

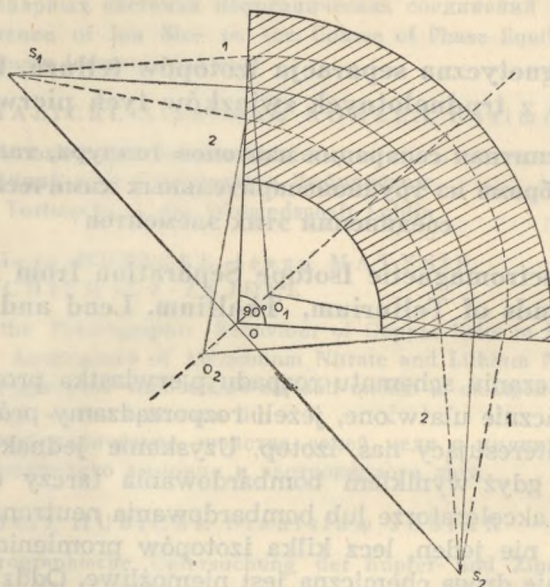
Kierownik: doc. dr Włodzimierz Żuk

* Pomiary zostały wykonane w Instytucie Nobla w Sztokholmie

steków. Opis aparatury został podany tylko w zakresie koniecznym do zrozumienia metody postępowania, a to z tego względu, że dane dotyczące szczegółów konstrukcji można znaleźć w odpowiednich publikacjach (4) (5).

ZASADA SEPARACJI IZOTOPÓW POLEM MAGNETYCZNYM

Teoria działania separatorów elektromagnetycznych nie różni się od teorii opracowanej dla spektrometrii masowej (6). Separator użyty do oddzielania izotopów zarówno stabilnych, jak i promieniotwórczych posiadał 90° soczewkę magnetyczną o promieniu krzywizny środkowej wiązki



Rys. 1. Ogniskowanie rozbieżnej wiązki jonów w 90° soczewce magnetycznej

jonów 160 cm. Soczewka ta pracowała w układzie symetrycznym, tj. odległości źródła jonów i kolektora od płaszczyzn ograniczających pole magnetyczne były w przybliżeniu równe. W niektórych przypadkach budowane są separatory z 90° soczewką magnetyczną, gdzie w pole magnetyczne wchodzi równoległa wiązka jonów, uformowana przy pomocy odpowiedniego układu soczewek elektrycznych. W takich warunkach zogniskowanie wiązki następuje na granicy pola magnetycznego (7).

Zasadę ogniskowania wiązki jonowej dla przypadku symetrycznego ilustruje rysunek 1. Z punktu S_1 , który wyobraża szczelinę wyjściową źródła jonów (przedmiot), wybiega rozbieżna wiązka jonów monoenergetycznych i tych samych mas. Tylko środkowy promień wiązki wchodzi prostopadle do płaszczyzny ograniczającej pole i, zakreślając okrąg

koła o promieniu r_0 , wychodzi z pola także prostopadle do drugiej płaszczyzny ograniczającej. Pozostałe promienie zarówno wejdą w pole, jak też z niego wyjdą ukośnie, jednak tak, że zogniskowanie wiązki nastąpi w punkcie S_2 leżącym na prostej łączącej punkty S_1 oraz O .

Jeżeli w wiązce znajdują się jony różnych mas, promienie krzywizny ich torów w polu magnetycznym będą różne, skutkiem czego nastąpi dyspersja wiązki. Z zasadniczego wyrażenia na promień krzywizny toru cząstki naładowanej, poruszającej się w polu magnetycznym, $r = c \frac{m v}{e H}$ wynika, że w przypadku dwóch cząstek o tych samych energiach, lecz różnych masach M_0 i M , zależność pomiędzy promieniami krzywizny ich torów wyrazi się wzorem $\frac{r}{r_0} = \sqrt{\frac{M}{M_0}}$. Stosując podaną wyżej zasadę ogniskowania wiązek różnych mas możemy znaleźć położenia obrazów odpowiadających tym masom. Będą one leżeć na krzywej, którą nazywamy krzywą położenia obrazów i która w tym przypadku jest nachylona ukośnie do środkowego promienia wiązki. Niezależnie jednak od tego, dla niezbyt dużego zakresu mas można przyjmować, że wytworzone obrazy leżą w płaszczyźnie prostopadłej do środkowego promienia wiązki. Przy takim założeniu przesunięcie obrazu wywołane różnicą mas $\gamma = \frac{\Delta M}{M}$ wyraża się wzorem:

$$(1) \quad D = \frac{1}{2} \gamma k,$$

gdzie k jest współczynnikiem dyspersji. Dla 90° soczewki magnetycznej oraz odwzorowania symetrycznego $k = r_0 + l = 2 r_0$, gdzie l jest odległością obrazu od brzegu pola magnetycznego. Wobec tego w tym przypadku dyspersja mas wyraża się bardzo prostym wzorem:

$$(1a) \quad D = r_0 \gamma$$

Separator użyty do rozdzielania izotopów posiadał promień krzywizny toru środkowego promienia wiązki jonowej w polu magnetycznym, $r_0 = 160$ cm. Z zależności (1a) wynika więc, że dla $\gamma = \frac{1}{200}$ $D = \frac{1600}{200} = 8$ mm. Rzeczywiście odległości uzyskiwanych na ekranie linii izotopów ołowiu były tego rzędu.

Możność rozdzielania izotopów określona jest zdolnością rozdzielczą P separatora lub spektrometru masowego. Liczbowo zdolność rozdzielcza równa jest liczbie masowej, dla której dwie linie, należące do mas różniących się o jednostkę masy atomowej, są jeszcze rozdzielone. Można uważać, że zachodzi to wówczas, gdy dyspersja odpowiadająca różnicy mas równej jednej jednostce atomowej równa jest szerokości B linii widma masowego.

$$(2) \quad P = \frac{D_{\Delta M=1} M}{B}$$

Po podstawieniu do ostatniego wzoru wyrażenia na D , przy jednoczesnym założeniu $\Delta M = 1$, mamy:

$$(3) \quad P = \frac{1}{2} \frac{k}{B}$$

Ponieważ w przypadku odwzorowania symetrycznego $k = 2 r_0$, więc ostatecznie:

$$(4) \quad P = \frac{r_0}{B}$$

Z podanych zależności wynika, że dla uzyskania dużej zdolności rozdzielczej konieczne jest, aby linie widmowe były dostatecznie wąskie. Szerokość linii widmowych, a co za tym idzie i zdolność rozdzielcza będą zależęć od doskonałości układu soczewek elektrycznych formujących wiązkę jonów oraz od jednorodności energetycznej jonów wchodzących w skład wiązki. Dla omawianego przypadku 90° separatora z promieniem krzywizny torów 160 cm, przy prądach jonowych nie przekraczających ok. $5 \mu A$ zdolność rozdzielcza dochodziła do 1200. Wzrost natężenia prądu jonowego powodował jednak dość szybki spadek zdolności rozdzielczej.

Masa separowanego izotopu może być łatwo obliczona, jeżeli znane jest natężenie prądu jonowego.

$$(5) \quad m = 0,0373 I M t$$

W podanym wzorze m oznacza zebraną masę w miligramach, M — liczbę masową izotopu, I — natężenie prądu jonowego w miliamperach oraz t — czas separacji wyrażony w godzinach.

W przypadku separacji izotopów promieniotwórczych znajomość natężenia prądu odpowiadającego danemu izotopowi oraz jego czasu połowicznego zaniku $T_{1/2}$ pozwala znaleźć zebraną w czasie t aktywność.

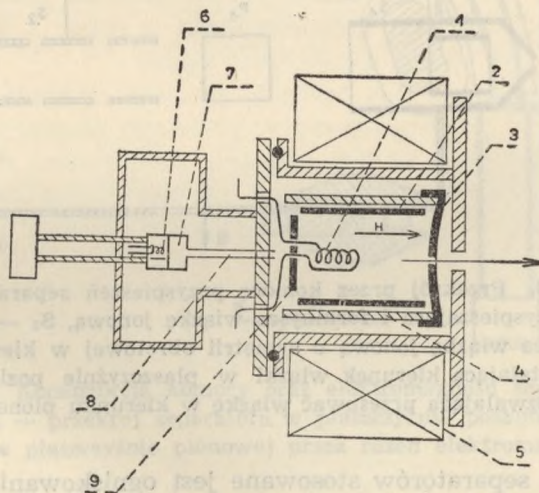
$$(6) \quad a = 1,2 \cdot 10^5 \cdot \frac{t}{T_{1/2}} I$$

W ostatnim wzorze a oznacza aktywność wyrażoną w mC, czasy t oraz $T_{1/2}$ powinny być podane w godzinach, zaś I w mikroamperach. Przy separacji izotopów radioaktywnych najczęściej stanowią one tylko drobną część włożonej do źródła jonów separatora próbki. W tych przypadkach prądy przyporządkowane izotopom promieniotwórczym są bardzo słabe, zaś główny prąd dostarczany przez źródło jonów separatora należy do izotopów stabilnych badanego pierwiastka. W takich przypadkach pomiar aktywności zebranej próbki oraz pomiar natężenia całkowitego prądu jonowego pozwala określić prąd odpowiadający temu izotopowi oraz jego procentową zawartość.

