

6.5 Espectrômetros de massa e identificação de partículas

A descoberta do elétron é o primeiro exemplo de uma identificação de uma partícula com a ajuda de campos elétricos e/ou magnéticos. Mencionamos três técnicas usadas na descoberta do elétron. As três usavam a relação entre o potencial de aceleração e a velocidade, isto é, a fórmula (6.4.1). Thomson mediu a velocidade com um campo elétrico cruzado com um campo magnético, Wiechert usou uma técnica de tempo de voo, Schuster e Kaufmann usaram o raio de curvatura da trajetória num campo magnético. Mencionamos ainda que a medida da frequência angular do movimento num campo magnético poderia ser usada para medidas muito precisas da razão q/m .

Estas técnicas e outras parecidas podem ser usadas também para identificar outras partículas eletricamente carregadas. O físico Eugen Goldstein (que tinha inventado o nome de *raios catódicos*) tinha descoberto um outro tipo de radiação gerada quando se mantém uma corrente elétrica num gás rarefeito. Ele colocou um furo ou canal no eletrodo negativo e observou uma radiação que passava através deste canal. Consequentemente chamou esta radiação de “*Kanalstrahlen*” (radiação do canal). Uma análise desta radiação com as técnicas mencionadas revelou que eles, ao contrário dos raios catódicos, consistem de variados tipos de partículas, e os tipos dependem do gás usado na descarga elétrica. Trata-se de íons positivos gerados a partir das moléculas do gás na ampola de vácuo. A figura 6.5.1 mostra esquematicamente a geração destes raios.

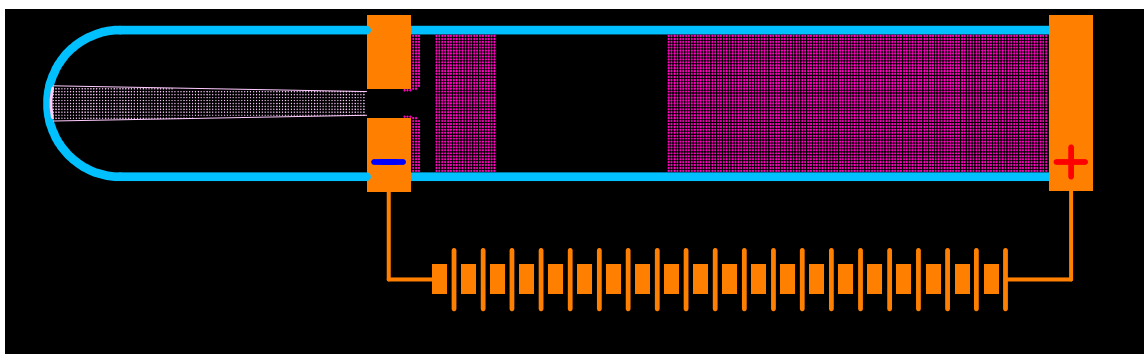


Fig. 6.5.1 Geração de *Kanalstrahlen*.

Com técnicas parecidas com aquelas usadas na descoberta do elétron, pode-se medir o quociente q/m ou equivalentemente m/q destas partículas e obter desta forma informação a respeito da composição química do gás na ampola. A partir desta ideia foram desenvolvidas finas técnicas de análise química e inventaram-se aparatos extremamente sofisticados, muitos destes comercialmente disponíveis. Estas máquinas têm aplicações nas mais diversas áreas como: pesquisas sobre a origem do sistema solar, geofísica, história do clima terrestre, datação na paleontologia e arqueologia, biologia, medicina, química, controle de qualidade de alimentos e de combustíveis, criminalística, – É praticamente impossível lembrar-se de todas as aplicações.

O uso da fórmula (6.4.1) que relaciona a velocidade das partículas com o potencial que as acelerou é um ponto fraco nos três métodos usados pelos pesquisadores envolvidos na descoberta do elétron. Será que a aceleração partiu mesmo da velocidade zero? No caso dos raios catódicos esta fórmula é até razoavelmente confiável. Pelo menos podemos ter certeza de que a maior parte dos elétrons foi liberada na superfície do cátodo de tal forma que estes elétrons realmente percorreram a diferença de potencial entre cátodo e ânodo. Mas no caso da radiação do canal se trata de íons positivos que

foram gerados em algum lugar desconhecido no gás. Então não temos um valor exato do potencial que os acelerou. Por esta razão é conveniente usar uma técnica que não dependa do valor exato do potencial acelerador. Os íons são acelerados e se forma um feixe destas partículas. Mas em vez de confiarmos num determinado valor de energia passada para as partículas, podemos selecionar partículas com um determinado valor de velocidade. Isto pode ser feito com um campo elétrico perpendicularmente cruzado com um magnético, ambos perpendiculares ao feixe de partículas e com sentidos tais que a trinca ordenada $\langle \vec{B}, \vec{v}, \vec{E} \rangle$ forme um triedro direito. Sabemos que somente as partículas cujo módulo de velocidade obedece à condição $|\vec{E}| = |\vec{v}||\vec{B}|$ seguirão uma trajetória reta. Colocando obstáculos com orifícios alinhados com esta trajetória não perturbada, podemos filtrar partículas que possuem um módulo de velocidade da nossa escolha. A escolha é feita com um ajuste de $|\vec{E}|$ e $|\vec{B}|$. A figura 6.5.2 mostra um filtro de velocidade com campos cruzados acoplado a uma fonte de íons positivos.

