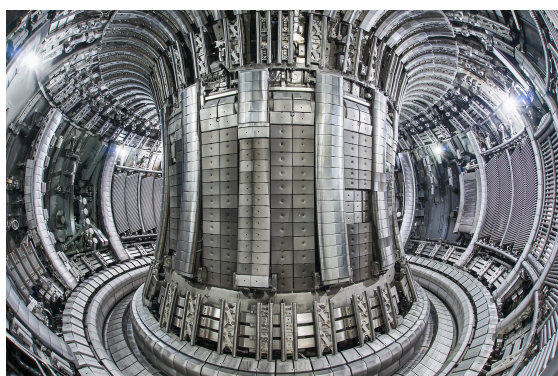


Fusão nuclear, agora vai?

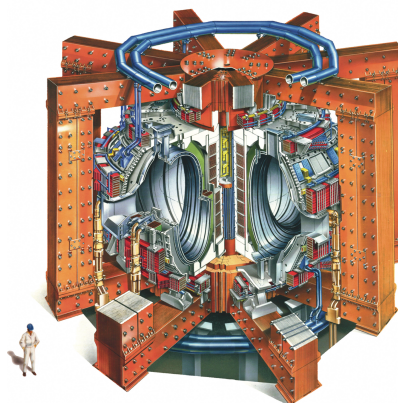
Carlos Alberto dos Santos

Para citar este artigo: C. A. dos Santos. Fusão nuclear, agora vai? Disponível em <http://profcarlosalberto.com/images/fusaonuclear.pdf>.

Em 2009 publiquei na minha coluna da Ciência Hoje Online, o artigo *O vaivém da fusão nuclear* que aqui usarei extensivamente, pela sua pertinência¹. Naquela oportunidade, a motivação do artigo foi o redimensionamento do projeto ITER². O presente artigo também é motivado pelo Projeto ITER, mas dessa vez por uma razão que todos acreditam mais do que relevante. Trata-se de uma façanha obtida por uma equipe do JET (*Joint European Torus*)³: a obtenção de um recorde de energia (59 megajoules), durante 5 segundos, tempo em que o confinamento do plasma se manteve sustentável no interior do Tokamak.



Interior do Tokamak do JET (2011). Fonte: <https://www.euro-fusion.org/media-library/fusion-experiments/>.



Desenho esquemático do Tokamak do JET (1980). Fonte: <https://www.euro-fusion.org/media-library/fusion-experiments/>.

O evento despertou a atenção da comunidade científica⁽¹⁾, dos meios de comunicação dedicados à divulgação científica^(2–4), e de importantes meios de comunicação de massa internacionais: BBC News⁴, The Guardian⁵, CNN⁶ e The Sun⁷.

¹ <https://cienciahoje.org.br/coluna/o-vaivem-da-fusao-nuclear/>.

² <https://www.iter.org>.

³ <https://www.euro-fusion.org/devices/jet/>.

⁴ <https://www.bbc.com/news/science-environment-60312633>.

⁵ <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>.

⁶ <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>.

⁷ <https://www.thesun.co.uk/tech/17602748/machine-replicates-sun-clean-energy-climate-change-solve/>.

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.

Existem dois processos pelos quais 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 eletricidade.

A fissão nuclear ocorre quando material radioativo pesado (por exemplo, U-235) é bombardeado com nêutrons, se dividindo em elementos mais leves, com a liberação de uma grande quantidade de energia. No início do século 20, vários estudiosos importantes (Jeans, Larmor, Eddington, entre outros) aventaram a possibilidade de a energia solar ser produzida por meio de um processo inverso à fissão nuclear. Ou seja, em vez de produzir energia pela divisão de um núcleo pesado, 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 1937(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 1952⁸.



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

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

Rapidamente a “tokamakmania” espalhou-se pelo mundo. Tokamaks foram instalados em todos os países industrializados. No Brasil, a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), a Universidade de São Paulo (USP) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) seguiram a moda. Mas as pesquisas não tiveram muito impacto nos meios de comunicação de massa.

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

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

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(8). De vez em quando, aparece um novo artigo sobre o tema, mas poucos cientistas 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. O ITER é considerado o último passo em direção ao teste final de exequibilidade da fusão nuclear em escala industrial, conhecido como Demo. Depois desse teste, deverão surgir instalações industriais que permitirão a realização desse processo em larga escala.