KONSTRUKCJA SEPARATORA

a) Źródło jonów

Źródło jonów pracowało na zasadzie łukowego wyładowania elektrycznego w polu magnetycznym. Badany gaz był doprowadzany przez zawór iglicowy zaopatrzony podziałką i pozwalający na dokładne dozowanie doprowadzanych ilości. Pierwiastki stałe lub ich związki w ilości kilku miligramów mogły być wkładane do piecyka i ogrzewane do temperatury 1000 °C. W tym przypadku łuk był zapalany w parach przedostających się z piecyka do obszaru wyładowania. Komora wyładowań zawierała żarzoną wolframową katodę oraz anodę wykonaną z molibdenu, pozwalającą na jej wygrzewanie, co utrudniało kondensację par badanych pierwiastków na ścianach komory wyładowań i zwiększało wydajność separacji. Budowa piecyka oraz komory wyładowań została pokazana na rysunku 2.



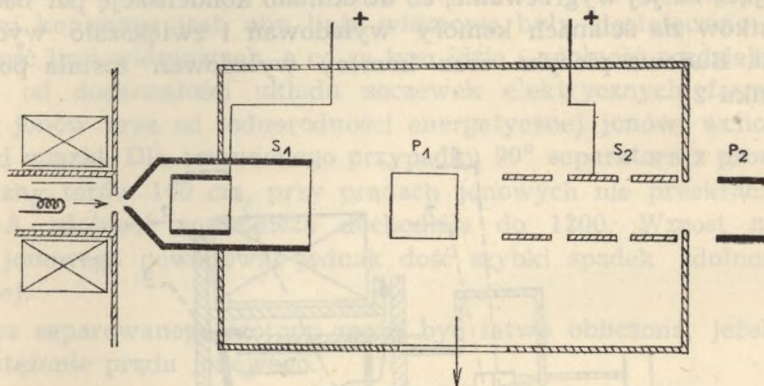
Rys. 2. Przekrój przez źródło jonów separatora

- 1 — katoda, 2 — molibdenowa anoda, 3 — elektroda wyciągająca jony, 4 — porcelanowy cylinder, 5 — cewka elektromagnesu źródła, 6 — grzejnik piecyka, 7 — komora piecyka, 8 — przewód doprowadzający pary do komory wyładowań, 9 — elektroda zamykająca komorę wyładowań

Po przedostaniu się przez otwór o średnicy ok. 3 mm, wykonany w elektrodzie 3 (rys. 2), przy pomocy specjalnego układu elektrod jony były przyspieszane i formowane w wiązkę. Komora przyspieszeń z układem odpowiednich elektrod pokazana jest na rysunku 3. S_1 jest soczewką elektryczną, zbudowaną z dwóch współśrodkowych cylindrów, z których zewnętrzny zakończony został stożkiem zaopatrzonym w otwór o śred-

nicy kilku milimetrów. Cylinder ten umieszczony jest na potencjale ziemi, natomiast potencjał cylindra wewnętrznego jest dodatni i może być zmieniany w granicach 15—20 kV. Układ takich dwóch cylindrów tworzy soczewkę elektryczną, działającą ogniskująco na wiązkę jonów. W pierwotnej konstrukcji separatora do ogniskowania wiązki stosowano układ trzech soczewek elektrycznych, zbudowany z czterech cylindrów o zbliżonych średnicach i ustawionych na jednej osi obok siebie (4) (8).

Ponieważ źródło jonów znajduje się na potencjale dodatnim rzędu 40—70 kV, zaś cylinder zewnętrzny soczewki S_1 na potencjale ziemi, wiązka jonów zostaje tą różnicą potencjałów przyspieszona.



Rys. 3. Przekrój przez komorę przyspieszeń separatora

S_1 — soczewka przyspieszająca i formująca wiązkę jonową, S_2 — soczewka cylindryczna rozciągająca wiązkę jonową o symetrii obrotowej w kierunku pionowym, P_1 — para płyt ustalająca kierunek wiązki w płaszczyźnie poziomej, P_2 — para płyt pozwalająca przesuwac wiązkę w kierunku pionowym

