

6. ELECTRÓNICA

O BETATRÃO

O betatrão é um aparelho destinado a produzir raios beta — o que justifica o seu nome — possuidores de grande energia, que recebendo um feixe de raios catódicos acelera os electrões que o constituem, animando-os de velocidades que chegam a valores muito próximos da velocidade da luz. É portanto um acelerador de partículas. Como se sabe, um electrão devido à sua massa e à sua carga eléctrica quando sujeito a um campo eléctrico, desloca-se com velocidade tanto maior quanto maior for a diferença de potencial a que está submetido; como exemplo diremos que um electrão partindo do repouso à superfície da Terra, se sob a acção de uma diferença de potencial de um microvolt, no sentido da vertical adquiriria a velocidade de 600 m/s que lhe permitiria ser projectado à altura de 18 km se o lançamento se fizesse no vácuo e se a Terra fosse desprovida de campo magnético.

Os primeiros passos para a aceleração de partículas foram dadas há mais de 20 anos, mas resultados práticos só foram obtidos quando Lawrence e Livingston da Universidade de Berkeley (Califórnia) apresentaram o primeiro ciclotrão. Rápido se reconheceu a vantagem do seu emprego no bombardeamento dos elementos por meio de protões e deutões acelerados, dando origem aos radio-elementos artificiais; assim, há notícia de que um ciclotrão que já existia em 1940 e cujo electroimã pesava 4000 toneladas, produzia por dia uma quantidade de rádio-sódio equivalente, em radiação gama, a 100mg de rádio.

O estudo teórico do ciclotrão faz concluir, com facilidade, que o aumento relativista da massa de uma partícula sujeita a grandes velocidades torna enormemente difícil a utilização do ciclotrão para tais partículas; dada a razão entre a massa do protão e a massa do electrão, para uma mesma energia, a velocidade do electrão é muito superior à velo-

cidade do protão e então os aumentos relativistas da massa do electrão tornam-se já apreciáveis em energias da ordem de 500keV. Por este facto não convém os ciclotrões para fornecer grandes energias aos electrões.

É a D. Kerst que se deve o betatrão com a sua forma utilizável em cujo estudo teórico teve a colaboração de R. Serber.

Nos fins ds primeiro quartel deste século ou começos do actual surgiram os primeiros trabalhos de J. Slepian em que se propunha acelerar electrões fazendo-os girar em torno de um núcleo sofrendo a acção dum campo magnético variável. A seguir G. Breit e M. Tuve dos Serviços do Magnetismo Terrestre de Washington apresentaram um modelo diferente cujas principais características residiam em dois solenoides coaxiais nos quais se produziam variações rápidas do campo magnético pela descarga de um condensador. Em 1927/28 o norueguês R. Widerøe modificou com grande resultado o dispositivo de Slepian utilizando um acelerador electrostático linear para dar aos electrões energia conveniente, entrando a seguir numa câmara de vácuo que estava situada entre as massas polares dum electroimã; embora aqui já se obtivessem progressos (foi Widerøe o primeiro a estabelecer a equação do betatrão), por algumas razões, entre elas o lento aumento do campo magnético, os electrões eram afastados da órbita conveniente ao cabo de poucas voltas na câmara.

Pouco tempo depois, por sugestões de Lord Rutherford, E. Walton, no Laboratório de Cavendish, estudou o problema da aceleração de electrões, confirmando a equação do betatrão obtida por Widerøe e estabelecendo as condições necessárias para a estabilização da órbita; para obviar aos inconvenientes do aparelho de Widerøe empregou uma bobina com núcleo de ar para obter rapidamente o

aumento do campo magnético, estando a bobina enrolada na câmara de vácuo em ligação com uma bobina indutora que lhe permitia obter o valor máximo do campo magnético no fim de cerca de 10^{-6} s; não deu os resultados desejados por falta das condições indispensáveis para a estabilidade da órbita.

Em 1936 W. Jassinski descreveu um acelerador magnético em que empregava um campo eléctrico focante; a seguir M. Steenbeck tirou a patente de um acelerador em que a focalização era obtida por um campo magnético; pouco se conhece deste acelerador, tendo o autor mencionado que chegou a obter raios X, detectados com um contador de Geiger, com a energia de 1,8 MeV. G. Tenney tirou, em 1940, patente de um acelerador nas condições indicadas por Jassinski. Foi neste ano que Kerst construiu na Universidade de Illinois um «acelerador de indução magnética» e que ficou logo conhecido com o nome de betatrão; trabalhava com uma frequência de 600 c/s e as partículas adquiriam a energia de 23 MeV que permitiam obter raios X equivalentes à radiação γ de 1g de rádio. Alguns meses depois trabalhando com a General Electric Co., em Schenectady, Kerst obteve um betatrão de 20 MeV, com uma frequência de 180 c/s.

Mais tarde, em 1945, W. Westendorf e E. Charlton constroem um grande betatrão de 100 MeV, com a frequência de 60 c/s.

