

Um roteiro para a inserção da

FUSÃO NUCLEAR

no Ensino Médio

.....

Carlos Alberto dos Santos[#]

Departamento de Ciências Naturais, Matemática e Estatística, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, RN, Brasil.

RESUMO

É apresentado um roteiro para uma transposição didática a respeito da fusão nuclear a partir da literatura recente sobre os avanços tecnológicos obtidos com um reator tokamak no âmbito do projeto internacional ITER, cujo objetivo central é a produção de energia elétrica em escala industrial utilizando a fusão nuclear. Mostra-se que é possível abordar, em nível compatível com o do Ensino Médio, conceitos fundamentais de física nuclear, desde a descoberta da radioatividade, passando pela elaboração do modelo atômico de Rutherford-Bohr para chegar às descobertas de próton, nêutron, fissão e fusão nuclear. Aborda-se também os fundamentos do tokamak, o principal equipamento para a obtenção sustentável de energia elétrica. O roteiro enquadra-se no que se pode denominar de ensino de física moderna no contexto da tecnologia contemporânea.

Palavras-chave: física moderna; radioatividade; fusão nuclear; tecnologia contemporânea; Ensino Médio

.....

1. Introdução

Nas últimas décadas, tem havido uma forte demanda pela inserção de tópicos de física contemporânea no Ensino Médio (EM). Se do ponto de vista cultural trata-se de uma demanda perfeitamente justificável, entendo que, do ponto de vista pedagógico e da educação para a cidadania, o mais importante talvez seja a inserção de tópicos de física moderna com importantes aplicações na tecnologia contemporânea. No estágio em que nos encontramos, de uma sociedade da informação onde crianças de 3-4 anos manipulam com desenvoltura equipamentos de alta tecnologia, como telefones celulares e pranchetas eletrônicas, é inconcebível que na sala de aula essas crianças e adolescentes não tenham a oportunidade de conhecer a ciência que está por trás desses dispositivos. No que concerne à física, a ciência que está por trás desses dispositivos é aquela que denominamos física moderna, que foi elaborada entre o final do século 19 e meados do século 20. A falta desse conhecimento contradiz a ideia de uma educação para a cidadania, na medida em que, ao continuar o currículo do ensino básico exclusivamente com a física desenvolvida até os anos 1850, teremos adultos que jamais conhecerão a ciência que constitui os dispositivos que manuseiam. Portanto, como parte relevante na tecnologia contemporânea, ou seja, no cotidiano da sociedade contemporânea, a física moderna ou, mais especificamente, a física moderna na tecnologia contemporânea (FMTC) deveria

Abordar a física moderna no contexto da tecnologia contemporânea é uma iniciativa pedagógica da educação para a cidadania

constituir um tema a ser incorporado ao currículo da educação básica.

Atualmente, a fusão nuclear e os avanços tecnológicos correlatos enquadram-se perfeitamente neste cenário. Com base nos resultados recentemente noticiados pelos mais importantes veículos de comunicação de massa (BBC News,¹ The Guardian,² CNN³ e The Sun⁴), bem como pelos veículos de comunicação dedicados à divulgação científica [1-3], é possível fazer uma transposição didática retrospectiva a partir da qual conceitos fundamentais da física moderna podem ser abordados em um nível compatível com o exigido no EM. Na Fig. 1, é apresentado um cenário possível

para essa transposição.

Com o presente material, objetiva-se fornecer conteúdo suficiente para que professores de física no EM se preparem para essa transposição didática. O tratamento conceitual aqui apresentado está no nível da licenciatura em física, o principal curso preparatório de professores do EM.

2. O vaivém da fusão nuclear

Em 2009, o site *Ciência Hoje* publicou o artigo *O vaivém da fusão nuclear*, que, aqui, usarei extensivamente pela sua pertinência.⁵ Naquela oportunidade, a motivação do artigo foi o redimensionamento do projeto ITER.⁶ O presente artigo também é motivado pelo projeto ITER, mas, dessa vez, por uma razão que todos acreditam ser mais do que relevante. Trata-se de uma façanha obtida por uma equipe do JET (*Joint European Torus*):⁷ a obtenção de um recor-

[#]Autor de correspondência. E-mail: cas.ufrgs@gmail.com.

