

**Wojciech BURIAN,**

VIII Liceum Ogólnokształcące w Katowicach

***Spektrometria mas: badanie składu izotopowego pierwiastków  
jako narzędzie badań ekologicznych***

**Streszczenie.** Praca opisuje wpływ izotopów promieniotwórczych na człowieka i jego środowisko oraz fizyczne podstawy spektrometrii mas. Przytoczone są przykłady zastosowań spektrometrii mas do wyznaczania składu izotopowego pierwiastków

## **1. Wstęp**

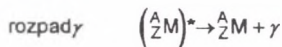
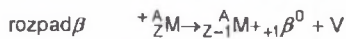
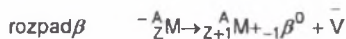
Izotopami nazywamy nuklidy o tej samej liczbie atomowej i różnej liczbie masowej, tj. o jednakowej liczbie protonów i różnej liczbie neutronów. Ze względu na taką samą strukturę powłoki elektronowej izotopy zajmują to samo miejsce w okresowym układzie pierwiastków. Mogą być naturalne lub sztuczne (nie występujące w przyrodzie), otrzymywane w wyniku reakcji jądrowej. Poszczególne pierwiastki mają od 1 do 10 trwałych izotopów. W przyrodzie istnieje 272 stabilnych jądeł pierwiastków, a wszystkie pozostałe, zwane radioizotopami, są promieniotwórcze. Liczba znanych izotopów promieniotwórczych niektórych pierwiastków przekracza 20. Izotopy tego samego pierwiastka mają różne właściwości fizyczne jak masy, rozmiary czy całkowite energie wiązania. Właściwości chemiczne substancji w praktyce nie zależą od składu izotopowego, gdyż są uwarunkowane strukturą zewnętrzną powłok elektronowych. Izotopy są szeroko stosowane w wielu dziedzinach nauki i techniki, głównie jako wskaźniki izotopowe, a także jako źródła promieniowania jądrowego, w radioterapii i

defektoskopii. Odkrycie zjawiska izotopii wiąże się z odkryciem promieniotwórczości. Termin *izotop* wprowadził F. Soddy, doświadczalnie zaś ich istnienie stwierdził w 1913 roku J. J. Thomson.

## 2. Wpływ izotopów promieniotwórczych na człowieka i jego środowisko

Radioizotopy są szczególną grupą substancji obecnych w środowisku, są one niestabilnymi konfiguracjami pierwiastków chemicznych, które ulegają rozpadowi promieniotwórczemu, emitując przy tym promieniowanie w postaci cząstek  $\alpha$  (jądra helu),  $\beta$  (elektrony) i promieniowania  $\gamma$  (promieniowanie elektromagnetyczne o wysokiej energii). W wyniku oddziaływania promieniowania z materiałami biologicznymi zostaje z nich uwolniona energia, co może spowodować różne niebezpieczne skutki. Dlatego też promieniowanie jest dla człowieka i innych organizmów żywych czynnikiem potencjalnie szkodliwym, choć ma ono również pozytywne zastosowanie (w diagnostyce, lecznictwie, do wytwarzania energii elektrycznej w reaktorach jądrowych). Realność niebezpieczeństwa związanego z promieniowaniem jonizującym dotarła do świadomości społecznej w sposób szczególnie dramatyczny po ataku atomowym na Hiroszimę i Nagasaki w 1945 roku. Zapoczątkowało to wówczas szeroko zakrojone badania, dzięki którym znane są zachowanie się radioizotopów w środowisku i organizmie człowieka oraz somatyczne i genetyczne konsekwencje napromieniowania. Dlatego rozpoznawanie poszczególnych izotopów promieniotwórczych ma duże znaczenie w ochronie środowiska i życia człowieka. Ich rozpoznawanie ma na celu stwierdzenie, który izotop emituje jakie cząsteczki i w jakim stopniu mają one wpływ na środowisko i człowieka.

Następujące procesy rozpadu są typowe dla nuklidów naturalnie promieniotwórczych:



W tych procesach  $\beta$  oznacza rozpad elektronowy z emisją antyneutrino, a  $\beta^+$  rozpad pozytronowy z emisją neutrino (cząstki o zerowym ładunku i prawie zerowej masie). W schemacie rozkładu,  $\gamma$  gwiazdka oznacza stan wzbudzony jądra.  $A$  jest liczbą masową i określa całkowitą liczbę protonów i neutronów, natomiast  $Z$  jest liczbą atomową i oznacza liczbę protonów.