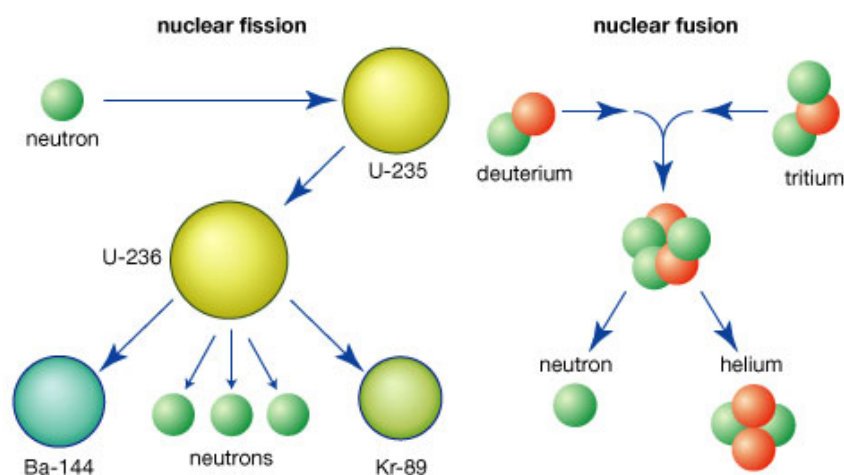
No início de 2009, o tema da fusão nuclear veio novamente à baila porque todo o projeto ITER estava sendo redimensionado, com objetivos menos ambiciosos e cronograma mais dilatado. Embora o princípio da fusão nuclear seja estonteantemente simples, sua utilização em artefatos industriais é muito mais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

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

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

Exatamente, como ocorre a fusão nuclear?

É instrutivo colocarmos lado a lado os dois processos pelos quais energia é extraída de reações nucleares. Podemos dizer que um é o oposto do outro, mas ambos resultam na liberação de grandes quantidades de energia.



<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/39/ฟิวชั่น.jpg>

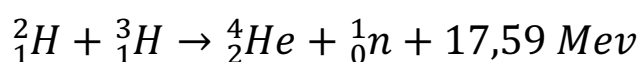
Na fissão nuclear, um núcleo radioativo pesado é bombardeado com nêutrons, resultando em núcleos mais leves, nêutrons e liberação de energia. Por exemplo, ao ser

bombardeado por um nêutron, o U-235 transforma-se em U-236, após o que ele se divide em Ba-144, Kr-89 e 3 nêutrons. Esta reação libera energia no valor de aproximadamente 200 MeV. Essa energia é calculada a partir da famosa equação de Einstein, $E=mc^2$.

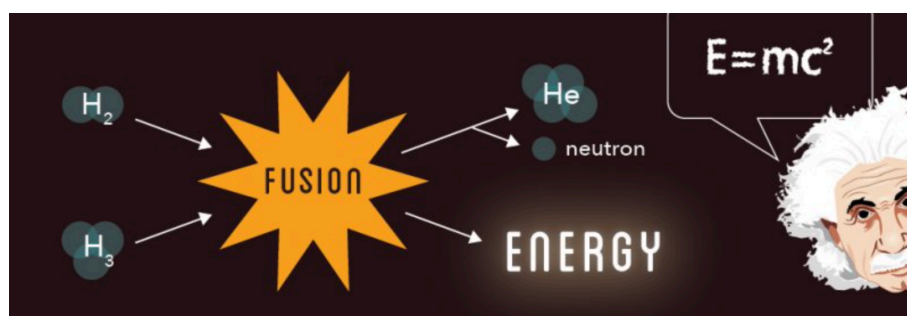
A fusão nuclear ilustrada na figura (deutério + trítio), que libera 17,59 MeV, é a mais usada atualmente, mas obviamente não é a mais simples. Em seu clássico artigo de 1939, *Produção de energia nas estrelas*, Bethe analisou várias reações, desde a mais simples, envolvendo a fusão de dois núcleos de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

${}^1_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^2_1H + \varepsilon^+ + \text{energia}$	${}^{12}_6C + {}^1_1H \rightarrow {}^{13}_7N + \gamma + \text{energia}$
${}^2_1H + {}^2_1H \rightarrow {}^3_2He + {}^1_0n$	${}^2_1H + {}^4_2He \rightarrow {}^6_3Li$

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.



