

## **Para que servem os aceleradores de partículas.**

**Nobuko Ueta DFN IFUSP.**

**Fevereiro 2018**

### 1-Introdução

Os aceleradores de partículas foram desenvolvidos pela necessidade de testar a validade de modelos de como um núcleo pode ser descrito matematicamente, ou seja, como se pode representar um núcleo. Os modelos nucleares são válidos dentro de certas limitações, que devem ser estabelecidas experimentalmente.

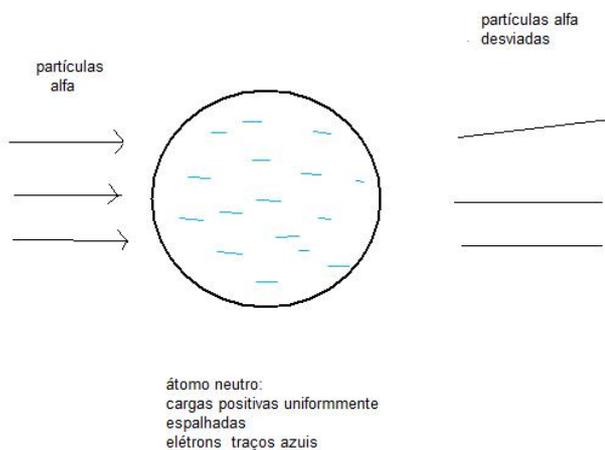
Antigamente, filósofos explicaram a existência de diferentes materiais como compostos por água, ar, fogo, etc. através de modelos apenas pensados, sem uma verificação específica da sua validade. Havia nessa época também um pensamento místico e até religioso, mas sempre sem uma verificação experimental como é a prática da ciência hoje em dia.

Galileu foi o primeiro pesquisador que utilizou um aparelho para olhar no céu os astros visíveis à noite utilizando uma luneta, uma descoberta recente de um artesão holandês, que a construiu como um objeto provavelmente com intuídos de defesa militar. Começa assim a física experimental. Galileu observou os satélites de Júpiter e seguiu ao longo de vários dias a disposição dos satélites grandes visíveis com o aumento conseguido com a luneta que construiu para esse fim. Consta que dificilmente Galileu conseguia convencer os sábios teóricos da época a observar o que ele queria mostrar. Parece até que seria uma heresia olhar os astros através de uma luneta. Mas se até houve sábios queimados vivos pelas suas ideias entende-se o cuidado tomado por alguns deles

A história da ciência revela como inúmeras teorias foram sendo desenvolvidas ao longo de séculos e relatam como teorias, hoje em dia apresentadas de forma linear e incontestes, foram na verdade duramente criticadas pelos pares da época e, assim reestruturadas, chegaram aos nossos dias.

Assim, vários pesquisadores elaboraram suas teorias atômicas; mas, em geral, as que têm sido difundidas ao longo dos tempos são os modelos de Thomson: o do pudim de passas e a de Rutherford: a existência de um núcleo atômico muito menor que o átomo e com peso muito concentrado nesse núcleo. (veja anexo1).

No modelo do pudim de passas admite-se que o átomo seja formado por um aglomerado de cargas negativas os elétrons, que são as passas, dentro de uma distribuição uniforme da parte positiva, que é a massa do pudim. Na realidade, no Brasil, valeria mais a comparação com um panetone (redondo) de passas. Se o átomo fosse como previsto por Thomson, podemos visualizar a previsão feita de que o espalhamento de partículas positivas como a partícula alfa favoreceria ângulos dianteiros e pequenos. Haveria a atração das partículas alfa pelos elétrons e repulsão pelas cargas positivas distribuídas pelo átomo todo. Foram feitos cálculos eletrodinâmicos exatos mostrando essa previsão.



Rutherford construiu uma câmara mantida em vácuo onde posicionou uma fonte radioativa de polônio montada com um colimador que permitia a passagem de um feixe estreito de partículas alfa incidindo sobre folhas finas de material metálico, colocado diante do feixe de partículas. Divulga-se em geral o uso de folhas finas de ouro são provavelmente as que foram conseguidas com melhor uniformidade. A figura histórica reproduzida abaixo mostra a câmara de espalhamento projetada e utilizada por Rutherford.

A base da câmara fixa na câmara B

B câmara de espalhamento móvel em torno da torre T.

C cilindro fixo em L, que por sua vez tem fixa a torre T que suporta a folha fina estudada (Au)

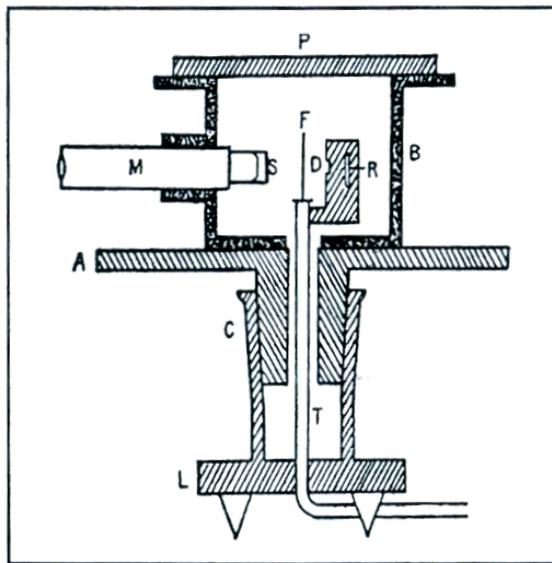
T torre onde está fixa a folha de ouro F

R fonte de partículas alfa de polônio (~5MeV)

D colimador para tornar o feixe estreito na direção da folha F

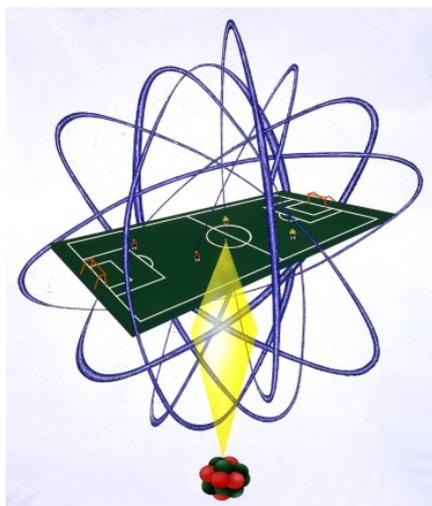
M tubo de um microscópio com uma camada fina de sulfeto de zinco S numa das extremidades, que fica luminescente quando atingido por uma partícula radioativa. Pode-se ver a ocular na outra extremidade, onde o pesquisador ficava observando as luminescências.

Provavelmente a torre T também era por onde se fazia vácuo dentro da câmara.



Partículas alfa de 5 MeV só percorrem da ordem de 5 cm no ar em pressão atmosférica normal, de modo que dentro da câmara de espalhamento deve haver vácuo. M significa  $10^6$  e eV é a energia que um elétron de carga e adquire ao atravessar uma diferença de potencial de 1 V ( $5 \text{ MeV} = 5 \times 10^6 \text{ eV}$ )

O que foi observado nessas medições resultou no modelo atômico de Rutherford, que persiste ainda hoje embora com detalhes complementares. (No You-tube entre com: "Rutherford alpha particle scattering experiment" e escolha uma apresentação embora esteja em inglês).

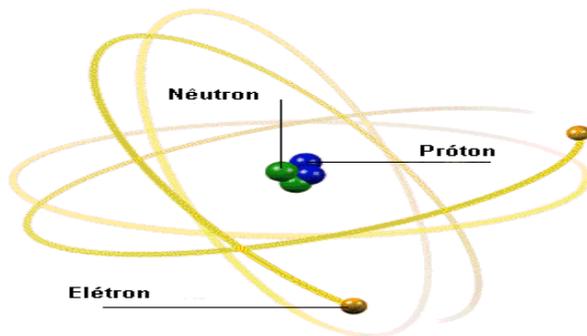


Esta figura mostra como seria proporcionalmente um átomo. Se um núcleo for representado por uma bola de futebol colocado no centro do campo, os elétrons estariam voando em círculos onde fica a arquibancada. ( Veja anexo 8). O átomo na verdade é bem vazio e se analisarmos o espalhamento das partículas alfa por núcleos de ouro é exatamente isso que se observa. Quase todas as partículas alfa não são desviadas e vão em frente, dizemos que foram em zero graus, sem desvio. A distribuição das partículas espalhadas em outros ângulos segue a lei do inverso do seno elevado à quarta potência da metade do ângulo de espalhamento teta.

$$\sin^{-4} \theta/2$$

e proporcional às cargas elétricas em questão. A probabilidade decai muito rapidamente quando se aumenta o ângulo de observação. Mas ainda existem partículas espalhadas perto de 180°.

Rutherford concluiu que a parte positiva seria um núcleo muito pesado e estaria concentrado numa minúscula região do átomo. O modelo é geralmente ilustrado nos textos como na figura abaixo, sem considerar as reais dimensões.



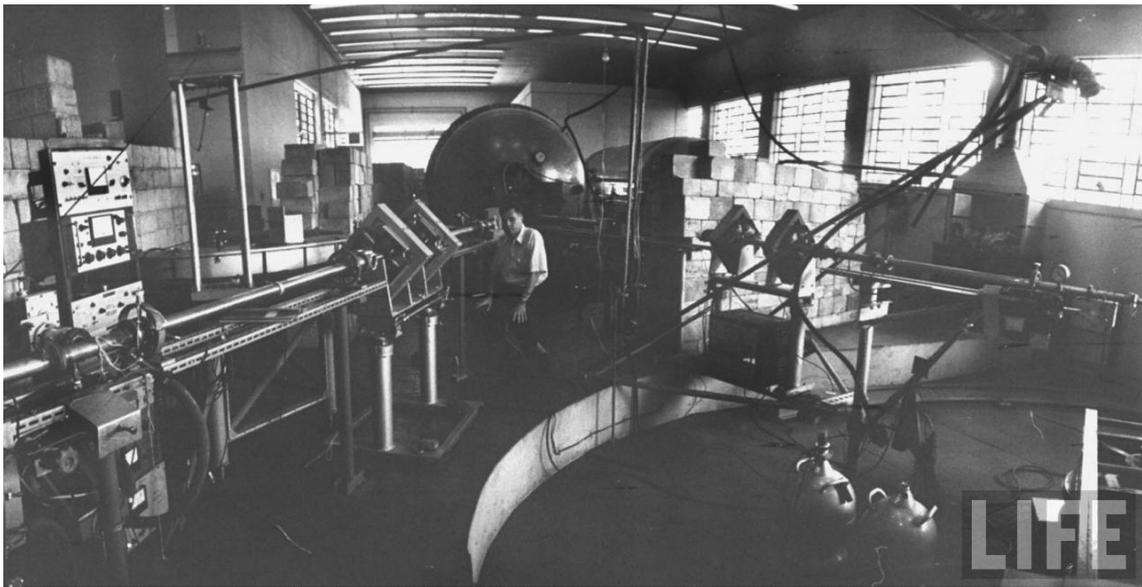
Em ciência estuda-se sistematicamente algum fenômeno. Assim, Rutherford em suas experiências utilizou diversos metais como: alumínio, chumbo, etc. O uso de fontes alfa de diferentes energias fica limitada à existência dessas fontes na natureza.

O projeto e a construção de aceleradores de partículas possibilitaram a realização de experimentos com variados feixes de partículas com diferentes energias incidentes. Na física nuclear utilizam-se feixes de partículas energéticas sobre alvos de diferentes núcleos a fim de se estabelecer um modelo teórico adequado para representá-los.

Hoje em dia existem vários modelos nucleares teóricos adequados a cada "tipo" de núcleo. O estudo sistemático nos permite classificar os diferentes núcleos estudados, estabelecendo em que região de energia incidente essa classificação é válida.

## 2- Aceleradores

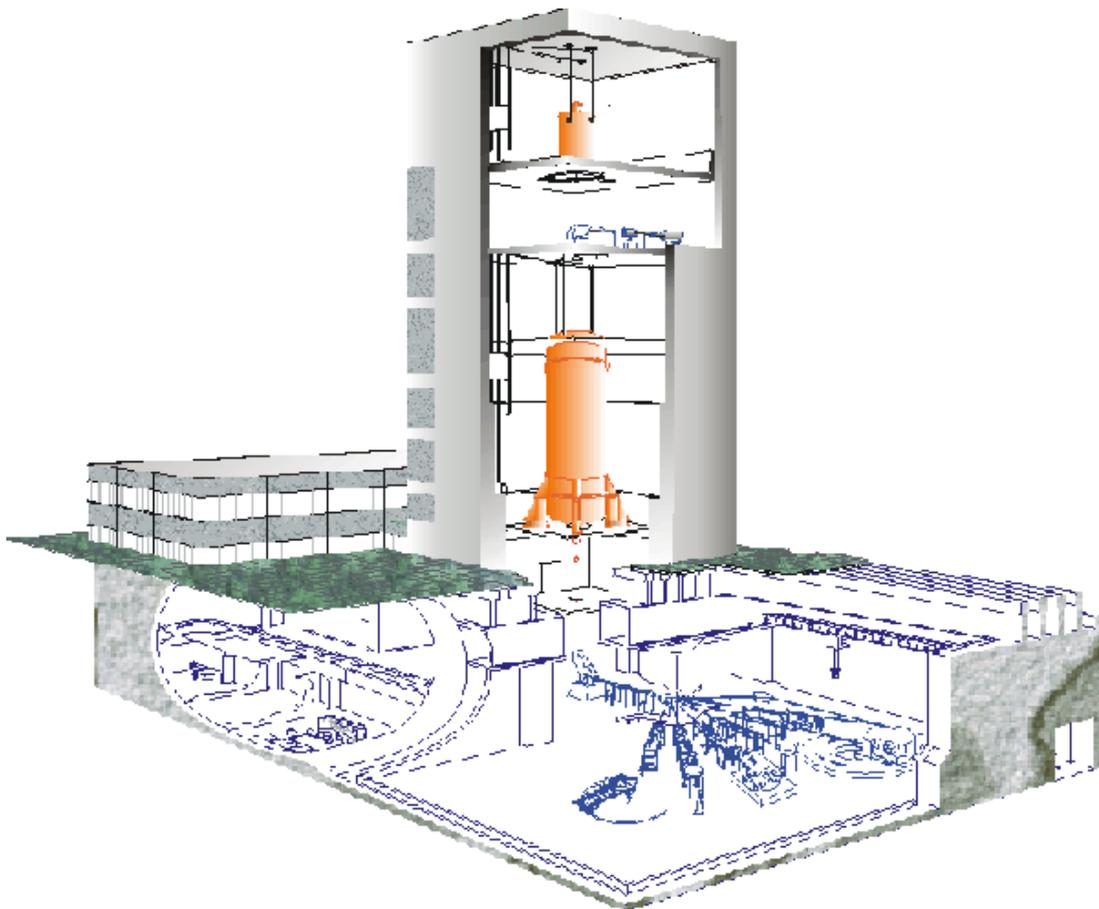
Na década de 1950 o Professor Oscar Sala iniciou a construção de um acelerador Van de Graaff em São Paulo no Departamento de Física da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras da Universidade de São Paulo. O acelerador foi construído com o apoio de estudantes, técnicos e com a participação da indústria nacional. Esse acelerador atingiu a energia de 3 MeV. Na fotografia abaixo o Prof. Oscar Sala está em frente ao acelerador. Nesse acelerador haviam três linhas de canalizações, uma para estudo com nêutrons e duas para partículas carregadas.



### 3- O Acelerador Pelletron e equipamentos acessórios

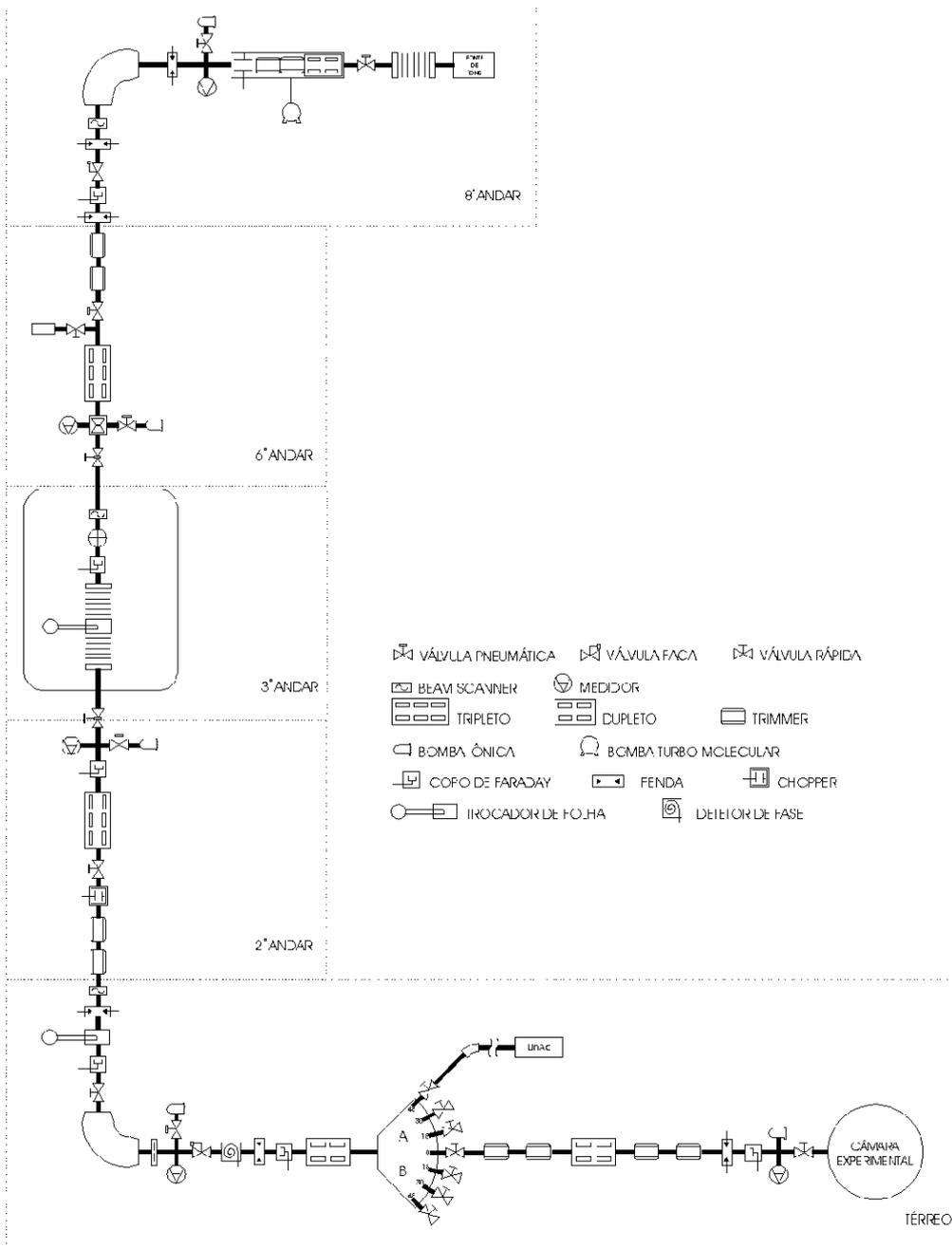
O acelerador Pelletron 8UD é um acelerador eletrostático e sua instalação também foi por iniciativa do Prof. Sala. Trata-se de um acelerador vertical abrigado numa torre especialmente projetada para evitar qualquer vazamento de radiação durante a sua operação. Está instalado no Edifício Oscar Sala do Departamento de Física Nuclear da USP. Esse acelerador foi construído pela National Electrostatic Corporation de Wisconsin USA, do professor Herb, antigo orientador do Prof. Oscar Sala.

A figura abaixo mostra esquematicamente o Acelerador Pelletron, dentro do edifício, inclusive o subsolo onde se encontram a sala de controle e a área experimental.



Como a canalização deve ser mantida em alto vácuo existem vários sistemas de bombeamento, com os respectivos medidores de vácuo, ao longo de toda trajetória do feixe iônico. Existem também válvulas que permitem a isolação de partes do sistema de vácuo e de forma automática em caso de queda de energia elétrica. Isso é importante para manter o vácuo nas partes essenciais da canalização. Vários sistemas de focalização e posicionamento do feixe estão colocados ao longo de toda a trajetória do feixe, conforme indicado no esquema abaixo.

No oitavo andar o feixe tem a trajetória na direção horizontal, encontra um eletro-ímã o ME20 e se torna um feixe na direção vertical, indo assim na direção do terminal de alta tensão. A corrente aplicada ao eletroímã deve ser a adequada para se ter o desvio do feixe necessário.



