

A. F. R. DE TOLEDO
PIZA é professor do
Instituto de Física da USP.

Física nuclear:

conteúdo,
contatos
imediatos
e aura

A. F. R. DE TOLEDO PIZA



entre os muitos setores em que é comum hoje dividir a física, a física nuclear é certamente um daqueles cujo nome é

mais conhecido, sobretudo pela participação que teve em conhecidos desenvolvimentos havidos durante o período da segunda das duas grandes guerras do século XX. Por isso, acabou por ser visto também com bastante ambivalência, representando tanto um triunfo da capacidade de desvendamento da natureza pela física, quanto uma capacidade de destruição sem precedentes. Neste ensaio tratarei de descrever em termos simples as contribuições trazidas pela física nuclear ao conhecimento científico da natureza, sugerindo também que a ambivalência, seja na realidade extrínseca à física, e em particular à física nuclear, enquanto formas de conhecimento, reflete apenas uma particular instância de um conflito possivelmente pandêmico entre conhecimento e toda uma classe de seus possíveis usos.

O DOMÍNIO NUCLEAR DA FÍSICA

A física nuclear pode ser caracterizada como aquilo que se pode compreender acerca de um particular dentre vários níveis em que a matéria, no sentido mais comum de tudo o que é visível no universo, é estruturada. Cabe observar, de passagem, que a restrição ao visível não é hoje trivial, e explícita pelo menos uma suspensão de julgamento quanto a grande parte – na realidade, quanto à maior parte – do que se pode ter como o conteúdo do universo. Mais especificamente, ela exclui (pelo menos de julgamento) a chamada matéria escura e outros agentes invisíveis, embora não imperceptíveis, da dinâmica do universo como hoje considerada. Na realidade, a natureza desses ingredientes excluídos, que têm certamente um papel central em um contexto cosmológico, permanece bastante problemática. Eles foram extensa e competentemente discutidos no recente dossiê Cosmologia da *Revista USP*. Por outro lado, a sua exclusão não é relevantemente restritiva quando se trata do “mundo sublunar” (por usar a expressão aristotélica) que constitui o nosso ambiente terrestre imediato, e mesmo quando se trata também da matéria visível tal como encontrada em domínios “supralunares”.

O caráter hierárquico que essa caracterização da física nuclear pressupõe com relação à estruturação da matéria visível tem bases muito mais objetivas que a mera conveniência conceitual. De fato, cada um dos níveis de estruturação da matéria discerníveis no universo visível corresponde a um domínio quantitativamente distinto de valores da *energia* envolvida em sua montagem ou desmontagem. Em particular a vida sobre a Terra, inteligente ou não, juntamente com os setores não-vivos participantes do mesmo complexo ecológico, tem como base ativa essencial o mais delicado dos níveis de organização, no qual *átomos* de vários tipos se combinam em estruturas maiores que podem ser desmontadas em seus átomos constituintes com apenas o módico dispêndio da energia de uma conta

de vidro que cai da altura de um metro para cada grupo de 10^{16} (dez milhões de bilhões de) átomos. Como a própria conta de vidro é constituída por um número de átomos quase um milhão de vezes maior que esse número, ela não pode ser completamente desfeita pelo impacto sofrido em uma tal queda, embora possa partir-se em muitos pedaços menores. Mesmo a desmontagem completa dos próprios átomos em seus núcleos e elétrons constituintes não requer mais que energias algumas dezenas de vezes maiores. Esse primeiro domínio é portanto o que corresponde à chamada física atômica, física molecular (química!) e física dos materiais. A física nuclear, por outro lado, corresponde a um segundo nível de estruturação, no qual estão envolvidas energias por constituinte da ordem de um milhão de vezes *maior*. Trata-se aqui da montagem e desmontagem dos núcleos atômicos em seus constituintes mais óbvios, prótons e nêutrons, e a mudança de escala da energia requerida para isso significa que eles são extraordinariamente “rígidos”, indestrutíveis, à escala dos processos que ocorrem no primeiro nível. Como as propriedades *químicas* dos diferentes elementos são determinadas pelo número de prótons presentes em seus núcleos atômicos, é claro que a extrema rigidez dos núcleos condena ao insucesso a busca alquímica da transmutação dos elementos através de manipulações restritas ao nível mais delicado de organização.

