

## UC Irvine

### UC Irvine Previously Published Works

#### Title

Implementação da Técnica de Espectroscopia de Massa com Aceleradores - AMS - no Brasil  
(Implementation of Accelerator Mass Spectrometry - AMS - in Brazil)(in Portuguese)

#### Permalink

<https://escholarship.org/uc/item/3vt7b25v>

#### Journal

Revista de Física Aplicada e Instrumentação, 12(2)

#### Authors

Santos, Guaciara

Acquadro, J.C.

Anjos, R.M.

et al.

#### Publication Date

1997-12-03

Peer reviewed

# Implementação da Técnica de Espectrometria de Massa com Aceleradores - AMS - no Brasil

G.M. Santos<sup>a+</sup>, J.C. Acquadro<sup>b</sup>, R.M. Anjos<sup>a+</sup>, P.R.S. Gomes<sup>a+</sup>, C. Tenreiro<sup>c</sup>,  
R. Liguori Neto<sup>b+</sup>, U. Schnitter<sup>b</sup>, N.H. Medina<sup>b+</sup>, N. Carlin Filho<sup>b+</sup>, N. Added<sup>b+</sup>,  
A.M.M. Maciel<sup>a+</sup>, M.A. Rizzuto<sup>b</sup>, M.M. Coimbra<sup>d</sup>, C.R. Appoloni<sup>d</sup>

<sup>a</sup>*Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense,*

*Av. Litoranea s/n, Cragoatá, Niterói, R.J., 24210-310, Brazil*

<sup>b</sup>*Instituto de Física, Universidade de S. Paulo, C.P. 20516, S. Paulo, 01498-970, Brazil*

<sup>c</sup>*Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, Santiago, Chile*

<sup>d</sup>*Departamento de Física, Universidade Estadual de Londrina, Paraná, Brazil*

<sup>+</sup>*Fellow of the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico- CNPq*

Recebido em 3 de Dezembro 1996

The technique of Accelerator Mass Spectrometry (AMS) is described, and the status of the Brazilian AMS program, based on the University of S. Paulo 8UD Tandem accelerator, is presented. Emphasis is given on its potential applications, the characteristics of the method and on the results of different tests and developments made so far.

A técnica de Espectrometria de Massa com Aceleradores (AMS) é descrita, e a situação atual do Programa Brasileiro de AMS, baseado no acelerador 8UD Tandem da Universidade de São Paulo, é apresentada. É dada ênfase às suas aplicações em potencial, às características do método e aos resultados de diversos testes e desenvolvimentos já alcançados.

## 1. Introdução

A técnica de espectrometria de massa com aceleradores (AMS) constitui-se atualmente no mais poderoso método de espectrometria de massa. Seu maior atrativo reside no fato de que ela permite a determinação de elementos a nível de ppb (partes por bilhão) com certa facilidade [1, 2, 3]. Na técnica de AMS, o acelerador de partículas é usado como um analisador magnético e eletrostático de massa e apresenta-se como uma ferramenta ideal na determinação das razões de abundância de isótopos raros [4,5]. As concentrações de radioisótopos de meia vida longa (como por exemplo, <sup>10</sup>Be -  $1.51 \times 10^5$  anos, <sup>14</sup>C - 5730 anos, <sup>26</sup>Al -  $7.4 \times 10^5$  anos e <sup>36</sup>Cl -  $3.01 \times 10^5$  anos), encontrados na natureza, resultantes de reações nucleares pela radiação cósmica, podem ser determinadas a partir de simples amostras naturais. Na técnica de espectrometria de massas convencional, a determinação da concentração destes isótopos é obtida da radiação emitida durante seus decaimentos. E isto só é possível utilizando-se grandes quantidades

de <sup>14</sup>C. Em contrapartida, a técnica de AMS mede diretamente tais concentrações, reduzindo sensivelmente a quantidade da amostra e aumentando a escala temporal da datação, uma vez que a utilização de radioisótopos com meias vidas maiores (por exemplo <sup>10</sup>Be, <sup>26</sup>Al e <sup>36</sup>Cl) permite a datação de amostras de milhões de anos. Assim, os feixes de íons, produzidos a partir destas amostras de isótopos raros, são acelerados a energias da ordem de MeV e medidos, posteriormente, pela contagem individual dos átomos através de técnicas de detecção nuclear. As concentrações destas espécies raras são determinadas através da comparação de suas taxas de contagem com as taxas de maior intensidade de um dos isótopos estáveis presentes na amostra do material. Uma vez que as intensidades de correntes típicas nos aceleradores são da ordem de  $10^{-6}$ - $10^{-9}$  Ampere ( $\cong 10^{13}$  íons/s), concentrações relativas ao redor de  $10^{-13}$  -  $10^{-14}$  podem ser medidas pela contagem individual dos íons raros.

Esta sensibilidade permite que o método AMS seja

aplicado em diversos ramos da ciência (climatologia, arqueologia, oceanografia, glaciologia, geologia, medicina, hidrologia etc). Devido à possibilidade da utilização de amostras da ordem de miligramas, o método é ideal para a análise de preciosidades arqueológicas (é não destrutivo) e em aplicações biológicas onde é necessária a introdução de doses radioativas (reduzidíssimas, neste caso) em seres vivos.