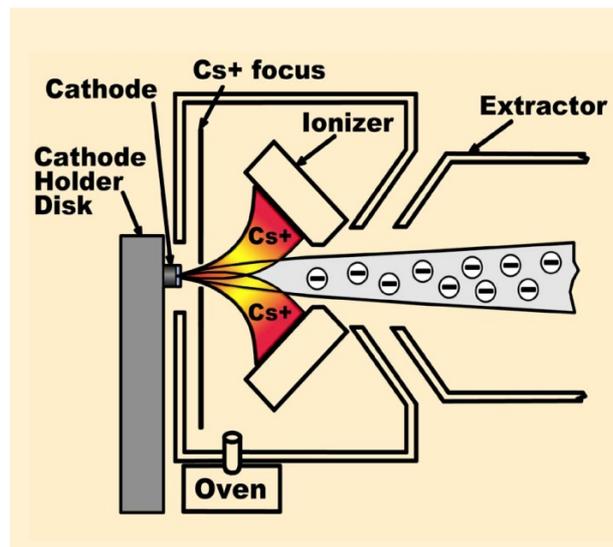
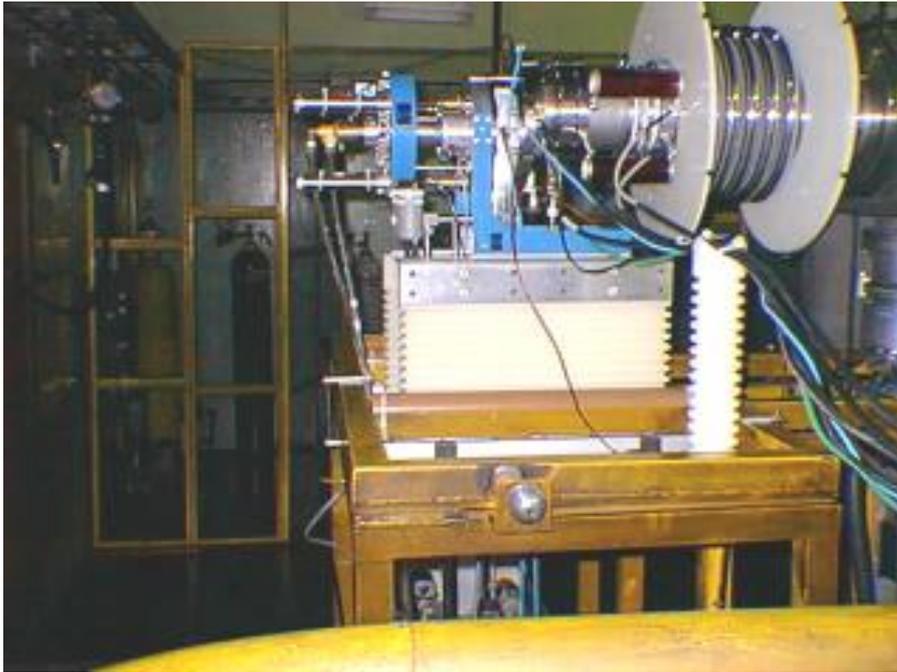
No terceiro andar está localizada a parte central do corpo do acelerador. Está destacado o trocador de folha, que é o “stripper”, isto é, o filme fino de carbono onde se processa a troca de carga do feixe iônico. No oitavo andar o feixe produzido é negativo e uma vez conduzido adequadamente através da canalização, toda mantida em alto vácuo, chega a ser atraído pela alta tensão positiva acumulada no terminal de alta tensão do acelerador. Ao atravessar a película de carbono o feixe perde elétrons e se torna positivo, sendo assim novamente acelerado pelo potencial elétrico do terminal e chega ao

eletro-ímã ME200, onde é desviado novamente para a direção horizontal e tem a sua energia determinada com alta precisão e alta resolução. Quando se processa a troca de carga do feixe negativo, podem ser formados feixes positivos de diferentes estados de carga. A energia do feixe depende do estado de carga, uma vez que a energia eletrostática é definida pelo produto da carga ( $q$ ) pelo potencial ( $V$ ), isto é,  $qV$ . No eletroímã ME200 se escolhe o feixe adequado, isto é, aquele cuja energia é a de interesse na pesquisa. No ME200 coloca-se a corrente elétrica necessária para que o feixe de interesse passe adiante na canalização.

Dependendo do tipo de medida a ser efetuada são necessários diferentes arranjos experimentais para se efetuar a detecção dos produtos das reações nucleares que ocorrem. Assim, existem várias canalizações disponíveis e o feixe pode ser desviado adequadamente utilizando o ímã defletor indicado pelas letras A e B, que são as denominações das salas experimentais.

#### 4- A fonte de íons

No oitavo andar fica localizada a fonte de íons, onde são produzidos os íons negativos do elemento que se quer acelerar. Atualmente é utilizada uma fonte denominada MC-SNICS ( Multi Cathode Source of Negative Ions by Cesium Sputtering ), dotada de 32 catodos que podem ser de diferentes materiais, cujos íons são os de interesse para a pesquisa. Na fonte, o feixe primário é de íons de césio Cs, esses íons positivos são acelerados contra o material do catodo devidamente posicionado, arranca um átomo do material. Esse átomo passa pela região nas vizinhanças da superfície do catodo onde interage com césio, aí presente, e ganha um elétron, tornando-se um íon negativo. Os íons negativos são sugados para fora da fonte, são focalizados para formar um feixe adequado para ser acelerado.

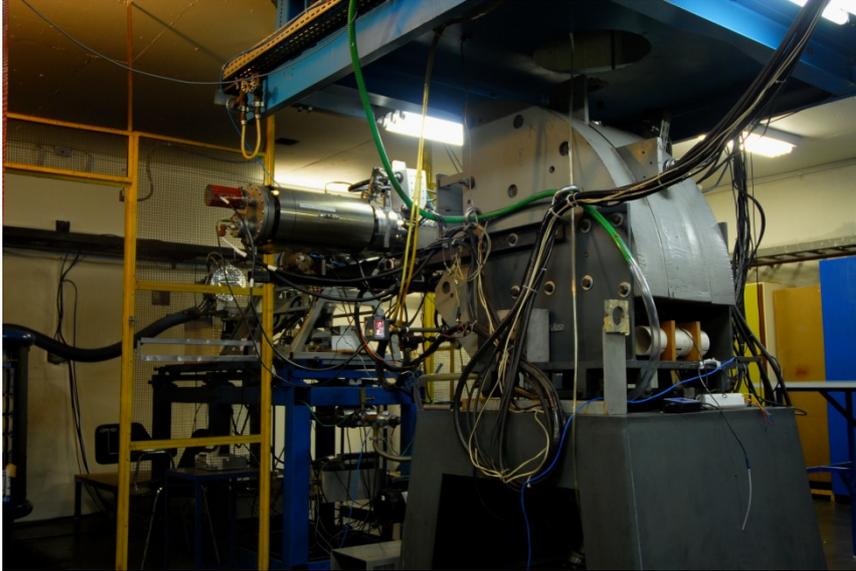


O funcionamento da fonte de íons está mostrado na figura acima. Os projetos tanto da fonte como o de demais componentes do acelerador consideram a forma geométrica e os potenciais elétricos necessários para a focalização e extração do feixe. São usados princípios eletrostáticos e eletro-magnéticos.

## 5- O ME20

O ME20 é basicamente um eletroímã que deflete o feixe desejado da posição horizontal para a vertical, para então ser conduzido para o

acelerador. A corrente necessária para defletir o feixe em questão é obtida, usando-se uma calibração prévia.

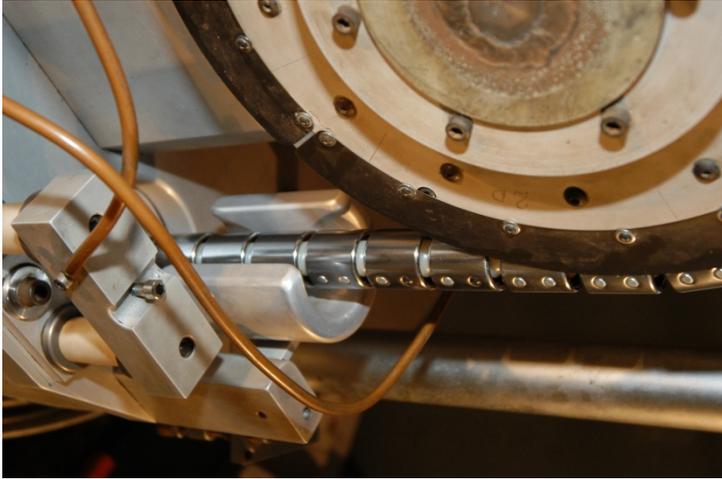


## 6- Sistema de carga

O acelerador Pelletron é um acelerador do tipo dos aceleradores Van de Graaff comuns em feiras de ciências, mas que tem um sistema diferente de carga. Nos aceleradores Van de Graaff de demonstração, a carga é obtida por atrito de uma correia. No Pelletron, o sistema de carga é feito por indução de carga, que pode ser visto na foto abaixo<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Fotos cedidas pelo Prof. Dr. Alexandre A. Suaide do DFN –IFUSP, a quem agradecemos



Na foto acima pode se ver os “pellets” que são cilindros de alumínio de aproximadamente uma polegada de comprimento e diâmetro aproximado de uma polegada. Os “pellets” são conectados uns aos outros por peças de teflon, que são isolantes elétricos e formam uma corrente que transporta a carga para o terminal de alta tensão. Com polarização elétrica adequada faz-se induzir cargas nos “pellets” que levam a carga quando a corrente é tracionada. A polia de tração da corrente também está visível na foto.

As cargas são acumuladas no terminal de alta tensão que pode ser visto na foto abaixo:

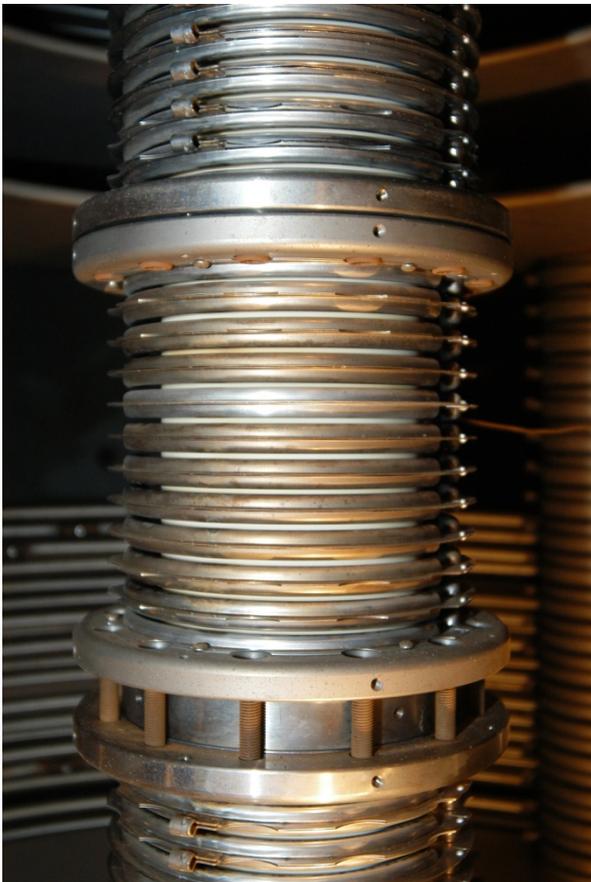


O terminal fica localizado no centro do tanque e fica aproximadamente no terceiro andar. Dentro do terminal de alta tensão

estão localizados: o sistema de descarga da corrente de “pellets”, o apetrecho que possibilita a troca de carga do feixe, etc.

## 7- Tubo acelerador

O feixe passa no interior do tubo acelerador mantido em alto vácuo e conectado adequadamente à estrutura de anéis que proporcionam a distribuição de alta tensão no interior do tanque do acelerador, veja foto abaixo.



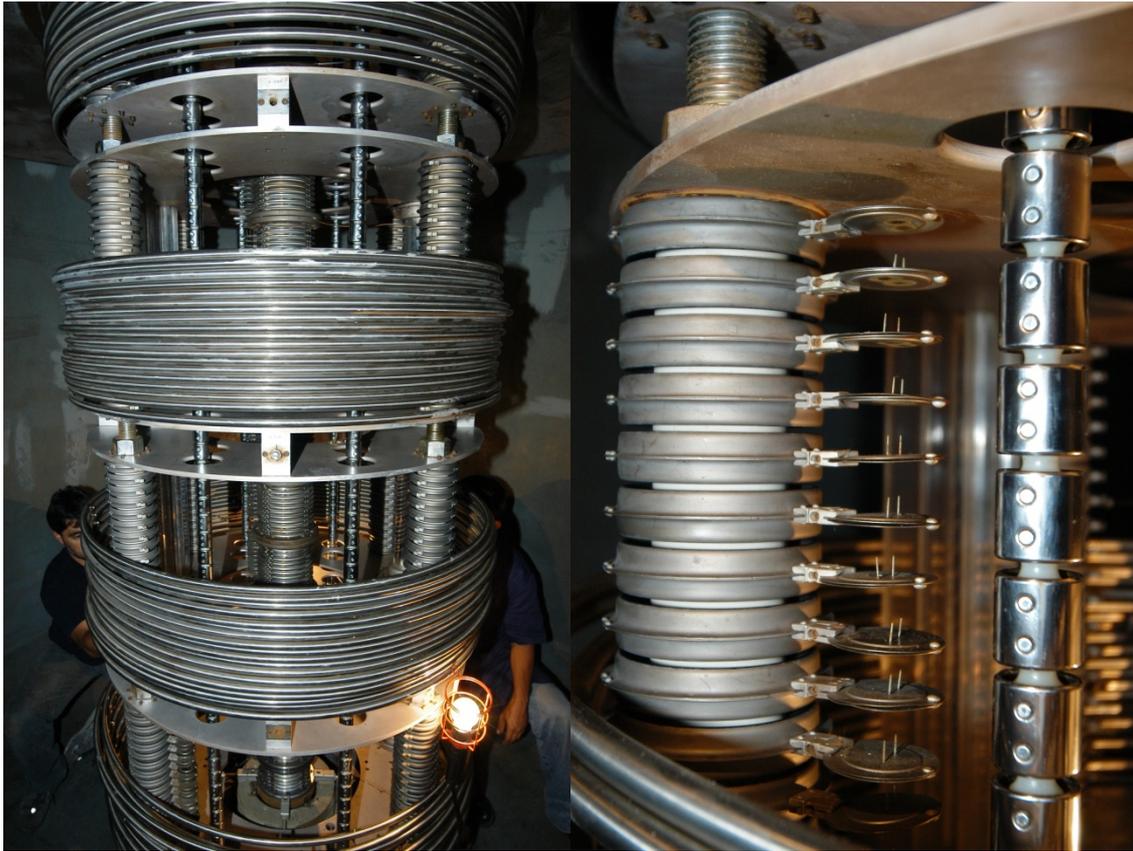
O tubo é composto de 8 unidades duplas daí o nome 8UD. Cada unidade é composta por três secções de tubo como mostra a fotografia acima. UD unidades duplas porque são duas unidades separadas pelo terminal de alta tensão.

Cada seção do tubo acelerador (na foto vemos uma unidade, com uma seção no centro e outras duas parcialmente visíveis) tem uma estrutura tal que uma vez conectado aos anéis da estrutura do acelerador proporciona um campo elétrico uniforme no interior, onde passa o feixe de íons.

Nota-se a estrutura do tubo acelerador composto por eletrodos metálicos, que transportam o campo elétrico criado pela estrutura do acelerador, entremeados por isolantes de porcelana (partes brancas). Nos eletrodos pode-se ver o local (saliências) onde se coloca um fio que será ligado à estrutura dos anéis de distribuição de potencial elétrico.

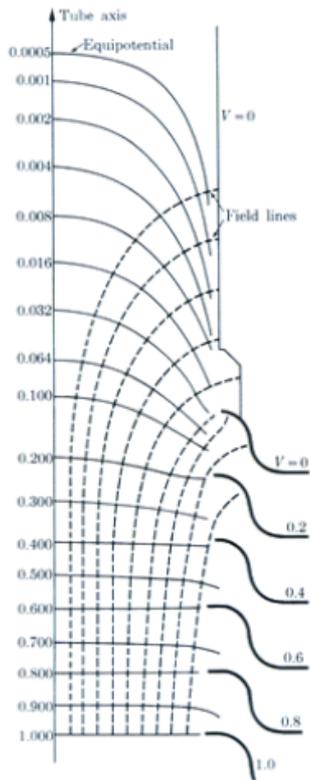
O campo elétrico no interior do tubo acelerador é um campo uniforme, que acelera as partículas do feixe iônico ao longo do eixo do tubo.

A estrutura interna do acelerador, destacando as colunas de sustentação do acelerador com detalhes das agulhas de descarga, bem como os anéis que contribuem para a distribuição do potencial elétrico podem ser vistos nas fotos abaixo. Dois técnicos estão trabalhando dentro do tanque na manutenção, utilizando uma plataforma interna. Os anéis estão deslocados da posição de funcionamento do acelerador para possibilitar os reparos necessários.



Nas fotos podem ser vistas as correntes de carga, o tubo acelerador, duas colunas de sustentação do conjunto, outras duas ficam atrás, simetricamente. Na foto do lado pode ser visto em detalhe uma coluna de sustentação, formado por secções metálicas com agulhas, que através de descarga no gás isolante com que é preenchido o tanque do acelerador, possibilitam o controle da operação do acelerador. Entre duas secções metálicas da coluna de sustentação ficam peças cilíndricas isolantes (em branco) feitas de cerâmica especial.

Todo o conjunto é projetado para produzir o campo elétrico necessário, o mais uniforme dentro do possível, que é usado para a aceleração das partículas.



A figura ao lado mostra as linhas equipotenciais dentro do tubo acelerador e as linhas do campo elétrico correspondentes (linhas pontilhadas). Note que no eixo do tubo, onde as partículas devem passar, o campo elétrico é paralelo à trajetória do feixe. Toda a estrutura do acelerador é projetada a fim de propiciar essa configuração do campo elétrico



Para entrar no tanque do acelerador para realizar a manutenção necessária, ou para uma eventual correção de falha, existe uma plataforma, como já foi dito, com sistema de elevador dotado de um

controle que pode ser visto com o Prof. Dr. Marcelo G. Munhoz. Junto a ele pode se ver a escotilha por onde se entra no tanque.



Uma vez fechado o tanque, tira-se o ar com bombas de vácuo e preenche-se com hexafluoreto de enxofre, gás tóxico e isolante elétrico, numa pressão que depende da tensão de operação do acelerador. Processa-se em seguida a secagem do gás e do sistema todo, que sempre absorve a umidade do ar durante as intervenções de manutenção do acelerador. É feita a circulação do gás com o auxílio de bombas que fazem passar por filtros com elementos secadores, previamente reconicionados para essa finalidade. O gás isolante é normalmente armazenado em tanques apropriados, localizados no subsolo do prédio, para onde é bombeado sempre que vai ser aberto o tanque do acelerador.

O tubo acelerador é mantido em ultra alto vácuo por intermédio de bombas iônicas, assim como toda a canalização por onde o feixe iônico é conduzido até chegar à câmara de espalhamento.

Ao longo do trajeto do feixe é necessário usar focalizações e centralizações do feixe dentro da canalização, o que é feito através do uso de campos magnéticos criados por eletroímãs. A fotografia abaixo mostra em primeiro plano um quadrupolo eletromagnético e logo em seguida um dipolo eletromagnético. O primeiro, o quadrupolo, é usado para focalizar o feixe numa direção, horizontal ou vertical, e é normalmente usado aos pares, localizados ao longo da trajetória do feixe iônico, de modo que se faz a focalização no eixo horizontal e no eixo vertical. É necessário que o feixe esteja bem centrado na canalização para que essa focalização seja eficaz. Para isso são utilizados os defletores eletromagnéticos ou os eletrostáticos, localizados ao longo do trajeto do feixe, como indicado anteriormente, no desenho esquemático.

## 8- O ME200

Apenas o feixe positivo de energia bem determinada deve ser conduzido até a câmara de espalhamento. Usa-se a calibração do ME200 a fim de escolher a corrente adequada para a escolha feita. Todos os demais feixes não são utilizados e se perdem em algum ponto da canalização. O ME200 além de defletir o feixe que se deseja, efetua a medição da energia desse feixe com alta resolução, de acordo com a calibração previamente feita.

Na extremidade do ME200 existem duas placas que medem as correntes do feixe que não tem o raio de curvatura correto para ser transmitido, ou por ter a energia menor que a devida (numa das placas) ou o contrário (fica na outra placa). Essa informação é usada para em caso de desbalanceio fora do previsto acionar um circuito eletrônico de "feed back" que age no controle de carga do terminal de alta tensão.