Existe ainda um terceiro nível de estruturação para a matéria visível, associado ao fato de que os constituintes mais ostensivos do núcleo atômico, prótons e nêutrons, se não podem ser completamente desmontados em constituintes mais elementares, pelo menos podem ter sua integridade fortemente afetada com o dispêndio de energias cerca de mil vezes maiores que as energias do domínio nuclear de organização. A inviabilidade de dissociar completamente prótons e nêutrons em constituintes mais elementares, de forma análoga à pela qual núcleos podem ser dissociados em prótons e nêutrons, é entendida em termos de propriedades bastante singulares das forças que intervêm nesse nível de estruturação. São

os efeitos residuais dessas mesmas forças, uma vez constituídos os prótons e nêutrons, objetos que satisfazem minimamente suas exigências mais urgentes, que determinam a estrutura, e em particular a considerável rigidez relativa dos núcleos atômicos.

A matéria dos núcleos atômicos

Diferentemente da matéria comum do “mundo sublunar”, a matéria de que são feitos os núcleos atômicos é carregada eletricamente devido aos prótons que entram na sua constituição, os nêutrons sendo eletricamente neutros. Na constituição de átomos, a carga elétrica positiva dos prótons é compensada pela carga elétrica negativa de um número igual de elétrons, e a neutralidade global resultante permite a formação de imensos agregados de átomos. No caso da matéria nuclear de que são constituídos os núcleos atômicos, a repulsão elétrica entre prótons é compensada, dentro de certos limites, pelos efeitos residuais *atrativos* das mesmas forças responsáveis pela organização interna dos prótons e nêutrons. Os limites são na realidade bastante estreitos, restringindo o maior número possível de prótons a cerca de cem, apenas. Em qualquer núcleo há portanto uma competição entre efeitos atrativos das chamadas *forças nucleares* e a repulsão elétrica entre os prótons carregados positivamente. Os efeitos atrativos são por sua vez favorecidos pela presença concomitante de um número de nêutrons igual ao número de prótons. Essa tendência é no entanto afetada pelos efeitos desagregadores da repulsão elétrica, de modo que núcleos maiores tendam a conter um número de nêutrons algo maior que o número de prótons. Dessa forma, enquanto o número de prótons não se estende além de cerca de uma centena sem que a repulsão das cargas positivas torne inviável o fragmento de matéria nuclear, o número de nêutrons pode chegar a ser da ordem de uma vez e meia o número de prótons no caso dos fragmentos com maior número de prótons (ver Figura 1). Como diferentes

números de prótons correspondem a diferentes elementos químicos, esses limites determinam ao mesmo tempo a extensão da tabela periódica dos elementos.

Sendo a massa de um elétron cerca de duas mil vezes menor que a massa de um próton ou de um nêutron (este apenas ligeiramente mais pesado que um próton), praticamente toda a massa de um átomo está concentrada em seu núcleo que, por outro lado, tem dimensões diminutas em comparação com as dimensões do átomo neutro como um todo (da ordem de um décimo de milésimo). Desse modo, o volume atômico é praticamente vazio. Se o núcleo é representado com as dimensões de uma laranja, a nuvem de elétrons circundantes se estende por centenas de metros em torno dela, com uma massa global relativamente diminuta, da ordem de um milésimo da massa total do átomo.

Uma propriedade notável das forças nucleares responsáveis pela agregação de prótons e nêutrons em núcleos é a de produzir objetos de densidade essencialmente constante. Isso significa que o volume de um núcleo tende a ser essencialmente proporcional ao número de prótons e nêutrons que ele contém, ou seja, essencialmente proporcional à massa do núcleo. Essa propriedade é conhecida como *saturação* da matéria nuclear. Devido às dimensões diminutas dos núcleos, o valor da densidade de saturação é enorme, cerca de duzentos milhões de toneladas por centímetro cúbico. Para chegar à densidade nuclear, toda a massa da Terra teria que ser comprimida até ocupar uma esfera de cerca de duzentos metros de raio. A Terra que conhecemos é evidentemente constituída por uma extensa poeira multigranulada e eletricamente carregada de matéria com essa densidade, permeada por vazios relativamente imensos em que vagueiam (aliás muito ordenadamente) os elétrons, relativamente levíssimos.

