INTRODUÇÃO AO ESTUDO

DA

FÍSICA NUCLEAR

Aula inaugural de

Abertura dos Cursos da Faculdade Nacional de Filosofia

da universidade do Brasil

a 16 de março de 1942.

por

J. COSTA RIBEIRO

INTRODUÇÃO AO ESTUDO DA FÍSICA NUCLEAR

I - INTRODUÇÃO

A física do núcleo atômico é sem dúvida um dos capítulos mais empolgantes da ciência moderna.

Nunca antes havia o homem penetrado tão profundamente na intimidade da matéria, nem, de maneira tão objetiva, lográra desvendar os admiráveis segredos dêsse mundo desconhecido, dêsse verdadeiro microcosmos atômico, oculto abaixo do limiar da nossa percepção sensível.

Graças ao auxílio dos mais delicados e dos mais poderosos instrumentos de investigação, foram descobertos fatos novos e surpreendentes, tais como: a existência de corpúsculos sub-atômicos, a transmutação dos elementos químicos, a transformação integral de energia radiante em corpúsculos materiais e a transformação inversa, a criação artificial de novos elementos radioativos, a libertação da energia armazenada no interior do átomo, para não citar sinão os mais importantes, e o estudo sistemático dêsses fe

nômenos, que poderiamos chamar de microfísicos, o estabelecimento das respectivas leis e os esforços realizados para a sua interpretação, conduziram a modificações profundas e imprevistas em algumas concepções e teorias que pareciam tão solidamente estabelecidas, que já se haviam, por assim dizer, integrado na própria estrutura do pensamento científico.

O primeiro sentimento que em nós desperta o contato com êsses novos e extraordinários aspetos da realidade é o salutar sentimento de que caminhamos sempre nas fronteiras do desconhecido e de que ha sempre um mistério a desvendar em qualquer objeto que se apresente á consideração atenta do nosso espírito.

Já não me refiro áquêle sentido mais alto do mistério que envolve a essência profunda das cousas ao olhar superior do filósofo, e acerca do qual já se disse que "plus on a de lumière, plus on voit le mystère grandir".

Refiro-me, aqui, apenas ao mistério que resulta da nossa ignorância sôbre a estrutura íntima e sôbre o funcionamento do próprio mundo da realidade sensível, cujo estudo constitue o objeto das ciências experimentais .

Aí também quanto mais profundamente vamos penetrando no conhecimento e na investigação da natureza, mais se evidenciam a extensão e a profundidade daquilo que ainda resta a conhecer e a investigar.

Cada fato novo, cada nova descoberta, longe de limitar ou reduzir o mundo das cousas desconhecidas, abre ao contrário, novos caminhos e desvenda novos horizontes, aumentando cada vez mais o campo da investigação e da pesquiza, propondo novos problemas e levantando novas interrogações, numa espécie de eterno desafio á inextinguível sêde de conhecimento da verdade, que caracteriza as atividades superiores do espírito humano.

Nenhum sentimento nos parece mais próprio a estimular o trabalho científico e o amor á pesquiza desinteressada, do que essa intuição obscura de que nada se esgota como objeto de conhecimento, e essa curiosidade superior tem sido talvez a maior fôrça para a construção e o progresso das ciências físicas, apezar da aparente rigidez do instrumentário matemático que formalmente as caracterisa e apezar de todas as limitações e normas restritivas que lhe teem tentado impor, alias, inutilmente, alguns sistematisadores da metodologia científica.

E, nêsse particular, ha uma estranha semelhança entre o cientista e o poeta. Tambem êste, contemplando os espetáculos da vida, e o fluxo perene e irreversivel do tempo , descobre nêles,separando-os da espessa ganga da vulgaridade quotidiana, os elementos novos e imprevistos as visões de beleza e de harmonia ocultos ao olhar superficial da maioria dos homens.

Em oposição áquele cientificismo primá - rio que supunha ter a ciência explicado definitivamente o universo, assistimos hoje como que a uma restauração do sentimento do mistério que reside em todas as cousas, comunicando o estranho sabor do desconhecido ás mais humildes realidades da vida quotidiana.

Pois, como disse um poeta:

"..... não é só nas estrelas distantes
que se oculta o perfume dos enigmas insondáveis,
a flôr, que tua mão alcança, tambem guarda o seu mistério
que amadurece em fruto, e se faz grão,
e resurge da terra".....

II.

A EVOLUÇÃO DA FÍSICA NOS ÚLTIMOS 50 ANOS

Impossível seria abordar, mesmo de leve, as questões de que trata a física nuclear, sem assinalar previamente alguns dos principais aspetos do desenvolvimento das ciências físico-matemáticas nestes últimos 50 anos.

Um dêsses aspetos, prende-se á revisão processada em certos conceitos fundamentais da ciência clássica, revisão essa que se tornou necessária à elaboração de quadros mais amplos para a descrição e a interpretação dos fenômenos do mundo físico e que permitiu a realização das

construções de grande generalidade da física relativista, da teoria dos "quanta", da mecânica ondulatória, e da mecânica quântica.

Um outro aspeto diz respeito ao problema da posição das ciências físico-matemáticas em face da teoria do conhecimento, ás questões de método, de finalidades e de limites dessas ciências e de um modo mais geral, ás relações entre tais ciências e a filosofia.

Mas o aspeto de que tencionamos nos ocupar mais detidamente, refere-se à considerável ampliação dos nossos conhecimentos sôbre a estrutura da matéria e sôbre os processos de sua inter-ação com a radiação e a energia.

A física relativista surgiu de uma análise aprofundada do esquema espatio-temporal tradicionalmente utilisado nas construções da mecânica racional clássica.

A revisão dêsse esquema, realizada sobretudo por Lorentz e Einstein, tornou-se necessária á construção de uma estrutura mais ampla, na qual a forma das relações de interdependência que exprimem analiticamente as leis da mecânica e da física, se tornassem invariantes em relação às condições de movimento dos sistemas de referência.

Dentre as muitas e importantes conseqüências decorrentes dêsse novo ponto de vista, duas ha que desejamos especialmente assinalar, dada a sua importância na

física corpuscular e na física atômica: a variação da massa com a velocidade, em oposição ao conceito clássico da invariância da massa, e a equivalência entre a massa e a energia.

Cumpre salientar que êsses novos conceitos, oriundos de considerações puramente teóricas, deveriam mostrar-se mais tarde do maior valor para a interpretação dos fenômenos da física nuclear, recebendo a mais bela confirmação experimental no estudo quantitativo dêsses fenômenos.

O caráter descontínuo das trocas energéticas nos processos elementares de inter-ação das radiações com a matéria, e o caráter "corpuscular" atribuível às radiações em tais processos, em oposição ás características de continuidade da teoria ondulatória clássica, nos fenômenos relativos á propagação da energia radiante constituem a contribuição fundamental da teoria dos "quanta", originada no começo dêste século, nos trabalhos de Planck e desenvolvida extraordinariamente, no domínio da física, atômica, depois do advento em 1913 do modêlo atômico quântico devido a Niels Bohr.

A "mecânica ondulatória" cujos fundamentos foram lançados por Louis de Broglie em 1924, e cujo desenvolvimento deve-se sobretudo aos trabalhos de Schrödin -

ger, realizou uma conciliação entre êsses dois aspetos aparentemente contraditórios da realidade física, e pela associação de uma onda de fase a cada corpúsculo, permitiu não só interpretar as propriedades corpusculares das radiações, como tambem prever as propriedades ondulatórias dos corpúsculos, que foram posteriormente reveladas, nas belas experiências de Germer e Davison e de G.P. Thomsom em 1927 sobre a difração dos eletrons pelas microestruturas cristalinas.

A "mecânica quântica", inaugurada por Heisenberg, partindo do princípio de que nas equações da física atômica só devem figurar quantidades "observáveis" postulando a impossibilidade, de se determinar simultaneamente, com ilimitada precisão, a posição e a velocidade de um corpúsculo, modificou profundamente o formalismo interpretativo dos fenômenos atômicos substituindo, nêsse domínio, o determinismo mecanicista clássico por um probabilismo de fundo meramente estatístico.