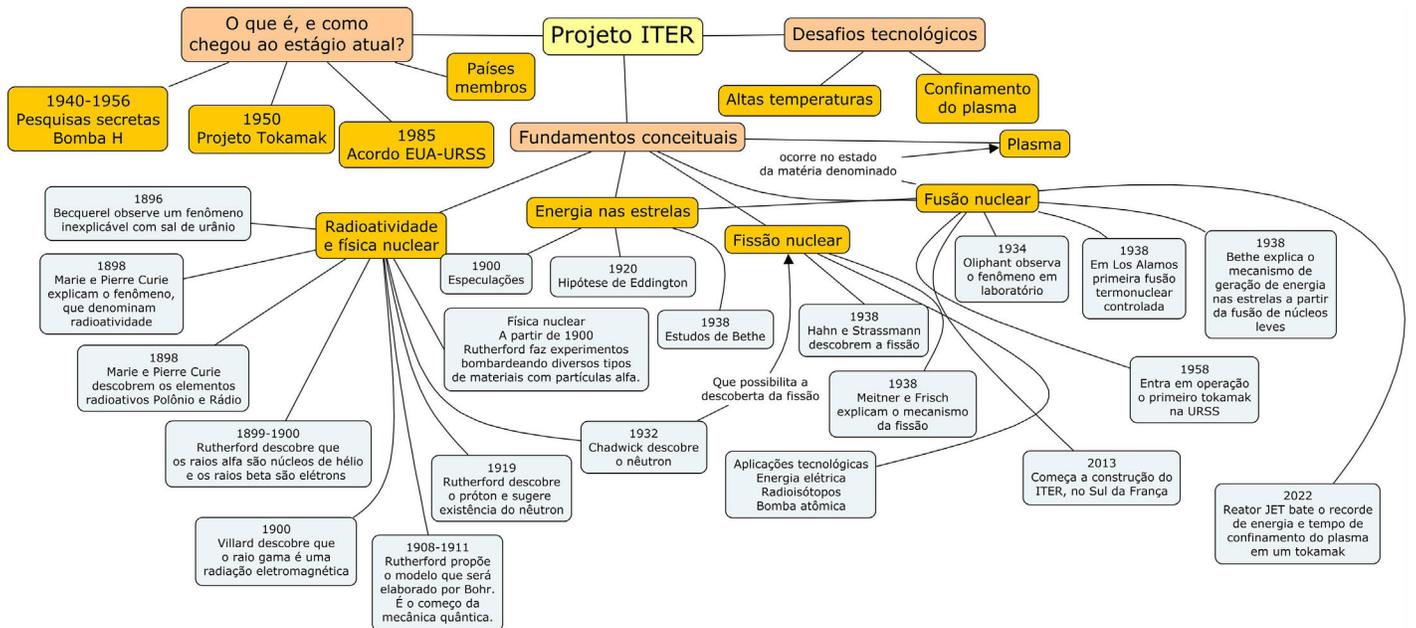


Figura 1 - Cenário temático possível para uma transposição didática da fusão nuclear no Ensino Médio.

de de energia (59 megajoules) durante 5 segundos, tempo em que o confinamento do plasma se manteve sustentável no interior do Tokamak (Fig. 2).

Naturalmente, o evento despertou a atenção da comunidade científica [4], assim como a dos meios de comunicação de massa e a dos veículos dedicados à divulgação científica supracitados.

Antes de abordar detalhes técnicos e científicos do processo de obtenção de energia por meio da fusão nuclear, apresentarei um cenário geral em linguagem coloquial.

Há dois processos pelos quais a energia pode ser extraída em reações nucleares. O primeiro processo é a fissão nuclear, descoberta em 1938 e que, lamentavelmente, teve como primeira aplicação as bombas atômicas (na verdade, bombas nucleares) lançadas sobre Hiroshima e Nagasaki, em agosto de 1945. Depois, teve início a fabricação de diversos tipos de reatores nucleares para a produção de energia elétrica.