Coesão, abundância e origem

Uma consequência importante da propriedade de saturação da matéria nuclear

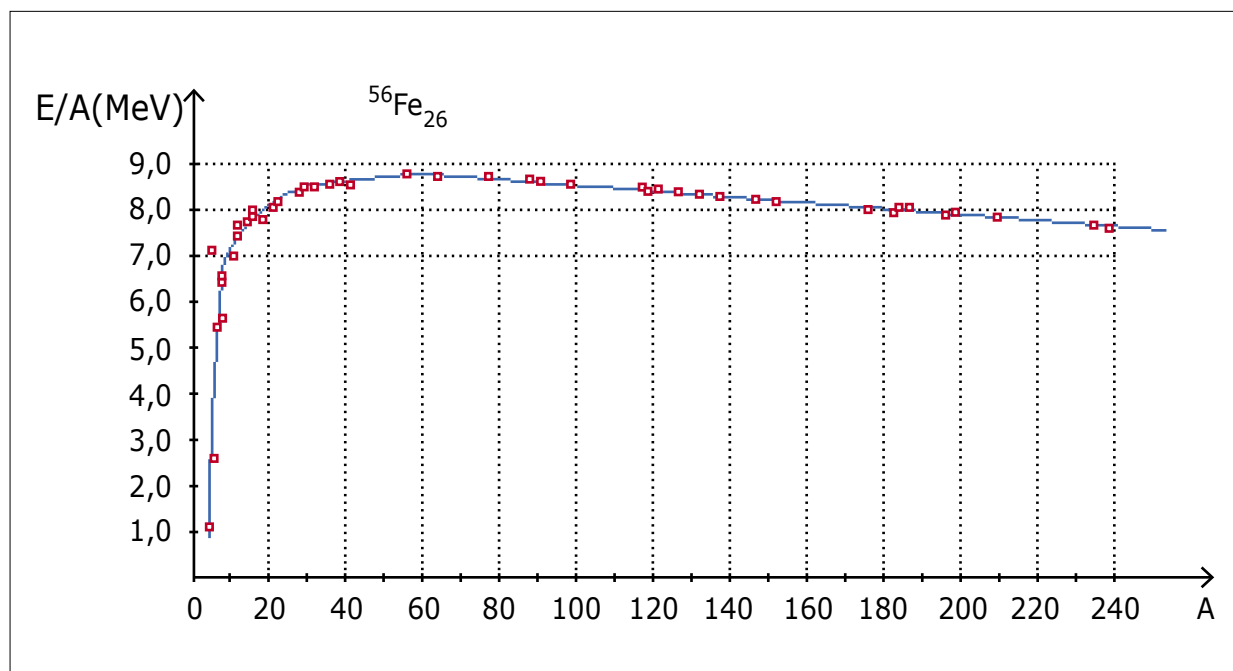
é a de que a energia total de coesão *por partícula* de núcleos atômicos viáveis (isto é, que podem ser encontrados na natureza) é por sua vez aproximadamente constante, exceto para os núcleos com menos de cerca de meia dúzia de prótons mais nêutrons. O valor médio por partícula aproximadamente constante é cerca de meio milhão de vezes maior que a energia de coesão de um elétron em um átomo de hidrogênio. Usando a celebrada relação de Einstein $E = Mc^2$, essa energia de coesão por partícula corresponde à massa de cerca de 16 elétrons, ou a cerca de oito milésimos – pouco menos de 1% – da massa de um próton ou nêutron. Portanto um núcleo típico é na realidade pouco menos que 1% *mais leve* que o conjunto desmontado de seus constituintes (1).

A não constância remanescente do valor da energia de coesão dos núcleos tem, por sua vez, um comportamento sistemático que pode ser compreendido em termos bastante simples (ver Figura 2): ele atinge um valor máximo para os núcleos com cerca de 60 partículas, e diminui suavemente para números de partículas tanto maiores quanto menores. A diminuição da coesão por partícula para núcleos com mais de cerca de 60 partículas se deve ao crescimento em importância do efeito desagregador da repulsão elétrica entre prótons, também cada vez em maior número. No caso dos números de partículas inferiores a cerca de 60, por outro lado, a diminuição se deve ao aumento da fração do número de partículas que se encontram na superfície do núcleo, e que nessas condições não podem

1 É um engano bastante difundido pensar que a famosa fórmula de Einstein esteja vinculada à energia nuclear, suas manifestações e usos. Na realidade, ela é *geral*, e se aplica com igual propriedade, por exemplo, à energia química. Da mesma forma que um núcleo coeso é mais leve que o conjunto desmontado de seus constituintes, uma molécula coesa qualquer, de água, por exemplo, é também mais leve que o conjunto desmontado de seus átomos constituintes, dois de hidrogênio e um de oxigênio, no caso. Um exemplo ainda de outra ordem é o de que a massa de um corpo frio é menor que a do mesmo corpo aquecido, de modo que, em princípio, balanças podem ser usadas como termômetros. O que ocorre é apenas que, a não ser no caso nuclear, em que o valor das energias envolvidas é relativamente muito maior, as diferenças de massa são por demais pequenas para serem medidas. Também por isso não se usam de costume, hoje, balanças como termômetros. Outra razão, se fosse necessária, seria a de que a relação entre a temperatura e a energia de um corpo em geral depende do corpo, e pode ser bastante complicada.

