depois em mecânica, e finalmente em energia elétrica. Os ~13% restantes se distribuem como energia de excitação desses fragmentos. Essa última parcela é consumida com a emissão imediata de nêutrons (2 a 3, com dissipação de ~17 MeV) e de radiação gama residual (com perda de ~7 MeV). No caso de terem sido emitidos, por exemplo, um nêutron do ^{96}Sr e outro do ^{140}Xe resultaria o par de produtos primários de fissão ^{95}Sr e ^{139}Xe “frios”, isto é, sem energia de excitação. A partir desses produtos primários, por emissão de elétrons e antineutrinos dos decaimentos β^- sucessivos, são criados produtos intermediários de fissão, até alcançar aos produtos finais estáveis. A soma das energias desses decaimentos β^- em sequência constitui a chamada energia secundária de fissão.

O modo de bipartição nuclear tomado acima como exemplo pode ser resumido como mostrado abaixo.



Os produtos primários de fissão ^{95}Sr e ^{139}Xe , por possuírem excesso de nêutrons, experimentam desintegrações β^- sucessivas, com perda de massa em cada uma, portanto, com liberação de energia, até chegar nos produtos finais de fissão ^{95}Mo e ^{139}La , estáveis, como se mostra em continuação (as quantidades entre parênteses são as meias-vidas dos produtos radioativos):



Em cada uma dessas desintegrações β^- um elétron e um antineutrino são emitidos com energia cinética total igual à diferença de massa dos núcleos envolvidos, ao mesmo tempo em que o número atômico aumenta de uma unidade (por exemplo, na sequência iniciada com o produto primário leve de $A = 95$, o decaimento $^{95}\text{Y} \rightarrow ^{95}\text{Zr} + e^- + \text{antineutrino}$ libera 4,45 MeV, e o número atômico passa de 39 para 40). A soma das energias de todos os decaimentos β^- de ambas as sequências nesse exemplo fornece 24,1 MeV para a energia secundária de fissão.

Os produtos primários e intermediários de fissão com a energia secundária que produzem constitui o que é conhecido como “resíduo radioativo” ou “cinza” decorrente do processo de fissão. Numa grande massa de urânio, como num reator

nuclear de potência, os produtos de fissão decorrentes dos diferentes modos de bipartição nuclear respondem por 97% de toda a radioatividade do rejeito total produzido [41].

O bom uso da fissão nuclear

O norte-americano Linus Pauling (1901–1994) foi um químico, bioquímico, especialista em química quântica e biologia molecular, Professor de Química no Instituto de Tecnologia da Califórnia (CALTECH, Pasadena CA), e, até hoje, um dos quatro cientistas agraciados duas vezes com o Prêmio Nobel: o de Química (1954), por suas investigações sobre a natureza das ligações químicas, e o da Paz (1962), pela campanha e combate contra os testes de armas nucleares.



Químico norte-americano
Linus Pauling
(1901-1994)

Ele sempre acreditou nas inúmeras aplicações pacíficas

que podem ser auferidas do modo controlado de produzir energia originária do fenômeno da fissão nuclear. Há quase sete décadas ele prognosticou sobre a importância sem precedentes do novo fenômeno físico como fonte inigualável de produção de energia. São dele as palavras “*Acredito que logo se reconhecerá que a descoberta da fissão controlada de núcleos atômicos e a liberação controlada de energia atômica é a maior descoberta feita desde que o uso controlado do fogo foi descoberto pelo homem primitivo*” [43].

De fato, a previsão do grande químico tornou-se realidade. Os cientistas, engenheiros e técnicos do setor nuclear “dominaram” a produção de energia em larga escala originária da fissão do núcleo atômico desenvolvendo os chamados reatores de fissão, dispositivos onde as reações de fissão em cadeia (e outras reações nucleares) acontecem de forma controlada, autossustentada e segura. Diversas aplicações decorrentes do fenômeno da fissão nuclear tornaram-se acessíveis e de uso corrente a bilhões de pessoas.

Geração de nucleoeletricidade

Desde a segunda metade dos anos 1950, com a entrada em operação das quatro unidades de produção de nucleoeletricidade no complexo Calder Hall, de potência total 240 MW, instaladas em Seascale (Reino Unido), os reatores de potência vem sendo utilizados principalmente na geração de eletricidade para consumo em geral e na propulsão naval.

REATORES DE FISSÃO NO MUNDO -> PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: [Fev/2019]