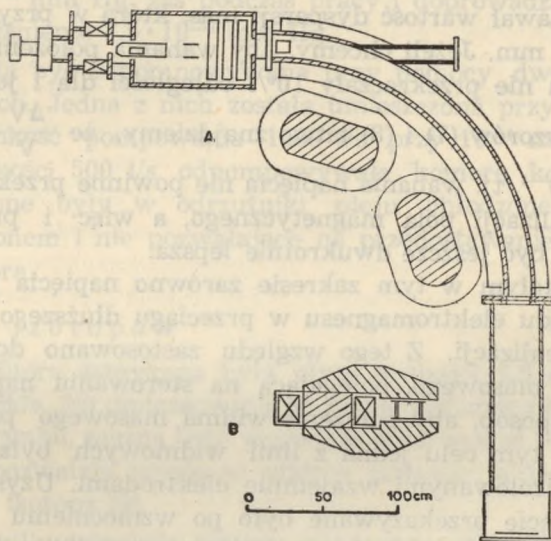
W większości separatorów stosowane jest ogniskowanie tylko w jednej płaszczyźnie, prostopadłej do kierunku linii sił. W tym przypadku zastosowano ogniskowanie trójwymiarowe, także w kierunku linii sił pola magnetycznego, stosując soczewkę elektryczną S_2 o działaniu cylindrycznym (5). Jak pokazano na rysunku 3 soczewka ta składa się z trzech par równoległych płytek, z których dwie zewnętrzne są na potencjale ziemi, zaś para środkowa posiada potencjał dodatni rzędu 10—20 kV. Działanie tej soczewki, podobnie jak i pierwszej, jest zbierające, jednak zachodzi ono jedynie w kierunku prostopadłym do płyt, a równoległym do linii sił pola magnetycznego. Powoduje to odpowiednie skrócenie linii widmowych i umożliwia zwiększenie ich intensywności.

Obok soczewek elektrycznych S_1 i S_2 w komorze przyspieszeń umieszczono dwie pary płaskich elektrod P_1 i P_2 , pozwalających wytworzyć

wzajemnie prostopadłe pola elektryczne. Pozwalały one na ustawienie wiązki jonowej w żądanym kierunku.

b) Elektromagnes

Konstrukcja elektromagnesu separatora widoczna jest z rysunku 4. Promień krzywizny wiązki jonowej w polu magnetycznym równy był 160 cm. Ogniskowanie wiązki następowało po odchyleniu jej o kąt 90° , w odległości od granicy pola magnetycznego w przybliżeniu równej odległości dla źródła jonów.



Rys. 4. Konstrukcja komory oraz elektromagnesu separatora

A — przekrój separatora w płaszczyźnie poziomej

B — przekrój w płaszczyźnie pionowej przez rdzeń elektromagnesu i komorę

Szczelina elektromagnesu miała szerokość 10,3 cm i można było w niej uzyskiwać pola magnetyczne, dochodzące do 3500 Oe. Jak łatwo sprawdzić, stosując znany wzór na liczbę masową zbieranego pierwiastka

$$M = 4,8 \cdot 10^{-5} \frac{r^2 H^2}{V},$$

natężenie to przy napięciu przyspieszającym do 60 kV w zupełności wystarcza do rozdzielenia izotopów nawet najcięższych pierwiastków. W podanym wzorze promień krzywizny toru jonów r należy wyrazić w centymetrach, V w woltach, zaś H w oerstedach (6). Dla uzyskania pola magnetycznego 3500 Oe potrzebne było natężenie prądu w cewkach elektromagnesu rzędu 165 A. Wymagało to dostarczenia dla elektromagnesu mocy ok. 7,8 kW z przetwornicy prądu stałego 9 kW.

Zarówno zmiana napięcia przyspieszającego jony, jak i natężenia pola magnetycznego powodują przesunięcie linii widma masowego. Przesunięcia te zależą od współczynnika dyspersji k , który dla naszego przypadku równy jest $2r_0$, i wyrażają się odpowiednio wzorami:

$$(7) \quad D(V) = \frac{1}{2} \frac{\Delta V}{V} k = r \frac{\Delta V}{V}$$

$$(8) \quad D(H) = - \frac{\Delta H}{H} k = - 2 r_0 \frac{\Delta H}{H}$$

Wzór (1a) podawał wartość dyspersji mas, która w przypadku ołowiu równa była ok. 8 mm. Jeżeli chcemy, aby wahania położenia linii widma masowego ołowiu nie przekraczały 10% odległości dla 1 jednostki masy atomowej, to z wzorów (7) i (8) łatwo znajdziemy, że $\frac{\Delta V}{V}$ powinno być mniejsze od $5 \cdot 10^{-4}$, tj. wahania napięcia nie powinny przekraczać 0,05%. Dokładność stabilizacji pola magnetycznego, a więc i prądu elektromagnesu powinna być jeszcze dwukrotnie lepsza.