Essencialmente, nos betatrões, os electrões são obrigados a descrever órbitas circulares nas quais são acelerados; há, portanto, a considerar um campo magnético que é o campo guiador e um campo eléctrico que é o campo acelerador. Os electrões são acelerados por tal forma que alcançam velocidades próximas da velocidade da luz, pelo que têm de mover-se em câmaras de vácuo (é suficiente um vácuo da ordem de 10^{-5} mm de mercúrio); as câmaras são de vidro e têm a forma de toros.

É curioso notar que um campo magnético alternado é suficiente para originar o campo guiador e o campo acelerador. Assim o órgão principal é um electroimã, cujo núcleo

tem a forma rectangular, ocupando os eixos das peças polares a mediana relativa aos lados maiores do rectângulo; no entreferro (entre as peças polares) está situado o tubo *T* onde se movem os electrões. Nas bobinas *BB*, envolvendo as peças polares, representadas no corte indicado na fig. 1, circula a corrente

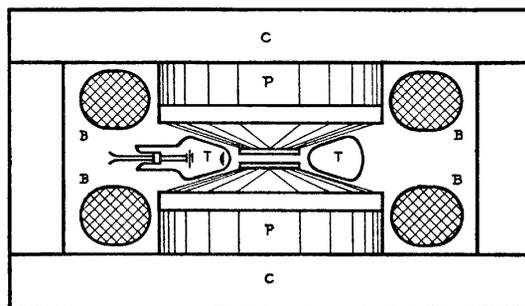


Fig. 1

alternada que produz, o campo magnético alternado entre as peças polares, cujo módulo é crescente apenas num quarto de período pelo que nos primeiros modelos as coisas se dispunham a só haver emissão de electrões no começo do quarto do período em que o campo magnético é crescente e de sentido conveniente a produzir a circulação dos electrões apenas no sentido escolhido a qual só tem lugar durante esse quarto de período.

A circulação da corrente nas bobinas excita o electroimã originando entre as peças polares o campo magnético que é o campo guiador; por sua vez, a variação do fluxo magnético obtido pela excitação do electroimã cria, em qualquer circuito nas suas proximidades, uma força electromotriz induzida que constitui o campo acelerador. A mesma conclusão se obteria se tivéssemos considerado a relação de Maxwell-Faraday que faz corresponder a um campo magnético variável um campo eléctrico de indução.

Considerações teóricas, baseadas na relação existente entre o raio da órbita que um electrão descreve e o campo magnético a que está submetido e na relação entre o campo eléctrico e a derivada do fluxo em ordem ao tempo, obtém-se a chamada equação do betatrão $\Delta H = \Delta\Phi / (2\pi r^2) = \Delta B / 2$, onde r é o raio da órbita do electrão, ΔH , $\Delta\Phi$ e ΔB , respec-

tivamente, as variações do campo magnético, do, fluxo magnético e da indução média (atendendo a que $\Phi = \pi r^2 B$) através a órbita.

A equação anterior mostra que o raio da órbita se manterá constante desde que haja proporcionalidade entre as variações do fluxo e as variações do campo magnético. Vê-se ainda que tanto a variação da velocidade do electrão como o conseqüente aumento relativista da sua massa em nada influem na equação do betatrão o que foi de contagem na resolução do problema que o autor tinha em vista.

Como atrás dissemos, Wideroë, já tinha notado a dificuldade em manter a focalização da órbita dos electrões, isto é, conseguir que os seu raio se mantivesse constante e foi Kerst que resolveu esta dificuldade imaginando, em presença do estudo teórico, o dispositivo necessário para a focalização da órbita; se esta não se fizesse os electrões rapidamente atingiram as paredes do tubo em que se movem, devido ao aumento ou à diminuição do raio da sua órbita, perdendo-se, portanto, o feixe que pretendia obter-se. Sendo os electrões partículas carregadas negativamente o feixe tenderia a dispersar-se por motivo da repulsão entre cargas do mesmo sinal; mas, por outro lado, os electrões em movimento nestas condições podem ser considerados como correntes paralelas e em virtude das leis da electrodinâmica as suas órbitas atrair-se-iam; sucede que estas duas forças se equilibram quando a velocidade dos electrões é próxima da velocidade da luz, mas no período inicial da aceleração é necessário recorrer a forças de focalização que evitem a perda do feixe.

Os desvios da órbita dos electrões podem considerar-se decompostos em duas direcções: uma na direcção do eixo do electroímã e outra segundo o raio da órbita de equilíbrio e previamente escolhida; há, portanto que considerar a focalização axial e a focalização radial; a focalização radial deve ser tal que se um electrão tender a aumentar o raio de sua órbita encontre um campo mais intenso que lhe curve mais a sua trajectória e o com-

trário no caso do raio da órbita tender a diminuir; a focalização axial obtém-se fazendo intervir forças que façam baixar o electrão se ele tende a subir e reciprocamente.