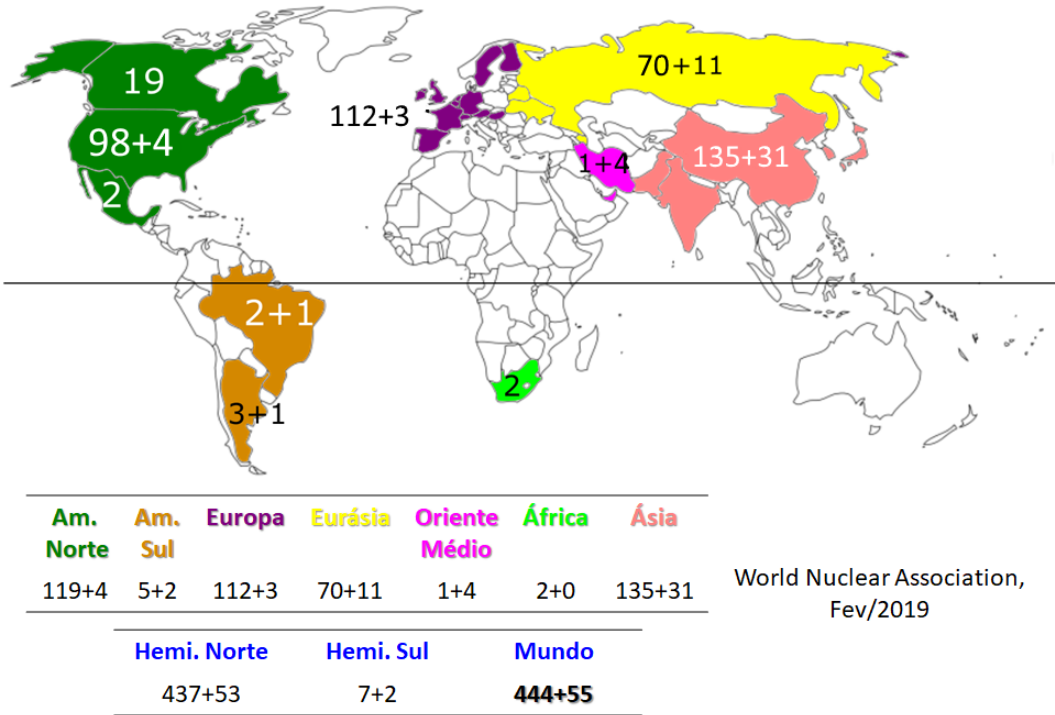


Fig. 8. Distribuição geográfica dos reatores de potência elétrica em funcionamento e em construção (dados atualizados extraídos de [44]).

A figura 8 mostra a distribuição geográfica global, por continente ou região, dos reatores de potência operacionais em fevereiro de 2019 [44]. Os números que seguem ao sinal + indicam reatores em construção. A potência elétrica disponibilizada por unidade nucleoeletrônica instalada situa-se no intervalo $\sim 400\text{--}1190\text{ MW}_e$ (Mega Watt elétrico). Nota-se uma carência de unidades de geração no hemisfério Sul (1,6% do total em operação, e $\sim 3,6\%$ do total dos que estão sendo construídos). Os reatores em operação atualmente respondem por $\sim 400\text{ GW}_e$ (bilhões de Watt elétricos), dos quais apenas 1,4% atendem ao hemisfério Sul. Com a entrada em operação dos novos reatores nos próximos 3–5 anos espera-se um acréscimo global de potência elétrica de $\sim 62\text{ GW}_e$.

Paralelamente a esses feitos, a primeira embarcação movida a propulsão nuclear foi o submarino Nautilus (EUA), construído em 1954, com reator de potência 10 MW, que lhe permitiu atravessar o Polo Norte. Na década de 1960 surgiram os navios mercantes a propulsão nuclear: o Savannah (EUA), de 74 MW, e o Otto Hahn (alemão), de 38 MW. As Marinhas dos EUA, Reino Unido, Japão, Rússia e China passaram a dominar a alta tecnologia de propulsão naval. É de se destacar o desempenho do porta-aviões norte-americano USS Enterprise, de potência 210 MW, que ficou em operação no período 1961–2012. Hoje existem ~ 220 reatores de potência usados como fonte de propulsão em porta-aviões, submarinos e quebra-gelos, tornando o setor naval com desempenho extremamente eficiente.

Aplicações na medicina

Outra classe de reatores a fissão nuclear não menos importante é a dos chamados reatores de pesquisa. Esses são usados em testes de materiais, treinamento de novos profissionais da área nuclear, pesquisa básica e produção de isótopos radioativos para uso na medicina e na indústria. Esses reatores funcionam como intensas fontes de nêutrons (energéticos e lentos), próprias para uso em pesquisas e produção de novos radioisótopos. A potência média dos ~ 230 reatores dessa classe hoje em funcionamento espalhados por ~ 60 países gira em torno de 10 MW e, individualmente não chegam a ter 100 MW. Cerca da metade desses reatores são usados principalmente na produção de radioisótopos para procedimentos de radiodiagnóstico e radioterapia, desse modo proporcionando saúde e conforto às pessoas.

Em reatores nucleares que utilizam urânio como combustível são produzidos da fissão do ^{235}U um grande número de radioisótopos largamente usados na medicina, seja em diagnósticos como em terapias. Para citar apenas cinco deles: ^{137}Cs (césio-137), de uso em terapia de cânceres; ^{131}I (iodo-131), no tratamento do hipertireoidismo; ^{90}Y (ítrio-90), usado para tratar câncer de fígado; ^{90}Sr (estrôncio-90), muito usado como fonte radioativa para radioterapia superficial de alguns cânceres e também no tratamento de câncer nos ossos; e ^{99}Mo (molibdênio-99), o qual desintegra-se por emissão β^- , com meia-vida de 66 horas, no ^{99m}Tc (tecnécio-99 excitado) de uso corrente em diagnósticos de vários órgãos e sistemas do corpo humano (Fig. 9). De longe, ^{99}Mo é o produto de fissão de maior demanda no mundo.

Nos reatores nucleares é também produzida uma série de

radioisótopos de elementos actíneos, notadamente isótopos de plutônio. Esses subprodutos decorrem das interações nucleares dos nêutrons não utilizados em produzir novas fissões. Um deles, ^{239}Pu (plutônio-239), pode ser reaproveitado para servir de combustível na recarga do próprio reator onde foi gerado. Outro, ^{238}Pu , entre outras aplicações, foi usado nos anos 1970 e 1980 como fonte de energia para construir pequenas baterias de uso em marcapassos cardíacos. Esses pequenos aparelhos são implantados no peito do paciente, próximo ao coração, para estimular e regular os batimentos cardíacos, desse modo promovendo um aumento da longevidade.