Existem atualmente cerca de 40 laboratórios no mundo trabalhando ou tentando implantar a técnica de AMS, sendo que cerca da metade utiliza pequenos Tandem e - Tandentron (2 a 3 MV) e os demais usam Tandem maiores. O isótopo mais estudado é, sem dúvida, o  $^{14}\text{C}$ . Os outros isótopos mais utilizados são  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{129}\text{I}$ . Estão sendo desenvolvidos estudos com  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{60}\text{Fe}$ ,  $^{238}\text{U}$  [3,6].

Neste artigo é descrito o estágio atual da implementação desta técnica no Brasil através de um programa envolvendo diversas instituições. O acelerador em que a técnica está sendo implantada é o Pelletron da USP. Na seção 2, são apresentadas algumas aplicações que motivam o interesse pelo uso do AMS no Brasil. Na seção 3, é feita uma apresentação do método experimental utilizado e desafios que devem ser transpostos para se obter sucesso com a técnica. Na seção 4, são apresentados os resultados obtidos até o momento. Finalmente, na seção 5, são apresentadas as perspectivas para o programa.

## 2. Aplicações da técnica de AMS

É muito grande o conjunto de áreas onde a técnica de AMS pode ser aplicada, e neste artigo será feito apenas um breve resumo destas. Os "proceedings" das mais recentes International Conferences on AMS [2,3,6] são excelente referências sobre o assunto.

### *Aplicações Biomédicas*

O  $^{14}\text{C}$  é o elemento mais utilizado nesta área, podendo ser introduzido em qualquer molécula orgânica e posteriormente rastreado. O uso do AMS para a detecção do  $^{14}\text{C}$  permite diminuir de 7 g para 2-5 mg a massa da amostra considerada, ainda assim aumentando a taxa de contagem de 0,030 c/min para 0,70 c/min. Isso permite a datação de materiais com conteúdo de carbono de 1400 a 3500 vezes menor que

o necessário na metodologia de espectrometria beta convencional, sendo tal característica fundamental em aplicações biológicas, onde o material radioativo deve ser injetado para o estudo. Dentre as aplicações estão investigações sobre câncer, onde o AMS traça toxinas e herbicidas existentes em alimentos, e estuda seus metabolismos, incluindo modificações hereditárias - são analisadas pequenas amostras de sangue e urina. Existem estudos, utilizando como amostra a urina de animais cobaias, sobre efeitos da poluição da gasolina e cigarros, e investigações sobre como a benzina, que causa leucemia, se liga ao DNA do fígado. Em neurologia, a transmissão de neurônios pode ser acompanhada com  $^{14}\text{C}$ -AMS. Testes respiratórios e dermatológicos são realizados ingerindo-se e difundindo-se na pele o  $^{14}\text{C}$ , que é metabolizado e expelido, medindo-se a atividade com cintiladores.

Aplicações biomédicas com uso de outros elementos, tais como  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{129}\text{I}$ , também são importantes. Por exemplo, estudam-se concentrações de  $^{36}\text{Cl}$  e  $^{129}\text{I}$  em dentes e ossos. O uso de  $^{26}\text{Al}$  em áreas biológicas tornou-se importante devido à descoberta de que o Al, considerado por muito tempo como sendo um elemento inócuo para o organismo, talvez seja um elemento de altíssima toxicidade, quando em contato com o sistema neurológico. Este elemento tem sido encontrado em proporções consideradas apreciáveis [7] em tecidos como o do cérebro de pessoas com doenças como a de Alzheimer. Além disso, ele é apontado como responsável por anemia e problemas renais crônicos [8-11]. O uso comum de compostos de Al em anti-ácidos pode ser uma via de acesso para o Al no corpo humano [12]. Além de estudos que envolvem a água potável de algumas localidades, onde a concentração de alumínio é considerada acima do normal [13]. Também com  $^{26}\text{Al}$  estuda-se câncer de tireóide, analisando-se amostras através da medida da concentração do elemento estável com amostras conhecidas e procurando estabelecer a concentração inicial. Na química fisiológica mede-se a concentração do traçador  $^{26}\text{Al}$  em sangue, para o estudo da influência de silicatos dissolvidos.

### *Aplicações Geológicas*

A técnica de AMS permite a datação de  $^{14}\text{C}$  de componentes orgânicos e inorgânicos dissolvidos em aqua-

duto, estudar falhas sísmicas e geológicas, terremotos e erupções vulcânicas. O uso de elementos radioativos como traçadores de meia vida longa tem amplas aplicações na hidrologia e geologia, sendo importante neste caso o uso de  $^{10}\text{Be}$  e  $^{26}\text{Al}$ , que são usados em estudos sobre erosão, composição de glaciares, montanhas e dos Pólos, o que permite estudar mudanças climáticas na Terra. As idades e concentrações são estudadas em função da profundidade e/ou altitude. A medida de  $^{10}\text{Be}$  no gelo é um indicador da produção cosmogênica no passado e ajuda a estabelecer a cronologia de “ice cores”. Estudos de efeitos solares e geomagnéticos nas concentrações de  $^{10}\text{Be}$  e  $^{36}\text{Cl}$  em gelos polares dão informações sobre a circulação atmosférica.

#### *Aplicações Arqueológicas*

Esta é uma das áreas onde a técnica de AMS encontra-se mais difundida, com datações de pinturas de cavernas, ossadas primitivas, sítios arqueológicos, igrejas medievais etc. A datação utilizando quantidades ínfimas de material permite um estudo detalhado, com erro associado muito menor que os obtidos com as técnicas usuais.