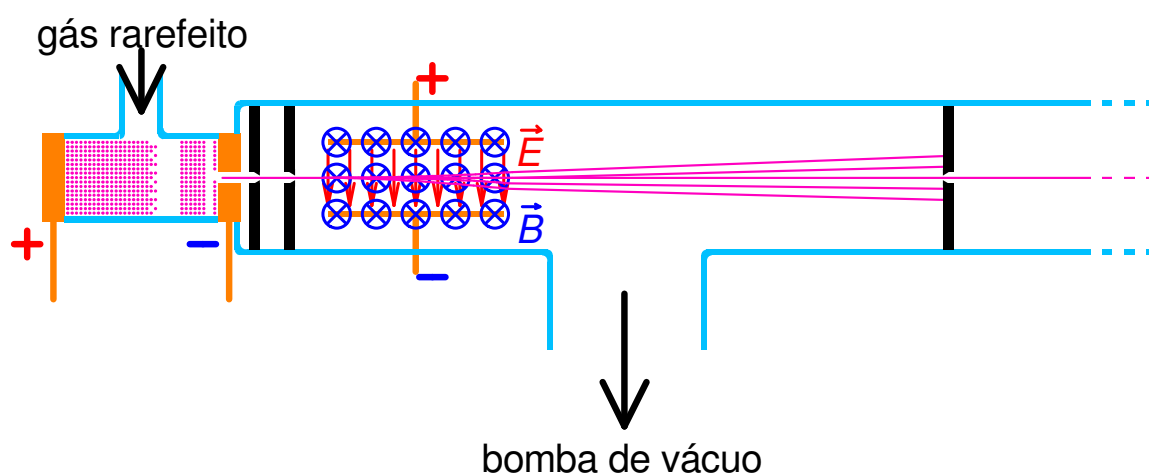


Fig. 6.5.2 Fonte de íons positivos junto com um filtro de velocidade. No lado direito da figura o tubo de vácuo continua dando acesso a outros elementos de um espectrômetro de massa completo.

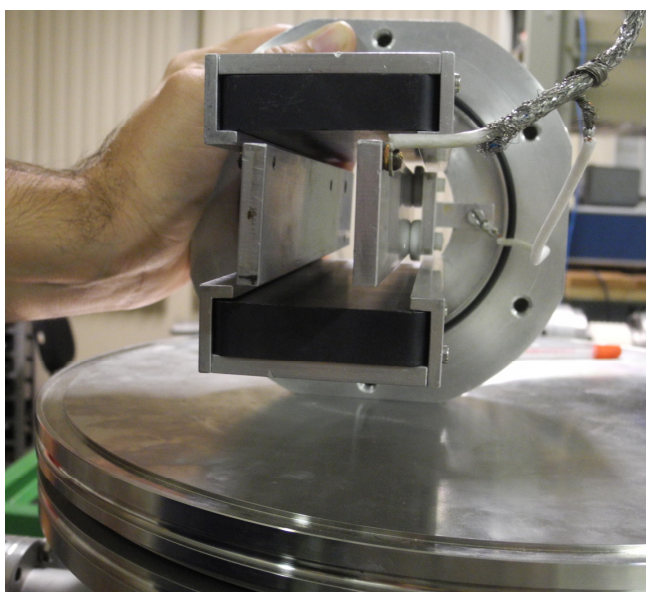


Fig. 6.5.3 Parte de um filtro de velocidade num laboratório de física atômica do Departamento de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora. O campo magnético é gerado por dois ímãs permanentes (blocos escuros) e o campo elétrico é aplicado com a ajuda de duas placas de alumínio. Agradecemos ao Prof. Fábio Zappa por fornecer este exemplo.

Com um feixe de partículas de velocidade selecionada, pode-se agora efetuar uma separação das espécies pelo valor do quociente m/q . Um campo magnético uniforme perpendicular ao feixe de partículas pode cumprir esta tarefa. Dependendo dos valores de m/q , as diversas espécies de partículas percorrerão trajetórias circulares com raios diferentes como mostra a figura 6.5.4. Então as espécies são separadas como as cores da luz branca quando passa por um prisma.

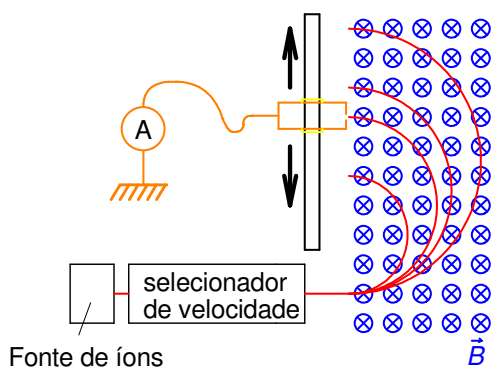


Fig. 6.5.4 Esquema de um espectrômetro de massa simples.

