

A ENERGIA TERMONUCLEAR

Patrick Amadien, tradução da "Revue
Défense Nationale" de abril 71, pelo
Ten Cel PAULO EDUARDO

Recentemente a mecânica da relatividade demonstrou que a energia, devido à sua identidade com a matéria, é um componente essencial do universo. A história da humanidade nos revela o papel fundamental que sua pesquisa e utilização desempenham na evolução do pensamento e das civilizações.

No início o homem aplicou sua inteligência em melhorar e aumentar sua própria energia física usando, para isso, ferramentas e armas de lançamento. Em seguida procurou na natureza as fontes de energia suscetíveis de ajudá-lo a vencer suas dificuldades quotidianas. Assim foi que ocorreu a domesticação de animais, a subordinação de outros homens à sua vontade e a organização de seu trabalho que cedo lhe forneceram os meios de realizar, com menor esforço, as mais difíceis tarefas. O fogo, o vento e a água progressivamente vieram acrescer seu arsenal e a cada aperfeiçoamento de sua utilização lhe permitia vislumbrar novos horizontes.

No século passado, a revolução industrial, construída sobre a potência motriz emanada da ação conjugada do fogo e da água nas máquinas a vapor, estabelece um marco decisivo na sua evolução. Com apoio na metalurgia do ferro, cada dia mais apurada, a mecânica toma novo impulso. Turbinas a vapor, a água, motores a combustão interna, tudo se desenvolve.

A generalização de uma nova fonte de energia, a eletricidade, disponível em toda parte e à vontade, fez com que nossa civilização sofresse transformações espetaculares.

Rápidos e sucessivos progressos contribuíram para colocar a ciência no lugar de destaque que ela ocupa no mundo hoje em dia. Esta pôs em evidência numerosas propriedades da matéria e, em particular, as potencialidades encerradas no núcleo atômico. Tais reservas de potência revolucionaram a escala dos valores devido a suas manifestações explosivas porém a ciência indicou logo o partido que disso se poderia extrair desde que as dominássemos.

Devemos concentrar nossa atenção nessa possibilidade tanto mais que o aumento do consumo de energia, de um lado, e a evo-

lução política mundial, de outro, podem colocar em evidência, mais cedo do que se pensa, com prioridade máxima, o problema das fontes de energia. Em realidade, as reservas hidrelétricas de nosso país (a França) estão quase completamente exploradas. As dificuldades de extração ou importação de carvão, as incertezas que pesam sobre o suprimento de petróleo e gás natural são fatores de molde a comprometer, em curto prazo, nossa liberdade de ação e, a longo prazo, nosso desenvolvimento. Além disso o esgotamento das fontes desses combustíveis é previsível dentro de maior ou menor prazo.

Assim, devemos cuidar de pôr em funcionamento centrais a fissão pela maior autonomia que elas proporcionam. A França trata disso e no título do VI Plano ela prevê um programa de 8000 MW em sete ou oito unidades de produção. É de notar, no entanto, que nossa dependência, do restante do mundo, em relação ao suprimento de urânio permanece como um sério óbice. Finalmente, esses diversos combustíveis são geradores de prejuízos à vida, uns pela poluição química que ocasionam e outros pelos detritos radioativos que produzem.

Existe entretanto na natureza uma possibilidade de contornar tais dificuldades. Alguns núcleos podem fundir-se liberando enormes quantidades de energia sem produzir resíduos perigosos.

Esse processo, entrevisto por Jean Perrin no início do século e desenvolvido por Bethe para explicar o mecanismo da produção de luz e calor das estrelas, de funcionamento quase eterno, mostrou toda sua potência na explosão da bomba "H". Seu controle é pois, teoricamente, um meio de resolver nosso problema energético. Além disso o fato de que ele utiliza o deutério, presente em grande quantidade no mar, torna-o econômico e elimina o problema da dependência no que concerne a matérias-primas.