#### *Traço de Elementos por AMS (TEAMS):*

Esta é outra área onde tem ocorrido grande desenvolvimento pela técnica de AMS. As impurezas de materiais, como o silício, são estudadas detalhadamente. Grandes companhias estão fazendo altos investimentos em AMS.

### **3. Arranjo e método experimental**

O arranjo experimental utilizado pode ser dividido, basicamente, nas seguintes partes: preparação de amostras, fonte de íons, acelerador eletrostático, controle da troca de feixes estáveis e radioativos e detetor de partículas carregadas. A fonte de íons é do tipo SNICS (Source of Negative Ions by Cesium Sputtering), o acelerador é do tipo Tandem 8UD, a injeção de feixes é seqüencial e o detetor atual é do tipo câmara de ionização, instalados no laboratório Pelletron da USP. Em linhas gerais, este arranjo baseia-se no mesmo

princípio da espectrometria de massas convencional (EM), com a diferença que a aceleração é feita com um potencial da ordem dos mega Volts (MV). Os demais elementos da óptica iônica são comparáveis com EM comum. Entretanto, é interessante e importante o conhecimento dos distintos componentes destes elementos a fim de que se possa entender as possibilidades e limitações do método de AMS. A seguir será dada uma descrição simples dos elementos que compõem nosso arranjo experimental para AMS.

#### **a) Fonte de íons:**

As fontes de íons mais usadas em AMS são as do tipo “sputtering”. O laboratório conta com uma destas fontes, do tipo SNICS, de cone simples, usando o céσιο como elemento de “sputtering”, construída em São Paulo [14] e similar à fonte de Middleton [15,16]. É feita de aço inox e possui geometria cilíndrica. Os átomos de Cs são acelerados até o catodo (por uma diferença de potencial de 4 kV), incidindo sobre um cilindro de cobre (localizado no extremo do catodo) que contém os elementos de interesse, em forma de uma pastilha. Parte dos íons arrancados por sputtering são carregados negativamente pela captura dos elétrons cedidos por ionização do Cs no filamento de tântalo (onde é mantida uma corrente entre 26 a 36 A, dependendo da pastilha em uso). Estes íons são posteriormente extraídos por uma lente a 20 kV e assim injetados no tubo de pré-aceleração.

Para a utilização regular da técnica de AMS é altamente recomendável o uso de fontes de íons tipo multicatodo. As fontes de íons precisam ter as seguintes características para poderem ser usadas de forma eficiente com AMS: correntes altas e estáveis; alta eficiência; baixa memória (para medidas confiáveis, sem que haja a necessidade de limpá-la constantemente) e rápida troca de amostras. Como as dimensões das amostras são da ordem de mm, o foco da fonte de íons deve ser excelente. Recentemente, foi adquirida pelo laboratório Pelletron uma nova fonte de íons que atende a tais requisitos. É uma fonte de “sputtering” de céσιο com 32 catodos, da NEC, que se encontra em fase de testes em uma bancada, e deverá entrar em operação no início de 1997. Os testes descritos neste artigo foram realizados com a fonte de catodo simples.

## b) Sistema de Aceleração:

Os íons extraídos da fonte são pré-acelerados pelo tubo de pré-aceleração por uma tensão de 70 kV, estabilizada dentro de  $\pm 100$  V, imprimindo-lhes uma energia total de 90 keV. O segundo elemento óptico é um duplete de quadrupolos eletrostáticos que permite focalizar o feixe na entrada do ímã seletor de massa ( $ME/Z^2=20$ ). Neste ímã, seleciona-se a massa dos íons a serem injetados no acelerador. O campo magnético é bastante estável, pois as variações a longo termo da corrente do eletro-ímã são menores que 1/5000.

Em seguida, há uma lente composta de um tripleto de quadrupolos eletrostáticos que focaliza o feixe no interior do acelerador.

O acelerador consiste, basicamente, de um tubo acelerador (tubo de baixa energia), de um terminal de alta tensão e de mais outro tubo acelerador (tubo de alta energia). Todos estes elementos estão colocados dentro de um tanque e envolvidos por um gás isolante,  $SF_6$ , a uma pressão de aproximadamente 5 atmosferas. A finalidade deste gás é evitar descargas entre o terminal e o meio externo. Os tubos aceleradores e a região de passagem das partículas no terminal são mantidos em alto vácuo ( $\sim 10^{-8}$  Torr). No interior do tanque encontram-se, também, o sistema de carga, as colunas de suporte, etc.

O sistema usual de controle da estabilidade da tensão do terminal (controle da energia) utiliza o modo “feedback” corrente-fendas. No entanto, este procedimento não pode ser aplicado para os feixes instáveis que possuem baixíssimas intensidades. Portanto, faz-se necessário o controle da estabilidade através do voltímetro gerador.

No centro do terminal há um “stripper”, constituído por uma folha de carbono, com espessura usual de 10 a 20  $\mu g/cm^2$ . No entanto, para a técnica de AMS estas folhas devem possuir espessuras da ordem de 5  $\mu g/cm^2$ , afim de garantir uma transmissão constante do feixe pela mesma, durante o tempo de aquisição dos dados. A finalidade desta folha é quebrar as moléculas e arrancar os elétrons dos íons incidentes, deixando-os num estado de carga  $q$ . Assim, a energia final dos íons acelerados é  $E_{lab} = (1 + q)V_T$  MeV, onde a distribuição de cargas  $q$  depende da energia de injeção dos íons no “stripper”.