Por causa desta analogia estes instrumentos são chamados de *espectrômetros de massa*. O complemento “de massa” não é no fundo totalmente adequado porque a separação é pelo valor de m/q e não apenas da massa. Mas muitas vezes pode-se adivinhar o valor da carga, já que ela tem que ser um múltiplo inteiro da carga elementar, e a informação

sobre m/q é essencialmente também uma informação a respeito da massa.

O último passo da análise das espécies é alguma detecção dos íons. No caso mais simples este detector pode ser um copo de Faraday ligado num amperímetro muito sensível cuja outra entrada está ligada na Terra, ou seja, no potencial comum do tubo de vácuo onde as partículas se movem livres de forças externas. O amperímetro daria um sinal proporcional ao fluxo das partículas cuja razão m/q junto com o campo magnético guia-as para dentro do copo de Faraday. Para poder medir os fluxos de diversas espécies, o copo de Faraday pode ser montado num trilho que permita movê-lo como mostra a figura 6.5.4.

Mas seria difícil detectar pequenas quantidades de substância com este tipo de detecção com um simples coletor de carga elétrica. Há detectores que amplificam o sinal. Nestes detectores o íon incide numa placa de um condutor especial que libera elétrons com muita facilidade. O impacto de um íon nesta placa libera tanta energia que alguns elétrons da superfície são jogados para fora da placa. Estes elétrons são acelerados num campo elétrico e caem numa outra placa deste material especial e liberam outros tantos elétrons. Repetindo este processo algumas vezes, gera-se uma quantidade enorme de elétrons a partir do impacto de um único íon. A figura 6.5.5 mostra um esquema deste tipo de detector.

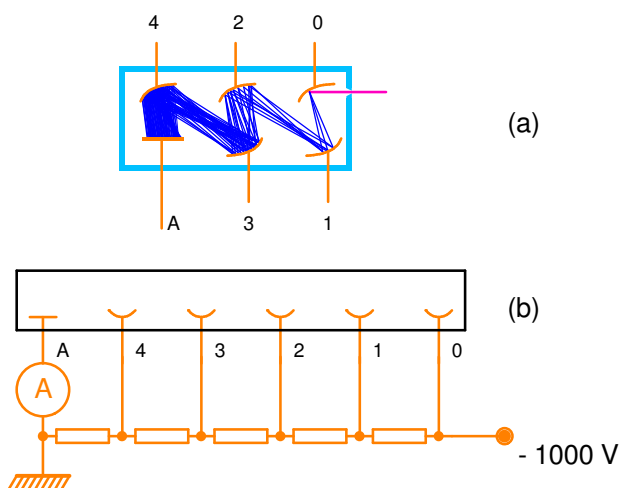


Fig. 6.5.5 Detector de íons com multiplicador de elétrons. (a) Esquema físico, (b) esquema elétrico.

Estas placas que emitem elétrons ao serem impactadas por partículas de alta energia são chamadas de *dínodos*. Para manter diferenças de potencial entre estes dínodos, usa-se uma única fonte de alta tensão e os potenciais dos dínodos são gerados com um divisor de voltagem. A corrente de elétrons

que chega ao último eletrodo (ânodo A) é registrada com um amperímetro. Com estes detectores podem-se gerar na ordem de 10^8 até 10^{12} elétrons com um único íon incidente.

No detector mostrado na figura 6.5.5, os resistores do divisor de voltagem que fornece os potenciais dos dínodos são conectados externamente no detector. Existe uma forma deste tipo de detector no qual os dínodos e o divisor de voltagem são uma peça só. Toda a fileira de dínodos e de resistores é transformada num único tubo com paredes com baixa condutividade. A figura 6.5.6 mostra o esquema deste tipo de detector.

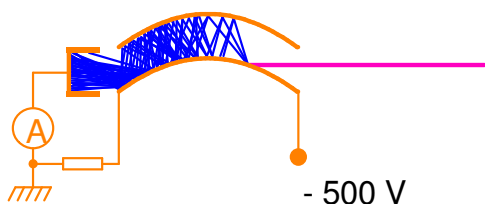
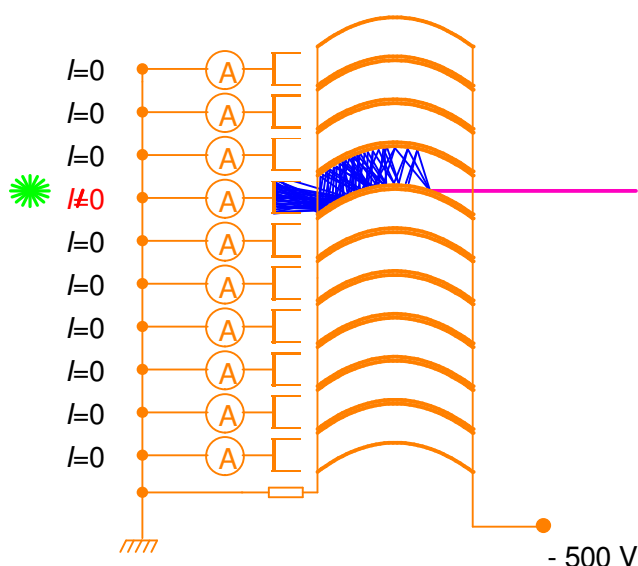


Fig. 6.5.6 Tubo de multiplicação de elétrons para detecção de partículas carregadas.