Seria um erro porém supor que uma tal revisão de conceitos signifique uma ruptura total com o corpo de conhecimentos e doutrinas que constituem o que se convencionou chamar de "física clássica". As novas teorias, ao contrário partindo de princípios mais gerais, definem os limites de validade, ou melhor os domínios de aplicação dentro dos quais é aceitável o tratamento clássico dos problemas e

aquêles domínios nos quais se torna necessário o tratamento decorrente das concepções teóricas modernas.

III - AS CIÊNCIAS FÍSICAS E A FILOSOFIA

Compreende-se no entanto facilmente a repercussão que essas mudanças de atitude deveriam ter nas questões relativas á posição das ciências físicas em face da teoria do conhecimento.

Assim por exemplo o "princípio de indeterminação" e o carater probabilítico do formalismo utilisado na descrição analítica dos fenômenos micro-físicos, pondo em cheque o determinismo mecanicista da física clássica, parecia vir abalar até mesmo o próprio princípio de causalidade.

Cumpre desde logo observar que si de fato essas novas concepções atingem em seus fundamentos o determinismo mecanicista, tal como ele deve ser compreendido nos domínios da física corpuscular, daí não se segue que esteja igualmente afetado o princípio de causalidade.

Essa conclusão, parece-nos, resultar com a maior clareza, da análise da significação física do princípio de indeterminação, e sobretudo da consideração, introduzida por Bohr, do conceito de "complementaridade" e da existência de um "efeito recíproco", abaixo do "limiar de

observação" entre os objetos atômicos e os instrumentos com os quais é feita a observação ou a mensuração.

Mas a agitação levantada em torno desses problemas trouxe uma espécie de revivescência do interesse pelas questões de metodologia, de finalidades próprias e de limites da ciência, e, de um modo geral, pelo estudo das relações entre a ciência e a filosofia.

Verdade é que tais questões sempre foram objeto de estudo e cogitação mais, no entanto, da parte dos filósofos, do que da parte dos cientistas, os quais, sobretudo depois de Comte., com raras exceções, haviam adquirido o hábito de afastar sumariamente, por uma espécie de preconceito, a que denominavam "atitude antimetafísica", todas as questões que lhes parecessem mais ou menos "contaminadas" de preocupações filosóficas.

Ultimamente é fácil de constatar um novo e crescente interesse por esses problemas, da parte dos próprios cientistas. Basta citar, por exemplo, os nomes de físicos como Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, ou de matemáticos como Bertrand Russel e Whitehead, que se tem ocupado e preocupado com tais problemas.

Mais uma prova desse interesse, encontramos na reunião em Copenhague, em 1936, do "2º Congresso Internacional pela Unidade da Ciência" em que foram debatidas essas questões por cientistas e não por filósofos.

Cumpre assinalar, no entanto, que êsse Congresso, reuniu quasi que exclusivamente representantes dos pontos de vista do chamado "círculo de Vienna", cujas concepções prendem-se muito diretamente á filosofia nominalista e para os quais os problemas de filosofia das ciências se resumem numa espécie de sintaxe, ou formalismo terminológico, destinado a aumentar apenas a precisão da linguagem científica e a evitar o aparecimento dos chamados "falsos problemas".

Não nos parece inoportuno assinalar aqui a importância e o valor da análise profunda das relações entre a ciência e a filosofia, recentemente empreendida por Jacques Maritain, figura incontestavelmente impar, na restauração contemporanea do pensamento tomista.

Insistindo sôbre a distinção essencial entre a "metafísica" a "filosofia da natureza" e as ciências da natureza", quer quanto ao seu objeto quer quanto aos seus métodos próprios, Maritain põe em relevo os principais erros decorrentes da confusão desses três diferentes "graus do saber", bem como da indevida usurpação de alguns desses domínios pelos outros.

O seu estudo é especialmente lúcido e interessante no que respeita ás distinções entre a "filosofia da natureza", caracterizada pela "análise ontológica" do real sensível, e as "ciências da natureza" nas quais o real sensível é objeto de uma "análise empiriológica".

Seja- nos permitido acompanhar o próprio Maritain, na localização do ponto de vista da mecânica quântica, em face da "análise empiriológica".

... " a análise empiriológica, diz Maritain, resolve o objeto em elementos observáveis ou mensuráveis, ela vai assim do observável ao observável, ficando constantemente no plano das operações dos sentidos, das observações ou mensurações efetuáveis.

... Esta análise vai do observável ao observável, ao menos indiretamente; com efeito, as teorias físicas atuais, no domínio da micro-física, e sobretudo na teoria dos "quanta", conduzem a interpretações matemáticas em que os fenômenos não são mais imaginativamente representáveis, pois a imaginação se representa as cousas segundo elas nos aparecem na nossa escala das grandes dimensões, na escala macroscópica, como objetos possíveis de uma observação completa e contínua, enquanto que, quando o cientista passa ao domínio atômico, êle constata que a própria possibilidade - é a idéa desenvolvida por Heisenberg - de uma observação completa e contínua dos fenômenos é suprimida. Ele passa então de um mundo de objetos imaginativamente representáveis, a um mundo de objetos sem figura imaginavel.

Isto não significa que êsse mundo não seja um mundo do observável, mas essas observabilidades tornam

-se por assim dizer, descontinuas... É como que um "atomis - mo" da observação e da mensuração que torna impossível á imaginação construir um modelo do fenômeno considerado, mas continuamos sempre na zona do observável".

Apresentada assim, em suas linhas mais gerais, a evolução de alguns dos princípais conceitos da física teórica nos últimos tempos, vejamos agora como evoluiram paralelamente os conhecimentos científicos sobre a estrutura íntima da matéria.

IV - A ATOMÍSTICA CLÁSSICA E A ATOMÍSTICA MODERNA

A idéa fundamental da atomística clássica parece-nos ter sido a do estabelecimento de uma relação de interdependencia entre as propriedades da matéria e a sua estrutura, procurando explicar as diferenças de propriedades por uma diferenciação correspondente de estrutura.

Essa concepção encontra-se por certo esboçada em Demócrito que disse: "As variedades de todas as cousas dependem das variedades de seus átomos em número, tamanho e estado de agregação".

Mas Demócrito, como aliás a maioria dos

filósofos antigos, não distinguia a filosofia da natureza das ciências da natureza, o que nos permite hoje compreender, não só as estravagantes conclusões por ele deduzidas daquele princípio, como tambem o fato de que esse conceito, fóra do seu domínio próprio de aplicação que é a análise empisiológica, tenha permanecido estéril durante vários séculos.

A formulação precisa dêsse conceito em termos científicos só foi possível depois do estabelecimento das leis quantitativas que regem os processos de interação entre as diversas espécies de matéria, revelando a descontinuidade de tais processos, e o nome de Dalton acha-se ligado á primeira elaboração de uma teoria atômica fundada em bases experimentais, no começo do século XIX.

Da fecundidade dos desenvolvimentos dessa teoria, dão bem uma idéa os admiráveis progressos realizados nos domínios da química durante aquele século.

O estudo sistemático das propriedades químicas da matéria, que em seu conjunto conduzirem á classificação periódica dos elementos, e o estudo de suas propriedades óticas reveladas pela espetrocopia, levaram porém á conclusão de que os átomos não constituem o termo final da subdivisão da matéria, mas são, ao contrário sistemas complexos, nos quais desempenham papel importante as cargas elétricas e em particular o "eletron", corpúsculo de carga negativa,e de

massa cerca de duas mil vezes menor que a massa de um átomo de hidrogênio, e que já tinha feito a sua aparição em outros domínios da física, sobretudo, nos processos de descarga elétrica nos gazes rarefeitos.

V - A DESCOBERTA DO NÚCLEO ATÔMICO

Foram porém as experiências de Geiger e Marsden, realizadas na Inglaterra, em 1909, sobre a deflexão das particulas, emitidas pelas substâncias radioativas, ao atravessarem a matéria, que revelaram, pela primeira vez, a existência do "núcleo atômico", região cujas dimensões lineares são cerca de dez mil vezes menores que as dimensões do próprio sistema atômico e na qual se acha concentrada praticamente toda a massa mecânica do átomo e toda a sua carga positiva.

Essas importantes experiências permitiram ainda a determinação da carga positiva do núcleo evidenciando a sua identidade com o valor do "número atômico" que define a posição do respectivo elemento químico, na classificação periódica.