Badania prowadzone nad izotopami promieniotwórczymi pozwalają określić okres aktywności takich cząsteczek, czyli okres, podczas którego są one zdolne wyrządzać szkody w organizmach roślinnych i zwierzęcych, intensywność ich emitowania i ilość wyemitowanych cząsteczek. Ma to duże znaczenie w ocenie, jak duże były dawki promieniowania pochłonięte przez dane obiekty, i w jakim stopniu wpłynie to na ich rozwój i dalsze funkcjonowanie. Jeżeli nie można byłoby rozpoznawać poszczególnych izotopów promieniotwórczych, nie można by określić, jakie szkody to promieniowanie może spowodować oraz nie moglibyśmy wykorzystać go na przykład do budowy elektrowni jądrowych. Jakkolwiek promieniowanie elektromagnetyczne i cząsteczkowe są pod względem fizycznym różne, to chemicznie i biologicznie efekty działania są często identyczne. Polegają one na wybijaniu elektronów, z których między innymi zbudowana jest materia. Utrata elektronu powoduje zwiększenie chemicznej reaktywności atomów, a dalsze reakcje zjonizowanych atomów zapoczątkowują negatywne efekty biologiczne. Mechanizm działania promieniowania na żywą komórkę nie jest dostatecznie wyjaśniony. Wiadomo, że pod wpływem dostarczenia dodatkowej energii następuje zerwanie wiązań międzycząsteczkowych. Po napromieniowaniu komórka naprawia szkody, ale prawdopodobnie nie w takim porządku, jak poprzednio. Pod bezpośrednim wpływem promieniowania powstają zmiany w chromosomach, w których zlokalizowane są nośniki cech dziedzicznych. Zmiany w chromosomach polegają na pękaniu, sklejanu bądź rozszczepianiu. Wszelkie zaburzenia liczby, wielkości i kształtu chromosomów prowadzą do zaburzeń podziału chromosomów, zmiany cech, których nosicielami są uszkodzone chromosomy, oraz powodują zaburzenia podziału komórek lub je wręcz uniemożliwiają. Zmiany chemiczne w organizmach pod wpływem promieniowania polegają na zmianach w cząsteczkach wody. Zmiany te to jonizacja lub rozpad na cząsteczki. Proces jonizacji następuje, gdy obojętna cząsteczka wody utraci elektron, przekształcając się w jon dodatni, lub gdy przyłączy elektron, stając się jonem ujemnym. Powstałe jony są bardzo nietrwałe, łatwo rozpadają się i tworzą wolne rodniki wodorowe i wodorotlenowe (H i OH), które mogą łączyć

się z innymi cząsteczkami chemicznymi, powodując na przykład inaktywację enzymów, bądź reagować między sobą tworząc cząsteczki  $H_2O$ ,  $H_2$  lub  $H_2O_2$  (woda utleniona należy do silnie działających odczynników). Działanie promieniowania może prowadzić do uwolnienia szeregu enzymów hydrolitycznych, które rozszczepiają wchodzące w skład komórki białka, tłuszcze i węglowodany prowadząc do ich samozniszczenia. Objawami popromiennymi są: przedwczesne starzenie się, utrata wagi, zmniejszenie liczby krwinek białych, anemia. Wkrótce po naświetleniu dużą dawką promieni występują także wszystkie wyżej wymienione objawy oraz: nudności, wymioty, krwawe biegunki, ogólne zatrucie organizmu wywołane produktami rozpadu zniszczonych tkanek. W załączonej tabeli wyszczególniono najczęściej występujące izotopy.

### 3. Spektrometria mas i jej fizyczne podstawy

Tabela 1

Nazwa izotopu	Emisja promienio - twórcza	Okres połowicznego rozpadu	Źródła
Tryt- $^3H$	$\beta$	12.3 lat	reakcje jądrowe zachodzące w atmosferze, wnikanie do atmosfery z promieniowaniem kosmicznym, próbné wybuchy jądrowe
Węgiel $^{14}C$	$\beta$	5730 lat	oddziaływanie neutronów promieniowania kosmicznego z azotem, podczas eksplozji jądrowych (wychwył nadmiernie powstających neutronów przez azot)
Krypton $^{85}Kr$	$\beta$ i $\gamma$	10.7 lat	oddziaływanie neutronów promieniowania kosmicznego ze znajdującym się w powietrzu $^{84}Kr$ , rozpad naturalnego promienio-twórczego uranu, próbné wybuchy jądrowe, produkcja plutonu dla celów wojskowych
Stront $^{90}Sr$	$\beta$	29.1 lat	produkowany podczas cyklu przetwarzania paliwa jądrowego, wybuchy jądrowe

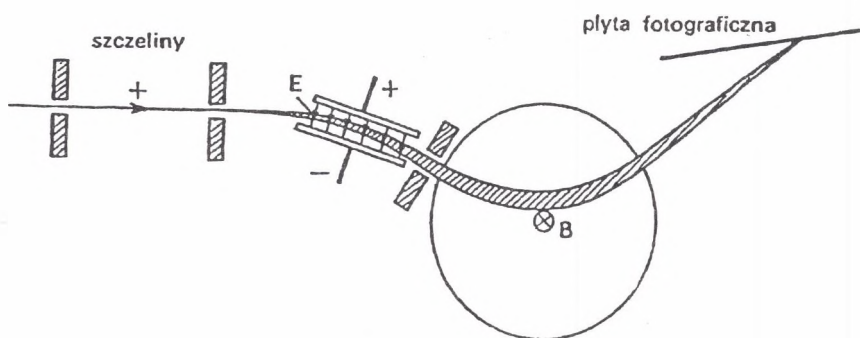
cd. tabeli 1

Jod izotopy o liczbach masowych od 117 do 141, z wyjątkiem $^{127}\text{I}$ są radioaktywne	$\beta$	od 2 sek do $1.57 \cdot 10^7$ lat	rozszczipienie naturalnego uranu, oddziaływania wysokoenergetycznych protonów, neutronów i fotonów z izotopami ksenonu, eksplozje jądrowe
Cez $^{137}\text{Cs}$	$\beta$ i $\gamma$	30.17 lat	wybuchy jądrowe, produkowany przez rozszczipienie w paliwie reaktorów jądrowych
Radon $^{219}\text{Rn}$ , $^{220}\text{Rn}$ , $^{222}\text{Rn}$	$\alpha$ i $\beta$	3.82 dnia	rozpad radu
Pluton $^{238}\text{Pu}$ , $^{239}\text{Pu}$ , $^{240}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Pu}$ , $^{242}\text{Pu}$	$\beta$	od 14.4 do 376000 lat	rozszczipienie uranu, wybuchy jądrowe w atmosferze, przetwa-rzanie zużytego paliwa jądrowego