Utrzymanie stałym w tym zakresie zarówno napięcia przyspieszającego, jak też prądu elektromagnesu w przeciągu dłuższego okresu czasu jest trudne do realizacji. Z tego względu zastosowano dodatkową stabilizację widma masowego, polegającą na sterowaniu napięcia płyt P_1 (rys. 3) w taki sposób, aby położenie widma masowego pozostawało na ekranie stałe. W tym celu jedna z linii widmowych była umieszczana między dwiema izolowanymi wzajemnie elektrodami. Uzyskane na tych elektrodach napięcie przekazywane było po wzmocnieniu na płyty P_1 , powodując przy zmianie napięcia przyspieszającego lub pola magnetycznego takie odchylenie wiązki jonowej w płaszczyźnie poziomej przed jej wejściem w pole magnetyczne, które kompensowałoby te zmiany.

Nabiegunniki elektromagnesu tworzyły szczelinę 10,3 cm, szerokości w płaszczyźnie poziomej 35 cm, przy czym komora odchyień była znacznie węższa, ok. 18 cm. Pozwalało to na wykorzystanie środkowej, bardziej jednorodnej części pola magnetycznego. Ponieważ nabiegunniki ustawione były równolegle z dokładnością 0,2 mm, pole magnetyczne było dokładnie jednorodne i w odległości 7,5 cm od środka oków odchylenie w natężeniu pola magnetycznego nie przekraczało 1% natężenia w środku pola.

Ze względu na znaczną moc pobieraną przez elektromagnes, cewki jego były chłodzone wodą.

c) Komora odchyień i układ próżniowy

Komorę separatora pojemności ok. 300 l zespawano z płyt wykonanych z amagnetycznej stali nierdzewnej. Pokrywa górna mogła być zdejm-

mowana, przy czym uszczelnienie zapewniono przez użycie gumowych podkładek. W celu umożliwienia dostępu do układu soczewek elektrycznych, formujących wiązkę jonową, jak też do kolektora boczne ściany tych komór mogły być otwierane.

Do uszczelnienia otwieranych ścian użyto gumowych sznurów. Obok gumy, wewnątrz komory jak też w miejscach wprowadzenia przewodów do wewnątrz, celem izolacji stosowano organiczne szkło, co oczywiście w następstwie uniemożliwiało wygrzewanie komory. Pomimo niemożności wygrzewania układu próżniowego, łatwo można było uzyskać w nim ciśnienie $1,5 \cdot 10^{-6}$ mm Hg, zaś podczas pracy i doprowadzania do źródła jonów gazu — ciśnienie $3,5 \cdot 10^{-6}$ mm Hg.

Komora mogła być odpompowywana przy pomocy dwóch olejowych pomp dyfuzyjnych. Jedna z nich została umieszczona przy źródle jonów i posiadała szybkość pompowania 1400 l/s przy 10^{-4} mm Hg, druga mniejsza o szybkości 500 l/s odpompowywała komorę kolektora. Obie pompy zaopatrzone były w odrzutniki oleju chłodzone do temperatury -24°C freonem i nie pozwalające na przedostawanie się par apiezonu do separatora.

d) Kolektor izotopów

Komora kolektora zamykana była płytą grubości 2,5 cm, wykonaną z organicznego szkła. Po umieszczeniu na płycie szklanego ekranu, pokrytego siarczkiem cynku, można było wygodnie obserwować widmo masowe. Mała dźwignia pozwalała uzyskane widmo zasłaniać aluminiową tarczą i zbierać na niej izotopy (9).

Przy energii kilkudziesięciu tysięcy elektronowoltów jony wbijały się w tarczę metalową, pozostając w niej na stałe. Miejsca kolekcji izotopów stabilnych widoczne były w postaci ciemnych linii, powstałych dzięki wydzieleniu węgla z rozkładu par organicznych związków, których ślady zawsze w komorze znajdują się. Położenie linii izotopów promieniotwórczych wskutek małych ich koncentracji nie jest widoczne, można je jednak zawsze określić, korzystając z linii izotopów stabilnych lub stosując licznik G. M. z odpowiednią szczeliną.

SEPARACJA IZOTOPÓW POSZCZEGÓLNYCH PIERWIASTKÓW

Uzyskanie jonów pierwiastków lub związków stałych jest możliwe po przeprowadzeniu ich w stan pary i następnie jonizację. Stosowane są przy tym dwie metody jonizacji, elektronami określonej energii lub drogą wyładowania jarzeniowego względnie łukowego. Bezpośrednio z ciał stałych można uzyskać jony, wykorzystując zjawisko termoemisji jonowej. Ta ostatnia metoda może jednak być stosowana tylko w ograniczo-

nym zakresie, gdyż nie dla wszystkich pierwiastków termoemisja jonowa zachodzi.