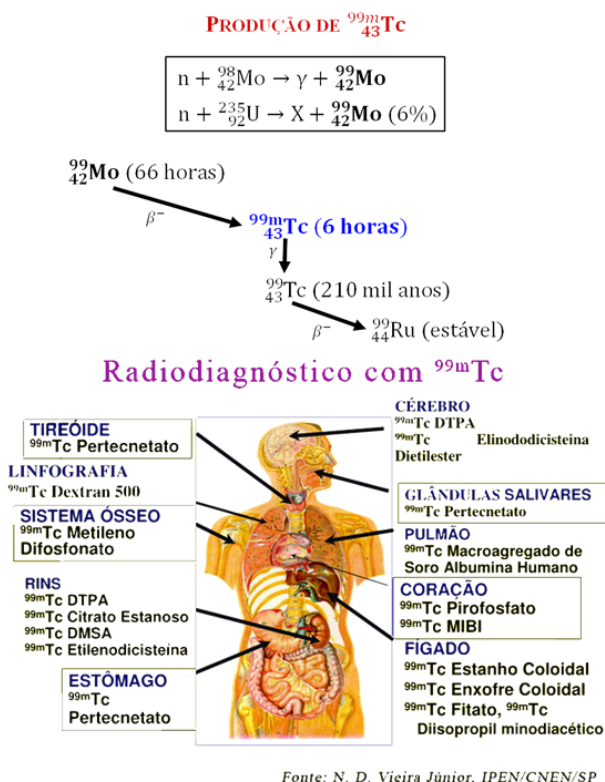


Fig. 9. Métodos de produção e usos de ^{99m}Tc em radiodiagnóstico.

A energia do decaimento alfa do ^{238}Pu (meia-vida de 88 anos) gera calor o qual se transforma em eletricidade num par termelétrico, produzindo pulsos não mais intensos do que $\sim 10\text{ mW}$ (miliWatt). A durabilidade desses aparelhos alimentados com ^{238}Pu chegou a ser ~ 35 anos, bem superior aos atuais que usam baterias de lítio de durabilidade ~ 18 anos [45]. Entretanto, por questões de segurança, os marcapassos cardíacos a ^{238}Pu estão sendo substituídos pelos de baterias a lítio.

Outras aplicações decorrentes da fissão nuclear

O aproveitamento da variedade de radioisótopos que são produzidos em reatores de potência e de pesquisa permitiu aos pesquisadores da área nuclear desenvolver muitas outras aplicações além daquelas específicas de uso em medicina. Alguns poucos exemplos servem para ilustrar a importância que a fissão nuclear tem representado para o cotidiano das

peçoas.

O radioisótopo ^{241}Am (amerício-241, meia-vida 432,6 anos) é usado num pequeno detector de fumaça para ativar alarmes contra incêndio em casas, escritórios, shopping centers, salas de espetáculos e outros ambientes. ^{241}Am emite partículas alfa que ionizam o ar criando uma pequena corrente elétrica entre dois eletrodos. Se alguma fumaça penetrar no detector ela absorverá as partículas alfa interrompendo a corrente e, de consequência, um alarme é emitido.

A espécie nuclear radioativa ^{147}Pm (promécio-147, meia-vida 2,62 anos) produz radioluminescência, sendo útil, em ambientes escuros, para iluminar relógios, locais de saída (“exit”) em prédios comerciais, aviões, navios, etc.

Os radioisótopos ^{137}Cs (césio-137, meia-vida 30 anos) e ^{90}Sr (estrôncio-90, meia-vida 28,9 anos) são produtos de fissão abundantes aproveitados largamente como fontes de energia para boias e faróis para navegação, como também em baterias para satélites artificiais. Geradores de potência elétrica que usam ^{137}Cs ou ^{90}Sr podem oferecer até 100 W. Eles precisam de um mínimo de manutenção, e podem ser utilizados em regiões longínquas ou de difícil acesso.

^{238}Pu tem sido usado largamente como fonte de energia para satélites alimentando baterias de até 50 W. Nas missões Voyager aos planetas mais distantes ^{238}Pu chegou a disponibilizar uma potência elétrica total de 400 W.

Os radioisótopos ^{60}Co e ^{137}Cs , o primeiro produzido por bombardeamento do cobalto natural (^{59}Co) com nêutrons em um reator, e o segundo extraído como produto da fissão nuclear, têm sido usados nos procedimentos de conservação de alimentos irradiando-os adequadamente com raios gama emitidos desses radioisótopos. A técnica de expor os alimentos à radiação gama destrói microrganismos, bactérias, vírus e microinsetos que podem estar presentes, desse modo aumentando a durabilidade e qualidade do alimento, evitando sua deterioração e evitando transmissão de doenças e inibindo a germinação, promovendo desse modo uma alimentação segura e mais saudável. Esse método de conservação e limpeza dos alimentos tem sido praticado em mais de sessenta países, totalizando cerca de 500 mil toneladas de alimentos tratados.