A concepção do átomo nuclear daí deduzida por Lord Rutherford, e as modificações nela introduzidas por Bohr, de acôrdo com a teoria quântica permitiram interpretar as principais propriedades óticas e químicas dos elementos

em função do número e da distribuição dos eletrons em torno do núcleo.

Mas como o número e a distribuição desses eletrons dependem finalmente da "carga nuclear", vemos que, no fundo, é o "núcleo" a verdadeira séde da individualidade de cada átomo.

Essa concepção tem consequências da maior importancia.

Com efeito, nessas condições, si o " núcleo atômico" fosse homogêneo, insecável e irredutível a elementos mais simples deveriamos concluir por uma absoluta estabilidade dos átomos e consequentemente dos respectivos elementos químicos.

Si porém, ao contrário, o núcleo fosse por sua vez um sistema complexo, constituido pela reunião de corpúsculos ainda mais simples, novas perspectivas se abririam á investigação e á pesquiza e a possibilidade de alterar sua estrutura acarretaria tambem a possibilidade de produzir novos elementos ou de realizar transmutações de um elemento em outro, o velho sonho dos alquimistas medievais.

A essa segunda hipótese, isto é a da complexidade dos núcleos, somos levados naturalmente pelo estudo dos fenômenos da radioatividade natural.

Aí assistimos, com efeito, á destruição progressiva de uns elementos e á formação gradual de outros,

com emissão de corpúsculos dotados de carga elétrica (particular α e β) e desprendimento de consideráveis quantidades de energia, não só sob a forma de energia cinética dêsses corpúsculos como ainda sob a forma de "fotons" ou "quanta" de radiação γ , de natureza eletromagnética.

A interpretação de tais fenômenos conduziu á teoria da "desintegração nuclear" que pressupõe a complexidade e a instabilidade dos núcleos dos rádio-elementos naturais, cujas modificações expontaneas acarretam verdadeiras transmutações sucessivas de uns elementos em outros originando-se assim as séries de desintegração, ou famílias de radio-elementos naturais, até que se forme um núcleo dotado de grande estabilidade e que constitue o termo final inativo de cada série.

Deve-se notar ainda que foi o estudo das radiações corpusculares emitidas pelas substâncias radioativas que conduziu ao desenvolvimento de certas técnicas especiais de laboratório que vieram tornar possivel a investigação experimental dos corpúsculos sub-atômicos, permitindo a determinação quantitativa de suas características e prestando assim os maiores serviços no domínio da física nuclear.

Dentre essas técnicas mencionaremos apenas, pela sua importância, a medida das correntes de ionisação produzidas nos gases pela ação ionisante dos corpúsculos,

os métodos de desvio por meio de campos elétricos e magnéticos intensos, a fotografia das suas trajetórias tornadas visíveis por meio da chamada câmara de Wilson, a utilização da sua ação fotoquímica permitindo o registro direto de sua ação sobre a chapa fotográfica, a sua contagem individual pelas cintilações que eles produzem ao se chocarem com um anteparo fluorescente e sobretudo a técnica dos "tubos contadores" de Geiger-Müller que permitem não só registrar o número dos corpúsculos como ainda determinar a sua energia, fornecendo tambem preciosas indicações sobre a direção e o sentido do seu movimento no espaço.

Mas os processos radioativos se caracterizam não só pela sua expontaneidade como ainda pela impossibilidade de serem modificados ou influenciados pela ação de causas exteriores. São alterações dos núcleos que se processam inteiramente fóra de qualquer controle humano.

VI - A TRANSMUTAÇÃO ARTIFICIAL DOS ELEMENTOS

Aqui porem vemos mais uma vez em trabalho aquela obscura intuição da existência de fatos novos, a que ha pouco nos referiamos, guiar persistentemente os investigadores na pesquiza da possibilidade de produzir alterações nos núcleos atômicos estáveis pela ação de agentes exteriores, tentando a realização de "transmutações artificiais".

A primeira experiência nesse sentido coroada de sucesso foi realizada em 1919 por Lord Rutherford, no laboratório Cavendish na Inglaterra.

Esse investigador teve a idéa de efetuar uma espécie de bombardeio dos núcleos atômicos empregando como projetis as particulas α emitidas pelo rádio-elemento Polonium, partículas essas que, podem ser identificadas com os núcleos do Helium e que na escala atômica apresentam uma massa considerável (4 vezes maior que a do átomo de H), e uma enorme energia cinética, graças á sua grande velocidade.

Utilizando o método das cintilações, Rutherford descobriu que o bombardeio dos núcleos do Nitrogenio com particulas α dava origem á produção de uma nova radiação corpuscular, muito mais penetrante que a radiação α excitadora, e que se verificou ser constituida por núcleos de átomos de Hidrogenio, para os quais Rutherford propôs em 1920 a denominação de "protons", hoje usada correntemente.

A interpretação desse fenômeno, de acordo com as concepções atuais é a seguinte:

Quando uma partícula α de grande energia consegue se aproximar suficientemente do núcleo de um átomo de Nitrogênio ela é capturada pelo núcleo, produz-se então uma modificação da estrutura nuclear com expulsão de um proton e formação de um outro núcleo diferente do primeiro.

Esse processo pode ser representado simbolicamente por uma notação convencional semelhante á que é usada nas reações químicas, mas na qual em vez dos símbolos dos elementos e compostos figuram os símbolos dos corpúsculos e núcleos atômicos:

$$\boxed{{}^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}H \nearrow} \qquad (1)$$

A experiencia de Rutherford e o processo nuclear nela envolvido acarretavam consequências de tão grande importância para a ciência que foram imediatamente objeto das mais cuidadosas investigações. Depois das belas verificações feitas por Blacket (em 1925) utilisando uma câmara de Wilson e obtendo fotografias nas quais se viam as trajetórias do corpúsculo incidente, do corpúsculo emitido e do novo núcleo formado e desviado em consequência do choque, dissiparam-se as últimas reservas sobre a realidade objetiva da primeira transmutação de elementos químicos artificialmente provocada num laboratório.

Essa experiência fundamental de Rutherford merece ser assinalada com um relevo todo especial, pois constitue o primeiro marco de novos caminhos conduzindo a horizontes até então insuspeitados no domínio da investigação científica. Ela inaugurou, por assim dizer, a física ex

perimental do núcleo atômico, e foi a origem de uma verdadeira hiper-química, na qual os elementos da química comum perdem o seu carater inviolável de termos finais da subdivisão da matéria e passam a ser considerados como combinações mais ou menos estáveis de um certo número muito reduzido de corpúsculos sub-atômicos fundamentais, entre os quais se realizam tambem processos de interação, verdadeiras reações corpusculares ou reações nucleares, acompanhados, em geral de trocas de energia extraordinariamente intensas.

O segundo passo importante, no domínio das transmutações artificais foi realizado em 1932, ainda no laboratório Cavendish, por dois alunos de Rutherford, Cockroft e Walton, bombardeando o núcleo do elemento Lithium, com protons acelerados artificialmente em um campo elétrico de algumas centenas de milhares de volts.

A reação nuclear correspondente pode ser representada pela equação

$$\boxed{{}^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He \nearrow + {}^{4}_{2}He \nearrow}$$

Essa reação de Cockroft e Walton apresenta dois aspetos novos e importantes:

Antes de tudo o fato de ter sido a primeira transmutação obtida por processos totalmente artifi-

ciais, utilisando corpúsculos acelerados artificialmente por meio de um campo elétrico auxiliar. Foi assim o início da técnica da utilisação das altas tensões para aceleração dos projetis usados nas reações nucleares, técnica que se desenvolveu depois extraordinariamente, graças sobretudo á invenção do gerador eletrostático de Van de Graaf que permite obter tensões contínuas de alguns milhões de volts.

O segundo aspeto, ainda mais importante, refere-se á energia posta em jogo nêsse processo.

Com efeito a energia cinética das partículas α resultantes dessa verdadeira explosão do núcleo do Litium poude ser determinada por meio da câmara de Wilson revelando-se muitas vezes maior que as energias observadas nas partículas α mais rápidas, emitidas pelas substâncias radioativas. (Estas últimas possuem energias compreendidas entre 4 e 8 milhões de eletron-volts, ao passo que a energia total das primeiras é de cerca de 17 milhões de eletron-volts).