A fissão nuclear ocorre quando material radioativo pesado (por exemplo, U-235) é bombardeado com nêutrons, tendo como consequência sua divisão em elementos mais leves e a liberação de uma grande quantidade de energia. Um processo inverso a esse, denominado fusão nuclear, foi aventado por estudiosos importantes (James Jeans, Joseph Larmor, Arthur Eddington, entre outros) no início do século 20 para explicar a produção de energia no Sol e em outras estrelas. Em vez de produzir energia pela divisão de um núcleo pesa-

do, o Sol produziria energia pela fusão de núcleos leves [5]. Alguns trabalhos foram publicados a esse respeito, mas foram os estudos de Hans Bethe, realizados no mesmo ano da descoberta da fissão nuclear, que ficaram para a história como a explicação do processo de geração de energia nas estrelas [6]. Por exemplo, a fusão de dois deutérios (isótopo de hidrogênio, com um próton e um nêutron no núcleo) produz 4,03 MeV. Pela explicação desse processo, Bethe ganhou o Prêmio Nobel de Física de 1967 [7]. Assim como no caso da fissão nuclear, a primeira aplicação da fusão foi a famigerada bomba de hidrogênio produzida pelos EUA e testada no Atol de Eniwetok, em 1º de novembro de 1952.⁸

Entre o trabalho de Bethe e a explosão da Bomba H, Igor Tamm, Andrei Sakharov e colaboradores desenvolveram o Tokamak [8], o equipamento principal do aproveitamento civil da fusão nuclear (Fig. 3). Tokamak é o acrônimo da expressão russa *toroidal'naya kamera v magnitnykh katushkakh*, que significa câmara toroidal com bobinas magnéticas.

Rapidamente, a “tokamakmania” se espalhou pelo mundo. Tokamaks foram instalados em todos os países industrializados. No Brasil, a Universidade Esta-

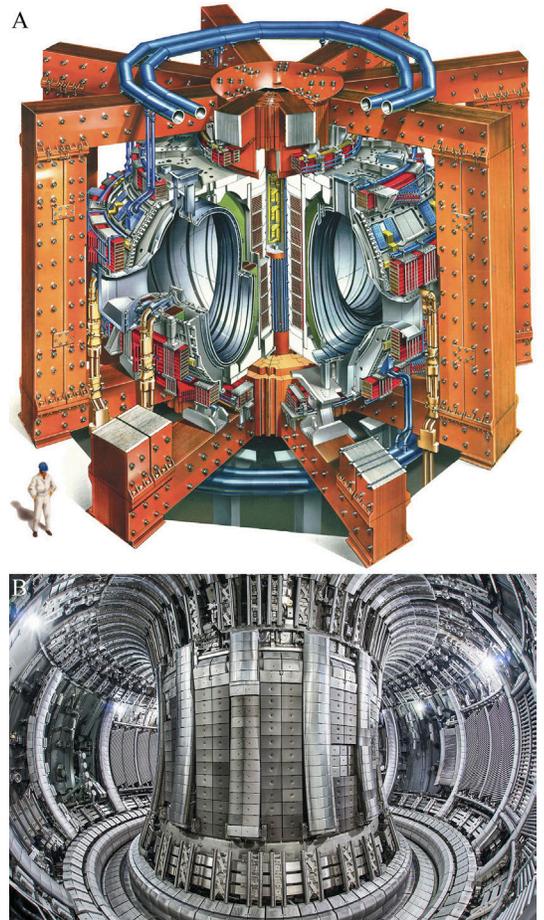


Figura 2 - (A): Desenho esquemático do maior Tokamak existente atualmente no mundo (JET, 1980); (B): Interior do JET (2011). Fonte: <https://www.euro-fusion.org/media-library/fusion-experiments/>.



Figura 3 - Primeiro Tokamak fabricado no Instituto Kurchatov de Moscou, em 1958. Fonte: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e5/Tokamak_T-1.jpg.

dual de Campinas (Unicamp), a Universidade de São Paulo (USP) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) seguiram a moda.

Em 1989, Martin Fleischmann, professor de química da Universidade de Southampton (Inglaterra), e Stanley Pons, professor de química da Universidade de Utah (EUA), publicaram um artigo que gerou uma enorme controvérsia na comunidade científica internacional. Eles relataram a descoberta de um fenômeno, logo denominado “fusão a frio”. O título do trabalho era *Fusão nuclear de deutério eletroquimicamente induzida* [9]. De vez em quando, um novo artigo sobre o tema aparece, mas poucos cientistas o levam a sério.