O acelerador Pelletron, assim como os aceleradores tandem de um modo geral, tem uma definição muito boa na energia do feixe se comparado, por exemplo, com feixes gerados em ciclotrons. A abertura das placas de controle de energia do feixe, acima descritas, define essa resolução em energia.

A intensidade do campo magnético é medida utilizando a técnica de NMR nuclear magnetic resonance.



9-Switching Magnet.

Um eletroímã que seleciona em qual canalização será conduzido o feixe está localizado “depois” do ME200. Existem duas salas a A e a B onde estão instaladas câmaras de espalhamento adequadas para diferentes detectores. As salas eram separadas por muros de tijolos de concreto para possibilitar o trabalho numa das salas enquanto o feixe estava na outra sala, sem o perigo da radiação. Hoje em dia com a ativação da sétima linha, a central, esse muro foi retirado. Existe ainda um muro para separar o acelerador até o eletroímã do Switching Magnet das salas experimentais.

## 10- Câmara de espalhamento

Dependendo da reação nuclear que se deseja estudar o arranjo experimental deve ser devidamente escolhido. As diferentes canalizações existentes estão adequadas para tipos diferentes de medições, isto é, para diferentes partículas a serem detectadas (partículas carregadas ou neutras, de alta ou baixa energia, com baixa ou alta resolução em energia, em coincidência temporal com algum outro evento, etc.). Nesta fotografia vê-se a canalização do feixe que chega a uma câmara de espalhamento. Dentro da câmara são montados detectores semicondutores de partículas carregadas, sobre uma plataforma que pode ser posicionada em diferentes ângulos com relação ao feixe incidente. No centro da câmara são colocados os alvos nucleares de interesse. (veja anexo 3)



## 11- Detetores

Partículas carregadas podem ser detectadas por detectores semicondutores de silício, que tem a propriedade de produzir um sinal elétrico proporcional à sua energia depositada na região de depleção. Raios Gama produzem sinais elétricos dentro de detectores de germânio lítio, por efeito fotoelétrico.

Já partículas gama e raios X são detectados por cristais cintiladores, como cristal de NaI com tálio, acoplados a fotomultiplicadoras especiais ou por detectores de germânio lítio. Nêutrons

são detectados medindo o tempo de voo entre dois detectores. Abaixo estão mostrados um conjunto de detectores de NaI com suas respectivas fotomultiplicadoras( tubos finos pretos, que parecem espetados numa câmara de várias faces. Pode-se ver ainda detetor de GeLi, um detetor semicondutor específico para radiação gama. ( Veja anexo 2 )

Em seguida está mostrada uma vista externa do espectrógrafo magnético. Em destaque está a abertura através da qual se posicionava o suporte do filme fotográfico, onde ficarão gravados os traços das partículas a serem detectadas. Hoje em dia são utilizados detectores sensíveis à posição.



(Veja anexo 3)

## 12- Sala de controle

Como diz o nome, da sala de controle toda a operação do acelerador e das experiências são controladas pelos pesquisadores.

Os sinais elétricos produzidos pelos detectores são conduzidos até a sala de controle por cabos coaxiais adequados para cada detector e método de medição, onde são eletronicamente analisados e devidamente armazenados no computador, para análise posterior.

Os sinais elétricos de controle da operação do acelerador também são conduzidos até a sala de controle, de onde se faz a devida correção, sempre que necessário. A intensidade do feixe disponível em diferentes pontos do trajeto do feixe iônico pode ser medida pela inserção de copos de Faraday por controle remoto, a partir do painel de controle. O formato do feixe também pode ser verificado com o uso de escaneadores do feixe ("beam scanners"), que reproduz tanto a posição do feixe como a distribuição de carga dentro da canalização.

Todo sistema de vácuo pode ser verificado, na sala de controle, por circuitos eletrônicos mostradores do vácuo, mantidos em paralelo aos localizados junto de cada medidor ao longo da trajetória do feixe.

A troca dos "strippers" de carbono também é feita no painel de controle, onde fica também identificado o número do "stripper" que está posicionado no feixe.



As fotografias foram tiradas pelo Prof. Dr Alexandre A. Suaide e Prof. Dr. Marcelo G. Munhoz., a quem agradecemos.

### 13-Quadrupolos focalizadores de feixes iônicos e manipulação do feixe iônico

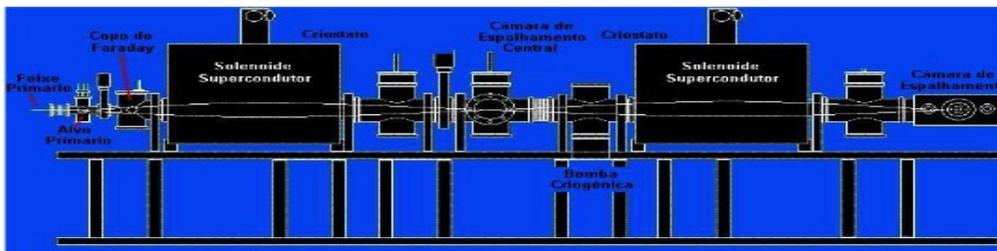
A focalização de um feixe iônico pode ser obtida num quadrupolo, através de campos magnéticos gerados por eletroímãs cujas correntes podem ser ajustadas convenientemente. A disposição dos pólos magnéticos define a direção de desvio do feixe. Usa-se a disposição dos pólos de modo que haja uma concentração dos íons que estejam se desviando do eixo central da canalização. Usam-se sempre pares de quadrupolos, um deles concentra o feixe na direção horizontal e o outro na direção vertical, fazendo com que o feixe fique com um formato próximo ao de um cilindro. (Veja anexo 4)

O desvio de um feixe pode ser conseguido através de um campo elétrico ou de um campo magnético adequado. Os dispositivos instalados ao longo da canalização para esse fim são denominados "trimmers".

## 14-O RIBRAS.

O RIBRÁS ( Radioactive Ion Beam do Brasil) é um programa de pesquisa em Física Nuclear utilizando íons radioativos como projéteis. O feixe radioativo é obtido fazendo incidir o feixe primário do acelerador Pelletron focalizado sobre um alvo localizado na primeira câmara de espalhamento utilizando um solenoide supercondutor. Dessa forma pode se obter algum elemento radioativo como o  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^{11}\text{Be}$ ,  ${}^{11}\text{Li}$ ,  ${}^{12}\text{Be}$  e outros. O feixe secundário é focalizado pelo segundo solenoide supercondutor e incide sobre um alvo nuclear colocado na segunda câmara de espalhamento. O feixe segue da esquerda para a direita no esquema e na fotografia do sistema mostrado abaixo.

### Esquema



### Arranjo Experimental



Os slides mostrados são da apresentação do sistema RIBRAS.

## 15 - LINAC.

O LINAC ( LINEar ACcelerator) foi projetado como um pós acelerador do feixe iônico do acelerador Pelletron a fim de possibilitar a obtenção de energias maiores. Ele nasceu do convênio entre a Universidade de São Paulo e a Universidade de Argonne ( EUA), que desenvolveu os ressoadores de nióbio, para o estudo de elementos químicos inexistentes na natureza que permitem compreender a formação e a evolução do Universo.

O projeto Pelletron-Linac foi idealizado pelos saudosos professores Oscar Sala, Juan Carlos Acquadro Quacchia, Elizabeth F Pessoa e Ross Alan Douglas e o coordenador é o Prof. Nemitala Added.

Sua aplicação estende-se às pesquisas em Biologia Nuclear, Física Ambiental, espectroscopia de massa (AMS) e outras que necessitam de alta densidade de energia.

O Linac diferentemente do acelerador Pelletron, que é um acelerador eletrostático e de campo elétrico constante, utiliza radio-freqüência para a transferência de energia ao feixe de partículas.

**Infraestrutura - Eletrônica**

**Ressonadores**  
Potência  
Antenas + amplif  
Controle  
Intens e fase do campo

**Sintonia grossa**  
 $\omega_0$  - controle de pressão de gás

**Sintonia fina**  
Controle da fase do campo  
acopl indutivo (capacitância var)



O sistema de cavidades é resfriado à temperatura de Hélio líquido 3K quando o Nióbio se torna supercondutor. As estações dedicadas à criogenia para a produção necessária de Hélio e Nitrogênio líquidos podem ser vistos no slide abaixo.



Todo o conjunto de sistemas auxiliares tais como:

- eletrônica de controle e potência das fonte de radio frequência
  - sistema de vácuo como bombas, medidores de vácuo e válvulas de medição
  - transporte das partículas como lentes eletromagnéticas e medição do feixe em diversas posições
  - detectores de radiação
  - sistemas de alerta de falhas nos módulos eletrônicos de sensores de vácuo
- são monitorados “on line” e controlados por estações “inteligentes” especialmente desenvolvidas.

Os slides mostrados nesta parte do LINAC são da apresentação do Prof. Nemitala Added.

Palavras finais e perguntas usuais.

Em tempos de verba reduzida e dificuldades econômicas no país, pode se duvidar da necessidade de aplicar verbas vultosas para pesquisa pura. Ouve-se repetidamente que é necessário haver modernização tecnológica imediata como o que acontece em outros países. Acontece que o desenvolvimento tecnológico é fruto da pesquisa pura dos países avançados.

Até para usar um exemplo mais próximo do cotidiano, avanços não projetos de carros da fórmula 1 certamente trouxeram muitas melhorias em segurança , estabilidade, etc, dos carros que utilizamos no dia a dia!

O desenvolvimento de técnicas em pesquisa pura certamente reverte em avanços em equipamentos e na formação de técnicos especializados que são absorvidos até em indústrias que nada tem a ver com a pesquisa. O bom andamento da pesquisa requer uma administração adequada e consciente do empreendimento de modo que até em gestão pode haver influência positiva.

Fala-se hoje em dia em escolaridade baixa no âmbito nacional, o que certamente deve se modificar se houver demanda de pessoal especializado para o desenvolvimento da pesquisa.

Certamente é necessário haver também pesquisa aplicada, o que facilmente se sente na medicina nuclear, onde cada vez é maior o número de aplicações da física nuclear na área da saúde.

Até em farmacologia e, portanto desenvolvimento de medicamentos, poderia haver certamente a influência de estudo de Biologia, Botânica etc. Se houvesse o descobrimento e o estudo sistemático das plantas medicinais conhecidas pelas tribos indígenas brasileiras poderiam trazer independência da indústria farmacêutica nacional das grandes empresas internacionais por exemplo!

## O MODELO ATÔMICO SATURNIANO DE NAGAOKA

MANUEL FIOLEAIS e MARIA DA CONCEIÇÃO RUIVO

Departamento de Física da Universidade de Coimbra, 3000 Coimbra



Em 1904, era dado a estampa, no prestigioso Philosophical Magazine, um artigo intitulado "Kinetics of a System of Particles Illustrating the Line and the Band Spectrum and the Phenomena of Radioactivity". Nele era apresentado o "modelo atômico de Saturno", segundo o qual o átomo teria uma estrutura semelhante a este planeta, isto é, haveria um núcleo central rodeado de elétrons, fazendo lembrar os anéis de Saturno. O seu autor, Hantaro Nagaoka (1865-1950), reputado físico japonês da Universidade Imperial de Tóquio, era ainda um ilustre

desconhecido no mundo ocidental, embora, a época, tivesse já dado contribuições importantes no domínio da propagação da radiação eletromagnética na atmosfera.

No início do século, a construção de modelos atômicos que permitissem compreender a estrutura da matéria estava na ordem do dia. Paradoxalmente, a crença na realidade dos átomos era ainda objeto de polémica. Embora a "hipótese atômica" fosse familiar aos químicos desde há cerca de cem anos e tanto os químicos como os físicos tirassem partido dela, a relutância em aceitar uma estrutura corpuscular da matéria era manifesta em alguns cientistas. Refira-se, a propósito, o químico Wilhelm Ostwald, um dos primeiros laureados

com o prêmio Nobel, e também o físico Ernst Mach. O próprio Max Planck confessou ter sido um adversário do atomismo que, de fato, só viria a aceitar quando tal se mostrou indispensável ao estabelecimento da sua teoria da radiação. Há, no entanto, um curto intervalo de tempo no virar do século, onde todo um conjunto de descobertas cruciais põe definitivamente em causa estes pontos de vista e abre novos horizontes ao conhecimento. Os modelos atômicos, formulados como resposta aos desafios lançados pelas novas experiências, representaram um grande passo no sentido de consagrar a ideia de uma matéria descontínua por natureza.

Os grandes modelos então nascidos - o de Thomson, o de Rutherford e o de Bohr - constituíram marcos assinaláveis no conhecimento da estrutura da matéria. Mas, por detrás destas etapas do percurso dos modelos atômicos, vale a pena ouvirmos o que nos diz a história sobre o mundo real dos cientistas da época, sobre os elegantes resultados obtidos frequentemente por um processo de tentativa e erro. E também sobre os contributos de figuras menos conhecidas, que tiveram a virtude de fecundar o terreno das ideias, para outros, mais hábeis ou dispostos de melhores meios, o virem a cultivar com sucesso.

A história das grandes invenções e descobertas é sempre rica e complexa e o papel desempenhado pelos diferentes atores nem sempre é fácil de destrinchar. Quando grandes problemas desafiam o engenho e o saber da comunidade científica, gera-se uma atmosfera propícia à criatividade, acontecendo frequentemente que ideias e descobertas idênticas ou complementares surgem, num mesmo período, oriundas de indivíduos ou de equipas, trabalhando, por vezes, independentemente.

Se refletirmos sobre estas situações, impõe-se-nos a visão de um saber que se constrói dinamicamente, desempenhando o confronto de ideias e a sua circulação um papel fundamental. É interessante, por conseguinte, espreitar para lá da face mais divulgada da história e observar episódios que nos revelam essa mesma faceta da criação do saber científico.

Vem estas reflexões a propósito do modelo atômico de Nagaoka, arredado dos manuais escolares e mesmo raramente referido em livros mais especializados. No entanto, ele pode ter tido alguma importância na construção de modelos mais realistas, talvez até pela ação positiva que a crítica a uma ideia incipiente tem no desabrochar de uma outra

mais sólida. Vale, pois a pena fazer um "close-up" deste pequeno episódio da história da Física e é este o objetivo principal do artigo.

Quando o nosso século começou, Joseph John Thomson, já bem conhecido no Ocidente e coberto de enorme prestígio, desenvolvia a sua atividade como diretor do *Cavendish Laboratory*. A ele se atribuía, de resto com toda a justiça, a descoberta do elétron, muito embora, e em rigor, essa glória devesse também ser partilhada por outras personalidades da época.

Thomson concebeu aquele que é tido como o primeiro modelo de estrutura atômica - o celebrado modelo de pudim de passas - onde o átomo era visto como um substrato contínuo de matéria carregada positivamente (o pudim propriamente dito), estando incrustados nele os elétrons (as passas), corpúsculos de carga oposta. O átomo era esférico e globalmente neutro. Esta "imagem" do átomo foi sugerida em 1903, nas "*Silliman Lectures*" na Universidade de Yale, nos Estados Unidos da América, onde Thomson se deslocava frequentemente.

A necessidade de construção de um modelo de estrutura do átomo era evidente. Os raios catódicos, constituídos pela mesma (e nova!) variedade de matéria, qualquer que fosse o cátodo, emanavam dos próprios átomos - estes deveriam, pois, ter uma estrutura interna.

Nas palavras do próprio Thomson:

"... temos nos raios catódicos matéria num novo estado, um estado em que a divisibilidade da matéria é levada muito mais longe do que no estado gasoso ordinário; um estado em que toda a matéria - isto é, matéria proveniente de diferentes fontes, tais como o oxigênio, o hidrogênio, etc. - é de uma e mesma espécie; esta é a matéria de que são feitos os elementos químicos."

[in *Philosophical Magazine* 44 (1897) 295]

Em 1897, coroando uma série de experiências, Thomson, anunciou o valor medido para a razão entre a carga e a massa dos constituintes dos raios catódicos, conjecturando, apesar de isso não ser evidente a partir dos seus resultados, que esses objetos teriam uma dimensão ínfima comparada com a dos átomos. O elétron, que foi a primeira

*partícula elementar* a ser identificada, detém, ainda hoje, essa qualidade!

No ano em que Thomson discorria em Yale sobre a sua visão do átomo, mais precisamente a 5 de Dezembro de 1903, Hantaro Nagaoka apresentava em Tóquio um "átomo saturniano", perante a Sociedade de Física- Matemática. O Japão, hoje um país na vanguarda do desenvolvimento científico e tecnológico, estava, no início do século, muito longe da posição que agora ocupa.

O país apresentava um razoável desenvolvimento tecnológico, mas tinha um atraso abismal no campo da ciência. Com Nagaoka a situação começou a inverter-se. De fato, para além de ter sido um físico de primeira linha, Nagaoka preocupou-se com o desenvolvimento científico do seu país que, no seu entender, deveria conseguir-se a custa da internacionalização da investigação. Numa carta enviada, em 1888, a Tanakadate, seu antigo professor, que estava de visita a Europa, e curiosamente redigida em inglês, Nagaoka aponta a grande necessidade de um papel preponderante por parte dos físicos japoneses no seio da comunidade científica internacional, o que tinha como pressuposto a obrigação de "aprenderem a escrever e a falar clara e fluentemente" línguas estrangeiras, designadamente o inglês, o francês e o alemão. Nagaoka fez estudos na Europa no início da última década do século passado, em Berlim, Munique e Viena. Posteriormente, veio ao Ocidente por diversas vezes, merecendo uma referenda especial a sua deslocação em 1910, quando se encontrou com Rutherford. Desempenhou também cargos administrativos de grande relevo, nas Universidades de Tóquio e de Osaka, tendo assim levado a prática muitas das suas ideias. Isso, decerto, contribuiu para que o Japão desse um salto qualitativo em matéria de investigação e alcançasse os países da vanguarda. O grande físico Heideki Yukawa que, em 1935, formulou a primeira teoria das forças nucleares (trabalho que lhe valeu o prémio Nobel da Física de 1949) e, de alguma forma, o herdeiro deste "renascimento" com origem em Nagaoka.

Mas em que consistia, mais detalhadamente, o modelo de Nagaoka?

Tratava-se de um modelo para o átomo concebido com o propósito de procurar explicar os espectros de linhas e de bandas que, após os trabalhos pioneiros de Balmer em 1885, eram obtidos cada vez com mais rigor e analisados com maior pormenor (cabe aqui destacar o trabalho de Zeeman). Nagaoka, tal como Thomson, procurou explicar a

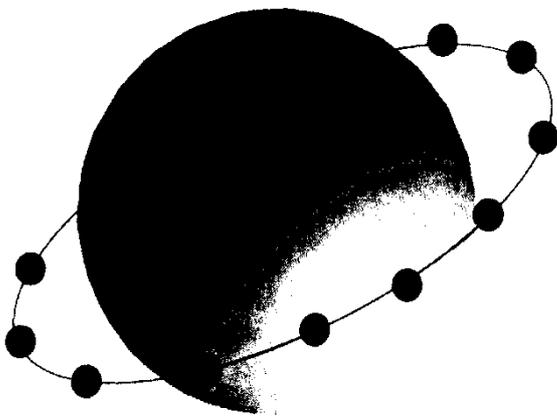
ocorrência das linhas espectrais e a sua regularidade em função das oscilações de um sistema que representava, afinal, o átomo. São de Nagaoka as seguintes palavras, retiradas do seu artigo de 1904:

"O sistema que vou discutir consiste num elevado numero de partículas de massa igual, dispostas num circulo a intervalos angulares regulares, repelindo-se com forças inversamente proporcionais ao quadrado das distancias; no centro do circulo coloca-se uma partícula de massa elevada, atraindo as outras de acordo com a mesma lei da força. Se as partículas orbitarem aproximadamente com a mesma velocidade em torno do centro de atração, o sistema permanecerá estável, em geral, se a força atrativa for suficientemente grande. Este sistema difere do sistema saturniano considerado por Maxwell pois as partículas repelem-se em vez de se atraírem. (...) Nas suas lições sobre elétrons, Sir Oliver Lodge chama a atenção para um sistema saturniano que provavelmente será do tipo do acima referido. A objeção a um tal sistema de elétrons e que ele acabara por atingir o repouso em consequência da perda de energia por radiação, se esta perda não puder ser compensada." [in Philosophical Magazine 7 (1904) 445]

Nagaoka estava consciente das limitações do modelo por este não garantir a estabilidade do átomo. Este ponto fraco, que também seria encontrado no modelo de Rutherford, só viria a ser resolvido pela Mecânica Quântica. Não obstante, o físico japonês chegou a explorar o seu modelo, e o acordo qualitativo entre previsões e dados experimentais encorajou-o mesmo a tecer algumas considerações sobre trabalhos futuros a realizar no quadro do modelo de Saturno. São dele as seguintes palavras, com que termina o artigo citado:

"Ha vários problemas que possivelmente poderão ser estudados na hipótese do sistema de Saturno, tais como a afinidade química e a valência, a eletrólise e muitas outras matérias ligadas com átomos e moléculas. O calculo grosseiro e a exposição pouco aprofundada que fiz de muitos fenômenos pode servir de sugestão para uma solução mais completa da estrutura atômica."