Além disso a determinação rigorosa das massas nucleares que tomam parte na reação, (determinação essa que pode ser feita por meio do espetrógrafo de massa, com uma precisão que atinge hoje a 5a. casa decimal) revela que a soma das massas dos 2 corpúsculos iniciais (os núcleos de Li e H) é maior que a soma das massas dar 2 partículas resultantes da reação.

Estamos assim pela primeira vez em presença de um processo físico, ou hiper-químico, no qual não ha mais conservação da massa.

Essa reação, já por tantos títulos notável, teve assim o mérito de constituir a la. verificação experimental da equivalência entre a massa e a energia que fôra prevista pela teoria da relatividade de Einstein, pois feito o cálculo da energia correspondente a êsse "Deficit de massa", pela fórmula relativística dessa equivalência, encontra-se justamente o valor 17 milhões de eletron-volts, em perfeita concordancia com a determinação experimental da energia cinética das partículas α observadas.

Para que se tenha uma idea da rapidez com que se desenvolveram as pesquisas experimentais no domínio da física nuclear basta dizer que, em 1935, o número total das reações nucleares conhecidas já era de 125 e dois anos mais tarde, (julho de 1937) esse número se elevára a 605, (sendo superior a 1000 o nº de reações desse tipo hoje conhecidas)

O quadro (3) indica as notações usuais dos corpúsculos sub-atômicos fundamentais que tomam parte nêsses processos nucleares.

Denominações	Notação	Observações
Partícula α	α ou $^{4}_{2}He$	núcleo do Helium
Proton	p ou $^{1}_{1}H$	núcleo do Hidrogenio
Déuteron	d ou $^{2}_{1}H$	núcleo do Deutérium
Néutron	n ou $^{1}_{0}n$	
Négatron ou eletron negativo	e ou $^{0}_{1}e$	
Pósitron ou eletron positivo	e ou $^{0}_{1}e$	

VII - A descoberta do Pósitron

Dêsses corpúsculos, a "partícula α " e o "negatron" já eram conhecidos, do estudo das substâncias radioativas, o "proton" e o "deuteron" de um certo modo tambem, pois não são mais que os núcleos do Hidrogenio e do seu isótopo o Deuterium, ou H pesado, já conhecidos como elementos químicos e como ions.

O pósitron ou " eletron positivo " e o " neu-

tron" constituem porem descobertas novas, representando duas das mais belas conquistas da física nuclear.

A história da descoberta do eletron positivo é das mais interessantes e encerra ainda um exemplo frizante da fecundidade da inter-ação, entre as pesquisas teóricas e as investigações experimentais.

Em 1930, Dirac propuzera uma teoria relativista do eletron que constituia um desenvolvimento brilhante da mecânica ondulatória, permitindo interpretar certas peculiaridades observadas sobretudo nos espetros dos metais alcalinos, bem como no efeito Zeeman, isto é no desdobramento das frequências das radiações quando a fonte é submetida á ação de um campo magnético exterior. Tal teoria tinha além do mais o mérito de dar conta do chamado "spin " ou movimento próprio de rotação do eletron e consequente momento magnético, conceito que havia sido introduzido em 1925 por uhlembeck e Goudsmith para interpretar aqueles resultados da espetrografia.

Mas a equação de Dirac, além da série de auto-valores correspondentes aos estados estacionários estáveis que davam conta das observações espetroscópicas, admitia tambem uma outra série de autovalores aos quais correspondiam para o eletron estados de energia cinética negativa e, portanto, de massa mecânica negativa.

Esse resultado paradoxal equivalia a admitir que um tal corpúsculo, solicitado mecanicamente por uma força adquiria uma aceleração de sentido contrário ao da força.

um comportamento tão singular, levou mesmo um físico teórico, a dar a esse hipótetico corpúsculo a pitoresca denominação de "eletron burro". A principal dificuldade porém não era o fato de não se ter ainda observado tais corpúsculos, mas o fato de que a teoria previa tambem a possibilidade de transições entre esses dois grupos de estados estacionários e portanto a possibilidade de que um "eletron normal", adquirisse, em conseqüência de uma tal transição o comportamento de um "eletron burro", o que era mais difícil de admitir.

Dirac apresentou uma interpretação, logicamente aceitável, admitindo que todos os estados estacionários correspondentes á energia negativa estavam normalmente preenchidos de forma que não se podiam observar praticamente transições para esses estados.

Ao contrário, a passagem de um eletron,do campo dos estados de energia negativa para o campo normal,embora rara, seria possivel, dando origem assim á observação de um "eletron normal" e deixando um "lugar vago" no campo das energias negativas. Êsse "lugar-vago" ou "buraco", na expressão de Dirac, apresentaria alem disso todas as proprie

dades de um eletron normal, que tivesse porem carga elétrica positiva.

Uma tal transição corresponderia á possibilidade da criação de um par de eletrons, um com carga negativa e outro com carga positiva, e ao desaparecimento simultâneo de energia sob a forma de "quanta" relativisticamente equivalentes ás massas mecânicas desses dois eletrons.

Essas conclusões, pareceram de início, perfeitamente fantásticas e quasi não foram levadas a sério pois tinham todas as características de uma explicação " ad hoc" preparada para "salvar" a teoria de Dirac.

Entretanto dois anos mais tarde, em 1932, a descoberta do "eletron positivo" feita por Anderson, nos Estados Unidos, no decurso de experiências sobre os raios cósmicos, utilisando a câmara de Wilson, viria trazer uma surpreendente confirmação ás predições fantásticas de Dirac.

Numerosas outras verificações do aparecimento do eletron positivo bem como determinações das suas características de massa mecânica, carga elétrica, e energia cinética, foram realisadas, graças á câmara de Wilson automática, pouco depois inventada na Inglaterra por Blackett e Ochiallini.

Faltava ainda provar no entanto que êsses eletrons positivos tinham sua orígem num processo de formação de "pares", tal como o previra Dirac.

Essa confirmação foi obtida quasi ao mesmo tempo, por Anderson, nos Estados Unidos, Lise Meitner, na Alemanha, e pelo casal Joliot-Curie na França, irradiando uma câmara de Wilson com radiação γ de energia superior ao limite previsto por Dirac, de acôrdo com a relação einsteiniana da equivalencia entre a massa e a energia.

Essas experiências constituem pois mais uma prova daquela equivalencia revelando pela 1a. vez a possibilidade daquilo que, na linguagem da física clássica se poderia chamar de "materialisação da energia radiante" isto é transformação integral da radiação γ em um par de corpúsculos materiais.

Cumpre observar que um tal processo se realisa apenas na escala atômica e si é verdade que apresenta o maior interesse científico, está longe de ter, no entanto, qualquer significação prática.

O processo inverso, isto é a interação entre um "negatron" e um "positron" com aniquilamento desses dois corpúsculos e formação de radiação γ que resulta tambem da teoria de Dirac, já foi igualmente observado em experiências realisadas por Jean Thibaud, na França, fazendo agir um feixe de eletrons positivos, concentrados por um processo de sua invenção, (o chamado "método da trochoide") sobre um obstáculo de platina, e observando a radiação γ resultante da interação dos positrons com os negatrons do me-

tal. O cálculo mostra que os positrons teem uma "vida média" extremamente curta, pois êles se aniquilam imediatamente unindo-se aos negatrons livres, muito abundantes na natureza, razão pela qual é tão difícil observá-los.

VIII - A DESCOBERTA DO NEUTRON

A história da descoberta do "neutron" não é menos interessante.

Com efeito as dificuldades para tornar observável um corpúsculo desprovido de carga elétrica deveriam ser ainda maiores que as encontradas no caso do "positron".

um tal corpúsculo atravessaria a matéria, por assim dizer sem deixar vestígios.

Não produzindo ionisação nos átomos que atravessa não poderia ser observado, ao menos diretamente, pelos métodos usuais da câmara de ionisação, da câmara de Wilson ou d os tubos contadores, que se baseiam, todos êles, naquêles fenômenos de ionisação.

Entretanto, no decurso de experiências realisadas no intuito de provocar transmutações artificiais, vários pesquisadores observaram que a ação das partículas sôbre os núcleos de elementos leves, e, em partícular, do elemento Berilium, não dava sempre origem á produção de protons, como na experiência fundamental de Rutherford, mas a

uma radiação extremamente penetrante, cujas singulares propriedades foram estudadas sobretudo por Bethe e Berkes, em 1930 e pelo casal Joliot-Curie, em 1932.