W separatorach elektromagnetycznych w celu otrzymania wiązki jonowej najczęściej wykorzystuje się wyładowanie łukowe. Jeżeli pierwiastek jest w stanie stałym, należy najpierw uzyskać jego pary, podgrzewając próbkę do odpowiedniej temperatury. Warunkiem osiągnięcia dużej wydajności separacji jest przetrzymanie par możliwie długo w obszarze wyładowania i niedopuszczenie do ich kondensacji na chłodnych częściach komory. Te warunki narzucają specjalną technikę separacji ciał trudnolotnych, różną od stosowanej dla gazów.

Celem wyparowania próbki ciała stałego umieszcza się ją w piecyku, pozwalającym na otrzymanie dostatecznie wysokiej temperatury. Piecyki takie wykonane są najczęściej z nierdzewnej stali lub grafitu i ogrzewane wolframową spiralą. Specjalne termoogniwo zapewnia możliwość kontroli temperatury.

Z piecyka para przedostaje się do komory wyładowań. Łuk elektryczny jest zapalany pomiędzy żarzoną katodą 1, a anodą 2 (rys. 2). W celu podniesienia temperatury komory wyładowań bardzo często także i anodę wykonuje się w postaci spirali z drutu molybdenowego i dodatkowo ogrzewa.

Źródło jonów separatora stosowanego do rozdzielania izotopów było typu magnetycznego, tj. w obszarze wyładowania istniało pole magnetyczne wytworzone przez cewkę 5 (rys. 2), o liniach sił równoległych do osi wiązki jonowej. Stosowane były dwa rodzaje połączeń elektrod źródła jonów. W połączeniu z tzw. elektronami oscylującymi katoda 1 oraz część 3 i 9 otrzymywały ten sam potencjał, natomiast anoda 2 potencjał o ok. 100 V wyższy. Połączenie takie nie zapewnia dostatecznie wysokiej temperatury wszystkim częściom komory i z tego względu stosowane jest raczej dla gazów.

Przy połączeniu bez elektronów oscylujących katodę 1 łączy się z częścią 9, zaś anodę 2 z częścią 3, dzięki czemu pod wpływem elektronowego bombardowania cała komora jonizacyjna może osiągnąć stosunkowo wysoką temperaturę. Dzięki temu ta ostatnia metoda nadaje się specjalnie do pracy z ciałami trudnolotnymi. Wadą jej jest jednak to, że uzyskana wiązka jonowa nie jest tak dokładnie jednorodną, jak przy metodzie elektronów oscylujących, wskutek czego linie widmowe są mniej ostre.

a) Separacja izotopów telluru

W celu separacji izotopów telluru do piecyka źródła jonów wkładałem stosunkowo dużo, bo ok. 20 mg sproszkowanego pierwiastka. Stosowałem połączenie z elektronami nie oscylującymi, dodatkowo ogrzewając anodę. W tych warunkach, przy temperaturze piecyka ok. 1000°C

można było osiągnąć prądy jonowe, dochodzące dla wszystkich ośmiu izotopów do $5\mu\text{A}$. Próbką 20 mg wystarczała zazwyczaj do pracy w przeciągu 2 godzin, dostarczając średnio ok. $3\mu\text{A}$ prądu jonowego. W literaturze można także znaleźć dane o separacji izotopów telluru z jego związków chemicznych, np. z chlorku lub fluorków (10).

b) Separacja izotopów talu

Celem separacji było uzyskanie czystych próbek promieniotwórczych izotopów talu, w pierwszym rzędzie $\text{Tl}^{198\text{m}}$, służących do pomiarów czasu życia na poziomach wzbudzonych (2) (11). Izotopy promieniotwórcze talu były otrzymywane z rtęci naświetlanej w cyklotronie deutronami lub protonami o energii kilkudziesięciu MeV. W wyniku reakcji typu (d,n), (d, 2n) lub podobnych z protonami, powstają promieniotwórcze izotopy talu. Wydzielenie ich jest możliwe po rozpuszczeniu rtęci w kwasie solnym, dodaniu kilku miligramów talu jako nośnika i przeprowadzeniu odpowiedniej preparatyki chemicznej, której rezultatem jest Tl Cl (11).