Desta forma, para feixes de íons como o  $^{35,36,37}Cl$ , formados diretamente na fonte como íon  $Cl^-$ , estes podem possuir estados de carga de até  $q=10^+$  com probabilidades razoáveis. O feixe de  $^{14}C$ , formado diretamente na fonte como íon  $C^-$  tem como estado de carga mais provável  $q=4^+$ . Entretanto, para o caso do  $^{26,27}Al$ , a extração do feixe é feita em forma de uma molécula de  $AlO^-$ , de massas 42 e 43, segundo o isótopo, sendo esta quebrada no “stripper”, mas injetada com uma energia equivalente menor, devido a dependência da energia cinética com a massa. Para cada feixe e acelerador existe uma faixa de tensão ideal de terminal, do ponto de vista de estabilidade e transmissão. Para os feixes descritos acima, em São Paulo estas faixas estão entre 5 e 7 MV.

Após o acelerador existem mais elementos ópticos (quadrupolos magnéticos) e outro ímã analisador ( $ME/Z^2=200$ ), que seleciona a massa e energia do feixe, e portanto, rejeita moléculas e feixes do elemento com outros estados de carga. Outro ímã (“switching magnet”) seleciona a canalização a ser utilizada. Vários copos de Faraday e monitores da forma do feixe estão instalados ao longo de toda canalização.

A figura 1 mostra esquematicamente o sistema acelerador.

## c) Aceleração de Feixes Radioativos e Estáveis:

De forma geral, existem dois sistemas de injeção de feixes estáveis e radioativos para a técnica de AMS: simultânea e seqüencial. Na injeção simultânea de isótopos radioativos e estáveis, são utilizados copos de Faraday (FC) fora da linha do feixe. Na injeção seqüencial, como utilizada em São Paulo, há mudança de parâmetros do sistema acelerador para a troca de feixes. Os laboratórios que trabalham com poucos feixes e pequenas máquinas utilizam, quase todos, a injeção simultânea.

Com a injeção seqüencial é usual acumular espectros de duração inferior a um minuto para os feixes estáveis e, de 5 a 10 minutos para os radioativos. O intervalo de tempo para mudança dos parâmetros do sistema acelerador, de forma a se passar de um feixe a outro, deve ser inferior a um minuto ou mesmo 30 segundos, tornando necessário o desenvolvimento de técnicas automáticas e precisas de realizar tais operações.

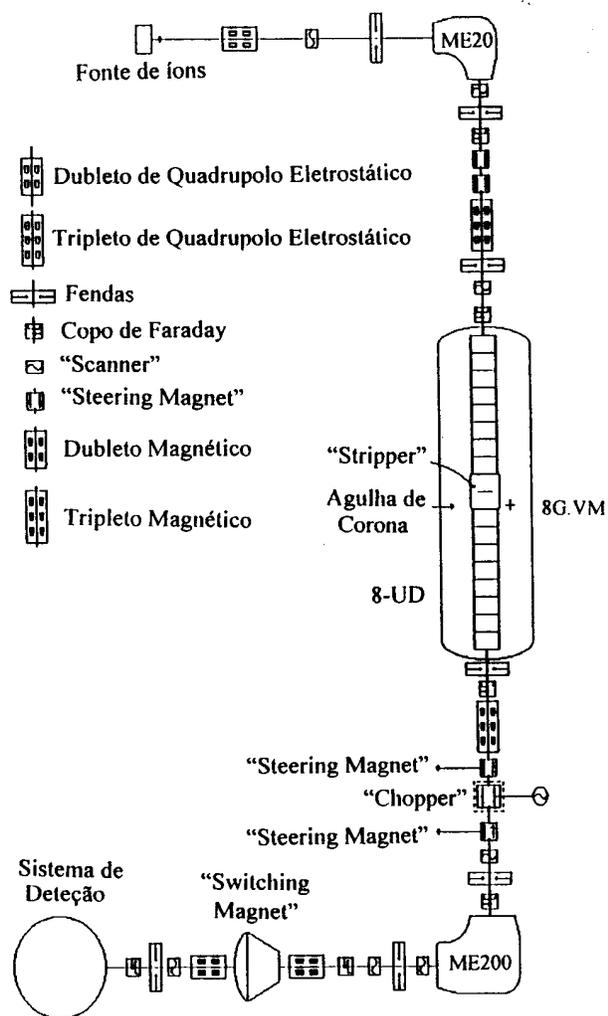


Figura 1. Esquema do acelerador Pelletron da USP.

Em geral, para medir razões isotópicas de amostras desconhecidas, também são medidas amostras padrão conhecidas, usadas como referências, e amostras sem o elemento radioativo, para determinação do fundo ("background"). Precisões de concentrações relativas da ordem de 0.1% a 5% são usualmente obtidas.

Os feixes radioativos, de baixíssima intensidade, são detetados a zero grau com a direção do feixe. Os feixes estáveis são medidos diretamente por copos de Faraday ou ainda por detetores situados fora da linha do feixe e após serem espalhados por um alvo.

