Ciência e Sociedade (CS), Rio de Janeiro, CBPF, v. 1, n. 1, 2013
dx.doi.org/10.7437/CS2317-4595/2013.01.007

Conversando sobre o Núcleo Atômico

Odilon A. P. Tavares*

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF/MCTI,

Rua Dr. Xavier Sigaud 150, Rio de Janeiro, RJ – 22290-180, Brasil

Resumo

Um rápido passeio nos assuntos sobre ciência nuclear e aplicações é feito de uma perspectiva histórica na qual as principais ideias e personagens que revolucionaram o século XX aparecem no caminho. Físicos brasileiros são também encontrados nessa caminhada. São aqui abordados, ainda que brevemente, as investigações que levaram ao conhecimento sobre a natureza e constituição do núcleo atômico, desintegrações e reações nucleares, a energia que vem da fissão de núcleos pesados e da fusão de núcleos leves, os mésons pi e a criação do CBPF, os usos pacíficos da energia nuclear no Brasil e no mundo, e o custo da pesquisa fundamental em Física Nuclear nos dias de hoje. Percebe-se que o Brasil vem se equiparando, mesmo que devagar, aos países mais adiantados, sobretudo no que diz respeito à geração de potência elétrica de origem nuclear para consumo, e à produção e ao uso de radioisótopos na Medicina.

Conteúdo

– Prólogo 2
– César Lattes e Hervásio de Carvalho 3
– Descoberta do núcleo atômico 4
– Primeiro constituinte do núcleo atômico: o próton 5
– A Mecânica Quântica e a impossibilidade de haver elétrons no núcleo. 6
– Descoberta do nêutron 7
– Equivalência entre massa e energia: $E = mc^2$ 8
– Massas atômicas e abundância isotópica 9
– Descobertas em Roma e Paris, e prenúncio em Berlim . 10
– Fissão nuclear do urânio e tório provocada por nêutrons 12
– Fusão termonuclear de núcleos leves 13
– 1939: o ano das fontes primárias de energia 14
– Reação de fissão em cadeia autossustentada e a bomba atômica 15
– Alguns cientistas do Projeto Manhattan 16
– Coesão nuclear, César Lattes e os mésons pi 17
– 1949: criação do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas 18
– Instituições originárias da criação do CBPF 19
– Pesquisa fundamental em Física Nuclear 20
– Elementos superpesados 21
– Radioatividade exótica 22
– Benefícios das Ciências Nucleares para a sociedade ... 23
– Combustível nuclear no mundo 24
– Reatores nucleares híbridos ADS's 25
– Potência elétrica por fusão termonuclear controlada ... 26
– Geração de energia nucleoelétrica no Brasil 27
– Submarino brasileiro a propulsão nuclear - Prosub 28
– Reator Multipropósito Brasileiro-RMB 29
– Epílogo: despertar para o nuclear 30
– Agradecimentos 31
– Sobre o autor 31

*Electronic address: oaptavares@cbpf.br

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS

(Fundado em 15 de janeiro de 1949)

CONVERSANDO SOBRE O NÚCLEO ATÔMICO

Odilon A. P. Tavares - CBPF/MCTI

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

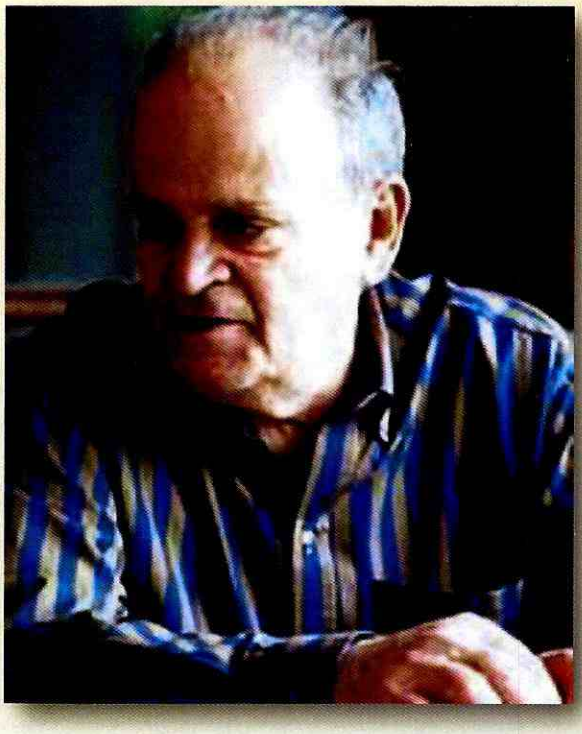
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

GOVERNO FEDERAL BRASIL PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA

- Rio de Janeiro, 27 de junho de 2013 -

Prólogo

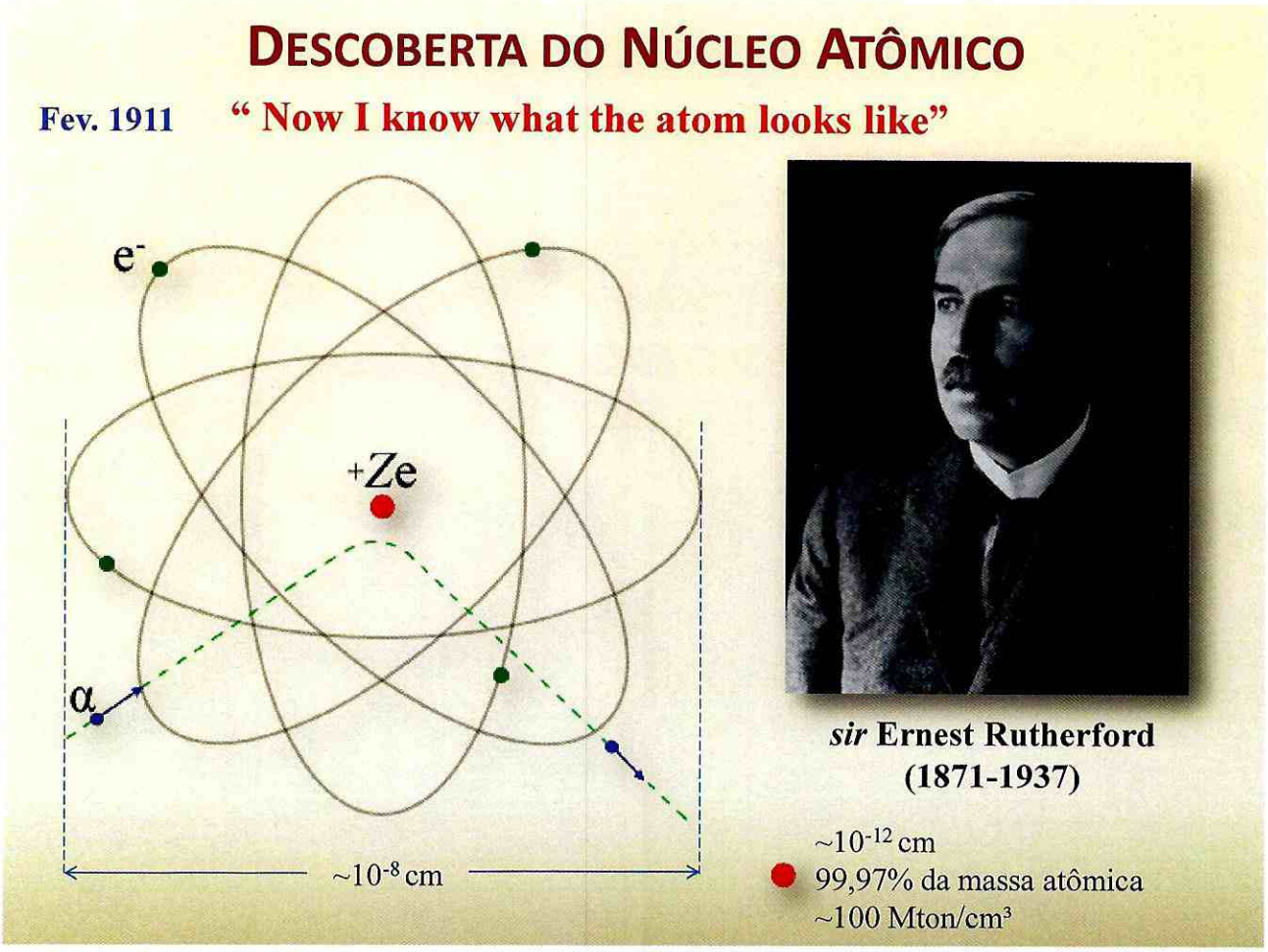
Em abril do ano em curso tomei conhecimento de que a série *Ciência e Sociedade*, editada pelo CBPF (CS-CBPF), estava completando exatos 50 anos em 2013. Coincidentemente, colegas meus me procuraram para conversar sobre uma homenagem que estavam organizando em comemoração aos 70 anos que eu completaria também este ano. Então, propuslhes como contribuição de cunho científico oferecer aos presentes na data combinada para o evento (27/junho) uma palestra que versasse sobre vários aspectos relacionados à Física Nuclear e suas Aplicações. "*Conversando sobre o Núcleo Atômico*" ficou sendo o título definido para a palestra que, agora, vem aqui registrada na forma de texto-legenda como contribuição ao volume especial que está sendo dedicado aos 50 anos de existência da série *Ciência e Sociedade*.



César M G Lattes
(1924-2005)

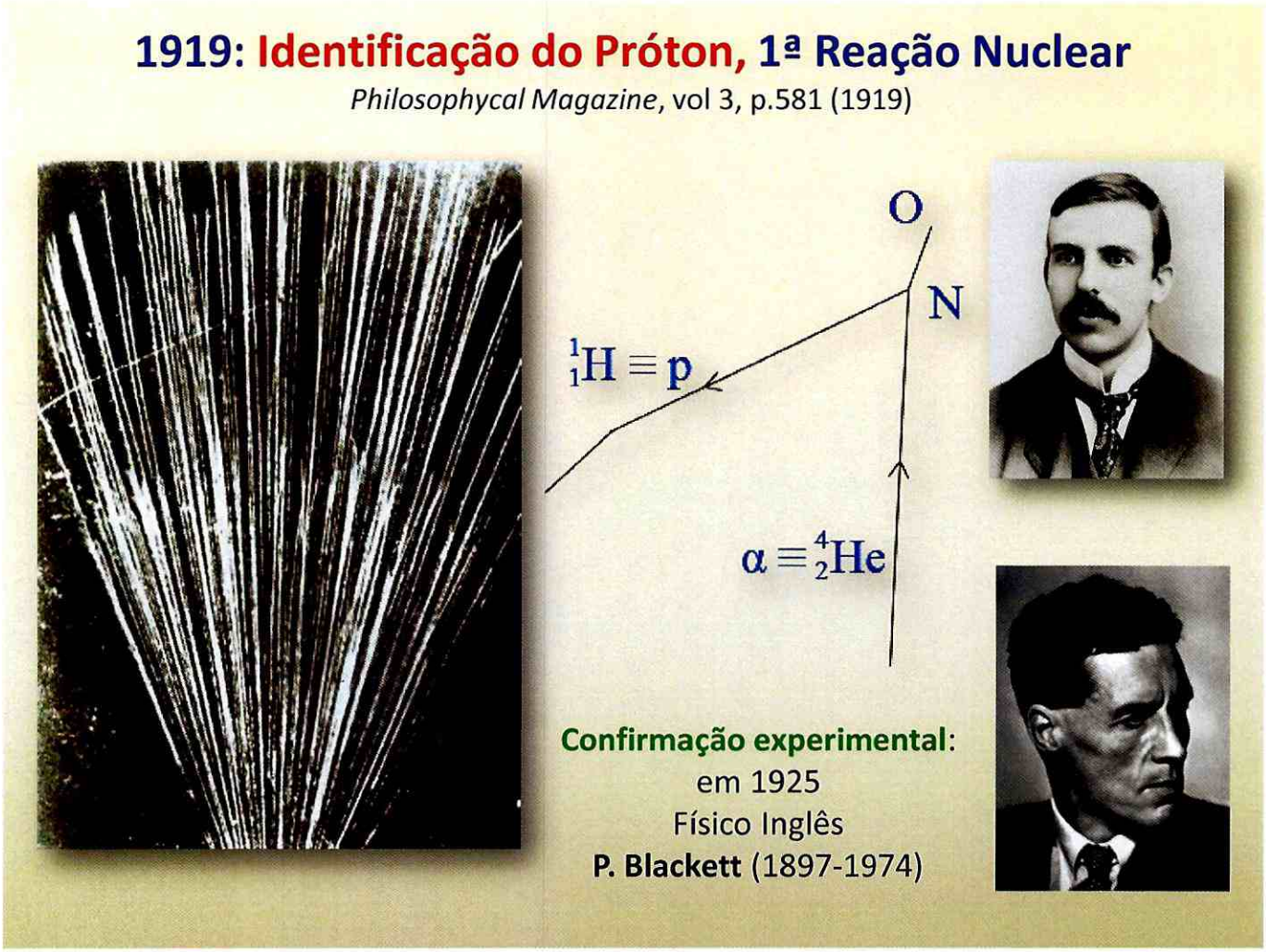
Hervásio G de Carvalho
(1916-1999)