O modelo de Thomson viria a ser publicado no mesmo volume do *Philosophical Magazine*. Mas não foi a inevitável exaustão da energia no modelo saturniano que levou Thomson a rejeita-lo. Foi algo mais sutil e que tinha a ver com a existência de pelo menos um modo de oscilação instável dos elétrons em torno das suas posições de equilíbrio. Essa instabilidade refletia-se na ocorrência de amplitudes de oscilação irremediavelmente crescentes, que conduziam ao desmembramento do átomo.



○ átomo segundo Nagaoka

No modelo atômico de J. J. Thomson, ao contrário do de Nagaoka, a carga positiva ocupa todo o volume do átomo e os elétrons circulam em anel no interior desta carga positiva. Estas partículas passam a ficar sob a ação de uma força restauradora, proporcional a distância ao centro do átomo, em vez de estarem sujeitas a força atrativa inversamente proporcional ao quadrado da distância. Nestas circunstâncias já não ocorre qualquer tipo de instabilidade mecânica como a anteriormente referida.

O modelo de Thomson podia explicar fenômenos como a emissão de radiação, a dispersão de raios X e de luz visível, a absorção da luz, etc. a partir do movimento oscilatório dos elétrons no interior do átomo, de

acordo com a eletrodinâmica clássica. Era, pois, um modelo dinâmico que, ainda hoje, pode ser visto como a teoria clássica do átomo<sup>2</sup> (alias, se as cargas no átomo não estivessem em movimento acelerado não poderia haver emissão de radiação eletromagnética).

O seu autor e muitos outros cientistas da época encararam o modelo bastante a sério ao ponto de se terem realizado numerosos estudos quantitativos baseados nele. Viria, contudo, a ser questionado, por força dos resultados das experiências levadas a cabo por Marsden e Geiger e orientadas por Ernest Rutherford, de dispersão de partículas  $\alpha$  e  $\beta$  por finíssimas folhas metálicas. Estas experiências foram realizadas por volta de 1909, e conduziram, como é bem conhecido, ao estabelecimento do "átomo nuclear".

Como se disse, Nagaoka deslocou-se por esta altura (mais precisamente no último trimestre de 1910) à Europa, a fim de participar em duas conferências e visitar vários centros de investigação no Velho Continente, para melhor se inteirar dos progressos registados desde os seus tempos de estudante, cerca de quinze anos antes. O percurso de Nagaoka na Europa é conhecido com pormenor p. 13 e descrito minuciosamente numa extensa carta que escreveu a Rutherford, em Fevereiro de 1911. Nessa missiva, Nagaoka agradece cordialmente a hospitalidade de Rutherford durante a sua visita a Manchester e relata assim a impressão que lhe deixou o equipamento experimental que estava a ser utilizado nas experiências de dispersão de partículas  $\alpha$ :

"... todos mostraram grande admiração pelos resultados esplendidos obtidos com um equipamento tão simples. Parece-me que só um gênio pode lidar com sistemas tão simples e obter resultados tão importantes

---

**Refira-se que a descrição de agregados atômicos e metálicos — assunto da máxima atualidade, por onde passa hoje uma das fronteiras do conhecimento em Física da matéria condensada — considera habitualmente, como ponto de partida, o chamado "modelo de geleia". Segundo este modelo, os íons são descritos classicamente de forma aproximadamente igual ao átomo de Thomson, i.e. são porções esféricas de matéria homogênea com carga positiva.**

que ultrapassam os que são obtidos com equipamentos mais complexos e delicados."

E de crer que Nagaoka tenha aproveitado o seu encontro com Rutherford para lhe referir as suas velhas ideias sobre a estrutura do átomo. Na ocasião dessa visita a hipótese de um modelo nuclear estava já experimentalmente confirmada. O artigo "*The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Particles by Matter and the Structure of the Atom*", onde Rutherford desenvolve o seu modelo atômico, seria publicado em Maio de 1911 no *Philosophical Magazine* e aí Nagaoka aparece citado a propósito do modelo atômico de Saturno. Refira-se, entretanto, que já em Março desse mesmo ano Rutherford publicara a nota "*The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Rays and the Structure of the Atom*", nos *Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society*. Neste artigo, as ideias sobre a estrutura do átomo estavam já expostas claramente:

"...[considere-se] um tipo de átomo que consiste numa carga elétrica central concentrada num ponto, rodeada por uma distribuição esférica e uniforme de carga elétrica em quantidade igual mas de sinal contrário."

Note-se que o modelo de Rutherford já não era um simples modelo intuitivo, como foram os de Thomson ou Nagaoka. Havia uma experiência crucial que fundamentava o modelo de átomo nuclear. Saliente-se também que, ao longo deste século, a celebre experiência de Rutherford acabaria por ser "repetida" inúmeras vezes, agora noutros contextos, no estudo da estrutura da matéria. Na verdade, fazendo incidir matéria contra matéria, e analisando os efeitos de tais colisões, vão-se conhecendo cada vez melhor os constituintes dessa matéria. Para dar um exemplo, refiram-se as experiências realizadas em finais na década de 60 no *Stanford Linear Accelerator Center*, nos E.U.A., de dispersão inelástica profunda de elétrons por prótons, em estreita analogia com a dispersão de partículas alfa em finíssimas folhas de ouro, e que revelaram, pela primeira vez, a existência de quarks e a sua distribuição no interior dos bárions alvo. E refiram-se

também as experiências, já mais sofisticadas, de colisões em "voo", que diariamente se realizam nos aceleradores de partículas.

São conhecidos de todos os desenvolvimentos posteriores do modelo de Rutherford, levados a cabo por Bohr, e que culminaram no estabelecimento do "modelo planetário". Em Outubro de 1911, Niels Bohr, que concluíra o seu doutoramento em Copenhague, rumara a Inglaterra a fim de trabalhar com J.J. Thomson. Cedo, porém, acabaria por se mudar para Manchester para trabalhar no florescente laboratório de Rutherford na questão da estrutura do átomo, onde encontraria um ambiente muito mais aberto as suas "estranhas" ideias.

Os resultados do labor de Bohr seriam publicados no *Philosophical Magazine* numa série de três artigos, todos intitulados "On the Constitution of Atoms and Molecules", que apareceram em Julho, Setembro e Novembro de 1913 e a que alguém já chamou "Grande Trilogia". As ideias de Thomson sobre a constituição do átomo estavam tão implantadas que perduraram durante algum tempo. Atente-se, por exemplo, no fato de o modelo de Rutherford, apesar de ter uma base experimental sólida, quase não ter sido mencionado no famoso Congresso Solvay de 1911, que reuniu as maiores sumidades da época e onde, alias, Rutherford participou.

Bohr teve a amabilidade de enviar a Nagaoka os seus trabalhos sobre a constituição de átomos e moléculas. Em resposta, o físico japonês enviou-lhe um postal, datado de 27 de Dezembro de 1913, com o seguinte texto:

"Meu caro Senhor

Do coração lhe agradeço a amabilidade de me ter enviado vários trabalhos sobre a estrutura atômica; parece estar intimamente ligada com o átomo saturniano de que me ocupei ha cerca de 10 anos.

Seu

Nagaoka"

A Física estava a transpor um novo limiar e a geração seguinte havia de tomar o modelo de Bohr como ponto de partida para novas aventuras.

Sendo a ciência um grande empreendimento coletivo, o papel dos indivíduos e, por vezes, difícil de julgar.

Saber qual o impacto efetivo do modelo de Nagaoka exigiria uma investigação mais aprofundada. No entanto, fica este breve registo de um episódio pouco divulgado da história dos modelos atómicos que, de alguma forma, ilustra os mecanismos através dos quais se vai construindo o saber.

## BIBLIOGRAFIA

BADASH, Lawrence - "Nagaoka to Rutherford, 22 February 1911", *Physics Today*, Abril (1967)

BOHR, Niels - "*Sobre a constituição de átomos e moléculas*", tradução para português dos artigos originais publicados no "*Philosophical Magazine*" in "*Textos fundamentais de Física Moderna - II volume*", Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa (1969). Precedendo os artigos de Bohr o volume contém uma "introdução", escrita por Leon Rosenfeld, que começa justamente com uma referência relativamente extensa aos sistemas saturnianos.

CHADWICK, James (dir. científica) - "*The collected papers of Lord Rutherford of Nelson*", Vol. 2, George Allen & Unwin Ltd., Londres (1963)

HEILBRON, John L. - "J. J. Thomson and the Bohr atom", *Physics Today*, Abril 1977

HOLTON, Gerald - "*The thematic origins of scientific thought*", Harvard Uni. Press, Cambridge (Ma) (1988)

NAGAOKA, H. - "Kinetics of a System of Particles Illustrating the Line and the Band Spectrum and the Phenomena of Radioactivity", *Philosophical Magazine* 7 (1904) 445

ROSENFELD, Leon (Ed.), "*Niels Bohr collected works*", Vol. 1 e 2, North Holland, Amsterdam (1981)

SEGRÉ, E. - "*Les physiciens modernes et leurs decouverts*", Fayard, Paris (1983)

WEINBERG, Steven - "*The discovery of subatomic particles*", Freeman, Nova Iorque (1990)

TATON, Rene (dir. científico)- "*Histoire General des Sciences*", Torno III, Vol. 2, Presses Univ. de France (1964)

Manuel Fiolhais é Professor Auxiliar do Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra; Maria da Conceição Ruivo é Professora Associada na mesma instituição.

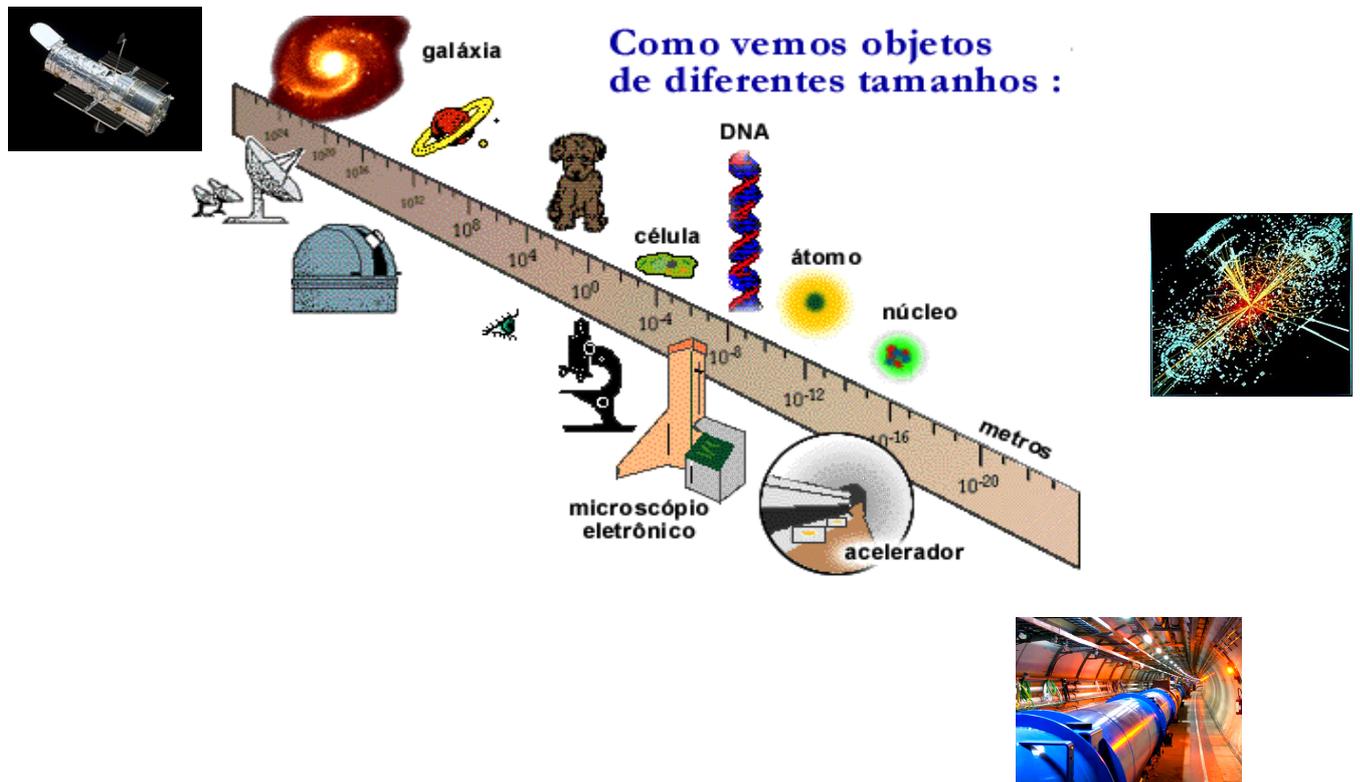
## ANEXO 2- Detectores de Radiação

Diferentes detectores são utilizados conforme a ordem de grandeza do objeto a ser observado.

A ilustração abaixo mostra a escala em metros e as diferentes formas de detecção.<sup>1</sup>



### Ordens de grandeza



O texto sobre Detectores de Radiação (abaixo reproduzido) faz parte do material utilizado por ocasião do curso de atualização de professores do ensino médio público do Estado de São Paulo, na Faculdade de Educação da USP. O material todo está disponível no endereço abaixo e o material de física atômica está em Partículas (

entrando no endereço os textos estão incluídos nos “resources” ou clique no mapa conceitual exatamente na atividade que se quer ver). O texto sobre detectores está no material complementar.

<http://cmap.atp.usp.br/rid=1L3XNSCQQ-HBCMBR-YP2/Nupic>

(veja anexo 9)

Desde que Galileu utilizou uma luneta para observar com mais detalhes os planetas vizinhos e a Lua a ciência tomou um rumo de experimentação para contrapor suposições teóricas com as observações experimentais correspondentes. Em particular a Física desenvolve-se de forma consistente com teóricos e experimentais trabalhando para estabelecer modelos que reproduzem observações feitas sistematicamente. Na física nuclear experimental detectores têm sido desenvolvidos ao longo do tempo de tal modo que seja possível estudar partículas diversas sistematicamente. Cada tipo de partícula interage com materiais de uma forma própria, que é utilizada para desenvolver detectores específicos.

### Detectores de cintilação

Rutherford e seus colaboradores, Geiger e Marsden, com muita dedicação, persistência e curiosidade extrema conseguiram medir a probabilidade de espalhamento de partículas alfa em função do ângulo de espalhamento, por diversos materiais, utilizando os próprios olhos como parte do detector de partículas. As partículas alfa produziam cintilações num filme de sulfeto de zinco colocado na extremidade de um microscópio acoplado à câmara de espalhamento. As cintilações foram cuidadosamente observadas para diferentes ângulos de espalhamento e contadas com o auxílio de um contador de eventos manualmente acionado.

Outra forma de identificar o tipo de partícula era o alcance das partículas em diferentes materiais. Uma partícula alfa não atravessa um

papelão grosso ao passo que partículas beta de altas energias assim como partículas gama e raios X podem atravessar.

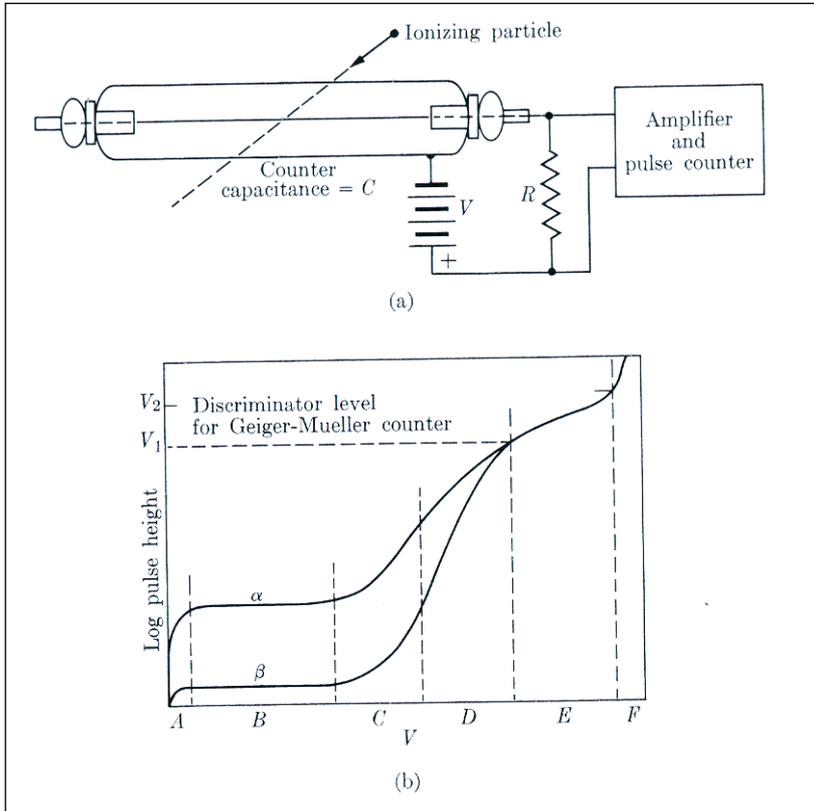
## Contador Geiger

Geiger deve ter sido o idealizador do detector que leva o seu nome até hoje amplamente utilizado como detector de partículas. Os detectores Geiger são muito versáteis e de fácil utilização embora não identifiquem que tipo de partícula se trata. Tanto raios X como raios gama e partículas  $\alpha$  ou  $\beta$  resultam no mesmo sinal elétrico, que são contados eletronicamente.

O contador Geiger é um detector a gás em baixa pressão dentro de um cilindro metálico dotado de um eletrodo central mantido em alta tensão e isolado do cilindro. Em detectores próprios para partículas  $\alpha$  e  $\beta$  numa das extremidades do cilindro fica a “janela” do detector que permite a entrada das partículas a serem detectadas. A “janela” era antigamente confeccionada de uma folha fina de mica, que pode ser separada, pois são encontradas na natureza por finas camadas superpostas, hoje em dia usa-se alguma substância plástica. A fonte de tensão não precisa ser muito especial, uma característica do Contador Geiger.

A figura abaixo, parte (a) mostra um detector a gás a baixa pressão acoplado a um sistema simples de amplificação necessário para o funcionamento desse tipo de detectores em regiões onde é possível a identificação das partículas. Como ilustrado na parte (b) da figura em detectores a gás existem várias regiões possíveis de operação. No eixo vertical estão representadas as alturas de pulsos em escala logarítmica. Na região A a altura de pulso é tipicamente da ordem de milivolts, na região B chega a ser de centena de vezes maior. Já na região Geiger chega a décimos de volts até uma dezena de volts. Na escala horizontal estão as altas tensões aplicadas entre o eletrodo central e a carcaça do detector. Para altas tensões relativamente baixas o detector funciona numa região em que é possível distinguir entre partículas  $\alpha$  e  $\beta$ , mas nessa região os pulsos elétricos são bem pequenos e são necessários amplificadores específicos para a sua operação ( região B). Em tensões um pouco mais altas ainda se pode identificar as partículas e os pulsos são um pouco maiores (região C e D). Depois vem

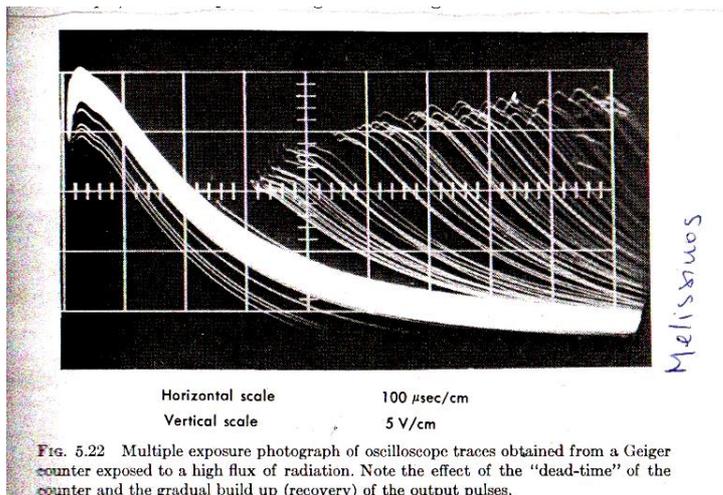
uma região em que todas as partículas  $\alpha$  e  $\beta$  tem a mesma altura de pulsos. Essa é a região Geiger que apresenta um plateau ( região E ) onde também raios X e raios gama apresentam a mesma altura de pulso.