#### d) Sistema de Detecção:

O principal problema técnico, quando se lida com a técnica de AMS, é a presença de contaminantes

isobáricos nas amostras naturais, como  $^{10}\text{B}$  em  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Mg}$  em  $^{26}\text{Al}$  e  $^{36}\text{S}$  em  $^{36}\text{Cl}$ . Em todos estes exemplos, a separação química dos contaminantes, em níveis requeridos para o uso de AMS, é muito difícil. Faz-se necessário, portanto, um sistema de detecção capaz de separar elementos que difiram por uma unidade de número atômico na região de massa de interesse, além de distinguir e eliminar a um nível baixíssimo a cauda do isóbaro contaminante. A completa identificação da partícula pode ser obtida combinando-se telescópios  $EE$  (ou detetor de Bragg) com sistemas de tempo de voo, ou câmaras de ionização com múltiplos anodos, espectrógrafos magnéticos, defletores eletrostáticos, filtros de velocidade etc. O sistema ideal de detecção varia muito, dependendo de diversas condições, desde simples detetores barreira de superfície para  $^{14}\text{C}$  até complexos detetores.

Inicialmente, o sistema de detecção utilizado neste trabalho foi constituído de um telescópio  $E - \Delta E$  [17], ou seja, por uma câmara de ionização sensível à posição (CISP), montada sobre o prato giratório da câmara de espalhamento  $30^\circ\text{B}$  do Laboratório Pelletron. Este possui a vantagem de permitir a identificação do número atômico ( $Z$ ) da partícula detetada.

Os dados experimentais foram adquiridos segundo alguns critérios baseados no tipo de feixe de íons incidente:

- para feixes pouco intensos (poucos milhares de íons por minuto) (por exemplo, os radioisótopos  $^{36}\text{Cl}$  e  $^{26}\text{Al}$ ), a CISP foi posicionada diretamente na linha do feixe.

- para os feixes de íons estáveis (por exemplo,  $^{35,37}\text{Cl}$  e  $^{27}\text{Al}$ ), devido à alta intensidade do feixe ( $\approx 50 \text{ nA}$ ), a CISP foi posicionada a  $20^\circ$  em relação à linha do feixe, medindo-se, então, o espalhamento elástico sobre um alvo de Au.

Com a finalidade de auxiliar na calibração dos números atômicos,  $Z$ , dos espectros biparamétricos  $E - \Delta E$ , também foi feita uma medida dos processos de fusão e espalhamento elástico dos feixes estáveis sobre um alvo de carbono.

Posteriormente, foi projetado, e no momento encontra-se em fase de construção, um detetor a gás, tipo câmara de Bragg, de uso exclusivo para o programa de AMS. Além disso, a geometria deste detetor permitirá acoplar um telescópio de tempo de voo, ca-

paz de identificar simultaneamente a massa e o número atômico da partícula detetada, importante na distinção e identificação dos isótopos  $^{35,36,37}\text{Cl}$  e  $^{36}\text{S}$ .

### e) Preparação e Análise de Amostras

A confecção apropriada de amostras é uma parte fundamental no processo de AMS, e depende de laboratórios limpos, técnicas específicas e presença de profissionais em química. Até o presente momento foram confeccionadas amostras de  $^{36}\text{Cl}$ , conforme descrito mais adiante, além da produção artificial de uma amostra de  $^{26}\text{Al}$  através de uma reação nuclear tipo (p,n).

A idade da amostra a ser datada é obtida através da comparação entre as razões das concentrações de isótopos radioativos e estáveis desta amostra e de outra amostra padrão, de idade previamente conhecida.

## 4. Resultados obtidos

As atividades iniciais do programa de AMS estão sendo centralizadas nos elementos  $^{26}\text{Al}$  e  $^{36}\text{Cl}$ . Foram efetuados testes da óptica iônica, de transmissão e de controle da tensão do terminal via Voltímetro Gerador (VG). Os resultados de alguns destes testes encontram-se publicados [17].

Vários testes de estabilidade foram feitos com o voltímetro gerador (VG), em função da posição e corrente da corona. Eles mostraram que o VG é capaz de controlar a tensão do terminal dentro de flutuações de  $\pm 2$  kV a 8 MV, que é satisfatório para aplicações com AMS.

A transmissão total do feixe de corrente elétrica para feixes  $8^+$  de  $^{35}\text{Cl}$  é da ordem de 20% para 8 MV. Esta transmissão é estável por períodos muito mais longos que os do ciclo de isótopos estáveis e instáveis acelerados.

O procedimento usado no ajuste da óptica foi, em primeiro lugar, a focalização otimizada, isto é, usa-se um feixe muito intenso, como por exemplo o feixe do isótopo estável  $^{35}\text{Cl}$  (aproximadamente 300 nA na entrada do acelerador), para efetuar a focalização por toda a extensão da máquina aceleradora. Posteriormente, foram modificadas a tensão no terminal e a corrente no ímã defletor ME20 de forma a verificar a estabilidade do ajuste efetuado para o outro isótopo estável, o

$^{37}\text{Cl}$ , também intenso, mas aproximadamente 30% menor que o obtido com  $^{35}\text{Cl}$ . As tensões aplicadas no terminal foram de 7.99 MV e 7.56 MV, respectivamente. Com este teste foram calibrados os “Helipots” de controle do ímã ME20 e do terminal, com o objetivo de encontrar os parâmetros adequados para o  $^{36}\text{Cl}$ . Cabe ressaltar que neste caso, a corrente do feixe não é mensurável nos copos de Faraday. Efetuando-se alterações cíclicas de feixe de íons de cloro, isto é testando-se a passagem dos feixes de massa de 35 a 37, notou-se que toda a óptica do feixe permaneceu inalterada. Desta forma, estes testes confirmaram que a estabilidade do VG é satisfatória para a técnica de AMS.