Chlorek talu w ilości 2—3 mg wkładałem do piecyka separatora. Już przy temperaturze 420°C pojawiały się linie talu 203 i 205, zaś w temperaturze 500°C — 600°C można było przy dobrej zdolności rozdzielczej uzyskać prądy rzędu 5 — $10\mu\text{A}$. Dzięki znacznej prężności par chlorku talu, przy ogrzewanej anodzie można było pracować zarówno z elektrodami oscylującymi, jak i nieoscylującymi.

c) Separacja izotopów ołowiu

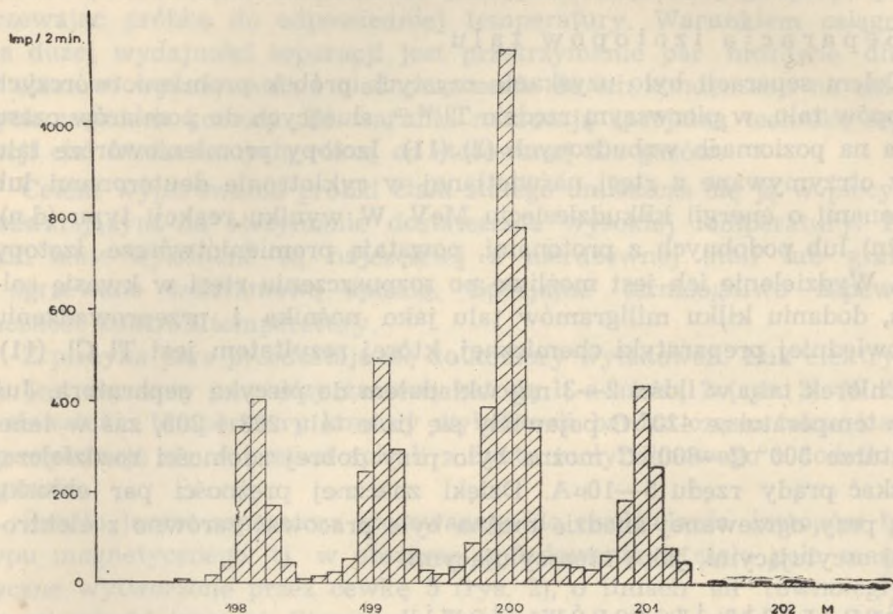
Promieniotwórcze izotopy ołowiu były otrzymywane przez naświetlenie tarczy z talu protonami o energii ok. 65 MeV. Powstałe w wyniku reakcji typu $\text{Tl}(p, xn)\text{Pb}$ izotopy ołowiu były drogą odpowiedniej preparatyki chemicznej wyodrębniane w postaci PbCl_2 (12). Uzyskany chlorek ołowiu, po dodaniu nośnika, w ilości kilku miligramów wkładany był do piecyka separatora.

Prowadziłem separację, stosując zarówno elektrony oscylujące, jak i nieoscylujące. Prąd jonowy pojawiał się już przy temperaturze piecyka 680°C , zaś temperatura 750°C — 800°C była optymalna dla pracy z ołowiem. Bez widocznego zmniejszenia zdolności rozdzielczej można było uzyskiwać prąd jonowy dla wszystkich izotopów Pb^+ razem dochodzący do $5\mu\text{A}$. Obok jonów pierwiastka można było także obserwować linie PbCl^+ , których natężenie było od 2 do 3 razy silniejsze od linii odpowiadających zjonizowanym atomom Pb^+ .

Na ekranie fluoryzującym widoczne były oczywiście tylko linie należące do izotopów stabilnych, gdyż prądy jonowe przyporządkowane izotopom promieniotwórczym były zbyt słabe. Po separacji jednak na tarczy aluminiowej, po pocięciu takiej tarczy na paski 1 mm, mierząc aktyw-

ność poszczególnych pasków licznikiem G. M. można było uzyskać widmo masowe także izotopów promieniotwórczych.

Na rysunku 5 pokazane jest takie widmo. Wykres został uzyskany po około 2 godzinnej separacji izotopów ołowiu z $PbCl_2$ przy natężeniu prądów jonowych ok. $2\mu A$. Na osi poziomej oznaczone zostały odległości



Rys. 5. Promieniotwórcze izotopy ołowiu uzyskane z talu przez naświetlenie protonami o energii 65 MeV.

na tarczy, na osi pionowej liczba impulsów, jakie dawał w ciągu 2 minut kielichowy licznik GM po wsunięciu pod jego okienko kolejnego paska 1 mm, wyciętego z tarczy.

Przeprowadzałem także separację izotopów ołowiu, stosując na miejsce chlorku PbJ_2 . Dla tego związku wystarczają niższe temperatury piecyka i komory wyładowań. Obok jonów ołowiu tu także występują jony molekuł, natężenie linii PbJ^+ nie przekracza jednak 1,7-krotnego natężenia linii Pb^+ .

d) Separacja bromu

Promieniotwórcze izotopy bromu były uzyskiwane jako produkty rozszczepienia uranu drogą naświetlania $UO_2(NO_3)_3$ w reaktorze. Z związku tego był wydzielany brom w postaci $AgBr$ podług specjalnej preparatyki chemicznej (13).

