

ACELERADORES E DETETORES DE PARTÍCULAS, UMA INTRODUÇÃO À FÍSICA  
EXPERIMENTAL DE PARTÍCULAS ELEMENTARES

Cláudio Graça

Departamento de Física, Centro de Ciências Naturais e Exatas. UFSM.  
Santa Maria, RS.

## RESUMO

A história do desenvolvimento dos aceleradores de partículas é um dos exemplos clássicos dos avanços científicos atingidos pela ciência moderna. Dos simples aceleradores de Lawrence e Cockroft-Walton cresceram imensos laboratórios de cujo trabalho resultaram muitas das mais importantes descobertas científicas das últimas décadas. As duas linhas de aceleradores hoje existentes, partiram, uma do acelerador linear de J. Cockroft e E.T.S. Walton e resultaram nos imensos aceleradores lineares de hoje, denominados LINAC, cujo exemplo mais citado é o de Stanford com três km de comprimento. A outra escola liderada por E. O. Lawrence, que desenvolveu o ciclotron, resultou nos aceleradores de confinamento magnético, cuja versão moderna resultou em sincrotrons acoplados a anéis de armazenamento e colisão entre dois feixes de partículas. Os aceleradores e detetores descritos neste trabalho já existem há muitas décadas, mas os princípios de seu funcionamento ainda estão sendo aplicados nos aceleradores construídos no presente mesmo que com tecnologias mais modernas como a utilização de supercondutores para os eletroímãs.

## SUMMARY

GRÇA, C.O., PARTICLE ACCELERATORS AND DETECTORS, AN INTRODUCTION TO EXPERIMENTAL PHYSICS OF ELEMENTARY PARTICLES. Ciência e Natura, 14: 105-125, 1992.

The history of particle accelerators is one of the classical examples of the spectacular advances in modern science. From the very modest machines of Lawrence and Cockroft-Walton vast laboratories have grown and many of the most important scientific discoveries in the last decades have been made using huge particle accelerators. Two distinct lines of progress have been followed, one started by J. Cockroft and E.T.S. Walton resulted in linear accelerators. The other school led by later E.O. Lawrence who developed the ciclotron resulted in magnetic confinement machines, whose modern version is the sincrotron with particle storage ring and collider. The devices described, (accelerators and detectors) in this work are dated but the principles they illustrate are still being applied in the most modern machines despite the use of modern technologies like superconductor magnets.

## INTRODUÇÃO

Os aceleradores de partículas, cuja evolução é iniciada a partir de 1930 com o aparecimento do acelerador eletrostático de Cockroft e Walton (1) na Inglaterra e o ciclotron de Lawrence (2) na Califórnia, permitiram o desenvolvimento extraordinário da Física Sub-atômica tornando-se um dos exemplos clássicos do processo científico que caracterizou a evolução das ciências físicas. Tal como Galileu há aproximadamente 400 anos, a realização de experimentos nos gigantescos aceleradores de hoje tem a função de questionar a natureza, forçando-a a dar uma resposta tanto a respeito das dimensões como da estrutura subatômica. Comparando os experimentos de queda livre realizados na Torre de Pisa com os realizados atualmente nos modernos aceleradores de partículas verifica-se que a experimentação foi introduzida de forma definitiva e que todo o desenvolvimento da Física depende da associação entre o pensamento científico e os resultados experimentais.

A indagação mais importante realizada pelos físicos nos primeiros anos deste século se referia à estrutura atômica. Qual é realmente a estrutura do átomo? Essa pergunta que tem sido feita desde os tempos mais remotos pelos filósofos gregos e que se repete até o presente pelos físicos de partículas, começou a ser respondida através de experimentos que muito se assemelham aos realizados nos grandes aceleradores de partículas de hoje. Os aceleradores de partículas não existiam então e para realizar os primeiros estudos sobre a estrutura atômica se utilizaram partículas alfa produzidas por elementos radioativos naturais, especialmente o  $Ra^{226}$ . As partículas alfa, que são ions positivos ao penetrarem em um alvo, por exemplo numa finíssima folha de ouro, mudavam bruscamente de direção, como está mostrado na Figura 1(a). A correlação entre os ângulos de espalhamento e o número de partículas espalhadas mostrou que as mesmas deveriam se chocar com uma estrutura muito pequena,  $10^{-4}$  vezes menor do que o diâmetro do átomo. Os resultados desses experimentos, feitos especialmente por Geiger e Marsden, levaram Ernest Rutherford e Niels Bohr a propor um novo modelo atômico.

Os experimentos de espalhamento de partículas  $\alpha$ , hoje denominados experimentos de Rutherford, foram utilizados para observar o núcleo atômico têm hoje a sua versão moderna para estudar a estrutura dos protons. Para isso são necessárias partículas bem menores e mais energéticas, por exemplo eletrons de 20 GeV. Da mesma maneira que nos experimentos de Rutherford o espalhamento de eletrons a grandes ângulos por protons permitiu mostrar que os mesmos deveriam, à semelhança do atomo, possuir uma estrutura interna de objetos pontuais que hoje denominamos quarks, Figura 1(b). Para realizar esta tarefa foi construído na Califórnia (SLAC) (4), um imenso acelerador

capaz de acelerar elétrons a 20 GeV. Os primeiros experimentos que foram realizados em 1969 tal como os realizados 66 anos antes evidenciaram a estrutura interna do próton, uma partícula até então considerada elementar.

Em Física se designa um objeto como elementar quando não existe maior indicação de que ele possua estrutura interna. Este conceito é no entanto relativo e muda para cada um dos ramos da física. Por exemplo: em algumas áreas da Físico-Química os átomos são elementares e não necessitam de estrutura interna. Na Física Atômica, na

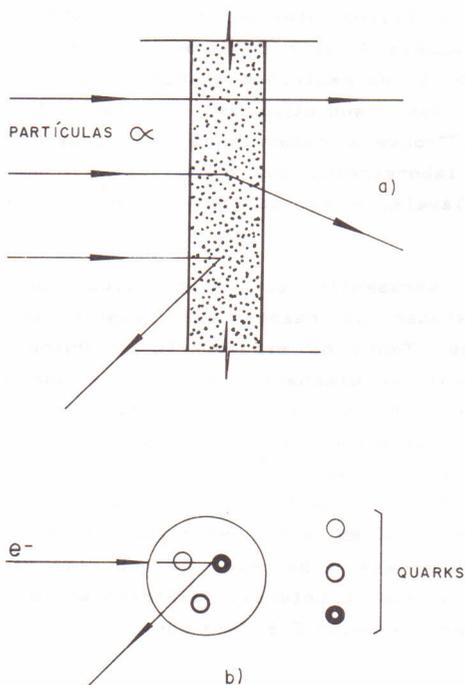


Figura 1. a) Experimento de Rutherford, onde se observam partículas  $\alpha$  espalhadas a grandes ângulos. b) espalhamento de elétrons pela estrutura interna de um próton (os quarks).

qual incluímos todas as áreas da matéria condensada, os átomos não são elementares, em vez disso possuem uma estrutura eletrônica e um núcleo e portanto o núcleo passa a ser uma partícula elementar. Para os físicos nucleares, o interesse na estrutura do núcleo resultou na comprovação da existência de nucleons, os prótons e nêutrons, como partículas elementares. Finalmente, para os físicos de partículas, os nucleons possuem uma estrutura interna e as partículas consideradas, hoje, como elementares são os léptons e os quarks.