César Lattes e Hervásio de Carvalho foram dois dos fundadores e os primeiros físicos nucleares do CBPF. César Lattes é tido como "nosso herói nuclear", no dizer do jornalista Cássio L. Vieira. Descobridor do méson pi na radiação cósmica ao nível de montanha em 1947, e no Cíclotron da Universidade da Califórnia em Berkeley (EUA) em 1948, em torno do seu nome foi criado no Rio de Janeiro, em janeiro de 1949, o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas-CBPF. De César Lattes aprendi que a história da ciência que se faz é tão importante quanto a própria ciência. Hervásio de Carvalho, pessoa e cientista extraordinários, foi membro do CBPF durante 35 anos (Diretor Científico no período 1964–1968) e ali criou um grupo de pesquisa dedicado a temas de investigação relacionados à radioatividade, às reações nucleares e à fissão, sempre buscando colaborações com os melhores laboratórios e centros de pesquisa estrangeiros da época, tais como o de Frascati (Itália), CERN (Suíça), Brookhaven (EUA), DESY (Hamburg, Alemanha), ANL (Argonne, Illinois, EUA), SLAC (Stanford, EUA) e outros. Particularmente, Hervásio foi meu mentor, conselheiro e, sobretudo, um grande amigo. Dele aprendi, dentre muitas lições, que a Física Nuclear trouxe e tem trazido ainda hoje inúmeros benefícios e bem-estar para a sociedade, como a geração de potência elétrica para consumo em geral, e o emprego de radioisótopos em procedimentos médicos de diagnóstico e tratamento. Com ambos, Lattes e Hervásio, fui buscar inspiração para compor o material da presente palestra de tal modo a atender a um público bastante diversificado. Espero que venha satisfazer a todos.



A descoberta do núcleo atômico em fevereiro de 1911 pelo físico neozelandês *sir* Ernest Rutherford está entre as dez mais importantes realizações em toda a história das ciências. Durante a primeira década do século XX, a partir do entendimento dos resultados de uma série de experimentos conduzidos por Rutherford e seus assistentes envolvendo o espalhamento de partículas alfa (átomos do gás hélio duplamente ionizado) por folhas finíssimas de mica e ouro, ele pôde concluir que o átomo era constituído de uma região central, ultraminúscula, contendo toda a carga elétrica positiva e praticamente toda a massa do átomo. A essa região central chamou de núcleo atômico. Rutherford foi capaz de estimar a dimensão do núcleo como sendo aproximadamente dez mil vezes menor que a do próprio átomo (que por sua vez é tão minúsculo quanto um centésimo do milionésimo do centímetro).

Pôde também avaliar a densidade de matéria concentrada no núcleo atômico como algo em torno a cem milhões de toneladas por centímetro cúbico, resultado que deixou a todos com enorme perplexidade. Os elétrons do átomo estariam de alguma forma orbitando ao redor do núcleo, como que formando um minúsculo sistema solar. A descrição dessas órbitas foi, dois anos mais tarde, apresentada por um de seus assistentes, o físico dinamarquês Niels Bohr (1885–1962), quando deu pela primeira vez a explicação das raias dos espectros de emissão dos elementos de baixo número atômico. No período 1911–1913 uma série de experimentos sobre espalhamento de partículas alfa em lâminas finíssimas de diferentes metais veio a confirmar a conclusão de Rutherford sobre a existência do núcleo atômico, embora tal descoberta tivesse sido recebida com indiferença pelos cientistas da época.



Continuando com seus experimentos de bombardear diversos elementos com partículas alfa provenientes de fontes naturais de raios alfa (rádio, polônio), Rutherford conseguiu identificar, em 1919, o primeiro constituinte do núcleo atômico, o próton, analisando o que chamou de primeira reação nuclear: alfa + nitrogênio → próton + oxigênio. Naquela época, o instrumento de registro das trajetórias e da medida das partículas carregadas era a câmara de nuvem (ou de neblina), inventada pelo físico escocês Charles Wilson (1869–1959). Seu funcionamento baseia-se no princípio de condensação do vapor d'água nos centros de condensação criados pelos íons produzidos ao longo da trajetória da partícula carregada.

A confirmação experimental da identificação do próton a partir de reações nucleares induzidas por partículas alfa veio seis anos mais tarde, em 1925, quando o físico inglês Patrick Blackett conseguiu separar meia dúzia de fotografias (como a da figura) da análise de cerca de vinte e cinco mil fotografias de reações registradas numa câmara de nuvem, onde ficava evidenciada sem ambiguidade a trajetória dos prótons. O próton é o núcleo do átomo de hidrogênio, ou o átomo de hidrogênio ionizado, isto é, que perdeu seu elétron. O próton tem uma unidade de carga elétrica e uma unidade de massa. O nome próton significa "primeiro" (o primeiro constituinte do núcleo atômico).

DE QUE É FEITO O NÚCLEO ATÔMICO?

1920: Rutherford previu a existência de "uma partícula neutra" ≈ próton + elétron

Meados da década de 1920:
MECÂNICA QUÂNTICA,
nova teoria, não-determinista

1927: Heisenberg anuncia o "Princípio de Incerteza"

Físico alemão
Werner Heisenberg
(1901-1976)

"Posição e quantidade de movimento de uma partícula não podem ser determinados simultaneamente com precisão desejada"

$$\Delta x \cdot \Delta p \sim h, \quad h = 4{,}14 \cdot 10^{-21}\ \mathrm{MeV} \cdot \mathrm{s}$$

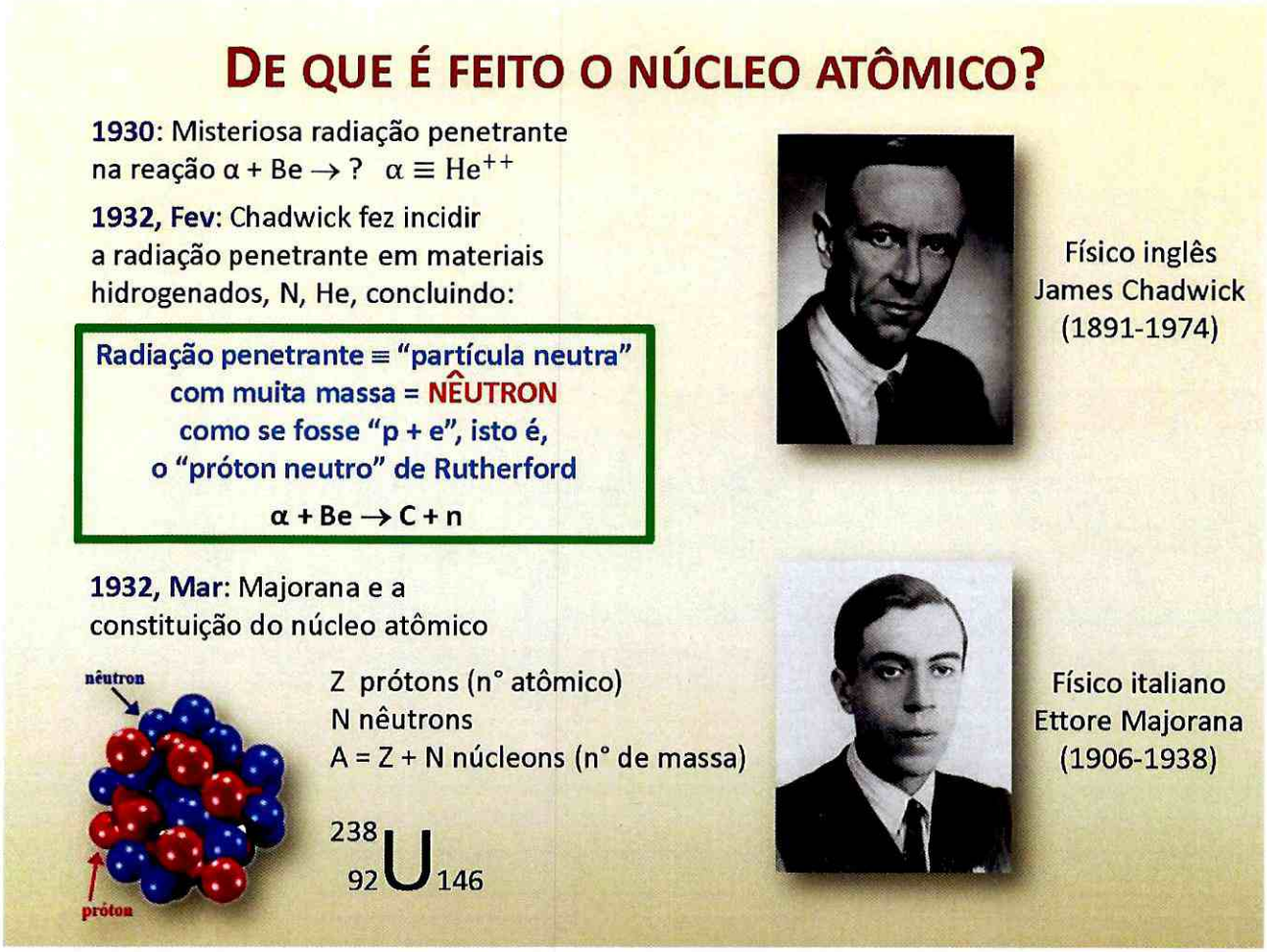
Energia cinética dos elétrons no decaimento beta:

Impossibilidade de haver elétrons no núcleo

60 MeV! Previsto pelo Princ. Incert.
< 3 MeV Experimentalmente

1928: Gamow, Condon e Gurney: MECÂNICA QUÂNTICA e o **efeito túnel para emissão alfa**

Naquela época (início da década de 1920), os físicos acreditavam que os elétrons também faziam parte do núcleo atômico. O físico inglês James Chadwick (1891–1974), por orientação de Rutherford, havia demonstrado por meio de experimentos superengenhosos que o número de cargas elétricas positivas do núcleo do átomo de um elemento era exatamente o número atômico desse elemento, isto é, o número de elétrons do átomo. Pensava-se, por exemplo, que o alumínio (número atômico 13 e número de massa 27) possuía em seu núcleo 14 elétrons e $14 + 13 = 27$ prótons, totalizando 13 cargas positivas que se neutralizavam com as 13 cargas negativas dos elétrons orbitais. Rutherford chegou a predizer em 1920 a existência de uma "partícula neutra" no núcleo, que seria constituída de um próton e um elétron. Naquele momento, entretanto, nascia uma nova teoria física, não-determinista, a chamada Mecânica Quântica (ou Ondulatória), que se seguiu à hipótese da dualidade onda-corpúsculo para as partículas, formulada em 1924 pelo físico francês Louis de Broglie (1892–1987), e verificada em 1927 pelos físicos norte-americanos Clinton Davisson (1881–1958) e Lester Germer (1896–1971) em seus experimentos de difração de elétrons. Neste mesmo ano, o físico alemão Werner Heisenberg (1901–1976), um dos criadores da Mecânica Quântica, anunciou o seu "Princípio de Indeterminação" [posição, x, e quantidade de movimento, p, de uma partícula não podem ser determinados simultaneamente com precisão desejada, suas incertezas estando ligadas pela constante de Planck, isto é, $\Delta x \times \Delta p \sim h$ ($h = 4,14 \times 10^{-21}$ MeV·s)] [costuma-se em Física Nuclear expressar energias em MeV (milhão de elétron-volt), valendo a correspondência 1 MeV = 1,6 $\times$ 10^{-13} Joule = 3,8 $\times$ 10^{-14} caloria]. Quando aplicado ao núcleo atômico, o Princípio de Incerteza dava como resultado a impossibilidade de haver elétrons no núcleo, porque elétrons no decaimento beta eram observados com energia menor do que 3 MeV, enquanto a teoria previa uma energia cerca de 60 MeV. A Mecânica Quântica, no entanto, foi capaz de explicar quantitativamente as taxas de emissão alfa natural pelo mecanismo conhecido por efeito túnel (ou tunelamento quântico), introduzido em 1928 pelo físico russo-norte-americano George Gamow (1904–1968) e, independentemente, pelo físico inglês Ronald Gurney (1898–1953) e o físico norte-americano Edward Condon (1902–1974).