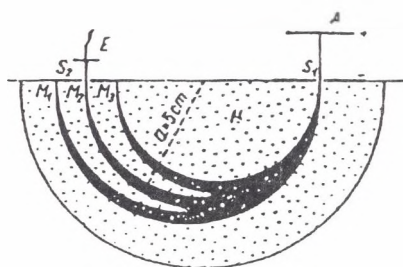
Metodą, która pozwala wyznaczyć w sposób bezpośredni skład izotopowy substancji, jest spektrometria masowa. Istota działania spektrometru masowego polega na zjonizowaniu metodą wyładowania elektrycznego wysokiego napięcia, wzbudzeniu termicznym czy wyładowaniu oscylacyjnym między elektrodami atomów badanego materiału, a następnie na wykorzystaniu własności odchylających i filtrujących pola elektrycznego oraz magnetycznego, odpowiednio uformowanych.

W tabeli zestawiono izotopy, które najczęściej przyczyniają się do skażenia środowiska naturalnego. Wymienione izotopy są uwalniane do środowiska w związku z funkcjonowaniem elektrowni jądrowych (zarówno normalnym, jak i awaryjnym) oraz w wyniku próbných wybuchów jądrowych prowadzonych w celach militarnych. Kumulacja tych pierwiastków w glebie, w wodach i powietrzu następuje w wyniku tych uwolnień, powoduje ich przenikanie i odkładanie się - trwale lub przejściowe - w organizmach ludzkich. W konsekwencji doprowadza to do zwiększenia radiacyjnego obciążenia populacji, co z kolei może wywołać niekorzystne skutki zdrowotne.

W 1919 roku Aston zastosował do analizy masowej wzajemnie prostopadłe pola, elektryczne i magnetyczne. Umożliwiło to zogniskowanie jonów o tym samym stosunku masy

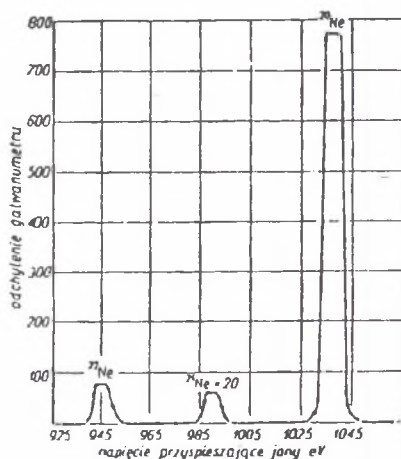


Spektrograf masowy Astona



Schemat spektrometru Dempstera

A — elektroda emitująca jony,  $S_1$ ,  $S_2$  — szczeliny spektrometru, E — kolektor jonów połączony z elektrometrem



Widmo masowe neonu uzyskane przy stałym polu magnetycznym drogą zmiany napięcia przyspieszającego jony

Rys. 1. Schematy spektrometru Astona i spektrometru Dempstera oraz przykład widma izotopowego neonu



do ładunku wzdłuż krótkich odcinków, będących obrazami szczeliny wyjściowej. Aston podobnie jak i Thomson do detekcji jonów używał klisz fotograficznych, na których uzyskiwał zaczerwienienia w postaci krótkich odcinków. Każdemu odcinkowi na kliszy odpowiadał określony stosunek masy jonów do ich ładunku, nawet wtedy, gdy prędkości jonów były różne i zawarte w pewnym, niezbyt szerokim przedziale. Aparatura Astona, nazwana spektrografem, ogniskowała więc jony tych samych mas i różnych prędkości pod warunkiem jednak, że wiązka jonowa była dokładnie równoległa.

Pierwszy spektrometr został zbudowany w 1918 roku, tj. o rok wcześniej od spektrografu Astona, przez Dempsera. Do rejestracji Dempser użył kolektora połączonego z elektrometrem. Jony były przyspieszane stosunkowo niskim napięciem od 500 V do 1750 V. W spektrometrze do analizy wiązki jonowej użyto jedynie pola magnetycznego. Aby jednak za pomocą jednorodnego pola magnetycznego można było rozdzielić jony różnych mas, wiązka analizowanych jonów powinna być dokładnie monoenergetyczna. Wszystkie jony powinny być przyspieszone taką samą różnicą potencjałów, co jednak nie daje się urzeczywistnić w metodzie wyładowania jonowego w gazie. W celu uzyskania jonów monoenergetycznych Dempser wykorzystywał albo termoemisję jonową, albo jonizację gazu elektronami. Otrzymane w ten sposób jony były następnie przyspieszane określoną różnicą potencjałów. W polu magnetycznym wiązki jonowe zakreślały półokręgi kół i po odchyleniu o 180 stopni były ogniskowane. Przy ustalonym natężeniu pola magnetycznego oraz wartości napięcia przyspieszającego tylko jony określonej masy mogły być ogniskowane na szczelinie wyjściowej spektrometru. Metodę zastosowaną w spektrometrze można nazwać metodą ogniskowania kierunkowego. Rozbieżne lecz monoenergetyczne związki zawierające jony o tym samym stosunku masy do ładunku zostają zogniskowane w polu magnetycznym. Zasadę działania spektrometru z 180-stopniowym polem magnetycznym pokazano na rys. 1. Cząsteczka o masie  $m$ , ładunku  $ne$  ( $ne$  oznacza ładunek wyrażony jako wielokrotność ładunku elementarnego) i prędkości  $v$  wbiegając w pole magnetyczne o indukcji  $B$ , prostopadłe do linii sił będzie poruszać się po okręgu koła, którego promień  $a$  określony jest równaniem