A pergunta que se pode fazer neste momento é então: Serão os quarks e léptons realmente partículas elementares? Usando aceleradores como o HERA (4) e o LEP (4) os físicos experimentais estarão aptos a estudar a dinâmica de quarks e elétrons e

verificar se realmente essas partículas possuem uma estrutura interna ou se realmente são elementares. Desta vez as partículas projétil devem analisar estruturas da ordem de  $10^{-17}$  cm e portanto devem possuir uma energia que pode chegar à ordem de TeV.

#### FUNDAMENTOS DO USO DE ACELERADORES DE PARTÍCULAS.

Graças aos estudos realizados com partículas  $\alpha$  e raios cósmicos, muitos êxitos científicos foram obtidos e entre eles destacamos, o modelo nuclear do átomo, a primeira transmutação do átomo, a descoberta do neutron e a produção e descoberta de muitas outras partículas sub-atômicas. Apesar destes resultados extraordinários houve a necessidade de produzir novas partículas aceleradas no laboratório, que possuíssem direção, intensidade e energia controláveis, o que só poderia ser feito por aceleradores de partículas.

Antes de apresentar os vários tipos de aceleradores é importante destacar as razões que levaram ao desenvolvimento dessas máquinas. Tanto no experimento de Rutherford no qual se conseguiram medir as dimensões nucleares e que levou a um novo modelo atômico, como o descobrimento da transmutação de alguns elementos por Rutherford em 1921 se utilizaram partículas  $\alpha$  obtidas de elementos radioativos naturais. É relativamente fácil estimar a energia das partículas  $\alpha$  capazes de interagir com o núcleo atômico pois em ambos experimentos é necessário que a partícula  $\alpha$  ultrapasse a barreira de repulsão elétrica existente entre duas partículas. O potencial elétrico entre uma partícula  $\alpha$  e o núcleo de número atômico Z é dado por:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2 Z}{r}. \quad (1)$$

Uma partícula  $\alpha$  para atingir a superfície de um núcleo atômico deverá portanto possuir uma energia cinética  $E_k$

$$E_k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2 Z}{R}, \quad (2)$$

onde R é o raio do núcleo. Para um núcleo, digamos de  $Z=20$ , cujo raio pode ser calculado pela aproximação de...  $R=R_0 A^{1/3}$  necessitaríamos uma partícula  $\alpha$  que tivesse uma energia cinética de aproximadamente 4 Mev. Este valor nos dá uma idéia do valor da energia necessária para induzir processos nucleares. Vencer esta barreira de potencial foi o primeiro argumento utilizado para a construção de aceleradores de partículas, mas a necessidade de produção de novas partículas como os mesons (5), ou mesmo o

detalhamento da estrutura interna do núcleo foram argumentos muito mais fortes para a pesquisa de aceleradores de altíssima energia.

Dos experimentos do tipo Rutherford se aprendeu que as propriedades da estrutura nuclear poderiam ser mais profundamente estudadas se os feixes de partículas fossem mais intensos e se a energia cinética das partículas projétil fosse maior do que a disponível nas partículas  $\alpha$  dos elementos radioativos naturais. As dificuldades dos primeiros tempos foram relacionadas com a baixíssima intensidade dos feixes de partículas  $\alpha$  e a sua limitação de energia à ordem de alguns MeV. Os aceleradores de partículas disponíveis hoje em dia aceleram partículas eletricamente carregadas, em geral prótons ou elétrons, desde MeV até TeV e os feixes de partículas alcançam valores de  $10^{16}$  partículas/s/mm<sup>2</sup>.

Os aceleradores de partículas são utilizados genericamente para realizar dois tipos de experimentos, produção de novas partículas e novos estados e investigação detalhada da estrutura de sistemas sub-atômicos. Considerando que existem na natureza em forma estável um número pequeno de partículas, (próton, elétron, neutrino e fóton) e também um número limitado de núcleos, que em geral se apresentam no seu estado fundamental, torna-se importante na investigação nuclear, para escapar a essas limitações, a produção de novos estados de forma artificial. Para a criação de um novo estado de massa se exige pelo menos uma quantidade de energia  $E=mc^2$ . No presente não existe limitação teórica para o valor da massa ou estado energético do sistema a ser produzido, portanto aceleradores cada vez mais potentes são em princípio o critério para investigar esses limites.

A necessidade de partículas com energia cinética muito alta também é fundamental na investigação da estrutura sub-atômica. Tanto para investigar o tipo de partículas e a sua distribuição como os detalhes da estrutura, é importante lembrar que a interação entre partículas apresenta um caráter mecânico quântico fundamental. Torna-se portanto importante explorar a relação entre a energia das partículas que interagem num acelerador e as dimensões do sistema sub-atômico a ser investigado. Para isso vamos realizar um exercício instrutivo de mecânica quântica elementar: o comprimento de onda de Broglie de uma partícula cuja quantidade de movimento vale  $p$  é dada por:

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (3)$$

onde  $h$  é a constante de Planck. Em geral em vez de utilizar  $h$  se utiliza  $\hbar$  de Dirac, o comprimento de onda reduzido,  $\lambda$ , que é dado por:

$$\lambda = \frac{h}{2\pi} = \frac{\hbar}{p}. \quad (4)$$

Para observar um objeto de dimensão  $d$  temos que usar uma partícula de comprimento de onda  $\lambda$  que obedeça ao simples critério  $\lambda < d$ , ou seja:

$$p > \frac{\hbar}{d} \quad (4)$$

Como exercício de fixação imaginemos que estejamos utilizando um acelerador de prótons de alta velocidade e que queiramos observar as dimensões do tamanho de hadrons, ou seja  $d = 10^{-16}$  m. Considerando que possamos utilizar a aproximação não relativística, a energia cinética mínima dos prótons deve ser da ordem de:

$$E_k = \frac{p^2}{2m_p} = \frac{\hbar^2}{2m_p \cdot d^2} \approx 20 \text{ MeV}. \quad (5)$$

Neste caso a aproximação não relativística é viável pois a energia cinética vale aproximadamente 2% da energia em repouso do próton (938 MeV).