Detector a gás em baixa pressão

Assim, o funcionamento do contador Geiger não depende drasticamente da estabilidade da fonte de tensão porque ele funciona numa região que apresenta um "plateau" denominado "plateau Geiger", isto é, dentro de uma certa região de alta tensão o comportamento do detector é exatamente o mesmo, qualquer partícula carregada produz uma ionização no gás que forma uma descarga no corpo todo do detector, de forma que um pulso de tensão é gerado pela coleção de cargas no eletrodo central, mantido em alta tensão. Os raios X ou os raios gama e as partículas  $\alpha$  e  $\beta$  produzem o mesmo sinal do detector Geiger como os traços vistos num osciloscópio conectado ao seu terminal. Nota-se o tempo morto do detector, intervalo no qual a altura do pulso não é recuperada imediatamente após a chegada de um evento. Na escala horizontal cada divisão

corresponde a  $100 \mu\text{s}$  e na escala vertical cada divisão corresponde a 5 volts. Cada pulso tem da ordem de 20 v, portanto fácil de ser medido. Depois que uma avalanche se forma dentro do contador demora da ordem de  $300 \mu\text{s}$  para conseguir detectar novamente como pode ser visto na tela do osciloscópio. Esse tempo necessário para a recuperação é denominado “tempo morto” do detector.



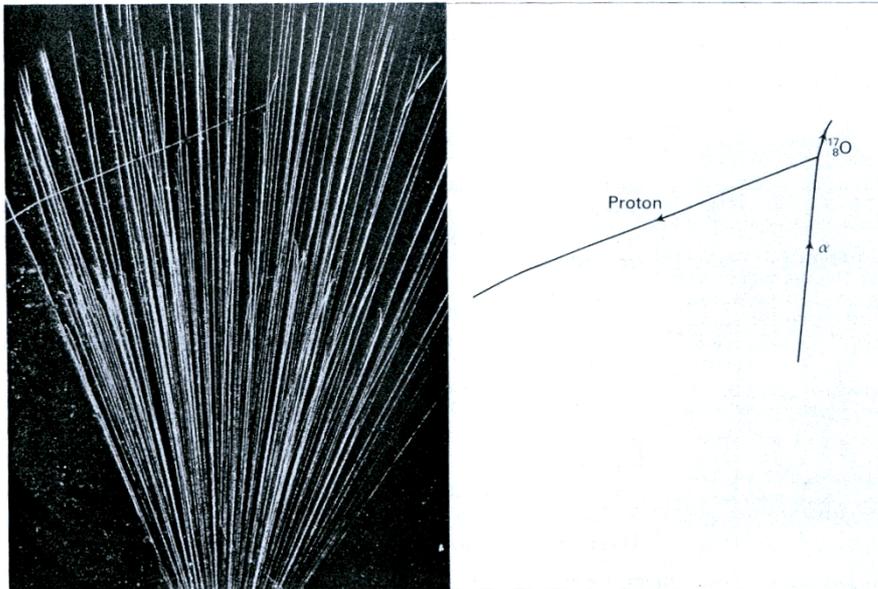
## Câmara de nuvens

Outra forma de detecção utilizada pelos cientistas do início do século XX é a câmara de nuvens, onde as partículas carregadas deixam um rastro conforme vai ionizando moléculas da “nuvem” de gás a baixa pressão.

Deve-se atentar para o fato que a observação a olho nu era de tal forma detalhista, que a descoberta do próton se deu exatamente porque Rutherford e colaboradores notaram que alguns pouquíssimos rastros observados numa câmara de nuvens eram muito mais finos do que as deixadas pelas partículas  $\alpha$  de uma fonte radioativa.

A perda de energia de partículas carregadas num material depende da energia, da carga e da massa da partícula incidente, bem como das propriedades desse material. Assim, um próton e uma partícula  $\alpha$  de mesma energia têm velocidades diferentes e a perda de energia diferente. A partícula mais pesada perde energia mais facilmente e seu

rastro é mais grosso que de uma partícula mais leve. Isso pode ser visto na foto abaixo.



A detecção do próton: Blackett, em 1932 no Laboratório de Cavendish

A figura acima mostra a detecção do próton: Blackett, em 1932, no Laboratório de Cavendish obteve numa reação nuclear de  $\alpha$  sobre nitrogênio, foto tirada de uma câmara de Wilson, ou "cloud chamber". Nitidamente se vê um traço do próton. Dá para ver que existem os traços de partículas  $\alpha$  de duas energias diferentes. Uma de baixa energia, rastros curtos e, outro grupo de alta energia, rastros longos. Por acaso houve uma reação e apenas uma!  $\alpha + {}^{14}\text{N} \rightarrow \text{p} + {}^{17}\text{O}$ . Dá para ver o traço do oxigênio saindo, como detalhado ao lado.

Marsden, aluno de Rutherford viu em 1917 esse mesmo traço longo e associou ao recuo de um átomo de hidrogênio, no espalhamento de  $\alpha$  por gás de hidrogênio, pois esses traços observados têm característica diferente dos traços de uma partícula  $\alpha$ . Rutherford intuiu que devia ser algo mais profundo, algo novo. Só em junho de 1919, Após quase três anos de experiências, Rutherford estava convencido que se tratava de desintegração do átomo de nitrogênio e que detectaram um próton. Muita dúvida foi colocada na identificação feita por Rutherford, que só foi aceita depois de muitas reproduções e confirmações.

Rutherford fez um estudo sistemático de alcance de partículas  $\alpha$  em diferentes gases utilizando um equipamento esquematizado abaixo.

Uma fonte radioativa de rádio (R) podia ser movimentada ao longo da câmara de modo que a distância entre a fonte radioativa e o anteparo fluorescente colocado em F podia ser alterada. Assim as partículas  $\alpha$  atravessavam uma distância medida externamente. A câmara era mantida numa pressão baixa do gás em estudo. Dessa forma Rutherford observou com nitrogênio como gás que quando a distância entre a fonte radioativa e o anteparo fluorescente atinge 7cm, incluindo nessa medida o equivalente de uma folha de prata que isolava a câmara da atmosfera externa, os rastros das partículas  $\alpha$  desapareciam bruscamente. Esporadicamente, entretanto, ele observou que existiam cintilações por uma distância superior a 40 cm, mas que partiam de qualquer lugar diferentemente das partículas  $\alpha$  provenientes da fonte  $\alpha$  localizada em R. E concluiu que era possível quebrar a estrutura nuclear do nitrogênio se usasse partículas  $\alpha$  de energia suficientemente alta. De início pensou que se tratava de hidrogênio sendo emitido do nitrogênio. Na verdade ocorre uma reação nuclear provocada pela partícula  $\alpha$



Detector semicondutor

Vocês já ouviram o som de um disco comum de 78 rotações em antigos amplificadores à válvula? Comparem com os modernos MP3 etc etc que já são feitos com circuitos integrados de diodos e transistores cada vez menores e de melhor qualidade... Se não conheceram, procurem saber com pessoas mais velhas que certamente sabem a diferença. Não é só o tamanho dos aparelhos que mudaram é também a qualidade e fidelidade dos equipamentos transistorizados (não os equipamentos digitalizados).

O nível de ruído de fundo diminui em muito, o que torna a reprodução mais fiel. O aperfeiçoamento correspondente em detectores de partículas é observado quando se compara um detector a gás tipo proporcional com um de barreira de superfície. Nos detectores a gás são necessários da ordem de 30eV para a criação de um par de íons. O conjunto dos pares deixados no gás do detector devidamente coletados forma o sinal elétrico, que traz a informação da energia da partícula. No caso de um detector semiconductor, como o de barreira de superfície necessita de apenas da ordem de 3 eV, o que certamente melhora a estatística<sup>3</sup> na formação de muitos pares resultando uma melhor resolução de energia, além de maior eficiência.

Os pares formados nos detectores semicondutores denominados genericamente de detectores de barreira de superfície ocorrem na região de contacto de dois semicondutores tipo p e tipo n. Nas vizinhanças dessa superfície forma-se a região de depleção onde as cargas livres do semiconductor se recombinam causando uma distribuição de carga como se fosse um capacitor através das cargas presas à rede cristalina como mostra figura 7. Essa região pode ser aumentada externamente através de polarização reversa de uma fonte de tensão auxiliar. Quanto maior a região de depleção maior será a região disponível para a detecção eficiente de energia e partículas de energia maior podem ser detectadas. Partículas carregadas são detectadas por esse tipo de detector com ampla vantagem em eficiência e resolução em energia. A boa resolução permite a diferenciação de grupos de partículas com energia bem próximas.

---

<sup>3</sup> A estatística tem como erro intrínseco o valor  $N^{1/2}$ , onde N é o número de eventos, neste caso representado pelo número de pares elétron-lacuna, o que afeta diretamente a resolução de um detector, pois a resolução está ligada ao erro relativo  $N^{1/2} / N$ , que diminui com N. Por outro lado, o número N de eventos está relacionado com a energia total da partícula detectada. (Para uma dada energia da partícula detectada o número de pares elétron-lacuna é muito maior que o número de pares íon positivo-elétron).

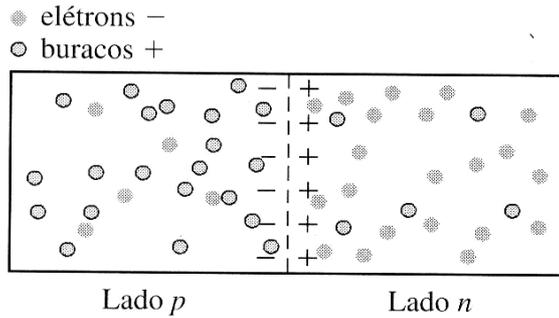


Figura 7- Na junção de dois semicondutores *junção pn*, do lado *p* ficam presos na rede cargas negativas e do lado *n* cargas positivas como mostra a figura. Aparece assim uma região com uma diferença de potencial, é a *região de depleção*, como se fosse um capacitor. Essa região pode ser aumentada por polarização externa reversa ou diminuída pela polarização externa direta. Entende-se assim o comportamento assimétrico do diodo que é uma junção *pn*, quando se aplica uma polarização externa.

O termo barreira de superfície vem do fato que esses detectores são fabricados com a face dianteira como área sensível, de modo que apenas uma superfície delgada de um dos semicondutores é colocada em contato com o semiconductor do outro tipo, esse sim com espessura suficiente para detectar adequadamente a partícula carregada. A descontinuidade da superfície delgada produz a região de depleção. A face sensível do detector deve ser suficientemente delgada a fim de evitar perda de energia desnecessária, que afetaria a sua definição, o que é obtido por essa geometria adequada. A figura 11 mostra fotos de detectores de barreira de superfície, do lado esquerdo um detector de 2000 e à direita um de 1960.

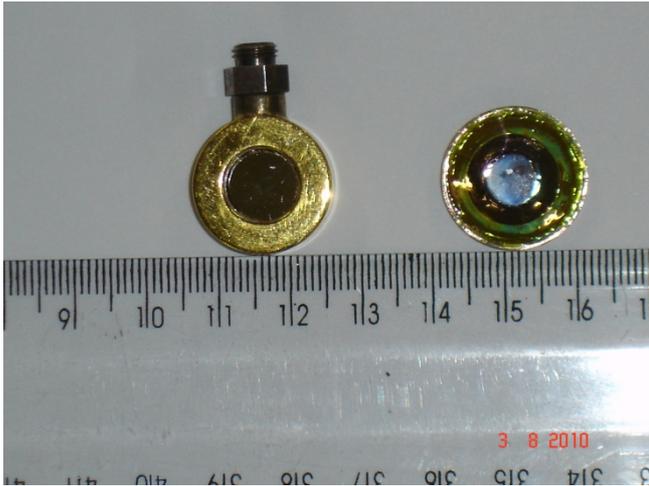


Ilustração 58- fotos de detectores de barreira de superfície comerciais.

Partículas carregadas ( prótons, partículas alfa, elétrons) que incidem na face dos detectores perdem energia na região de depleção e formam um número grande de pares elétron lacuna, que por sua vez, uma vez coletados, formam um pulso elétrico cuja altura é proporcional à energia depositada. Esse pulso da ordem de milivolts é devidamente amplificado e analisado com circuitos eletrônicos apropriados, digitalizados e armazenados em computadores para análise posterior.

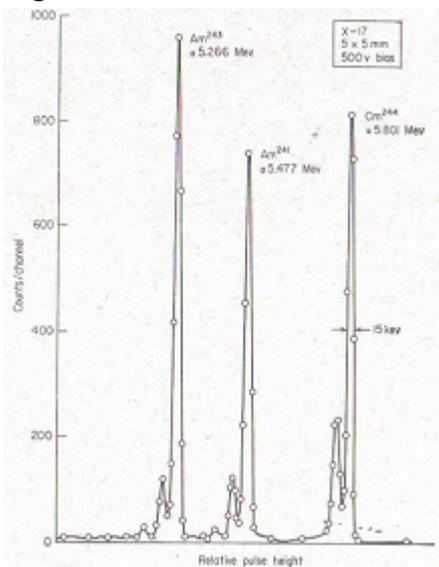


Fig. 8-24 Illustration of high resolution obtained in alpha-spectrometry application. Taken with surface-barrier detector of 25 mm<sup>2</sup> area, operated at room temperature. (From J. L. Blankenship and C. J. Borkowski, *IRE Trans. on Nuclear Sci.*, NS-8 (no. 1): 19 (1961).

Ilustração xx- Espectro de energia de várias fontes □ a fim de ilustrar a alta resolução em energia apresentada por detectores semicondutores (Price, página 252).

Partículas carregadas positivamente são detectadas em detectores semicondutores de silício dopados, enquanto radiação X e gama são detectadas pelos elétrons do efeito fotoelétrico em detectores de germânio-lítio. Sendo produtos do efeito foto-elétrico as energias dos fotoelétrons são praticamente iguais à energia dos raios X ou raios gama incidentes.

A figura abaixo mostra um quadro sendo “iluminado” (veja um pontinho verde) por um feixe de partículas submetido à análise pelo método denominado PIXE ( Particle Induced X rays Emission) . Os raios X característicos emitidos pelos diferentes átomos, que compõem a tinta, sob ação das partículas incidentes estão identificados no espectro em energia sobreposto ao quadro.

Raios X e Gama podem ser detectados por detectores de Ge-Li. O detector de germânio lítio também é detector semicondutor e os elétrons do efeito fotoelétrico, que tem energia bem próxima da energia total do raio X ou do Gama produzem espectros de energia bem característicos. Uma vez feita a calibração com fontes padrões, o sistema permite a identificação das radiações com grande precisão.

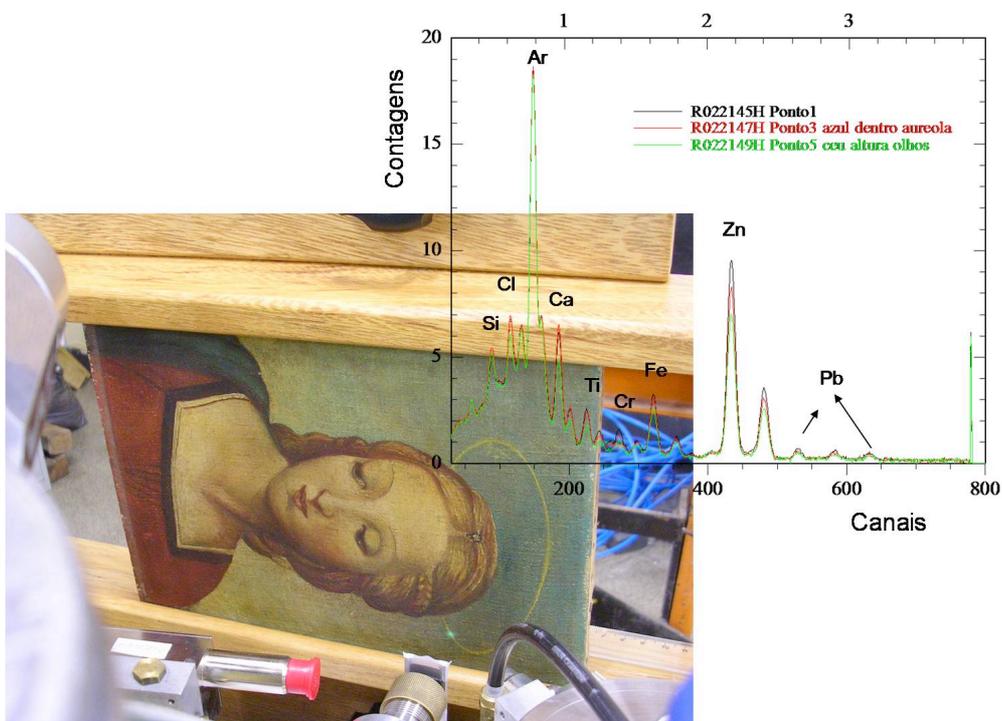


Ilustração xx- Quadro sendo irradiado por um feixe de partículas  $\alpha$  ( veja a marca do feixe: um pontinho iluminado no quadro) e o espectro PIXE resultante. Note as identificações dos elementos da composição das tintas utilizadas na pintura. Este teste não danifica o quadro.

Detector de cintilação de NaI Tl.

### 1-Interação da radiação com a matéria

Partículas carregadas interagem com a matéria principalmente via ionização. O campo eletromagnético da partícula alfa ou da partícula beta ao atingir a superfície interage com o campo dos átomos do material causando perdas de energia da partícula incidente por ionizações sucessivas. Enquanto a houver energia suficiente a partícula penetra no material causando ionizações.

Já ondas eletromagnéticas como os raios X e raios gama perdem energia por outros processos como:

Efeito fotoelétrico

Efeito Compton

Produção de pares.

No efeito fotoelétrico, a radiação incidente arranca um elétron ligado do átomo que se torna um elétron livre, com energia cinética igual à energia inicial da onda eletromagnética menos a energia de ligação do elétron no átomo. Esse elétron livre por sua vez pode caminhar dentro do material perdendo energia por ionização sucessiva.

No efeito Compton, a radiação incidente é espalhada pelo átomo (pelo campo eletromagnético do átomo) gerando um elétron livre e uma outra radiação eletromagnética. A energia inicial da onda eletromagnética é dividida entre o elétron que se torna livre e uma radiação eletromagnética de energia menos que a incidente. Há conservação de energia e de quantidade de movimento. Assim conforme o ângulo de saída do elétron, a radiação eletromagnética correspondente terá energia e ângulo de emissão de acordo com as regras de conservação. O efeito Compton ocorre com elétrons pouco ligados ao átomo, ao contrário do efeito fotoelétrico que se dá com os elétrons mais ligados.

Se a energia da radiação for maior que a de dois elétrons, isto é, maior que 1,022 MeV (cada elétron corresponde a 0,511 MeV) pode haver a criação de um par elétron pósitron. A energia excedente é distribuída igualmente entre o elétron e o pósitron como energia cinética.

Em todos os casos valem as leis de conservação de energia e de quantidade de movimento.

## 2- Detector de NaI de raios gama e raios X

No item 7 do material complementar está mostrado como diferentes materiais são afetados pela interação com a radiação gama. No caso dos detectores de iodeto de sódio NaI mostrados abaixo as secções de

choque relativas aos três efeitos efeito foto elétrico, efeito Compton e produção de pares conforme o gráfico abaixo.