Para os testes com  $^{26}\text{Al}$ , primeiro foi produzido o radioisótopo a partir do bombardeio de prótons de 16 MeV sobre uma amostra de  $^{26}\text{Mg}$  via a reação  $^{26}\text{Mg}(p,n)^{26}\text{Al}$ . Esta reação garante uma boa produção de  $^{26}\text{Al}$  devido ao fato de possuir uma seção de choque da ordem de 100 mb para prótons com energias de bombardeio  $E_p$  entre  $6 \text{ MeV} \leq E_p \leq 15 \text{ MeV}$ . A amostra de  $^{26}\text{Mg}$  era composta de MgO em pó compactado sob pressão de 2 Ton. Entretanto, como o  $^{26}\text{Mg}$  foi usado na preparação da pastilha para extração de feixe de  $^{26}\text{Al}$ , feixes de  $^{26}\text{AlO}^-$  e  $^{26}\text{MgO}^-$  (massa 42) foram produzidos e acelerados. Seguindo os procedimentos da referência [14], esta amostra foi misturada com outra contendo o isótopo  $^{27}\text{Al}$ . Feixes de  $^{27}\text{AlO}^-$  (massa 43) foram produzidos de uma mistura de pós de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e Cu impressadas no catodo. Mais detalhes da preparação da amostra são encontradas nas referências [17,18]. Depois da passagem pelo “stripper”, os íons  $^{26}\text{Mg}$  e  $^{26}\text{Al}$  possuem distribuições de carga muito semelhantes, tornando-os indistinguíveis pela óptica da parte de alta energia. Desta forma, fica imposto que o detector nuclear, utilizado em AMS, deve possuir a vantagem de distinguir isóbaros. A calibração do número atômico nos espectros foi obtida através de reações e espalhamento dos feixes de isótopos estáveis  $^{16}\text{O}$  e  $^{12}\text{C}$  com folhas de  $^{12}\text{C}$ . A figura 2 mostra o espectro  $E \times \Delta E$  obtido para o  $^{26}\text{Al}$  onde pode ser visto que o sistema de detecção consegue separar razoavelmente os isóbaros  $^{26}\text{Al}$  e  $^{26}\text{Mg}$ . Nota-se nesta figura a existência de feixes parasitas de baixa intensidade, com  $Z < 10$ . Dentre estes observa-se principalmente o feixe de oxigênio proveniente das moléculas de  $\text{AlO}^-$  e  $\text{MgO}^-$ .

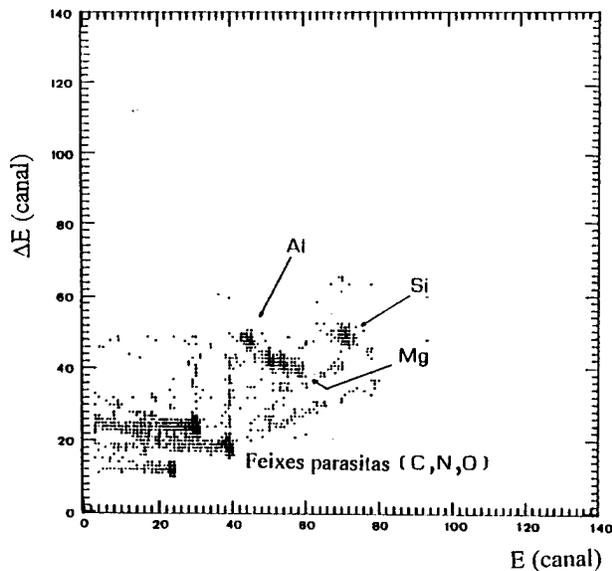


Figura 2. Espectro biparamétrico  $E \times \Delta E$  de detecção do  $^{26}\text{Al}$ .

Feixes de  $^{36}\text{Cl}$  foram produzidos a partir de amostras de montanhas chilenas. As amostras foram preparadas segundo os procedimentos da referência [19]. A passagem do feixe de Cl obedeceu a sistemática já descrita, após a calibração dos helipot. A incidência do feixe de  $^{36}\text{Cl}$  sobre o detetor ocorreu sem problemas, isto é, sem a necessidade de modificar os parâmetros, anteriormente deduzidos, da óptica do feixe. Um alvo de Au foi usado para espalhar feixes estáveis intensos, com o detetor colocado a  $20^\circ$  em relação à direção do feixe. Para o feixe de  $^{36}\text{Cl}$ , o alvo foi removido e o detetor colocado a  $0^\circ$ . As energias de bombardeio para os feixes de  $^{35,36,37}\text{Cl}$  são, contudo, diferentes. Seus valores foram de 72.0 MeV, 70.0 MeV e 68.1 MeV, respectivamente. As figuras 3 (a, b e c) mostram os espectros biparamétricos obtidos para os três isótopos de cloro. O contorno na figura c mostra onde deveria se localizar, pela calibração, o  $^{36}\text{Cl}$ . Os resultados mostraram que os fundos de  $^{36}\text{S}$  e  $^{26}\text{Mg}$  nos espectros de  $^{36}\text{Cl}$  e  $^{26}\text{Al}$  são muito altos para serem aceitáveis em AMS. Portanto, foi necessário investir no desenvolvimento de um melhor sistema de detecção. Encontra-se em fase final a construção de um detetor a gás, tipo câmara de Bragg, projetado para uso exclusivo no programa de AMS.