Com o princípio deste tipo de detector pode-se formar um detector com resolução espacial, ou seja, um detector que informa não apenas que chegou um íon, mas informa também

o local da chegada. Colocam-se muitos destes tubos paralelamente formando uma fileira. Desta maneira não é preciso colocar o detector num trilho e movê-lo para efetuar uma varredura dos valores de m/q . Com uma varredura feita com o movimento do



detector, precisa-se manter o feixe de partículas durante todo o processo. Então a utilização de um detector único móvel implica num gasto alto de substâncias. Consequentemente este tipo de espectrômetro não serve para amostras com pouca substância. Neste caso é vantajoso usar detectores com resolução espacial. A figura 6.5.7 mostra o esquema deste tipo de detector múltiplo.

Fig. 6.5.7 Detector com resolução espacial.

Há um outro tipo de analisador de massa que usa a frequência angular de rotação num campo magnético uniforme para a determinação do quociente q/m . Este aparato é conhecido com a sigla FT-ICR MS (Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometer). Os íons que devem ser analisados são injetados no centro de uma câmara de vácuo. Em toda a câmara existe um campo magnético extremamente intenso e muito estável. Neste espaço se cria também um campo elétrico oscilatório com uma frequência angular ω . Aqueles íons cuja velocidade angular $\omega_{q/m} = |q\vec{B}/m|$ coincide com ω receberão energia desta oscilação elétrica no ritmo certo e estes seguirão em órbitas espirais até a parte mais afastada do centro da câmara. Geralmente há mais de um tipo de íon na amostra. Para levar todos os tipos de íons para uma órbita circular grande, a frequência angular ω é variada. Uma vez que todos os íons foram acelerados e levados para uma órbita de grande raio, o campo

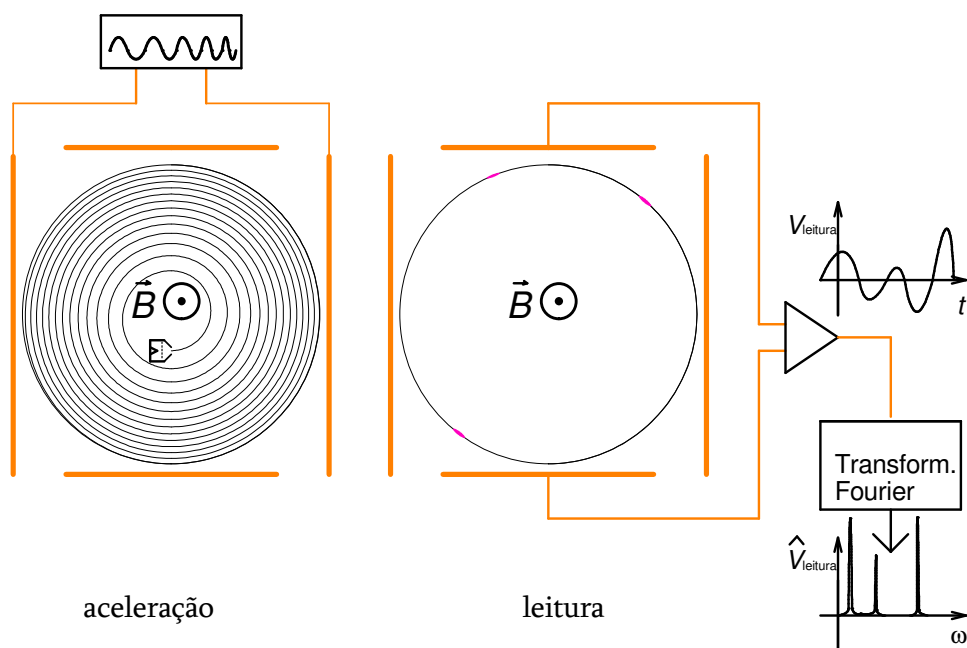
oscilatório é desligado. Então agora há vários pacotes de íons circulando, cada pacote com a sua velocidade angular característica $\omega_{q/m} = |q\vec{B}/m|$. Estas cargas em movimento circular induzem em dois eletrodos existentes na câmara um sinal elétrico $V_{leitura}(t)$. Cada pacote de íons contribui para este sinal com uma oscilação cuja frequência angular é a do pacote:

$$(\text{contribuição do pacote com carga específica } q/m) = A_{q/m} \cos(\omega_{q/m}t + \phi_{q/m}) \quad (6.5.1).$$

A amplitude $A_{q/m}$ desta oscilação é proporcional ao número de íons dentro deste pacote. São estes valores que devem ser determinados. A maneira de obter estas amplitudes $A_{q/m}$ é com o cálculo da transformada de Fourier do sinal $V_{leitura}(t)$.