From Wikipedia, the free encyclopedia

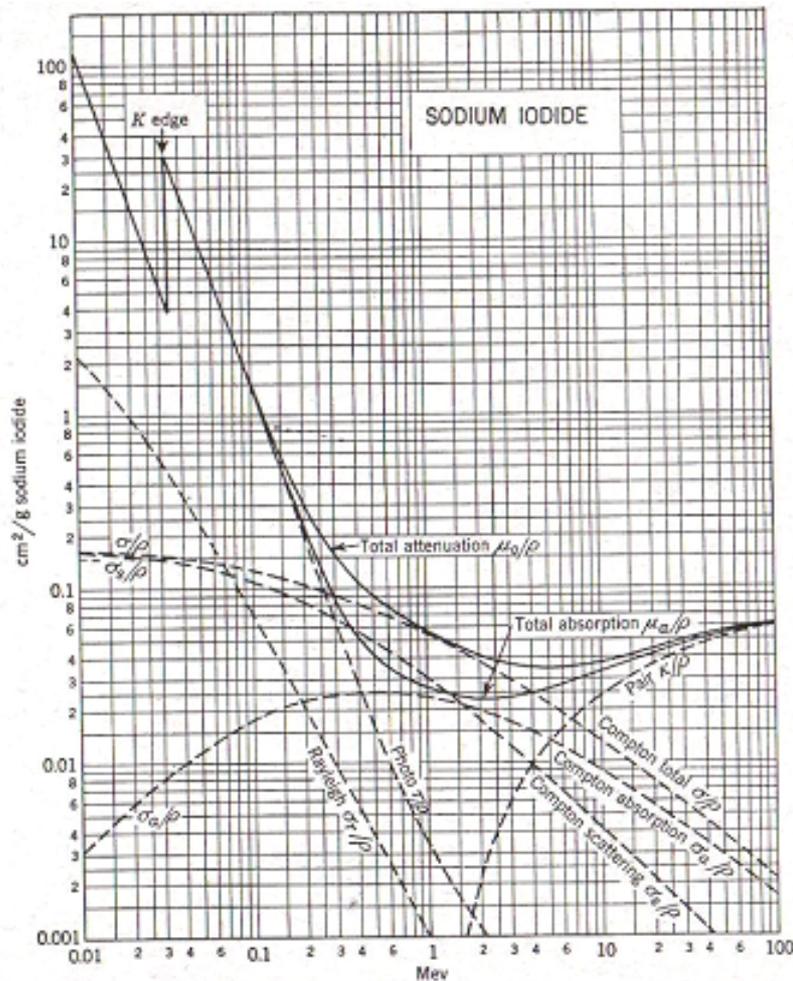


Fig. 1.6 Mass attenuation coefficients for sodium iodide. The individual curves have the same significance as in Fig. 1.2 and were computed from tables of atomic cross sections prepared by G. R. White (W38). Additionally, the "Compton total" attenuation coefficient  $(\sigma/\rho) = (\sigma_a/\rho) + (\sigma_s/\rho)$  is shown explicitly, because of its usefulness in predicting the behavior of NaI scintillators. Linear attenuation coefficients for NaI may be obtained using  $\rho = 3.67 \text{ g/cm}^3 \text{ NaI}$ .

Ilustração 54- Coeficientes de atenuação de um detector de NaI ( Fig. 1.6 Evans)

Podemos distinguir que em baixas energias, de dezenas a uma centena de eV predomina a interação por efeito fotoelétrico. Já para energia de duzentos eV há uma considerável contribuição de efeito Compton. Para energias maiores que 1,5 MeV começa também a haver contribuição da produção de pares. Dentro do cristal de NaI dopado com Tl os elétrons provenientes das interações dos raios gama perdem

energia causando cintilações em número proporcional à perda de energia.

O cristal é montado numa fotomultiplicadora com uma resina especial que transmite a luminosidade para o foto catodo da fotomultiplicadora. A luminosidade é novamente transformada em elétrons e a fotomultiplicadora amplifica o sinal elétrico sucessivamente nos dinodos. A fotomultiplicadora deve ser alimentada por uma fonte de tensão que polariza os vários dinodos, de modo que a multiplicação de elétrons ocorra sucessivamente até atingir o anodo onde o sinal elétrico é coletado para posterior amplificação e análise.

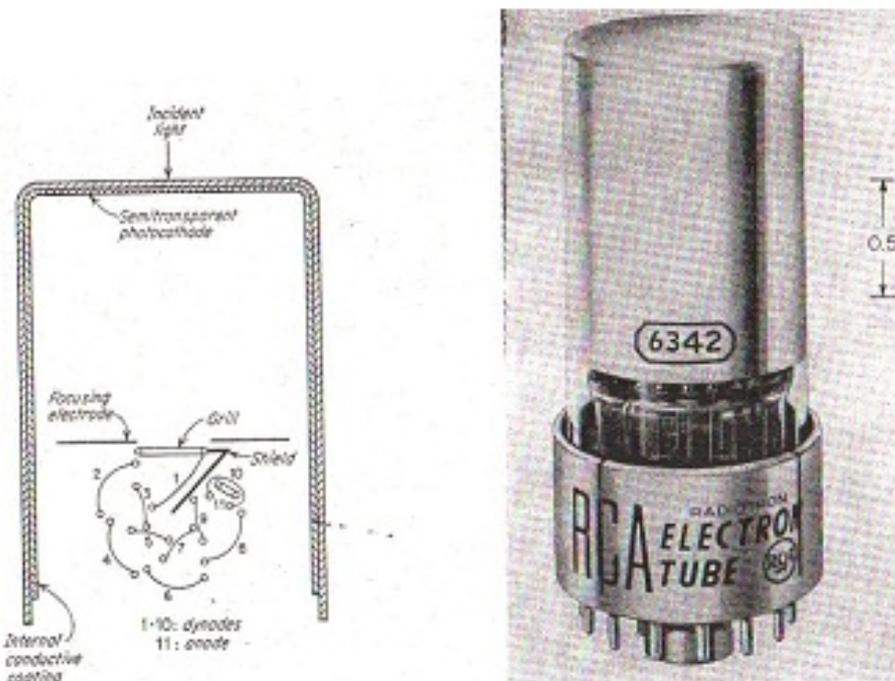


Fig. 7-8 Photomultiplier tube RCA 6342; schematic diagram and photograph; circularly focused dynode structure. (From G. A. Morton, "Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy," vol. 14, p. 246, United Nations, New York, 1956; photograph courtesy of RCA.)

Ilustração xx- esquema de uma fotomultiplicadora e foto de uma fotomultiplicadora comercial muito utilizada (Fig.7.8 Price)<sup>4</sup>.

Assim um detector de NaI apresenta as características na distribuição das alturas de pulso elétrico detectadas e amplificadas, como pode ser

---

<sup>4</sup> Price, Nuclear Radiation Detection, Mc Graw-Hill, 1964.

visto no espectro típico de uma fonte de cobalto ( Melissinos pagina 198) e da fonte de cézio ( Melissinos pagina 199)<sup>5</sup> mostradas abaixo.

Em geral o sistema eletrônico de análise dos pulsos dos detectores é constituído de um pré- amplificador, um amplificador e um analisador de altura de pulsos ou um multicanal.

A calibração do sistema de detecção é feita usando o mesmo arranjo eletrônico para armazenar, por exemplo, esses dois espectros o de cézio cujo foto pico corresponde a 660 keV e o de cobalto que corresponde a energia de 1,17 MeV e 1,33MeV. A altura dos pulsos correspondentes a esses eventos é proporcional à energia dos elétrons e os dados são armazenados num analisador multicanal conforme os intervalos de discriminação, que estão representados no eixo horizontal dos espectros mostrados. A cada nível de discriminação corresponde um canal do multicanal. Assim a cada energia do foto pico corresponde um canal do multicanal, que por sua vez corresponde a uma energia. Constrói-se assim uma curva de calibração canal do multicanal-energia do foto pico, em geral representada por uma reta.

Os eixos horizontais correspondem à energia depositada no cristal e no eixo vertical está mostrado o número de contagens correspondentes a cada energia.

Vemos claramente um pico no espectro do cézio que corresponde ao pico do efeito fotoelétrico, e em energias menores pode-se ver um "patamar" que corresponde ao efeito Compton. Os elétrons produzidos dentro do cristal perdem energia causando cintilações nos átomos do cristal de NaI dopado com tálio. Quanto maior a energia cinética do elétron, maior o número de cintilações. Essas cintilações são captadas por uma fotomultiplicadora, que converte essas luzinhas em impulso elétrico proporcional, que então é eletronicamente amplificado e enviado a um analisador multi-canal. A cada canal do analisador corresponde uma energia. Os eventos de cada energia são, assim, armazenados ao longo de uma aquisição de dados experimentais.

---

<sup>5</sup> Melissinos, *Experiments in Modern Physics*, Academic Press,1966.

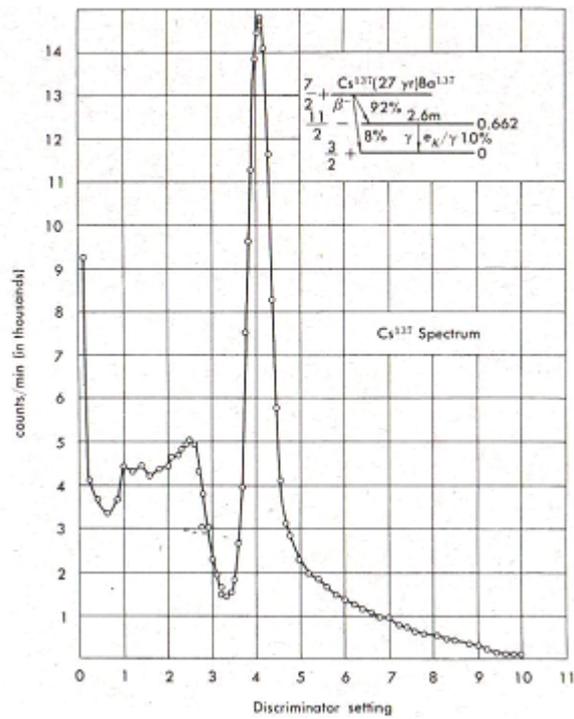


Ilustração xx- Espectro em energia de uma fonte radioativa de  $^{137}\text{Cs}$  obtida com um detector de NaI.

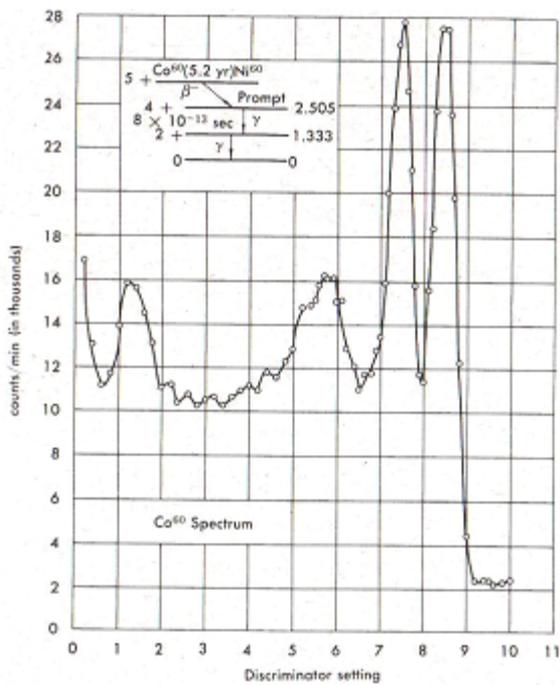


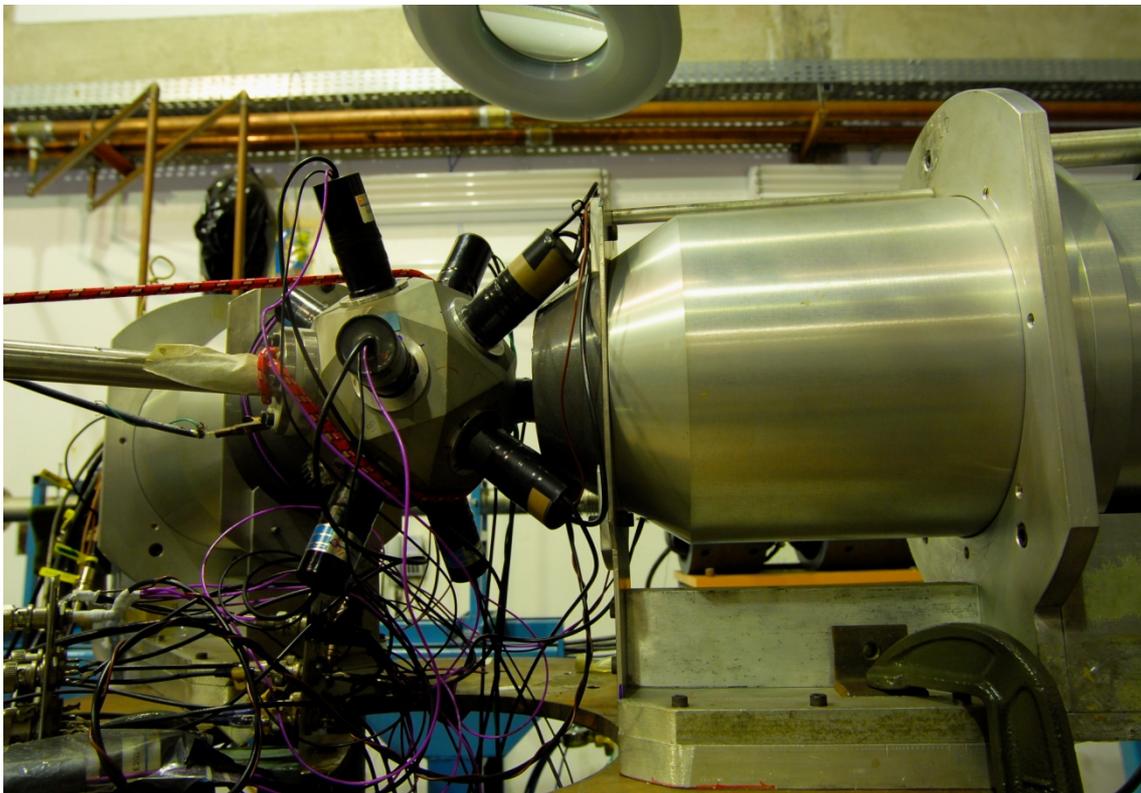
Ilustração xx- Espectro em energia de uma fonte de  $^{60}\text{Co}$  obtida com detector de NaI.

No caso do cobalto 60, são vistos dois picos bem definidos que correspondem aos picos do efeito fotoelétrico e um “patamar” contínuo do efeito Compton sobrepostos a um pico de retro espalhamento dos raios gama entre as abcissas indicadas por 1 e 2 do nível de discriminação. O esquema de decaimento do  $^{60}\text{Co}$  para o  $^{60}\text{Ni}$  por decaimento beta e posterior emissão dos raios gama em cascata está mostrado na figura. Os raios gama são de 1,33 MeV e 1,17 MeV, que são as energias atribuídas aos picos do efeito fotoelétrico, uma vez que a energia de ligação do elétron emitido perdida pelo raio gama é desprezível.

Notem que no espectro do césio o pico de retro espalhamento está sobreposto a uma elevação típica correspondente ao efeito Compton, isto é o “patamar” do efeito Compton tem uma elevação característica.

Tendo efetuada a calibração do sistema detector pode-se medir radiações gama desconhecidas e determinar a energia correspondente aos fotopicos correspondentes.

Na figura abaixo vemos o sistema de detecção de raios gama na sala experimental do Acelerador Pelletron. Várias fotomultiplicadoras e um detector de Germânio-Lítio (GeLi) estão posicionados para detecção simultânea dos produtos da reação nuclear estudada.



## Identificação de partículas carregadas. Baixas energias.

A identificação de partículas carregadas em física nuclear de baixas energias pode ser feita utilizando dois detectores de barreira de superfície em conjunto, colocados um após o outro de modo que no primeiro detector as partículas perdem apenas parte da sua energia e no segundo detector perde o restante da energia. Existem detectores apropriados para essa finalidade, de modo que toda energia perdida no detector é transformada em impulso elétrico proporcional permitindo assim a medição de toda energia deixada no conjunto de detectores com o auxílio de aparelhos eletrônicos. Partículas com maior massa perdem energia mais facilmente do que aquelas mais leves, de modo que elas deixam maior quantidade de energia no primeiro detector. A aquisição dos dados é feita de modo que seja possível obter tanto a energia deixada no primeiro detector (massa) como a energia total. Dessa forma fica evidenciada tanto a massa como a energia da partícula detectada.

Antigamente, observando os traços deixados pelas diferentes partículas também levando em consideração a facilidade de perda de energia, pesquisadores como Rutherford e colaboradores identificaram traços diferentes dos das partículas alfa, posteriormente identificados como provenientes de prótons até então desconhecidos. Traços mais finos, devidos aos prótons foram inicialmente identificados como sendo de hidrogênio.

Desenho ou foto de espectro bi  $\square$  ExE.

## Detectores pixel

Em altas energias como nas pesquisas realizadas no LHC (Large Hadron Collider) do CERN os detectores são compostos de várias camadas a fim de possibilitar a identificação das partículas produzidas no centro do detector na colisão entre dois feixes. Basicamente é necessário conhecer a massa, a carga, a energia, além de outras qualidades como spin e paridade, que são propriedades quânticas para identificar uma partícula. As três primeiras características são obtidas diretamente medindo a perda de energia, a trajetória dentro de campos magnéticos ou elétricos previamente calibrados e o alcance ou a energia total liberada dentro do detector. Cada detector do LHC é constituído por camadas diferentes apropriadas para cada finalidade e descrito em outro texto XXX. Uma das camadas é constituída de detectores denominados por “pixel”, que descreveremos a seguir.

O termo “pixel” está difundido no cotidiano tanto em aparelhos de televisão como em máquinas fotográficas, mas a função de um pixel num detector de partículas difere da de uma máquina fotográfica. A semelhança está no fato de serem pequenos dispositivos semicondutores montados adequadamente para a sua finalidade específica.

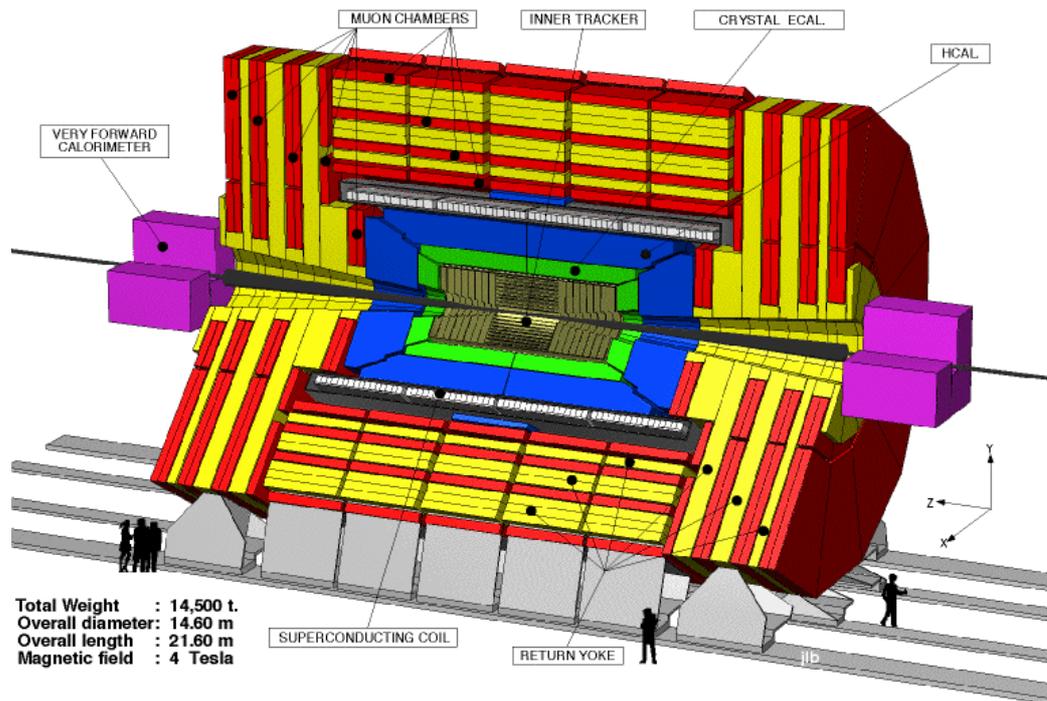
Numa máquina fotográfica os pixels ficam montados numa área na qual chega focalizada a luz refletida proveniente do objeto que está sendo fotografado. Quanto menor for cada pixel maior será a resolução

conseguida na fotografia. Numa fotografia convencional o sensor de luminosidade é composto de moléculas contendo prata. O feixe de luz incidente produz em cada dispositivo um sinal elétrico proporcional à sua intensidade luminosa. A disposição bidimensional dessas luminosidades processadas e reproduzidas numa tela compõe a fotografia.

Outra diferença fundamental é que num pixel de uma máquina fotográfica chegam fótons com alguns eV de energia ao passo que num detector de altas energias cada partícula tem energia de algumas centenas de milhões de eV e podem chegar a centenas de bilhões de eV! Espera-se que a vida útil desses detectores apesar de tudo seja de muitos anos!