Os produtos de fissão estão presentes também na indústria. Os já mencionados ^{147}Pm e ^{137}Cs , bem como ^{144}Ce e ^{109}Cd (e também ^{60}Co produzido em reatores), são muito usados no controle da produção industrial. Basicamente, o sistema de controle consiste numa fonte de radiação (que é um dos radioisótopos) e um detector de radiação. Esses podem estar em lados opostos do arranjo técnico a ser usado nas medidas (são os instrumentos de transmissão ou absorção), ou do mesmo lado (são os instrumentos de reflexão ou retroespalhamento). Com isso consegue-se controlar com precisão espessura, densidade, volume, empacotamentos em geral e outras grandezas dos materiais produzidos.

Finalizando a seção, uma palavra sobre o uso dos reatores a fissão nuclear no processo de dessalinização da água. Estima-se que, hoje, $\sim 20\%$ da população mundial ($\sim 1,5$ bilhão de pessoas) não têm acesso à água de beber, e essa dificuldade aumenta devido ao aumento da população em relação aos recursos da água de boa qualidade. A falta de água potável é, sem dúvida, um empecilho importante ao

desenvolvimento em certas regiões do mundo. Sendo água potável prioridade para um desenvolvimento sustentável, nas áreas onde ela não pode ser encontrada a dessalinização da água do mar ou de águas subterrâneas com alto teor de minerais faz-se necessário.

A maioria das instalações de dessalinização de águas em operação hoje em dia usa combustíveis fósseis, desse modo contribuindo sobremaneira para o aumento dos níveis dos gases de efeito estufa e o consequente aumento da temperatura ambiente. A energia nuclear, entretanto, já está sendo usada na dessalinização. Como exemplo, no Cazaquistão já ficou demonstrada uma produção de 80 mil m^3/dia de água potável por mais de 30 anos com o uso de um reator rápido. No Japão, umas dez instalações de dessalinização ligadas a reatores nucleares de produção de eletricidade renderam de 1 mil a 3 mil m^3/dia de água potável.

Uma das estratégias concebidas é usar toda a eletricidade gerada em um reator de potência na máxima capacidade de geração de eletricidade para suprir a carga exigida pela rede quando ela for alta, e parte dela passa a ser empregada em dessalinização quando a demanda por carga for baixa. Novos projetos de tecnologias de dessalinização de águas estão sendo desenvolvidos na Índia, Rússia, Coreia do Sul, Espanha, Reino Unido, Paquistão, Egito, Argélia, Marrocos e Tunísia. Os estudos de viabilidade levam em conta a energia nuclear, e tais iniciativas trarão num futuro próximo melhores condições de vida e desenvolvimento sustentável para as populações menos favorecidas no suprimento de água de boa qualidade [46,47].

O Brasil na era nuclear

“*O fogo dos deuses*”, título dado ao livro de autoria do engenheiro Guilherme Camargo, descreve com riqueza de informações preciosas uma história da energia nuclear, cobrindo desde as ideias sobre a natureza da matéria pelos antigos gregos até os tempos recentes [48]. Nessa obra, de leitura obrigatória para aqueles interessados pelo assunto, o leitor pode seguir com clareza a atuação dos vários personagens envolvidos nos acontecimentos que levaram o Brasil a se inserir na era nuclear, como se sabe, inaugurada em 02 de dezembro de 1942, em Chicago (EUA), por Enrico Fermi e sua equipe, ocasião em que colocaram em operação o primeiro reator nuclear, demonstrando pela primeira vez a reação de fissão em cadeia autossustentada e com liberação da energia nuclear de forma controlada. Por essa razão, o autor limitar-se-á aqui a apresentar, e de forma breve, as conquistas do Brasil no setor nuclear conseguidas nas últimas seis décadas e meia.

Graças aos esforços, liderança, entusiasmo, competência e espírito público de grande número de profissionais, tendo à frente o Alm. Álvaro Alberto da Motta e Silva (1889–1976), foram criados, a partir da segunda metade dos anos 1950, institutos e centros de pesquisa voltados fundamentalmente para as questões da energia nuclear. Nessas instituições tiveram lugar a construção e operação dos primeiros reatores nucleares do Brasil, todos voltados para produção de radioisótopos para medicina, radiofármacos, pesquisa na área nuclear e formação de pessoal especializado.



Álvaro Alberto da Motta e Silva
Cientista brasileiro
(1889 - 1976)
Entusiasta, pioneiro e líder da energia
nuclear no Brasil

Assim, no Instituto de Energia Atômica–IEA (atualmente Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN), localizado no campus da Universidade de São Paulo (Capital), entrou em operação em setembro de 1957 o primeiro reator nuclear do Brasil (e da América Latina), o IEA-R1, autorizado a operar na potência de 2 MW (hoje 5 MW), oficialmente inaugurado em janeiro de 1958 pelo então presidente Juscelino Kubitschek de Oliveira (1902–1976).

Seguiu-se o reator TRIGA (**T**raining, **R**esearch, **I**sotopes production, **G**eneral **A**tomics) Mark-1, colocado em funcionamento em novembro de 1960 no então Instituto de Pesquisas Radioativas - IPR (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN desde 1977) localizado no campus da Universidade Federal de Minas Gerais (Pampulha) em Belo Horizonte.

Também, no campus da UFRJ na Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, o primeiro reator de pesquisa totalmente construído no Brasil por empresa brasileira, o ARGONAUTA, de potência máxima de 10 kW, que entrou em operação em fevereiro de 1965.

Passados 23 anos, o Brasil inaugurou seu primeiro reator nuclear genuinamente nacional, o IPEN/MB-01, que entrou em operação em novembro de 1988. Resultado de uma parceria entre pesquisadores do IPEN e da Marinha do Brasil, ele opera a uma potência de 100 W, e tem como objetivo primordial a formação de novos profissionais com desenvolvimento de pesquisas em física de reatores e instrumentação nuclear. Com 30 anos de operação, esse reator inteiramente brasileiro representa independência e autonomia do país no setor nuclear.