O desenvolvimento teórico no estudo da estrutura fundamental das partículas levaram Gell-Mann e George Zweig (6) a propor uma nova estrutura para os hadrons (partículas que sofrem a ação de forças nucleares). Para eles os hadrons consistiam na combinação de triádes de quarks. Como consequência da necessidade de investigar dimensões cada vez menores tornou-se necessário a utilização de aceleradores que permitam obter energias da ordem de GeV ou mesmo TeV.

Em princípio a aceleração de uma partícula resulta da força aplicada por um campo elétrico. Na Figura 2 apresentamos o princípio de funcionamento de um acelerador no qual se pode observar que a energia adquirida por uma partícula simplesmente depende do potencial existente entre dois eletrodos, ou seja para controlar a energia da partícula basta controlar o potencial existente entre esses dois eletrodos. Se as partículas forem elétrons, a fonte pode ser um simples filamento incandescente. Quando se tratar de íons positivos então a fonte é um tubo de descarga gasosa de hidrogênio, deutério ou mesmo hélio. Em qualquer caso a extração e aceleração das partículas carregadas é feita por campos elétricos adequados. Na prática o máximo potencial que pode ser utilizado dessa maneira alcança o valor da ordem de alguns MeV. A origem dessa limitação está na formação de arcos voltaicos entre os eletrodos. Para alcançar maiores energias torna-se portanto necessário acelerar as partículas em vários estágios, isto pode ser conseguido colocando vários aceleradores em série, em vez de aumentar a diferença de potencial entre

eletrodos. Assim resulta o tipo de acelerador denominado genericamente de LINAC, ou acelerador linear. A limitação do número de estágios do LINAC (8) e o seu custo fez com que se desenvolvessem aceleradores com uma única cavidade e um campo magnético, que permite que o feixe de partículas confinado nesse campo, possa ser acelerado periodicamente na cavidade por um fonte de RF. Um acelerador construído dessa maneira é denominado de sincrotron. A importância deste acelerador é tal que hoje em dia praticamente todos os grandes projetos são baseados em aceleradores do tipo sincrotron.

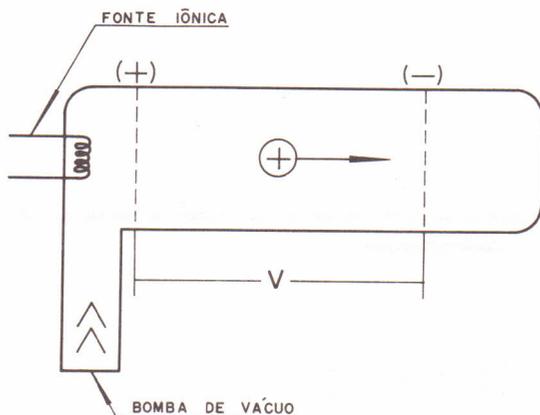


Figura 2. Esquema de funcionamento de um acelerador de partículas.

Apresentamos neste trabalho apenas um esboço dos principais tipos de aceleradores com a finalidade de fornecer subsídios iniciais tanto para alunos como para professores das áreas de Ciências Físicas. Na bibliografia indicada o leitor poderá encontrar em detalhe estes e outros tipos de aceleradores.

#### ACELERADORES DO TIPO COCKROFT-WALTON

Este tipo de acelerador foi o primeiro a ser utilizado e nele um potencial estático é o responsável pela aceleração de ions. O acelerador consta fundamentalmente de uma fonte de alta tensão, uma fonte de ions e uma coluna aceleradora desses ions. Além destes elementos básicos o acelerador possui ainda um sistema de vácuo, um sistema de controle do feixe iônico e um alvo, conforme pode ser observado na Figura 3.

A fonte de alta tensão é formada por um transformador e retificador, cuja tensão é formada por um transformador e retificador, cuja tensão em geral é da ordem de 100 kV até 1 MV.

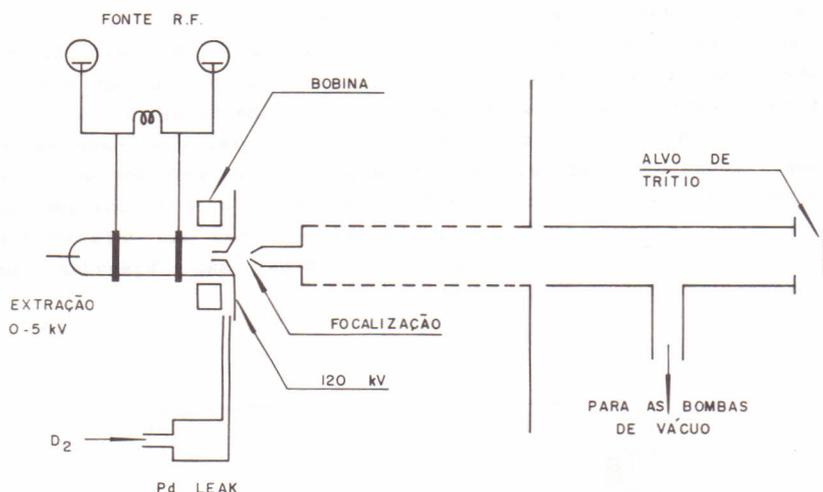


Figura 3. Esquema simplificado de um acelerador de partículas do tipo Cockroft-Walton.

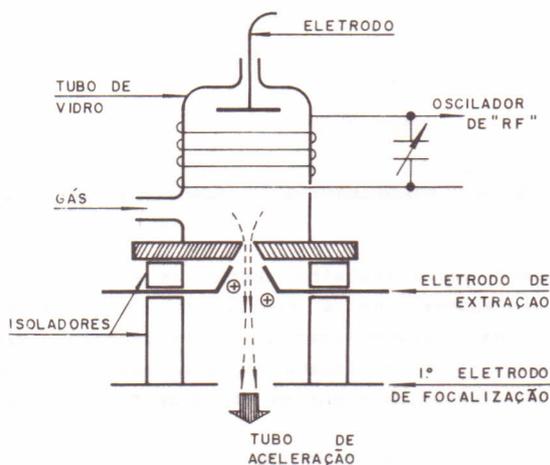


Figura 4. Diagrama esquemático de uma fonte iônica onde a ionização é obtida por um oscilador de RF.

