

## ROZDZIAŁ IV

### PROMIENIE DODATNIE

#### § 19. Powstawanie promieni dodatnich w rurce z rozrzedzonym gazem.

##### Promienie anodowe. Ich energia i własności.

Promienie dodatnie biegną w rurce z rozrzedzonym gazem ku katodzie i biorą początek w różnych punktach ciemni Crookesa i poświaty ujemnej. Jeżeli katoda jest zaopatrzona w otwory, można poza nią widzieć wiązkę promieni «kanalikowych» w postaci świecącego pasma, co jest wynikiem luminescencji rozrzedzonego gazu oraz świecenia samych drobin (rys. 35). Wiązka powoduje również fluorescencję szklanych ścianek, na które pada; pod działaniem magnesu odchyła się nieznacznie.

Ponieważ promienie kanalikowe powstają w punktach, których odległość od katody jest różna, przeto im punkt jest dalszy, tym większa jest praca wykonana przez pole; jej największa wartość odpowiada napięciu  $V$  przyłożonemu do elektrod rury. Wiązka promieni kanalikowych jest zatem niejednorodna pod względem prędkości i energii, nawet jeżeli jest utworzona z cząstek, których masa i ładunek są jednakowe. Masa jest w tym przypadku rzędu wielkości masy atomu; w istocie cząstki tych promieni są to jony dodatnie powstające z drobin gazu w rurce. Ich prędkość jest mniejsza niż elektronów, na ogół nie przekracza  $10^8$  cm/sek; możemy przeto traktować masę jako wielkość stałą i stosować w celu obliczania energii prosty wzór  $mv^2/2 = eV'$ , gdzie  $V' \leq V$ .



Rys. 35.

Ładunek jonu  $e$  jest równy ładunkowi elementarnemu lub jego wielokrotności. Jeżeli jon jest jednowartościowy, energia równa się  $V$  elektronowoltów, tj. wyraża się tą samą liczbą co potencjał emisyjny w woltach, jeżeli jon jest  $n$ -wartościowy, energia jest równa  $nV$  elektronowoltów. Dla krótkości będziemy oznaczali 1 elektronowolt literami ew., 1000 elektronowoltów, czyli 1 elektronokilowolt, literami ekw.

W rurach przeznaczonych do badania przemian jądrowych cząstki uzyskują znacznie większe prędkości. Niektóre ze skonstruowanych w tym

celu rur zużytkowują napięcie 800 kV i większe. Inny sposób polega na stosowaniu niezbyt wielkiej różnicy potencjałów  $V$  dawanej przez generator drgań elektrycznych i udzielaniu dodatnim jonom przyspieszenia wielostopniowego. Dzieje się to w ten sposób, że wiązka jonów zakrzywiona w polu magnetycznym przybiera kształt spiralnej przecinającej wielokrotnie okolice pola elektrycznego; każde przejście odbywa się w chwili, gdy  $V$  jest maximum; za każdym razem przeto energia jonu wzrasta o  $V$  ew.; wydajność tej metody jest ograniczona wskutek stopniowego rozpraszania się wiązki. Tym sposobem otrzymano jony, których energia przewyższa  $10^6$  ew.;  $10^6$  ew. odpowiada w przypadku jonów wodoru prędkości  $1,4 \cdot 10^9$  cm/sec, tj.  $\beta = 0,046$ .

Rozżarzona anoda umieszczona w próżni, zawierająca niektóre sole lotne w wysokiej temperaturze, wysyła jony dodatnie. Energię tych promieni dodatnich możemy obliczyć na podstawie wzoru  $m\nu^2/2 = eV$ , gdzie  $V$  jest to napięcie przyłożone do rury, gdyż w tym przypadku wszystkie jony są poddane działaniu całkowitego napięcia.

