

---

# FUSÃO NUCLEAR COM MUONS<sup>1</sup>

---

*Diógenes Galetti*  
Instituto de Física Teórica – UNESP  
São Paulo – SP

## I. Introdução

É bem sabido que certas reações nucleares liberam grande quantidade de energia e, como tal, podem ser de grande utilidade quando produzidas em cadeia controlada. Reatores são de conhecimento comum e supõe-se mesmo que países com alguma tecnologia dominem seus princípios básicos. Não obstante, a fissão nuclear, o princípio fundamental dos reatores, não é a única maneira de se produzir energia nesse contexto. As reações de fusão nuclear com elementos leves como o hidrogênio e seus isótopos, que podem ser obtidos da água do mar, são um campo extremamente rico para o estudo de novas possibilidades. Se, por um lado, a fusão nuclear a quente consubstanciada nos projetos de plasma já é de conhecimento amplo, há, por outro lado, um ramo de estudos menos divulgado e conhecidos que merece destaque. Aqui, a fusão nuclear de elementos leves induzida por muons (um méson da mesma família do elétron) será o motivo de nossa atenção. Para efeitos comparativos discutiremos inicialmente a fusão a quente nos seus ingredientes básicos e então descreveremos os princípios que mostram a fusão a frio com muons.

## II. Idéias gerais da fusão a quente

O procedimento costumeiro para se obter a chamada fusão nuclear a quente consiste em suprir os sistemas que se quer fundir com grandes quantidades de energia para se aquecer o gás (hidrogênio, deutério ou trítio) de tal forma a se estabelecer um plasma. Aí são bem conhecidos os problemas que tal tecnologia encontra, entre outros:

- i) Confinamento do plasma.
- ii) Manutenção do plasma por períodos longos em confinamento.
- iii) Controle das instabilidades do plasma.

---

<sup>1</sup> Notas do Colóquio oferecido no Departamento de Física da Universidade Federal de Santa Catarina em agosto de 1990.

iv) Tecnologia específica de materiais para a construção do vaso de contenção do plasma, bem como do equipamento eletrônico-eletrotécnico associado.

Esses problemas têm razões ou de especificidades da geometria (e inerentemente da eletrodinâmica e das instabilidades das soluções de suas equações) ou de **carácter intrínseco das reações nucleares** esperadas. Desta forma, no que se refere às reações nucleares, a necessidade de se aquecer o gás tem razões físicas bastante claras:

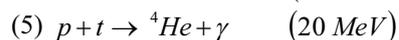
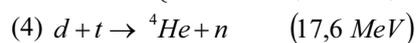
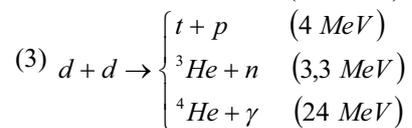
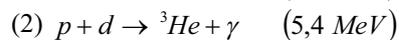
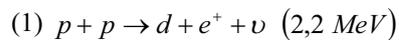
a) Em primeiro lugar vê-se que é necessário um excedente de energia para se fundir dois núcleos (hidrogênio, deutério ou trítio), já que, como ambos são sistemas eletricamente carregados (têm prótons), apresentam uma repulsão coulombiana.

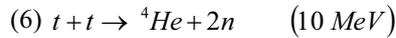
b) Um cálculo bastante simples para a repulsão coulombiana máxima dá uma energia equivalente de aproximadamente 340 KeV (kilo-elétron-volts) para cada par próton-próton (p-p), ou equivalentemente a dêuteron-dêuteron (d-d), próton-dêuteron (p-d), próton-trítio (p-t) ou dêuteron-trítio (d-t).

Como trabalhamos com sistemas na escala sub-atômica, sabemos que a dinâmica de tais sistemas deve obedecer as idéias da mecânica quântica e, como tal, podemos calcular a probabilidade que ocorra uma fusão nuclear mesmo em condições normais, i.e., sem aumento da pressão nem da temperatura. Esse cálculo é realizado, em geral, com algumas aproximações. Não obstante, são justamente esses efeitos quânticos que governam o processo de fusão nesses sistemas e, como tal, merecem ser discutidos com mais detalhes.