Como resultado dos testes iniciais, foi verificada a importância de se realizar estudos visando melhorar as condições de focalização e da troca periódica de feixes, mantendo fixos todos os parâmetros envolvendo cam-

pos magnéticos, tanto dos ímãs analisadores quanto dos quadrupolos. Tal procedimento evita efeitos de histerese e possibilita uma troca mais rápida do feixe focalizado. Com isto, os únicos parâmetros a serem mudados são o potencial de pré-aceleração da fonte de íons, a voltagem no terminal e as voltagens dos quadrupolos eletrostáticos. Esta sistemática foi efetuada com sucesso com feixes de  $^{35,37}\text{Cl}$ . A focalização do feixe  $^{35}\text{Cl}$  foi obtida com uma tensão de pré-aceleração de 90 kV e voltagem no terminal de 8 MV. A seguir, as condições de focalização foram satisfatoriamente reproduzidas para o feixe de  $^{37}\text{Cl}$ , com a modificação destes valores para 85.14 kV e 7.5 MV.

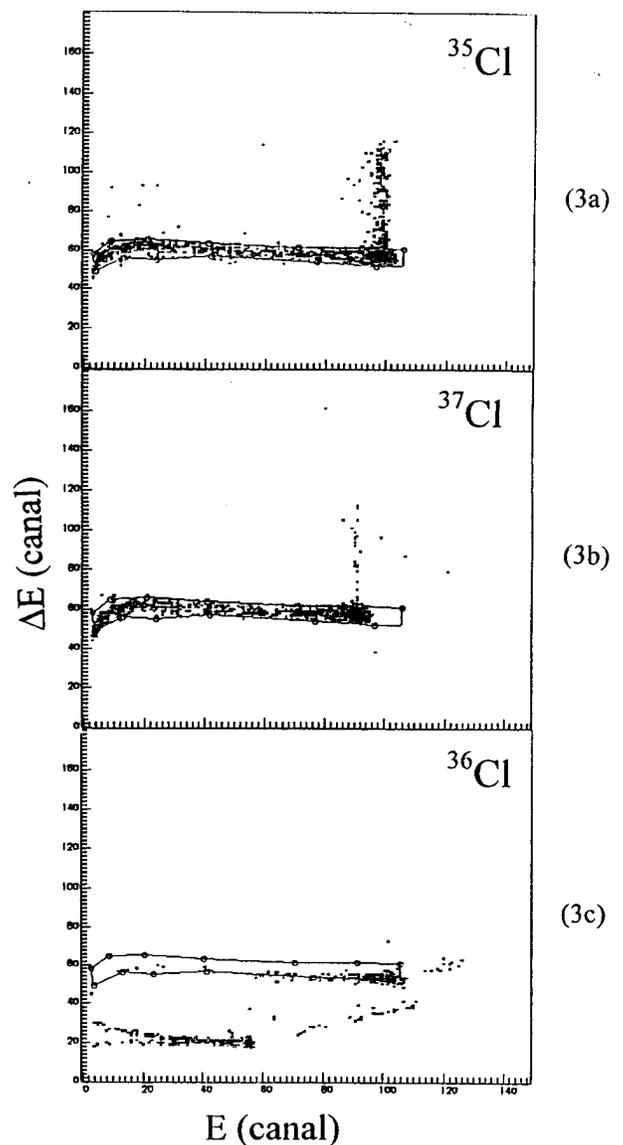


Figura 3. Espectro biparamétrico  $E \times \Delta E$  de detecção do: (3a)-  $^{35}\text{Cl}$ . (3b)-  $^{37}\text{Cl}$ . (3c)-  $^{36}\text{Cl}$ .

Também mostrou-se desejável desenvolver um sistema automático, controlado por um micro computador, para realizar a mudança cíclica e periódica de feixes. Este sistema deve ser capaz de rejeitar a transmissão de feixes estáveis quando o detetor estiver posicionado para detetar feixes instáveis de pouca intensidade, e, ao mesmo tempo, otimizar a troca de um feixe para outro. Na procura de um mecanismo que fosse capaz de defletir, e conseqüentemente rejeitar os feixes indesejáveis, foi, primeiramente, introduzido uma variação de corrente no “trimmer” magnético localizado na saída da fonte de íons. Esta corrente produziria um campo magnético capaz de defletir feixes de baixa energia, diminuindo a corrente de feixe por ordens de grandeza. No entanto, os resultados com o feixe de  $^{35}\text{Cl}$  mostraram que, para  $\Delta I = 1 \text{ A}$ , a intensidade de corrente de feixe decresce somente a 5% de seu valor original.

Uma segunda tentativa foi usar um “chopper” já instalado antes do imã analisador de alta energia (ME 200). A deflexão do feixe ocorreria pela introdução de um campo elétrico transverso. No entanto, os resultados também não se mostraram satisfatórios, pois o decréscimo da corrente de feixe com a tensão aplicada saturou em 15% do seu valor inicial, para tensões acima de 4 kV.

Em função destes resultados, optou-se então por instalar um copo de Faraday na linha do feixe, em frente ao detetor, a fim de interceptar e medir os feixes estáveis. A melhor geometria do copo ainda está sendo investigada, visto que é fundamental a confiabilidade de sua leitura. Se um feixe estável de alta intensidade é acelerado e focalizado, o copo move-se de forma a interceptar e bloquear o feixe. Com isso, ele impede que feixes indesejáveis atinjam o detetor colocado a  $0^\circ$ , ao mesmo tempo em que fornece uma informação quantitativa sobre a intensidade do feixe estável.