Promienie kanalikowe oraz anodowe posiadają niektóre własności analogiczne do promieni katodowych. Podobnie jak te ostatnie, promienie dodatnie wzbudzają fosforescencję, zacerniają klisze fotograficzne, wreszcie posiadają zdolność jonizacyjną. Od promieni katodowych różnią się znakiem ładunku i masą cząstek. Te cząstki biorące początek w jonizacyjnym zderzeniu z elektronem wysyłają światło z charakterystycznymi objawami efektu Dopplera: obserwator patrzący w kierunku, z którego przybiegają cząstki, stwierdza, że światło monochromatyczne posiada okres  $T'$  mniejszy od okresu rzeczywistego  $T$ :

$$T' = T(1 - \nu/c),$$

gdzie  $\nu$  jest to prędkość cząstki,  $c$  prędkość światła. Badając wynikającą stąd zmianę długości fali, otrzymujemy na prędkość  $\nu$  wartości zgodne z wartościami otrzymanymi za pomocą innych metod. Przenikliwość promieni dodatnich jest niezmiernie mała, nawet jeżeli potencjał emisyjny wynosi  $10^6$  woltów.

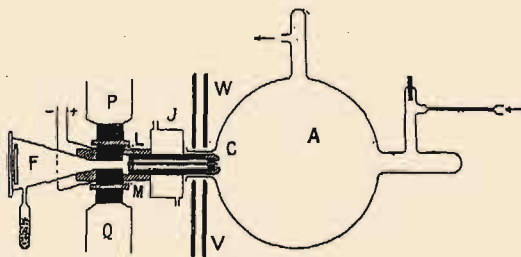
## § 20. Pomiary stosunku $e/m$ promieni dodatnich.

Teoria działania pola magnetycznego i elektrycznego na promienie dodatnie nie różni się niczym od teorii wyłożonej w ustępie o promieniach katodowych (§ 14); należy tylko pamiętać, że odchylenia zachodzą w przeciwnym kierunku. Ponieważ odchylenie elektryczne jest proporcjonalne do  $e/m\nu^2$ , tj. do  $1/V$ , przeto jest tego samego rzędu wielkości co odchylenie promieni katodowych, jeżeli w obu przypadkach mamy do czynienia z jednakowym potencjałem emisyjnym (w założeniu, że nie jest zbyt wielki) i z jednakowym natężeniem  $h$  pola odchylającego. Natomiast odchylenie magnetyczne niezbyt szybkich cząstek jest proporcjonalne do  $e/m\nu$ , zmienia się zatem jak  $e/m$ , jeżeli potencjał emisyjny

pozostaje bez zmiany; jest przeto znacznie mniejsze w przypadku promieni dodatnich niż katodowych, o ile natężenie  $H$  jest dane.

Dla wyznaczenia  $e/m$  promieni kanalikowych otrzymywanych w rurze z rozrzedzonym gazem i z zimną anodą konieczne jest badanie odchylenia magnetycznego oraz elektrycznego. Główna trudność polega na unikaniu rekombinacji jonów dodatnich z elektronami rozproszonymi w gazie.

W celu możliwego usunięcia tej niedogodności, dzielimy aparat na dwie części: komorę do wyładowań zawierającą badany gaz pod stosownym ciśnieniem, w której jony uzyskują prędkość, oraz komorę obserwacyjną, w której wytwarzamy odchylenia i którą opróżniamy możliwie najlepiej za pomocą pompy o wielkiej wydajności; komory łączą się ze sobą rurką kapilarną, która odgrywa rolę diafragmy określającej przekrój wiązki. Ponieważ prędkości cząstek nie są jednakowe, wskazane jest stosowanie skrzyżowanych odchyżeń, magnetycznego i elektrycznego, lub metody parabol (§ 14). Na rys. 36 przedstawiony jest schemat aparatu używanego przez *J. J. Thomsona*.



Rys. 36. *A* — komora, w której powstają promienie kanalikowe, *F* — komora obserwacyjna; *C* — przewiercona katoda z bardzo wąskim kanałem, przez który przechodzą promienie; *L*, *M* — izolowane płytki z miękkiego żelaza, stanowiące części biegunów *P*, *Q* elektromagnesu; pole elektryczne jest wytworzone pomiędzy *L* i *M*; *W*, *V* — ekran magnetyczny; *J* — chłodnica.

W metodzie parabol każdy rodzaj cząstek posiadających jednakowe  $e/m$  daje na ekranie łuk paraboli, której wierzchołek znajduje się w punkcie *P* i której oś leży na prostej *Py* (rys. 34).