Existem várias formas de retificação e de multiplicação de tensão, sendo o mais simples o retificador de meia onda. Os íons necessários para o acelerador são produzidos em uma fonte iônica de radiofrequência, cuja versão primitiva está esquematizada na Figura 4. Nela um campo eletromagnético produzido por uma bobina produz ionização de um gás contido em um tubo de quartzo. Se

necessitarmos de protons o hidrogênio será o gas utilizado. A coluna de aceleração de ions cujo esquema está na Figura 5 deve desempenhar dois papéis muito importantes, o primeiro é o de acelerar o feixe iônico e o segundo é o de manter o feixe focalizado. Para isso ela possui vários eletrodos em forma de iris, ligados entre si por resistores, usualmente de  $10^3 \text{ M}\Omega$ , de tal maneira que a diferença de potencial entre pares de eletrodos é sempre a mesma. As linhas de campo elétrico que estão mostradas na mesma figura sugerem que as partículas se mantêm em um feixe concentrado e possam incidir sobre uma pequena área do alvo, onde se realiza a reação nuclear desejada.

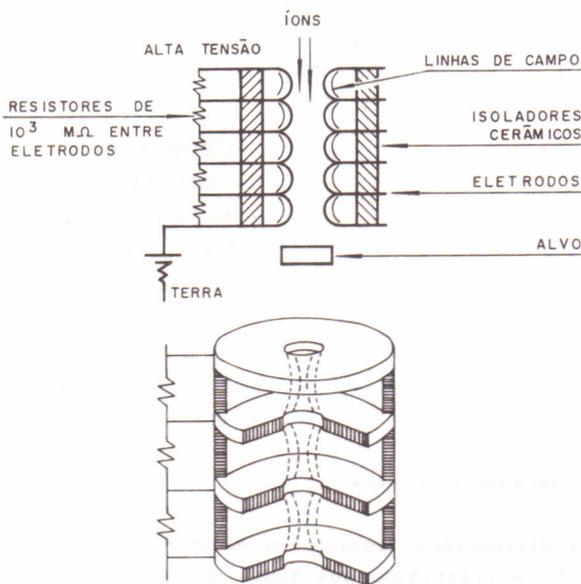


Figura 5. Anéis de aceleração de um acelerador Cockroft-Walton

Um diagrama esquemático do acelerador Cockroft-Walton do Departamento de Física, utilizado como gerador de neutrons, está esquematizado na Figura 6. A única diferença neste caso está na fonte iônica que deve utilizar ions deutério, provenientes da água pesada hidrolisada e do alvo que conterá trítio, podendo portanto realizar a reação nuclear do tipo  $D + T \rightarrow \alpha + n$ .

#### ACELERADORES LINEARES (LINAC).

Conceitualmente, se desejarmos acelerar partículas a altas energias basta multiplicar o número de campos elétricos e colocá-los em série. O LINAC esquematizado na Figura 7 consta de uma

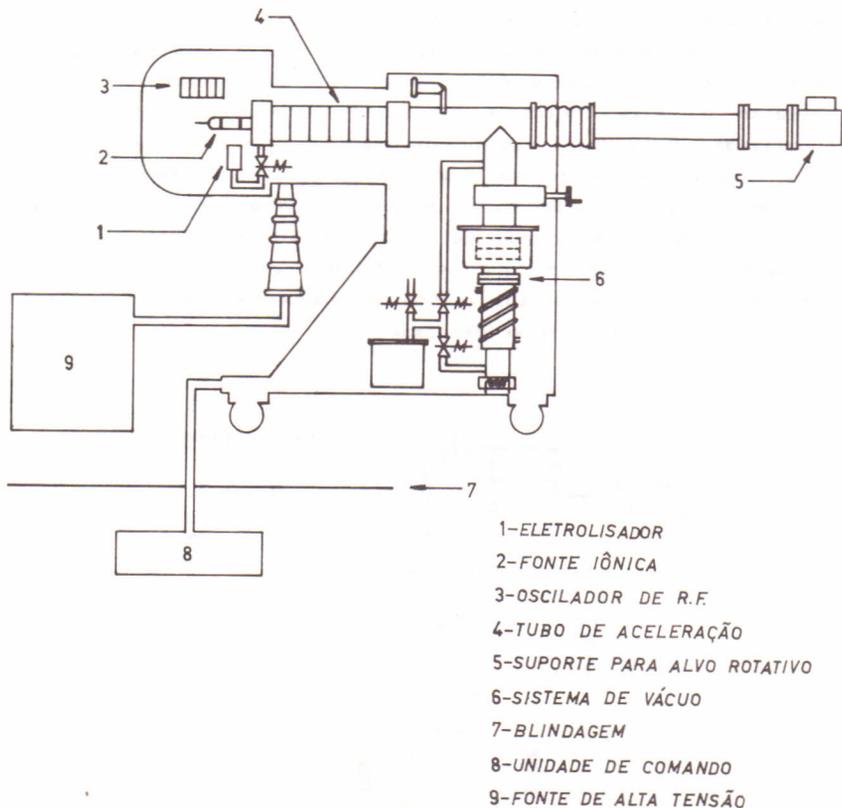


Figura 6. Gerador de nêutrons.

série de tubos cilíndricos, condutores elétricos, conectados a um oscilador de RF. A polaridade dos tubos é alternadamente trocada fazendo com que um íon seja acelerado ao longo do seu eixo. O campo elétrico no interior dos tubos é nulo, portanto a aceleração ocorre no espaço entre os tubos onde o campo elétrico se alterna na frequência do oscilador de RF. Uma partícula de carga elétrica  $q$  ganhará uma energia cinética  $nqV$ , onde  $n$  é o número de pares de tubos e  $V$  a diferença de potencial entre um par de tubos. Como a velocidade dos íons é crescente o comprimento dos tubos também o deve ser para que os íons cada vez que penetram no campo elétrico o façam em fase com o mesmo. Portanto o comprimento dos tubos deve valer  $L = \frac{vT}{2}$  onde  $v$  é a velocidade da partícula e  $T$  o período do oscilador de RF. Supondo que o valor de  $v$  rapidamente se aproxime de  $c$  a velocidade da luz o comprimento  $L$  se aproximará de  $\frac{cT}{2}$ .

Um exemplo importante deste tipo de máquinas é o LINAC construído na Universidade de Stanford, que possui 3 km de

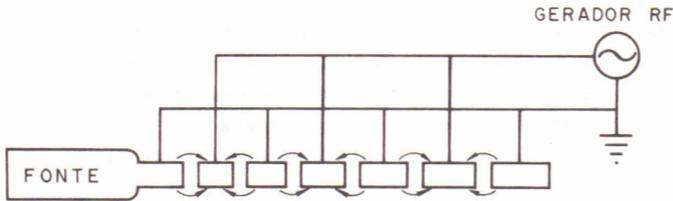


Figura 7. Esquema simplificado de acelerador linear (LINAC).

comprimento e acelera elétrons a 20 GeV. A construção de um acelerador desse tipo envolve inúmeros problemas científicos e tecnológicos, que o leitor poderá encontrar na literatura especializada, no entanto, podemos entender perfeitamente que em acelerador desse tamanho um dos maiores problemas é sem dúvida manter o feixe de íons colimado.