Ao contrário dos demais espectrômetros de massa, o FT-ICR MS mede todos os íons ao mesmo tempo e sem separá-los espacialmente. Isto tem como consequência de os sinais captados serem fortes mesmo que cada tipo de íon esteja presente apenas numa concentração ínfima. Pode-se mostrar que este fato melhora a razão entre sinal e ruído¹. Tipicamente uns 200 íons de uma espécie são suficientes para gerar um sinal detectável.

Fig. 6.5.8 Funcionamento de um espectrômetro de massa por transformada de Fourier. À esquerda: fase de aceleração e criação de pacotes de íons em órbita circular grande. A varredura de frequência (gráfico na caixinha do gerador) está mostrada exageradamente rápida. À direita: Leitura do sinal induzido em eletrodos e análise de Fourier. O triângulo simboliza um amplificador.



Este método de Análise de Fourier de Ressonância Iônica de Ciclotron fornece espectros de massa com altíssima resolução na massa. Isto permite distinguir até moléculas que nominalmente teriam a mesma massa, mas cuja massa verdadeira difere ligeiramente por causa da energia de ligação nuclear. Por exemplo, a tabela 6.5.1 mostra valores de massas (em Dalton) de alguns elementos. Olhando os íons $C_{17}H_{21}^+$ e

¹ Isto é um efeito que foi primeiramente descoberto na espectroscopia óptica, em que a transformada de Fourier também pode ser utilizada. O efeito é conhecido como *vantagem de Fellgett*.

$C_{16}H_{17}O^+$ superficialmente, eles teriam a mesma massa, 225 Da. Um espectrômetro de massa de baixa resolução não seria capaz de destingi-los. Mas por causa das energias de ligação nuclear e com a famosa fórmula $E = mc^2$, as verdadeiras massas são ligeiramente diferentes:

$$\begin{aligned} \text{massa de } C_{17}H_{21}^+ &= 225,16378 \text{ Da} \\ \text{massa de } C_{16}H_{17}O^+ &= 225,12739 \text{ Da} \end{aligned} \quad (6.5.2)$$

Tabela 6.5.1 Massas de isótopos estáveis de Hidrogênio, Carbono e Oxigênio e do elétron.

Elemento	Massa [Da]
H^1	1,007825
C^{12}	12 (exato por definição da unidade Dalton)
O^{16}	15,99491461956
e^-	$5,48579909070 \times 10^{-4}$

Num aparato de FT-ICR estes casos de massas quase iguais podem ser distinguidos.

Isto não significa necessariamente que um espectrômetro de massa simples com baixa resolução não possa distinguir as moléculas com massas quase iguais. Além da separação das massas e a detecção, há ainda um terceiro aspecto importante nos espectrômetros de massa, a saber, o processo de ionização. Dependendo do método que se usa, uma espécie de molécula grande é quebrada de diversas maneiras durante o processo de ionização. Então em geral a ionização de uma amostra de moléculas M fornece uma mistura de íons de fragmentos M_a , M_b ... da molécula original.

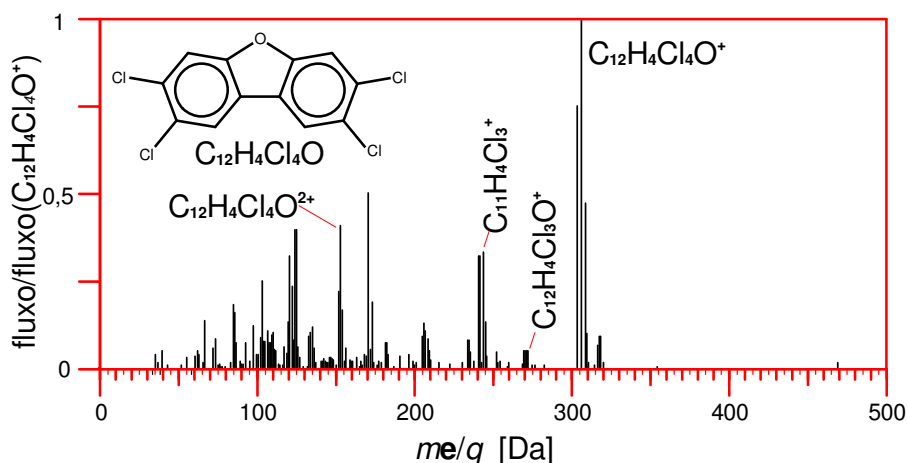
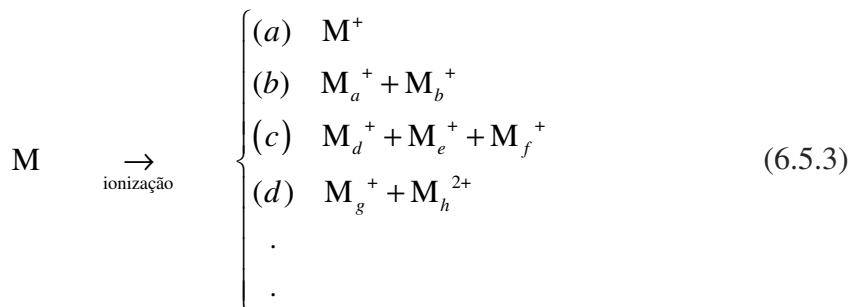