Na área de produção de energia elétrica para consumo em geral o Brasil atualmente conta com duas unidades nucleoeletricas de grande porte que abastecem o sistema elétrico interligado de FURNAS Centrais Elétricas (Eletrobrás): Angra I, de potência 640 MW, em funcionamento há 37 anos,

e Angra II (1350 MW) a partir de 2000. Sem data para entrar em funcionamento, há ainda a terceira unidade (em construção), Angra III, projetada para uma potência de 1400 MW. O conjunto compõe o complexo nuclear de produção de energia elétrica Central Nuclear Alm. Álvaro Alberto, localizado no município fluminense de Angra dos Reis. Mas é preciso investir muito mais na geração de energia de origem na fissão nuclear para que o país consiga suprir sua carência de energia elétrica nas próximas décadas. Seguramente o Brasil não poderá prescindir da energia nuclear para o seu desenvolvimento, ao mesmo tempo em que ela garantirá a sustentabilidade e a preservação do meio ambiente (uma retrospectiva dos avanços da energia nuclear no Brasil o leitor encontrará em [49]).



Fig. 10. Central Nuclear Alm. Álvaro Alberto-CNAAA; construção, operação e manutenção pela Eletrobras-Eletronuclear.

Adicionalmente, há de se mencionar importante decisão do governo brasileiro de construir um reator nuclear multipropósito de grande porte, o RMB, destinado à produção de radioisótopos para medicina, pesquisa em tecnologia nuclear, energia, agricultura, indústria, ciências dos materiais, meio ambiente, e outras aplicações. Essa iniciativa constitui-se na garantia de independência nuclear para o Brasil. O projeto do RMB prevê sua vida útil estimada em 50 anos, e representará economia de pelo menos R\$ 30 milhões por ano, sem a necessária importação de radioisótopos e radiofármacos a serem utilizados, sobretudo em procedimentos médicos. O RMB será construído no interior de São Paulo, no município de Iperó, junto ao Centro Experimental de Aramar, da Marinha do Brasil.

Centro Experimental de Aramar – CEA, Iperó - SP

Projeto do Submarino Nuclear da Marinha do Brasil

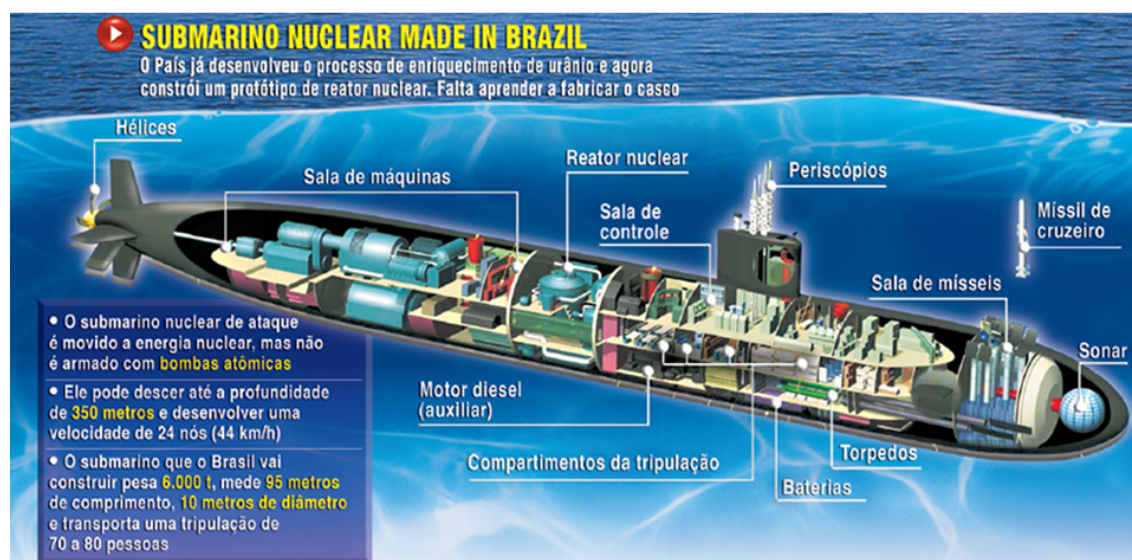


Fig. 11. PROSUB-Projeto do Submarino a propulsão nuclear da Marinha do Brasil.

Desenvolve-se também no Centro Experimental de Aramar da Marinha do Brasil (Iperó-SP), o Projeto do Submarino Brasileiro a Propulsão Nuclear-PROSUB, aos cuidados da Marinha do Brasil. Iniciado em 1979, o submarino a propulsão nuclear será totalmente construído no Brasil, previsto a ser lançado ao mar em 2025. O PROSUB permitiu que o Brasil dominasse totalmente o ciclo do combustível, operando com ultracentrifugação o processo de enriquecimento isotópico de urânio (^{235}U), como também está em andamento a construção de um protótipo do reator nuclear. O submarino a propulsão nuclear, dada suas características únicas, terá capacidade de patrulhar vastas regiões oceânicas atuando como defensor da costa brasileira, portanto de grande valor estratégico para o país.