FIGURA 2

Energia de coesão por partícula dos núcleos mais estáveis da Figura 1. A unidade (MeV, milhões de elétrons-volt) corresponde a cerca de setenta e cinco mil vezes a energia de coesão de um elétron em um átomo de hidrogênio. O número A, representado no eixo horizontal, corresponde ao número total de prótons mais nêutrons. A linha representa a tendência média, e os pontos correspondem aos valores experimentais para núcleos específicos. Fonte: <http://www.ufsm.br/geff/FNenli.htm>



se beneficiar completamente da interação nuclear coesiva com outras partículas circundantes. Esses fatos têm conseqüências muito importantes: por exemplo, a coesão de um par de núcleos de oxigênio, com 8 prótons e 8 nêutrons cada, é *menor* que a coesão de um núcleo de enxofre, com 16 prótons e 16 nêutrons; e a coesão de um núcleo de urânio é também *menor* que a de um par de núcleos menores que contenha o mesmo número total de partículas.

Enquanto a viabilidade de diferentes tipos de núcleos e átomos pode ser vista como sendo determinada em última análise pelas forças fundamentais da natureza, notadamente forças nucleares e repulsão eletrostática, a abundância relativa com que eles são de fato encontrados traz em si um elemento que se pode dizer histórico, no sentido de que tem o que dizer acerca dos processos através dos quais os diferentes tipos de núcleos vieram a ser produzidos. Em termos muito globais, tomando como amostra algo tão grande como a nossa galáxia, ou mesmo algo maior, a abundância relativa dos elementos já é algo surpreendente: cerca de 73% da *massa* total dos elementos está sob a forma de hidrogênio; cerca de 25% estão sob a forma de hélio, cabendo os cerca de 2% restantes da massa total a *todos os outros elementos*. Essas abundâncias relativas por certo não correspondem às que podem ser encontradas no nosso ambiente terrestre imediato, que é portanto fortemente atípico em termos universais.

Por outro lado, os mecanismos envolvidos nos processos que dão origem a diferentes tipos de núcleos necessariamente envolvem energias da ordem de um milhão de vezes maiores que os mecanismos envolvidos em reações químicas, sendo portanto tipicamente estranhos ao ambiente terrestre, organizado quimicamente. É claro também que a matéria-prima preferencial com que esses processos devem operar é o hidrogênio. Um dos primeiros grandes feitos da física nuclear consistiu em identificar esses mecanismos e processos, juntamente com os engenhos em que eles operam rotineiramente sua alquimia: as estrelas, das quais algo mais se dirá adiante.

CONTATO COM O DOMÍNIO NUCLEAR

O que foi dito até este ponto corresponde a uma descrição, não-técnica e bastante abreviada, do que a física nuclear contribuiu para uma imagem contemporânea do mundo. A partir desse ponto, porém, tratarei, como os entendo, de alguns dos momentos relevantes no processo de aquisição desse conhecimento, bem como de alguns de seus mais famigerados desdobramentos.

A inauguração de um domínio nuclear na física da estrutura da matéria pode ser datada de 1911, quando Ernst Rutherford, na Universidade de Manchester, chegou à imagem nuclear do átomo, com base nas grandes deflexões sofridas por partículas alfa (núcleos de átomos de hélio, obtidos a partir de elementos naturalmente radioativos) e beta (elétrons) ao colidir com os átomos de uma fina folha de ouro. Foi a partir de então que o átomo adquiriu a geometria de um pequeno “sistema planetário” com que continua a ser representado hoje até mesmo em textos para o ensino fundamental, o pequeno e denso núcleo ocupando a posição central. Alguns anos depois, em 1919, o mesmo Rutherford relata “um efeito anômalo” ao repetir a experiência substituindo os átomos-alvo de ouro por nitrogênio: eram observadas, entre as partículas alfa defletidas, também partículas de outro tipo, que puderam ser identificadas como prótons (núcleos de hidrogênio). Essa foi, na realidade, a primeira evidência de uma autêntica transmutação de elementos em laboratório: um dos prótons do núcleo de hélio se transferiria para um núcleo de nitrogênio transformando-o em um núcleo de oxigênio, ao mesmo tempo em que o núcleo de hélio se transformava em um núcleo de hidrogênio.