### III. Efeitos quânticos na fusão nuclear

As reações de fusão de fato não ocorrem somente quando os sistemas colidentes têm energia para sobrepujar a barreira coulombiana; na realidade elas começam a ocorrer com probabilidade significativa para energias bastante abaixo do máximo da barreira repulsiva coulombiana em virtude do tunelamento quanto-mecânico através daquela barreira. Experimentalmente, sabemos que as reações seguintes, que ocorrem com liberação de energia, são possíveis





Como já dissemos, a altura da barreira é da ordem de algumas centenas de KeV (kilo-elétron-volts) e, para a reação (4), foi determinado experimentalmente (com aceleradores) que a fusão começa a ocorrer com uma energia da ordem de 1 - 10 KeV para cima. Agora, uma energia média equivalente a 10 KeV pode ser obtida se colocarmos o sistema a uma temperatura de  $10^8$  Kelvin, quando então, havendo equilíbrio térmico, os átomos do gás apresentam uma distribuição de velocidades com um valor médio tal que a energia cinética correspondente é de 10 KeV. Dentro dessa análise de teoria cinética de gases vemos que: 1) o número de sistemas que têm energia maior do que a barreira coulombiana é pequeno, 2) isto significa que a maior parte das reações ocorre por efeito túnel quântico. Para esclarecer tal afirmação vamos considerar que os sistemas satisfaçam a distribuição de Maxwell-Boltzmann

$$d\omega_v = \left(\frac{m}{2\pi T}\right)^{\frac{3}{2}} 4\pi \exp\left[-\frac{mv^2}{2K_B T}\right] v^2 dv,$$

o que é bastante razoável dadas as condições do sistema global. Nota-se que, de fato, a região mais importante da distribuição de Maxwell-Boltzmann para reações termonucleares é aquela que, incluindo o fator da barreira coulombiana,  $\exp\left[-2\pi \frac{Z_1 Z_2 e^2}{\hbar v}\right]$ , onde

$v$  é a velocidade relativa e  $Z_1$  e  $Z_2$  são as cargas dos sistemas, dá o máximo para o expoente  $\left[-\frac{mv^2}{2K_B T} - 2\pi \frac{Z_1 Z_2 e^2}{\hbar v}\right]$ , i.e., na vizinhança da velocidade

$$v_o = \left(\frac{4\pi Z_1 Z_2 e^2 K_B T}{\hbar m}\right)^{\frac{1}{3}};$$

o valor da energia cinética correspondente

$$E_c^o = \frac{mv_o^2}{2}$$

assume, para a reação  $d + d$ , a  $T = 10^8$  Kelvin, o valor

$$E_c^o \sim 30 \text{ KeV},$$

que está consideravelmente abaixo do topo da barreira repulsiva coulombiana! Por essa razão o estudo do tunelamento quântico merece nossa atenção.

Como é bem sabido, o fator de tunelamento é dado na mecânica quântica pela expressão:

$$B = \exp \left\{ -\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} dx \sqrt{2m[U(x) - E]} \right\}$$

medindo a probabilidade de que uma partícula de massa  $m$  tunele uma barreira de potencial  $U(x)$ . Do ponto de vista físico, esta expressão apresenta inúmeros aspectos interessantes que passaremos a discutir.

a) Este fator é mais sensível à largura da barreira do que à altura da mesma. Isto pode ser verificado reescrevendo

$$B = \exp \left[ -\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m\bar{U}} (x_2 - x_1) \right]$$

onde  $\bar{U}$  é alguma altura média da barreira. Note-se que o fator de tunelamento varia linearmente com  $(x_2 - x_1)$ , a largura da barreira, e com a raiz quadrada da altura. É muito interessante verificar que esse resultado explica porque nas reações químicas as transições abaixo da barreira praticamente não têm qualquer importância; esse fato é devido a que, embora as barreiras de potencial sejam mais baixas (quando comparadas com aquelas nucleares), suas larguras são tão maiores que o fator de tunelamento se torna praticamente desprezível. Claro está que as reações químicas ocorrem sempre com energias acima da barreira.