A fusão nuclear voltou a ser assunto para o grande público em 1992, quando a Comunidade Europeia, a Coreia do Sul, a China, os Estados Unidos, o Japão e a Rússia decidiram construir o Reator Termonuclear Experimental Internacional (ITER, na sigla inglesa). Na verdade, esse projeto teve origem em uma colaboração entre os Estados Unidos e a União Soviética iniciada em 1985.⁹ O ITER é considerado o último passo em direção ao teste final de exequibilidade da fusão nuclear em escala industrial, quando será construído o reator chamado Demo. Depois do teste com o Demo, deverão surgir instalações industriais que permitirão a realização desse

A energia liberada na fusão nuclear, assim como na fissão nuclear, é calculada pela equação de Einstein $E = mc^2$

processo em larga escala.

No início de 2009, o tema da fusão nuclear veio novamente à baila porque todo o projeto ITER estava sendo redimensionado, com objetivos menos ambiciosos e cronograma mais dilatado. A comunidade científica foi aprendendo que, embora o princípio da fusão nuclear seja estonteantemente simples, sua utilização em artefatos industriais é muito mais complexa do que se imaginava.

E assim chegamos a essa extraordinária façanha relatada pela equipe inglesa do JET: 59 megajoules durante 5 s!

Cabe a pergunta, que responderemos ao final deste artigo: por que a fusão nuclear está sempre atrasada?

3. Como, exatamente, ocorre a fusão nuclear?

É instrutivo colocarmos lado a lado os dois processos pelos quais a energia é extraída de reações nucleares (Fig. 4). Podemos dizer que um é o oposto do outro, mas ambos resultam na liberação de grandes quantidades de energia. Na fissão nuclear, um núcleo radioativo pesado é bombardeado com nêutrons, resultando em núcleos mais leves, nêutrons e liberação de energia. Por exemplo, ao ser bombardeado por um nêutron, o U-235 transforma-se em U-236, que depois se divide em Ba-144, Kr-89 e 3 nêutrons. Esta reação libera energia no valor aproximado de 200 MeV, que é calculada a partir da famosa equação de Einstein: $E = mc^2$.

A fusão nuclear ilustrada na Fig. 4 (deutério + trítio), que libera 17,59 MeV, é a mais usada atualmente, mas não é a mais simples. Em seu clássico artigo de 1939, *Produção de energia nas estrelas*, Bethe analisou várias reações, desde a mais simples, envolvendo a fusão de dois núcleos de hidrogênio, até as mais complexas, envolvendo alguns dos elementos leves da tabela periódica [6], entre as quais estão apresentadas na

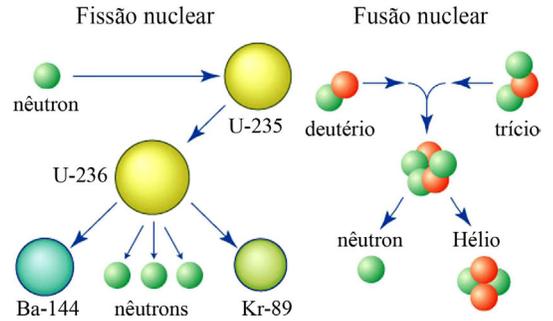
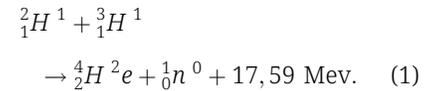


Figura 4 - Reações de fissão e fusão nuclear. Adaptado de https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Nuclear_fission_reaction.svg.

Tabela 1.

Curiosamente, Bethe não deu destaque à reação mais usada atualmente (deutério + trítio):



Em todas essas reações, o subscrito indica a quantidade de prótons no núcleo, enquanto o sobrescrito indica o número de massa, ou seja, a soma de prótons e nêutrons. Da mesma forma como na fissão nuclear, a energia é calculada com a fórmula de Einstein.

Aqui, vale a pena abrir um parêntese para uma breve digressão em torno dessa equação, deduzida por Einstein em 1905, no bojo da sua teoria da relatividade restrita [10, 11]. Ela é geralmente conhecida como a equivalência de massa e energia. Ou seja, qualquer massa, mesmo em repouso, tem associada a ela a energia dada pela equação de Einstein. Do ponto de vista instrumental, ela é mais apropriadamente relacionada com processos em escala atômica. Sempre que há uma “perda” de massa, ela aparece sob a forma de energia. Além dos casos já mencionados, um bastante interessante e didático é aquele associado com a energia de ligação de partículas nucleares. Por exemplo, o deutério, formado por um próton e um nêutron, tem massa igual a 2,014102 amu. Essa massa é menor do que a soma das massas do próton e do nêutron (2,01649 amu). Então, para onde foi a massa “perdida” (0,002388 amu)? A resposta é: ela foi transformada em energia de ligação do deutério. Para calcular essa energia, ou para realizar quaisquer cálculos envolvendo massas e energia em escala atômica, convém usar a unidade de massa

Tabela 1: Quatro reações de fusão nuclear analisadas por Hans Bethe [6].