$$a = \frac{mv}{neB},$$

wynikającym wprost ze wzoru na siłę Lorentza. Widzimy, że promień okręgu, po którym porusza się cząstka w polu magnetycznym, jest proporcjonalny do pędu cząstki. Cząstka

porusza się z prędkością  $v$  na skutek przyspieszenia w polu elektrycznym o stałym napięciu  $U$  i jej energię kinetyczną można wyrazić następującym wzorem:

$$\frac{mv^2}{2} = neU.$$

Z poprzednich równań można wyprowadzić wzór na stosunek masy cząsteczki do jej ładunku

$$\frac{m}{ne} = \frac{a^2 B^2}{2U}$$

Wyrażając masę jonu w jednostkach masy atomowej  $M$ , ostatnią równość można wyrazić następująco:

$$\frac{M}{n} \propto \frac{a^2 B^2}{U}.$$

W spektrometrze Dempsera jony mogą być zebrane przez kolektor tylko przy określonej wartości promienia  $a$  ustalonego wymiarami aparatury. Z ostatniego wzoru wynika więc, że możemy ogniskować na szczelinę  $S_2$  (rys. 1) jony coraz innych mas zmieniając  $U$  przy stałym natężeniu pola magnetycznego. W takim przypadku mamy

$$\frac{M}{n} = \frac{A}{U},$$

gdzie  $A$  dla danego natężenia pola magnetycznego jest stałą spektrometru. Wykres zależności natężenia prądu jonowego zebranego przez kolektor od masy jonu nazywa się widmem masowym.

Uzyskując widmo przez zmianę natężenia pola magnetycznego otrzymamy skalę mas proporcjonalnych do  $B^2$ , zaś przy zmianie napięcia przyspieszającego proporcjonalną do  $1/U$ . Wierzchołek izotopu  $^{21}\text{Ne}$ , przedstawiony na rys. 1, został uzyskany przez 20-krotne zwiększenie czułości układu pomiarowego. Za pomocą sprktrometru Dempser osiągnął zdolność rozdzielczą dochodzącą do 100, a więc znacznie mniejszą od zdolności rozdzielczej spektrografów (przez zdolność rozdzielczą spektrometru rozumie się stosunek masy analizowanego atomu czy cząsteczki do różnicy mas, jaka może być jeszcze rozróżniona przez spektrometr). Ta zdolność wystarczała jednak do przeprowadzenia analizy izotopowej litu, magnezu, wapnia i cynku.

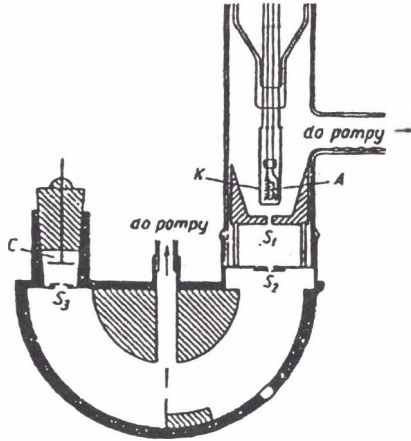
W następnych latach ciągle ulepszano konstrukcje spektrometrów. Niektóre przykłady przedstawiono na rys. 2. Bleakney w 1932 roku w celu wyznaczenia potencjału jonizacyjnego wodoru buduje spektrometr z 180-stopniowym polem magnetycznym odchylającym.



Spektrometr ten różnił się zasadniczo od powstałych wcześniej. Elektrony z rozżarzonego włókna przyspieszane były polem elektrycznym równoległym do linii sił pola magnetycznego. Natomiast pole przyspieszające jony miało kierunek prostopadły do kierunku ruchu elektronów. Ten sposób wytwarzania wiązek jonowych jest obecnie wyłącznie stosowany w spektrometrii masowej. Pole magnetyczne odchylające jony Bleakney wytwarzał za pomocą solenoidu długości 1 metra i średnicy około 12.5 centymetra, bez stosowania rdzenia żelaznego. Metoda wytwarzania odchylającego pola magnetycznego za pomocą solenoidu nie znalazła jednak większego zastosowania. Jonizację gazu elektronami zastosowali także Tate i Smith. Spektrometru podobnej konstrukcji używał także Nier do badania składu izotopowego argonu, potasu, rubidu, cynku i kadmu. Nier był jednym z pierwszych, którzy na szerszą skalę za pomocą spektrometru masowego podjęli badania nad składem izotopowym pierwiastków.

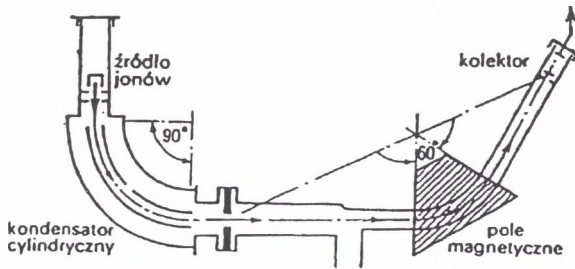
W roku 1940 Nier do budowy komory odchyień zastosował metal. W spektrometrze zbudowanym w tym czasie przez tego autora pomieszczenia na źródło jonów oraz przewody próżniowe wykonane były jeszcze ze szkła spajanego z metalem komory odchyień. W następnych latach zaczęto jednak coraz częściej budować całkowicie metalowe spektrometry, zaś szkło stosowane było jedynie w miejscach prowadzenia przewodów elektrycznych.