Tal radiação, inicialmente denominada "radiação do Berilium" não produzia ação ionisante mas tinha a propriedade de produzir nos núcleos atômicos que eventualmente encontrasse, choques tão violentos que êsses núcleos adquiriam energia cinética suficiente para percorrer vários centímetros, realisando forte ionisação nesse percurso, cujas trajetórias podiam então ser facilmente observadas na câmara de wilson.

Chadwick em 1932, medindo essas trajetórias e determinando as energias postes em jogo nos processos de choque com núcleos de massas diferentes, poude calcular a massa mecânica do corpúsculo responsável por tais choques chegando á conclusão de que essa massa deveria ser igual á do proton.

Como tal corpúsculo não possuisse carga elétrica Chadwick propôs que êle fôsse denominado "neutron".

O processo nuclear que conduz ao maior rendimento em neutrons é o da ação das partículas α de uma subst. radioativa sôbre o Berilium seg. a reação.

$$\boxed{{}^{9}_{4}Be + {}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{12}_{6}D + {}^{1}_{0}n \nearrow} \qquad (4)$$

IX - A CONSTITUIÇÃO DOS NÚCLEOS ATÔMICOS

A descoberta do "neutron", deveria ter conseqüências da maior importância no domínio da física nuclear.

Primeiramente veio permitir o estabelecimento da hipótese, logo proposta por Heisenberg, de se considerarem todos os núcleos atômicos como constituidas exclusivamente pela reunião de protons e neutrons.

Essa hipótese, pela sua simplicidade, tem sido extremamente útil, na interpretação dos processos nucleares e em partícular na explicação dos fenômenos, já de ha muito conhecidos, da "isotopia" e da "isobaria" dos elementos químicos.

A existência dos "isótopos", como é sabido, permitira interpretar as grandes discrepâncias em relação aos valores inteiros, observadas nas massas atômicas determinadas por processos químicos, e que são apenas valores médios, pois nos processos químicos tomam parte misturas de isótopos em proporções variáveis, como o provaram os resultados obtidos com o "espetrógrafo de massa" de Aston.

Mas apezar disso ainda havia pequenas discrepâncias em relação aos valores inteiros, nas massas atômicas dos isótopos rigorosamente determinadas pelos métodos mais aperfeiçoados da "espetrografia de massa".

Essas discrepâncias, interpretadas como "deficts de massa" resultantes da energia libertada nos processos de formação dos núcleos permitem hoje calcular, pela fórmula de equivalência e insteiniana essa energia de formação, que constitue uma medida da "estabilidade" ou "coesão" do sistema nuclear.

Uma das questões mais delicadas da física nuclear é por certo esta, da estabilidade dos núcleos. Como conciliar, com efeito, essa extraordinária estabilidade que revela a existência de forças de coesão extremamente intensas, e a coexistência dos "protons", corpúsculos positivos, entre os quais portanto deveria haver repulsão e não coesão?

Para interpretar êsse fato a hipótese mais simples parece ser a de que a lei de repulsão eletrostática, ou lei de Coulomb, deixaria de ser válida quando os corpúsculos se aproximassem uns dos outros além de um certo limite, a partir do qual, em vez de repulsão passaria a haver atração, embora nada se possa ainda afirmar quanto á natureza dessa fôrça de atração.

Aliás as experiencias já citadas de Geiger e Marsden, sôbre a deflexão das particulas α ao atravessarem a matéria, mostraram que a lei de Coulomb só é válida para distâncias ao núcleo superiores a um certo valor crítico, ordem de 10^{12} cm., e não nos devemos admirar

de que não sejam aplicáveis no domínio "microfísico" do núcleo leis que só foram estabelecidas para o domínio "macrofísico".

Quanto à estrutura interna do núcleo quasi nada se pode ainda afirmar com segurança.

As descontinuidades observadas na distribuição da energia cinética das partículas α bem como na distribuição das frequências da radiação γ, no caso dos elementos radioativos, leva a conclusão da existência de "níveis energéticos" no núcleo, e possivelmente à ocorrência de estados estacionários estáveis. Mas a teoria da estrutura nuclear está longe de ter a precisão alcançada por exemplo na teoria dos fenômenos relacionados apenas com a estrutura dos sistemas eletrônicos que envolvem os núcleos.

X - O MECANISMO DAS REAÇÕES NUCLEARES

Um dos pontos sôbre os quais convem insistir sempre que se trata das transmutações artificiais dos elementos é a do baixo rendimento das reações nucleares.

Com efeito, na maioria dos casos, ás transmutações obtidas correspondem quantidades de matéria que, embora acessiveis á verificação experimental, pelos métodos da física nuclear, são no entanto tão pequenas que escapam por completo aos métodos de análise química mais sensíveis, a não ser em casos especiais, de que trataremos adeante.

Esse baixo rendimento decorre de duas causas principais.

A primeira é o carater extremamente lacunar do átomo.

Com efeito, como o provaram as experiencias de Geiger e Marsden, o núcleo ocupa um volume extraordinariamente pequeno em relação ao volume total do átomo (cerca de 10^{12} vezes menor), de modo que é tambem extremamente pequena a probabilidade do choque de um corpúsculo com o núcleo atômico.

A segunda causa é a forte repulsão que sofrem os corpúsculos positivos ao se aproximarem do núcleo, antes de atingirem a distância crítica em que deixa de ser válida a lei de Coulomb.

Si essa lei se aplicasse sem restrições na física nuclear, essa fôrça de repulsão tenderia para um valor infinito quando o corpúsculo positivo se aproximasse cada vez mais do núcleo e portanto nunca seria possível a penetração do corpúsculo na zona nuclear e menos ainda a sua captura pelo núcleo.

Mas uma vez que a experiência mostra a possibilidade dessa captura, devemos concluir que ha um limite, uma distância crítica, além da qual não é mais aplicável a lei de Coulomb.

Essa conclusão concorda plenamente com a

hipótese acima formulada para interpretar a estabilidade do edifício nuclear.

A fôrça que se exerce entre um corpúsculo positivo e o núcleo póde ser representada, em função da distância ao núcleo pela curva de variação do potencial cujo aspéto é o da fig. (5).

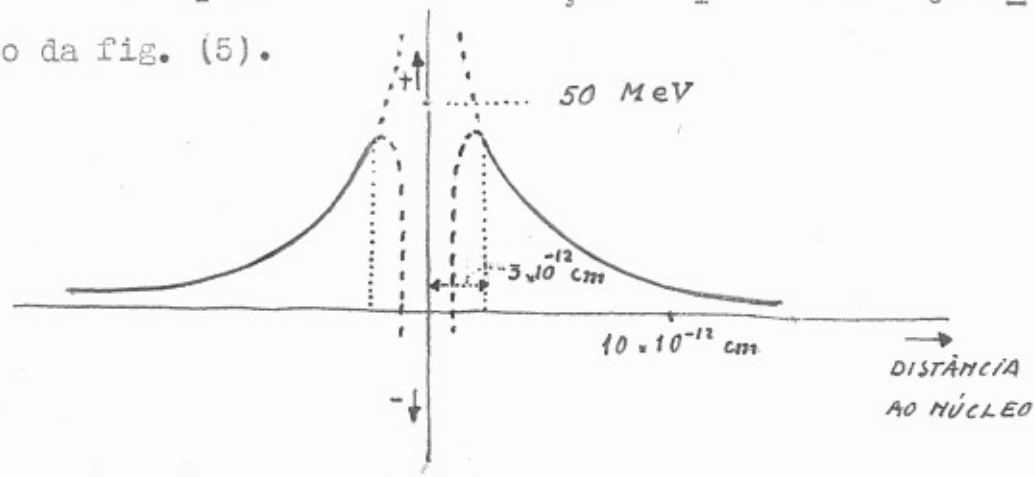

Fig. 5.

Á medida que o corpúsculo positivo se aproxima do núcleo o potencial cresce (o que indica uma fôrça repulsiva) obedecendo á lei de Coulomb. (a curva cheia é uma hipérbole) a partir da distância crítica porém, ($3x10^{-12}$ cm) deixa de ser válida a lei de Coulomb e a fôrça torna-se atrativa o que é representado na figura pela diminuição do potencial (curva tracejada, traçada arbitrariamente, apenas para indicar a mudança de sinal da fôrça).