## 5. Perspectivas do programa

Como ocorre em todos os laboratórios onde a técnica de AMS encontra-se implantada, são necessários constantes testes de melhoria da estabilidade da máquina, da transmissão do feixe, da otimização da óptica de feixe e eficiência e resolução do sistema de detecção e copo de Faraday. Dificilmente poder-se-á dizer, algum dia, que esta fase está encerrada.

A nova fonte de íons multi-catodo, após os testes de bancada, será colocada em operação, possibilitando o uso regular do sistema com AMS. Após a implementação do método, serão dedicados esforços na preparação apropriada das amostras. Já estão previstos testes com amostras padrão conhecidas de  $^{14}\text{C}$ , a serem fornecidas por outros laboratórios, afim de ser verificada a confiabilidade do método em nosso laboratório.

Encontra-se em fase de desenvolvimento o sistema automático de controle dos parâmetros da máquina, para uso com AMS. O objetivo principal é a troca periódica e simultânea das voltagens do terminal, da fonte de íons e dos elementos eletrostáticos de focalização. Este sistema também será responsável por bloquear ou permitir a passagem do feixe até o detetor situado  $0^\circ$ . O princípio de operação é o seguinte: uma interface entre o controle do acelerador e os computadores de aquisição de dados envia a informação da mudança dos parâmetros ao lado da aquisição. Por exemplo, para os feixes de  $^{35,36,37}\text{Cl}$ , os parâmetros de entrada são o intervalo de tempo ( $T_{AI}$ ), a voltagem do terminal ( $V_{Ai}$ ) e a voltagem de injeção ( $B_{Ai}$ ), para  $A = 35,36,37$ . Com estes parâmetros pré-estabelecidos, o código gera ciclos de feixes estáveis e instáveis, e o copo de Faraday em frente ao detetor move-se para cima e para baixo, controlado por um pulso de “trigger” relacionado à tensão do terminal. Se os parâmetros não são os apropriados para a focalização dos feixes instáveis, o copo de Faraday desce e intercepta o feixe.

O novo sistema de detecção, com um tipo Bragg [20], será usado exclusivamente no programa de AMS. Uma descrição detalhada do detetor e os resultados de testes obtidos com o mesmo serão reportados oportunamente. Caso haja necessidade, serão projetados e construídos sistemas de detecção mais complexos.

Com a técnica implantada em São Paulo, e o programa de AMS em operação regular, espera-se a colaboração entre grupos de pesquisa brasileiros, de diferentes áreas de pesquisa onde o AMS é aplicado. Existem planos de implantação da técnica no Rio de Janeiro, no futuro, com a aquisição de um pequeno Tandem.

## Referências

1. D. Elmore, M. Phillips, Science **236**, 543 (1987).

2. Proceedings of the 5th Intern. Conference on AMS; Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B **52** (1990).
3. Proceedings of the 6th Intern. Conference on AMS; Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B **92** (1994).
4. W. Kutschera, Nucl. Instr. and Meth. **B50**, 252 (1990).
5. M. Suter, Nucl. Instr. and Meth. **B52**, 211 (1990).
6. Proceedings of the 7th Intern. Conference on AMS, Nucl. Instrum. Methods in Phys. Research B **123** (1997).
7. G. Farrar, P. Altman, P. Hodgkins, J.A. Blair, Lancet **339**, 302 (1992).
8. J.W. Coburn *The Kidney* 3rd edition, vol. 2 (1986), pag 160; Editor: B.H. Brenner, F.C. Rector, Edited by Saunders.
9. G.A. Trapp, Lige Sc. **33**, 311 (1983).
10. G. Farrar, P. Altman, S. Welch, O. Wychrif, B. Ghose, J. Lejeune, J. Corbett, V. Prasher, J. A. Blair, Lancet **335**, 747 (1990).
11. C.R. Harrington, Lancet **343**, 993 (1994).
12. P. Slanina, W. Frech, L.G. Ekstrom, L. Loof, S. Slorach, A. Cedergren, Clin. Chem. **32**, 539 (1986).
13. D. Herwitt, L.C. Neri, Lancet **338**, 390 (1991) and W.F. Forbes, L. M. Hayward, N. Agwani, Lancet **338**, 1592 (1991).
14. L.A.B. Tessarotto, J.C. Acquadro, M. Stier, P.R.S. Gomes, O. Sala, Proceedings of the 7th Intern. Symp. on Ion Sources and Ion Assisted Technology, Kyoto (1983), 147.
15. G.T. Caskey, R.A. Douglas, H.T. Richards, H.V. Smith Jr., Nucl. Instr. Meth **157**, 1 (1978).
16. R. Middleton, Nucl. Instr. Meth **214**, 139 (1983).
17. C. Tenreiro, R.M. Anjos, J.C. Acquadro, G. Kremer, G. Ramirez, Nucl. Instr. Meth in Phys. Res **B92**, 89 (1994).
18. J. Barker, J.P. Day, T.W. Aitken, T.R. Charlesworth, R.C. Cunningham, P.V. Drumm, J.S. Liley, G.W.A. Newton, M.J. Smithson, Nucl. Instr. Meth B **52**, 540 (1990).
19. L.E. Tubbs, Rochester Ann. Rep. (1981), 163.
20. C. Schessl, W. Wagner, K. Hartel, P. Kienle, H.J. Koner, W. Mayer, K.E. Rehm, Nucl. Instr. Meth **192**, 291 (1982).