Fig. 6.5.9 Exemplo de espectro de massas dos íons gerados por ionização por impacto com elétrons nas moléculas

$C_{12}H_4Cl_4O$. Alguns dos íons estão indicados. Picos ao lado direito do pico molecular $C_{12}H_4Cl_4O^+$ são causados pela presença de isótopos diferentes na amostra.

Consequentemente uma determinada espécie química M resulta num conjunto grande de picos no espectro de massa. A figura 6.5.9 dá um exemplo de um espectro de massa da espécie 2,3,7,8-tetrachlorodibenzofuran ionizada por impacto de elétrons.

Estes padrões de picos funcionam como as impressões digitais das pessoas. Mesmo duas espécies químicas, que contêm exatamente os mesmos átomos e consequentemente têm a mesma massa², dariam padrões de picos diferentes se as moléculas tiverem estruturas químicas diferentes e com isto se quebram em fragmentos diferentes. Então com o conhecimento do método de ionização, um espectro de massa pode até fornecer informação estrutural da molécula.

Falamos que o conjunto de picos num espectro de massa é como uma impressão digital. Pois bem, imaginem que um detetive quisesse mostrar que determinada pessoa viajou no metrô. Ele examina as marcas digitais deixadas pelas pessoas num destes canos de aço inox que servem para se segurar numa curva ou freada. Obviamente este detetive não terá sucesso. Centenas de marcas digitais, uma em cima da outra, não permitem distinguir nenhuma delas. O mesmo acontece na análise química com um espectrômetro de massa quando a amostra contém uma mistura de centenas de substâncias. Esta é a situação típica com amostras na biologia. Neste caso pode-se fazer uma separação prévia das espécies com métodos chamados de *cromatografia*, que são baseados no arraste de substâncias em algum fluxo.

Quando esta separação de espécies não for possível, há ainda outra forma de analisar misturas complexas de substâncias. Pode-se usar um método de ionização que praticamente não quebra as moléculas e produz predominantemente os íons $(M+H)^+$, $(M+2H)^{2+}$, $(M+3H)^{3+}$, onde $(M+nH)^{n+}$ significa o íon obtido da molécula M através de um acréscimo de n prótons. Depois estes íons são analisados com o método de Análise de Fourier de Ressonância Iônica de Ciclotron. Neste método cada espécie M resulta numa família de picos relativamente pobre, isto é, com poucas linhas e altamente resolvidas. A resolução do método FT-ICR é tão alta que a composição de misturas com até 11000 espécies pode ser analisada³. O método de ionização que não quebra as moléculas é conhecido com o nome de “ionização por *eletrospray*” (ESI *elektrosprayionisation*). Neste método a amostra é dissolvida num solvente e gotículas da solução são positivamente carregadas ao saírem de uma agulha para uma câmara de baixa pressão. Nesta câmara o solvente evapora reduzindo o diâmetro da gotícula. Com a diminuição do diâmetro a densidade superficial de carga da gota cresce e chega num valor limite⁴ e a gota explode jogando íons para fora.

É evidente que os espectrômetros de massa são ferramentas importantíssimas na pesquisa química e biológica. Mas há ainda outras aplicações curiosas. Por exemplo, a razão da abundância dos isótopos O^{16} e O^{18} em amostras de gelo e em calcita formada

² A todo rigor, duas moléculas com os mesmos átomos, mas com estruturas diferentes, podem ainda ter massas ligeiramente diferentes porque as energias envolvidas nas ligações químicas também resultam numa diferença de massa. Mas estas diferenças são tão pequenas que elas escapam mesmo da resolução do FT-ICR MS.