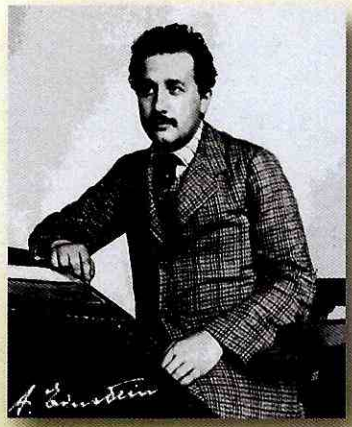
Eis que, em 1930, dois físicos alemães, Walther Bothe (1891–1957) e seu assistente Herbert Becker (1887–1955), observaram uma radiação misteriosa e muito penetrante toda vez que bombardeavam berílio com partículas alfa emitidas do rádio. Em Paris, a química francesa Irène Curie (1897–1956) e seu marido, o físico francês Frédéric Joliot (1910–1958), se debruçaram sobre esse mistério, e em 18 de janeiro de 1932 observaram que prótons energéticos eram detectados toda vez que a tal radiação penetrante passava em materiais hidrogenados (parafina, água e outros). O mistério acabou sendo desvendado finalmente por Chadwick (mencionado aqui anteriormente) nas semanas seguintes, quando fez a radiação penetrante incidir sobre diferentes gases (hidrogênio, hélio e nitrogênio), e, comparando entre si as velocidades máximas adquiridas pelos núcleos bombardeados, ele pode concluir tratar-se de uma partícula neutra, com muita massa, bem próxima à massa do próton.

Suas conclusões foram anunciadas em 17 de fevereiro do mesmo ano, e à partícula neutra deu o nome de **nêutron**, como se fosse "um próton + um elétron", isto é, o "próton neutro", que Rutherford havia predito doze anos antes. A reação nuclear que estava acontecendo era alfa + berilio → carbono + nêutron. Logo imediatamente, em março de 1932, o jovem físico italiano Ettore Majorana (1906–1938) pôde afirmar sobre a constituição do núcleo atômico como sendo formado de prótons e nêutrons. O número de prótons costuma-se representar por Z, o número de unidades de carga elétrica nuclear, ou seja, o número atômico, e o de nêutrons por N, sendo a soma $A = Z + N$ o número de massa, ou o número de núcleons. A notação para as espécies nucleares é feita com o símbolo ${}^{A}_{Z}X$, onde X representa o elemento químico.

... ainda em 1932

1ª Verificação Experimental Direta da **equivalência entre massa e energia** ($m \leftrightarrow E$) $E = mc^2 = m_0c^2 + E_{cinética}$

Teoria da Relatividade Especial, 1905

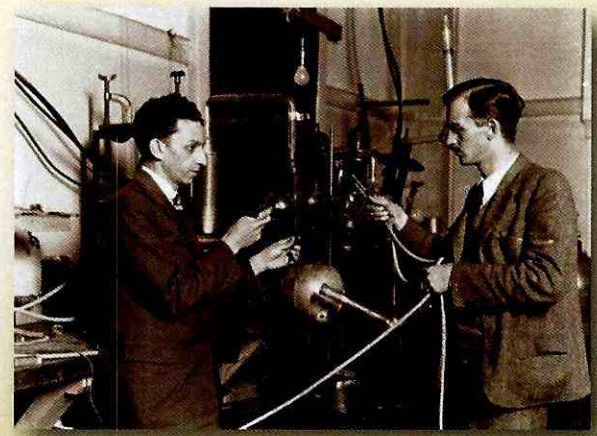


Físico alemão **Albert Einstein** (1879-1955)

$^1p + ^7Li \rightarrow ^4\alpha + ^4\alpha$

Decréscimo de massa = energia cinética medida das alfas

Físico inglês John Cockcroft (1897-1967)
Físico irlandês Ernest Walton (1903-1995)



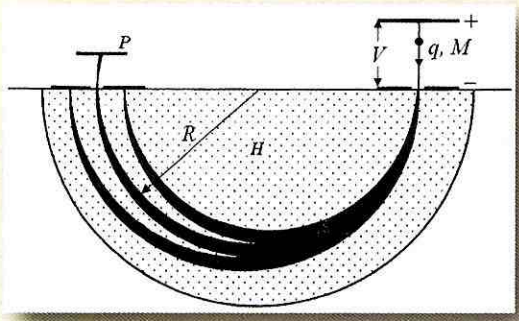
Cockcroft e **Walton** no Laboratório Cavendish Cambridge (Inglaterra)

O ano de 1932 foi considerado por muitos cientistas como um ano maravilhoso – pelo menos, para a Física Nuclear. Muitas descobertas e feitos notáveis aconteceram naquele momento: a construção do primeiro cíclotron, então com 27 polegadas, na Universidade da Califórnia em Berkeley (EUA) pelos físicos norte-americanos Ernest Lawrence (1901–1958) e Milton Livingston (1905–1986), máquina que permitiu acelerar prótons a uma energia de 3,5 MeV, e partículas alfa até 14 MeV. Outro feito importante foi a descoberta do pósitron (o elétron positivo), conseguido pelo físico norte-americano Carl Anderson (1905–1991), quando observou a passagem da partícula proveniente da radiação cósmica numa câmara de nuvem colocada num local de campo magnético. Também naquele ano deu-se a descoberta do deutério (o hidrogênio de massa 2, conhecido por hidrogênio pesado, com o qual se prepara a água pesada) anunciada pelos físicos norte-americanos Harold Urey (1893–1981), Ferdinand Brickwedde (1903–1989) e George M. Murphy (1905–1968).

Destaque especial, no entanto, foi a comprovação direta em laboratório da equivalência entre massa e energia, expressa pela famosa equação $E = mc^2$. O feito foi conseguido pelos físicos, o inglês John Cockcroft (1897–1967) e o irlandês Ernest Walton (1903–1995), que produziram partículas alfa energéticas a partir do bombardeio de alvos finos de lítio e flúor com prótons acelerados a uma energia de 0,7 MeV. Já era sabido na época o valor das massas dos núcleos envolvidos nas reações do próton com o lítio e o flúor. Medindo a energia cinética das partículas alfa eles puderam comprovar diretamente que o valor encontrado correspondia ao decréscimo de massa nas reações induzidas pelos prótons. Cockcroft e Walton foram também os pioneiros em utilizar um acelerador para produzir desintegrações nucleares. Passaram-se 27 anos desde o estabelecimento em 1905 da relação $E = mc^2$, decorrente da Teoria da Relatividade Especial do físico alemão Albert Einstein (1879–1955), até ela ser pela primeira vez comprovada diretamente em laboratório, por Cockcroft e Walton, em 1932.

~ 1920-1938: MASSAS ATÔMICAS (~ NUCLEARES)

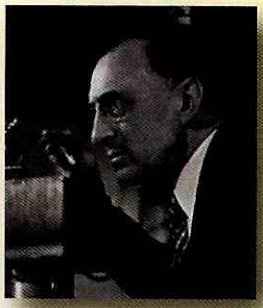
ISÓTOPOS e Abundância Isotópica



1920: Espectrômetro de Dempster

1935: Espectrômetro de Nier

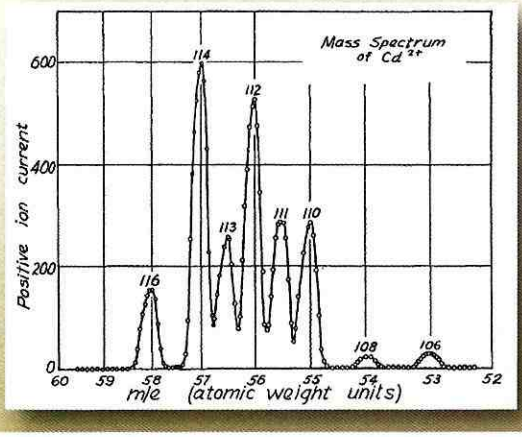
$$MV = \frac{q}{2}(R \cdot H)^2$$



Físico canadense
Arthur Dempster
(1886-1970)

Descobridor do isótopo U-235 em 1935

Isótopos do Cádmio

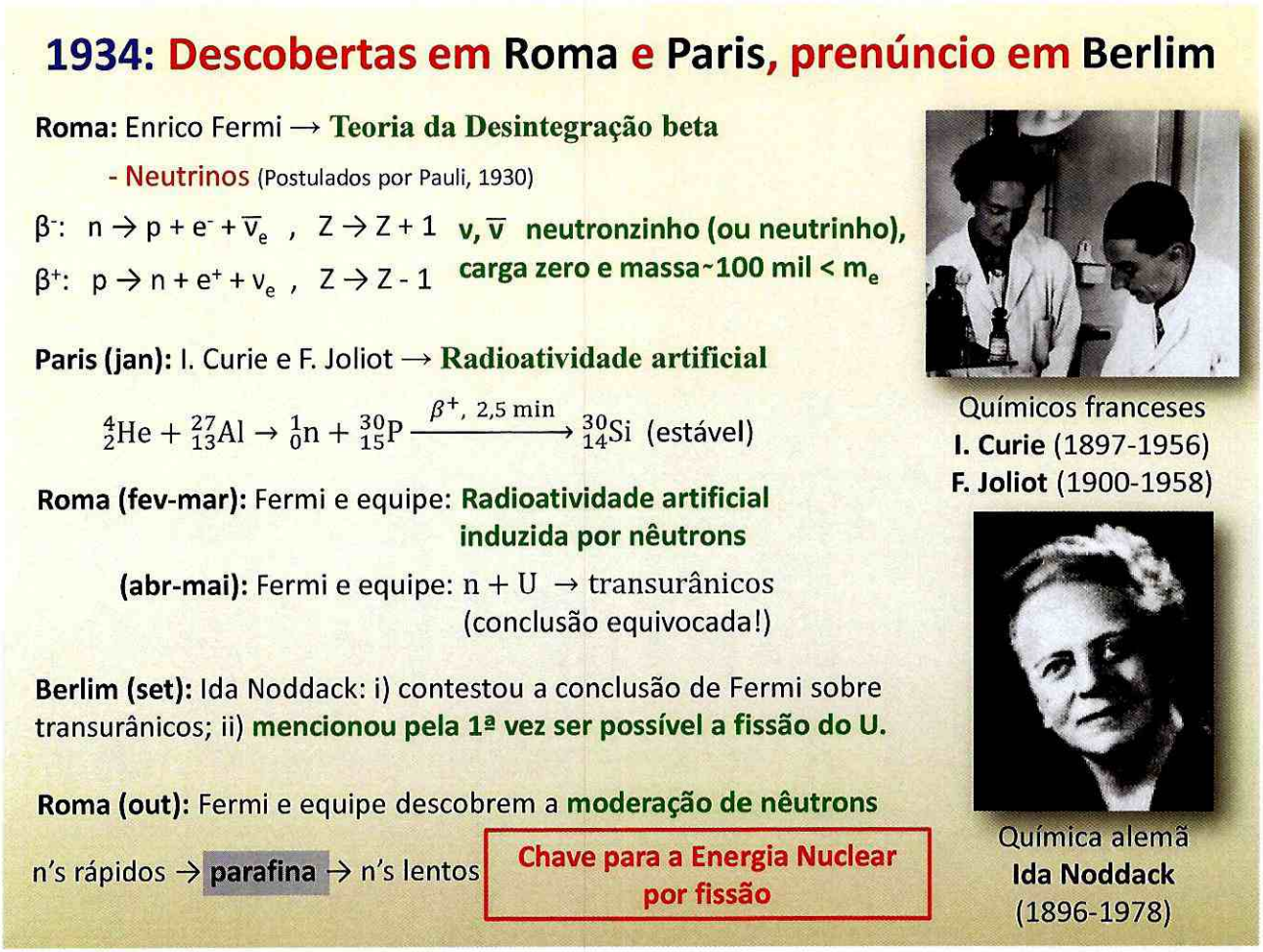


Físico americano
Alfred Nier
(1911-1994)

A palavra isótopo é a combinação de *iso*, que significa "mesmo", e *topo*, que quer dizer "posição". *Isótopos* significa, portanto, que ocupam a mesma posição. Aqui trata-se de espécies nucleares diferentes; porém, de um mesmo elemento químico, isto é, núcleos diferentes que ocupam a mesma posição na Tabela Periódica dos Elementos. Isótopos foram percebidos pela primeira vez em 1902 pelo químico inglês Frederick Soddy (1887−1956), quando notou que o chumbo proveniente das desintegrações radioativas sucessivas a partir do tório era ligeiramente mais pesado do que aquele proveniente do urânio. O termo isótopo foi introduzido na linguagem científica por Soddy em 1911. A variedade isotópica de um dado elemento resulta das diferenças acentuadas de massa dos diferentes núcleos desse elemento, justamente por eles possuírem números diferentes de nêutrons.