Para encerrar, o domínio da tecnologia de enriquecimento isotópico de urânio pelo método de ultracentrifugação, e dos métodos de produção de radioisótopos por irradiação com nêutrons de reator são as grandes conquistas do Brasil nas últimas décadas que têm proporcionado uma melhor qualidade de vida a um expressivo número de cidadãos brasileiros. Uma visão atualizada sobre o Programa Nuclear Brasileiro está disponível em [50], com destaque para o Programa Nuclear da Marinha do Brasil.

Epílogo

Todo esse progresso científico e tecnológico do pós-guerra desenvolvido por dezenas de países (incluindo o Brasil) nas últimas sete décadas, com a implantação de inúmeras instituições de pesquisa e de formação de pessoal especializado na área nuclear e afins, as diversas aplicações na medicina, na indústria, na geração de energia elétrica, propulsão naval e tantas outras, com a geração de empregos para centenas de milhares de profissionais das mais diferentes especialidades, é decorrente da descoberta

e investigação do fenômeno da fissão nuclear na escala de bancada de laboratório, passando em seguida à escala industrial. Este é um claro exemplo da prioridade e importância que a pesquisa básica representa para o desenvolvimento das nações. É como alguém disse certa feita: *“as grandes revoluções se fazem no silêncio dos pequenos laboratórios”*. Fundamental é, portanto, que os governos, através de seus tomadores de decisão, se convençam e não hesitem em investir em pesquisas básicas se quiserem que seus netos vivam em seus países com níveis de desenvolvimento aceitáveis.

Em si mesmas, a energia nuclear e as radiações que a acompanham não causam prejuízos ou danos às pessoas e ao meio ambiente quando bem utilizadas e de modo seguro. A energia nuclear que mata e traz destruição é a mesma que cura e propicia conforto e bem estar à sociedade. As decisões sobre essa riqueza contida no núcleo atômico que a natureza pôs à disposição da humanidade é que farão dela algo benéfico ou não. A fissão de núcleos pesados (^{233}U , ^{235}U e ^{239}Pu) é, no momento, a transformação física de maior concentração energética disponível. O domínio das tecnologias de utilização da energia nuclear para o bem só trará mais conforto, saúde, segurança, transporte, alimentos de qualidade e bem estar para as populações, como fartamente já demonstrado por inúmeros países que as utilizam desde há muito. Sem energia nenhum empreendimento torna-se viável, nada funciona, e a sociedade sucumbe.

Para finalizar, ressalte-se que o Brasil, ao lado apenas dos EUA e da Federação Russa, detém hoje o conhecimento e o domínio completo de todo o ciclo do combustível nuclear [extração do minério de urânio, moagem e refino, conversão a hexafluoreto de urânio, enriquecimento isotópico a $\sim 3,5\%$ de ^{235}U , preparação do elemento combustível (dióxido de urânio), produção de energia elétrica (reator de potência), estocagem dos rejeitos], ao mesmo tempo que possui expressivas reservas de urânio (309 mil toneladas de óxido de

urânio), a matéria prima de onde é extraída com fatura a energia liberada na fissão do núcleo atômico. O país tem tudo para tirar o melhor proveito dessa posição invejável, e não desprezá-la, em prol do desenvolvimento e bem-estar da sociedade.

Oportuno é, pois, celebrar os 80 anos da revolucionária descoberta da fissão nuclear, acontecimento sem igual da história recente da humanidade, só comparável em importância à descoberta do fogo pelo homem primitivo em tempos remotos.

Agradecimentos – Novamente, o autor sente-se no dever de agradecer ao Dr. Emil Medeiros pela leitura crítica dos originais com suas valiosas sugestões que enriqueceram o texto final. O esforço e a competência colocados na preparação das ilustrações por José Guilherme T. Monteiro é grandemente reconhecido pelo autor, que aqui renova seu reconhecimento especial. Por fim, a primorosa qualidade da

composição gráfica pela Francisca Valéria é grandemente reconhecida e gratificada pelo autor.

Sobre o autor – Odilon A. P. Tavares (76) é Doutor em Física pelo CBPF (1978) onde é Pesquisador Titular desde 1985. Liderou e/ou participou de vários projetos de pesquisa científica em colaboração com instituições brasileiras e estrangeiras. É autor em cerca de 130 publicações, 100 delas em revistas de circulação internacional, sobre temas relacionados à radioatividade natural e artificial (desintegrações por emissão de 1-próton, 2-prótons, partículas alfa, clusters nucleares mais pesados e fissão) e reações nucleares de fissão, “spallation” e íons pesados. Um dos descobridores, em 1975, da radioatividade exótica, na qual o núcleo atômico emite fragmentos nucleares mais pesados do que a partícula alfa, atualmente é pesquisador colaborador vinculado à Coordenação de Cosmologia, Astrofísica e Interações Fundamentais–COSMO do CBPF/MCTIC.