Do facto dos materiais empregados terem susceptibilidades magnéticas desiguais e de atingirem a saturação com valores diferentes do campo magnético, resultou o meio de se

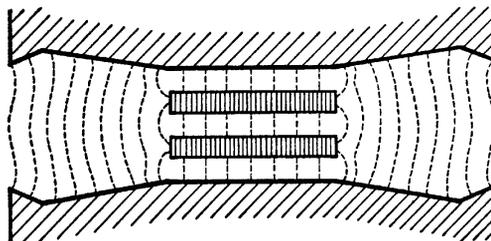


Fig. 2. Campo magnético entre as peças polares com peças centrais no entreferro

obterem as focalizações, conjuntamente com a forma a dar às peças polares e, com a necessidade de, em alguns modelos colocar substâncias convenientes no entreferro.

A teoria mostra que, em determinadas condições, o electrão no seu movimento executa oscilações amortecidas em torno da órbita de equilíbrio, acabando por descrever esta.

Sabido como os electrões são obrigados a percorrer a órbita previamente escolhida e como são acelerados, vamos ver como é lançado no tubo o feixe de electrões e como é utilizado depois de adquirir a energia pretendida.

O lançamento dos electrões no tubo faz-se por meio de um injector a que os americanos chamam, quer neste aparelho quer noutros como o microscópio electrónico, *canhão de electrões*. O produtor de electrões é um fio incandescente que se encontra já dentro do tubo e um pouco afastado da órbita de equilíbrio; pouco depois do campo magnético ter passado pelo valor zero, e enquanto o seu valor é fraco, estabelece-se uma tensão de alguns quilovolts que lança os electrões tangencialmente á órbita de equilíbrio. Para evitar que electrões errantes possam acumular-se na parede interna do tubo, produzindo perturbações na órbita dos electrões, é sobre ela depositada uma fina camada de prata.

No fim do quarto de ciclo, no começo do qual são lançados os electrões, estes adquirem a sua máxima energia por ser neste momento que o campo magnético obteve o seu valor máximo. É então que, fazendo variar a relação entre o fluxo guiador e o fluxo acelerador por meio de um enrolamento apropriado, actuando no momento preciso, que os electrões passam a descrever órbitas espiraladas até atingirem um alvo de tungsténio que em geral está situado na mesma peça que suporta o injectador e por trás dele. No primeiro betatrão o injectador de electrões está situado no exterior da órbita de equilíbrio ao passo que o alvo está no interior da mesma órbita.

Este alvo de tungsténio atingido pelo feixe de electrões animados de grande energia, funciona como o anti-catódio de uma ampola de raios X, tornando-se um emissor de radiação gama muito penetrante.

Os betatrões que primeiramente foram construídos, actuados por corrente alternada, apenas em um quarto de ciclo utilizavam a energia despendida, pois nos três restantes quartos de ciclo estavam inactivos. Têm sido feitas modificações posteriores com o fim de obter maior rendimento.

O primeiro betatrão foi apresentado por Kerst em 1940, como já dissemos. Embora

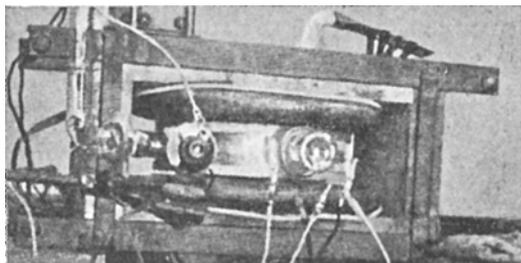


Fig. 3. O betatrão de 2,3 MeV

de dimensões reduzidas — 50 cm de frente, 25 cm de alto e 20 cm de fundo — acelerava electrões de forma a fornecer-lhes a energia de 2,3 M e V, o que permitia, no lapso de tempo de 400 μ s, darem cerca de 10^5 voltas no tubo, percorrendo aproximadamente 45 km, pois o raio da órbita de equilíbrio tinha 7,5 cm. Este betatrão era alimentado pela

energia fornecida por um alternador de 4 kW e 600 c/s acoplado a um motor de corrente contínua. A corrente obtida no alternador era lançada num circuito de duas espiras, uma em torno de cada uma das peças polares, à volta das quais estavam ainda enroladas, em cada uma delas, 10 espiras dum circuito secundário, que produzia o campo acelerador, e que era ressonante por conter em cada um deles 8 condensadores de 5 μ F.

Todo o circuito, magnético foi obtido com lâminas muito finas (com cerca de 0,08 mm de espessura) de aço-silício que nas peças polares eram sobrepostas radialmente com o fim de lhes dar a forma conveniente para a focalização da órbita; em cada topo plano das peças polares estava cimentado dum disco de 5 cm de diâmetro feito com pó de ferro comprimido; a espessura destes discos variava conforme as conveniências.

O tubo onde se aceleravam os electrões era feito de uma única peça de vidro e tinha a forma aproximada de um toro com o diâmetro exterior de 20 cm e interior de 7 cm e 5 cm de altura; os electrões eram fornecidos por um filamento de tungsténio e depois de acelerados iam chocar com um alvo constituído por uma folha de tungsténio de 0,4 mm de espessura, que neste modelo estava situado no interior da órbita de equilíbrio. Com este betatrão obtinham-se raios X fornecendo 0,014 r/min e distância de 1 m do alvo bombardeado pelos electrões.