Durante as décadas de 1920 e 1930, muita tecnologia foi desenvolvida na construção dos instrumentos chamados espectrômetros de massa, de grande precisão, e assim foi possível obter a composição isotópica de praticamente todos os elementos. Os aparelhos mais difundidos na época foram o desenvolvido em 1920 pelo físico canadense Arthur Dempster (1886−1970), quem inclusive descobriu, em 1935, o isótopo de urânio de número de massa 235 (^{235}U), e o do físico norte-americano Alfred Nier (1911−1994), um dos que obtiveram a composição isotópica do cádmio (ver figura). A quantidade do isótopo correspondente a certa massa M de um dado elemento no estado de carga q é obtida registrando-se a quantidade de carga que chega no coletor P por unidade de tempo em decorrência da diferença de potencial V, mantendo-se fixos o raio R da trajetória do íon e a intensidade do campo magnético, H, como se ilustra acima.

O ano de 1934 foi de importantes e novas surpresas na Física Nuclear, mas também cruel para o mundo ocidental. Em Roma, o físico italiano Enrico Fermi (1901–1954) deu a explicação, até hoje válida, para a desintegração beta, isto é, a emissão natural (ou artificial) de elétrons (ou pósitrons) pelo núcleo atômico. Para tanto, ele se valeu de uma partícula hipotética chamada neutrino, postulada em 1930 pelo físico austríaco Wolfgang Pauli (1900–1958). Neutrinos são os neutrozinhos ou neutrinhos, partículas de carga elétrica nula e massa (hoje se sabe) cerca de cem mil vezes menor que a do elétron. Eles tomam parte no decaimento beta conservando a energia total do processo e possibilitando explicar a distribuição contínua da energia cinética dos elétrons emitidos, desde zero até o valor máximo permitido pelo balanço de massa-energia. Em Paris, o casal Joliot-Curie, em janeiro, descobriu a radioatividade artificial quando bombardearam alumínio com partículas alfa, obtendo um nêutron e fósforo ativo, emissor de pósitron, com meia-vida de dois minutos e meio, transformando-se no produto estável silício. Os nêutrons, como não possuíssem carga elétrica, foram usados por Fermi e sua equipe em Roma no período fevereiro-março para provocar radioatividade artificial em um grande número de elementos ao longo da Tabela Periódica, detectando-a efetivamente. Em abril-maio, quando bombardearam urânio com nêutrons, eles concluíram (equivocadamente) terem produzido novos elementos artificiais, os transurânicos, isto é, de número atômico maior do que o do urânio, $Z = 92$.



Em setembro, em Berlim, a química alemã Ida Noddack (1896–1978) contestou a conclusão de Fermi sobre a produção de transurânicos, e mencionou pela primeira vez ser possível a fissão do urânio, isto é, esse urânio poderia dividir-se em dois fragmentos de massa intermediária quando bombardeado por nêutrons. Porém, como ela não fizesse a prova experimental, tudo ficou na esfera das conjeturas. Ainda nesse ano de 1934, em Roma, Fermi e seus assistentes descobrem o que chamaram de "moderação de nêutrons", isto é, a diminuição da energia cinética dos nêutrons rápidos quando estes atravessam materiais hidrogenados, como a parafina. O fenômeno era resultado das colisões elásticas principalmente com os prótons em repouso no material, e que faziam os nêutrons rápidos incidentes tornarem-se nêutrons "lentos" (ou térmicos). Esta foi uma descoberta-chave para o futuro funcionamento dos reatores

na produção de energia pela fissão nuclear.

Embora a década de 1930 tivesse sido um período de grande progresso científico, convém lembrar aqui que foi também um período particularmente difícil e cruel, sobretudo para os europeus. Já em 1933, o líder político de origem austríaca Adolf Hitler (1889–1945) era nomeado chanceler do Terceiro Reich na Alemanha, e então começou a perseguição dos nazistas aos judeus e àqueles de origem não-ariana. Muitos cientistas emigraram. Einstein transferiu-se para New Jersey (EUA); o físico húngaro Léo Szilard (1898–1964) foi para a Inglaterra e depois seguiu para os EUA. Szilard havia acreditado em Ida Noddack sobre a possibilidade do urânio se quebrar em dois fragmentos quando bombardeado por nêutrons. Visionário que foi, Szilard conjecturou ser possível construir uma arma de enorme poder destruidor utilizando-se da fissão do urânio, pelo que patenteou na Inglaterra em 1936 o princípio de uma bomba atômica.

Importante mencionar que três anos antes o físico alemão Bernhard Gross (1905–2002) havia se transferido para o Rio de Janeiro, estabelecendo-se no INT (Praça Mauá). Em 1934, por recomendação de Fermi, deu-se a vinda do físico de origem ucraniana Gleb Wataghin (1899–1986) para São Paulo, introduzindo no Brasil a pesquisa científica em Física Moderna. Por essa época, aumentou o radicalismo do regime nazista de Hitler, e em 1938 deu-se a anexação da Áustria e parte da Tchecoslováquia (hoje República Tcheca) à Alemanha. Fermi, que era casado com uma judia, viu-se forçado a abandonar a Itália, e emigrou com a família para os EUA, o mesmo acontecendo com a física austríaca Lise Meitner (1878–1968), que refugiou-se na Suécia, e depois foi para a Inglaterra. Também veio para o Brasil o físico italiano Giuseppe Occhialini (1907–1993), que juntou-se a Gleb Wataghin em São Paulo.

O Ano Revolucionário De 1939

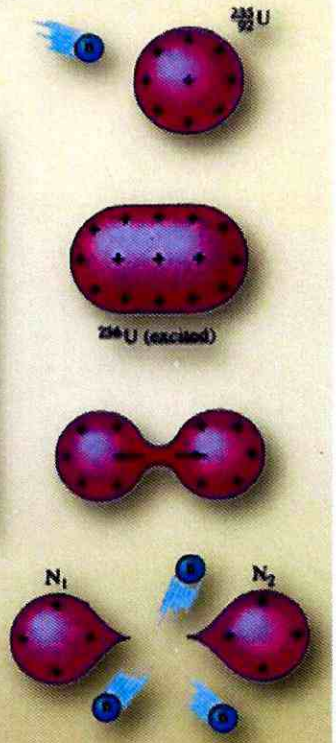
• **Dez/38 – Set/39:** Um novo, inesperado,fenômeno nuclear foi descoberto e firmemente estabelecido:

A FISSÃO DE NÚCLEOS DE URÂNIO E TÓRIO POR BOMBARDEAMENTO COM NÊUTRONS

- A quebra do núcleo em **2 fragmentos de massas comparáveis**;
- A descrição do novo fenômeno pelo **Modelo da Gota**;
- A predição de **distribuições de carga, massa e energia cinética** dos fragmentos de fissão;
- A detecção de uma **ionização elevada** causada **pelos fragmentos de fissão**;
- A estimativa de ~**200 MeV** liberada no processo (~ 0,8 MeV/núcleon);
- A **emissão de 2 a 3 nêutrons** por fissão;
- A descrição detalhada de uma possível **reação em cadeia** da fissão do urânio.

A física da Fissão Nuclear

Física austríaca
Lise Meitner
(1878 – 1968)



Foi nessa época conturbada pelas força e perseguição implantadas pelo regime nazista que aconteceram duas das mais importantes descobertas da Física Nuclear, responsáveis pela total mudança dos destinos da Humanidade. A primeira em Berlim, em dezembro de 1938, quando os químicos alemães Otto Hahn (1879–1968) e Fritz Strassman (1902–1980) apresentaram as evidências químicas para a fissão de núcleos de urânio e tório quando bombardeados por nêutrons. A outra, também na segunda metade de 1938, foi o anúncio feito de modo independente e simultâneo pelo físico alemão-norte-americano Hans Bethe (1906–2005) e o físico alemão Carl F. von Weizsäcker (1912–2003) das reações de fusão termonuclear de núcleos leves para explicar a produção de energia nas estrelas. Ambos os fenômenos nucleares (a fissão de núcleos pesados e a fusão de núcleos leves) tiveram suas características físicas e propriedades estabelecidas praticamente no mesmo período, até setembro de 1939.

Mas, ao mesmo tempo, já em março daquele ano, Hitler havia anexado à Alemanha o restante da Tchecoslováquia (Bohemia), e em setembro a Polônia era invadida pelas forças nazistas, dando início à Segunda Guerra Mundial. Um mês antes, Einstein havia assinado a célebre carta endereçada ao Presidente norte-americano Franklin D. Roosevelt (1882–1945) alertando-o e pedindo providências e apoio do governo para combater o inimigo, pois os cientistas na Inglaterra e nos EUA tinham receio de que os alemães pudessem fabricar uma grande arma de destruição. Após ter lido e assinado a carta Einstein disse: "pela primeira vez na história o homem usará energia que não aquela proveniente do Sol".

Por causa das duas grandes e extraordinárias descobertas e dos acontecimentos políticos ocorridos no período julho/1938-setembro/1939, 1939 pôde ser chamado "o ano revolucionário". Em setembro daquele ano os físicos e químicos já sabiam *i)* que nêutrons estavam sendo produzidos na fissão do urânio, como haviam demonstrado Fermi, Szilard, o casal Joliot-Curie e outros; *ii)* de uma descrição detalhada de uma reação de fissão em cadeia como divulgado na época pelo físico alemão Siegfried Flügge (1912–1997); *iii)* sobre o mecanismo da fissão descrito pelo modelo nuclear da gota, como haviam proposto o físico dinamarquês Niels Bohr (1885–1962) juntamente com o físico norte-americano John Wheeler (1911–2008).

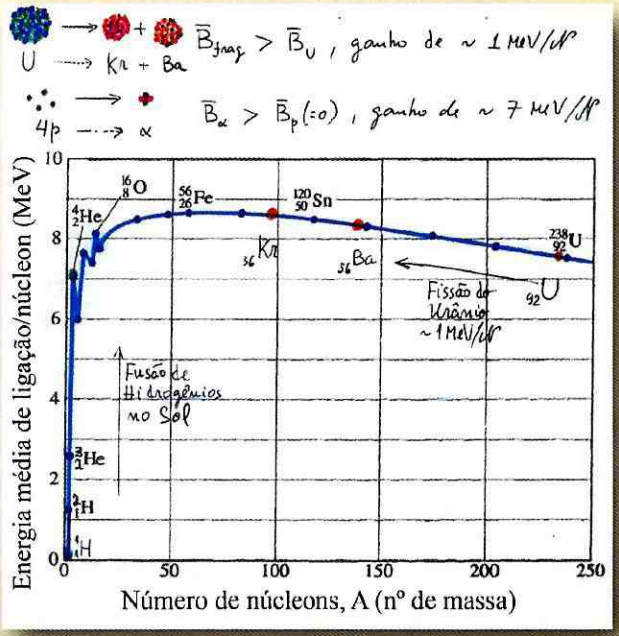
Lise Meitner foi a personagem central dessa descoberta, pois ela deu a interpretação correta do fenômeno, batizou-o de "fissão", sugeriu o modelo da gota para explicá-lo, e estimou em cerca de 200 MeV a energia liberada na fissão de um único núcleo de urânio. Por seu turno, o mecanismo de reações de fusão termonuclear veio explicar a produção de energia nas estrelas, de modo especial no Sol, e ficou compreendido que nele a queima de hidrogênio na produção de hélio mediante uma sequência de reações de fusão próton-próton libera a enorme quantidade de energia equivalente a quase 7 MeV por próton.

1939: O ANO DAS FONTES PRIMÁRIAS DE ENERGIA

Toda a energia primária de que o homem necessita origina-se de REAÇÕES NUCLEARES:

- **FUSÃO TERMONUCLEAR DE NÚCLEOS LEVES** (energia produzida no Sol pela queima de hidrogênio)
- **FISSÃO NUCLEAR DE NÚCLEOS PESADOS** (energia disponível na TERRA proveniente dos núcleos físseis)
- **RADIOATIVIDADE α e β DOS RADIONUCLÍDEOS** (os que ocorrem na natureza e os produzidos artificialmente)

Fissão: ~ 200MeV → 0,8 MeV/núcleon
Fusão: ~ 27 MeV → 6,7 MeV/núcleon
Fusão ≈ 8 × Fissão



POR QUE AS PESSOAS SE POSICIONAM CONTRA A ENERGIA NUCLEAR?

O ano de 1939 ficou então conhecido como "o ano das fontes primárias de energia", isto é, "toda a energia primária de que o homem necessita origina-se de reações nucleares", quais sejam: *i)* a fusão termonuclear de núcleos leves, que é a fonte da energia produzida pelo Sol através da queima do hidrogênio, *ii)* a fissão nuclear de núcleos pesados, que gera a energia disponível na Terra contida no urânio e tório, e , em menor escala, *iii)* a energia das desintegrações radioativas α e β dos radioelementos que ocorrem na natureza e os produzidos artificialmente.