Wspomniany spektrometr Niera w miejsce 180-stopniowego pola miał 60-stopniowe pole magnetyczne. Spektrometry z 60- i 90-stopniowym polem magnetycznym przy tej samej zdolności rozdzielczej wymagają elektromagnesów o znacznie mniejszej mocy, mogą być stosowane także magnesy trwałe. Rozwój techniki spektrometrycznej pozwolił na zastosowanie spektrometrów w przemyśle chemicznym do analizy jakościowej i ilościowej związków węgla. Począwszy od roku 1942 budowano spektrometry do celów technicznych. Początkowo posiadały one zdolność rozdzielczą niewiele wyższą od 100 (przez zdolność rozdzielczą spektrometru rozumie się stosunek masy analizowanego atomu czy cząsteczki do różnicy mas, jaka może być jeszcze rozróżniana przez spektrometr) i pozwalały wykryć stężenie składnika rzędu  $10^{-5}$ - $10^{-6}$ . Obecnie zdolność rozdzielcza takich spektrometrów wynosi 600, natomiast czułość jest rzędu  $10^{-7}$ . W latach 1940-1947, w wyniku prac naukowców, między innymi Niera, ukształtował się standardowy typ spektrometru budowany z pewnymi zmianami w konstrukcji w szeregu laboratoriach, a także przez firmy dla przemysłu. Prawie wszystkie stosowane do chwili obecnej spektrometry mają źródło jonów działające na zasadzie jonizacji gazu elektronami. Wiązka elektronów przebiega prostopadle do wiązki jonowej, równoległe do

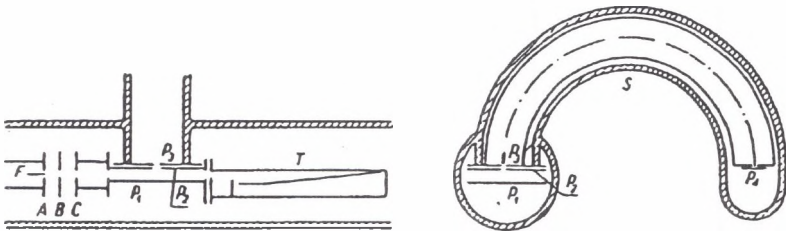


7. Spektrometr Dempstera z 1922 r.

A — anoda, K — katoda,  $S_1$ ,  $S_2$  i  $S_3$  —  
szeliny, C — kolektor



Spektrometr masowy Niera z podwójnym ogniskowaniem



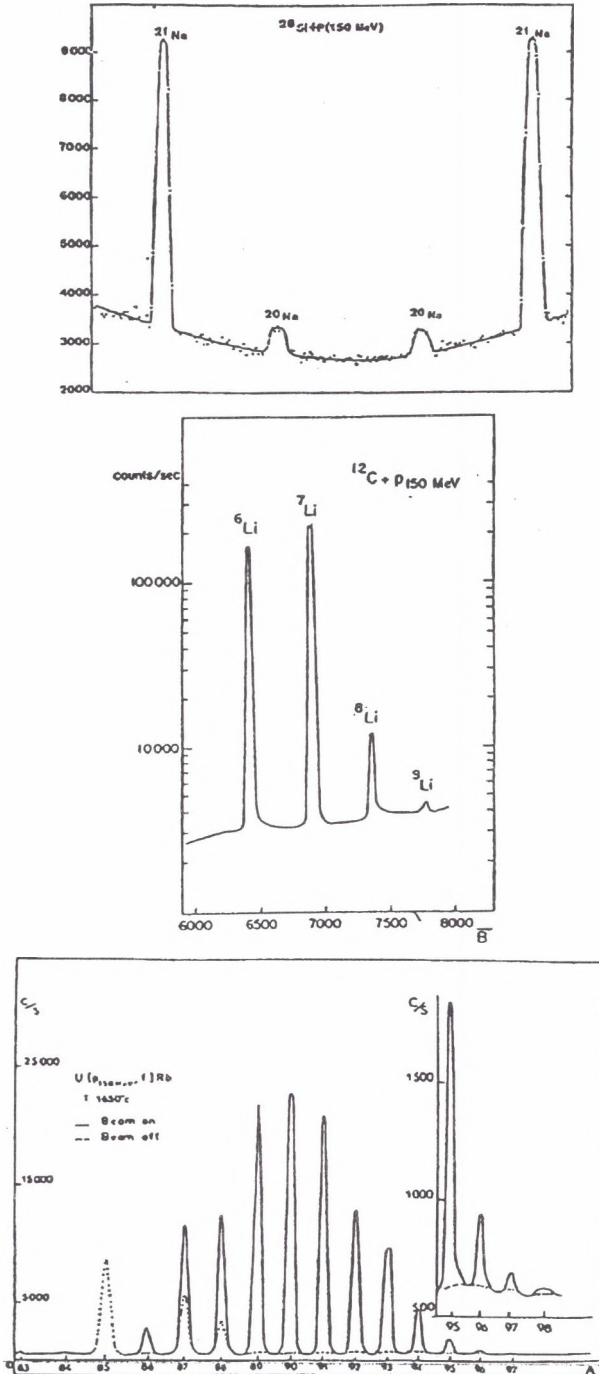
Spektrometr Tate i Smitha

F — katoda emitująca elektrony, A, B, C — elektrody formujące wiązkę elektronową,  
 $P_1$  — elektroda odpychająca dodatnio jony,  $P_2$  i  $P_3$  — elektrody tworzące szeliny jonowe,  
 $P_4$  — kolektor jonów, S — część metalowa komory odchylenia spektrometru, T — pułapka elektronów