<https://www.energy.gov/articles/how-does-fusion-energy-work>.

Mas, para que tudo isso 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 estável, 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, para 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 dez milhões de graus Celsius, no laboratório são necessárias temperaturas dez vezes maiores. Entre tantas dificuldades técnicas para se obter as condições de fusão nuclear sustentável, uma das mais importantes refere-se ao confinamento do plasma. Por exemplo, na grande façanha noticiada recentemente (fevereiro), o plasma só foi mantido confinado durante 5 segundos.

Como funciona o tokamak?

É extensa a literatura sobre o tokamak. Selecionei apenas duas referências, uma pelo relato histórico que faz(9), e outra pelo revisão atualizada(10).

Segundo Smirnov(9), no início dos anos 1950 muitos pesquisadores vinham trabalhando secretamente com o problema da fusão nuclear:

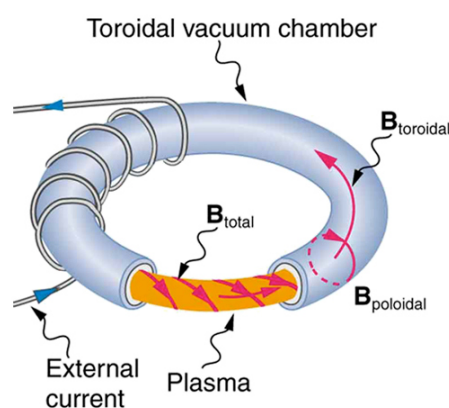
At the opening ceremony of the United Nations First International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy held in Geneva in 1955, the outstanding Indian physicist Homi Bhabha stated that the conference would only be discussing the use of energy from heavy nuclear splitting but that the future would lie with the fusion energy of light nuclei. Having said this, Bhabha paused, but with no reaction from the assembled delegates. Today we know that many scientists among those present had already worked on the controlled nuclear fusion (NF) research problem, but that all these works were strictly classified.

The initiative to declassify came from the USSR. I.V. Kurchatov's lecture in Harwell in April 1956 about fusion related high current pulsed discharges was the first step in this direction. Two years later, at the Second Geneva Conference on the NF problem, 105 papers were presented, detailing work performed in the USSR, USA, UK, Germany and other countries. Thus it was shown that, despite the regime of classification, and apparently without any leakage of information, research had been conducted in practically identical directions. The conference did not result in an immediate collaboration in scientific research between different countries, but it demonstrated a common scientific approach and that the regime of research classification in the field was unnecessary given the lack of potential uses of magnetic confinement facilities for defence-oriented work. This was a solid basis to begin the wide international collaboration in fusion in the future.

Tudo indica que 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. Veja acima uma fotografia do primeiro tokamak, cuja construção teve início em 1958. 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 melhor condições operacionais, que não cabem serem discutidos aqui, o equipamento passou por mais de 15 modelos ao longo das três primeiras décadas de funcionamento.

O princípio da fusão nuclear é simples, e também simples é 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.

O desenho abaixo é um esquema básico 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(11). Tem-se uma câmara toroidal (uma espécie de pneu) confeccionado 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 pressão forem altas, ocorrerá o choque entre as partículas do gás. Tem-se a fusão.

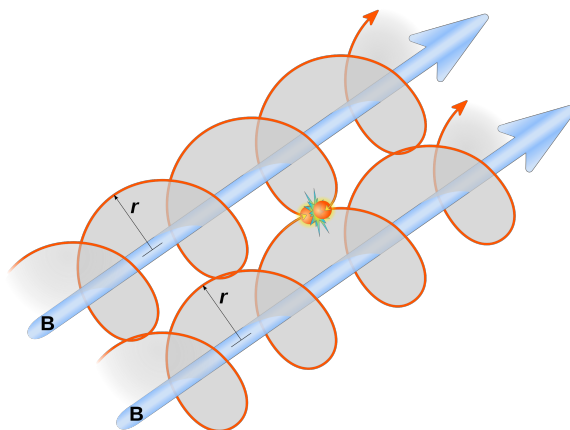


Openstax_college-physics_22.26b_tokamak-schematic.jpeg.

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

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

No interior do tokamak existe um plasma (íons + elétrons) com os constituintes das diversas reações de fusão nuclear. 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 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.