Não se pode deixar de ser seduzido pela elegância e riqueza potencial desse processo sintético que parece ser o único, em nosso poder, capaz de satisfazer nossas exigências em energia. Eis por que precisamos dominá-lo. Também devemos, desde já, decidir sobre a importância do esforço a dar nas pesquisas sobre a fusão termo-nuclear controlada. Vamos mostrar que já possuímos elementos necessários para tomar nossas decisões com conhecimento de causa.

Após um ligeiro lembrete sobre a física nuclear, descreveremos sumariamente os trabalhos empreendidos para dominar o fenômeno da fusão e, em seguida, alinharemos as vantagens que resultariam de seu êxito.

A FUSÃO

Inicialmente voltemos aos conhecimentos básicos no que concerne à estrutura da matéria que sabemos ser composta por átomos.

Cada um destes é formado por uma nuvem de elétrons em torno de um núcleo central, em tal número que o conjunto da carga, que eles representam, se equilibre assegurando a neutralidade elétrica do todo.

O núcleo, cuja estabilidade é assegurada por uma harmoniosa repartição de prótons (p) e de nêutrons (n) pode, para um mesmo elemento químico, ter várias configurações neutrônicas; fala-se pois de isótopos de um elemento: o deutério ($1p\ 1n$) é um isótopo de hidrogênio ($1p$).

Além disso próton e nêutron representam dois estados de uma mesma partícula, o núcleon, cuja característica importante é a poderosa força de atração que exerce sobre outros núcleons. Pode-se, assim, pensar em recuperar a formidável energia potencial de união, associada a essas forças por fissão ou fusão, dos núcleos atômicos.

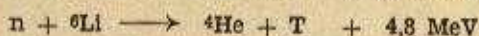
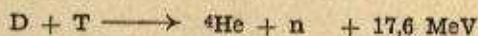
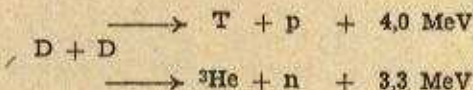
Diz-se que há fissão quando um núcleo pesado, tornado instável pela edição de um nêutron suplementar, se divide em dois núcleos mais leves com a emissão de nêutrons supranumerários (excedentes) portadores de energia. Há uma liberação de energia pois os núcleos resultantes dessa operação possuem menos energia do que o núcleo primitivo.

Ao contrário, partindo de núcleos leves aproximados uns dos outros até que as forças nucleares de atração vençam as eletroestáticas repulsivas, pode-se formar, pela fusão, um núcleo mais pesado cuja energia interna total é inferior à soma das dos núcleos leves que o geraram. A diferença de energia emitida sob a forma de radiação é, teoricamente, recuperável. Por outro lado, demonstra-se que a energia de fissão de um núcleo é muito inferior à obtida pela fusão. Nesta última reação a extrema fraqueza da energia a fornecer para vencer as forças eletroestáticas, em relação à energia nuclear liberada, deve tornar bastante positivo o balanço energético da reação. É suficiente para nós convencermos comparar as potências realizadas pelas armas termonucleares às de seus "fósforos", bombas clássicas de fissão.

Entre os núcleos leves, os de hidrogênio e de seus isótopos (deutério e trítio), com um só próton, serão os menos "repulsivos" entre todos e assim mais suscetíveis de serem aproximados. Por isso é que se foi levado a escolhê-los para essas reações de fusão, tanto mais quanto seu desencadeamento pode ser obtido, de modo relativamente simples, por agitação térmica a temperaturas muito altas (da ordem de 100 milhões de graus) de seus núcleos postos em face uns dos outros em quantidade suficiente (10^{14} a 10^{17} por cm^3). Com efeito, em tais condições, a violência com que os núcleos são projetados uns sobre os outros, permite a um grande número dentre eles vencer mutuamente sua repulsão eletroestática e de se fundirem dois a dois. A soma da pouca energia liberada quando dessas

numerosas fusões, tomadas individualmente, é então utilizada em nossa escala.