Mais tarde processos desse tipo receberiam uma designação não com base em uma terminologia alquímica, mas sim simplesmente química, sendo denominados até hoje *reações nucleares*. As primeiras reações nucleares produzidas, não por projéteis

resultantes de processos de radioatividade natural, como no caso das experiências de Rutherford, mas por projéteis artificialmente acelerados no laboratório, foram produzidas apenas em 1932, em Cambridge, por John Cockroft e Ernest Walton, que para isso desenvolveram o primeiro acelerador de partículas carregadas. Fazendo um feixe de prótons acelerados incidir sobre alvos de vários elementos, foi possível observar partículas carregadas emergentes da colisão identificáveis como partículas alfa, indicando a ocorrência de reações inversas às observadas antes por Rutherford (2). Um fato importante a ter em conta com relação a essa experiência é o de que, de acordo com as previsões da mecânica de Newton e do eletromagnetismo de Maxwell, as maiores energias disponíveis no acelerador desenvolvido por Cockroft e Walton deveriam ser insuficientes para vencer a repulsão eletrostática entre as cargas, ambas positivas, do projétil (próton) e das diferentes espécies de núcleos-alvo. No entanto, de acordo com a teoria quântica desenvolvida a partir de 1925 por Werner Heisenberg e, independente e alternativamente, por Erwin Schrödinger, haveria ainda assim uma probabilidade não-nula de ocorrência da reação nuclear. Dessa forma, o próprio trabalho de desenvolvimento do acelerador envolveu uma aposta na confiabilidade da nova teoria que acabou recompensada pelos resultados.

Reações de transmutação e os nêutrons

Os nêutrons não eram ainda conhecidos até essa época, que por isso pode ser descrita como um breve período pré-histórico da física nuclear. A sua descoberta no Laboratório Cavendish, também em Cambridge, data também de 1932, é devida a James Chadwick, e pôs finalmente em cena o elemento faltante indispensável para uma compreensão teórica mínima da estrutura nuclear. Uma tal teoria foi de fato apresentada nesse mesmo ano por Werner

Heisenberg, dentro do contexto da nova mecânica quântica, que rapidamente se tornou a linguagem básica indispensável para a análise da estrutura da matéria em todos os seus níveis. É sem dúvida notável que, apesar de sua precocidade com relação à descoberta dos nêutrons, a teoria de Heisenberg utiliza sistematicamente uma idéia que se tornaria crucial para todas as teorias da estrutura nuclear até os dias de hoje: a idéia de que o papel desempenhado por prótons e nêutrons nesse contexto é extraordinariamente simétrico, a ponto de as duas partículas poderem ser vistas como identidades alternativas de *uma mesma* partícula.

À época da descoberta do nêutron, se a mecânica quântica de Heisenberg, Schrödinger e outros havia, pelo menos em princípio, reduzido a química à física, através da compreensão dos mecanismos dinâmicos que presidem a estrutura atômica e molecular, a descoberta das reações nucleares anunciava algo semelhante com relação à velha alquimia. E aqui os nêutrons apareciam como dotados de credenciais singulares: enquanto os processos nucleares envolvendo projéteis eletricamente carregados, como prótons e alfas, tinham que vencer a inibição, embora permeabilizada pela mecânica quântica, da repulsão eletrostática entre cargas de mesmo sinal, os nêutrons seriam, em condições semelhantes, inteiramente livres de tal inibição. Uma idéia que se propunha naturalmente, portanto, era a de estudar reações nucleares iniciadas por nêutrons, que poderiam, mesmo com velocidades reduzidas, interagir nuclearmente até com os núcleos de maior carga elétrica, como o urânio, por exemplo. Foi exatamente isso que levou Otto Hahn e Fritz Strassmann, dessa feita na Berlim de 1938, a empreenderem uma cuidadosa análise *química* de uma amostra de urânio que fora submetida à irradiação por nêutrons, esperando encontrar outros elementos, eventualmente produzidos através de mecanismos nucleares de transmutação. Essa análise teve resultados inesperados: em vez de apenas elementos que diferissem do urânio original pela carga elétrica de um ou dois prótons,