Para manter um feixe iônico colimado se utilizam lentes colimadoras, que analogamente às lentes que fazem convergir e colimam a luz. Para isso se utiliza um campo magnético dipolar, para à semelhança de um prisma desviar o feixe iônico, e um campo magnético quadripolar, ambos mostrados na Figura 8. O campo magnético obtido por cada peça quadripolar colima o feixe segundo um plano, portanto associando dois desses ímans em série com o eixo defasado de  $90^\circ$  se poderá colimar o feixe iônico em dois planos.

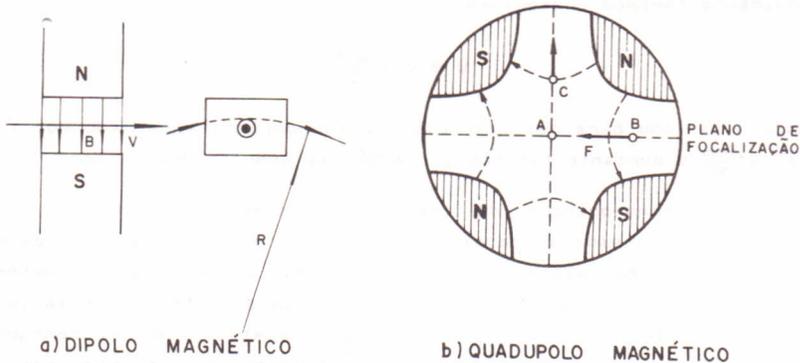


Figura 8. Colimação do feixe iônico em um acelerador de partículas: a) campo dipolar para desvio de partículas. b) lente quadripolar para focalizar o feixe de partículas.

O primeiro ciclotron foi idealizado por E.O. Lawrence e construído por seu estudante de doutorado M.S. Livingston. Os íons eram átomos de hidrogênio ionizados (protons) acelerados por 80 kV. Cada íon é acelerado duas vezes em cada trajetória circular completa e o tamanho desse primeiro acelerador permitia que os íons percorressem pelo menos 40 trajetórias completas. Em 1931 Lawrence por seus resultados com esse protótipo recebeu uma bolsa de US\$500 que lhe permitiu desenvolver tanto o oscilador de RF como um novo eletroímã. Este acelerador é provavelmente o mais conhecido de todos os aceleradores, por ser um dos exemplos clássicos da aplicação do eletromagnetismo e o princípio de seu funcionamento pode ser encontrado em quase todos os livros de eletromagnetismo básico. A história do desenvolvimento do ciclotron de Lawrence é talvez um dos capítulos mais interessantes da física moderna, pois permitiu além dos conhecidos avanços da Física Nuclear e de partículas, o avanço de áreas multidisciplinares com aplicação da Física Nuclear. O laboratório LBL (Lawrence Berkley Laboratory) (8) criado a partir do trabalho de Lawrence permitiu avanços na medicina, biologia, ciência dos materiais física de alta energia.

O ciclotron usa para aceleração das partículas um campo elétrico de alta frequência, enquanto que um campo magnético é utilizado para produzir trajetórias curvas. Quando uma partícula de carga  $q$  e de energia cinética  $E$  se move num plano perpendicular a um campo magnético constante  $B$ , realizará um movimento circular de raio  $R$ , com velocidade angular  $\omega$ . Da equação relativística do movimento teremos o seguinte:

$$B \cdot q \cdot v = \frac{mv^2}{R}, \quad (6)$$

onde o período para realizar uma órbita completa será dado por  $t = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$  e portanto teremos a frequência angular  $\omega$  dada por:

Como consequência do tempo ser independente do raio da trajetória, teremos as partículas sempre em fase com a fonte de RF que cria o campo elétrico, fazendo com que as partículas penetrem na cavidade de RF no instante em que o campo elétrico for máximo. Para velocidades muito baixas a massa relativística se confunde com a massa em repouso e portanto o isocronismo é mantido com um campo  $B$  constante e homogêneo. Por outro lado se for necessário aplicar a correção relativística, é preciso aplicar um campo de RF de menor frequência para corrigir o aumento relativístico de massa. Para contornar este problema foram construídos ciclotrons com campo magnético não homogêneo, para que se mantenha o isocronismo da trajetória.

A Figura 9 mostra o esquema de um ciclotron. A fonte de ions está localizada entre duas peças em forma de D que fazem parte como eletrodos de um oscilador de RF. O conjunto de Des está localizado no interior de uma câmara de vácuo, situada entre os polos de um eletroimã. Para que ocorra aceleração ressonante das partículas os ions realizam meia rotação no campo magnético em um tempo igual ao semi-período do oscilador. Continuando o exercício instrutivo de mecânica quântica elementar, agora aplicada ao ciclotron, podemos escrever que uma partícula que atingiu o momento linear  $p = mv$  deverá girar em uma trajetória cujo raio é dado por:

$$R = \frac{p}{qB}. \quad (8)$$

Como comprimento de onda de De Broglie vale  $\lambda = \frac{h}{p}$  portanto podemos escrever a seguinte relação:

$$R \lambda = \frac{h}{qB}. \quad (9)$$

Considerando ainda que se utilize núcleo de ferro para a construção do eletroimã o valor de B será limitado pela saturação do ferro de 1 a 2 T. Portanto substituindo os valores das constantes e fazendo  $B = 1T$  teremos o produto  $R\lambda$  terá um valor igual a  $4 \times 10^{-16} m^2$ , ou seja, se quisermos investigar dimensões hadronicas necessitaremos de um ciclotron de raio  $R \approx 4$  m. Este valor é unicamente de referência, pois para cada tipo de acelerador deve-se dar um tratamento mais preciso ao cálculo do valor do campo magnético de saturação do núcleo de ferro.

#### SINCROTON

Os aceleradores lineares podem produzir feixes de partículas, teoricamente com qualquer energia cinética mas o seu preço cresce vertiginosamente com o valor de energia a atingir. Por isso foi possível desenvolver a partir da idéia original do ciclotron de Lawrence, um acelerador cuja trajetória das partículas permitisse utilizar o mesmo sistema a acelerador várias vezes, em contraste com o LINAC que utiliza vários campos em série pelos quais as partículas só passam uma única vez. O sincrotron desenvolvido em 1945 independentemente por McMillan e Vksler (9)(10) possui os seu elementos fundamentais, como está mostrado na Figura 10. O sistema injetor de partículas, em geral é um acelerador linear, por exemplo um acelerador Cockroft-Walton, que envia partículas para anel com uma energia cinética  $E_c$ . Campos Magnéticos dipolares produzem uma trajetória circular no anel enquanto que os campos magnéticos quadripolares da mesma maneira