As reações fundamentais da fusão se expressam assim:



Nessas temperaturas se forma um "gás" de núcleos, de prótons, nêutrons e elétrons que se denomina "um plasma". Um recipiente comum não pode, é evidente, conter tal mistura tão quente e eletricamente carregada. Daí então o problema que se apresenta de conservar esse "plasma" (melhor ainda o de confiná-lo) com densidade suficiente e por tempo necessário para que o número de reações obtidas satisfaça nossas exigências de produção de energia. Esse problema é tanto mais difícil de resolver que uma relação estabelecida teoricamente (denominada critério de Lawson) e unindo o tempo de confinamento, a densidade do plasma e o consumo de combustível, impõe condições experimentais que ainda não estamos capacitados a realizar perfeitamente.

Por sorte, a dinâmica das partículas plásmicas lhes permite interagir com um campo magnético exterior e de seguir suas linhas de força. Assim, por menos que se saiba achar uma geometria das linhas de força bastante astuciosa, pode-se conceber um processo para conservar o plasma conseguido.

As direções essenciais da pesquisa permitindo chegar a um controle da fusão surgem então. Trata-se de conseguir uma boa "garrafa magnética" e paralelamente de se esforçar, partindo de cálculos teóricos e também de dados experimentais, de reunir as condições que satisfaçam ao "critério de Lawson" acima citado.

Resumindo, todo problema está em: uma vez obtido o meio de conservar o plasma, formá-lo, confiná-lo e mantê-lo. Vejamos as soluções propostas para as diversas etapas de controle da fusão.

A CONSERVAÇÃO

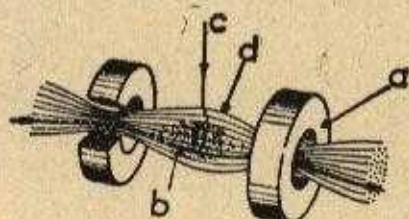
Os dispositivos magnéticos que foram propostos, para conservar o plasma e fazê-lo produzir as reações termonucleares, seduzem pelo requinte e simplicidade das configurações das linhas de força a que dão origem.

Trabalha-se astuciosamente com a variação do gradiente do campo magnético a fim de que as partículas carregadas permaneçam em uma região como prisioneiras das linhas do campo.

Os principais traçados se definem pelas posições relativas das linhas de força e do recipiente onde existe o vácuo. Se tôdas as linhas dos campos ficam contidas no recipiente diz-se que temos um traçado fechado, caso contrário diz-se que é aberto.

Nessa segunda categoria as máquinas mais utilizadas e também as mais simples são as denominadas "de espelhos" magnéticos. Duas bobinas coaxiais percorridas por fortes correntes, produzem um campo magnético (fig. 1).

DISPOSITIVOS DE ESPELHOS MAGNETICOS (FIG. 1)

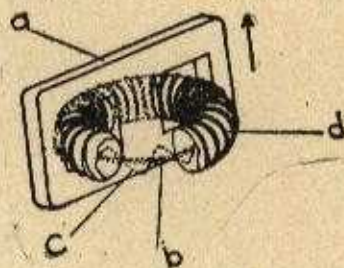


- a) bobinas do "espelho"
- b) plasma
- c) injeção de íons moleculares
- d) linhas do campo magnético

Daí provém a expressão "garrafa magnética". As partículas aprisionadas em seu interior efetuam um incessante vai e vem, seguindo as linhas do campo, entre os gargalos da garrafa onde elas sofrem uma verdadeira reflexão como se estivessem diante de um espelho.

Nos traçados fechados busca-se fechar as linhas do campo sobre si mesmas. O método mais simples para obter esse resultado consiste em utilizar o campo longitudinal produzido em uma moldura circular magnética (fig. 2) e modificá-lo, segundo as necessidades, pela aplicação de um campo de força externo. O plasma desloca-se então segundo uma trajetória circular no interior da moldura.

SISTEMA TOLKAMAC (FIG. 2)



- a) circuito produtor de campo transversal estabilizador
- b) cordão anelar do plasma
- c) campo magnético helicoidal
- d) circuito gerador do campo longitudinal.

A FORMAÇÃO

Antes de mais nada devemos encher a "garrafa magnética" com o plasma e procurar dar-lhe temperatura "básica", provocando uma agitação térmica suficiente e além da qual pode-se esperar escorvar as reações de fusão. Para isso dois processos diferentes podem ser encarados.