2 Um dos resultados das experiências de Cockroft e Walton foi a primeira comprovação experimental da famosa relação de Einstein $E = Mc^2$, através da análise das massas e das energias envolvidas nas reações nucleares observadas. Essa foi a primeira ocasião em que trocas de energia implicavam variações observáveis de massa.

como usual em outras reações nucleares então conhecidas, foram encontrados, na amostra de urânio irradiada por nêutrons, sinais de bário, cuja carga elétrica (a de 56 prótons) é pouco maior que a metade da carga elétrica original do urânio (a de 92 prótons). Esse resultado foi imediatamente comunicado a Otto Frish e à sua tia Lise Meitner, dois físicos então respectivamente em Copenhague e em Estocolmo que, com base em um modelo desenvolvido pouco antes por Niels Bohr, de Copenhague, no qual a matéria nuclear era tratada como um líquido eletricamente carregado, o interpretaram, no início de 1939, em termos de um processo de ruptura do núcleo de urânio em dois fragmentos de tamanhos comparáveis. Tomando por empréstimo um termo então utilizado por biólogos para a divisão celular, Frish e Meitner chamaram esse processo de *fissão nuclear*. Como já foi dito, a propensão de núcleos pesados a esse tipo de ruptura está associada ao fato de que os dois fragmentos mais leves resultantes da ruptura são na realidade globalmente mais coesos que o núcleo pesado inicial, devido à saturação da coesão nuclear combinada com os efeitos da repulsão eletrostática entre números grandes de prótons (ver Figura 2, A maior que cerca de 60). A energia de coesão *liberada* em um tal processo está evidentemente na faixa das energias envolvidas em processos nucleares, e é portanto tipicamente da ordem de um milhão de vezes maior que a energia liberada em um processo químico.


A energia das estrelas

No mesmo ano de 1938, nos Estados Unidos da América, Hans Bethe, nascido em Estrasburgo e educado na Alemanha (3), elucidou os mecanismos envolvidos na produção de energia em estrelas ricas em hidrogênio, como o Sol. Aqui o mecanismo básico é *nuclear*, e envolve inicialmente a combinação de dois prótons para a produção de um *déuteron*, núcleo de uma forma pesada do hidrogênio que é constituído de um próton ligado a um nêutron. A

conservação da carga elétrica inicial total dos dois prótons exige para isso a emissão de um *pósitron*, contrapartida com carga positiva de um elétron, interpretada como sua *antipartícula*, no contexto de teoria desenvolvida dez anos antes por Paul Dirac, em Cambridge. A necessária aproximação dos dois prótons que sofrerão tal processo requer disponibilidade de energia suficiente para competir com a repulsão elétrica com probabilidade suficiente de sucesso, o que ocorre em ambientes de temperatura suficientemente alta. Os dêuterons resultantes podem em seguida capturar um próton adicional, dando origem a um núcleo de hélio com apenas um nêutron; e dois desses núcleos de hélio podem subsequentemente dar origem a um núcleo, muito mais coeso, de hélio com dois nêutrons, devolvendo ainda ao meio dois prótons como sobra. O balanço final dessa seqüência de reações nucleares consiste portanto na produção de hélio a partir de hidrogênio, também com a liberação de uma quantidade de energia típica para processos nucleares (ver Figura 2, $A \leq 4$). Essa energia não apenas mantém a temperatura em nível suficiente para garantir a operação do processo, mas é também irradiada como o brilho da estrela. Uma característica importante desse processo de “queima nuclear de hidrogênio” é a de que a força da natureza responsável por ele opera de forma muito lenta (ela é por isso chamada “interação fraca”), fazendo com que uma estrela como o Sol possa operar de forma estável por um período de vários bilhões de anos. Esse largo intervalo de tempo é necessário para permitir a operação dos mecanismos biológicos de evolução em planetas como a Terra por tempo suficiente para a emergência de físicos que os compreendam.

Agregação de núcleos muito leves (em particular os de hidrogênio e deutério) em outros, menos leves, veio a ser chamada *fusão nuclear*. Uma vez esgotadas as reservas de hidrogênio da estrela, novos regimes são atingidos envolvendo outros processos de fusão, com a formação de elementos mais pesados a partir do hélio formado e de seus sucedâneos. Como mostrado na Figura 2,

3 Falecido recentemente, em 6 de março de 2005, em Ithaca, Nova York (EUA), aos 98 anos de idade.




os processos de fusão são liberadores de energia de coesão enquanto o número de prótons mais nêutrons no pacote final for inferior a cerca de 60.