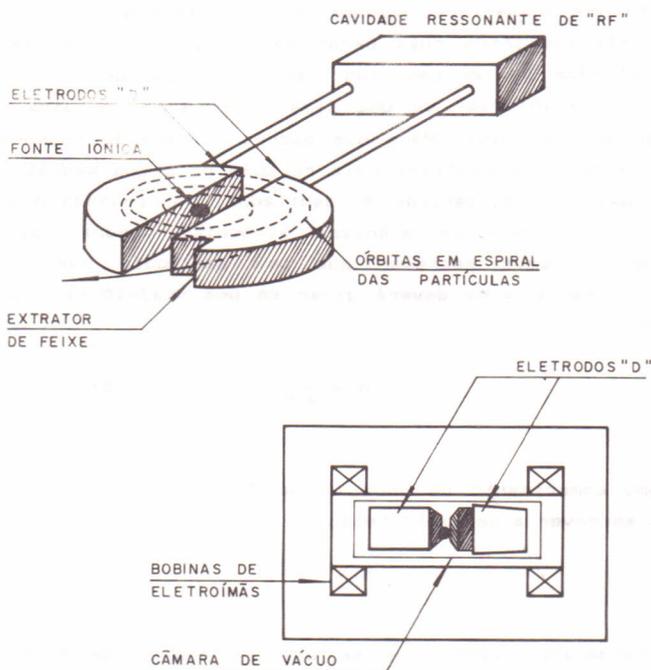


Figura 9. Esquema do ciclotron construído por Lawrence e Fdelfsen

que no Linac mantêm o feixe de partículas colimado. As partículas são aceleradas por um grande número de cavidades de RF sendo o raio de curvatura  $\rho$  conseguido pela deflexão de cada dipolo magnético menor do que o raio da trajetória  $R$ . Após a injeção de partículas com energia  $E_i$  e momento linear  $p_i$ , a partícula é mantida em órbita circular, através da aceleração centrípeta, emitindo portanto radiação eletromagnética, ou radiação sinotróica que pode ser explicada com base nas equações de Maxwell. A energia emitida por unidade de tempo (potência) por uma partícula de carga  $q$ , movendo-se em órbita circular com velocidade tangencial  $v$  é dada por:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{2q^2}{2R^2} \frac{\beta^4}{(1-\beta^2)^2} \quad \text{onde } \beta = \frac{v}{c} \quad (10)$$

Quando  $\beta$  se aproximar de 1 ou seja quando a partícula atingir velocidades relativísticas poderemos escrever a expressão (10) da seguinte maneira:

$$\frac{dE}{dt} \approx \frac{2q^2 c}{3R^2} \left( \frac{E}{mc^2} \right)^4. \quad (11)$$

A energia perdida em uma única revolução será então:

$$-\delta E \approx \frac{dE}{dt} \cdot T \approx \frac{4\pi\alpha^2}{3R} \left(\frac{E}{m_0 c^2}\right)^4 \quad (12)$$

Nos aceleradores do tipo sincrotron, podemos acelerar eletrons e protons mas a energia perdida pela aceleração dos eletrons é imensamente maior do que a perdida por protons:

$$\frac{\delta E_e}{\delta E_p} = \frac{m_p^4}{m_e^4} \approx 10^{18} \quad (13)$$

Esse fato faz com que o sincrotron como acelerador de eletrons se torne extremamente útil como fonte de radiação eletromagnética, com amplo uso em investigações de estado sólido, medicina, biologia, ciência dos materiais. O Laboratório Nacional de Luz Sincrotron, em Campinas, será brevemente um dos exemplos desse tipo de utilização (11).

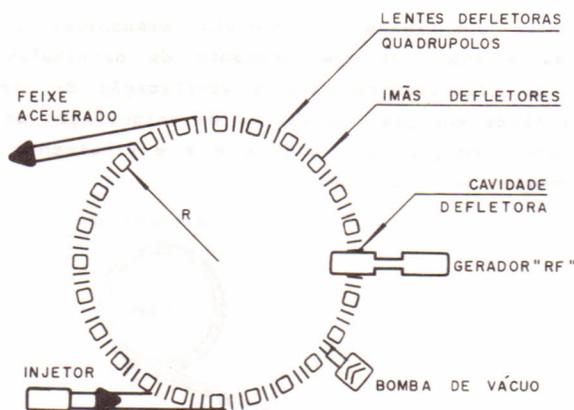


Figura 10. Sincrotron e seus elementos principais.

#### ANÉIS DE ARMAZENAMENTO E COLISÃO.

A energia dispersa pelo choque de um íon acelerado contra um alvo fixo se torna um limitante para aceleradores de alvo fixo. Outro limite é o seu custo em razão da perda dessa mesma energia. Por outro lado se a colisão for vista do ponto de vista do centro de massa, quando duas partículas de mesma massa e aceleradas com a mesma energia cinética, se chocam a soma das suas energias estará disponível totalmente para a realização da reação desejada. Portanto para obter, por exemplo, 100 GeV são necessários obter duas partículas que viajem em sentido oposto com 50 GeV cada uma.

Colisões desse tipo podem ser obtidas utilizando um único sincrotron mas com um anel de armazenamento, cuja estrutura é semelhante ao do sincrotron, com suas lentes focalizadoras, e pelo menos uma cavidade de RF para aceleração das partículas, que supre a energia perdida por radiação. As instalações desse tipo permitem o armazenamento de partículas e anti-partículas em um único anel, em trajetórias com percurso contrário, que permitem realizar choques entre protons e antiprotons, positrons e eletrons etc. Na Figura 11 esquematizamos o anel do tipo existente no CERN denominado ISR (Intersecting Storage Ring) (12). Para o seu funcionamento protons de 28 GeV produzidos por um sincrotron (PS) são extraídos tangencialmente e injetados no anel de armazenamento. Este processo pode ser feito em duas direções diferentes, o que permite criar no anel (ISR) dois feixes de partículas que se superpoem ao mesmo tempo, e em um dado momento podem ser feitas colidir.

A enorme quantidade de energia disponível produzida em aceleradores e anéis de armazenamento de partículas permite a realização de experimentos para a verificação da eletrodinâmica quântica a altas energia, do estado de aniquilação de eletrons e positrons com formação de mesons K e  $\pi$  e finalmente verificação das propriedades dos quarks e gluons.

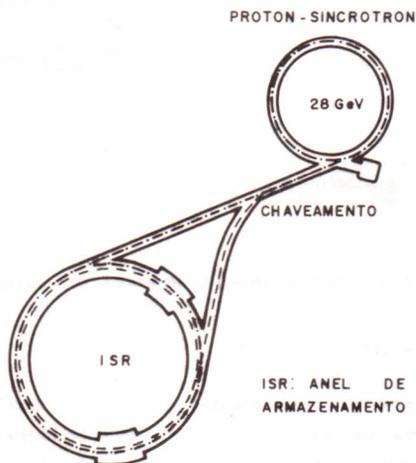


Figura 11. Esquema simplificado do sincrotron de protons com anel de armazenamento existente no CERN (do CERN Courier, 6, 127(1966).