Nos detectores ATLAS e CMS do LHC os pixels estão dispostos em camadas subseqüentes e formam um invólucro completo em torno do centro da colisão entre dois feixes e foram projetados para armazenar a informação da trajetória da partícula detectada. Cada partícula que atravessa um pixel deixa vários pares de elétron-lacuna que são atraídos por campos elétricos e conduzidos para circuitos eletrônicos. Em cada pixel de 0,05mm por 0,4mm existe um contacto bidimensional eletrônico acoplado a um sistema de armazenamento ultra-rápido da informação, uma vez que o detector deve estar disponível para outros eventos subseqüentes. O instante correspondente a cada evento é também registrado de modo que seja possível a análise posterior de eventos específicos. Uma trajetória deve ser identificada, reconstruída e analisada. Pode-se imaginar a dificuldade dos programas de computação necessários para que essa informação toda possa ficar convenientemente disponível para análise "off-line", bem como a necessidade de enorme memória de computador!

A figura abaixo ilustra como é constituído internamente o detector CMS do LHC. Alguns detalhes podem ser vistos em outro texto XXX. Várias camadas de detectores que medem diferentes parâmetros são sobrepostos a fim de se obter a identificação da partícula correspondente ao evento. Pode-se ver uma camada denominada "Inner Tracker", que é onde se armazena toda informação sobre as trajetórias das partículas detectadas.



Esses detectores dotados de pixels são utilizados para medir momentum de partículas o que é feito com a determinação da trajetória das partículas e posterior identificação dos parâmetros necessários como massa e energia.

A forma como definimos momentum  $p$  na cinemática não relativística é simplesmente

$$p = mv ,$$

onde  $m$  é a massa da partícula e  $v$  a sua velocidade. Classicamente o momentum está relacionado diretamente à energia do movimento. A relação entre energia e momentum relativisticamente é, entretanto,

$$E^2 = p^2c^2 + m^2 c^4 \quad \text{sendo } c \text{ a velocidade da luz.}$$

A interpretação dessa fórmula da energia total pode ser simplificada atribuindo ao primeiro termo como o devido ao movimento da partícula e o segundo como o devido à sua massa.

Para determinar o momentum de uma partícula os detectores do LHC possuem um campo magnético produzido por solenóides magnéticos cujo campo uniforme tem a direção do feixe de partículas. Supondo que o campo magnético está entrando na folha de papel, uma partícula ejetada com velocidade  $v$  sentirá uma força  $F$  como mostra a fórmula abaixo, onde os negritos indicam grandezas vetoriais.

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}),$$

Essa força fará com que a partícula seja desviada de acordo com a sua massa e sua carga de uma determinada forma. Os detectores são formados por camadas concêntricas de modo que a trajetória de uma partícula positiva pode ter a forma ilustrada ao lado. Uma partícula com momentum maior teria que se curvar menos. A partícula deixará sinais elétricos armazenados no computador correspondentes aos pontos desenhados na figura de baixo em cada camada do detector. A reconstituição da trajetória feita por computação utilizando os sinais elétricos armazenados permite sugerir a trajetória provável da partícula bem próxima da trajetória real da partícula estudada.

Essa descrição dá uma vaga idéia do trabalho de computação envolvido na análise dos dados colhidos em cada evento que ocorre entre os feixes que colidem a cada intervalo de tempo no centro do detector. Cada detector tem dimensões enormes e é composto de muitas camadas e não apenas as três camadas usadas na explicação acima. A seqüência temporal dos sinais elétricos também precisa ser considerada corretamente. O ponto de origem dos sinais é determinado através da análise.

A determinação da energia da partícula é feita na camada denominada calorímetro, onde a partícula deposita a sua energia remanescente interagindo com a sua estrutura. Uma forma possível de compreender o funcionamento pode ser figurativamente representada como segue: se uma partícula se espatifa sobre um grande bloco de metal e depois se extraem todas as vibrações dos átomos do metal causadas pelo choque de alguma forma detectável traduzidas em sinais elétricos. Um calorímetro é feito de grandes blocos de metal que de alguma forma absorve parte da energia das partículas e a transforma em sinal elétrico, mas consegue “saber” quanta energia havia na partícula inicialmente. Tudo isso depende do procedimento feito durante a calibração dos detectores. Assim o calorímetro é uma parte do detector que mede a energia da partícula e a absorve; em contraste, o “tracker” o detector da trajetória mede o momentum da partícula e o deixa passar. O calorímetro e o “tracker” permitem a medida da informação completa da equação

$$E^2 = p^2c^2 + m^2 c^4.$$

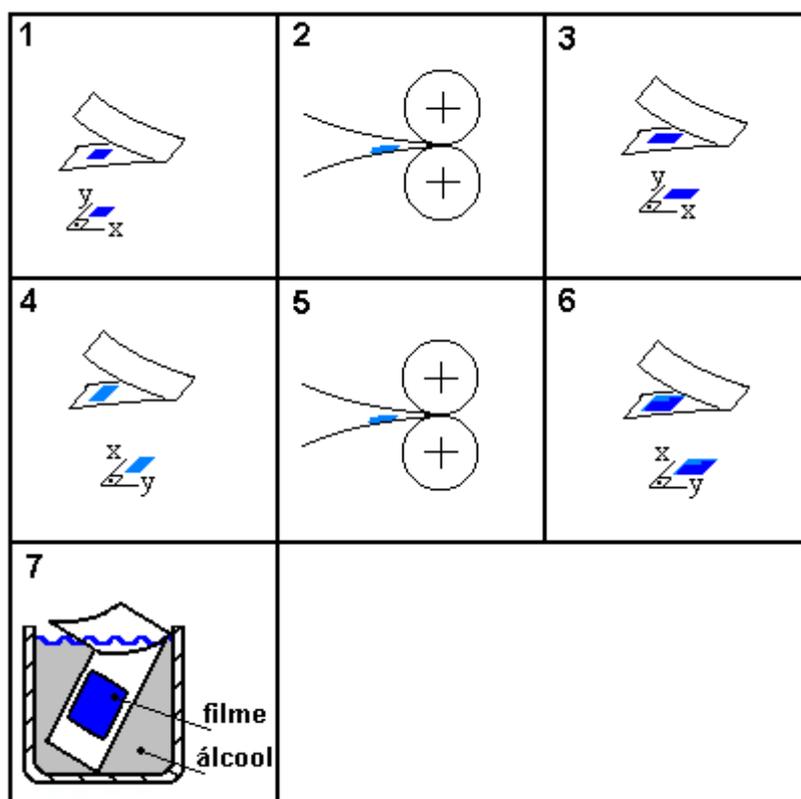
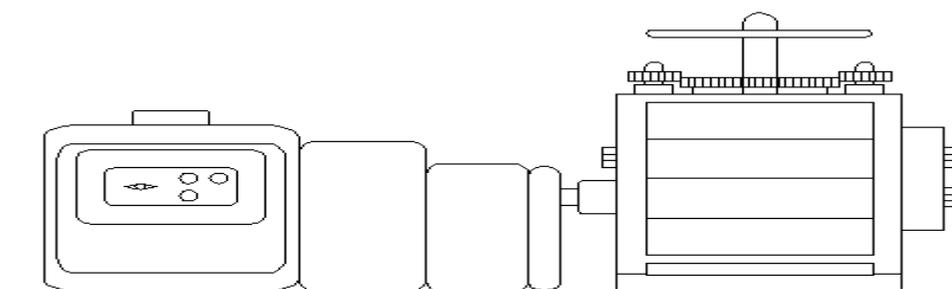
## Anexo 3

### Alvos nucleares

Na época de Rutherford provavelmente os alvos foram feitos partindo de fios metálicos e prensando até formar uma folha fina e razoavelmente uniforme de material. Partículas alfa de 5 MeV em pressão atmosférica tem um alcance de apenas da ordem de 4 a 5 cm. Assim a câmara de espalhamento deve ser mantida em vácuo e a folha metálica usada deve ser relativamente fina. Hoje em dia, filmes finos utilizados em aceleradores nucleares são de espessuras desde alguns microgramas por centímetro quadrado até da ordem de miligramas por centímetro quadrado. Existem vários métodos de confecção de alvos nucleares e os que são utilizados no Laboratório de Alvos do acelerador Pelletron podem ser consultados numa apostila.

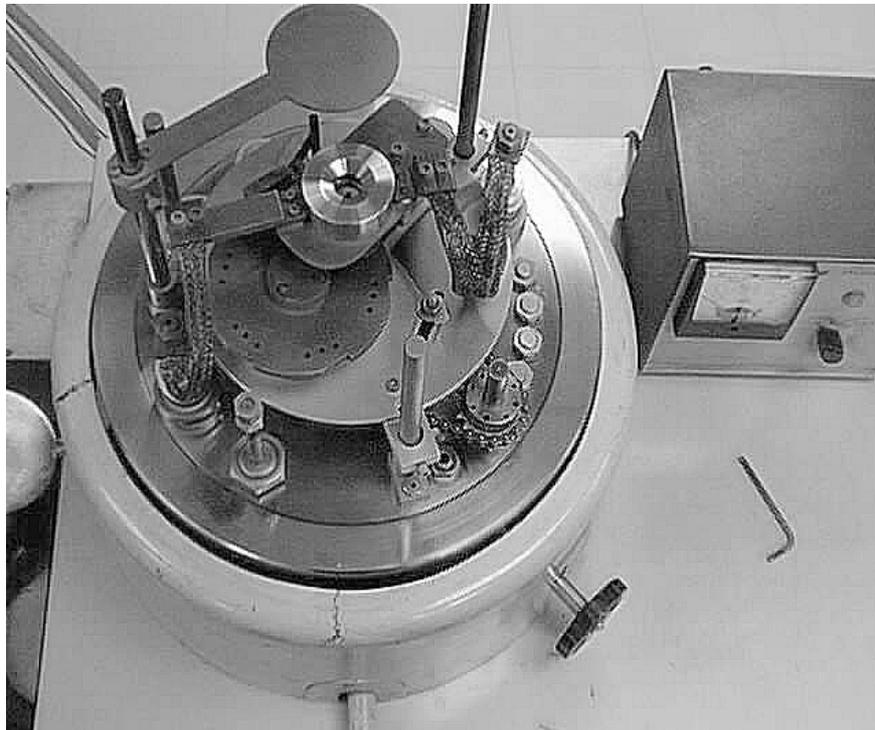
Em geral são utilizados materiais de alta pureza isotópica a fim de se conseguir exatamente o núcleo em questão. Apenas testes preliminares do método de confecção são efetuados com material natural, pois materiais de pureza isotópica são importados e caros. Pequenas mudanças de comportamento durante a confecção são geralmente observadas até entre isótopos diferentes de um mesmo material.

Filmes da ordem de miligramas por centímetro quadrado podem ser confeccionados pelo método de "rolling" utilizando um equipamento parecido com as de fazer massa de pastel ou macarrão, mas com a possibilidade de imprimir alta pressão entre os dois rolos. Filmes metálicos são produzidos iniciando com um fio ou com uma placa de metal, que é introduzido entre os rolos compressores. O sistema é acoplado a um motor elétrico de baixa rotação. O pedaço de metal é colocado entre duas placas de tântalo para evitar a adesão do material nos rolos. Uma vez passado entre os rolos é necessário virar o material para que a compressão seja feita uniformemente. O filme é solto por imersão em álcool.



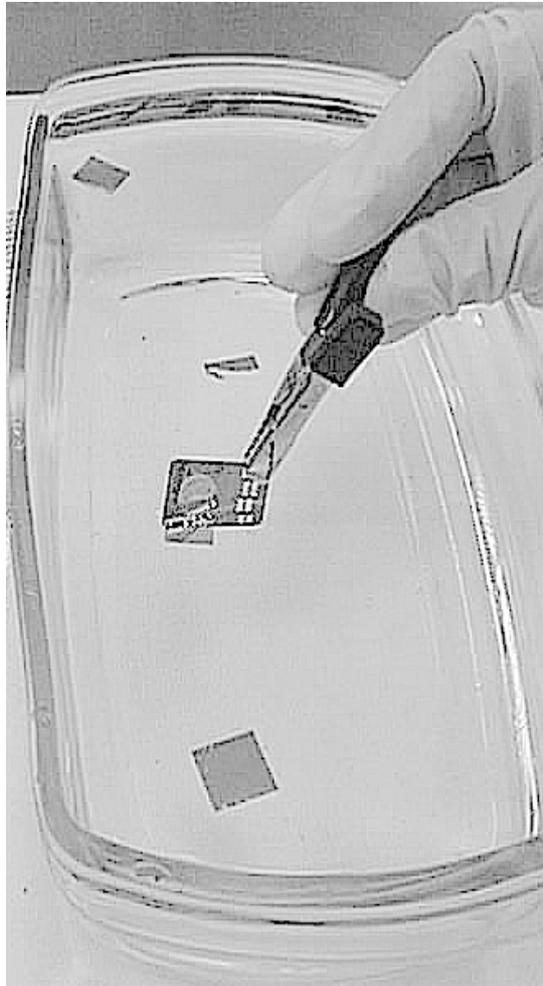
Filmes da ordem de microgramas por centímetro quadrado são confeccionados por evaporação em vácuo. Nesse caso utiliza-se uma unidade evaporadora como a mostrada abaixo. A evaporação é colhida sobre lâminas de microscópio previamente preparadas com uma camada de agente solúvel em água. Dessa forma o filme depois é

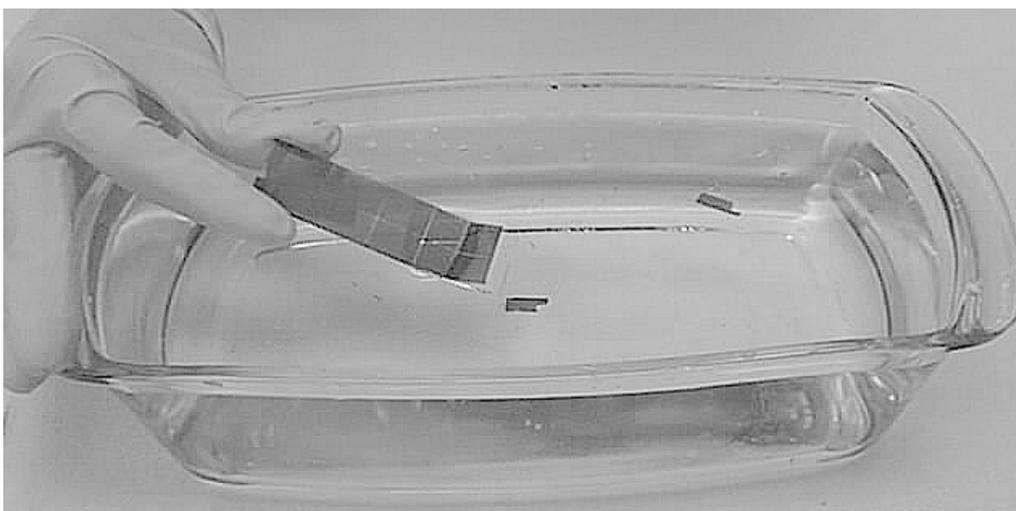
solto mergulhando a lâmina em água. Nas figuras abaixo estão mostradas filmes de carbono da ordem de 5 microgramas por centímetro quadrado. Esses filmes são os usados na troca de carga do



feixe iônico do acelerador. Outros métodos de evaporação estão descritos na apostila acima mencionada.







Fotos tiradas por Wanda P. Engel e José Carlos de Abreu a quem agradecemos.

#### Anexo 4

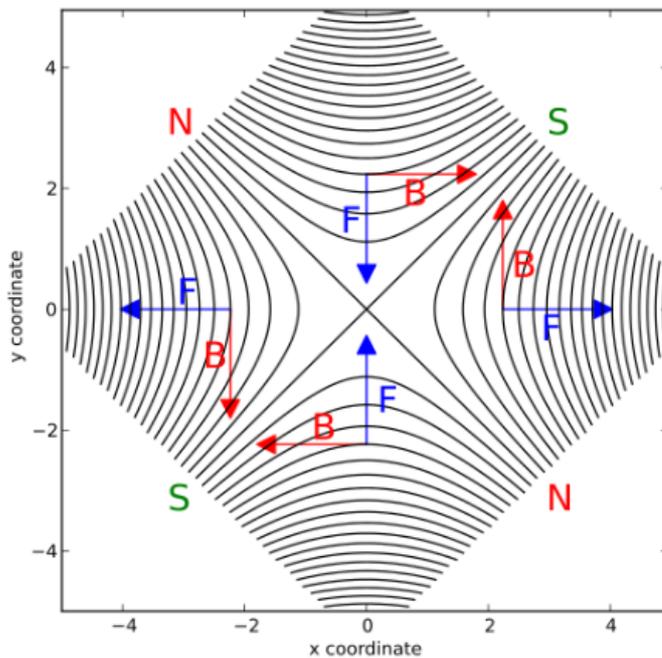
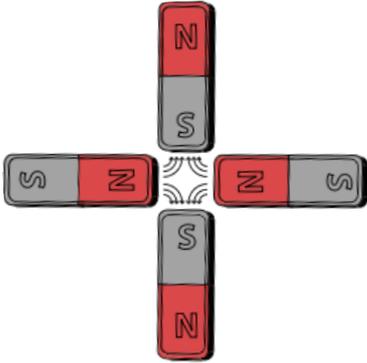
#### Quadrupolos magnéticos

A focalização de um feixe iônico pode ser obtida num quadrupolo, através de campos magnéticos gerados por eletroímãs cujas correntes podem ser ajustadas convenientemente. A disposição dos pólos magnéticos define a direção de desvio do feixe. Usa-se a disposição dos pólos de modo que haja uma concentração dos íons que estejam se desviando do eixo central da canalização. Usam-se sempre pares de quadrupolos, um deles concentra o feixe na direção horizontal e o outro na direção vertical, fazendo com que o feixe fique com um formato próximo ao de um cilindro.

Uma carga elétrica  $q$  sujeita a um campo elétrico  $E$  e um campo magnético  $B$  está sujeita a uma força  $F$  dada pela relação abaixo usando a notação vetorial:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}),$$

Um feixe de íons de carga elétrica  $q$ , com velocidade  $v$  e sob ação de um campo magnético  $B$  é defletido pela ação de uma força magnética  $F_{\text{mag}}$  cuja direção é dada dependendo das direções da velocidade  $v$  e do campo magnético  $B$ . Apenas a parte magnética vale nesse caso.



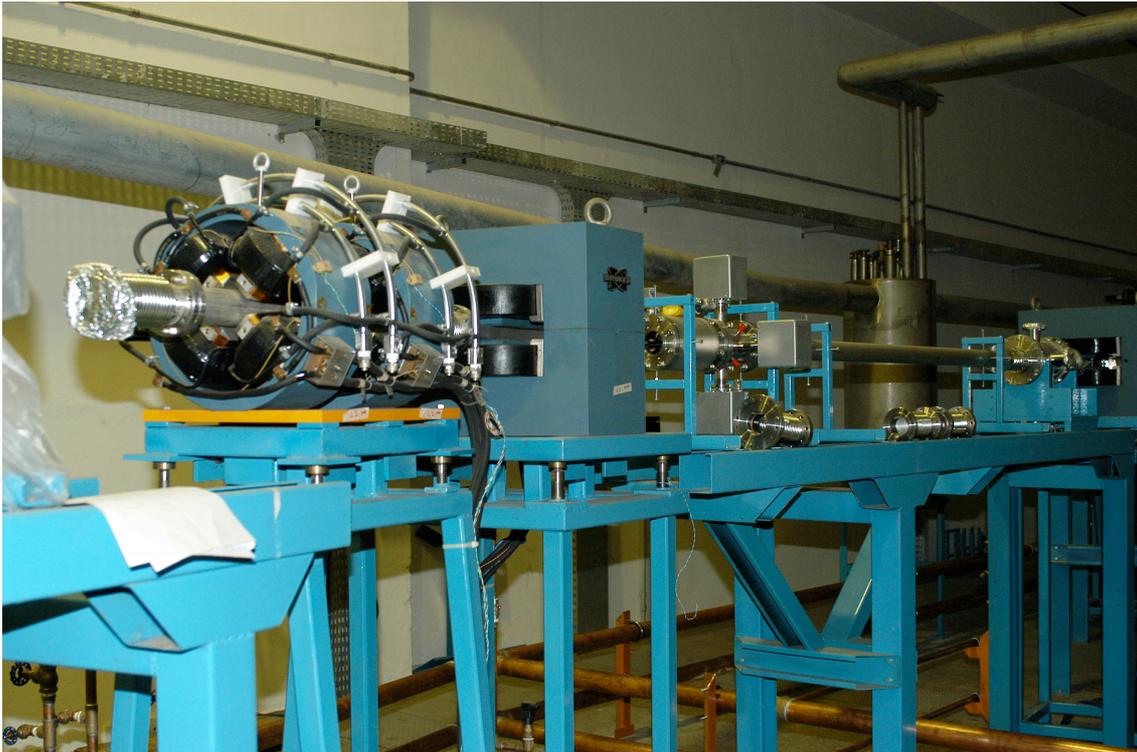
O campo magnético  $B$  sai do polo N e vai para o polo S . Se um feixe de íons positivos, muito bem colimado, tiver a direção entrando no papel e bem no centro desse conjunto de polos magnéticos. Esse feixe não terá nenhuma influência dos campos magnéticos por estar bem centrado numa região sem campo magnético. A secção do feixe no plano do papel será um círculo. Suponha agora que não seja um feixe bem colimado e uma parte do feixe encontre algumas linhas de campo magnético.