Okazało się koniecznością stosowanie w separatorze bromu w postaci związku chemicznego. Próby, jakie przeprowadziłem z bromem w postaci

pierwiastka, nie dały pozytywnych wyników. Należy to tłumaczyć aktywnością chemiczną tego pierwiastka, w której wyniku zostaje on prawdopodobnie nychmiast po wprowadzeniu do aparatury związany chemicznie przez metalowe ścianki. W literaturze podaje się, że separację izotopów bromu w kalutronie przeprowadzano stosując Sr Br_2 , przy czym temperatura pieca podobnie jak dla Ag Br wynosiła ok. 700°C (14).

Brom posiada 2 stabilne izotopy 79 i 81. Już przy temperaturze piecyka 700°C pojawiają się zazwyczaj 4 linie widmowe 79, 80, 81 i 82, należące do jonów Br^+ i HBr^+ . Po dłuższej pracy separatora linie HBr^+ powoli słabną. Uzyskiwane natężenie dla tych czterech linii nie przekraczało $1 \mu\text{A}$.

Tab. 1. Charakterystyka separowanych pierwiastków lub ich trudnołotnych związków chemicznych

Pierwiastek	Związek chemiczny	Temperatura w $^\circ\text{C}$				Natężenie prądu jonowego μA		Wydajność ‰
		Topnienia	Wrzenia przy 1 atm. R-rozkl.	Pojawienia się prądu jonów	Optymalna pracy	Średnie	Maksim.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tellur	Te	452	1390	840	1000	3,0	5,0	1,5
Tal	Tl Cl	430	720	430	500	5,0	20,0	30,0
Ołów	Pb Cl_2	501	950	630	730	3,0	5,0	8,0
	Pb J_2	402	954	500	600	3,0	4,5	25,0
Brom	Ag Br	434	R 700	700	900	0,5	1,0	2,6

PIŚMIENNICTWO

1. Alväger T., Johansson B., a Żuk W.: Arkiv f. fys. 14, 373 (1958).
2. Johansson B., Alväger T. a Żuk W.: Arkiv f. fys. 14, 439 (1958).
3. Żuk W.: Ann. Univ. Mariae Curie-Skłodowska, secio AA, vol. XI, 13 (1957).
4. Bergström I., Thulin S., Svartholm N. a Siegbahn K.: Arkiv f. fys., 1, 281, (1949).
5. Alväger T. a Uhler J.: Arkiv f. fys., 13, 145, (1958).
6. Żuk W.: Spektrometria masowa. PWN, Warszawa 1956.
7. Andersson G.: Arkiv f. fys., 12, 331, (1957).
8. Bergström I.: Arkiv f. fys., 5, 191 (1952).
9. Thulin S.: Arkiv f. fys., 9, 107 (1954).
10. White J. R., Cameron A. E.: Phys. Rev., 74, 991 (1948).
11. Andersson G. a Bergström I.: Nucl. Phys., 3, 506 (1957).
12. Herrlander C. J., Stockendal R., Mc Donell J. A. a Bergström I.: Nucl. Phys., 1, 643 (1956).

13. Radiochemical Studies of the Fission Products, Book 3, Papers 200—336, McGraw-Hill Book Comp. 1951.
14. Butram H. J., Love L. O. a. Bell W. A.: Oak Ridge National Laboratory. United States Atomic Energy Commission, Y-671 (1950).

Р Е З Ю М Е

Работа содержит экспериментальные данные полученные при разделении изотопов теллура, таллия, свинца и брома.

Для химических соединений этих элементов дано температуры, а также средние и максимальные ионные токи при которых проводилась сепарация изотопов.

Получено данные о производительности разделения изотопов, которые для теллура были 1,5‰ а для таллия 30‰.

В работе подана краткая теория фокусировки в 90° магнетической линзе и описана конструкция нового источника с дуговым разрядом.

S U M M A R Y

This paper contains experimental results obtained from electromagnetic isotope separations of tellurium, thallium, lead and bromine. There were given chemical compounds of elements, which were separated, and temperatures necessary to obtain ion currents. For each element and chemical compound were calculated separation efficiency closed between 1.5‰ for Te and 30‰ for Tl.

The theory of 90° magnetic lens is also given; and the construction of the magnetic ion source with an electric arc, as well as the separator chamber and electromagnet, is briefly described.