Tudo se passa, pois, como si o núcleo estivesse envolvido por uma espécie de "barreira de potencial" que o protegesse do ataque dos projetís corpusculares ,

sendo de prever que um corpúsculo positivo, só poderia penetrar no núcleo quando a sua energia cinética fosse pelo menos igual ou então superior ao valor máximo do potencial(que corresponde á chamada "crista de Gamow", da "barreira de potencial") e que é da ordem de 50 milhões de eletron-volts.

Numa imagem sugestiva, poderiamos dizer que a situação do núcleo, em relação ao acesso de corpúsculo positivo é semelhante á de um objetivo militar que estivesse situado no fundo de uma crátera, existente numa alta montanha. Para atingir tal objetivo, seria necessário lançar os projetis, digamos as granadas de ataque, com uma energia cinética suficiente para que pudessem ultrapassar a crista da montanha, depois do que as granadas cairiam simplesmente dentro da crátera pela própria ação da fôrça da gravidade.

A experiência mostra não só que a penetração de corpúsculos positivos no núcleo é possível mas até que ela pode ter lugar mesmo quando a energia do corpúsculo atacante é bem menor que a energia correspondente á crista de Gamow da barreira de potencial, o que constitúe um fato de todo paradoxal, e incompreensivel do ponto de vista da mecânica clássica.

Afim de interpretar essa espécie de"transparência da barreira de potencial" aos corpúsculos atacantes, precisamos mais uma vez abandonar nossas concepções clássi-

cas sôbre o comportamento dos corpúsculos nos processos de choque e apelar para os novos conceitos da mecânica ondulatória e da mecânica quântica.

De acordo com esses conceitos, em cada ponto do espaço, a amplitude da onde de fase associada a um corpúsculo, representa a raiz quadrada da probabilidade da presença dêsse corpúsculo no ponto considerado.

Compreende-se assim a possibilidade de interpretar por um processo de resonância ondulatória, um aumento considerável da amplitude da onda de fase no interior do núcleo, o que corresponde á penetração do corpúsculo no núcleo, atravez da barreira de potencial.

uma interpretação análoga póde tambem ser dada para explicar a saída de um corpúsculo do núcleo, e constitue a base da moderna teoria das desintegrações radioativas, desenvolvida sobretudo por Gamow.

XI - A RADIOATIVIDADE ARTIFICIAL

uma outra conquista de inestimável importância no domínio da física nuclear é a descoberta da radioatividade artificial.

Nos processos de transmutação atômica que até aqui mencionamos o que acontece, em geral, é a captura do corpúsculo incidente a emissão subsequente de um outro corpúsculo e a formação de um novo núcleo, diferente do pri-

meiro, porém igualmente estável.

Mas em 1933 uma descoberta de maior importância foi feita na França pelo casal Joliot-Curie, isto é a descoberta de que em certos processos nucleares de transmutação os novos núcleos formados não são estáveis, mas por assim dizer, semi-estáveis, desintegrando-se, espontaneamente, ao fim de um tempo mais ou menos longo, com todas as características dos fenômenos da radioatividade.

A experiência fundamental de Joliot-Curie consistiu em bombardear o núcleo de alumínio com partículas α, o que conduz á captura da partícula com emissão subsequente de um neutron, segundo a reação

$$\boxed{{}^{27}_{13}Al + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{30}_{15}P^{*} + {}^{1}_{0}n \nearrow} \qquad (6)$$

Mas o novo núcleo formado, que é um isótopo de elemento fósforo, é semi estável, e se desintegra expontaneamente, em seguida, com emissão de um "eletron positivo" segundo a reação:

$$\boxed{{}^{30}_{15}P^{*} \rightarrow {}^{30}_{14}Si + {}^{0}_{+1}e \nearrow} \qquad (7)$$

Forma-se então finalmente um núcleo estável de Silicium.

O estudo da variação da intensidade da emissão de positrons em função do tempo mostrou que essa variação obedecia a uma lei exponencial e que tinha um carater expontâneo não sendo influenciada por fatores externos, o que permitiu concluir que o isótopo do fósforo $^{30}_{15}P$ se comportava como um verdadeiro elemento radioativo, tendo um periodo de semi-desintegração de 3 minutos e 15 segundos.

Foi êste o primeiro radio-elemento artificialmente produzido num laboratório.

um desenvolvimento extraordinário na técnica da produção de rádio-elementos artificiais deveria porém resultar da aplicação dos "neutrons" como agentes de transmutação nuclear.

Até então, com efeito só haviam sido utilisados como projetis para atacar os núcleos, corpúsculos dotados de carga positiva (part. α, protons, deuterons etc) os quais deveriam portanto vencer previamente a forte repulsão elétrica representada pela barreira de potencial o que diminuia de muito a probabilidade de uma penetração do corpúsculo no núcleo.

Os neutros, ao contrário, sendo desprovidos de carga elétrica apresentavam-se como corpúsculos particularmente aptos para penetrarem mesmo nos núcleos atômicos de maior carga positiva, isto é nos núcleos dos elementos pesados, e provocarem aí novos tipos de transmutação.

Nesse sentido desenvolveu-se toda uma série de pesquisas levadas a efeito desde (1934) por Fermi e seus colaboradores, na universidade de Roma, das quais resultou a obtenção de um grande número de novos radio-elementos artificiais.

um exemplo particularmente interessante de processos dêsse tipo é o da produção de um rádio-fósforo, resultante da ação dos neutrons sôbre o núcleo do enxofre:

$$\boxed{{}^{32}_{16}S + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{32}_{15}P^{*} + {}^{1}_{1}H \nearrow} \qquad (8)$$

O isótopo do enxofre assim formado ${}^{32}_{15}P^{*}$ é semi-estável e se desintegra espontaneamente com emissão de negatrons segundo a reação.

$$\boxed{{}^{32}_{15}P^{*} \longrightarrow {}^{32}_{16}S + {}^{0}_{-1}e \nearrow} \qquad (9)$$

reconstituindo-se desta forma o primitivo núcleo do enxofre.

Êsse radioelemento apresenta duas características importantes: a primeira é o seu longo período de semi-desintegração que é de cerca de 15 dias, o que torna possível pensar na sua utilisação para fins práticos, uma vez que seja possível produzi-lo em quantidades apreciáveis.

Outra característica é a de que ele se desintegra com emissão de eletrons negativos, e portanto em condições que mais se assemelham ás dos radio-elementos naturais.

Os trabalhos do grupo de Fermi, conduziram ainda á descoberta de um novo fenömeno, denominado "efeito Fermi", isto é, ao aumento considerável do rendimento dos processos nucleares pela utilização de "neutrons lentos", isto é neutrons que tendo atravessado previamente substancias hidrogenadas (ricas em protons) (água, parafina, etc.) apresentam energia cinética muito pequena.

Tais corpúsculos assim "retardados" revelaram-se, paradoxalmente, muito mais eficazes do que os neutrons rápidos, para a produção de modificações nucleares, como si a maior lentidão de seus movimentos aumentasse as probabilidades de suas interações com os núcleos.

XII - OS PROGRESSOS DA TÉCNICA DAS REAÇÕES NUCLEARES

A primeira questão que imediatamente nos ocorre em face dessas extraordinárias descobertas é a da possibilidade de serem esses novos radio-elementos artificiais produzidos em quantidades suficientes para que possam ser utilisados p.ex. na prática da radiumterapia, tal como os radio-elementos naturais.

Para responder a essa pergunta é necessá-

rio dar algumas indicações prévias sobre os mais recentes desenvolvimentos da técnica das transmutações nucleares.

O emprego nas reações nucleares de corpúsculos produzidos pelas substâncias radioativas naturais, quer diretamente (particulas α) quer indiretamente (p.ex) neutrons obtidos pela ação dessas particulas α sôbre o Berilium) apresenta uma limitação essencial no fato de que não é possivel obter fontes dêsses corpúsculos de intensidade tão grande quanto quisermos, pois os radio-elementos naturais ocorrem em quantidades extraordinariamente pequenas na superficie da Terra. Basta dizer que no intervalo de cerca de 40 anos decorrido até hoje desde a descoberta do Radium, a quantidade total dêsse elemento extraido em todo o mundo não chega a atingir um quilograma.