Notem que os ímãs formam exatamente uma cruz que une os eixos dos dois ímãs que estão frente a frente. No centro dos ímãs forma-se um quadrado, suponha partículas do feixe que estão exatamente nas diagonais desse quadrado. O feixe é positivo e está entrando no papel. Então, aplique a regra da direção da força magnética que vai aparecer se os íons estiverem exatamente sobre as diagonais. Um feixe inicialmente de secção circular vai ficar elipsoidal. Haverá “focalização” numa das diagonais e “desfocalização” na outra.

Exatamente isso ocorre com os quadropolos focalizadores de um feixe iônico. Usam-se dois conjuntos de quadropolos, como é visto na fotografia abaixo. Uma canalização que conduzirá o feixe iônico pode ser visto entrando num conjunto de dois quadropolos eletromagnéticos. Cada enrolamento produz um campo magnético na direção do eixo de cada pólo, de modo que o conjunto fica posicionado como foi descrito acima, dependendo da direção da corrente elétrica em cada enrolamento.

Pode-se ver os quatro pólos magnéticos em contacto com a canalização cilíndrica do feixe. Notem o posicionamento dos quadropolos. Um dos quadropolos vai assim focalizar o feixe no eixo horizontal e logo em seguida o outro quadropolo focaliza no eixo vertical.

Logo em seguida dos dois conjuntos de quadropolos, pode-se ver um dipolo magnético formado por dois eletroímãs ( pretos) montados no corpo de um núcleo de ferro ( cinza azulado). Esse dipolo magnético deverá separar feixes iônicos com  $q/m$ , razão entre carga e massa, diferentes.

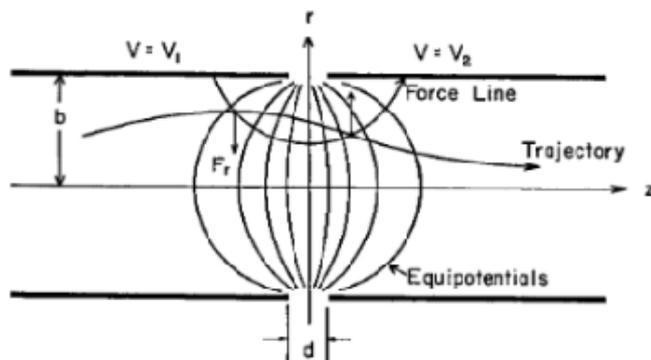


Tanto aceleradores como os sistemas de focalização de feixes iônicos são ainda assuntos da engenharia nuclear. ( Passive Focusing of Intense Ion Beam , Albert Yuen, Tese de doutoramento, Engenharia Nuclear, Universidade da Califórnia, Berkeley, Orientador Karl A. van Bibber, primavera de 2016 e publicação de Martin Reiser –“Theory and Design of Charged Particle Beams”, Wiley-VCH, second and updated edition, 2008).

## Anexo 5

### Lentes eletrostáticas

Lentes eletrostáticas são utilizadas para focalizar feixes iônicos. Um tipo de lente eletrostática é denominado lente Einzel.



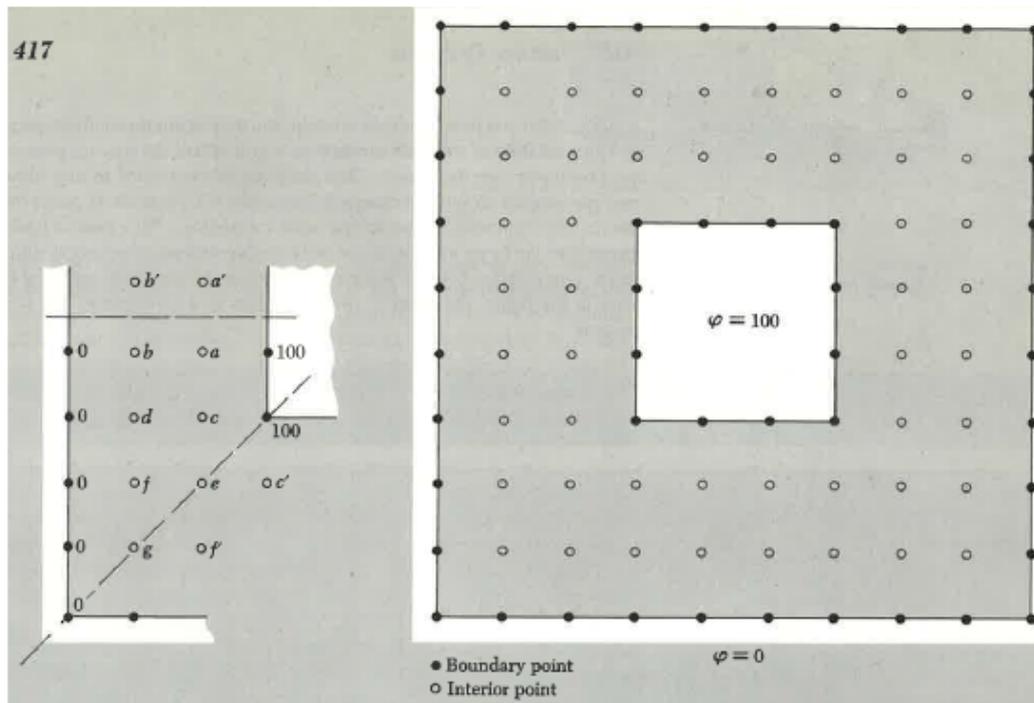
Suponham um feixe simétrico com diâmetro igual ao indicado no desenho. Notem a diminuição do diâmetro de um feixe comparando antes e depois de passar pela lente. Esse dispositivo é utilizado em diversas posições da trajetória do feixe. Até dentro de uma fonte de íons usa-se esse tipo de focalização.

Sempre que se tem uma distribuição de potencial elétrico é possível obter as linhas equipotenciais e as linhas de força são perpendiculares as equipotenciais. Uma carga elétrica segue as linhas de força dependendo de ser positiva ou negativa, na mesma direção ou na direção oposta. Um exercício 3.29 proposto no segundo volume do Berkeley Physics Course, Mac Graw Hill 1965, página 416, mostra como traçar as linhas equipotenciais usando a Equação de Laplace aproximadamente por sucessivas aproximações, no caso bidimensional. Para resolver problemas tridimensionais existem programas de computação. Tradução:

Aqui está uma forma de se resolver a equação de Laplace aproximadamente, para dados valores de contorno, usando apenas aritmética. O método é o "método de relaxação" mencionado na seção 3.8 e está baseado no resultado do problema 3.28. Por simplicidade vamos tomar um exemplo bidimensional. Na figura existem dois contornos quadrados e equipotenciais, um dentro do outro. Isto poderia ser a seção perpendicular de um capacitor feito de dois tamanhos de tubos metálicos de seção quadrada. O problema é encontrar valores numa sequência de pontos que seria uma boa aproximação da verdadeira função  $F(x,y)$  do potencial elétrico nesses pontos.\\\\\\\\assumindo arbitrariamente um potencial de 100v no quadrado de dentro e zero v no quadrado de fora e que todos os

pontos nesses contornos fiquem constantes nesses valores. Em princípio, poderemos começar com qualquer valor em alguns pontos, mas podemos economizar tempo usando valores mais inteligentemente chutados. Um conjunto de pontos de início está indicado na figura abaixo. O trabalho deve levar em consideração simetrias. O trabalho é iterativo e depois de algumas repetições pouco se altera o valor obtido em cada ponto.

Figura



Substitua o valor em cada ponto interior por:

$$1/4[100 + a + d + e]$$

Mantenha:  $a' = a$  ,  $b' = b$  ,  $c' = c$  e  $f' = f$

Valores iniciais sugeridos:

$$a = 60$$

$$b = 30$$

$$c = 50$$

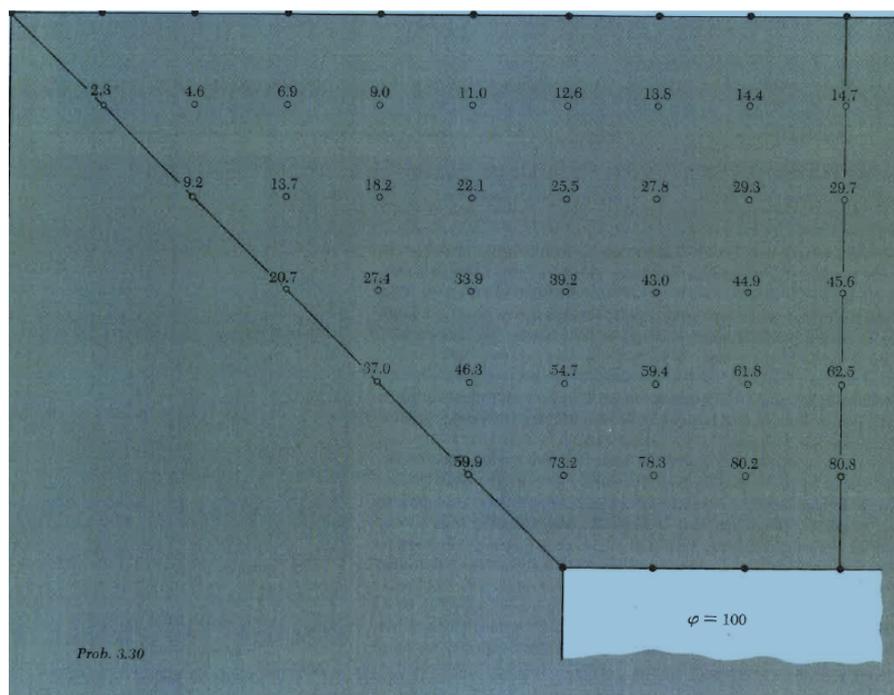
d=25

e=40

f=20

g=10

Existem programas de computação para efetuar esse exercício. O resultado obtido por computação pode ser visto na figura abaixo.



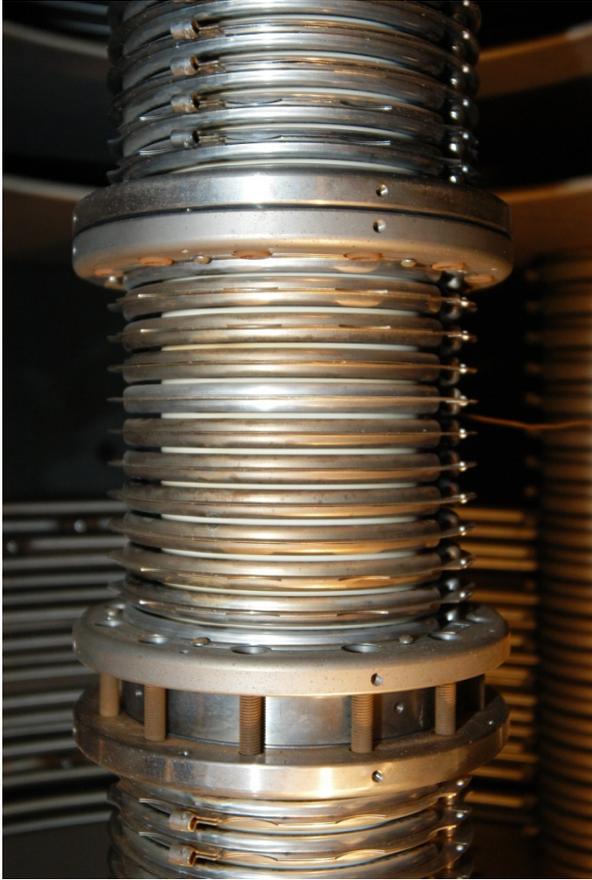
Figura

Para problemas tridimensionais como é o caso de lentes eletrostáticas para feixes iônicos podem ser feito vários cortes sucessivos em planos perpendiculares ao eixo de simetria da lente, e, posteriormente por processos gráficos obter as linhas de equipotenciais em todo o espaço.

#### Anexo 6- Tubo acelerador

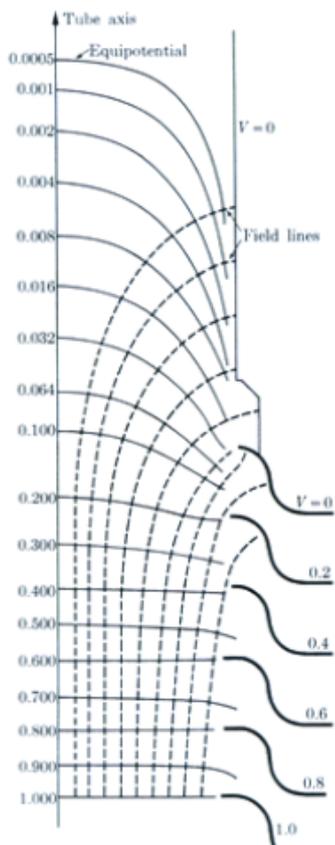
O tubo acelerador é composto de oito unidades aceleradoras razão pela qual o acelerador é chamado de 8UD 8 unidades duplas de aceleração. Cada unidade é composta de três secções de aceleração. Uma secção de aceleração é por sua vez composta de uma sucessão de eletrodos metálicos soldados intercaladamente com partes de cerâmica isolantes elétricos. Todo o sistema funciona em alto vácuo e as junções das secções são feitas com anéis de alumínio.

A fotografia abaixo mostra uma unidade de aceleração do tubo. São três secções de aceleração, formados por eletrodos de aço intercalado com isolantes de cerâmica.



Cada secção está mostrada nas fotografias abaixo, junto com um eletrodo desmontado e os inserts e um detalhe da parte interna, onde se vê os eletrodos em sequencia. Cada eletrodo é conectado ao corpo do acelerador de modo que a distribuição dos potenciais elétricos seja transmitida adequadamente. As fotos foram tiradas por Wanda P. Engel e Antonio Carlos Tromba a quem agradecemos.





A figura ao lado mostra as linhas equipotenciais dentro do tubo acelerador e as linhas do campo elétrico correspondentes (linhas pontilhadas). Notem que no eixo do tubo, onde as partículas devem passar, o campo elétrico é paralelo à trajetória do feixe. Toda a estrutura do acelerador é projetada a fim de propiciar essa configuração do campo elétrico

## Anexo 7

Bombas de vácuo. Medidores de vácuo.

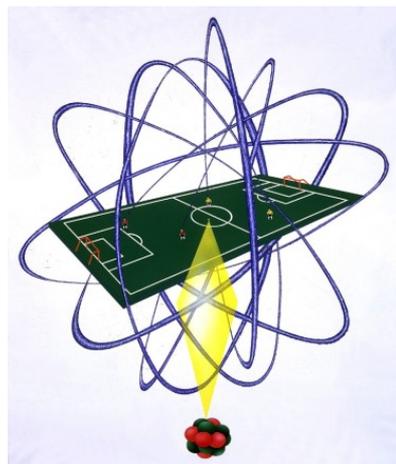
Partículas alfa de Polônio tem da ordem de 5 MeV e perdem totalmente sua energia cinética ao atravessar 5 cm de ar. Assim, mesmo Rutherford na sua histórica experiência com as folhas de ouro deve ter feito vácuo na câmara. Naquela época certamente não haviam ainda as

facilidades de hoje em dia com a possibilidade de usar diferentes tipos de bombas de vácuo.

Uma forma antiga de medir vácuo é com uma coluna de vidro em U preenchida com mercúrio ou com algum óleo estável (não solte gases). Mede-se a pressão com relação à pressão atmosférica se uma das extremidades for mantida em ar e a pressão diferencial se as duas extremidades estiverem conectadas a terminais específicos da montagem experimental. Por exemplo, para medir a pressão dentro de uma câmara com gás numa extremidade do tubo em U, e vácuo na outra extremidade. Detalhes dos aparelhos de vácuo fazem parte do currículo do alunos de Física.

As apostilas do curso de vácuo do curso de bacharelado em Física do IFUSP estão no link [portal.if.usp.br/tecvac](http://portal.if.usp.br/tecvac).

Anexo 8: Proporções válidas.



Como foi dito no texto, a real proporção entre o tamanho do átomo e do núcleo está representado na figura abaixo. O Tamanho de um átomo é da ordem de 1 ângstrom (1Å) que é igual a  $10^{-8}$ cm ou seja  $10^{-10}$ m. Podemos calcular o tamanho do núcleo utilizando a relação

$$r = r_0 A^{1/3}$$

onde r é o raio do núcleo

$r_0$  é o raio do hidrogênio usualmente considerado como 1,3 F

F é o Fermi é a unidade de comprimento adequada para o tamanho do núcleo e é igual a  $10^{-13}$  de cm.

A é o número de massa do átomo em questão.

Por exemplo vamos calcular o tamanho do núcleo de ouro Au .

A do ouro  $^{197}\text{Au}$   $A=197$  e  $Z=79$ . O Au tem 79 elétrons e 79 prótons e 118 nêutrons.

$$r = 1,3 \times 10^{-15}\text{m} \times 197^{1/3}$$

$$r \sim 1,3 \times 10^{-15}\text{m} \times 5,65$$

Supondo que o raio de um átomo seja da ordem de  $10^{-11}$ m e colocando como diâmetro da bola de futebol 25 cm,

$1,3 \times 10^{-15}\text{m} \times 5,65$  corresponde ao diâmetro  
0,25m

$10^{-11}$  m corresponde ao diâmetro da órbita  
L

Pela regra de três:

$$L = (0,25 \times 10^{-11}) / (1,3 \times 10^{-15}\text{m} \times 5,65)$$

$$L = 0,25 \times 10^{-4} / (1,3 \times 5,65)$$

$L = 340\text{m}$  diâmetro da órbita do elétron , supondo o diâmetro de uma bola de futebol de 25 cm comparado com o raio do núcleo de ouro.

## ANEXO 9

Nos cursos de atualização de professores da rede estadual de ensino médio do Estado de São Paulo, foram produzidos materiais didáticos que podem ser acessados em:

<http://cmap.atp.usp.br/rid=1L3XNSCQQ-HBCMBR-YP2/Nupic>

Vai aparecer uma lista de cursos, e em cada curso um esquema dos blocos apresentados.

Todos os textos, atividades propostas, etc. podem ser encontrados em cada um dos blocos apresentados clicando em “resources for blocos x”

## ANEXO 10 Ainda o modelo atômico

A história da ciência revela como inúmeras teorias foram sendo desenvolvidas ao longo dos tempos, mas hoje em dia são divulgadas de uma forma linear e aparentemente incontestada. Entretanto, foram duramente criticadas por outros cientistas da época em conferências internacionais frequentes. Aos poucos as teorias foram sendo modificadas até chegar como hoje em dia divulgadas.

Se o átomo fosse como previa Thomson formado por uma esfera uniformemente carregada positivamente com elétrons espalhados ao acaso, pode se notar porque só se espera ter desvios em ângulos pequenos quando se faz incidir partículas alfa como mostrado na figura abaixo.



As partículas alfa têm cargas elétricas positivas e incidem sobre o átomo formado por uma massa uniforme de cargas positivas com os elétrons distribuídos ao acaso. Uma carga positiva será repelida por cargas positivas e atraída pelas negativas. Essa situação pode ser calculada exatamente, considerando as forças eletrostáticas atuantes e que resultam em desvios pequenos.

Experimentalmente o que se observa é que a grande maioria das partículas alfa passa pelo átomo sem desvio algum e alguns sofrem desvios em ângulos pequenos, mas apesar da quantidade de partículas espalhadas não diminuindo em quantidade conforme se aumenta o ângulo de observação, até em ângulos quase de 180 graus ainda se observa algumas partículas espalhadas. Muitas universidades americanas têm vídeos e textos explicativos dessa experiência, por exemplo a mencionada abaixo que foi acessada em 29 de janeiro de 2018.

[Rutherford's Scattering Experiment \(Theory\) : Class 9 : Chemistry : C](#)

...

[\*http://cdac.olabs.edu.in/?sub=75&brch=12&sim=88&cnt=1\*](http://cdac.olabs.edu.in/?sub=75&brch=12&sim=88&cnt=1)

Objective: To demonstrate the scattering of alpha particles by gold foil. Background: Model for the structure of an atom had been first proposed by J.J. Thomson. Later, followed many theories however, Rutherford's model was finally accepted as the correct nuclear model. Rutherford had shown his model with help of an ...

11