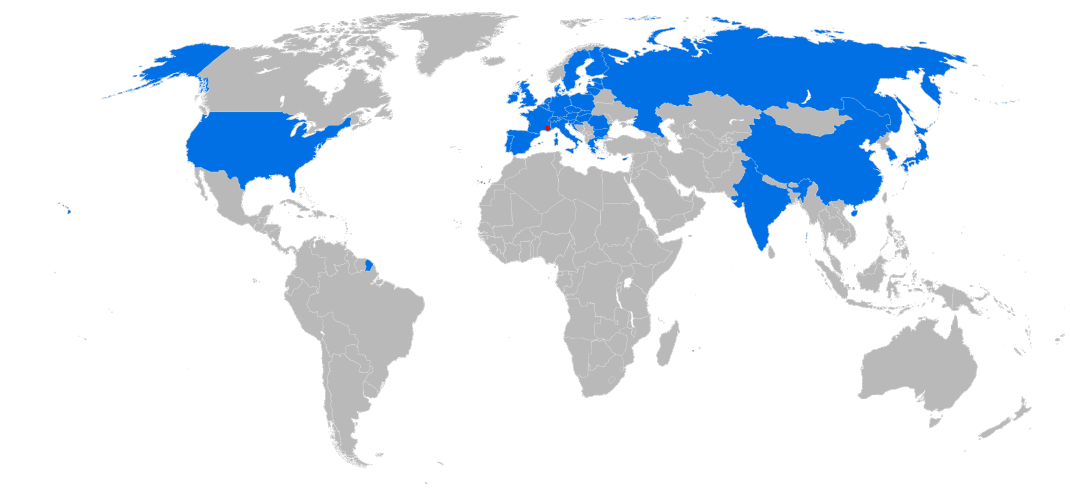


Ion_paths_in_a_weak_magnetic_field.png

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 avanço, 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 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 incontrolável. No caso do Manhattan, havia o interesse de um governo, o dos EUA. 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?



Participantes do ITER (regiões em azul).

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/02/ITER_participants.svg/2560px-ITER_participants.svg.png



Tokamak KSTAR, em Daejeon, Coréia do Sul.

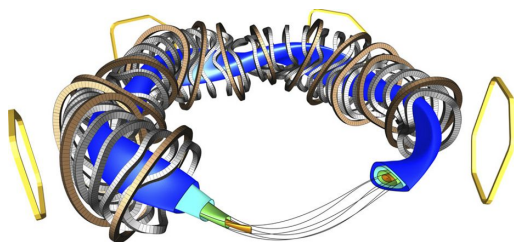
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:KSTAR_tokamak.jpg

Michel Maccagnan, 2007.

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 denominado DEMO, aquele 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(12).

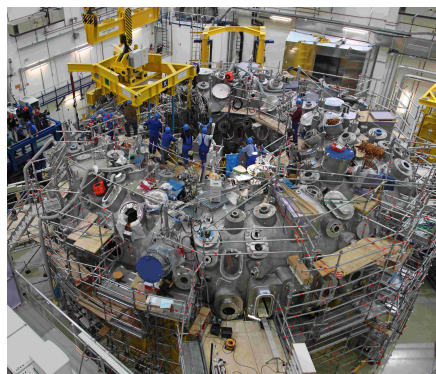
Manter o plasma confinado no tokamak tem sido um problema desafiador, levando os pesquisadores a testarem diversas alternativas(13). Logo descobriram que além do campo magnético toroidal, cujas linhas de força estão no sentido do toróide, há necessidade de um campo poloidal, com suas linhas envolvendo 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 dificulta a fabricação.

Acrescente-se às dificuldades técnicas, problemas de financiamento em um ou outro país, o que frequentemente posterga objetivos inicialmente definidos.



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.



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.