#### DETETORES

Os detetores de partículas têm a função de registrar, com a

maior precisão possível as propriedades das partículas que são produzidas em reações nucleares. Nos experimentos realizados em grandes aceleradores, muitas vezes o número de partículas e o tempo de medida em cada experimento são muito pequenos fazendo com que a informação coletada tenha que ser analisada com uma eletrônica muito rápida. Muitas outras propriedades deve realizar o sistema detetor mas de forma simplificada podemos dizer que para reconstruir um estado final produzido no acelerador, necessitaremos das quantidades de movimento das massas e da carga elétrica das partículas envolvidas. A variedade de técnicas utilizadas na detecção de partícula é muito grande, e portanto o número de diferentes detetores também o é. Não é possível discutir todos os tipos de detetores, neste trabalho, tentaremos em vez disso dar uma boa compreensão do problema.

A história do desenvolvimento dos detetores de partículas correu paralela ao desenvolvimento Física Sub-atômica experimental. Sem um detetor seria impossível quantificar as observações experimentais. Para realizar os primeiros experimentos com partículas  $\alpha$  foi utilizado o espintariscópio, construído por Sir William Crookes em 1903, êle consistia em uma lâmina de ZnS e de um microscópio, ou seja quando uma partícula alfa atingia essa lâmina se produzia uma cintilação que podia ser observada com um microscópio. Muitos resultados importantes para a física moderna foram obtidos com êsse detetor rudimentar. Em 1910, por exemplo, utilizando esse detetor Geiger e Marsden realizaram o primeiro experimento de coincidência, observando com dois microscópios, partículas  $\alpha$  de um experimento que realizavam. Êles provavelmente davam um grito cada vez que uma partícula atingia a placa e se isso ocorresse dentro de um tempo pré-estabelecido êles consideravam a coincidência ou não do eventos observados. No entanto a necessidade de experimentos mais precisos, fez com que se abandonasse o olho humano e em 1944 o cintilador utilizando uma fotomultiplicadora trouxe novas possibilidades para a detecção de partículas. Com os outros tipos de detetores ocorreu o mesmo tipo de desenvolvimento, de procedimentos muito elementares de detecção se evoluiu aos detetores muito precisos de hoje, aos quais se incorporaram as tecnologias mais avançadas. Descreveremos aqui (13) os quatro detetores que consideramos mais importantes para a detecção de partículas nos aceleradores: cintiladores, detetores a semicondutor, camaras de bolhas e camaras de descarga elétrica (spark chambers).

#### Cintiladores

Os cintiladores, ou detetores de cintilação, surgidos em 1944 traziam uma fotomultiplicadora para substituir o olho humano,

utilizados nos primeiros espintariscópios. Um moderno detector de cintilação tem uma estrutura como a mostrada na Figura 12. Um cristal cintilador, está acoplado óticamente a uma ou mais válvulas fotomultiplicadoras. Uma partícula ao atravessar o cristal cintilador, produz ftons e estes ftons são transportados óticamente até o fotocátodo da fotomultiplicadora. No fotocátodo são liberados eletrons que são por sua vez acelerados e focalizados no primeiro dinodo. Para cada eletron que bate na superfície do dinodo, são produzidos 4 ou 5 novos eletrons. Considerando que os dinodos são arranjados de tal maneira que existam até 14 estágios, se pode amplificar a corrente de eletrons proveniente do fotocátodo por um fator de  $10^9$ . Portanto, alguns ftons incidentes produzem um pulso de corrente mensuravel, como o que está mostrado na mesma Figura 11. Basicamente existem dois tipos de cintiladores em uso, os cristais de NaI(Tl), e os cintiladores plásticos.

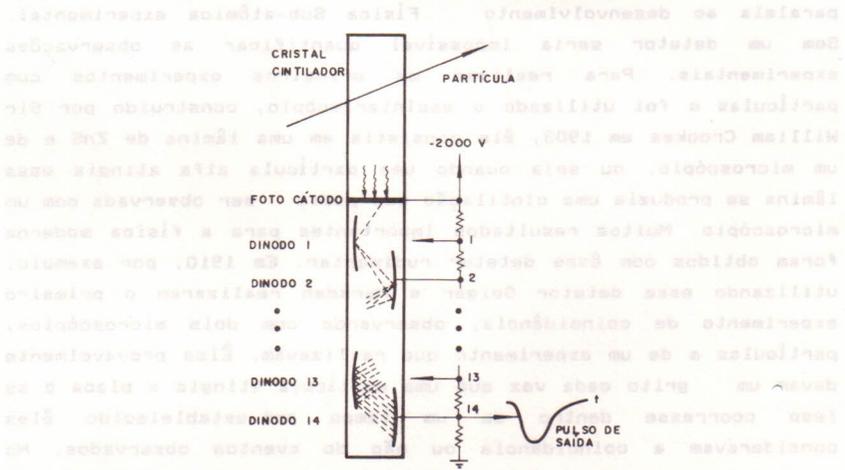


Figura 12. Detector de cintilação

#### Detetores a Semicondutor

O fundamento dos dispositivos detetores a semicondutor, é muito simples e está baseado no mesmo principio das câmaras de ionização. Quando um ion se move através de um gas ou de um sólido, produz pares de ions, cujo número depende do material atravessado, da energia cinética dos ions e da sua massa. A vantagem do uso de semicondutores, está no fato de para produzir um par de ions são necessários 2,9 eV no germânio e 3,5 eV no silicio, enquanto que num gas como o He se necessita 44 eV, 22 eV no Xe e 34 eV no ar. Na Figura 13 podemos observar esquema

simplificado de um detetor a semiconductor, o par de ions criado no conjunto semiconductor, é separado indo o ion negativo para camada n e o positivo para a camada p. A corrente produzida é amplificada e medida sob a forma de um pulso.

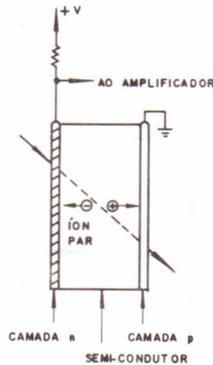


Figura 13. Detetor a semiconductor.