Contexto e implicações

A presença de Otto Frish em Copenhague, de Lise Meitner em Estocolmo e de Hans Bethe nos Estados Unidos da América por volta de 1938 foi pelo menos fortemente determinada pela configuração política – e suas disposições concomitantes – instalada na Alemanha da época, Adolph Hitler tendo sido nomeado chanceler da Alemanha em janeiro de 1933. Otto Hahn permaneceu na Alemanha, onde veio a fazer parte do chamado “grupo do urânio” liderado por Heisenberg. Se por um lado o progresso conseguido na elucidação das propriedades da matéria à escala nuclear e processos associados emprestara à física uma considerável relevância potencial para os interesses dos agentes das forças políticas que então se exerciam no mundo, as ações desencadeadas por parte desses agentes foram extraordinariamente eficientes em deslocar um contingente grande de pesquisadores, entre os quais muitos dos que haviam desempenhado papel central em dar à física a importância estratégica que acabara por obter.

Crucial para este outro contexto foi a descoberta do processo de indução por nêutrons da fissão nuclear de núcleos pesados, como o urânio, através do trabalho desenvolvido por Hahn, Strassmann, Frish e Meitner. O ponto central foi exposto simples e claramente em uma palestra filmada, proferida por Enrico Fermi pouco depois da publicação do trabalho de Otto Frish e Lise Meitner, na Universidade de Chicago. Fermi também emigrara para os Estados Unidos da América devido à perseguição sofrida por sua esposa Laura, de ascendência judaica, e numa certa altura da palestra diz o seguinte: os dois fragmentos resultantes da fissão induzida por um nêutron provavelmente não são produzidos em



seu estado de menor energia; assim sendo, eles podem, uma vez formados, descartar a energia excedente emitindo por sua vez algumas partículas, possivelmente nêutrons; digamos, para fins de argumentação, um total médio de dois nêutrons por núcleo de urânio fissionado; se então esses nêutrons puderem ser usados para por sua vez induzir a fissão de outros núcleos de urânio, será possível, dependendo de menor ou maior aproveitamento subsequente dos nêutrons produzidos, a ocorrência de uma cadeia auto-sustentada ou auto-amplificada de processos de fissão com liberação de energia na escala das energias de coesão nucleares. Tais processos liberariam, por núcleo fissionado, e portanto por átomo, energia da ordem de um milhão de vezes maior que a energia liberada, também por átomo, em um processo de natureza química, como a combustão de carvão ou petróleo, ou a explosão de algum composto químico de nitrogênio.

Cabe dizer que o destaque dado aqui a Fermi com relação a essa questão se deve exclusivamente à existência da palestra filmada, bem como ao seu pensamento direto e estilo informal. Outros físicos sem dúvida chegaram às mesmas conclusões com seus próprios estilos e por caminhos próprios. Em particular Werner Heisenberg, que decidira permanecer na Alemanha “para participar da reconstrução da ciência alemã depois da catástrofe que se anunciava”, produziu, em fins de 1939, instado pelas autoridades militares alemãs, um extenso relatório que lhe valeu a liderança do chamado “grupo do urânio” naquele país (4).

CONSEQÜÊNCIAS: CONHECIMENTO E SEUS USOS

Em termos gerais, o que pode ser notado com relação a esses fatos é que as conclusões retiradas da física correspondem meramente a possibilidades, e que a sua efetiva implementação eventual, em contexto e com fim determinados, é muito mais uma questão de tecnologia que de física, no

4 No capítulo 14 de seu livro autobiográfico *A Parte e o Todo* (trad. Vera Ribeiro, São Paulo, Contraponto, 1996, p. 198), Heisenberg descreve, como uma reminiscência de fins de 1938 e quase com as mesmas palavras que Fermi usara em sua palestra, o que poderia ser esperado dos resultados de Hahn e Strassmann, citando a contribuição de Carl Friedrich von Weizsäcker, que se integraria ao “grupo do urânio”, para sua interpretação em termos de processos de fissão nuclear induzida por nêutrons.

sentido de que a *busca* de conhecimento se vê substituída pelo *uso* de conhecimento adquirido visando à implementação de determinadas *ações*. O conhecimento por si só promove uma aproximação integradora com o mundo natural, ao passo que as ações pretendidas *podem* se inserir em projetos fundamentalmente extrínsecos que buscam modificá-lo. Entre os projetos que *não* têm essa natureza estão, em particular, os usos técnicos do conhecimento em benefício da atividade experimental indispensável à própria ciência. Em outras palavras, entre o conhecimento e uma ação que o utiliza existe sempre um projeto que singulariza a ação como desejável. É na medida em que o conhecimento seja identificado com a ciência, e devido ao fato de que é apenas o projeto que aponta para determinadas ações servindo seja ao próprio conhecimento seja ao que lhe é extrínseco, que é possível falar numa neutralidade *a priori* da ciência com relação aos seus usos.