Para concluir, vejamos alguns dos eventos registrados na história da fusão nuclear, até 2020(13):

- 1920: O astrônomo britânico Arthur Eddington sugere que o Sol e outras estrelas produzem energia por meio da fusão de átomos de hidrogênio.
- 1934: O físico australiano Mark Oliphant observa reação de fusão no seu laboratório na Universidade de Cambridge.
- 1958: Pesquisadores em Los Alamos demonstram a primeira fusão termonuclear controlada.
- 1958: Início da operação do primeiro tokamak, T-1, na União Soviética.
- 1974: A empresa privada KMS Fusion bombardeia uma amostra contendo deutério e trítio, obtendo a primeira fusão induzida por laser.
- 1985: Mikhail Gorbachev e Ronald Reagan assinam uma colaboração para pesquisa em fusão, que terminou desembocando no projeto ITER.
- 1995: Pesquisadores do Laboratório de Plasma de Princeton, obtêm com um tokamak o recorde de temperatura de 510 milhões de graus Celsius.
- 1997: O reator JET, na Inglaterra, produz o recorde de 16 megawatts.
- 2013: Começa a construção do ITER no Sul da França.
- 2013: A Instalação Nacional de Ignição (NIF, na sigla em inglês) produz mais energia do que a fornecida para a implosão.
- 2019: Dois terços da construção do ITER é concluída. Espera-se que produza 10 vezes mais energia do que a necessária para colocá-lo em operação.

Referências

1. Gibney E. Nuclear-fusion reactor smashes energy record. Nature. 2022;602:371-.
2. Vaughan A. Fusion energy record suggests we really could build artificial suns [Internet]. New Scientist. 2022 [cited 2022 Feb 22]. Available from: <https://www.newscientist.com/article/2307548-fusion-energy-record-suggests-wereally-%0Dcould-build-artificial-suns/>
3. Banks M. Fusion energy record smashed by Joint European Torus facility

- [Internet]. Physics World. 2022 [cited 2022 Feb 22]. Available from: <https://physicsworld.com/a/fusion-energy-record-smashed-by-joint-european-torus-facility/>
4. Greenwald J. Breakthrough brings a fusion energy device closer to realization [Internet]. Phys.Org. 2022 [cited 2022 Feb 22]. Available from: <https://phys.org/news/2022-02-%0Abreakthrough-fusion-energy-devicecloser.%0Ahtml>
 5. Kragh H. Reluctant Pioneer of Nuclear Astrophysics: Eddington and the Problem of Stellar Energy. In: Arthur S Eddington: From Physics to Philosophy and Back Again [Internet]. Paries; 2019. Available from: <https://arxiv.org/pdf/2111.02096.pdf>
 6. H. A. Bethe. Energy Production in Stars. Phys Rev. 1939;55:434–56.
 7. H. A. Bethe. Energy production in stars [Internet]. Nobel Prize Organization. 1967 [cited 2022 Feb 22]. p. 215–33. Available from: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/bethe-lecture.pdf>
 8. Fleischmann M, Pons S. Electrochemically induced nuclear fusion of deuterium. J Electroanal Chem. 1989;261:301–8.
 9. Smirnov VP. Tokamak foundation in USSR/Russia 1950–1990. Nucl Fusion 50. 2010;50(013003(8pp)).
 10. Song Y. The progress and current status of Tokamak: a systematic review. E3S Web Conf. 2021;292:1–5.
 11. Halliday D, Resnick R. Física Básica, vol. 3. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; 1981. 334 p.
 12. Scharping N. Why Nuclear Fusion Is Always 30 Years Away. Discover Magazine [Internet]. 2016; Available from: <https://www.discovermagazine.com/technology/why-nuclear-fusion-is-always-30-years-away>
 13. Clynes T. 5 BIG IDEAS FOR MAKING FUSION POWER A REALITY. IEEE Spectrum [Internet]. 2020; Available from: <https://spectrum.ieee.org/5-big-ideas-for-making-fusion-power-a-reality>

Carlos Alberto dos Santos é professor aposentado pelo Instituto de Física da UFRGS. Foi Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação da UNILA (2010-2011) e professor visitante sênior do Instituto Mercosul de Estudos Avançados-UNILA (2011-2015). Autor revelação do ano, categoria ficção, no Prêmio O Sul, Correios e os Livros, durante a Feira do Livro de Porto Alegre, 2003, com o livro *O plágio de Einstein*. Com o mesmo livro, foi 1º. lugar no Prêmio Marengo d’Oro (Categoria Autor Estrangeiro, Itália, 2004); 3º. lugar no Prêmio Jabuti em 2016 (Categoria Ciências da Natureza, Matemática e Meio Ambiente), pela organização do livro *Energia e matéria: da fundamentação conceitual às aplicações tecnológicas*.