${}^1_1\text{H}^1 + {}^1_1\text{H}^1 \rightarrow {}^2_1\text{H}^1 + \epsilon^+ + \text{energia}$	${}^{12}_6\text{C}^6 + {}^1_1\text{H}^1 \rightarrow {}^{13}_7\text{N}^7 + \gamma + \text{energia}$
${}^2_1\text{H}^1 + {}^2_1\text{H}^1 \rightarrow {}^3_1\text{H}^2 + {}^1_0\text{n}^0 + \text{energia}$	${}^2_1\text{H}^1 + {}^2_2\text{He}^2 \rightarrow {}^3_2\text{Li}^3 + \text{energia}$

atômica (atomic mass unity), amu:

$$1 \text{ amu} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg.} \quad (2)$$

Depois de passar de kg para amu, convém expressar amu em unidades de energia. Para isso, basta colocar $1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ na equação $E = mc^2$, com $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Obtém-se, assim, $1,494 \times 10^{-10} \text{ J}$. Sabendo que $1 \text{ J} = 6,24 \times 10^{18} \text{ eV}$, chegamos à conversão de 1 amu em MeV (milhão de eV):

$$1 \text{ amu} = 931 \text{ MeV.} \quad (3)$$

Se um amu é igual a 931 MeV, 0,002388 será igual a 2,22 MeV, que é a energia de ligação do deutério.

Voltemos ao tema da fusão. Para que ela seja possível, são necessárias pelo menos duas condições facilmente observadas no interior das estrelas, mas de difícil reprodução em laboratório. Mesmo que tais condições sejam reproduzidas em laboratório, há que se ter um plasma sustentável, de modo que se possa extrair energia da reação em valor superior àquele gasto na produção da reação. A primeira condição tem a ver com a superação da repulsão elétrica entre os dois núcleos (p. ex. H_2 e H_3). Esta superação é obtida nas estrelas por conta das altas temperaturas ali existentes, implicando em colisões em altas velocidades. Uma vez atingida essa condição, é necessário manter os núcleos confinados em um volume muito pequeno a fim de aumentar a probabilidade de colisões. Isso acontece nas estrelas por causa da alta gravidade ali existente.

Na falta da alta gravidade existente nas estrelas, os experimentos em laboratório necessitam de temperaturas mais altas. Por exemplo, enquanto no Sol a fusão se dá em 10 milhões de graus Celsius, no laboratório são necessárias temperaturas 10 vezes maiores. Entre tantas dificuldades técnicas para se obter as condições de fusão nuclear sustentável, uma das mais importantes se refere ao confinamento do plasma quente. Por exemplo, na grande façanha do JET, noticiada em fevereiro, o plasma, nessas condições extremas, só foi mantido confinado durante 5 segundos. Em condições de “plasmas frios”, como nos processos de nitretação em plasma, não há dificuldade em mantê-lo confinado por longos períodos de tempo.

4. Como funciona o tokamak?

É extensa a literatura sobre o tokamak. Selecionei apenas duas referências:

as: uma pelo relato histórico que faz [8] e outra pela revisão atualizada do estado da arte [12].

Segundo Smirnov [8], no início dos anos 1950, muitos pesquisadores vinham trabalhando secretamente com o problema da fusão nuclear:

Na cerimônia de abertura da Primeira Conferência Internacional das Nações Unidas sobre Usos Pacíficos da Energia Atômica, realizada em Genebra em 1955, o notável físico indiano Homi Bhabha afirmou que a conferência discutiria apenas o uso da energia proveniente da divisão nuclear pesada, mas que o futuro estaria com a energia de fusão dos núcleos leves. Tendo dito isso, Bhabha fez uma pausa, mas sem reação dos delegados reunidos. Hoje sabemos que muitos cientistas entre os presentes já haviam pesquisado sobre a fusão nuclear controlada, mas que todos esses trabalhos eram secretos.