b) Em virtude daquele resultado, vemos que poderíamos ter reações nucleares, mesmo para energias cinéticas bastante baixas dos núcleos, se pudéssemos trazê-los suficientemente próximos um do outro por efeito de pressão externa ou de forças químicas.

#### IV. Fusão nuclear com muons

Para as separações interatômicas costumeiras numa molécula de hidrogênio,  $r_0 \sim 0,74$  (ångströms), reações nucleares são praticamente impossíveis. Nesse caso, o fator de tunelamento é aproximadamente

$$B \cong \exp \left[ -\frac{2}{\hbar} (2m_e^2 r_0)^{\frac{1}{2}} \right],$$

onde  $m$  é agora a massa reduzida dos núcleos de hidrogênio na molécula. Contudo uma estimativa para  $r_0$  nos diz que ele é da ordem de grandeza do raio de Bohr para o elétron de ligação da molécula,  $r_0 \sim a_e = \frac{\hbar^2}{m_e e^2}$ , onde  $m_e$  é a massa do elétron e, conseqüentemente

$$B \cong \exp \left[ -2\sqrt{2} \sqrt{\frac{m}{m_e}} \right].$$

A partir desse resultado temos que a estimativa da probabilidade de uma reação nuclear numa molécula de hidrogênio-deutério (HD), dá, para  $1\text{m}^3$ , de HD líquido,  **$10^{-21}$  reações por ano!** O fascinante é notar, porém, que, se diminuíssemos a distância entre os núcleos por um fator de 5 a 10, a reação poderia atingir taxas bem mais interessantes; por exemplo, para 1 kg de deutério (D), a uma pressão de  $600 \times 10^6$  atmosferas (densidade  $80\text{ g/cm}^3$ ) e uma separação média entre as partículas no entorno da metade daquela da molécula de  $\text{H}_2$ , observar-se-ia **uma reação por minuto** em média. Esse tipo de reação seria conhecido como piezofusão. Por outro lado, não há compostos químicos que reduzam essa distância e, desta forma, facilitem reações de fusão.

Se estamos interessados, de alguma forma, em produzir um sistema que tenha probabilidade maior de fusão para que possamos ter energia liberada – veja a lista anterior de reações – devemos procurar alguma outra maneira de tornar B maior. De fato, olhando a expressão de B notamos que, como

$$B \cong \exp \left[ -2\sqrt{2} \sqrt{\frac{m}{m_e}} \right],$$

é suficiente termos um sistema molecular que seja ligado não por um elétron, mas sim por uma outra partícula com as mesmas propriedades do elétron, porém de massa maior! Isto quer dizer que um sistema de dois átomos ligados não por um elétron, mas por essa outra partícula de massa maior, tem uma separação menor entre seus núcleos (prótons) já que o raio de Bohr para a nova situação é

$$a_{part} = \frac{\hbar^2}{m_{part} e^2}.$$

A natureza, pródiga em partículas elementares, tem um tal candidato a substituto do elétron já que na família dos léptons temos:

Partícula	Nome	Vida Média	Massa
elétron	e	estável	$m_e$
muon	$\mu$	$10^{-6}\text{ s}$	$207 m_e$
tau	$\tau$	$5 \times 10^{-13}\text{ s}$	$3500 m_e$
+ neutrinos			