Rys. 2. Schematy spektrometrów: Dempstera z 1922 roku, Niera z podwójnym ogniskowaniem oraz Tate'a i Smitha

dłuższych krawędzi szczelin jonowych. Ogniskowanie wiązki elektronowej uzyskuje się przez pole magnetyczne, równoległe do kierunku biegu elektronów i wytworzone za pomocą oddzielnego magnesu. Powstałe w komorze jonizacyjnej jony zostają usunięte z tego obszaru za pomocą słabego pola elektrycznego, a następnie przyspieszone. Większość spektrometrów posiada także system szczelin, ogniskujących wiązkę jonową. Do odchylenia wiązki stosowane są pola magnetyczne zarówno o  $60^\circ$  jak i  $90^\circ$  kącie rozwarcia. Komory odchylenia współczesnych spektroskopów są budowane wyłącznie z metalu. Elektromagnes, źródło jonów, układ pomiarowy spektrometru są zasilane z sieci przez odpowiednie stabilizatory. Stosowany jest powszechnie automatyczny zapis widoku, nie wykluczający jednak możliwości bezpośredniego odczytu i rejestracji ręcznej. Dalsze prace nad spektrometrią masową, prowadzone po roku 1947 przez wielu badaczy, przyczyniły się do udoskonalenia aparatury, metod i techniki pomiarów oraz rozszerzyły dziedziny, w których spektrometria masowa znalazła zastosowanie. Ten rozwój spektrometrii trwa do obecnej chwili i nie jest dotąd zakończony. Jednocześnie z udoskonaleniem aparatury i metod pomiaru zwiększa się zakres zagadnień, w których spektrometria masowa znajduje zastosowanie. Obecnie spektrometr masowy służy do wyznaczania składu izotopowego pierwiastków w fizyce jądrowej, do badania zjawisk jonizacji i dysocjacji w gazach, badania kinetyki reakcji chemicznych, a także do celów analitycznych. Pomiaru składu izotopowego pierwiastków wykonywano początkowo za pomocą spektrografów metodą fotograficzną (kliszową). Systematyczne wyznaczanie rozpoczął pierwszy Nier, wyznaczając w 1936 roku skład izotopowy rubidu, cynku, argonu, potasu i kadmu, w następnym roku rtęci, ołowiu, osmu oraz wielu innych pierwiastków.

Nier przy zastosowaniu metody spektrometrycznej powtórzył pomiary Astona i innych badaczy. Okazało się wtedy, że błędy w określeniu składu izotopowego za pomocą spektrografu dochodziły do 10%. Wtedy także stwierdzono, że czułość spektrografu nie jest duża i szereg izotopów wykryto metodą spektrometryczną. Jako przykład mogą służyć rzadkie izotopy wapnia. Stosowanie coraz dokładniejszych metod pomiaru prądów jonowych oraz źródeł z udoskonalaną stale optyką jonową pozwalało zwiększyć dokładność i czułość spektrometrów, służących do wyznaczania składu izotopowego pierwiastków. W ostatnich latach przeprowadzono dokładne pomiary składu izotopowego pierwiastków poszukujących nowych, jeszcze nie odkrytych, izotopów. Przy obecnym stanie techniki pomiarowej można przyjmować, że błąd pomiaru składu izotopowego pierwiastków za pomocą spektrometru



Rys. 3. Przykłady widm izotopowych sodu, litu i rubidu otrzymane przy użyciu współczesnych spektrometrów

masowego, w zależności od zawartości izotpu, waha się od ułamka do kilku procent. Największe wahania składu izotopowego spotykamy w przypadkach pierwiastków, których niektóre izotopy mogą być pochodzenia promieniotwórczego. Do takich pierwiastków należą ołów, hel, argon i stront. Zmiany w składzie izotopowym wykazują także pierwiastki lekkie pochodzenia niepromieniotwórczego, jak wodór, azot, tlen i inne. W fizyce jądra atomowego spektrometr masowy znajduje zastosowanie do separacji izotopów, analizy i identyfikacji produktów reakcji jądrowych oraz dokładnego wyznaczenia energii przemian jądrowych. Metodą spektrometryczną można również bardzo dokładnie wyznaczyć czas połowicznego zaniku pierwiastków promieniotwórczych zarówno krótko-, jak i długotrwałych. Szczególnie zastosowanie znajduje spektrometria w badaniach produktów rozszczepienia uranu. Ta metoda lepiej niż każda inna pozwala określić produkty rozszczepienia oraz wyznaczyć ich czas połowicznego rozpadu. Naświetlając badany pierwiastek neutronami, a następnie wyznaczając metodą analizy masowej ilość produktu przemiany, łatwo znaleźć przekrój czynny dla zachodzącej reakcji. Energię emitowanych w reakcji cząstek  $\alpha$  można badać za pomocą spektrometru dla ciężkich cząstek o wielkich energiach. Analiza masowa pozwala stwierdzać radioaktywność poszczególnych izotopów pierwiastka, a następnie obliczyć przekroje czynne na reakcje z neutronami. Poza fizyką metoda spektrometrii masowej znalazła szerokie zastosowanie w geologii do wyznaczania wieku skał, do badania dysocjacji molekuł pod wpływem bombardowania elektronowego, do badania kinetyki reakcji chemicznych oraz analizy jakościowej i ilościowej mieszanin gazowych. W skałach zawierających uran gromadzi się z czasem także i ołów jako produkt jego rozpadu. Izotop ołowiu 206 powstaje z rozpadu uranu 238, zaś izotop ołowiu 207 z aktynouranu. Pomiar stosunku ilościowego izotopów ołowiu nagromadzonych w skałach prowadzi do wyznaczenia wieku skał.