³ C. A. Hughey, R. P. Rodgers, A. G. Marshall: Resolution of 11000 Compositionally Distinct Components in a Single Electrospray Ionization Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrum of Crude Oil. Anal. Chem. 2002, 74, 4145-4149

⁴ Limite encontrado em 1882 por Lord Rayleigh (12/11/1842– 30/06/1919).

por crustáceos permite reconstruir a história climática de Terra⁵. Moléculas de água com o isótopo O^{16} evaporam mais facilmente que moléculas de água com O^{18} . Em contrapartida as moléculas de água com O^{18} no vapor são as primeiras a condensar. Isto leva a uma separação destas espécies no globo terrestre. As primeiras chuvas nas regiões tropicais são mais ricas em O^{18} enquanto o restante de umidade que é levada para as regiões polares tem menos O^{18} . Em épocas mais frias esta diferença fica mais acentuada. Daí resulta que durante eras glaciais a abundância de O^{18} na neve das geleiras polares era menor e maior em sedimentos de calcita nas regiões tropicais. Então amostras de cilindros verticais de gelo tiradas de geleiras e de cilindros de sedimento nos oceanos podem contar a história climática de Terra quando analisadas num espectrômetro de massa. Infelizmente há diversos erros sistemáticos nestes métodos, por exemplo, erros por causa da influência da salinidade do mar no processo de evaporação da água. Então os resultados destas pesquisas devem ser vistos com cautela. Estes métodos de medida de temperatura se chamam métodos *proxy*⁶. Também a datação de objetos arqueológicos baseada em abundâncias de isótopos de elementos como argônio ou carbono aproveita a alta sensibilidade dos espectrômetros de massa.

Mencionamos apenas alguns tipos de espectrômetros de massa. Há uma grande variedade de técnicas no mercado. Especialmente na datação arqueológica por abundância de radioisótopos usam-se espectrômetros especiais envolvendo processos de aceleração das partículas para altas energias. Como esta seção faz parte do capítulo da força magnética, enfatizamos especialmente os espectrômetros que envolvem o campo magnético. O desvio da trajetória de partículas carregadas num campo magnético é também uma das principais ferramentas na pesquisa sobre partículas elementares.

Na física de partículas elementares se observam partículas que saem de uma colisão entre um projétil e um alvo. Para muitas das partículas resultantes, sua identificação é feita com medidas geométricas das trajetórias num campo magnético intenso. Para poder medir os raios de curvatura destas trajetórias, é necessário registrar as trajetórias ou torná-las visíveis. Uma técnica de tornar trajetórias de partículas visíveis foi inventada por Charles Thomson Rees Wilson⁷. Sua invenção é conhecida como câmara de névoa ou câmara de Wilson. Numa câmara fechada se cria um vapor de água ou de álcool supersaturado. Quando uma partícula eletricamente carregada passa com alta velocidade por este vapor, ela deixa um rastro de íons, e estes íons servem como núcleos de condensação para o vapor. Então ao longo da trajetória da partícula se forma uma fileira de gotículas de névoa. Colocando este tipo de instrumento num campo magnético, pode-se medir o raio de curvatura da trajetória. A partícula perde energia ao atravessar o gás ou outro material, e isto resulta numa modificação do raio de curvatura. Isto permite estimar a energia da partícula e conseqüentemente a razão q/m . Algumas descobertas fundamentais sobre o mundo das partículas subatômicas foram feitas com este método. A figura 6.5.10 mostra uma imagem do trabalho⁸ de C. D. Anderson⁹ que é considerado a descoberta do pósitron (antipartícula do elétron).

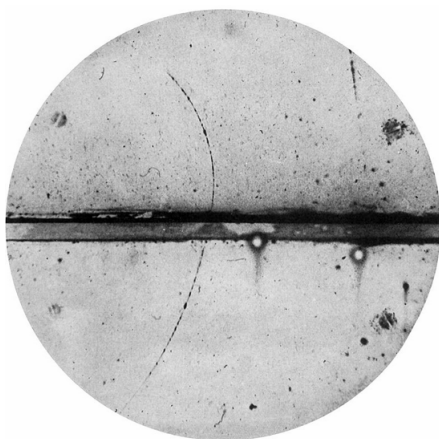
⁵ Veja por exemplo: http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Paleoclimatology_OxygenBalance/

⁶ Do inglês, Proxy significa procurador. A razão dos isótopos representa a temperatura como se fosse uma pessoa com procuração que representa outra ausente.

⁷ Charles Thomson Rees Wilson (14/02/1869 – 15/11/1959) estava investigando a formação de nuvens. Na tentativa de reproduzir no laboratório aquilo que acontece na atmosfera terrestre, ele descobriu que partículas eletricamente carregadas podem marcar sua trajetória num vapor supersaturado.

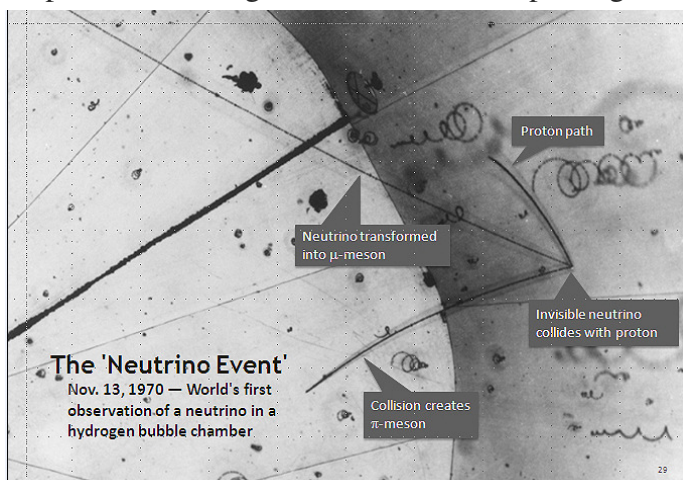
⁸ Anderson, Carl D. (1933). "The Positive Electron". *Physical Review* **43** (6): 491–494. DOI:10.1103/PhysRev.43.491