-
- [1] Julius Elster, Hans Geitel: Versuche an Becquerelstrahlen [Experimentos sobre radiações Becquerel], *Ann. Physik* **302**, 735 (1898).
 - [2] E. Rutherford and T. Royds: The Nature of the α Particle from Radioactive Substances, *Phil. Mag.* **17**, 281 (1909).
 - [3] E. Rutherford: Collision of α -Particles with Light Atoms. IV. An Anomalous Effect in Nitrogen, *Phil. Mag.* **37**, 581 (1919).
 - [4] M. Stanley Livingston: The History of the Cyclotron, *Proc. 7th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications*, Zürich (Switzerland) (Aug. 1975), page 635.
 - [5] O. Hahn, F. Strassmann: Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle’ [Sobre a identificação e o comportamento dos metais alcalino-terrosos provenientes da irradiação de urânio por meio de nêutrons]: *Naturwiss.* **27**, 11 (1939).
 - [6] O. Hahn, F. Strassmann: Nachweis der Entstehung aktiver Bariumisotope aus Uran und Thorium durch Neutronenbestrahlung; Nachweis weiterer aktiver Bruchstücke bei der Uranspaltung [Identificação da produção de isótopos ativos de Bário pela irradiação de urânio e tório por nêutrons; identificação de outros fragmentos da fragmentação do urânio], *Naturwiss.* **27**, 89 (1939).
 - [7] O. Hahn, F. Strassmann: Weitere Spaltprodukte aus der Bestrahlung des Urans mit Neutronen [Outros produtos de fissão da irradiação de urânio com nêutrons], *Naturwiss.* **27**, 529 (1939).
 - [8] Lise Meitner and O. R. Frisch: Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction, *Nature* **143**, 239 (1939); Products of the Fission of the Uranium Nucleus, *Nature* **143**, 471 (1939).
 - [9] O. R. Frisch: Physical Evidence for the Division of Heavy Nuclei under Neutron Bombardment, *Nature* **143**, 276 (1939).
 - [10] Maria Goeppert Mayer: On Closed Shells in Nuclei. II., *Phys. Rev.* **75**, 1969 (1949); Nuclear Configurations in the Spin-Orbit Coupling Model. I. Empirical Evidence, *Phys. Rev.* **78**, 16 (1950); II. Theoretical Considerations, *Phys. Rev.* **78**, 22 (1950).
 - [11] Hans E. Suess, Otto Haxel, J. Hans D. Jensen: Zur Interpretation der ausgezeichneten Nucleonenzahlen im Bau der Atomkerne: II. Mitteilung [Para a interpretação do excelente número de núcleons na construção de núcleos atômicos: II. Notícia], *Naturwiss.* **36**, 153 (1949).
 - [12] J. Hans D. Jensen, Hans E. Suess, Otto Haxel: Modellmässige Deutung der ausgezeichneten Nucleonenzahlen im Kernbau [Modelo de Interpretação do excelente número de núcleons na estrutura nuclear], *Naturwiss.* **36**, 155 (1949). Ver também: Otto Haxel, J. Hans D. Jensen and Hans E. Suess: On the “Magic Numbers” in Nuclear Structure, *Phys. Rev.* **75**, 1766 (1949).
 - [13] J. Chadwick: The Existence of a Neutron, *Proc. Roy. Soc. (London)* **A136**, 692 (1932).
 - [14] E. Fermi, E. Amaldi, O. D’Agostino, F. Rasetti and E. Segrè: Artificial Radioactivity Produced by Neutron Bombardment, *Proc. Roy. Soc. (London)* **A146**, 483 (1934).
 - [15] E. Fermi: Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92, *Nature* **133**, 898 (1934).
 - [16] Ida Noddack: Über das Element 93 [Sobre o Elemento 93],