#### **4. Przykłady zastosowań spektrometrii mas do wyznaczania składu izotopowego pierwiastków**

W tym rozdziale przedstawiono dwa przykłady zastosowania spektroskopii mas do wyznaczania zawartości izotopów w badaniach ekologicznych. Pierwszy przykład dotyczy obserwacji zanieczyszczeń powietrza izotopami ołowiu w okolicach Alaski, w kwietniu 1990



roku. Na rys. 4, po lewej stronie, widać mapkę z zaznaczonymi literami miejscami pobrania próbek. Aby otrzymać próbki do badań spektrometrycznych, powietrze przepompowywano przez system filtrów, w których zbierały się zanieczyszczenia. Na rysunku 4 pokazane są wykresy przedstawiające stosunek zawartości izotopów  $Pb^{206/207}$  i  $Pb^{208/207}$  w funkcji całkowitej zawartości ołowiu w badanych próbkach. Poszczególne punkty naniesiono na wykresy łącznie z błędami w postaci pionowych linii. Na tym samym rysunku, po prawej stronie, przedstawiono stosunki zawartości izotopów ołowiu jako funkcji części czasu (wyrażonej w procentach), kiedy wiatr wiał z kierunku Oceanu Atlantyckiego (a) i z terenów miejskich, zanieczyszczonych spalinami samochodowymi. Na podstawie analizy tych wyników oszacowano poziom rozprzestrzeniających się zanieczyszczeń i sposób ich przemieszczania się.

Rys. 5 ilustruje wyniki badań zawartości izotopów strontu w wodzie deszczowej, w Kongo. Próbkę została pobrana w listopadzie 1988 roku. Wykresy przedstawiają zmiany stosunku zawartości izotopów  $^{87}Sr / ^{86}Sr$  z upływem czasu trwania opadów i w funkcji zawartości pozostałych metali, których obecność stwierdzono w wodzie deszczowej.

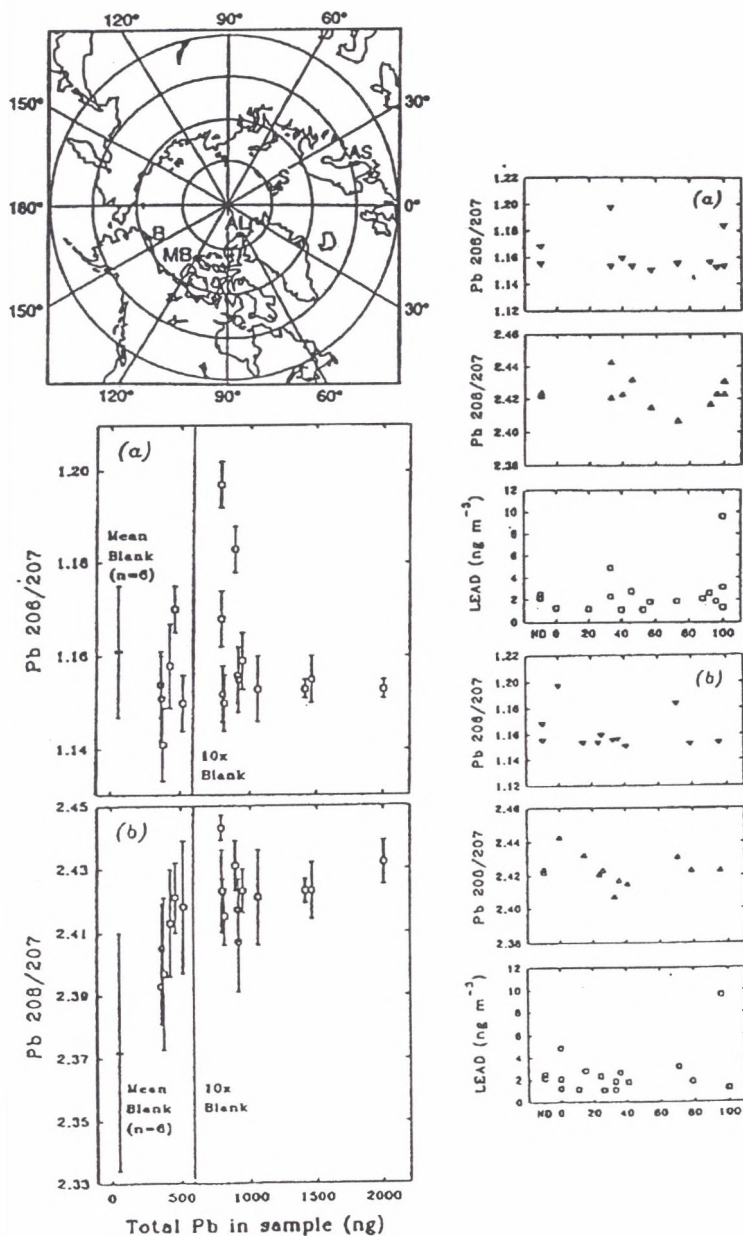
## 5. Podsumowanie

Zanieczyszczenie środowiska naturalnego izotopami promieniotwórczymi ma duży wpływ na zdrowie, a nawet życie człowieka oraz na warunki, w jakich przyjdzie mu żyć w przyszłości. Takie skażenie ma również wpływ na zdrowotność przyszłych pokoleń, ponieważ może wywoływać zmiany w kodzie genetycznym człowieka.