Por um processo balístico pode-se injetar, em uma "garrafa magnética", ions moleculares de alta energia. Acumula-se dessa forma, progressivamente, um plasma cujas particulas estão muito carregadas de energia, e por isso muito agitadas. É verdade que se por um lado a temperatura desejada é atingida rapidamente, por outro a densidade obtida é fraca. As pesquisas prosseguem no sentido de aperfeiçoar o processo e a qualidade do fluxo das particulas injetadas melhora a cada dia.

O outro processo consiste em encher a "garrafa" com um plasma frio (100000º) e em seguida aquecê-la. Para isso, criar-se-ão no plasma descargas, ou por outra, correntes induzidas de grande intensidade (centena de milhões de ampères). Pode-se ainda procurar comprimir magnéticamente o plasma, sem troca de calor com o meio exterior. Esse último processo constitui uma etapa para o confinamento.

Numerosas pesquisas estão em curso e o segundo processo tem a preferência dos especialistas. Ultimamente se utiliza para a inflamação um laser de grande potência cujo feixe devidamente focalizado produz rapidamente a temperatura desejada; já existem projetos de reatores que utilizam esse meio com bastante sucesso.

O CONFINAMENTO

A partir do estágio anterior procura-se obter um plasma em que poderão ter origem reações termonucleares.

Para tanto deve-se simplesmente comprimir o plasma formado, diz-se então que se está realizando o confinamento. Essa operação se realiza aumentando o valor do campo magnético das "garrafas". As linhas de força se estreitam e as particulas que as seguem se aproximam mais umas das outras. Mas, essas particulas reagem contra essa violência e tendem a escapar do traçado. Há pois uma instabilidade do plasma. Em todos os casos observa-se um efeito de microturbulência e flutuações das linhas do campo que acarretam uma difusão do plasma para as paredes da "garrafa". Nos traçados abertos há mesmo uma fuga pelos colos.

Tais perturbações, inerentes à presença de particulas carregadas, podem ser reduzidas se utilizarmos campos magnéticos muito fortes e bem dispostos.

Nos traçados abertos e longos procura-se por meio de colos finos e torções das linhas de força, reduzir essas fugas porém os resultados não são muito convincentes.

Os traçados fechados ou os que dele derivam são mais prometedores. Eliminando quase que totalmente as fugas das extremidades, eles parecem mais adaptados para opor-se aos desvios transversais do plasma, ao mesmo tempo que permite um confinamento bastante eficiente. A máquina de concepção russa, denominada TOKOMAC, deu resultado bastante promissor.

O aparelho comporta uma moldura circular no qual se faz o vácuo e no interior do qual cria-se um cordão de plasma. Para formá-lo induz-se corrente da ordem de centenas de milhões de ampères. No campo circular produzido pela corrente do plasma superpõe-se um campo magnético longitudinal exterior produzindo assim um campo magnético helicoidal que confina o plasma. Um campo transversal exterior estabiliza o sistema. Com uma densidade de partículas vizinha da ideal obtém-se temperaturas da ordem de dez milhões de graus e campo de confinamento da ordem de 1/100 de segundo. Se nos reportarmos às cifras indicadas no início verifica-se que ainda não se atinge a fusão. Esses resultados constituem todavia um passo em frente, sobretudo no que respeita ao tempo de confinamento. Máquinas mais aperfeiçoadas do que os protótipos atuais permitiriam chegar a resultados mais positivos. Grandes especialistas internacionais reunidos na conferência "Energia 70" em Las Vegas em setembro de 1970 não tinham a menor dúvida sobre isso.

A MANUTENÇÃO

Produzido e confinado, nosso plasma tornando-se a sede das reações termonucleares deve assumir um estado de regime tal que permita que a instalação produza energia suficientemente. Dois caminhos surgem então: segundo o regime seja contínuo ou não, o sistema exigirá condições diversas de manutenção.