#### *Câmaras de borbulhas e câmaras de névoa.*

As câmaras de Wilson ou câmaras de névoa, inventadas em 1896 por C.T.R. Wilson em Cambridge, contêm ar saturado com álcool a baixa temperatura. Quando a radiação atravessa a câmara forma-se uma linha de gotículas, que corresponde à condensação do vapor. Esta câmara colocada entre os polos de um forte imã permite verificar a carga dos ions que a atravessa, pois as trajetórias espiraladas opostas indicam cargas elétricas opostas. Nessas mesmas câmaras pode-se medir a energia cinética pelo tamanho do traço e a massa pela sua espessura. Experimentos com câmaras de névoa são muito fáceis de realizar, e a câmara de névoa é muito fácil de construir, mas a precisão das medidas é muito pequena.

A necessidade de medir grandes fluxos de partículas em tempos muito curtos, fez com se desenvolvesse a câmara de borbulhas, em 1952 (Donald Glaser). As câmaras de borbulhas contêm nitrogênio líquido ou algumas vezes argônio também líquido, em condições termodinâmicas de entrar em ebulição. O nitrogênio líquido entra em ebulição a  $-230^{\circ}\text{C}$ . No momento de se realizar o experimento, faz-se a pressão no interior da câmara baixar repentinamente, movendo-se um embulo. Os ions que atravessam a câmara nesse momento produzem ebulição do nitrogênio ao longo do seu percurso. Uma câmara fotográfica, disparada em sincronismo com o embulo, pode dessa maneira registrar os traços das ions. Na Figura 14 podemos observar o esquema de uma dessa câmaras. Da mesma

maneira que na câmara de Wilson, com a utilização de imãs muito potentes se podem identificar pela trajetória, os diferentes ions. Na mesma Figura 13 ,está esquematizada uma típica fotografia obtida com uma câmara de borbulhas. A complexidade dos traços obtidos e dos eventos registrados fez com que se utilizassem computadores para análise dos registros feitos.

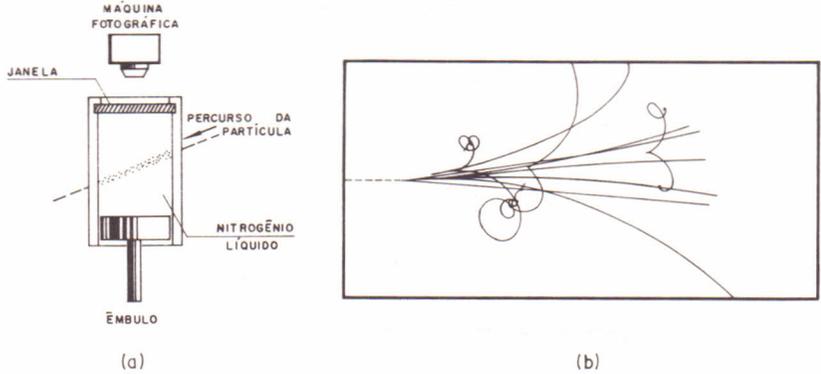


Figura 14. Câmara de borbulhas, e um evento típico fotografado na câmara, depois que um neutrino, vindo da direita se chocou com um próton.

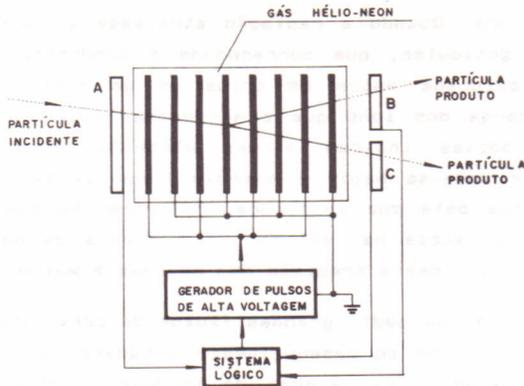


Figura 15. Câmara de descarga elétrica (spark chamber)

#### Câmaras de descarga elétrica. (Spark chambers)

Numa câmara de descarga elétrica, os ions que atravessam os espaço entre dois eletrodos, aos quais é aplicada uma diferença de potencial, podem ocasionar a quebra do dielétrico do meio e fazer saltar uma descarga elétrica entre os eletrodos. Os

elementos de uma câmara de descarga estão mostrados na Figura 15. A vantagem dessa câmara sobre as outras está o fato dela poder ser disparada, no momento da penetração da partícula no eletrodo A, pois o sistema lógico pode nesse momento acionar o registro da passagem da câmara pela variação dos potenciais gerados entre pares de eletrodos.

## CONCLUSÃO

O tema abordado aqui é muito amplo e portanto teve que ser resumido, mas com a preocupação de não se perder a precisão conceitual e a estrutura didática, que eram os objetivos básicos. Existem mais tipos de aceleradores e detetores do que os aqui esquematizados, mas estes representam conceitualmente a grande maioria dos aceleradores existentes na atualidade e portanto servem de guia de estudo para os demais. A pesquisa experimental para responder a questões fundamentais, como quais são realmente as partículas elementares ainda não está concluída, ou seja ainda não se pode dizer definitivamente se leptons e os quarks são realmente elementares. Em ambos os casos se pode confirmar teórica e experimentalmente a existência de uma estrutura fina tanto para elétrons como para quarks, mas muitas outras coisas precisam ser ainda confirmadas experimentalmente e por isso se continua a construção de grandes aceleradores, especialmente para estudar as características das interações fracas. O tema vai portanto continuar atual por muitas décadas e os jovens estudantes necessitaram destas e de outras informações para a sua formação.

## BIBLIOGRAFIA

1. COCKROFT, J.D., WALTON, E.T.S. Proc. Roy. Soc. (London), A129, 477(1930); 136A, 619(1932).
2. LAWRENCE, E.O., EDELFSSEN, N.E. Science, 72, 376(1930); LAWRENCE, E.O., LIVINGSTONE, M.S., Phys. Rev., 37, 1707(1931); 38(1931).
3. RUTHERFORD, E., Phil. Mag., 86, vol 37, 537-583(1919).
4. FRITZSCH, H. Quarks The Stuff of Matter, Penguin Books, England(1984).
5. LATTES, C.M.G., et alii, Nature, 160, 455-488(1947).
6. GELL-MANN, M. Phys. Letters, 8, 214(1964).
7. NEAL, R.B., The Stanford Two-mile Accelerator, Benjamin Reading, Mass.(1968).
8. LBL News Magazine, 6, 3, 6(1981).
9. BLEWETT, J.P. Advan. Eletron. Phys., 29, 233(1970).
10. WILSON, R.R., Scientific American, 242(1),42-55(1980).
11. Laboratório Nacional Sincrotron, Campinas, 1989, 12, CNPQ, MCT.
12. CERN Courier, 6, 127(1966).
13. KNOLL, G.F. Radiation Detection and Measurement, John Wiley, US, (1979).

Faint, illegible text at the top of the page, possibly a header or introductory paragraph.

Main body of faint, illegible text, appearing to be several paragraphs of a document.

Faint, illegible text at the bottom of the page, possibly a footer or concluding paragraph.