Daí a importância da utilização de corpúsculos positivos acelerados artificialmente por meio de campos elétricos auxiliares, cuja primeira realisação foi feita, como vimos por Cockroft e Walton em 1932.

Afim de comunicar a tais corpúsculos as energias necessárias para que êles possam ser eficazes como projetís contra o núcleo era necessário porem o emprego de campos elétricos contínuos de grande intensidade com diferenças de potencial da ordem de alguns milhões de volts.

O maior gerador eletrostático do tipo Van de Graaf, construido nos Estados Unidos, permitia obter uma

tensão de 5 milhões de volts, porém com uma corrente apenas de 3 a 4 milésimos de ampère.

Tais aparelhagens, no entanto, são extremamente caras e dificeis de realisar, e só laboratórios de pesquisa excepcionalmente bem dotadas de recursos materiais podem se abalançar a tais empreendimentos. Além do mais essa técnica apresenta tambem uma limitação resultante da impossibilidade de se realisarem praticamente tensões elétricas muito maiores do que as até aqui obtidas, em consequência das dificuldades de isolamento, limitação essa a que se deve acrescentar a dificuldade de obter, sob essas tensões, correntes de intensidades apreciável, a não ser com o emprego de potencias extremamente elevadas.

XIII - O CICLOTRON

Por todos êsses motivos um passo á frente considerável foi dado recentemente nos Estados Unidos, com a invenção de um aparelho denominado "ciclotron", imaginado e construido pelos Professores Lawrence e Livingston da universidade de Princéton em 1936.

Tal aparêlho baseia-se em um princípio novo cuja idéa fundamental é a seguinte:

Em vez de se aplicar imediatamente e de uma só vez ao corpúsculo positivo, uma tensão elétrica considerável, aplicam-se-lhe, ao contrário sucessivos impulsos, de

tensão relativamente baixa (apenas alguns milhares de volts) de modo que finalmente se obtenha uma aceleração total e portanto uma energia cinética suficientemente grande.

Para isso o corpúsculo é submetido á ação de um campo magnético intenso que encurva a sua trajetória e os impulsos de tensão sucessivamente comunicados, quando o corpúsculo passa por pontos da trajetória diametralmente opostos, podem ser obtidos por meio de uma dif. de potencial alternativa de alta frequência. Sob a ação dêsses impulsos a velocidade do corpúsculo vai aumentando progressivamente, assim como o raio de curvatura da sua trajetória que adquire forma semelhante á de uma espiral plana.

Para que se possa ter uma idéa do progresso que representa essa nova técnica basta dizer que no ciclotron construido pelo Prof. Lawrence em 1937 foi possivel produzir um fluxo de particular artificiais (isto é nucleos de Helium , acelerados artificialmente) com energia cinética de 12 M.E.V. (1 vez e meio maior do que a energia das partículas α naturais mais rápidas (8 M.E.V.)., e, o que é ainda mais importante, com uma intensidade (nº de partículas por segundo) algumas mil vezes maior do que aquelas que podem ser obtidas com os preparados rádio-ativos usuais.

utilisando a ação de " "Deuterons", artificialmente acelerados por meio do "ciclotron" sôbre o "Berilium" podem-se obter tambem "neutrons" segundo a reação

$$\boxed{{}^{9}_{4}Be + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{10}_{5}Bo + {}^{1}_{0}n \nearrow} \qquad (10)$$

Por êsse processo foi possível ao Prof. Lawrence realisar uma "fonte artificial de neutrons" de intensidade equivalente a que só se poderia obter, pelos processos usuais, si se dispusesse de um preparado radioativo contendo 10 quilogramas de Radium.

Com essa fonte de neutrons tornou-se possivel a produção de radio-elementos artificiais não apenas na escala atômica, mas já em escala, digamos assim, química.

Dentre as duas centenas de isótopos radioativos artificiais, até hoje conhecidos, um dos que tem apresentado maior interesse, do ponto de vista das suas aplicações técnicas e terapeuticas, é o isótopo radioativo do Sodium ${}^{24}_{11}Na$, cujo periodo de semi-desintegração é de cerca de 15 horas e que emite radiações β e γ semelhantes às dos radio-elementos naturais.

Por meio do "ciclotron" já tem sido possivel fabricar preparações dêsse "sodium radioativo" permitindo obter radiação γ correspondente em intensidade á de um preparado que contivesse 1 grama de Radium, o que representa um resultado notável pois os preparados usuais empregados na terapeutica teem apenas de algumas dezenas a algumas centenas de miligramas de Radium.

Esta parece ser de fato a primeira conquista alcançada pela física nuclear, no domínio das realisações práticas.

XIV - O APROVEITAMENTO DA ENERGIA ATÔMICA

Chegamos finalmente a uma das questões mais fascinantes da física contemporanea, isto é a da possibilidade da libertação e do aproveitamento das extraordinárias reservas de energia armazenadas no interior dos átomos.

Para tratarmos cientificamente dêsse problema devemos pôr de lado a imaginação e a fantasia e examiná-lo á fria luz dos atuais conhecimento sôbre os processos nucleares e sôbre as quantidades de energia postas em jogo nêsses processos.

Antes de mais nada devemos precisar aquilo que se deve entender por energia atômica.

Com efeito, si com essa expressão quisermos, significar a quantidade de energia que, de acordo com a teoria da relatividade é equivalente á massa mecânica total dos corpúsculos que constituem o átomo, então nos encontraremos deante de valores extraordinariamente elevados pois, feito o cálculo, pela fórmula de equivalência, verifica-se facilmente que 1 massa de 1 Kg de matéria ao se transformar integralmente em energia, daria origem a cerca de 7,5 bilhões de K.W.H.

Para que se tenha um termo de comparação

basta dizer que 1 Kg de carvão comum fornece, pelo processo químico da combustão apenas cerca de 9 K.W.H.

Mas uma tal transformação está inteiramente fóra das cogitações científicas. Com efeito o único processo conhecido em que se observa essa transformação integral da massa em energia é a inter-ação "positron-negatron" a que já nos referimos, mas o positron não existe no estado livre na natureza, o processo que lhe dá origem é extremamente raro e êsse corpúsculo tem uma "vida média " extraordinariamente curta, não sendo pois possível pensar em utilisa-lo, digamos assim, como um "combustivel corpuscular" para a produção de energia.

Poder-se-ia tambem entender como energia atômica a que é libertada no processo de formação hipotética dos núcleos atômicos, partindo da reunião de protons e neutrons, pois o cálculo dos "deficits de massa" e a estabilidade dos núcleos mostram que êsse processo deve ser fortemente exo-energético, (o que encontra uma analogia nos processos químicos de formação das moléculas mais estáveis, que são fortemente exo-térmicos).

Assim por exemplo na formação de cada núcleo de Helium, pela reunião de 2 protons e 2 neutrons, a quantidade de energia libertada seria de 28 milhões de eletron-volts.

Como termo de comparação basta dizer que a energia calorífica libertada no processo químico da combustão, corresponde, para cada átomo de carbono, apenas a 4 eletron volts.

Mas a possibilidade de utilisar "neutrons" e "protons" para a formação direta de núcleos atômicos, está tambem fóra de qualquer cogitação no estado atual da ciência, pela simples razão de que os "neutrons" tambem não existem na natureza no estado livre, e embora cerca da metade da massa total da matéria existente no mundo seja constituida por "neutrons", êles já estão todos "nuclearmente combinados" com os protons e só poderiam ser separados pelo emprego de uma energia, pelo menos igual áquela que se pretenderia obter.

Encontramo-nos, nêsse particular em condições semelhantes áquelas em que estariam os para aproveitar a energia química de combustão do carbono si todo o carbono da Terra estivesse já combinado com o oxigenio sob a forma de CO_2).

Mas ainda ha uma terceira hipótese a examinar, isto é a da possibilidade de utilisar a energia libertada no processo de formação de núcleos dotados de grande energia de coesão partindo da interação de núcleos com menor energia de coesão, pois num tal processo, a sobra de energia se encontra em geral, sob a forma de energia cinética dos novos núcleos formados.

É o caso por exemplo, da formação de partículas α partindo da interação de protons com os núcleos de elemento Litium, segundo a reação de Cokroft e Walton a que já nos referimos.

$$\boxed{{}^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He \nearrow + {}^{4}_{2}He \nearrow} \quad (2)$$

Já vimos que a energia libertada nêsse processo se é de 17 milhões de eletron-volts para cada átomo de Litium, e se encontra sob a forma de energia cinética das partículas α formadas.