A iniciativa de torná-los públicos veio da URSS. A palestra de I.V. Kurchatov em Harwell em abril de 1956 sobre descargas pulsadas de alta corrente relacionadas à fusão foi o primeiro passo nessa direção.

Dois anos depois, na Segunda Conferência de Genebra sobre o problema da fusão nuclear, foram apresentados 105 trabalhos, detalhando pesquisas realizadas na URSS, EUA, Reino Unido, Alemanha e outros países. Ficou assim demonstrado que, apesar das atividades secretas, e aparentemente sem qualquer fuga de informação, as pesquisas foram conduzidas em direções praticamente idênticas. A conferência não resultou em uma colaboração imediata em pesquisa científica entre diferentes países, mas demonstrou uma abordagem científica comum e que era desnecessário manter as pesquisas em segredo, dada a falta de usos potenciais de instalações de confinamento magnético para trabalhos orientados à defesa. Esta foi uma

base sólida para iniciar a ampla colaboração internacional em fusão no futuro [Tradução nossa].

O primeiro projeto de um tokamak foi elaborado por I. E. Tamm e seu aluno de doutorado A. D. Sakharov por volta de outubro de 1950 (Fig. 3). O primeiro experimento realizado pela equipe soviética foi uma reação entre dois deutérios, ou reação D-D. Para evitar uma série de problemas técnicos e implementar melhores condições operacionais, que não cabem aqui serem discutidos, o equipamento passou por mais de 15 modelos ao longo das três primeiras décadas de funcionamento.

O princípio da fusão nuclear é simples, assim como a ideia básica do tokamak. E por que então ainda não se chegou a utilizar tudo isso de modo sustentável? Na próxima seção, farei uma abordagem simplificada dessa questão. Pretendo agora apresentar, também de modo simplificado, como funciona essa máquina.

A Fig. 5 é um esquema básico da câmara de um tokamak. Para simplificar, esqueça o campo magnético poloidal ($\mathbf{B}_{\text{poloidal}}$). Excetuando esse artifício técnico, tudo que está na figura é perfeitamente compreensível por quem estudou o volume 3 de Halliday e Resnick [13]. Tem-se uma câmara toroidal (uma espécie de pneu) confeccionada com algum tipo de metal envolvido por uma bobina condutora, ou solenoide condutor. Se uma corrente elétrica circular no solenoide, ela produzirá um campo magnético toroidal. Se houver cargas em movimento no interior do toroide, elas serão aceleradas pelo campo $\mathbf{B}_{\text{toroidal}}$ percorrendo uma espiral em volta do campo. Se as velocidades e a pressão forem suficientemente altas para a superação da repulsão elétrica, ocorrerá o choque entre as partículas do gás em condições de produzir a fusão.

A força do campo magnético (\mathbf{B}) sobre uma carga (q) em movimento (velocidade v) é conhecida como força de Lorentz¹⁰

$$F = qv \times B. \quad (4)$$

No interior do tokamak, há um plasma (íons + elétrons) com os constituintes das diversas reações de fusão nuclear. Como já foi dito, os mais usados atualmente nos reatores de primeira geração são deutério (núcleo de hidrogênio com um próton e um nêutron) e trítio (núcleo de hidrogênio com um

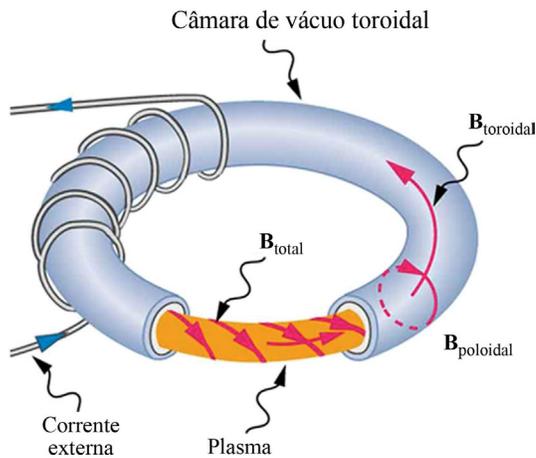


Figura 5 - Representação esquemática da câmara de um tokamak. Adaptado de https://openstax.college-physics_22.26b_tokamak-schematic.jpeg.

próton e dois nêutrons). Quando este plasma é aquecido, sua pressão aumenta. Um campo magnético muito intenso aumenta a probabilidade de choque entre esses dois isótopos em condições de produzir a reação de fusão nuclear.