No betatrão de 20 MeV construído, no ano imediato, no Laboratório de Investigação da General Electric Company, em Schenectady, ainda sob a direcção de Kerst, havia aperfeiçoamentos importantes. Pesava 1,5 toneladas e tinha 150 cm de frente, 90 cm de fundo e 90 cm de altura. A órbita de equilíbrio tinha 19 cm de raio e era percorrida, em menos de 1/4 de período (1,4 milésimo de segundo), cerca de 150000 vezes na qual os electrões percorriam para cima de 280 km. O tubo de vácuo no qual se moviam os electrões foi feito com dois tubos cilíndricos ambos com 4,4 cm de altura, um com o diâmetro de 45 cm e o outro com o diâmetro

de 30 cm, e com dois discos em anel todos de vidro Pyrex ligados com betume apropriado; a camara obtida era prateada interiormente e à parede do cilindro exterior adap-

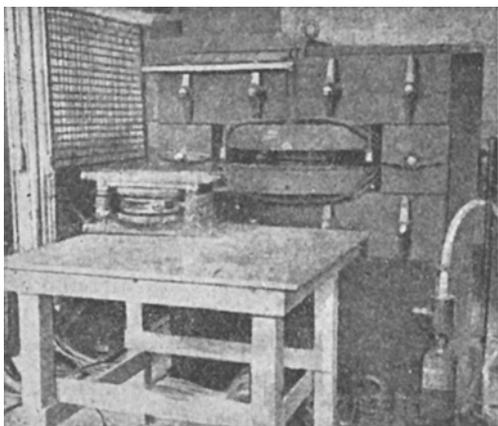


Fig. 4. O betatrão de 2,3 MeV em frente do betatrão de 20 MeV

tavam-se tubos para a extracção do ar, para a instalação do injectore e para a do alvo.

O núcleo do electroímã foi construído com lâminas de 0,35 mm de espessura de aço-silício formando fiadas que ficavam afastadas 3,2 mm umas das outras para a circulação do ar. As peças polares foram obtidas agrupando as lâminas em sectores deixando espaços entre si para a circulação do ar tendo as faces terminais forma análoga às do primeiro betatrão, sendo a ligação dos vários sectores, depois de esmaltados, feita por uma resina especial. Nos primeiros betatrões havia peças centrais colocadas no entreferro como no betatrão de 2,3 MeV; mas nos modelos em que há expansão da órbita, quando os electrões têm o máximo de energia, então o alvo está fora da órbita de equilíbrio e sobre as faces das peças polares estão bobinas de poucas espiras para produzirem a expansão e a compensação.

As bobinas excitadores, tendo cada uma 81 voltas de cabo feito de fios de 1,4 mm, estavam encerradas em caixas de substância isoladora e, em série recebiam corrente de 180 c/s com a intensidade de 106A a 16,5kV; a frequência de 180 c/s era obtida num triplicador de frequência que recebia corrente tri-

física a 60 c/s. Para haver ressonância no circuito secundário as bobinas estavam associadas a uma série de condensadores com a capacidade de 5,5 μ F, circuito este que consumia à potência de 1750 kW, havendo nos condensadores, por libertação de calor, uma perda de 6 kW, pelo que os condensadores eram arrefecidos, por circulação de água. No ferro do electroímã havia uma perda de de potência de 20 kW, sendo o arrefecimento aí produzido por circulação de ar posto em movimento por ventoinhas.

O valor máximo do campo magnético na órbita era de 3600 oersteds havendo uma indução de 10000 gauss nas peças centrais e de 7200 gauss na órbita.

Os momentos de lançamento dos electrões e do choque sobre o alvo eram obtidos por circuitos especiais.

Com o betatrão de 20 MeV conseguiram-se raios X de 16 r/min à distância de 1 m do alvo, equivalente à radiação gama de pouco mais de 1 kg de rádio.

W. F. Westendorp e E. E. Charlton, trabalhando também no Laboratório de Investigação da General Electric Company, construíram, em 1945, um betatrão de 100 M e V. O seu peso é de 130 toneladas e tem as se-

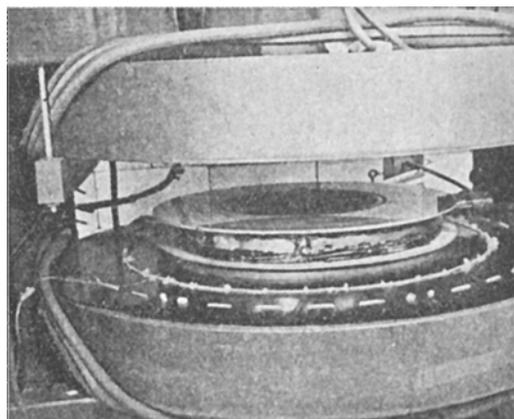


Fig. 5. O tubo entre as peças polares; a peça polar superior está subida

guintes dimensões 4,5 m de frente, 2,8 m de altura e 1,9 m de fundo, e teve de ser instalado em edifício apropriado para defesa dos ocupantes dos edificios vizinhos. Neces-

sita de uma potência de 200 kW e trabalha na frequência de 60 c/s utilizando também apenas um quarto de período (4 milésimos de segundo) na aceleração dos electrões durante o qual estes percorrem a órbita de equilíbrio, com 84 cm, cerca de 250000 vezes efectuando um percurso próximo de 400 km. Dadas

betatrão anterior com as faces planas mais acentuadas, ficando no entreferro, alternando com discos isoladores, peças centrais constituídas por discos nos quais estão implatadas as lâminas de aço cortadas às tiras e dispostas em 16 sectores.