A energia nuclear produzida na fusão e fissão está resumidamente explicada no gráfico da figura, a primeira sendo cerca de 8 vezes mais eficaz que a segunda. E então surge para muitas pessoas a desconfortável indagação: "Por que as pessoas se posicionam contrárias à energia nuclear"?

No início de 1940, os físicos britânicos Otto Frisch (1904–1979) e Rudolf Peierls (1907–1995) haviam chegado à conclusão de que era factível a fabricação de um artefato bélico com base na gigantesca quantidade de energia liberada na fissão do urânio. Essa conclusão fazia parte do conteúdo do famoso Memorando Frisch-Peierls. Em setembro do mesmo ano, havia sido formado o Eixo Alemanha-Itália-Japão por acordo entre os respectivos líderes, Adolf Hitler, Benito Mussolini (1883–1945) e o imperador Hiroito (1901–1989). Concomitantemente, em Berkeley (EUA) estavam sendo produzidos pela primeira vez os elementos transurânicos neptúnio e plutônio, sendo físsil o isótopo ^{239}Pu, que veio a ser, cinco anos mais tarde, a matéria prima usada na preparação da primeira bomba atômica, o chamado Teste Trinity. No ano seguinte, em decorrência do ataque-surpresa à base naval norte-americana em Pearl Harbor (Hawaí) pelos japoneses, os EUA declararam guerra ao Japão e, em consequência, a Alemanha e a Itália declararam guerra aos EUA. Em 1942, era formada a frente dos Aliados, inclusive com a incorporação do Brasil, para combater as tropas inimigas na Europa. De posse das informações contidas no Memorando Frisch-Peierls os cientistas sediados nos EUA conseguiram convencer o governo norte-americano a apoiá-los, criando, no início de 1942, o que foi conhecido como Projeto Manhattan, com o objetivo de construir uma bomba atômica. 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, evento conseguido em 02 de dezembro de 1942 por Enrico Fermi e sua equipe, ocasião em que fizeram funcionar o primeiro reator nuclear, de modestos 200 W, nas dependências da Universidade de Chicago (EUA).

O Projeto Manhattan mobilizou mais de cem mil pessoas, por cerca de três anos, e consumiu algo como trinta bilhões de dólares em valores atuais. Foi, até hoje, o maior empreendimento científico-tecnológico-inovador que o homem desenvolveu. O produto final foram três bombas atômicas acionadas em julho e agosto de 1945: a primeira delas foi o chamado "Teste Trinity", realizado no deserto de Alamogordo (Novo México, EUA) em 16 de julho; a segunda foi lançada em 06 de agosto sobre a cidade de Hiroshima, e a terceira caiu sobre Nagasáki em 09 de agosto, pondo fim à Segunda Guerra Mundial. Embora a energia proveniente da fissão dos núcleos atômicos tivesse sido obtida pela primeira vez de forma controlada, as circunstâncias da guerra fizeram com que ela fosse utilizada de maneira totalmente descontrolada, com finalidade bélica, nas primeiras três explosões nucleares do final da Segunda Guerra, em 1945.

FÍSICOS E QUÍMICOS MAIS DESTACADOS NO PROJETO MANHATTAN

Azul: Nobel de física Vermelho: Nobel de química (idade em 1945)

Aage Bohr (23)
Albert Einstein **(66)**
Alfred Nier (34)
Alvin Weinberg (30)
Arthur Compton (53)
Arthur Wahl (28)

Edward Teller (37)
Edwin McMillan (38)
Emilio Segrè (40)
Enrico Fermi (44)
Ernest Lawrence (44)
Eugene Wigner (43)

Glenn Seaborg (33)

Hans Bethe (39)
Harold Urey (52)
Herbert Anderson (34)

Isadore Perlman (30)
Isidor Rabi (47)

James Chadwick (54)
James Franck **(63)**
John Wheeler (34)
Joseph Kennedy (29)
Julian Schwinger (27)

Leo Rainwater (28)
Leo Szilard (47)
Luis Alvarez (34)

Niels Bohr **(60)**
Norman Ramsay (30)

Otto Frisch (41)
Owen Chamberlain (25)

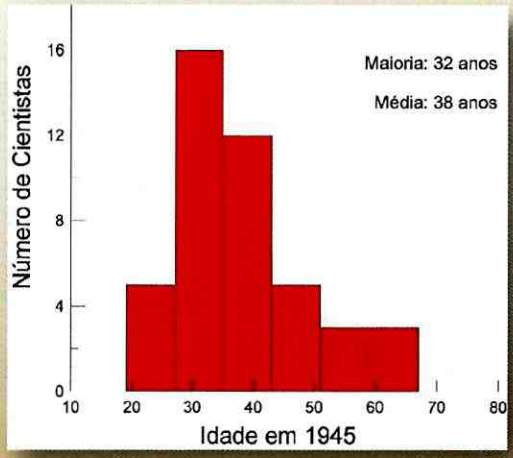
Philip Abelson (32)
Philip Morrison (30)

Richard Feynman (27)
Robert Oppenheimer (41)
Robert Serber (36)
Robert Wilson (34)
Rudolf Peierls (38)

Samuel Allison (45)
Samuel Goudsmit (33)
Seth Neddermeyer (38)

Victor Weiskopf (37)

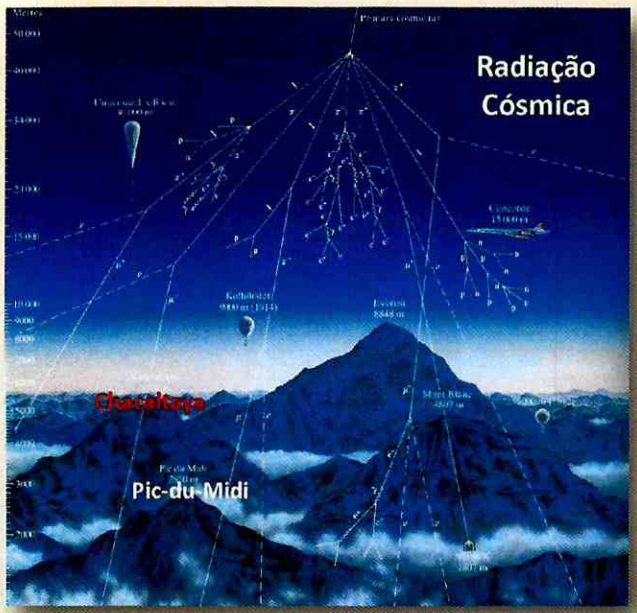
Chien S. Wu (33)
Leona W. Marshall (26)
Maria Goeppert-Mayer (39)



Cerca de noventa cientistas, entre físicos, químicos e profissionais de várias outras áreas, bem como um grande número de engenheiros de diversas especialidades, tomaram parte no Projeto Manhattan. A maioria dos cientistas tinha na época entre 30 e 35 anos de idade, e a média das idades dos participantes 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. A física norte-americana Leona Marshall (1919–1986), com apenas 23 anos, foi uma espécie de braço direito de Fermi, e coube a ela o funcionamento e acompanhamento dos equipamentos que registraram a entrada em funcionamento da primeira pilha atômica em 02 de dezembro de 1942. Chien Wu (1912–1997) foi uma física de origem chinesa que se ocupou com o enriquecimento de urânio no isótopo físsil ^{235}U pelo método da difusão gasosa. A segunda e última (até agora) mulher a receber o prêmio Nobel de Física, a física de origem alemã Maria Göppert-Mayer (1906–1972), participou também do Projeto nas questões relacionadas à separação isotópica do urânio; porém, com atuação bastante modesta.

A direção geral do Projeto ficou a cargo do físico norte-americano Robert Oppenheimer (1904–1967), então com 38 anos. Atuação destacada teve o jovem físico norte-americano Richard Feynman (1918–1988), a quem coube resolver o problema da difusão dos nêutrons na massa crítica de urânio e plutônio. Como se sabe, Feynman tornou-se popularíssimo nos meios acadêmico-científicos ligados à Física por sua obra monumental "The Feynman Lectures on Physics", lançada nos EUA em 1964, e posteriormente editada em português em 2008 pela Bookman Editora.

CÉSAR LATTES E A DESCOBERTA DO MÉSON π (BRISTOL, UK, 1947)



- Na radiação cósmica:
  (Pic-du-Midi, França, 2,8 km de altitude);
  Chacaltaya, Bolívia, 5,6 km de altitude

NATURE May 24, 1947
Processes Involving Charged Mesons
C M G Lattes, H Muirhead, G P S Occhialini, C F Powell

- Em Laboratório: Berkeley (1948)

SCIENCE March 12, 1948
Production of Mesons by the 184-Inch Berkeley Cyclotron
E Gardner and **C M G Lattes**

Mésons π são partículas mediadoras da força forte, atrativa, de curto alcance, entre 2 núcleons, que mantém a coesão nuclear, prevista em 1935 pelo físico japonês **H. Yukawa** (1907-1981).

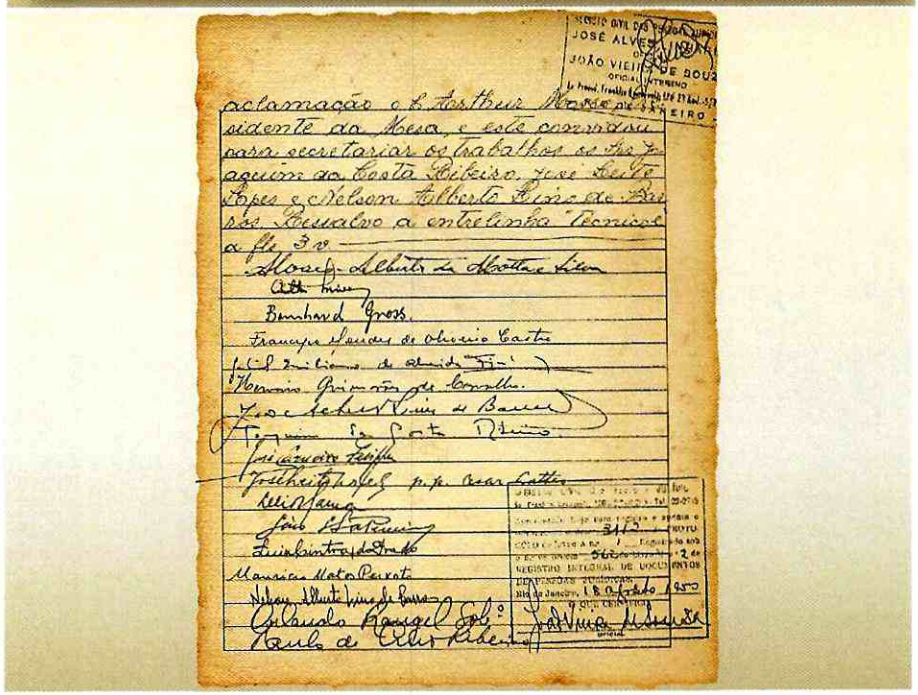
Uma questão fundamental sobre a natureza do núcleo atômico diz respeito à sua estabilidade, pois sendo constituído por partículas de cargas unicamente positivas (os prótons) estas deveriam se repelir mutuamente, comprometendo assim a própria existência do núcleo. Quatro anos antes do início da Segunda Grande Guerra, o físico japonês Hideki Yukawa (1907–1981) se debruçou sobre essa questão, que o levou a introduzir em 1935 a ideia da existência de uma força de interação entre os núcleons, a força forte, atrativa, de curto alcance, responsável pela coesão nuclear. E como mediadora dessa nova força, Yukawa previu a existência de mésons, partículas subnucleares que podiam possuir carga elétrica (positiva ou negativa) ou não, e massa compreendida entre a do elétron e a do próton, cerca de 270 vezes maior que a massa do elétron. Efetivamente, os mésons pi, ou píons, foram identificados doze anos mais tarde.

O físico brasileiro César Lattes (1924–2005), então com 23 anos, foi um dos descobridores dos mésons pi carregados presentes na radiação cósmica. Suas trajetórias foram observadas em emulsão de traços nucleares que haviam sido expostas a 2,8 km de altitude no Pic-du-Midi (França), e a 5,6 km de altitude no Monte Chacaltaya (Bolívia). E no ano seguinte (1948), Lattes foi capaz de detectar mesóns pi carregados negativamente que estavam sendo produzidos no cíclotron da Universidade da Califórnia em Berkeley (EUA) quando partículas alfa incidiam sobre um alvo fixo de carbono. A descoberta dos píons, tanto na natureza quanto em laboratório, tendo como personagem central a figura do cientista brasileiro César Lattes, deu início a uma nova era de investigação científica em nível mundial. É a chamada Física das Partículas Elementares com o uso de aceleradores. César Lattes pode ser, sem dúvida, considerado o "herói nuclear" brasileiro.