5. De breakthrough em breakthrough no rumo do breakeven

Esses dois termos são extensivamente utilizados na literatura internacional pertinente aos experimentos de fusão nuclear. *Breakthrough* significa mais do que avanço: significa quebra de barreiras; enquanto *breakeven* significa empate. No caso da fusão nuclear, *breakeven* significa o empate entre a energia gasta para obter a reação e a energia recuperada durante a reação. A fusão só poderá ser usada comercialmente quando a energia recuperada for superior à energia gasta. Até o momento, nem mesmo o empate foi obtido.

No início dos anos 1990, a comunidade científica internacional percebeu que o *breakeven* só poderia ser atingido por meio da cooperação entre os grandes laboratórios instalados nos diversos países. Foi assim que surgiu o ITER, que, em certa medida, lembra o projeto Manhattan, mas com um ingrediente praticamente incontornável. No caso do

Manhattan, havia o interesse de um governo, o dos EUA.¹¹ No caso do ITER, são várias nações colaborando, com problemas geopolíticos muito sensíveis. Por exemplo, o que ocorrerá agora, com a invasão da Rússia na Ucrânia?

Assim como no Manhattan cada equipe desenvolvia uma parte do projeto, no ITER, cada país se responsabiliza pelo desenvolvimento de pesquisas referentes a determinados aspectos do processo de obtenção de energia através da fusão nuclear. O objetivo do ITER é chegar ao reator chamado Demo, que estará a um passo do uso comercial da fusão nuclear. Mas o que se verifica no momento é que cada resposta que sai das pesquisas dá origem a novas perguntas [14].

Manter o plasma confinado no tokamak tem sido um problema desafiador, levando os pesquisadores a testarem diversas alternativas [15]. Logo descobriram, no início dos estudos com o tokamak, que, além do campo magnético toroidal, cujas linhas de força estão no sentido do toroide, há necessidade de um campo poloidal, com suas linhas envolvendo o plasma. Além disso, um outro tipo de reator está sendo testado. Trata-se do *stellarator*, que produz plasma de alta densidade e mais estável do que o tokamak. No entanto, a complexa geometria de suas bobinas magnéticas (Fig. 6) dificulta a fabricação.

Acrescente a isso as dificuldades técnicas e os problemas de financiamento em um ou outro país, o que frequentemente posterga objetivos inicialmente definidos.

6. Comentários finais

O presente artigo sugere uma estratégia para introduzir tópicos de física moderna a partir de um resultado importante da tecnologia contemporânea.

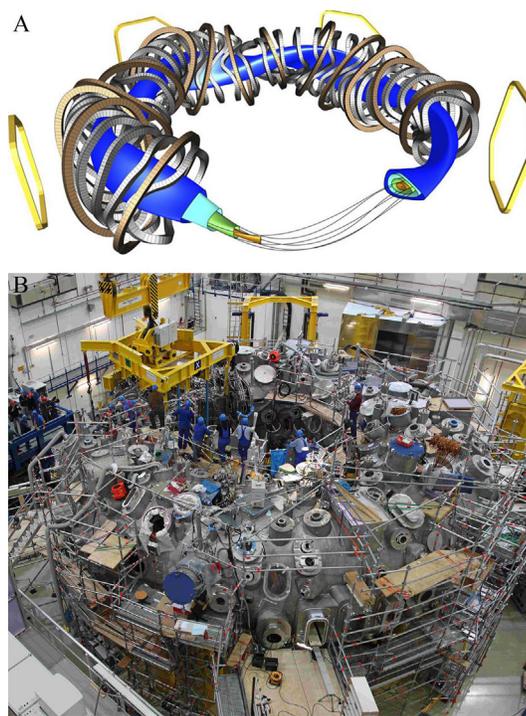


Figura 6 - (A): Representação esquemática do *stellarator* Wendelstein 7-X, ilustrando a complexa geometria das bobinas magnéticas. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/01/Wendelstein_7-X_layout_magnetic_surfaces.jpg; (B): Instalação, em 2011, do último módulo do W7-X. Tino Schulz (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik). https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8f/Wendelstein7-X_Torushall-2011.jpg.