A energia é fornecida por um grupo motor-

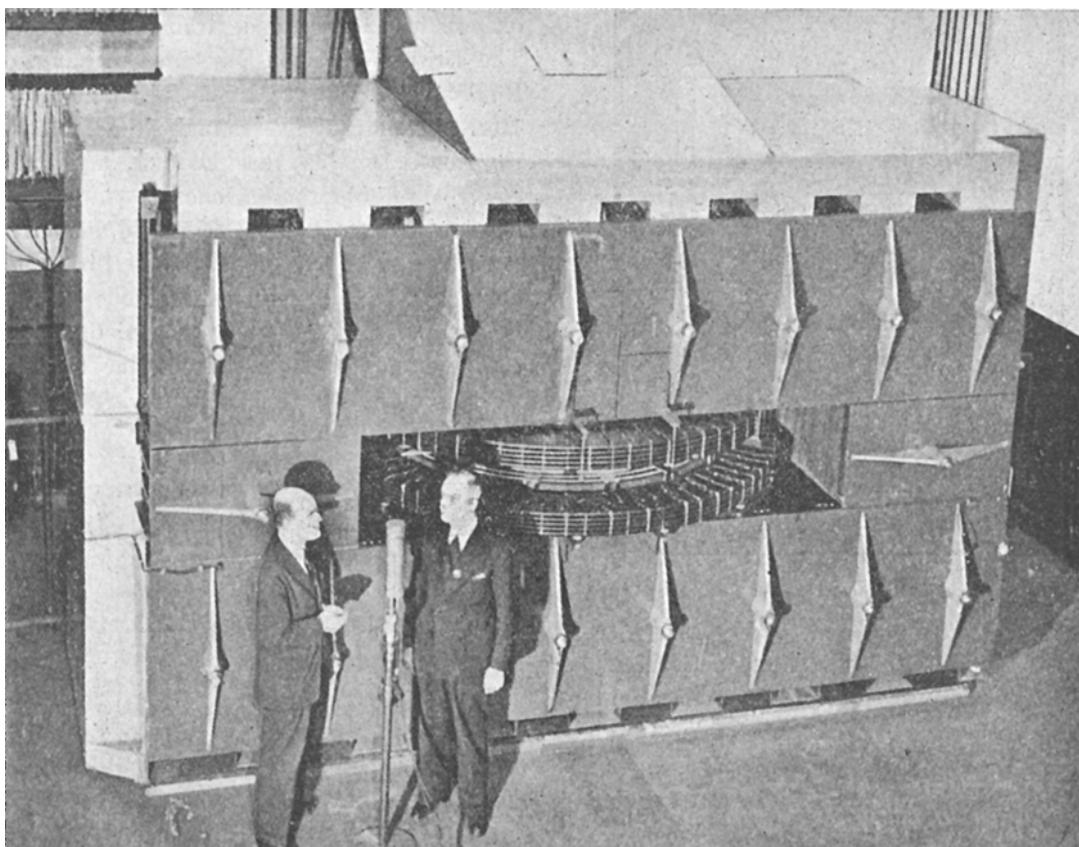


Fig. 6. O betatrão de 100 MeV

as suas dimensões (1,88 m de diâmetro exterior e 1,47 m de diâmetro interior) o tubo que tem a forma de um toro de secção oval, é formado pela junção de 16 sectores que são todos prateados por dentro.

O núcleo do electroímã é construído análogamente ao do betatrão de 20 MeV com lâminas de aço (com 4,5 % de silício) esmaltadas mas com disposições ainda mais apropriadas para a circulação do ar fazer melhor o arrefecimento de todo o aparelho. As peças polares têm configuração análoga às do

-gerador sincronizados e lançada nas bobines (cada uma com 40 voltas de cabo feito de fios, cada um deles isolado para evitar correntes de Foucault por fuga de fluxo) através de séries de condensadores para se obter ressonância no circuito; os condensadores (com a potência de 24000 kW) em número próximo de mil, formam 16 grupos com 60 unidades cada grupo, ligadas em paralelo; a potência perdida nos condensadores é de 80 kW o que obriga a uma circulação forçada de 250 m³ de ar por minuto, cuja tempera-

tura se eleva de 16°C ; a sua instalação está no andar superior àquele em que se encontra o betatrão.

O valor da indução magnética na órbita é de 4000 gauss.

O lançamento dos electrões, feito à tensão de 30 a 70 kV, e a sua projecção sobre o



Fig. 7. O tubo constituído pela junção de 16 sectores e os discos que forma uma das peças polares

alvo fazem-se nos instantes convenientes, utilizando circuitos apropriados, como no betatrão de 20 MeV. No betatrão de 100 MeV pode obter-se o choque com o alvo, antes do fluxo magnético ter atingido o seu, valor máximo permitindo assim obter electrões com energias que vão de 1 a 100 MeV.