Em regime alternado, simples em princípio, e já experimentado em nossas máquinas, raciocina-se à base de ciclo. O plasma passa pelas etapas que descrevemos e cada um dos parâmetros evolui a seu tempo.

Um regime contínuo, ao contrário, necessita um ajustamento global dos numerosos parâmetros do sistema, apresentando então o difícil problema da sua execução em padrão ótimo. A resolução desse problema dará provavelmente a solução a ser adotada no futuro.

Para cada tipo de regime os modelos dos reatores são diferentes. A título de exemplo a fig. 3 dá o esquema teórico de um reator que utiliza o laser para ignição ou qualquer outro processo de formação.

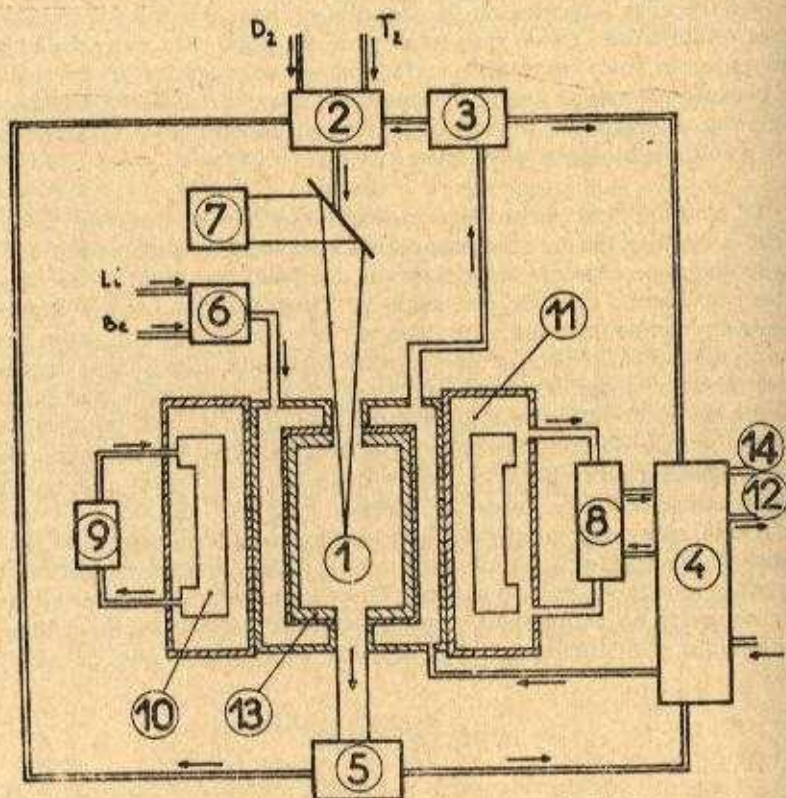


FIG. 3

- | | |
|--|--|
| 1. fornalha | 8. resfriador do escudo protetor |
| 2. injetor | 9. resfriador dos eletroímãs |
| 3. separador de trítio | 10. eletroímãs |
| 4. permutador de calor | 11. mistura refrigerante do escudo térmico |
| 5. separador de hélio | 12. conduto para as turbinas |
| 6. misturador de lítio e berílio | 13. banha de molibdeno |
| 7. laser ou outro dispositivo de ignição | 14. expulsão do hélio. |

Mas não se sabe ainda qual será em seu seio o comportamento de um plasma, sede de numerosas reações de fusão, e qual será o mecanismo íntimo de manutenção deste. Sômente a experiência nos informará a respeito. Parece possível, antes de um prazo de dez anos, construir um reator que forneça tanta energia quanto a que receba para funcionar. Isso já constituirá uma etapa importante.

A RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA E OS PROJETOS DE REATORES

Agora que já conseguimos, teoricamente, estabilizar nosso plasma, trata-se de recuperar a energia emitida. Segundo a natureza da emissão de energia vários métodos podem ser encarados.

Inicialmente devemos dizer que os nêutrons, formados no decurso dessas fusões, interagindo com uma camada de lítio líquido que circula em redor do plasma, fornecerão o trítio necessário à alimentação do reator. O calor irradiado, por outro lado, nessa última reação pode, por um sistema apropriado de permutadores, alimentar uma central termelétrica.