Fig. 6.5.10 Trajetória de um pósitron antes ($E \approx 63 \text{ MeV}$) e depois ($E \approx 23 \text{ MeV}$) de passar por uma placa de chumbo de 6 mm de espessura. Num campo magnético de 1,5 T, que aponta da posição do observador para a imagem, a trajetória se curva para a esquerda indicando que esta partícula tem carga positiva. Se a partícula fosse um próton, sua energia (julgando pela curvatura da trajetória superior) teria o valor de $E \approx 0,3 \text{ MeV}$ e, de acordo com dados empíricos, um próton com esta energia não poderia voar tão longe no ar. Os traços visíveis são formados por inúmeras gotículas de névoa numa câmara de Wilson.



Em 1952 Donald A. Glaser¹⁰ inventou uma modificação da câmara de Wilson. Em vez de usar um vapor supersaturado, ele usou um líquido superaquecido, ou seja, um líquido que pelos valores de temperatura e pressão já deveria estar na forma gasosa. Quando uma partícula ionizante atravessa este líquido, ela deixa um rastro de minúsculas bolhas de gás. Estas câmaras de bolhas foram muito usadas nos grandes laboratórios de pesquisa de altas energias. A figura 6.5.11 mostra o primeiro “flagrante” de um neutrino numa câmara de bolhas.

Nos anos 60 Georges Charpak¹¹ inventou a *câmara proporcional multifios*, um detector parecido com o contador de Geiger, mas com diversos fios e capaz de informar a energia da partícula e a geometria da trajetória. Esta, operada numa região com intenso campo magnético, pode informar sobre a razão q/m



das partículas e permite altas taxas de aquisição de dados, já que ela é lida eletronicamente. Com todos estes detectores o desvio da trajetória causada por um campo magnético é um ingrediente essencial para a interpretação dos resultados.

Fig. 6.5.11 Flagrante de neutrino numa câmara de bolhas.

"FirstNeutrinoEventAnnotated" by Argonne National Laboratory - Image courtesy of Argonne National Laboratory. Licensed under Public Domain via Commons -

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FirstNeutrinoEventAnnotated.jpg#/media/File:FirstNeutrinoEventAnnotated.jpg>

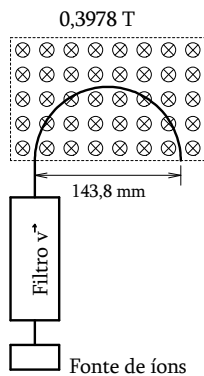
⁹ Carl David Anderson (03/09/1905 – 11/01/1991) descobriu não apenas o pósitron, mas, junto com o seu aluno Seth Henry Neddermeyer (16/09/1907 – 29/01/1988), descobriu também o muon, uma partícula negativamente carregada e 207 vezes mais pesada do que o elétron.

¹⁰ Depois de inventar a câmara de bolhas e de trabalhar em física de partículas elementares, Donald Arthur Glaser (21/09/1926 – 28/02/2013) estudou biologia, pesquisou sobre câncer de pele e fundou a primeira empresa que trabalhava com manipulação genética. Mas sua linha de atuação mudou mais uma vez e ele se transformou num especialista de neurociência.

¹¹ Georges Charpak (Originalmente Jerzy Charpak, 01/08/1924 – 29/09/2010) nasceu em Dąbrowica (Polônia - Ucrânia) de uma família judia. A família emigrou para a França em 1931. Durante a Segunda Guerra Mundial Charpak lutou na resistência francesa, mas foi capturado e enviado em 1944 para o campo de concentração em Dachau onde permaneceu até a libertação do campo em 1945. Depois da guerra ele estudou engenharia civil. Fez um doutorado em Física e entrou no CERN onde inventou a câmara proporcional multifios e outros detectores de partículas.

Exercícios

E 6.5.1: A figura 6.5.4 mostra um espectrômetro de massa simples no qual a varredura de valores de q/m é feita com o movimento de um detector único ao longo de um trilho. Pense numa maneira de fazer uma varredura de valores de q/m sem mover o detector e sem o uso de um detector múltiplo com resolução espacial.



E 6.5.2: Íons com carga $q = -1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ saem de uma fonte de íons e passam por um filtro de velocidade com um campo elétrico de $1,000 \times 10^4 \text{ V/m}$ e um campo magnético de $0,2860 \text{ T}$ (campos cruzados como explicado na aula). Estes íons entram numa região com campo magnético uniforme de $0,3978 \text{ T}$ e descrevem uma trajetória circular com diâmetro de $143,8 \text{ mm}$. Calcule a massa dos íons. Qual será a espécie química?