O feixe de raios X tem a abertura de 4° quando os electrões têm a energia de 100 MeV e a abertura de 24° quando a energia é de 20 MeV. Para a energia de 100 MeV obtêm-se raios X de 2600 r/min à distância de 1 m do alvo, o que equivale à radiação gama de 180 kg de rádio!

Alguns investigadores reconhecendo que havia muita energia que não era utilizada nestes betatrões (aceleração dos electrões apenas num quarto de ciclo e dissipação de energia sob a forma de calor no núcleo do electroimã e na série de condensadores) pensaram na sua modificação. Assim já Wideröe tra-

balhando na Alemanha, em 1943, planeou um betatrão de 200 MeV em que aproveitava meio ciclo na aceleração pelo que tinha de empregar enrolamentos auxiliares, alimentados com corrente contínua, como compensadores. K. Wilkison, com a sua equipa, começou, em 1945, o estudo de um betatrão a que chamou de «duplo campo» e que foi executado na secção de transformadores de The British Thomson-Houston Company, em Rugby, na Inglaterra e que foi concluído em 1947, encontrando-se actualmente no Laboratório Clarendon, em Oxford, acelerando electrões a obterem a energia de 10 MeV num tubo com cerca de 40 cm de diâmetro e que dava 0,1 r/h à distância de 1 m, tendo como filtro uma lâmina de chumbo de 3 mm de espessura. As inovações consistiam, principalmente, nas peças polares que tinham a forma de anel com o mínimo de superfície nas faces, pouco mais abrangendo que o tubo,

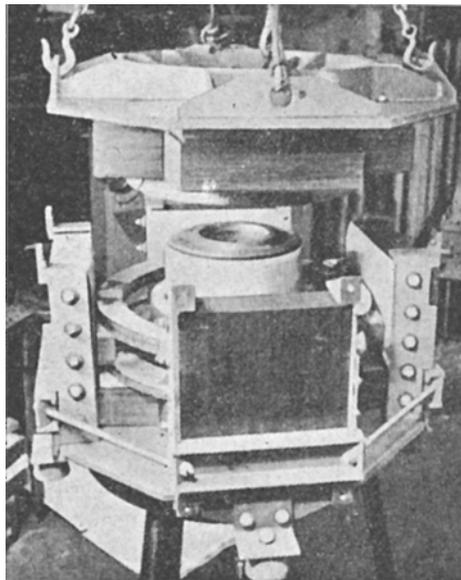


Fig. 8. O betatrão B 20 de 10 Mev da B. T. H.

a poderem assegurar uma constância na órbita de equilíbrio dos electrões e em dois enrolamentos associados em paralelo um interior (com 32 espiras) e outro exterior (com 20 espiras) relativamente às peças polares (fig. 9) cujo estudo foi cuidadosamente feito.

Kerst e Westendorp fazendo a sobreposi-

ção da corrente contínua sobre a corrente alternada e usando também as peças polares em forma de anel conseguiram reduzir em mais de 30 % a energia consumida. Utiliza-

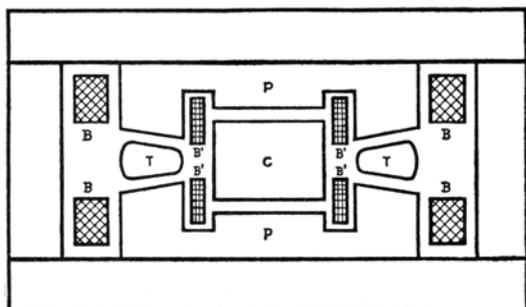


Fig. 9. Esquema do betatrão modificado:
P - peças polares; C - peças centrais;
B - bobines principais;
B' - bobines compensadoras; T - Tubo

vam a aceleração de electrões durante quase meio ciclo. Algumas variantes foram estudadas usando ou não peças centrais podiam assim obter órbitas de raio reduzido nos quais a indução magnética era de 6000 a 8000 gauss o que além de reduzir a potência a utilizar, conduzia a uma economia de material.

As aplicações do betatrão podem, principalmente, ter lugar na radiografia de metais, na terapêutica profunda dos raios X no tratamento do cancro e em investigação na física nuclear. A importância cada vez maior, da radiografia de metais, na metalurgia, confere ao betatrão uma utilização imediata; sa-

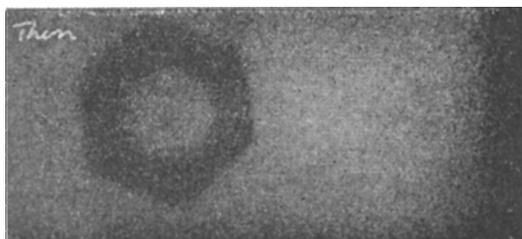


Fig. 10. Radiografia de porca de latão de parafuso de 5/8", obtida, através 1" de chumbo, com B 20 trabalhando a 10 MeV

be-se que, para, o ferro, o coeficiente de absorção da radiação X é mínimo quando a energia correspondente à emissão é de 5 MeV e que cresce muito rapidamente quando a energia diminui a partir deste valor, mas que, para valores superiores, há proporcionalidade

entre as variações do coeficiente de absorção e as variações da energia da radiação, variando aí o coeficiente de absorção muito mais lentamente que a energia; como o feixe de radiação X obtida no betatrão tem, especialmente para as energias mais elevadas, uma pequena abertura, obtêm-se radiografias muito mais nítidas, que as obtidas com as ampolas usuais; são evidentemente necessários tempos de posse muito mais reduzidos.