O candidato natural nessas circunstâncias é o méson  $\mu^-$  uma vez que pode ter carga negativa e quase não reage com o núcleo durante seu tempo de vida, i.e., o processo fundamental que caracteriza o tempo de vida do méson  $\mu^-$  em hidrogênio é a sua lei de decaimento

$$\mu^- \rightarrow e + \nu + \bar{\nu}$$

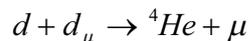
com uma taxa de decaimento  $\lambda_0 = 0,45 \times 10^6 s$  (o que dá sua vida média de  $10^{-6}$  s) e a taxa de reação com os prótons do hidrogênio

$$\mu^- + p \rightarrow n + \nu.$$

Porém, essa reação é da ordem de  $10^{-3}$  -  $10^{-4}$  vezes a sua probabilidade de decaimento, o que implica que o muon negativo praticamente não reage com os núcleos durante sua vida média. Assim, não se consideram reações de captura do muon negativo pelos núcleos. Desta forma, o muon negativo pode servir de partícula de ligação numa molécula no lugar do elétron e apresenta um raio de Bohr

$$r_{\mu^-} = \frac{\hbar^2}{m_{\mu} e^2} \sim 2,56 \times 10^{-11} \text{ cm},$$

que é muito menor que os  $10^{-8}$  cm do elétron! Esse é o ingrediente físico que indica o aumento de probabilidade de fusão das moléculas de elementos leves; o fator de tunelamento B é ampliado algumas ordens de grandeza e, com essa taxa de fusão, podemos produzir energia. Essas possibilidades formidáveis de resultados de grande significado físico foram descobertas teoricamente por F. C. Frank<sup>(1)</sup> em 1947 e depois estendidas por A. D. Sakharov<sup>(2)</sup> (1948) e Ya.B. Zel'dovich<sup>(3)</sup> (1954). É fascinante observar que Frank elaborou estas idéias imediatamente após os resultados de Powell, Lattes e Occhialini<sup>(4)</sup> sobre os mésons detectados em emulsões. Já Sakharov estudou em 1948 as reações nucleares produzidas por muons em deutério líquido, ou seja,



e estimou a vida da mesomolécula  $dd\mu$  como sendo  $10^{-11}$  s. Zel'dovich em 1954 verificou a possibilidade de se ter **reações nucleares** daquele tipo sendo **catalisadas por muons**. De fato, a reação  $pd_{\mu} \rightarrow {}^3\text{He}$ , como produzida pela fusão induzida pelo muon, foi descoberta experimentalmente por L. Alvarez<sup>(5)</sup> em 1957. A porta estava aberta para a conclusão que parecia então ser óbvia: poder-se-ia obter fusões nucleares, em condições simples, sem o uso de fortes campos magnéticos; simplesmente precisar-se-ia introduzir muons negativos numa mistura de gases (ou líquidos) de hidrogênio com deutério.

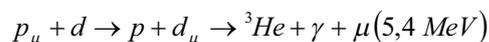
Cada muon poderia induzir espontaneamente um **certo número** de reações de fusão nuclear, como um perfeito catalisador durante sua vida média.

Alvarez descreveu a euforia que dominou sua equipe quando da descoberta da fusão no seu discurso de aceitação do Prêmio Nobel de 1968:

*“We had a short but exhilarating experience when we thought we had solved all of the fuel problems of mankind for the rest of time. A few hasty calculations indicated that in liquid HD a single negative muon would catalyze enough fusion reactions before it decayed to supply the energy to operate an accelerator to produce more muons, with energy left over after making the liquid HD from the sea water. While every one else had been trying to solve this problem by heating hydrogen plasmas to millions of degrees, we had apparently stumbled on the solution, involving very low temperature instead”<sup>(6)</sup>.*

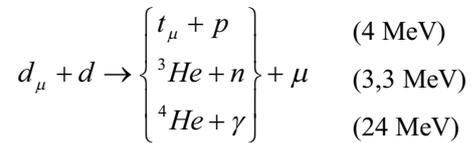
Tal entusiasmo não foi de fato justificado face aos cálculos teóricos que previam umas poucas fusões catalisadas por um muon. Mesmo nas experiências de Alvarez, raras vezes um muon catalisava mais do que uma fusão.