- Ange. Chemie* **47**, 653 (1934).
- [17] A. J. Dempster: Positive-Ray Analysis of Potassium, Calcium and Zinc, *Phys. Rev.* **20**, 631 (1922).
- [18] A. J. Dempster: Isotopic Composition of Uranium, *Nature* **136**, 180 (1935).
- [19] Alfred O. Nier: The isotopic constitution of Uranium and the half-lives of the Uranium Isotopes. I. *Phys. Rev.* **55**, 150 (1939).
- [20] Laura Fermi: *Atoms in the family. My Life with Enrico Fermi*, University of Chicago Press (Chicago, 1954).
- [21] Ruth Lewin Sime: *Lise Meitner, A Life in Physics*, University of California Press, Berkeley (1996) [Chap. 8: Escape; Chap. 9: Exile in Stockholm].
- [22] Ruth Lewin Sime: *Lise Meitner, A Life in Physics*, University of California Press, Berkeley (1996) [Chap. 10: The Discovery of Nuclear Fission].
- [23] H. von Halban, Jr., F. Joliot and L. Kowarski: Number of Neutrons Liberated in the Nuclear Fission of Uranium, *Nature* **143**, 680 (1939); Liberation of Neutrons in the Nuclear Explosion of Uranium, *Nature* **143**, 470 (1939).
- [24] H. L. Anderson, E. Fermi and Leo Szilard: Neutron production and absorption in Uranium, *Phys. Rev.* **56**, 284 (1939).
- [25] S. Flügge: Kann der Energieinhalt der Atomkerne technisch nutzbar gemacht werden? [Pode a energia dos núcleos atômicos ser aproveitada tecnicamente?], *Naturwiss.* **27**, 402 (1939).
- [26] Geoffrey Blainey: *Uma Breve História do Século XX* (versão brasileira da editora, 1ª ed.), Editora Fundamento Educacional (São Paulo, 2008), Caps. 11–14.
- [27] N. Bohr: Resonance in Uranium and Thorium Disintegrations and the Phenomenon of Nuclear Fission, *Phys. Rev.* **55**, 418 (1939).
- [28] J. Frenkel: On the Splitting of Heavy Nuclei by Slow Neutrons, *Phys. Rev.* **55**, 987 (1939);
- [29] Niels Bohr and John A. Wheeler: The Mechanism of Nuclear Fission, *Phys. Rev.* **56**, 426 (1939).
- [30] K. A. Petrzhak, G. N. Flerov, *Doklady Akad. Nauk SSSR* **28**, 500 (1940); *Sov. Phys. JETP* **10**, 1013 (1940); *J. Phys. USSR* **3**, 275 (1940).
- [31] K. A. Petrzhak, G. N. Flerov: Spontaneous Fission of Nuclei, *Sov. Phys. USPEKHI* **4**, 305 (1961).
- [32] Norman E. Holden and Darleane C. Hoffman: Spontaneous Fission Half-Lives for Ground-State Nuclides, *Pure Appl. Chem.* **72**, 1525 (2000).
- [33] A. V. Podgurskaya, V. I. Kalashimikova, G. A. Stoliarov, E. D. Vorobev, G. N. Flerov: The spontaneous fission of Thorium, *Sov. Phys. JETP* **1**, 392 (1955).
- [34] G. N. Flerov, D. S. Klochkov, V. S. Skobkin, V. V. Terentiev: Spontaneous Division of Th-232 and the Stability of Nucleons, *Doklady Akad. Nauk SSSR* **118**, 69 (1958).
- [35] R. Bonetti, C. Chiesa, A. Guglielmetti, R. Matheoud, G. Poli, V. L. Mikheev and S. P. Tretyakova: First observation of spontaneous fission and search for cluster decay of ^{232}Th , *Phys. Rev. C* **51**, 2530 (1995).
- [36] G. Audi, F. G. Kondev, Meng Wang, W. J. Huang and S. Naimi: The NUBASE2016 evaluation of nuclear properties, *Chin. Phys. C* **41**, 030001 (2017).
- [37] O. R. Frisch and R. Peierls: Frisch-Peierls Memorandum, March 1940 (On the Construction of a “Super-bomb” based on a Nuclear Chain Reaction in Uranium), *atomicarchive.com*, Historical Documents and Reports, The Nuclear Age Begins (acesso em 12/fev/2019).
- [38] J. W. Kennedy, G. T. Seaborg, E. Segrè, and A. C. Wahl: Properties of 94 (239), *Phys. Rev.* **70**, 555 (1946) (recebido para publicação em maio de 1941).
- [39] Alfredo Marques: *Projeto Manhattan*, em “CBPF: da Descoberta do Méson π aos Dez Primeiros Anos”, CBPF-Ciência e Sociedade-031/97, Rio de Janeiro (1997); ver também *Energia Nuclear e Adjacências*, EdUERJ (Rio de Janeiro, 2009)
- [40] H. D. Smyth: Atomic Energy for Military Purposes, *Rev. Mod. Phys.* **17**, 351 (1945).
- [41] Odilon A. P. Tavares: Fissão nuclear: energia farta disponível para a humanidade, *Ciência e Sociedade* **3** (2), 1–34 (2015), CBPF-CS-002/2015
- [42] W. Reisdorf, J. P. Unik, H. C. Griffin and L. E. Glendenin: Fission fragment K X-ray emission and nuclear charge distribution for thermal neutron fission of ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu and spontaneous fission of ^{252}Cf , *Nucl. Phys.* **A177**, 337 (1971).
- [43] Linus Pauling: *College Chemistry*, W. H. Freeman & Company, 2nd Edition (San Francisco, CA, 1957), Chap. 32, page 666.
- [44] World Nuclear Association: *World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements* (Feb. 2019).
- [45] V. Parsonnet, J. Driller, D. Cook, S. A. Rizvi: Thirty-One Years of Clinical Experience with “Nuclear-Powered” Pacemakers, *PACE (Pacing and Clinical Electrophysiology)* **29**, 195 (2006).
- [46] Ian Hore-Lacy: *Nuclear Energy in the 21st Century*, World

- Nuclear University Press, World Nuclear Association, Academic Press (2006), Elsevier Inc. (2007).
- [47] International Atomic Energy Agency: New Technologies for Seawater Desalination Using Nuclear Energy, IAEA-TECDOC-1753 (Vienna, 2015).
- [48] Guilherme Camargo: *O Fogo dos Deuses. Uma história da energia nuclear*, Contraponto Editora (Rio de Janeiro, 2006).
- [49] Ana Maria R. de Andrade: *A Opção Nuclear. 50 anos rumo à autonomia*. Comissão Nacional de Energia Nuclear-CNEN e Museu de Astronomia e Ciências Afins-MAST/Ministério da Ciência e Tecnologia-MCT (2006).
- [50] Revista BRASIL NUCLEAR (Informativo da Associação Brasileira de Energia Nuclear) Nº 49 (dezembro 2018).

Notas Técnicas é uma publicação de trabalhos técnicos relevantes, das diferentes áreas da física e afins, e áreas interdisciplinares tais como: Química, Computação, Matemática Aplicada, Biblioteconomia, Eletrônica e Mecânica entre outras.

Cópias desta publicação podem ser obtidas diretamente na página web <http://revistas.cbpf.br/index.php/nt> ou por correspondência ao:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Área de Publicações
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4^o andar
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ
Brasil
E-mail: alinecd@cbpf.br/valeria@cbpf.br
<http://portal.cbpf.br/publicacoes-do-cbpf>

Notas Técnicas is a publication of relevant technical papers, from different areas of physics and related fields, and interdisciplinary areas such as Chemistry, Computer Science, Applied Mathematics, Library Science, Electronics and Mechanical Engineering among others.

Copies of these reports can be downloaded directly from the website <http://notastecnicas.cbpf.br> or requested by regular mail to:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Área de Publicações
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4^o andar
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ
Brazil
E-mail: alinecd@cbpf.br/valeria@cbpf.br
<http://portal.cbpf.br/publicacoes-do-cbpf>