Em terapia podem os raios de elevada energia ser utilizados directamente e assim podem dispor-se as coisas de forma tal que os electrões, depois de acelerados a obterem a energia conveniente, podem ser dirigidos

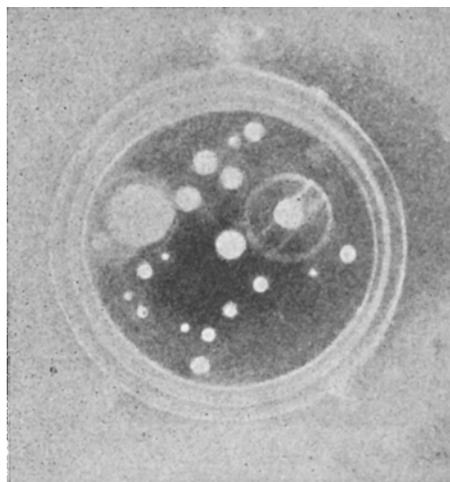


Fig. 11. Radiografia de relógio obtida, através 4 polegadas de aço, com raios X produzidos pelo betatrão de 100 MeV a 6,5 m de distância

sobre o indivíduo que necessita do respectivo tratamento; os electrões com a energia de 20 MeV são capazes de penetrar 10 cm no corpo pelo que podem ser utilizados em vez dos raios X, pois que; enquanto os electrões produzem aí a ionização conveniente, semelhante à que produziria determinada radiação X, a sua acção cessa quase um pouco mais além, o que não sucede aos raios X correspondentes pela sua acção continuar em profundidade. Por outro lado, comparando os efeitos produzidos com os raios X obtidos no betatrão de 20 MeV com os raios X de uma instalação de 400 kV, verifica-se que os

primeiros produzem uma ionização máxima no interior dos tecidos a cerca de 4 cm da pele, quando o anticatódio esteja a 1 m de distância ao passo que com os segundos a ionização é máxima na pele; vê-se, então, que, para uma mesma dose sobre a pele, um órgão à distância de 4 cm pode receber com o betatrão uma dose tripla da que recebia com uma ampola usual de raio X.

As elevadas energias obtidas com os betatões permitem a desintegração dos elementos; com o betatrão de 20 MeV conseguem-se reacções fotonucleares de muitos elementos (a cisão do urânio obtém-se a partir de 7MeV); o betatrão presta-se muito bem para determinar as energias mínimas necessárias para a expulsão de um neutrão do núcleo. G. Baldwin e H. Koch já em 1945 bombardearam, utilizando um betatrão, carbono, azoto, oxigénio, ferro, etc. tendo determinado as condições em que estes elementos se tornavam radioactivos. Tem, pois, o betatrão um papel muito importante em física nuclear.

Antes de terminar não podemos deixar de fazer referência, embora muito ligeiramente, a outros aceleradores de partículas. Depois da citação do ciclotrão, feita no começo, e das considerações que fizemos sobre o betatrão é justo dizer o que é o sincrotrão que, conjuntamente com os outros dois, completa o grupo dos aceleradores magnéticos; aproxima-se mais do betatrão que do ciclotrão e destina-se também à aceleração de electrões. Difere do betatrão em a aceleração ser obtida por um campo eléctrico actuando perifericamente sobre a órbita com uma frequência radiofónica, se bem que este campo só actua quando a velocidade dos electrões seja elevada (correspondente à energia de um megaelectrão-volt), porque até ali um pequeno campo magnético central fá-lo funcionar, de início, como um betatrão. Tornam-se menos dispendiosos que o betatrão para energias superiores a 100 MeV. Há poucos meses foi apresentado, na América, o projecto de um sincrotrão de 10 biliões de electrões-volts, orçado em 450 mil contos!

Existe ainda o sincrociclotrão que é uma

modificação do ciclotrão; para compensar o ganho relativista de massa no sincrociclotrão os *DD* estão submetidos a uma tensão de frequência modulada, o que permite a utilização de uma potência relativamente menor.

Há um outro grupo de aceleradores de partículas: os aceleradores lineares; estes parecem oferecer maior número de vantagens entre as quais se destacam a facilidade de obter os materiais necessários, já desenvolvidos para outros fins e, pelo facto de dispensarem os ímanes, o seu custo crescer mais lentamente com a elevação da energia máxima a fornecer às partículas. Consideram-se neste grupo os aceleradores de ressonância linear (Linear Resonator Accelerator) e os aceleradores guia de onda linear (Linear Waveguide Accelerator).