A perspectiva, que parecia ruim naquela ocasião, foi de novo orientada para panoramas mais otimistas em consequência de trabalhos realizados em Dubna, na União Soviética. Lá, um fenômeno notável foi discutido teoricamente e verificado experimentalmente pelos grupos de Ponomarev e Dzhelepov<sup>(7)</sup>, através do qual se verificou que a formação de moléculas muônicas é grandemente facilitada principalmente em misturas DT, quando se tem temperaturas na faixa de 20 - 300 Kelvin. Nessa nova situação, a catálise muônica é verificada com um alto índice de regeneração do muon. Assim, a cadeia

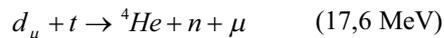


---

<sup>2</sup> “Nós vivenciamos um momento curto porém extremamente emocionante e intenso quando pensamos ter resolvido todos os problemas de combustíveis da humanidade pelo resto dos tempos. Alguns cálculos rápidos indicavam que no HD líquido um único muon negativo catalizaria, antes de decair, um número de fusões suficiente para fornecer energia para operação de um acelerador capaz de produzir mais muons além de um adicional de energia, descontada obviamente a utilizada para extrair HD da água do mar. Enquanto a maioria buscava a solução deste problema aquecendo plasmas de hidrogênio a temperaturas de milhões de graus, nós havíamos aparentemente tropeçado na solução que envolvia, pelo contrário, temperaturas muito baixas”. (Traduzido por Frederico Firmo de Souza Cruz, Depto. de Física, UFSC)



foi encontrada, bem como a cadeia mais interessante devido a sua eficiência



com ciclos de mais de cem fusões catalisadas (S. Jones<sup>(6)</sup> cita o Los Alamos Mesons Physics Facility como tendo sucesso em obter até 150 fusões por muon (em média) em misturas densas de deutério e trítio). Contudo, vê-se que para cem reações a produção de energia corresponde a 1,76 GeV (giga-elétron-volts), o que corresponde a 1/3 da energia necessária (~ 5 GeV) para haver balanço favorável. Desta forma, ainda não se tem a situação ideal para uma produção de energia com vantagens econômicas, embora tenha havido inegavelmente um progresso respeitável no que se refere à compreensão da física fundamental relacionada com esse interessante problema.

As pesquisas nessa linha continuam vivas e têm atraído atenção principalmente em função dos alardes jornalísticos sobre a fusão fria, propalada por alguns autores, que ocorreria pela eletrólise de água pesada com eletrodo de paládio. Este é, porém, um outro problema ao qual não vamos nos ater.

## V. Referências Bibliográficas

1. FRANK, F. C. **Nature**, v. 160, p. 525, 1947.
2. SAKHAROV, A. D. **Reports of the Physical Institute**. Academy of Sciences, 1948.
3. ZEL'DOVICH, Ya.B. **Dokl. Akad. Nank SSR**, v. 95, p. 493, 1954.
4. LATTES, C. M. G.; OCCHIALINI, G. P. S.; POWELL, C. F. **Nature**, v. 160, p. 453, 1947.
5. ALVAREZ, L. **Phys. Rev.**, v. 105, p. 1127, 1957.
6. JONES, S. **Nature**, v. 321, p. 127, 1986.
7. MUJIN, K. N. **Física nuclear recreativa**. Moscou: Mir, 1988.

---

## **PENSE E RESPONDA!**

---

João ligou o sistema de contagem de partículas no Laboratório Avançado e contou quantos raios cósmicos apareciam, num intervalo fixo de tempo. O resultado foi: 4, 1, 0, 5, 3, 4, 0, 6, 4 e 3.

O seguinte diálogo foi escutado no Laboratório:

João: O aparelho está estragado, porque o resultado varia muito.

Antônio: Não tens ainda dados suficientes para tirar essa conclusão.

Márcia: De acordo com os teus dados o aparelho está bom.

Quem está certo?