Finalmente, nas máquinas lineares a variação do fluxo eletromagnético que resulta da expansão radial do plasma contra o campo de confinamento, gera um processo de conversão direta da energia cinética das partículas em energia elétrica. Este método bastante prático, no momento, está no estágio puramente teórico. Ele sofre a concorrência das instalações previstas no primeiro que é mais clássico. Não é proibido pensar que, segundo a utilização que se queira dar aos reatores, um ou outro dos métodos terá sua aplicação.

Ao lado da produção de eletricidade, pode-se também encarar a recuperação do plasma para realizar certas operações de sublimação de metais ou de outros elementos, é o que os pesquisadores denominam "the fusion torch".

Se ainda não chegamos ao estágio das realizações efetivas, equipes de pesquisadores e engenheiros dedicam-se desde hoje a calcular as características de centrais de fusão controlada. As instalações produziriam com um pequeno volume 2.000 a 10.000 MW. Com os traçados abertos nas instalações lineares de vários quilômetros — o que reduz assim as fugas pelas extremidades — poder-se-ia esperar potência de 100.000 MW. Isso é enorme e não se pode ver interesse econômico em tais monstros. Será que algum dia possuiremos instalações industriais localizadas que exijam tanta energia? As dificuldades técnicas que tais máquinas apresentarão não parecem intransponíveis.

ESTADO DAS PESQUISAS

As pesquisas sobre a fusão atualmente têm lugar em todos os países que se interessam pela física nuclear. Dois mil pesquisadores divididos por uma quinzena de países procedem a pesquisas sobre a fusão controlada e permitiram os progressos verdadeiramente encorajadores que descrevemos.

O esforço principal se desenvolve nos Estados Unidos (mais ou menos 30 milhões de dólares em 1970), na Rússia e em seus satélites

e na Europa Ocidental. A Inglaterra efetua pesquisas já bastante adiantadas em Culham. A Alemanha em Garching e a França no Centro de Estudos Atômicos de Tonlenay-aux-Roses desempenham papel de relevo no seio do Euratom. Neste grupo nossa participação representa cerca de um terço do esforço total. Assim, no orçamento para 1970, na associação Centro-Euratom para o estudo da fusão, com fins eletrogeradores, consta uma dotação de 60 milhões de francos. Outras pesquisas, de menor amplitude e ainda teóricas, são levadas a cabo em outros organismos científicos.

Globalmente constata-se, no entanto, que as despesas previstas são fracas em relação àquelas consignadas para os estudos da fissão. Estima-se que para os próximos quinze anos as pesquisas custarão cerca de 1 bilhão de dólares na Europa (isto representa a metade do custo do "Concorde"). Além disso torna-se difícil fazer previsões. Se, de um lado, é necessário tornar a fusão operacional antes do fim do século, parece, por outro lado, que as despesas atuais são insuficientes para alcançar esse objetivo, levando-se em conta, ademais, as dificuldades técnicas encontradas.

PERSPECTIVAS E VANTAGENS

As considerações técnicas que acabamos de alinhar permitem compreender melhor as vantagens consideráveis da fusão controlada em relação a qualquer outro sistema existente. Temos nela uma fonte de energia própria quase inesgotável. Além disso as técnicas a desenvolver, necessárias a sua utilização, seriam geradoras de outros progressos científicos em quadro muito mais amplo.

— **Fonte inesgotável:** Sob o ponto de vista econômico e estratégico, a utilização da fusão dará aos países que dela dispuserem uma autonomia praticamente total no que tange à energia. O deutério que ela utiliza provém do mar e existe em quantidades tais que não se deve pensar em seu esgotamento. Ele existe na água comum na proporção de 1/5000. Dessa forma, supondo que na terra existam 7 bilhões de homens e que cada um consuma duas vezes mais energia do que o cidadão americano de hoje, somente 1% do deutério dos mares, utilizado com um rendimento de 10%, permitiria prover as necessidades humanas durante três milhões de anos.