O grande incremento na construção dos aceleradores de partículas é de tal ordem que quase podemos aferir, pelo seu número, o grau de aperfeiçoamento científico de um país, como, no começo deste século, se podia avaliar do desenvolvimento industrial pelo número de toneladas de ácido sulfúrico que cada país consumia.

No grupo dos países escandinavos, Suécia, Noruega e Dinamarca, devem existir em data próxima cinco ciclotrões e dois betatrões, esperando-se que, dentro em breve a Suécia seja enriquecida com um sincrotrão, que será o quarto do mundo, dispondo de electrões possuindo a energia de 35 MeV.

Quando terão os cientistas portugueses um destes aceleradores de partículas à sua disposição, para que Portugal não fique mergulhado na cauda dos esquecidos países, longe do progresso científico?!

BIBLIOGRAFIA

- (1) WALTON, E. S. — *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **25**, p. 469 (1929).
- (2) LAWRENCE, E. G. and LIVINGSTON, M. S. — *Phys. Rev.*, **40**, p. 19 (1932).
- (3) KERST, D. W. — *Phys. Rev.*, **58**, p. 841 (1940).
- (4) KERST, D. W. — *Phys. Rev.*, **60**, p. 47 (1941).

- (5) KERST, D. W. and SERBER, R. — *Phys. Rev.*, **60**, p. 53 (1941),
- (6) KERST, D. W. — *Rev. Sci. Inst.*, **13**, p. 387 (1942).
- (7) WESTENDORP, W. F. and CHARLTON, E. — *Jour. Appl. Phys.* — **16**, p. 581(1945).
- (8) KERST, D. W. — *Phys. Rev.*, **68**, p. 233 (1945).
- (9) WESTENDORP, W. F. — *Jour. Appl. Phys.*, **16**, p. 657 (1945).
- (10) BALDWIN, G. and KOCH, H. W., — *Phys. Rev.*, **67**, p. 1 (1945).
- (11) MCMILLAN, E. M. — *Phys. Rev.* **68**, p. 143 (1945).
- (12) BALTÁ, J. — *Alfa*, **16 y 17**, p. 32 (1945).
- (13) BOSLEY, W. — *Jour. Sci. Ins.*, **23**, p. 277 (1946).
- (14) WILKINSON, K. — *Res. Lab. B. T. H.* (1948).

J. XAVIER DE BRITO
 PROF. DO LICEU PASSOS MANUEL

7. FÍSICA NUCLEAR

O QUE SÃO E COMO FUNCIONAM AS PILHAS ATÓMICAS

A Física dos nossos dias ressuscitou, para o primeiro plano das actualidades científicas, duas designações do século XVIII: a *máquina electrostática* e a *pilha*. A primeira está magnificamente representada na máquina de Van der Graff; a segunda, na pilha atômica, poderosa fonte de energia de cuja utilização se espera vir a tirar grande proveito.

Originariamente a designação de pilha explicava-se pelo empilhamento dos discos de cobre e de zinco, separados por rodela de pano embebidas em água acidulada, que Volta utilizou na realização do primeiro gerador hidroeléctrico. Na pilha atômica há também, como vamos ver, o empilhamento de certos materiais, o que justifica a designação de pilha.

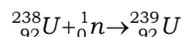
O urânio natural é formado por três tipos de átomos diferentes que podemos representar por U_{234} , U_{235} e U_{238} . Em cada 100.000 átomos de urânio natural existem, em média, 6 do isótopo 234; 700 do 235 e 99294 do 238. O primeiro, que existe em quantidades ínfimas, não tem interesse prático. O segundo e o terceiro, embora aquele em pequena proporção, desempenham importantíssimo papel nas investigações de Física nuclear.

Quando se bombardeia o urânio natural com neutrões e os núcleos dos isótopos conseguem captar alguns, as consequências que resultam dependem do isótopo que fez a captação e da energia cinética do neutrão

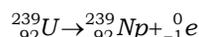
captado. Classifiquemos os neutrões em lentos e rápidos consoante o valor dessa energia. A dos lentos pode descer a valores tão baixos que se equipare à energia cinética das moléculas dos gases à temperatura ordinária e que é da ordem de grandeza de 0,025 electrões-volts. Foi a esta categoria de neutrões lentos que Fermi chamou neutrões térmicos.

Poder-se-ia duvidar que tão fraca energia tivesse algum efeito sobre os núcleos mas, na verdade, quanto mais lento for o neutrão mais tempo gasta a percorrer a vizinhança do núcleo e mais probabilidades tem, portanto, de ser captado. Para os neutrões rápidos a captação é mais difícil em consequência dos violentos choques elásticos que sofrem contra os núcleos.

Os resultados conseguidos experimentalmente resumem-se deste modo: a) quando um núcleo dum isótopo 238 capta um neutrão lento (particularmente se a energia deste vale entre 10 e 100 eV) forma-se o isótopo 239:



que é radioactivo β , de período 23 minutos, originando o neptúnio:



o qual, por sua vez, também é radioactivo β , de período 2,3 dias, originando o plutónio:

