

## 2 Montagem Experimental

Neste capítulo será descrita a montagem experimental, assim como os procedimentos utilizados nesta dissertação para a aquisição de dados.

### 2.1 A linha de colisões atômicas: uma visão geral

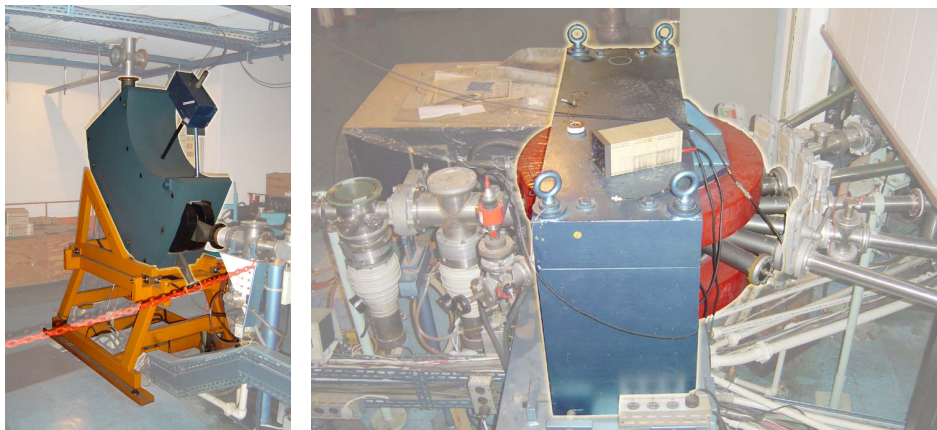
O acelerador de partículas utilizado nas experiências foi o Van de Graaff da PUC-Rio (High Voltage Engineering Corp.), de 4 MV.

Os feixes produzidos por ele são direcionados para a horizontal por um ímã 90°, cuja função principal é permitir a seleção do feixe desejado (figura 2.1(a)), e, em seguida, um ímã seletor (ou *switching magnet*, figura 2.1(b)) permite que a direção do feixe seja novamente alterada, porém, desta vez, no plano horizontal, selecionando assim a linha de colisões atômicas dentre as outras linhas existentes no laboratório. A linha utilizada nessa dissertação é a de 15° à esquerda e é ilustrada na figura 2.1(c).

Na entrada da linha, há um sistema de colimação, de três estágios (figura 2.2(a)), que é utilizado para fazer uma primeira redução na intensidade do feixe para valores compatíveis com os tolerados pelos detectores empregados neste trabalho. Mais à frente nessa dissertação, serão abordados, em tópico especial, esses detectores e suas características. Os colimadores consistem de folhas de tântalo, com furos de aproximadamente 5,00, 0,42 e 0,26 mm em seus centros, fixadas nas extremidades de cilindros de latão, que lhes dão suporte. Os três cilindros são fixados em uma haste móvel para permitir a seleção da intensidade inicial do feixe, sem quebrar o vácuo da linha.

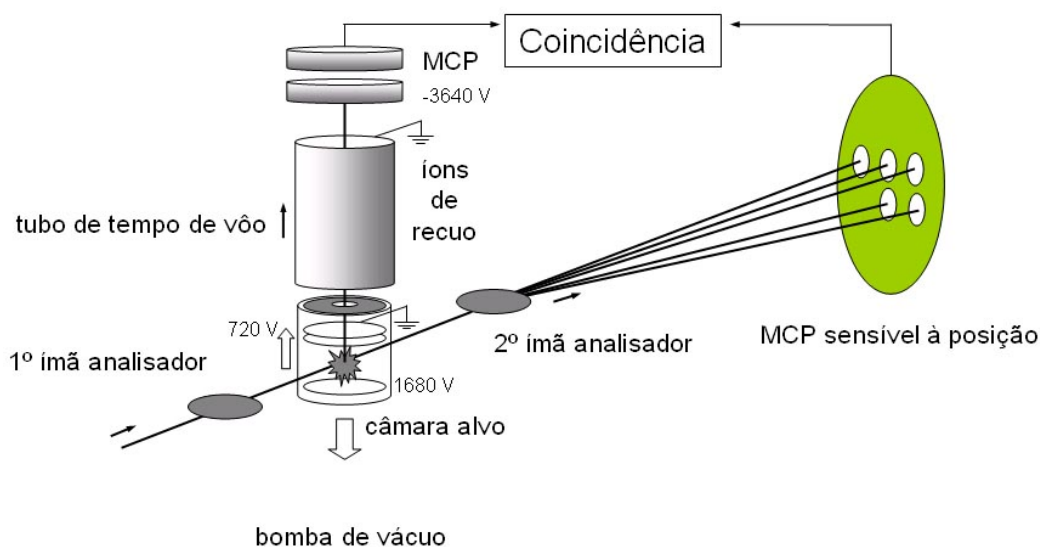
Aproximadamente 26 cm à frente do colimador, estão montados, em cruz, dois pares de colimadores dinâmicos cilíndricos que podem ser movidos por meio de parafusos micrométricos (figura 2.2(b)). Com esse sistema, pode-se também ajustar a forma da seção reta do feixe, sendo utilizado para uma colimação mais precisa do feixe. Cada anteparo é preso a um parafuso micrométrico de modo que a forma da passagem possa ser trabalhada para melhorar a forma geométrica do feixe emergente.

Dois metros e meio linha abaixo, encontra-se a câmara de colisões e,



a)

b)



c)

Figura 2.1: (a) esquema da linha de colisões atômicas do laboratório Van de Graaff; (b) o ímã seletor; (c) o ímã 90°

conectado a ela, em um ângulo de 90°, o sistema de detecção de íons de recuo, que serão discutidos em detalhes nas seções seguintes. Imediatamente antes e depois da câmara de colisões, existem dois eletro-ímãs cujos campos são orientados perpendicularmente um ao outro e à direção do feixe. A função desses ímãs é separar espacialmente os estados de carga diferentes do feixe, desviando ligeiramente suas trajetórias de modo proporcional à razão entre a carga e a massa dos projéteis. O primeiro tem o campo de direção horizontal de modo a causar uma separação vertical dos estados de carga. Sua função principal neste trabalho foi a de “limpar” o feixe principal: feixes espúrios são comumente gerados por espalhamento nos dispositivos de colimação e por colisões com gases residuais na tubulação. Para que essa função seja realizada

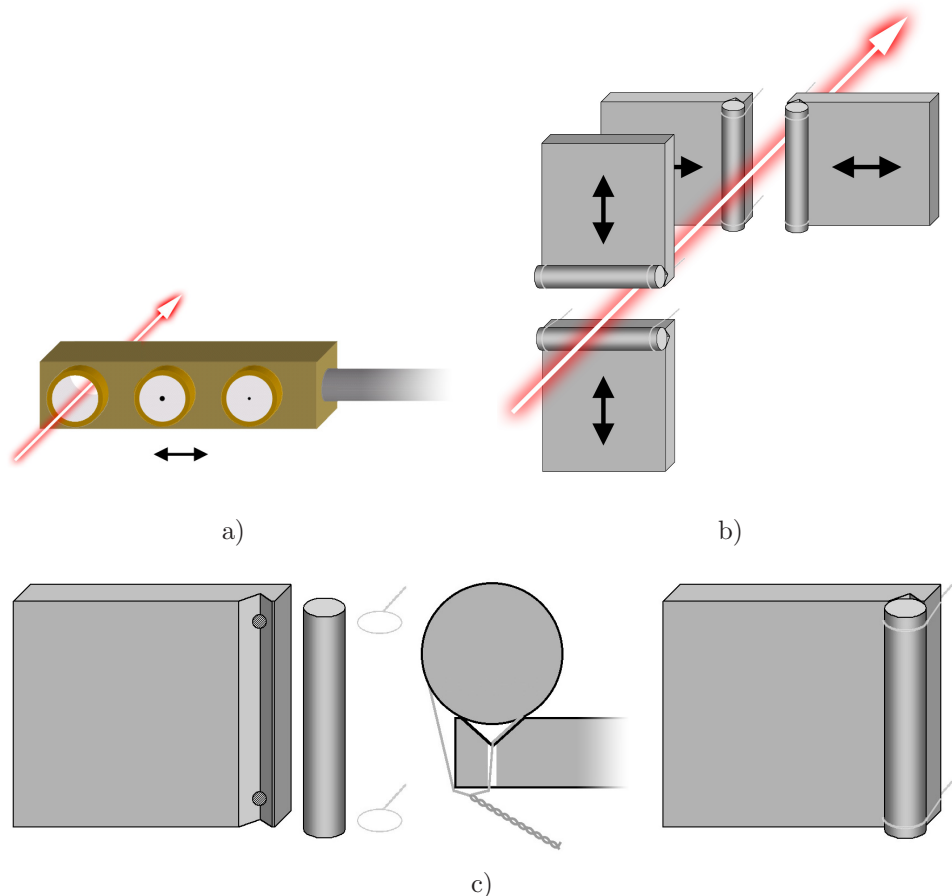


Figura 2.2: (a) primeiro sistema de colimação, de três estágios; (b) o sistema de colimação precisa dinâmico; (c) detalhes de um colimador dinâmico.

da melhor forma possível, é crucial que esse ímã seja instalado o mais próximo possível da câmara de colisões. O segundo ímã tem campo de direção vertical de modo a causar a separação horizontal do feixe. Sua função é a de permitir a diferenciação espacial dos estados finais de carga do feixe, após a colisão.

Depois do segundo ímã, a linha de colisões continua com um tubo de aproximadamente 4,5 m até a câmara de detecção de projéteis, que também terá uma seção dedicada a ela.

## 2.2

### A câmara de colisões

A câmara de colisões utilizada nesse trabalho consiste em dois cilindros concêntricos com seus eixos de simetria alinhados com a vertical. Os dois cilindros possuem tampos de vidro (ver figura 2.3) removíveis para permitir melhor controle das condições experimentais e acesso menos complicado aos componentes.

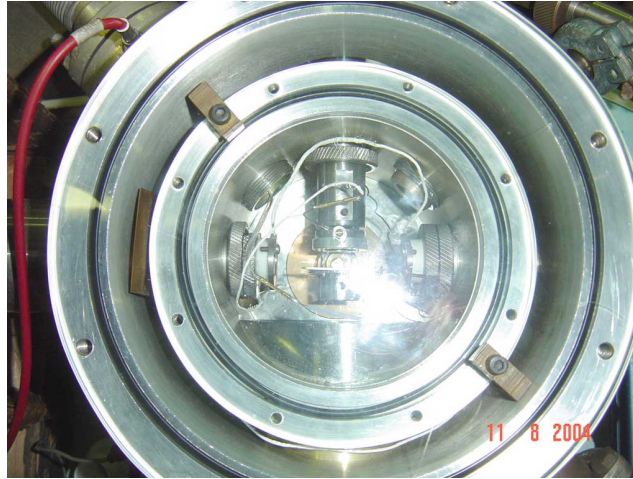
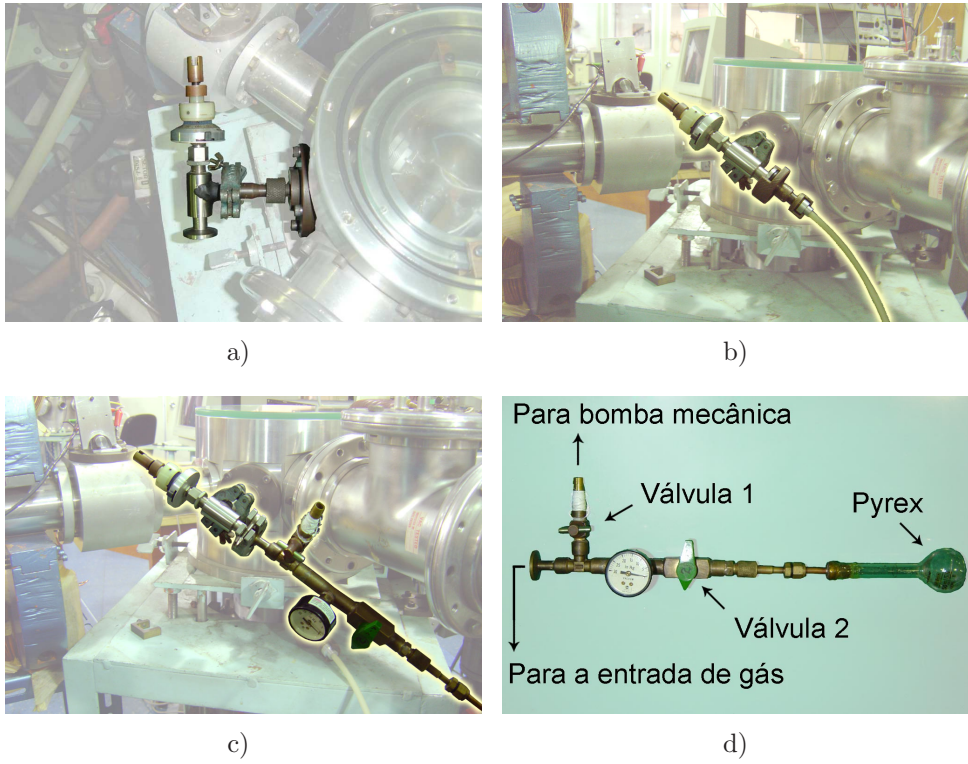


Figura 2.3: Foto da vista superior da câmara de colisões: dois cilindros concêntricos, câmara e célula gasosa (interna), com seus tampos de vidro.

A idéia por trás dos dois cilindros é garantir o bombeamento diferencial e uma pressão uniforme na célula gasosa, ou seja, evitar que gás da região de colisões se propague para o resto da linha e, também, que ocorram grandes flutuações de pressão ao longo da trajetória dos projéteis. Na verdade, esse problema acontece devido ao fato de que a célula gasosa precisa ter furos por onde o feixe deve entrar e sair (além das aberturas de admissão de gás e medição da pressão). O problema é que, quanto maiores forem esses furos, mais difícil será restringir o gás apenas ao interior da célula gasosa, e quanto menores, mais difícil será alinhar o feixe através deles. A solução que as duas câmaras oferecem é possibilitar um bombeamento eficiente da região exterior à célula gasosa e, ao mesmo tempo, formar um gradiente mais suave de pressão de modo a evitar turbulências e permitir um escoamento laminar do gás. O bombeamento é feito por três bombas difusoras, uma diretamente sob a câmara de colisões e as duas outras imediatamente antes e depois dela. A câmara interna (a célula gasosa) possui, além dos dois furos dedicados à passagem do feixe principal, um terceiro, na direção perpendicular aos outros dois, que permite a extração dos íons resultantes das colisões em direção ao sistema de detecção de íons de recuo. Com um volume de aproximadamente 1,4 l e orifícios de entrada, saída e extração de íons de recuo de 1,8, 2,0 e 4,0 mm de diâmetro, respectivamente, a montagem permite uma razão entre as pressões nos cilindros externo e interno da ordem de 1/300 [17].



e)

Figura 2.4: Sistema de gás: (a) admissão com válvula tipo “agulha”; (b) ligação para o manômetro; (c) ligação para o sistema de água; (d) sistema especial para água com duas válvulas e um Pyrex; (e) sistema de gás com rede de distribuição e cilindros (realçados em dourado), e bomba mecânica.



### 2.2.1

#### Admissão e controle de pressão

Para melhor controlar as condições de experiência, a admissão de gás na câmara é feita por meio de uma válvula de agulha (figura 2.4(a)) instalada externamente a ela, capaz de controlar a passagem do gás através de um duto que liga a câmara interna ao exterior.

Nesse trabalho, apenas quatro gases diferentes foram utilizados como alvos: Neônio (Ne), Argônio (Ar), água (H<sub>2</sub>O) e a atmosfera (80% N<sub>2</sub> e 20% O<sub>2</sub>). Para Argônio e Neônio, a válvula de agulha é ligada diretamente ao manômetro dos cilindros com os gases (figura 2.4(b)). Para a atmosfera, simplesmente nada é ligado à válvula (figura 2.4(a)). Para água, no entanto, o processo é outro (figura 2.4(c)): colocada em um recipiente de vidro Pyrex, inicialmente é feito um bombeamento (entrada da válvula 1; ver figura 2.4(d)) por uma bomba mecânica (ver figura 2.4(e)) para purificá-la (válvulas 1 e 2 abertas; válvula de agulha fechada). Primeiro, com a rápida diminuição da pressão, a água borbulhava e, depois de alguns minutos, estabilizava, chegando a congelar algumas vezes. Em seguida, a válvula 1 era fechada e a válvula de agulha aberta. Aos poucos, a água evaporava dentro do Pyrex e “vazava” para dentro da câmara. Esse processo está descrito detalhadamente em trabalho inédito [18].

Ao longo do trabalho, esse método de obtenção de vapor d'água foi aperfeiçoado: os longos tempos gastos em cada medição desse trabalho faziam com que a pressão dentro do Pyrex aumentasse tanto que o vapor começava a se condensar justamente na válvula de agulha, interrompendo a passagem do gás até que, subitamente, a gotícula condensada atingisse o outro lado da válvula. Nesse momento, a pressão dentro da câmara interna subia a ponto de causar descargas entre as partes em alta tensão. Esse fenômeno levou, muitas vezes, à perda de todos os dados medidos, aumentando ainda mais o tempo de cada medição.

Para contorná-lo, uma pequena e simples adaptação do processo se mostrou estatisticamente eficiente: ao invés de permitir que a água evaporasse continuamente para dentro da câmara, depois de alguns minutos, a válvula 2 do Pyrex (ver figura 2.4(d)) era fechada, fazendo da tubulação entre ela e a válvula de agulha um reservatório de pressão mais estável. Isso, no entanto, conduzia a uma tendência de queda na pressão de trabalho na câmara interna, exigindo a abertura da válvula de agulha cada vez mais freqüentemente, como forma de compensação.

Para tornar tudo isso possível, uma leitura da pressão se faz necessária. Para tanto, a câmara de colisões conta com um manômetro capacitivo absoluto



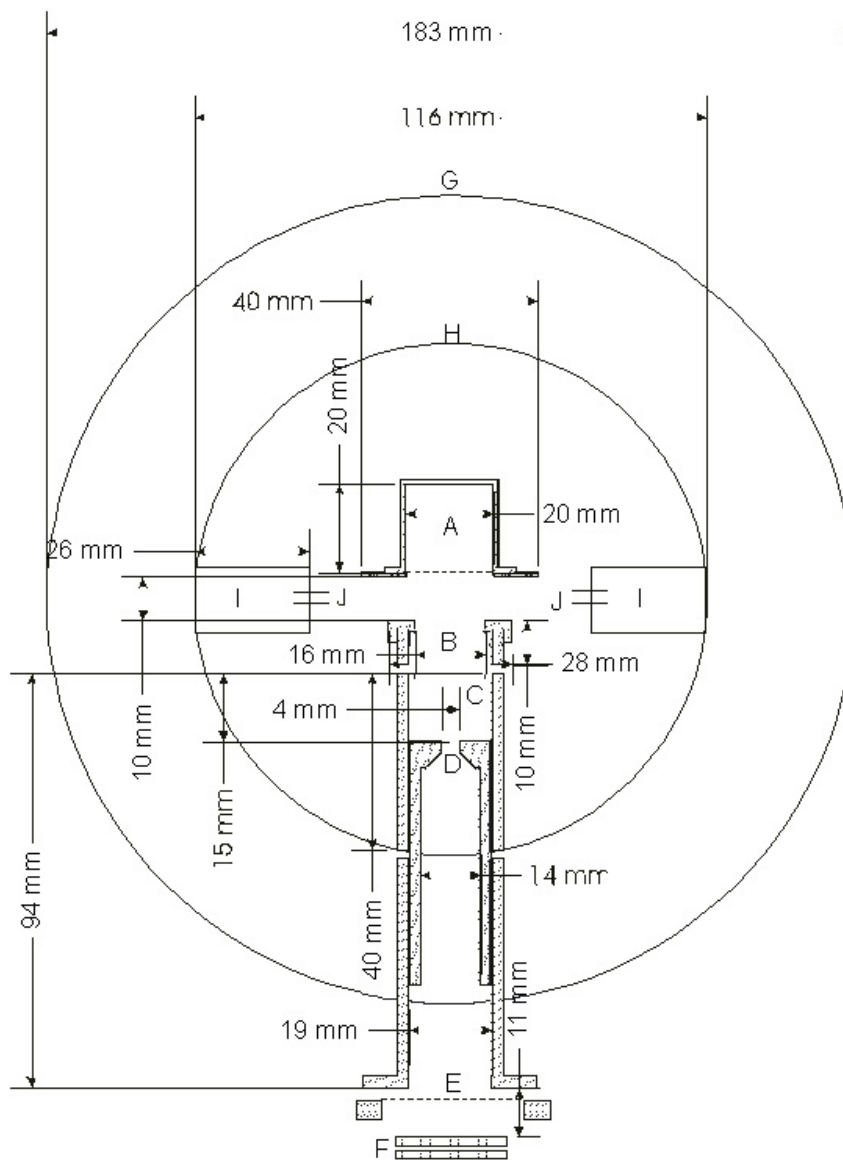


Figura 2.6: Esquema do espectrômetro de íons de recuo, gentilmente cedido pelo professor Wilson de Souza Melo: A, placa; B, anel e grade de extração; C, tubo de tempo de vôo; D colimador do tubo de tempo de vôo; E, grade posicionada a frente do detector; F, detector; G, câmara externa; H, célula gasosa; I, região de interseção entre as duas câmaras; J, colimadores de entrada e saída da célula gasosa.

onde  $d$  é a distância percorrida pelo íon na região livre de campos, parâmetro da montagem, fixo para todos os íons, e  $t$  é o tempo que cada íon demora para percorrer essa distância (chamado “tempo de vôo”), então

$$t \propto \sqrt{\frac{M}{q}}. \quad (2-4)$$

Uma explicação detalhada, incluindo as calibrações, pode ser encontrada



em [19] e [20]. A seguir, serão discutidos brevemente os dois primeiros tópicos (o sistema de extração e o tubo de tempo de vôo), enquanto o detector em si será discutido em uma seção à parte. A figura 2.6 ilustra o espectrômetro, com todas as suas dimensões [19].

### 2.3.1

#### O sistema de extração

Uma diferença de potencial é aplicada entre a placa e o anel (A e B da Figura 2.6, respectivamente), de modo a acelerar os íons formados durante as colisões. O anel possui uma grade para homogeneizar o campo gerado. O formato de cartola da placa foi escolhido pensando em evitar que elétrons resultantes das colisões projétil-alvo liberem íons espúrios os quais possam vir a entrar no tubo de tempo de vôo. Variando-se a voltagem aplicada no anel, é possível “focalizar” o feixe de íons de recuo. As tensões ótimas utilizadas foram determinadas em [19]: 1680 V aplicados na cartola e 720 V aplicados no anel geram um campo elétrico de 960 V/cm.

### 2.3.2

#### O tubo de tempo de vôo

O tubo de tempo de vôo não possui muitas características relevantes, consistindo simplesmente em uma região livre de campos e com baixa pressão, de modo a permitir um movimento uniforme por parte do íon de recuo e aumento da resolução em tempo do espectrômetro. Para atender a essas necessidades, o tubo deve ser eficientemente bombeado e possuir o menor orifício de entrada possível. Infelizmente, quanto menor o orifício, menor a eficiência do sistema, devido à menor fração de íons de recuo coletados, devendo, portanto, haver um compromisso entre ambos. Isto foi obtido com um orifício de 4 mm de diâmetro [19]. O bombeamento é feito por uma bomba difusora de 2 polegadas instalada diretamente atrás do detector.

## 2.4

### Os detectores MCP

Os detectores utilizados neste trabalho são do tipo MCP (*MicroChannel Plate* ou placa de micro-canais). Esses detectores consistem em placas finas de vidro de chumbo vazadas por milhares de micro-canais (como o nome sugere) que apresentam uma pequena inclinação com relação à normal à superfície. Cada micro-canal possui diâmetro da ordem de 25  $\mu\text{m}$  e são agrupados em até  $10^7$  canais por placa. O vidro de chumbo é tratado de forma a otimizar as características de emissão secundária de elétrons, isto é, a emissão de dois

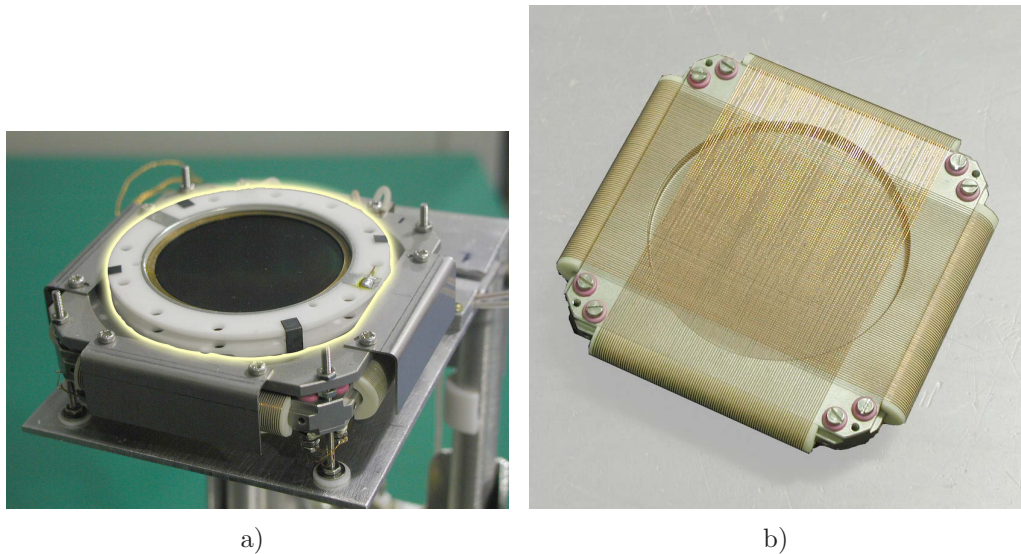


Figura 2.7: (a) O detector MCP-P. Em destaque dourado o “sanduíche” das MCPs; (b) anodo tipo multi-fios.

ou mais elétrons devida à incidência de um primeiro, de energia superior. A reposição de cargas é garantida pelas propriedades semicondutoras das paredes dos canais. Uma deposição de um filme fino metálico ao longo do perímetro de cada face funciona como eletrodo. Uma MCP típica possui resistência entre as faces da ordem de  $10^9 \Omega$  [21].

#### 2.4.1 A MCP-P

A MCP-P (*MicroChannel Plate* para detecção de Projéteis) faz parte de um pacote da firma Roentdek Handels GmbH: um detector multi-fios DLD40, com um par de MCPs apropriadas (40 mm), um módulo de eletrônica DLA-TR6 e uma placa de aquisição TDC-ISA (*Time to Digital Converter* de encaixe ISA - *International Standards Association*) de oito canais. A montagem e calibração do detector foi toda realizada por Cavalcanti [22] com base no manual [23]. O pacote ainda inclui o *software* desenvolvido pelo fabricante, COBOLD PC. O Apêndice B trata de alguns detalhes da configuração e do uso deste *software*.

O par de MCPs é montado em “sanduíche” (ver figura 2.7(a)) na configuração Chevron, onde os canais da primeira placa estão alinhados em oposição máxima aos da segunda, de modo a aumentar o ganho do sistema para no mínimo  $10^7$ .

Uma parte muito importante deste trabalho é o fato do detector MCP-P ser sensível à posição. Isso é possível devido ao anodo multifios mostrado na figura 2.7(b). Dois pares de fios metálicos são enrolados em um suporte isolante

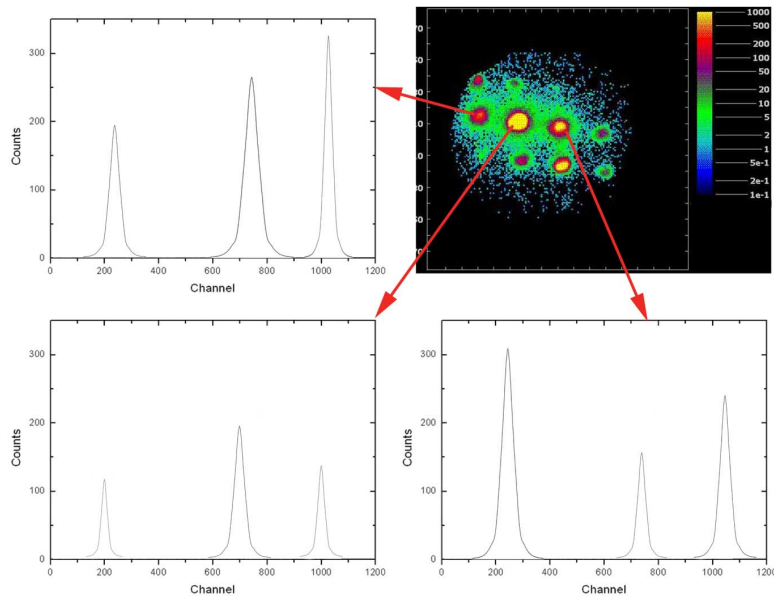


Figura 2.8: A figura colorida mostra a imagem do detector com os vários estados finais de carga do feixe de projéteis. A cada estado final gerará um gráfico de TOF exclusivo para aquele canal de coincidência. Três exemplos fictícios, com diferenças exageradas para fácil visualização, são mostrados.

em direções perpendiculares entre si. Cada par é composto por um fio de sinal e outro de referência. Uma diferença de potencial da ordem de 30 V entre eles garante que os elétrons serão captados preferencialmente pelo fio de sinal. Cada uma das oito pontas é monitorada para formar a imagem: a diferença de tempo entre a chegada do sinal em duas pontas de um mesmo fio indica uma coordenada espacial do evento. As quatro pontas do fio de sinal indicam as duas coordenadas ( $x$  e  $y$ ) e os fios de referência e suas quatro pontas servem para controle de ruído e “sintonia” da imagem. Controlando o feixe emergente da câmara de colisões podemos visualizar e contar todos os estados finais de carga do mesmo, simultânea e discriminadamente, o que faz com que esse tipo de detector seja muito rico em informações. A figura 2.8 mostra uma imagem obtida com esse detector e ilustra como é feita a coincidência entre os canais.

Testes foram feitos para tentar determinar a taxa de contagem máxima com a qual os resultados ainda concordassem com trabalhos anteriores. O valor encontrado foi de aproximadamente 150 contagens por segundo. Devido à instabilidade fina do feixe, a média da taxa de contagem foi mantida um pouco abaixo desse valor: aproximadamente 110 contagens por segundo. Algumas das seções de choque que foram medidas aqui geram eventos em uma razão da ordem de  $1/375.000$  eventos por projétil detectado, o que se traduz em um tempo de espera para formação de volume de dados da ordem de 60.000 segundos ou aproximadamente 17 horas.

As medidas realizadas por Cavalcanti [22] foram feitas utilizando filmes finos de alumínio como difusores, para que o feixe atingisse uma área maior no detector e assim não deteriorasse sua eficiência. Isso ocorria porque, apesar do detector suportar altas taxas de contagem, sua taxa máxima de contagem por área é limitada. O uso do difusor permitiu que fossem feitas medidas com taxas de até  $5 \times 10^4$  partículas por segundo.

No caso deste trabalho, essa prática não é possível por duas razões: primeiro, o projétil utilizado,  $\text{He}^+$ , possui estrutura e, portanto, sua interação com os átomos do difusor comprometeriam o resultado. Segundo, a utilização do difusor “embaralharia” os estados de carga diferentes sobre a área do detector, impossibilitando a coincidência aqui almejada.

### 2.4.2 A MCP-R

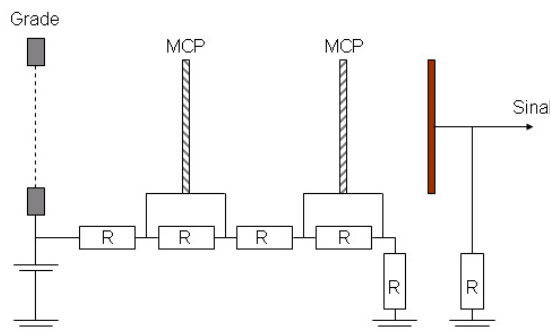


Figura 2.9: Esquema da montagem e do circuito do detector MCP-R.

O projeto e a montagem do detector MCP-R (*MicroChannel Plate* para detecção íons de Recuo) também foi realizada por Melo [19]. A figura 2.9 ilustra esquematicamente a montagem.

Uma vez que os íons a serem detectados possuem carga positiva, o conjunto do detector deve possuir polarização negativa a fim de gerar um impulso extra nas partículas, melhorando a eficiência de detecção [24]-[26]. Uma grade metálica disposta à frente do detector recebe um potencial maior, de modo a repelir elétrons liberados no impacto dos íons na superfície do detector e evitar que os mesmos sejam acelerados em direção ao tubo de tempo de vôo.

As resistências são escolhidas tendo em vista um limite de 10% para a corrente que passa pelas MCPs em relação à corrente que passa pela outra via dos divisores.

O bombeamento eficiente do detector é de suma importância por dois motivos. Primeiro, devido a alta tensão à qual suas partes são submetidas quando em funcionamento e, segundo, porque a própria eficiência do detector depende da pressão a qual ele está sujeito. Apesar de não recomendada, devido ao potencial de acidentes com contaminação da superfície do detector por vapor de óleo, a instalação de uma bomba difusora à base de óleo se fez necessária por ser a única disponível. Podem ser creditados a essa montagem alguns atrasos no desenvolvimento deste trabalho. Acidentes que prejudicaram o detector levaram à experiência de recuperação dos mesmos, descrita em detalhes no Apêndice A.

Vale ressaltar aqui que, no trabalho de Santos e colaboradores [20], os autores apresentam resultados indicando que, para esta montagem, tanto a cinemática dos íons de recuo quanto a eficiência do espectrômetro são essencialmente independentes da natureza dos íons de recuo.

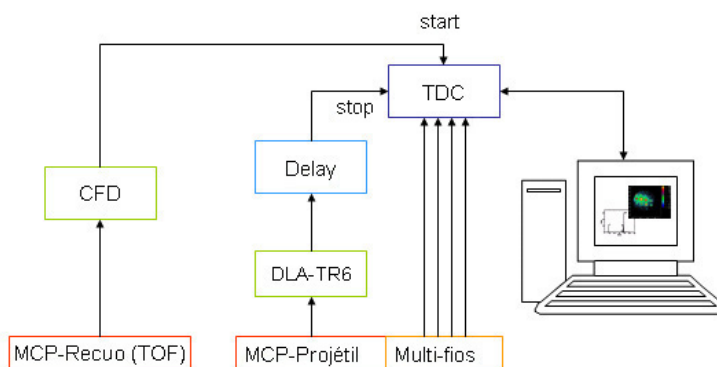


Figura 2.10: Esquema simplificado da eletrônica

## 2.5

### A eletrônica de coincidência

A figura 2.10 ilustra as conexões da eletrônica de modo simplificado, omitindo alguns detalhes técnicos. Esses e outros detalhes serão apresentados no Apêndice C.

O sinal emitido pelo detector MCP-P é recebido pelo módulo DLA-TR6 que conformiza o pulso e, depois, sofre um atraso ao passar por um módulo de *delay*, antes de chegar ao destino final, a placa de aquisição TDC-ISA. O detector MCP-R envia seu sinal a um CFD (*Constant Fraction Discriminator*) que conformiza o pulso e, depois o envia para a placa TDC-ISA.

Além desses dois sinais, a placa ainda admite mais os quatro vindos do módulo DLA-TR6 que formarão a imagem. O trabalho do *software* é: conferir se os 4 sinais do multi-fios podem ser considerados um evento baseado



em condições pré-programadas; conferir se o evento detectado pelo multi-fios tem correspondência com um evento registrado pela MCP-P; registrar outros eventos provenientes dos outros canais de aquisição, no nosso caso, apenas um, o sinal do detector MCP-R. O *software* registra evento-a-evento toda a experiência em um arquivo que pode ser (posteriormente) analisado com base em novas condições formuladas *a posteriori*.

Essas duas capacidades, a saber discriminação dos estados finais de carga dos projéteis em medida simultânea e análise *a posteriori*, permitem que seja verificada a correlação entre os sinais dos íons de recuo e os sinais dos diferentes estados finais de carga dos projéteis.

## 2.6

### A obtenção das seções de choque

A equação básica para determinação das seções de choque de ionização utilizada nesse trabalho relaciona o número de eventos detectados ( $N_d$ ), o número de projéteis incidentes detectados ( $N_p$ ), o número de centros espalhadores ( $N_c$ ) e a eficiência de detecção dos detectores MCP-P e MCP-R ( $\alpha_{mcp-p}$  e  $\alpha_{mcp-r}$ , respectivamente) da seguinte forma

$$\sigma = \frac{\alpha_{mcp-r} N_d}{\alpha_{mcp-p} N_c N_p}. \quad (2-5)$$

$N_d$  e  $N_p$  são obtidos diretamente dos espectros de tempo de vôo e do sinal da MCP-P, respectivamente, porém  $N_c$  não pode ser obtido de modo direto. Mesmo assim, é possível inferir o seu valor através da pressão na célula gasosa ( $P$ ) e fatores geométricos como comprimento da célula gasosa e área da seção reta transversal do feixe, além da densidade do gás em função da pressão. Porém, como esses fatores, incertezas e eficiências atuam todos ao mesmo tempo, a fim de simplificar a idéia, podemos reuni-los todos em um único parâmetro de eficiência e incerteza ( $\alpha$ ) e determiná-lo calibrando o sistema a partir de alguma seção de choque previamente conhecida. Assim,

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{N_d}{N_p P} \right). \quad (2-6)$$

Neste trabalho foram usadas as seções de choque absolutas obtidas por Santos [27] em medidas com neônio como alvo para a obtenção da eficiência  $\alpha$ . Medidas sistemáticas feitas com neônio determinaram a eficiência atual do

sistema através da comparação das seções de choque obtidas com os resultados prévios ( $\sigma_S$ , [27]):

$$\alpha = \frac{1}{\sigma_S} \left( \frac{N_d}{N_p P} \right) \quad (2-7)$$

A integral de cada pico de cada espectro de tempo de vôo da figura 2.8 fornece um valor para  $N_d$  que, por sua vez, será utilizado na equação (2-6) para determinar a seção de choque para aquele evento.

Na maioria dos picos, a relação contagens/ruído é muito alta, tornando o tratamento do fundo muito simples e pouco significativo.

Todas as medidas deste trabalho foram feitas com pressões variando entre 0,95 e 1,00 mTorr, região de pressões onde colisões múltiplas (mais de uma colisão por parte do mesmo projétil) não contribuem significativamente, como foi demonstrado por Melo em sua tese de doutorado [19]. Como é difícil precisar, exatamente, o valor médio da pressão no tempo ao longo da experiência, optou-se por permitir a variação da mesma em um curto intervalo de valores, de modo a tornar o valor central uma boa aproximação. Desse modo, a incerteza na leitura da pressão é de 5%. No futuro, um circuito integrador acoplado a uma saída do medidor de pressão pode tornar essa aferição muito mais precisa e menos trabalhosa.

Além da incerteza na leitura da pressão de 5%, existe a incerteza na medida efetiva do comprimento da célula gasosa que misturada à eficiência de detecção dos íons de recuo, gerou um erro de aproximadamente 10% nos dados, além dos erros estatísticos associados a cada seção de choque medida [20, 27]. A soma de todos os erros e incertezas podem ser encontrados no apêndice E, junto com as seções de choque relacionadas.