— **Fonte própria:** A poluição, sempre crescente da biosfera, corolário da sociedade industrial e científica de hoje, inquieta cada dia mais o homem do século XX que sofre na carne esse mal. As explosões nucleares abalaram por tal forma a consciência da humanidade em relação aos efeitos que elas podem produzir que se desenvolveu um receio infundado a respeito das fontes de energia nuclear. Receio esse que não é totalmente injustificado quando se

sabe dos problemas que acarretam a eliminação ou confinamento dos resíduos radioativos das centrais a fissão e a extrema complexidade dos cuidados a ter para evitar sua embalagem.

As centrais a fusão, ao contrário, não apresentam êsse inconvenientes. Elas não produzem detritos. As reações que têm lugar não podem, por sua natureza, se desenvolver em cadeia. De mais a mais a pequena densidade do plasma comparada à produzida nas bombas "H", 100 milhões de vezes mais densa, permite controlá-las mais facilmente e eliminar os riscos da explosão. Finalmente, o baixo nível radioativo do reator permite sua instalação na proximidade das cidades. O pequeno vulto das instalações, sua compactidade, em relação à energia que pode ser produzida, permite até mesmo imaginar diversas utilizações em elementos móveis (navios, espaços) com riscos mínimos.

— **Fonte de progresso:** Os benefícios a esperar do desenvolvimento de tais fontes em matéria de energia são diretamente apreciáveis mas êsses desenvolvimentos podem trazer outros mais discretos porém, cujas conseqüências podem ser de profundidade.

É fato que as experiências necessitam o estudo de campos magnéticos intensos e o comportamento das partículas carregadas nos sítios onde elas imperarão. Ligada a isso, a técnica dos eletroímãs não deixará de progredir enormemente devido às dimensões dos aparelhos a serem construídos. Os plasmas bem aquecidos permitem que se penetre melhor em seu âmago e as propriedades que se lhes descobre abrem campo a novas utilizações particularmente em metalurgia e astronáutica. Como derivadas indiretas pode-se assinalar que as técnicas do vácuo, da eletrônica e da ótica, que permitirão controlar as máquinas a fusão, não deixarão de progredir espetacularmente sob a pressão das necessidades. Aquil, do mesmo modo que para a fissão, as técnicas de laboratório mais sofisticadas serão desenvolvidas.

Finalmente, com a fusão, desemboca-se naturalmente no domínio do estudo das partículas elementares e dos campos quânticos cuja aproximação se faz com o auxílio de uma aparelhagem matemática muito recente que aí encontra uma de suas aplicações.

Assim a construção e a utilização de aparelhos aperfeiçoados necessários à exploração da fusão exercerão uma poderosa ação de incentivo à aquisição e desenvolvimento dos conhecimentos em domínios ainda inexplorados ou pouco conhecidos.

Um olhar na História das Ciências pode mostrar, por analogia, que a central termonuclear será no mundo de amanhã o que a central hidrelétrica é no de hoje. Padrão de técnica e ciência, autônoma, limpa, a central termonuclear extrairá também da água, porém por outra forma, os meios de fornecer aos homens a energia de que necessitarão para os misteres do amanhã.

Todaya esse acontecimento não representará provávelmente se não uma etapa na história da energia. As possibilidades oferecidas pela destruição total da matéria e da antimatéria quando postas em confronto já está sendo encarada. Tal processo, cuja resultante única é uma radiação eletromagnética, parece o ideal, sua aplicação parece ainda muito distante mas as pesquisas prosseguem graças aos grandes aceleradores de partículas.

Ao contrário, a energia termonuclear está a nosso alcance. Do domínio que tivermos dependerá o bem-estar das gerações futuras; é preciso pois que o obtenhamos.

É verdade que para passar do estágio experimental para o industrial é necessário realizar um esforço de vulto mas cabe à nossa geração perseverar nêle para levar a cabo essa gigantesca empresa.



O homem continua a ser o elemento principal na guerra. O êxito ou a derrota será função do modo como fôr formado, instruído e chefiado.