César Lattes estimula, articula e realiza, no Rio de Janeiro, a criação de um Instituto dedicado à Pesquisa Fundamental em Física, o

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS - CBPF

(Fundado em 15/janeiro/1949)



A extraordinária repercussão desses feitos fundamentais para a Física, tanto no exterior quanto, e sobretudo, entre os intelectuais no Brasil, levou em pouquíssimo tempo à criação, no Rio de Janeiro, de um instituto voltado para a pesquisa fundamental em Física, o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, fundado em 15 de janeiro de 1949, em decorrência do estímulo e articulação de César Lattes e dos entusiastas da causa científica no Rio de Janeiro, envolvidos nesse empreendimento, que efetivamente se concretizou e repercutiu sobre as gerações futuras, políticos, militares, cientistas, empresários, banqueiros e muitos outros intelectuais que acreditaram naquela feliz iniciativa.

INSTITUIÇÕES ORIGINÁRIAS DA CRIAÇÃO DO CBPF

- Anos 1950: Laboratório de Física em Chacaltaya (Andes bolivianos, 5200 m)
- 1951: Criação do CNPq (Rio)
- 1952: Criação do IMPA (Rio)
- 1956: Criação da CNEN (Rio)
- 1960: Criação do CLAF (CBPF)
- 1980: Criação do LNCC (Petrópolis)
- 1986: Criação do LNLS (Campinas)

CBPF hoje

Unidade de Pesquisa vinculada ao MCTI

Missão: Realizar pesquisa básica em Física e desenvolver suas aplicações, atuando como Instituto Nacional de Física do MCTI e polo de investigação científica e formação, treinamento e aperfeiçoamento de pessoal científico.

Raramente uma descoberta científica ecoou tão larga e profundamente nos meios científico, político e econômico como a descoberta dos mésons pi. De fato, a fundação do CBPF ofereceu o ambiente e a atmosfera propícios às conversas que levaram de imediato ao seu desdobramento em outras instituições e órgãos voltados para a Ciência e a Tecnologia, atuando seja em suas atividades fim, seja como organização de fomento e/ou de política científica. Essas acham-se elencadas na ilustração. Depois de superar profunda crise financeira que culminou com a extinção da instituição como sociedade civil, o CBPF vinculou-se ao CNPq em 1976, e hoje o CBPF é considerado um Instituto Nacional de Física como parte do MCTI, mantendo sua finalidade precípua de realizar pesquisa fundamental em Física, mas cuidando também da formação de pessoal científico e técnico qualificado.

FÍSICA NUCLEAR: ÚLTIMOS 50 ANOS

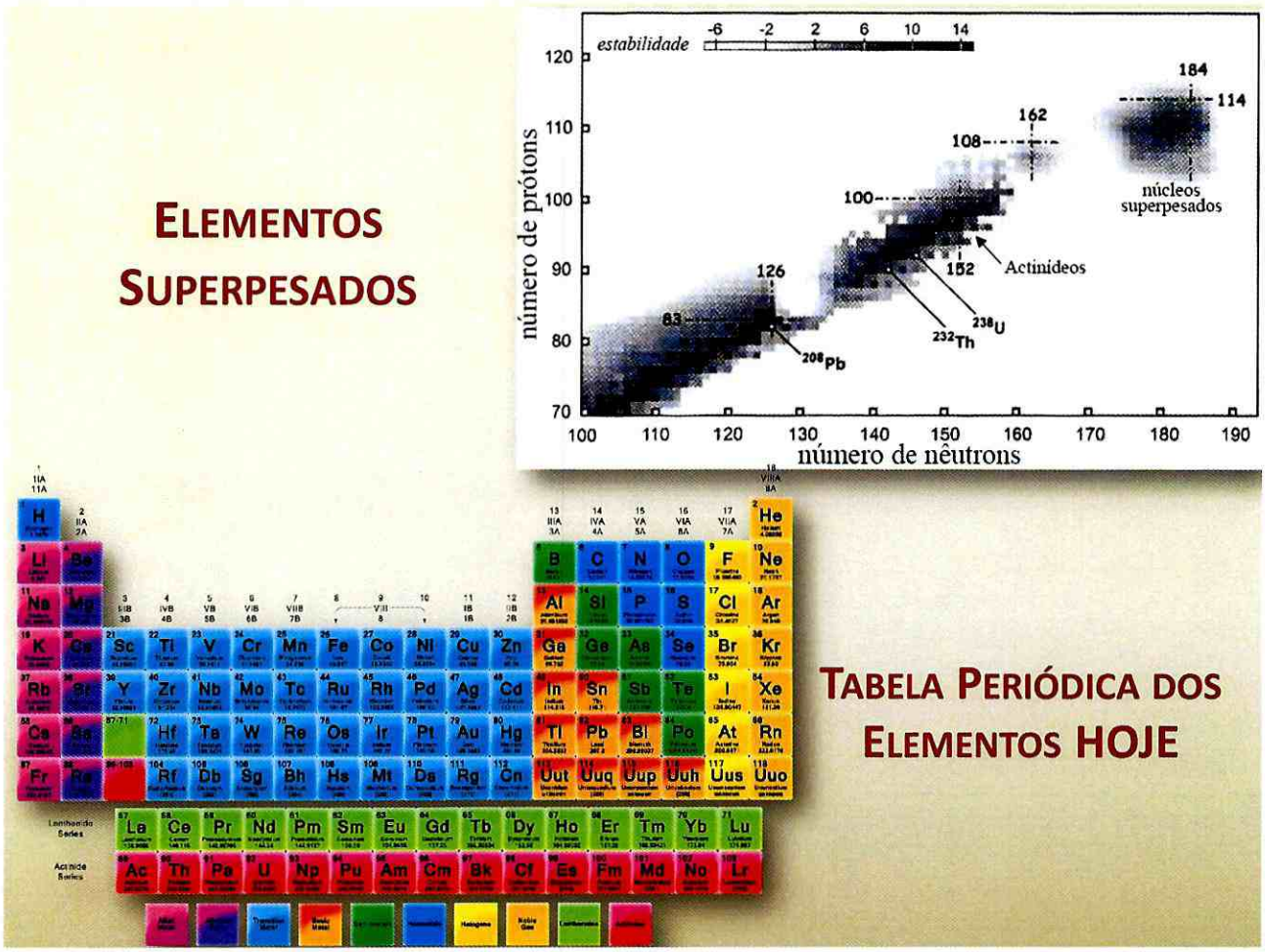
- Desenvolvimento de Aceleradores, Reatores e Sistemas de Detecção;
- Estrutura Nuclear;
- Momentos Eletromagnéticos e Núcleos Deformados;
- Modelos Nucleares: de camadas, coletivos e de cluster;
- Hipernúcleos;
- Radioatividade: beta, 2-beta, próton, 2-prótons, alfa, fissão espontânea, clusters, fissão fria;
- Isomerismo nuclear;
- Reações Nucleares (baixa, média, alta e altíssima energia):
  - Modelos e Simulações Monte Carlo
  - Induzidas por Partículas, fótons, léptons e neutrinos
  - de fissão e spallation
  - Produção de núcleos superpesados: fusão fria
  - Com íons pesados e de fusão-fissão
  - Com íons pesados relativísticos
- Astrofísica Nuclear e Nucleossíntese Estelar;
- Explosão de Supernovae e Estrelas de Nêutron;
- Núcleos Exóticos;
- Plasma e Fusão Termonuclear Controlada.

Força de trabalho na Física Nuclear
(pesquisa fundamental)
~2,5 bilhões de US$ por ano

Região	Total	Nº/Mi-hab
Europa	~7560	~10,2
América do Norte	~4360	~8,4
América do Sul	~450	~1,2
Ásia (Pacífico)	~3050	~1,9
Total	~15420	

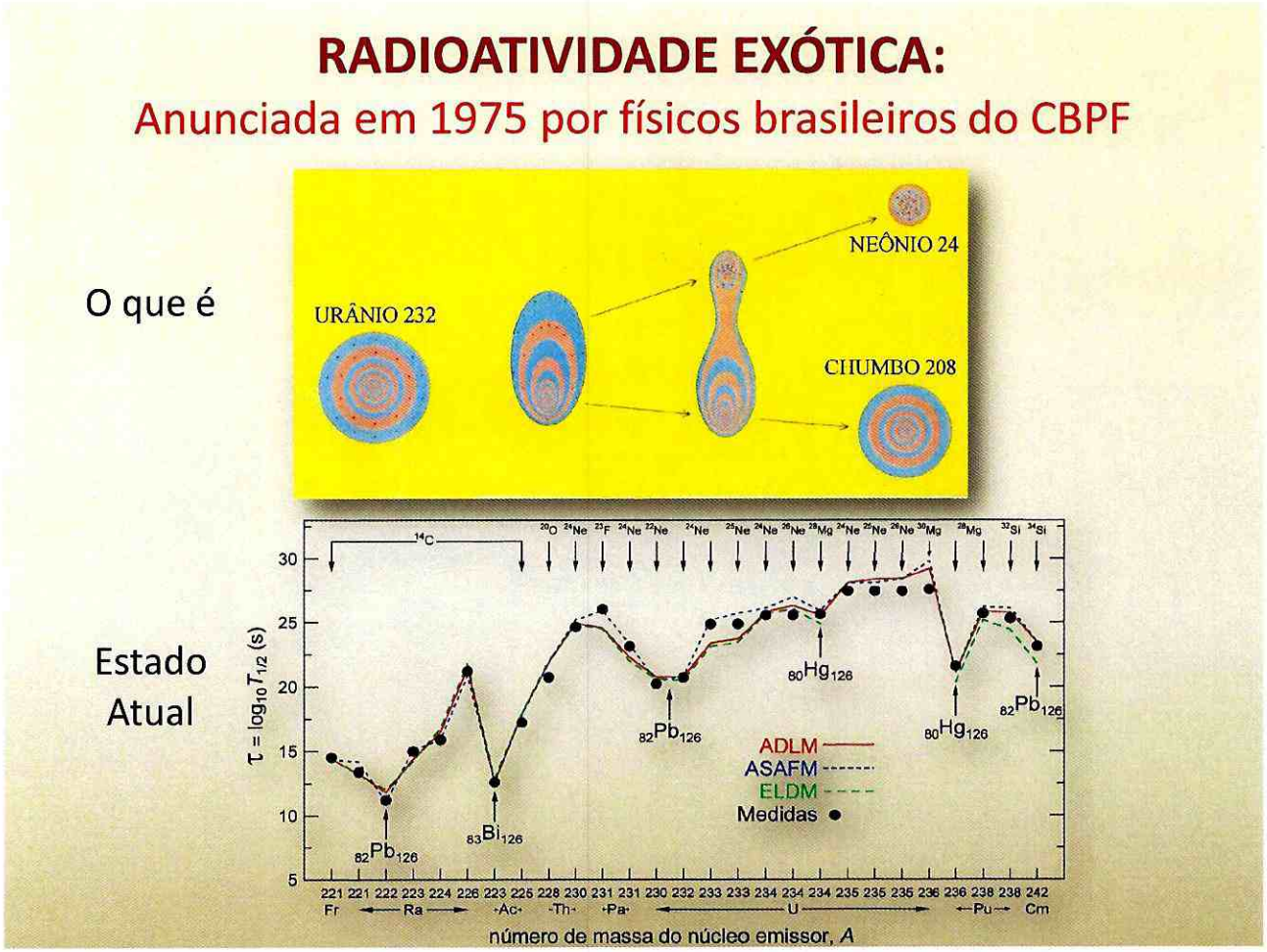
Fonte: OECD Global Science Forum (2008) + 16%

As ciências nucleares tiveram um avanço enorme logo após o término da Segunda Guerra Mundial. As décadas de 1950 e 1960 foram particularmente ricas em novas e importantes descobertas. Multiplicou-se a temática dos assuntos ligados à natureza e às propriedades do núcleo atômico. Técnicas experimentais, instalações de reatores nucleares e aceleradores de partículas e o desenvolvimento de modelos nucleares trouxeram progressos notáveis não somente para a compreensão dos fenômenos nucleares, mas também para o desenvolvimento de inúmeras aplicações na indústria e medicina nucleares. Logo a seguir desenvolveu-se a Astrofísica Nuclear, com as investigações sobre a formação e evolução das estrelas até as chamadas estrelas de nêutron. A lista de assuntos é extensa, e na ilustração (longe de ser completa) mostram-se em azul os temas que, em momentos diferentes, foram objeto de pesquisa no CBPF. Uma visão global sobre a força de trabalho em Física Nuclear pode ser apreciada no quadro que se insere na figura. Fica claro a ainda bastante modesta contribuição da América do Sul, quando se compara com o número de profissionais em Física Nuclear Fundamental na Europa. Entretanto, não se pode concluir, como querem alguns cientistas de outras subáreas, que a Física Nuclear hoje se encontra em declínio.