No contexto da física nuclear, e tomando como caso específico a fissão de núcleos pesados induzida por nêutrons, juntamente com o seu potencial de auto-sustentação, o conhecimento esclarece a possibilidade e as condições de ocorrência de uma série de processos que são na realidade processos *naturais*. Reações auto-sustentadas não só podem ocorrer espontaneamente na natureza, como efetivamente ocorreram na Terra, onde se realizaram as condições requeridas para tanto (5). Foi a interveniência de projetos ligados à situação de conflito armado entre grandes potências que alimentou o enorme esforço tecnológico que levou à viabilidade a utilização do conhecimento existente para as conhecidas ações que dele resultaram. Por outro lado, o engajamento nesses projetos resultou desastroso para o funcionamento normal da ciência, e isso é um indício claro de seu caráter extrínseco: todo o sistema que fora responsável pelas novas descobertas viu-se imediatamente fragmentado em grupos tornados estanques por barreiras de sigilo militar e também “ideológico” (6); e os próprios grupos sobreviventes tiveram seu funcionamento alterado ao serem fortemente pressionados

por resultados “práticos”. Um expressivo testemunho da consciência dessa situação se encontra na leitura *pública* por Erwin Schrödinger, em sessão da Academia de Ciências da Irlanda realizada poucos meses após a explosão de Hiroshima, de um trabalho seu intitulado “Problemas de Probabilidade em Química Nuclear”, em cuja introdução disse: “Reações nucleares auto-alimentadas, como as que foram recentemente descobertas, dão origem a questões interessantes de probabilidade, que quero discutir por elas mesmas e apesar do fato de que trabalhos não publicados sobre o bem conhecido problema prático devem ter-se ocupado delas em grande detalhe. Peço que o que segue seja visto não como uma contribuição *post festum* à teoria da chamada bomba atômica, mas como um exemplo no cálculo de probabilidades”. A suposição acerca de “trabalhos não publicados” é absolutamente correta e hoje completamente explícita. Do lado da Alemanha existe a esse respeito o relato de Heisenberg, de que durante a guerra “o *slogan* do governo era ‘precisamos usar a física para a guerra’ e nós o transformamos no nosso *slogan* ‘precisamos usar a guerra para a física’”.

Dentro desse quadro, os quase-*slogans* modernos segundo os quais “ciência e tecnologia são elementos básicos para o progresso” e “é preciso que os resultados da pesquisa científica revertam em benefícios para a sociedade” (além de tantos outros semelhantes) adquirem contornos alarmantes na medida em que sejam entendidos em termos da sujeição da busca de conhecimento a projetos fundamentalmente extrínsecos a essa busca, podendo vir a reencenar em múltiplas escalas e contextos – embora nem sempre com a mesma capacidade material de destruição – os mesmos conflitos e desencontros ocorridos no cenário da física nuclear. Nessas condições, a tecnologia se mostra com capacidade para adquirir um claro viés *anticientífico*, e assim transformar o famigerado binômio “ciência e tecnologia” em aporia (7) porventura remanescente da que foi elaborada por Freud (8) em termos de “Eros e Thanatos”.

5 Isso se deu sabidamente há cerca de dois bilhões de anos na África Ocidental, em uma jazida de urânio que funcionou como um reator nuclear natural durante cerca de seiscentos mil anos. Esse fato é revelado pela abundância que pode hoje ser observada na jazida dos elementos resultantes dos processos de fissão. O enorme tempo decorrido desde então foi suficiente para que o “lixo radioativo” resultante fosse também naturalmente reduzido à inocuidade.

6 Após a rendição da Alemanha houve um empenho considerável dos aliados ocidentais, especialmente dos Estados Unidos da América, com sua “Missão Alsos”, em chegar antes dos russos e com “especialistas” às instalações do reator em construção pelo “grupo do urânio” em Haigerloch.

7 Cf. Jacques Lacan, *Écrits*, Paris, Editions du Seuil, 1966, p. 101.

8 Sigmund Freud, *Beyond the Pleasure Principle*, trad. James Strachey, New York, Bantam Books, 1959 [1ª edição alemã: 1920].