Mas para que um tal processo pudesse ser utilisado para produção de energia seria necessário realisar as condições para que êle se pudesse entreter espontaneamente, assim como para utilisar o calor de combustão é preciso realisar as condições para que a reação química, uma vez iniciada, prosiga, á custa da própria energia libertada na combustão.

Assim, a energia libertada, digamos, na primeira transmutação nuclear de um átomo deveria poder dar origem a novas transmutações da mesma espécie até que a reação atingisse a totalidade dos átomos presentes na operação.

Poderia por exemplo acontecer que as partículas α formadas, chocando-se com os protons existentes

na matéria pudesem comunicar-lhes energia suficiente para realisar novas transmutações.

Infelizmente porem tal não acontece pelas razões seguintes:

Primeiramente, como os núcleos estão envolvidos pelos eletrons que formam a estrutura exterior do átomo, as particulas α consomem toda a sua energia em processos de ionisação chocando-se com esses eletrons e é muito pequena a probabilidade de que se venham a chocar eficazmente com os protons.

Em segundo lugar, mesmo que tais choques primários se realisassem, dado o carater extremamente lacunar do átomo e a forte repulsão eletrostática dos núcleos,é tambem pequeníssima a probabilidade de choque dos protons assim eventualmente acelerados, com os núcleos do Litium.

O cálculo dessas probabilidades mostra que as condições são semelhantes áquelas em que nos encontrariamos si pretendessemos queimar e entreter a combustão de 1 Kg de carvão pulverisado, misturado com um quilometro cúbico de areia.

Uma observação importante porém deve ser feita; êsse raciocínio tão lógico quanto desanimador, baseia-se no fato de que se trata de um processo nuclear produzido por corpúsculos positivos, dando origem tambem a corpúsculos positivos, cujas probabilidades de encontro com os núcleos atômicos são sempre muito pequenas.

Si porém fôsse descoberta uma reação nuclear exo-energética provocada por exemplo por neutrons e dando origem tambem á produção de neutrons, talvez fosse possivel realisar praticamente as condições necessárias para "entreter" espontaneamente uma tal reação.

XV - A SCISÃO OU "FISSION", DOS NUCLEOS PESADOS

Ora essas condições parecem, pelo menos em parte, possiveis de realisação, do ponto de vista científico, graças á descoberta feita em começos de 1939, pelo químico Hahn e seus colaboradores, de um grupo de reações nucleares do tipo acima indicado e que hoje se denominam processos de "fission", isto é de "scisão" dos núcleos de elementos pesados, e, em particular do núcleo de Uranium, sob a ação dos "neutrons".

Hahn foi levado a essa descoberta, proseguindo os trabalhos iniciados por Fermi sôbre a ação de neutrons sôbre os núcleos dos últimos elementos, da classificação periódica, o que de início parecia autorisar a suposição de que se formassem em tais processos elementos de número atômico mais elevado, isto é os chamados "elementos transuranianos".

Retomando o problema da identificação dos novos elementos formados nesses processos, Hahhn e seus colaboradores chegaram á conclusão de que em alguns dêsses pro -

cessos ocorria o fracionamento do primitivo núcleo em duas partes principais de massas aproximadamente iguais.

Êsse fato constituia uma novidade no domínio das reações nucleares, pois em geral, os novos núcleos formados em tais reações teem massas e números atômicos pouco diferentes das massas e números atômicos dos núcleos primitivos.

Do ponto de vista da teoria dos núcleos um tal processo deveria ser acompanhado de uma grande libertação de energia, o que foi logo depois confirmado por determinações experimentais realisados por Frisch, na Áustria, verificando que a energia cinética total dos novos núcleos formados era de cerca de 200 milhões de eletron-volts, o que constituia um récord, surpreendente, em relação ás energias até então observadas nos processos nucleares mais exo - energéticos.

mas a circunstância mais importante , do ponto de vista que nos ocupa, é o fato de que êsses processos de "fission", sendo produzidos pela ação de neutrons lentos, davam por sua vez origem á produção de neutrons rápi - dos.

Tal circunstância era de molde a tornar possivel a realisação das condições necessárias não só para entreter espontaneamente a reação, como ainda para realisar

um mecanismo destinado a sua auto-regulação, o que é de grande importância, do ponto de vista do aproveitamento energia libertada.

Com efeito, pela mistura do uranium com substâncias hidrogenadas, por exemplo a água, os neutrons rápidos resultantes da reação, poderiam ser retardados, tornando-se assim mais eficazes e dando origem a novas reações do mesmo tipo, e assim sucessivamente, com desenvolvimento de grandes quantidades de energia.

Essa energia, transformada em calor volatilisando a água, reduziria a ação retardadora desta última sôbre os neutrons que se tornariam de novo menos eficazes, diminuindo assim a produção total de energia.

Parecia pois estarem realisadas, pelo menos teoricamente, as condições ideais para a libertação e o aproveitamento da energia nuclear.

Acontece, porém, infelizmente, ou felizmente, talvez, que o rendimento dêsse tipo de reação só é suficientemente elevado quando o processo de "fission" se realiza com o núcleo de um dos isótopos do uranium, o $^{235}_{92}U$, o qual existe associado ao uranium comum em proporção extremamente pequena.

Ao se iniciar a presente guerra, era êste um dos problemas que absorviam a atenção dos investigadores da física nuclear em todo o mundo. Novas determinações expe-

rimentais do balanço de energia da reação foram feitos nos Estados Unidos, confirmando plenamente os primeiros resultados, e as pesquisas se orientavam tambem no sentido de encontrar um método prático para separação de isótopos que permitisse obter o uranium 235 em quantidades suficientes para a experimentação do processo de "fission" em maior escala.

XVI - CONCLUSÃO

Ainda é difícil dizer o que de positivo se pode esperar das investigações até aqui realisadas nêsse sentido.

O cálculo revela porém valores impressionantes para potência destruidora que representaria a libertação, em um tempo muito curto, de quantidades de energia incomparavelmente maiores do que aquelas de que podemos dispor até hoje pela utilização de processos puramente químicos.

Essa possibilidade, de consequências catastróficas tem levado um certo temor aos espíritos mais ponderados, pela ante-visão do que poderia representar para a cultura e para a civilização a posse de semelhantes meios de destruição e de morte.

Com efeito, a ciência nada nos diz sôbre a finalidade das ações humanas. Ela nos ensina apenas que certa dose de uma substância produz a cura de uma enfermidade e que tal outra dose produz a morte do paciente, mas a

utilização dêsse conhecimento para um ou outro dêsses objetivos está condicionada a imperativos de uma outra ordem, que escapa por completo aos limites próprios da Ciência.

É na ordem dos valores morais, na hierarquia dos valores espirituais, no domínio das concepções religiosas sobre as finalidades da vida e do homem que se encontra a resposta para essas perguntas.

Dificilmente poderiamos encarar com otimismo essa questão, nos tempos presentes.

Não nos devemos esquecer porém de que a essa capacidade de destruir, no domínio das realidades materiais, que é cada vez mais ampliada pelos progressos da ciência e da técnica, sempre se sobrepõe a capacidade superior de escolher entre o bem e o mal, escolha essa que constitue o fundo do drama de cada consciência, de cada cultura e de cada civilisação.

Para concluir desejamos apenas externar uma reflexão que nos é sugerida pelo tema que nesta aula inaugural acabamos de desenvolver.

Ao espetáculo confrangedor que nos apresenta o mundo contemporaneo, onde assistimos a uma luta sem paralelo na história da Terra, e em que vemos os homens, esquecidos dos principios fundamentais da fraternidade e da caridade cristã, se entredestruirem numa avalanche de morte, seja-nos permitido contrapor o espetáculo do labor silencioso

e fecundo dêsses cientistas e investigadores em todo o mundo, homens de várias raças, de diferentes nações, de diversos credos políticos e sociais, que acabamos de contemplar fraternalmente unidos numa outra luta, não porem de destruição e de morte mas de construção continua e renovadora, para ampliar e enriquecer cada vez mais, pelos valores imperecíveis do espírito, o patrimônio cultural da civilização.

Rio, 16-3-1942.