Em anos recentes, por exemplo, tem sido implacável a busca pelos chamados elementos superpesados. Em abril de 2010 cientistas russos anunciaram ter conseguido sintetizar o elemento de número atômico 117 (ainda sem nome de batismo). Eles mesmos já tinham sintetizado os de número atômico 116 e 118. Recorda-se que o urânio (número atômico $Z = 92$) é o último elemento que pode ser encontrado na natureza. Os assim chamados transurânicos (acima do urânio) são hoje em número de vinte e seis, onze dos quais pertencem à família do actínio [são os actinídeos (veja Tabela Periódica)] e os outros quinze, que vão do rutherfordio ($Z = 104$) ao de $Z = 118$, são conhecidos por elementos superpesados. Para todos esses já foram identificados cerca de trezentos radioisótopos, a maioria deles desintegrando-se por emissão alfa e/ou fissão espontânea. O radioisótopo do superpesado de $Z = 117$ sintetizado há três anos é o que possui o maior número de nêutrons até hoje, 177, o que resulta no número de massa $A = 294$.

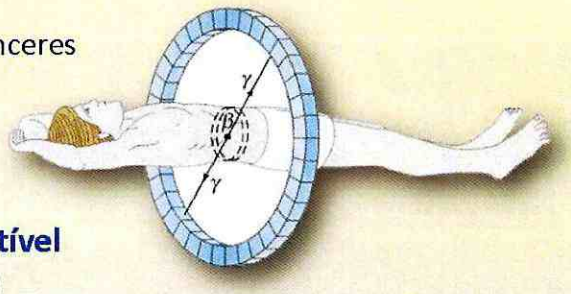
A importância dessas investigações é que espécies nucleares superpesadas com grande número de nêutrons tendem a apresentar uma menor instabilidade nuclear, representando um indício experimental de que os cientistas estão se aproximando da assim chamada "ilha de estabilidade" nuclear, como ilustrado na parte superior de Carta de Nuclídeos. Além disso, é de se notar que o superpesado de $Z = 118$ vem completar o sétimo período e o grupo dos gases nobres (grupo 8A) da Tabela Periódica dos Elementos, embora ele não deva ser necessariamente um gás, como acreditam alguns químicos teóricos. Essas são pesquisas de ponta que, há décadas, vêm sendo desenvolvidas em Berkeley e Oak Ridge (EUA), em Dubna (Rússia), Tóquio (Japão) e Darmstadt (Alemanha), e delas o Brasil não participa.



Outro exemplo de fenômeno inteiramente novo encontrado na Física Nuclear nos dias de hoje, e que foi anunciado pela primeira vez por físicos brasileiros do CBPF (um deles este autor), é o da desintegração de núcleos pesados por emissão de fragmentos nucleares bem mais pesados do que a partícula alfa. O fenômeno pode ser entendido com base no mecanismo quântico de penetração de barreira de potencial (tunelamento quântico, como no caso da emissão alfa). Vinte e sete casos já foram identificados nos melhores laboratórios do mundo. Das investigações ficou evidenciada a influência marcante dos efeitos de camada na estrutura nuclear. Núcleons, da mesma maneira que elétrons no átomo, se arrumam em camadas, de tal modo que o núcleo passa a exibir maior estabilidade quando os prótons e/ou nêutrons completam uma camada com números "mágicos" 2, 8, 20, 28, 50, 82 e 126. Isso explica por que o ^{208}Pb e os isótopos seus vizinhos são os núcleos restantes após a emissão de fragmentos nucleares como ^{14}C, ^{24}Ne, ^{28}Mg,^{34}Si e outros. A radioatividade exótica, como é conhecido o fenômeno, ocorre preferencialmente, isto é, com menor meia-vida, toda vez que os produtos da desintegração possuem estrutura de camada fechada de seus núcleons.

FÍSICA NUCLEAR E OS BENEFÍCIOS PARA A SOCIEDADE

- **Medicina Nuclear** (diagnóstico e tratamento), 1952
  - Uso de radioisótopos: ^{99m}Tc em cardiopatias, ^{131}I distúrbios da tireoide, ^{137}Cs terapia de cânceres
  - Tomografias: SPET, PET
  - Ressonância Nuclear Magnética (NMR)
  - Implantação de marca-passo cardíaco



PET-Scan: Um radioisótopo (^{11}C) emite pósitrons que se aniquilam com elétrons do tecido produzindo 2 raios gama opostos que são detectados produzindo uma imagem do órgão.

- **Engenharia Nuclear e os Ciclos do Combustível**
  - Reatores de fissão na geração de eletricidade
  - Reatores de fissão na produção de radioisótopos para medicina e indústria
  - Reatores de fissão na propulsão naval
  - Reatores de fusão termonuclear controlada na geração de eletricidade para consumo

- **Outras Aplicações da Ciência Nuclear**
  Radiobiologia, Proteção contra as Radiações, Geocronologia, Prospecção de U e Th, Arqueologia (datação por ^{14}C), Baterias Atômicas para Satélites e Veículos Espaciais, Meteorítica, Esterilização de Instrumentos Cirúrgicos, Conservação de Alimentos, Agricultura (irradiação de sementes, metabolismo de plantas), Alarmes contra Incêndio.

Não basta ao homem satisfazer sua curiosidade procurando compreender a natureza das coisas. Ele pode também tirar proveito desse conhecimento. Assim é que a Física Nuclear tem proporcionado à sociedade inúmeros benefícios através de suas várias aplicações, notadamente na Medicina Nuclear, com procedimentos de radiodiagnóstico e radioterapia. Também nas engenharias, sobretudo com a construção de reatores nucleares, que podem ser utilizados para produzir energia elétrica, propulsão naval e produção de radioisótopos para a Medicina. Há também um sem-número de aplicações menores, não menos importantes, que têm trazido conforto, segurança e bem-estar ao homem moderno. É preciso observar que a energia contida nos núcleos atômicos que mata e causa destruição e horror é a mesma que cura e proporciona conforto às pessoas. As decisões humanas sobre o uso dessa riqueza de origem nuclear é que farão dela algo benéfico ou não.

"Toda a energia primária de que o homem necessita é de origem nuclear"
(Fissão de núcleos pesados e fusão de núcleos leves)

CONTEÚDO ENERGÉTICO MUNDIAL DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR *

Espécie Nuclear	Quantidade na Crosta terrestre (Gton)	Conteúdo potencial de energia nuclear (10^{20}kW · h)	Utilização	Durabilidade (Ma)
^{238}U, ^{235}U	1,2	1,9	Reatores Conv. e Rápidos: ^{239}Pu	1,0
^{232}Th	3,7	5,8	Reatores Híbridos ADS: ^{233}U	3,1
^{6}Li	1,9	11	Reatores a fusão gerando $^{3}H(T)$	4,3
$^{2}H(D)$	∞		O SOL NA TERRA	

* C D Bowman
+ 20 experts
Los Alamos (1992)

Rejeitos acumulados até ~ 2015 → 70 kton de combustível utilizado
Produtos de fissão: ^{99}Tc, ^{129}I, ^{90}Sr, ^{137}Cs, ...
600 ton de transurânicos (500 ton de Pu)

Assim como nos primórdios da história do homem ele aprendeu a dominar o fogo, hoje também ele está aprendendo a dominar a produção e o bom uso da energia nuclear, "o fogo dos deuses". Resumidamente, hoje existem em operação no mundo número bem próximo a mil reatores nucleares, distribuídos entre os que geram energia elétrica, os que são usados em propulsão naval, aqueles que produzem radioisótopos para medicina e os de pesquisa fundamental. Todos esses reatores convencionais e os rápidos produzem uma quantidade enorme de plutônio e os chamados rejeitos de baixa, média e alta radiotoxicidade. Calcula-se que até 2015 estarão acumulados cerca de 500 toneladas de Pu, suficientes para a fabricação de pelo menos dez mil bombas de alto índice de destruição. A questão dos rejeitos está, há muito tempo, sendo considerada seriamente pelos especialistas. Duas propostas de superação desse problema estão em estudo e investigação nesse momento: *i)* o desenvolvimento de reatores híbridos que utilizam tório como combustível primário e *ii)* a produção de energia através das reações de fusão termonuclear.

REATORES HÍBRIDOS: ADS's (ACCELERATOR-DRIVEN SYSTEMS)

(Inovação tecnológica, Los Alamos, ~ 1990)

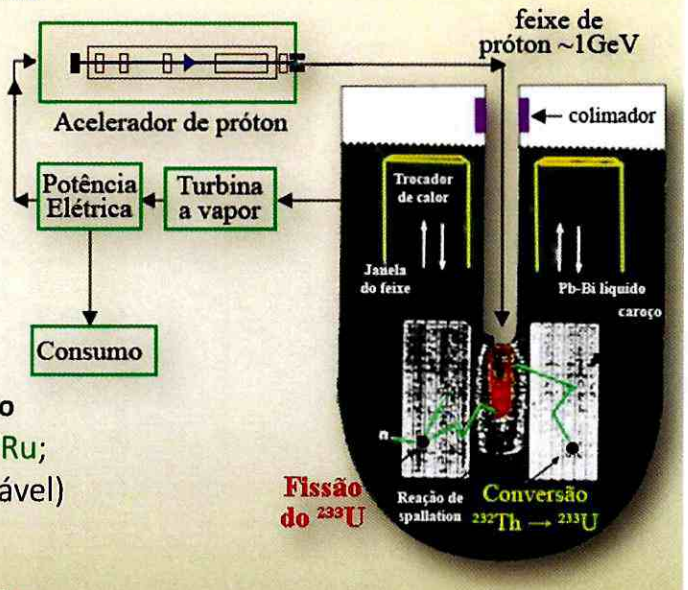
Físico italiano Carlo Rubbia, Prêmio Nobel em 1984

Sistema de geração de energia nuclear e transmutação de rejeitos radioativos acionado por acelerador:

- Acelerador de prótons → ~ 1 GeV;
- p + (Pb-Bi) → reação de spallation produzindo ~ 12 nêutrons por interação;
- Acoplado a um caroço contendo ^{232}Th que se converte em ^{233}U físsil;
- Funciona em regime subcrítico;
- Pb-Bi líquido é alvo e refrigerante.
- **Rejeitos são eliminados por transmutação**

Exs.: $^{99}Tc + n \rightarrow {}^{100}Tc(\beta^-) \rightarrow {}^{100}Ru$;
(200 mil anos) (16 s) (estável)

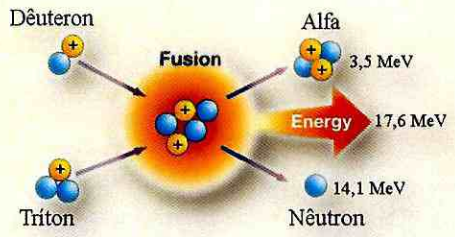
$^{129}I + n \rightarrow {}^{130}I(\beta^-) \rightarrow {}^{130}Xe$
(15,7 Ma) (12,4 h) (estável)



ADS ~ 2 bilhões de US$

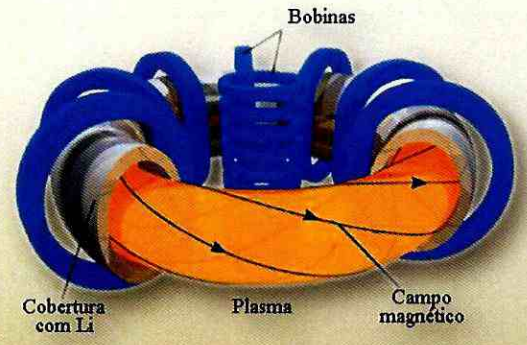
Uma classe de reatores híbridos são os conhecidos por ADS's (sigla em inglês para *Accelerator-Driven Systems*), cujo funcionamento é comandado por um acelerador de prótons. Basicamente, o sistema consiste de um grande reservatório de chumbo (ou chumbo-bismuto) líquido contendo na parte inferior o caroço do reator com tório e eventualmente os rejeitos de outros reatores a serem destruídos por transmutação. Na parte superior estão os trocadores de calor que produzirão vapor para as turbinas e a subsequente produção de energia elétrica para consumo. Prótons acelerados a cerca de 1000 MeV interagem com o alvo de Pb (ou Pb-Bi), produzindo cerca de 12–15 nêutrons por interação. Parte deles fará a conversão do tório no isótopo físsil ^{233}U, que por sua vez experimenta a fissão nuclear produzindo calor; uma outra fração dos nêutrons, uma vez termalizados no meio, é usada para transmutar produtos de fissão de alta radiotoxicidade em núcleos estáveis, desse modo diminuindo substancialmente a quantidade de rejeitos perigosos ao meio ambiente e ao homem. O Pb-Bi líquido funciona como alvo e refrigerante, transferindo calor de baixo para cima por convecção. Cálculos de simulação mostraram que um tal sistema é capaz de reduzir o nível de radiotoxicidade em cinco ordens de grandeza após 400 anos de o sistema ser desligado, enquanto num reator convencional o decréscimo seria de apenas um fator oito.

GERAÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA POR FUSÃO TERMONUCLEAR CONTROLADA



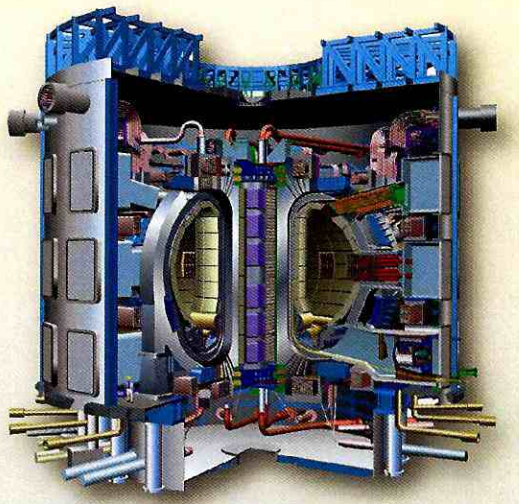
1 litro d'água contém 33 mg de D

$$^{1}n + {}^{6}Li \rightarrow {}^{4}He + {}^{3}H$$



Confinamento magnético

ITER (~ 500 MW) ~20 bilhões de US$



Valor energético relativo de alguns combustíveis

Material	Índice
Lenha	1
Carvão	5,3
Gasolina	7,7
U-235 (4%), Reat. Conv.	575 000
U-natural, Reat. Rap. Reg.	4 000 000
D + T (reator de fusão)	55 800 000

A fusão nuclear de núcleos leves, gerando energia que eventualmente pode ser utilizada de forma eficiente para consumo em geral, vem sendo considerada pelos cientistas e engenheiros há cerca de seis décadas. A reação de fusão mais favorável é a do dêuteron com o tríton produzindo partícula alfa e nêutron, fornecendo um total de 17,6 MeV. Dêuteron é o núcleo do deutério (hidrogênio pesado) que faz parte da composição de água na proporção de 33mg por litro. O tríton, por sua vez, é o núcleo do hidrogênio-3, o isótopo ^{3}H, com um próton e dois nêutrons, e resulta da reação do nêutron com o isótopo ^{6}Li. Esse é encontrado no lítio natural na proporção de quase 8% de átomos. Os ingredientes básicos (água e lítio) são abundantes na crosta terrestre, e uma vez separados os isótopos, ^{2}H e ^{6}Li, tem-se conseguido a fusão do dêuteron com o tríton num sistema conhecido por confinamento magnético. A tarefa tem se mostrado bastante difícil porque são requeridas altíssimas temperaturas (centenas de milhões de graus) ao mesmo tempo em que alta densidade e tempo de confinamento dos núcleos em "recipientes magnéticos".

Nessas condições, há a formação de um plasma (conjunto de íons e elétrons, como resultado da altíssima temperatura) que precisa ser confinado, por exemplo, por meio de uma combinação de dois campos magnéticos num dispositivo toroidal conhecido por *tokamak*. Um revestimento com lítio garante a produção de trítio. Um reator a fusão termonuclear não produz rejeitos danosos, somente o gás hélio. O reator termonuclear experimental internacional (ITER), uma máquina gigantesca projetada para gerar 500 MW de potência elétrica de reações de fusão, está sendo construído em Cadarache (sul da França) com o esforço e a contribuição de vários países. Esta é a grande esperança para a humanidade em termos de geração de energia. É como se estivesse sendo construído o Sol na Terra. A tabela anexada mostra o valor energético relativo de alguns combustíveis, na qual se vê claramente o avanço significativo quando se passa dos combustíveis fósseis ordinários para os que são usados nas reações nucleares.

O Brasil não ficou de fora dos avanços da utilização da energia nuclear para fins pacíficos. Três grandes projetos estão atualmente em andamento. O primeiro é a finalização da construção da Unidade III de produção de 1405 MW de potência nucleoelétrica (Angra III) na Central Nuclear Alm. Álvaro Alberto, em Angra dos Reis-RJ, previsto para entrar em operação em 2016. Somando-se àquelas outras duas já em operação há muito, Angra I, de 640 MW, operando desde 1982, e Angra II, de 1350 MW, produzindo energia há treze anos, será alcançado o percentual de 3% do total nacional hoje gerado (117 GW). Mas é preciso investir muito mais na geração de energia de origem nuclear para que o país consiga suprir sua carência energética nas próximas décadas. Certamente, como fizeram e fazem os países desenvolvidos, 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.

Paralelamente, o país deve acompanhar também todo o aperfeiçoamento e a expansão das diversas instalações nucleares que constituem o chamado ciclo do combustível, com suas etapas de extração, moagem e refino do minério de urânio, conversão a hexafluoreto de urânio, enriquecimento no isótopo ^{235}U, fabricação do elemento combustível, reprocessamento do combustível utilizado, e tratamento dos rejeitos radioativos. É bom os brasileiros saberem que, atualmente, apenas três nações no mundo, EUA, Rússia e Brasil, detêm toda a tecnologia e, ao mesmo tempo, reservas abundantes de urânio suficientes à produção farta de energia utilizando reatores nucleares convencionais. O país não pode deixar de aproveitar essa oportunidade única capaz de suprir suas necessidades energéticas.

O segundo grande projeto nacional é o do submarino a propulsão nuclear que vem sendo desenvolvido pela Marinha do Brasil no Centro Experimental de Aramar, em Iperó-SP (próximo a Sorocaba). Iniciado em 1979, o submarino a propulsão nuclear será totalmente construído no Brasil, e deverá ser lançado ao mar em 2025. O Prosub, como é conhecido esse projeto, permitiu que o Brasil dominasse completamente o ciclo do combustível, e além de já operar com ultracentrifugação o processo de enriquecimento isotópico do urânio, está em andamento a construção de um protótipo do reator nuclear. Esta será uma embarcação com características únicas: *i)* capacidade de passar despercebido (pode descer até 350 m de profundidade); *ii)* enorme autonomia (pode ficar submerso por meses); *iii)* pode deslocar-se com grande velocidade (até ~ 40 km/h); *iv)* grande mobilidade nas manobras; *v)* capacidade de patrulhar vastas regiões oceânicas atuando como defensor da costa brasileira.

REATOR MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO - RMB

[Centro Experimental de Aramar – CEA (Iperó – SP), junto ao PROSUB da Marinha do Brasil]

Objetivos e Benefícios:

- **Produção de radioelementos para a saúde, indústria, agricultura, meio ambiente, etc.**

  $^{99m}_{43}$Tc diagnóstico de doenças cardíacas

  $^{131}_{53}$I diagnóstico na glândula tireoide

  $^{137}_{55}$Cs na terapia de cânceres

- **Capacidade nacional para testar e qualificar combustíveis nucleares para reatores na:**

  - Propulsão Naval
  - Geração de eletricidade
  - Pesquisa Fundamental

- **Ampliar a capacidade de formação de RH na área nuclear**

RMB representará, entre outros, a Independência do Brasil na Medicina Nuclear

(previsto para 2017; estimado em 850 milhões de reais em 6 anos)

Também no Centro Experimental de Aramar da Marinha do Brasil em Iperó-SP, desenvolve-se junto ao Prosub o Reator Multipropósito Brasileiro-RMB. Essa foi uma decisão sábia do governo federal em direção à independência do Brasil no setor nuclear. O RMB está sendo construído com objetivos bem definidos, quais sejam: *i*) produção de radioelementos para usos na medicina, indústria, agricultura, no meio ambiente, etc; *ii*) capacidade para testar e qualificar combustíveis nucleares para reatores de usos diversos; *iii*) ampliar a capacidade de formação de recursos humanos na área nuclear. Além de representar economia de, pelo menos, R$ 30 milhões por ano nos gastos com importação de radiofármacos, o Brasil não poderia prescindir dessa iniciativa, pois os países de onde são importados tais produtos estão deixando de fabricá-los devido ao longo tempo de funcionamento de seus reatores com esse propósito. Hoje, por exemplo, o radioisótopo ^{99m}Tc (Tecnécio-99 metaestável) entra na composição de vários radiofármacos usados em procedimentos de radiodiagnóstico da tireoide, sistema ósseo, rins, estômago, cérebro, glândulas salivares, pulmão, coração, fígado e sistema linfático. Como se vê, não se pode ter vida longa sem usar, em algum momento, o tecnécio-99m. Daí a necessidade de o país possuir seu reator nuclear voltado, entre outros benefícios, para a saúde da população.

Despertar para o nuclear

A energia liberada nas transformações nucleares já trouxe muito mais conforto, saúde e bem-estar à sociedade do que morte e destruição. Não há, pois, porque rejeitá-la.

Assim como o homem primitivo aprendeu a lidar com o fogo, o homem da atualidade não deve medir esforços para dominar com segurança o bom uso da energia nuclear, "o fogo dos deuses".

Imprescindível é, portanto, pensar o BRASIL NUCLEAR para que tenhamos no futuro um BRASIL GRANDE, SOBERANO e SEM POBREZA.

MAIS ENERGIA ≡ { MAIS DESENVOLVIMENTO / MELHOR QUALIDADE DE VIDA }

Finalmente, à guisa de Epílogo, o autor conclama os leitores a lerem o pequeno texto acima sobre a necessidade do país desenvolver em escala ainda maior programas de pesquisa e inovação em direção ao bom uso e ao domínio completo da energia nuclear com total segurança, garantindo desse modo mais energia e saúde para todos, que se traduzem em mais desenvolvimento e melhor qualidade de vida.

As ciências nucleares com suas inumeráveis aplicações têm beneficiado mais de um bilhão de pessoas no mundo todos os dias, e em um nível de segurança maior até do que a aviação comercial. É bom recordar que "toda a energia primária de que o homem necessita é de origem nuclear" (fissão de núcleos pesados e fusão de núcleos leves). Não tão somente "o fogo dos deuses", mas, verdadeiramente, o maná com que a natureza cósmica pode sustentar a humanidade.

Agradecimento – *O autor deseja expressar aqui seu agradecimento a José Guilherme T. Monteiro pelo brilhantismo na preparação das ilustrações, e a Cristiana Moura pelo empenho e presteza colocados na digitalização dos originais manuscritos. A apresentação primorosa do texto final só foi possível graças ao trabalho de leitura crítica com as valiosas sugestões da Dra. Márcia Reis e do Dr. Emil Medeiros, para quem o autor não encontrou as palavras justas que expressassem sua profunda gratidão. Por fim, a primorosa qualidade da composição gráfica por Francisca Valéria é especialmente reconhecida pelo autor.*

Sobre o Autor

- **ODILON A. P. TAVARES**, 70 anos, é Doutor em Física Nuclear pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas-CBPF, do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação-MCTI, onde é Pesquisador Titular desde 1985;
- Liderou e/ou participou de projetos de pesquisa fundamental em colaboração com o IFUSP, a UFPB, UFF, UESC, e o IRD/CNEN, e no exterior com a Univ. de Roma, DESY de Hamburgo, Univ. de Bonn, o InsTEC de Havana, INFN de Frascati (Roma) e o Instituto de Física Nuclear de Novosibirsk (Rússia);
- Foi Professor e Orientador na Pós-Graduação em Física no CBPF, preparador ao Mestrado em Engenharia Nuclear (CNEN, 1975) e lecionou Física Nuclear para Geólogos (CNEN, 1974 e 1977);
- É autor de mais de uma centena de publicações sobre temas ligados à radioatividade por emissão de próton, decaimento alfa, radioatividade exótica e fissão espontânea, e a reações nucleares de fissão e "spallation", e com íons pesados;
- O autor foi um dos poucos que, no Brasil, desenvolveram e aplicaram o chamado Método Ionográfico na Física Nuclear, e foi um dos descobridores, em 1975, do decaimento exótico, no qual o núcleo atômico emite fragmentos nucleares mais pesados que no decaimento alfa;
- Atualmente integra o Grupo de Física Nuclear e Astrofísica do CBPF como Pesquisador Colaborador vinculado ao LAFEX/CBPF.