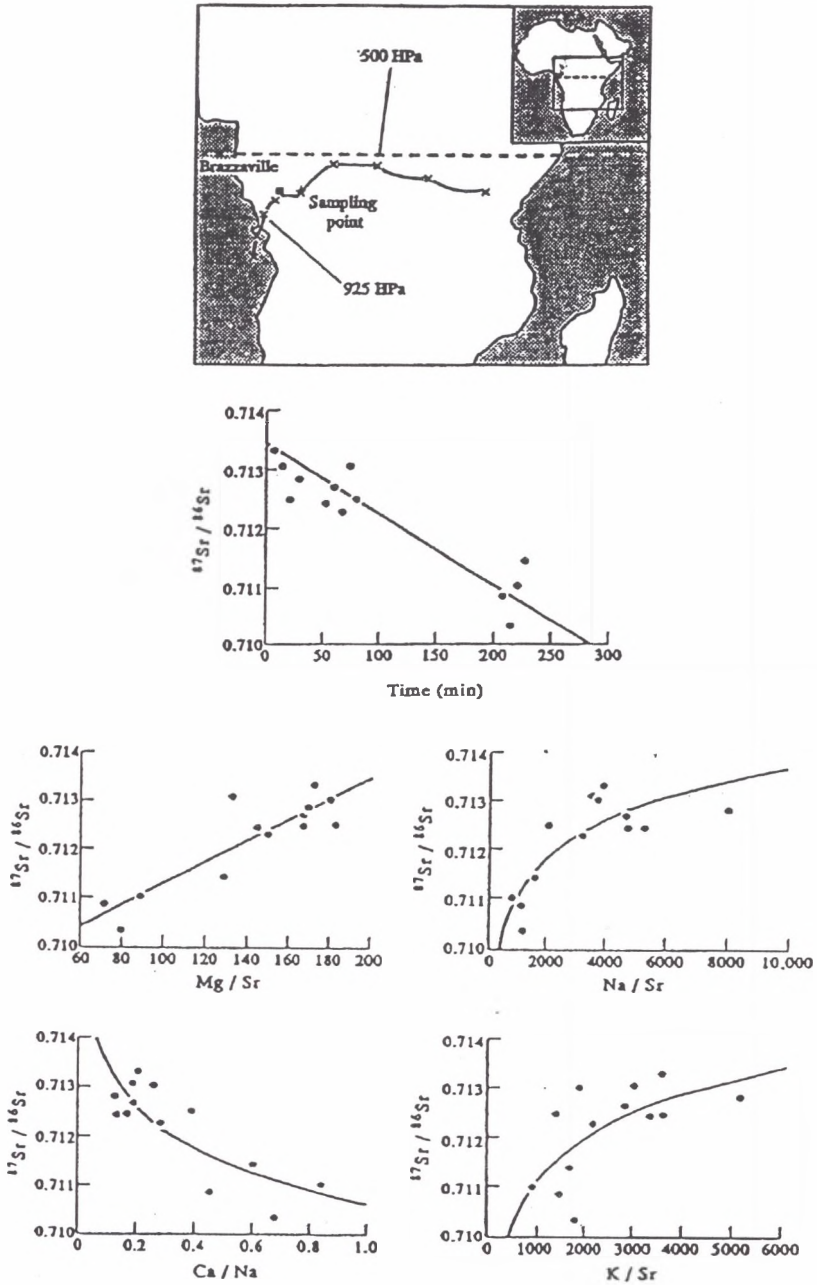
Jedną z metod pozwalających badać występowanie i zawartość szkodliwych dla życia na Ziemi izotopów jest spektrometria masowa. Przedstawione przykłady pokazują jej skuteczność i przydatność w badaniach ekologicznych. Wyniki uzyskane za jej pomocą świadczą o celowości sięgania po metody fizyczne w badaniach stopnia zanieczyszczenia oraz sposobu i prędkości rozprzestrzeniania się szkodliwych substancji w środowisku naturalnym.

Należy jednak zaznaczyć, że nie jest to metoda powszechnie stosowana, ponieważ jest stosunkowo kosztowna i wymaga przeprowadzenia pomiarów, które mogą być wykonane w wyspecjalizowanych laboratoriach fizycznych. Jednak jako metoda pozwalająca wyznaczyć





Rys. 4. Wyniki badań zanieczyszczenia powietrza z okolic Alaski izotopami ołowiu



Rys. 5. Wyniki badań zanieczyszczeń wody deszczowej izotopami strontu w Kongo, w Afryce

skład izotopowy zanieczyszczeń w sposób bezpośredni i niezwykle precyzyjny, jest bardzo przydatna.

Przedstawione przykłady pokazują jak bardzo w obecnych badaniach naukowych ważne jest stosowanie metod interdyscyplinarnych. Podejmowane prace mające na celu ochronę naszego środowiska nigdy nie mogłyby być zrealizowane, gdyby nie stosowanie różnych metod i narzędzi badawczych. Do nich należy również spektrometria masowa.

### Literatura

1. Acosta V., Cowan C. L., Graham B. J., Podstawy fizyki współczesnej, PWN, Warszawa 1981.
2. Dupre B., Negrel Ph., Seimbille F., Allegre C.J., Atmospheric Environment, (1994) vol. 28, No 4, str. 617-620.
3. Kryteria zdrowotne środowiska pod redakcją J. A. Indulskiego, PWN, Warszawa 1991.
4. Strzałkowski A., Wstęp do fizyki jądra atomowego, PWN, Warszawa 1974.
5. Stasiak J., Stasiak K., Problemy środowiska przyrodniczego, PWN, Warszawa 1983.
6. Sturges W. T., Hopper J. F., Barrie L. A., Schnell R. C., Atmospheric Environment, (1993) vol.27A, No 17/18, str. 2865-2871.
7. Żuk W., Spektrometria masowa, PWN, Warszawa 1956
8. Żukowski P., Podstawowe problemy współczesnej techniki ochrony środowiska, cz.II., PWN, Warszawa 1987.