Ou seja, com base na notícia de que uma equipe do JET (*Joint European Torus*) bateu recordes de obtenção de energia por meio da fusão nuclear em um reator tokamak, é possível planejar uma transposição didática retrospectiva até a descoberta da radioatividade e, a partir daí, iniciar um roteiro didático abordando, em linguagem compatível com a do Ensino Médio, os avanços históricos da radioatividade e da física nuclear.

Agradecimento

Agradeço ao prof. Luiz Fernando Ziebell (IF-UFRGS) pela criteriosa leitura que fez do manuscrito.

Recebido em: 6 de Abril de 2022

Aceito em: 12 de Maio de 2022

Notas

¹<https://www.bbc.com/news/science-environment-60312633>.

²<https://www.theguardian.com/environment/2022/feb/09/nuclear-fusion-heat-record-a-huge-step-in-quest-for-new-energy-source>; <https://www.theguardian.com/commentisfree/2022/feb/13/power-stars-energy-needs-fusion-energy-industry>.

³<https://edition.cnn.com/2022/02/09/uk/nuclear-fusion-climate-energy-scen-intl/index.html>; <https://edition.cnn.com/2022/02/11/opinions/nuclear-fusion-energy-climate-change-lincoln/index.html>.

⁴<https://www.thesun.co.uk/tech/17602748/machine-replicates-sun-clean-energy-climate-change-solve/>.

⁵<https://cienciahoje.org.br/coluna/o-vaivem-da-fusao-nuclear/>.

⁶<https://www.iter.org>.

⁷<https://www.euro-fusion.org/devices/jet/>.

⁸<https://www.atomicheritage.org/event/november-1-1952>.

⁹Em 1973, Richard Nixon e Leonid Brezhnev tentaram fazer um acordo similar, denominado INTOR, acrônimo em inglês para Reactor Tokamak Internacional. Mas a ideia não vingou, e em 1985 o INTOR foi substituído pelo ITER.

¹⁰Na verdade, a força de Lorentz é a soma das forças do campo elétrico e do campo magnético. Como estamos aqui considerando apenas o campo magnético, usamos essa definição simplificada da força de Lorentz, como é usual em muitos textos didáticos.

¹¹Havia a colaboração de cientistas de vários países, mas o controle de administração era exclusivamente dos EUA.

Referências

- [1] A. Vaughan, New Scientist [online], 2022. Disponível em: <https://www.newscientist.com/article/2307548-fusion-energy-record-suggests-wereally-%0Dcould-build-artificial-suns/>. [Acessado em: 22-Feb-2002].
- [2] M. Banks, Physics World [online], 2022. Disponível em: <https://physicsworld.com/a/fusion-energy-record-smashed-by-joint-european-torus-facility/>. [Acessado em: 22-Feb-2022].
- [3] J. Greenwald, Phys. Org. [online], 2022. Disponível em: <https://phys.org/news/2022-02-%0Abreakthrough-fusion-energy-devicecloser.%0Ahtml>. [Acessado em: 22-Feb-2022].
- [4] E. Gibney, Nature **602**, 371 (2022).
- [5] H. Kragh, arXiv, 2019. Disponível em <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2111/2111.02096.pdf>.
- [6] H.A. Bethe, Phys. Rev. **55**, 434 (1939).
- [7] H.A. Bethe, Nobel Prize Organization [online], 1967. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/bethe-lecture.pdf>. [Acessado em: 22-Feb-2022].
- [8] V.P. Smirnov, Nucl. Fusion, **50**, 013003 (2010).
- [9] M. Fleischmann, S. Pons, J. Electroanal. Chem. **261**, 301 (1989).
- [10] A. Einstein, *A Teoria da Relatividade Especial e Geral* (Contraponto, Rio de Janeiro, 2005).
- [11] A. Einstein, *The Collected Papers of Albert Einstein* [online] 1905. Disponível em: <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-trans/186>. [Acessado em: 01-Mar-2022].
- [12] Y. Song, E3S Web Conf. **292**, 1 (2021).
- [13] D. Halliday, R. Resnick, *Física Básica, Vol. 3* (Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1981).
- [14] N. Scharping, Discover Magazine [online], 2016. Disponível em <https://www.discovermagazine.com/technology/why-nuclear-fusion-is-always-30-years-away>.
- [15] T. Clynes, IEEE Spectrum [online], 2020. Disponível em <https://spectrum.ieee.org/5-big-ideas-for-making-fusion-power-a-reality>.