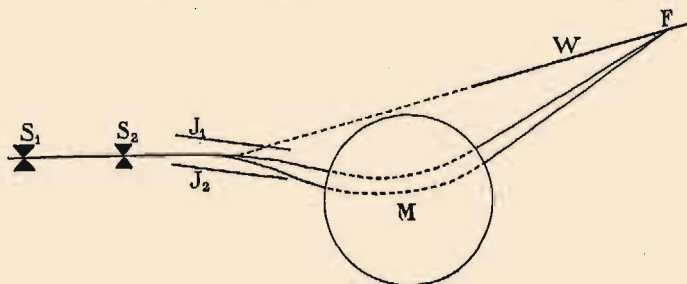
Na podstawie znajomości stosunku  $e/m$  można wyliczyć masę  $m$ , w założeniu, że  $e$  równa się  $ne_0$  ( $n$  całkowite), tj. niewielkiej wielokrotności ładunku elementarnego. Pomiar  $e/m$  prowadzi przeto do *wyznaczania mas jonów* dodatnich, a zatem ciężarów atomowych i drobinowych. *Aston* powiększył dokładność tej metody, stosując zasadę ogniskowania promieni, tj. łączenia we wspólnym ognisku torów cząstek, których prędkości są zawarte w pewnym przedziale. Przyrząd *Astona* nosi nazwę spektrografu mas.

Cienka wiązka cząstek mających jednakowe  $e/m$ , lecz różne prędkości, zostaje najpierw odchylona w polu elektrycznym, wskutek czego powstaje wiązka rozbieżna; znajdujące się nieco dalej pole magnetyczne odchyła wiązkę w przeciwnym kierunku i zarazem zamienia ją na wiązkę zbieżną w ognisku *F*, co ma miejsce jeżeli rozmiary aparatu oraz natężenia obu pól są dobrane w odpowiedni sposób. Schematy aparatury widzimy na rys. 37 a i 37 b. Ponieważ diafragma określająca wiązkę ma

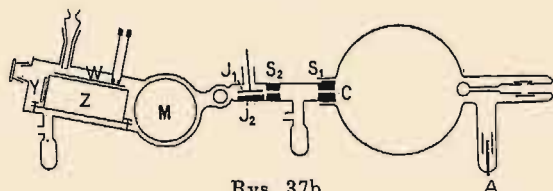


kształt szczeliny, przeto na kliszy fotograficznej otrzymujemy widmo mas, składające się z szeregu prążków, z których każdy odpowiada określonej wartości  $e/m$ .

W przypadku promieni anodowych wszystkie cząstki mają jednaki potencjał emisyjny  $V$ ; dla wyznaczenia  $e/m$  wystarcza przeto zmierzyć napięcie i odchylenie magnetyczne (przyrząd Dempstera, rys. 38).



Rys. 37a.



Rys. 37b.

Rys. 37a i 37b.  $A$  — anoda,  $C$  — katoda;  $S_1$ ,  $S_2$  — wąskie szczeliny ograniczające wiązkę;  $J_1$ ,  $J_2$  — płytki, pomiędzy którymi wytwarza się pole elektryczne;  $M$  — bieguny elektromagnesu wytwarzającego pole magnetyczne;  $Z$  — równoległe płytki mosiężne, pomiędzy którymi przebiega wiązka;  $W$  — klisza fotograficzna;  $F$  — ekran z wilemitu do obserwacji wstępnych.

Doświadczenie polega na badaniu ładunku otrzymywanego przez elektrodę  $F$  w zależności od potencjału  $V$ .

Krzywa przedstawiająca tę zależność posiada ostre maxima w pobliżu niektórych wartości  $V$  świadczące o tym, że promienie zakreślają przepisany tor kołowy. Wyliczamy  $e/m$  z wzorów

$$mv^2/2 = eV \quad mv/e = \mu_0 HR.$$

Natężenie prądu w każdym maximum pozwala obliczyć względną liczbę cząstek różnego rodzaju zawartych w wiązce.

## § 21. Analiza mas. Izotopy. Energia wiązania.

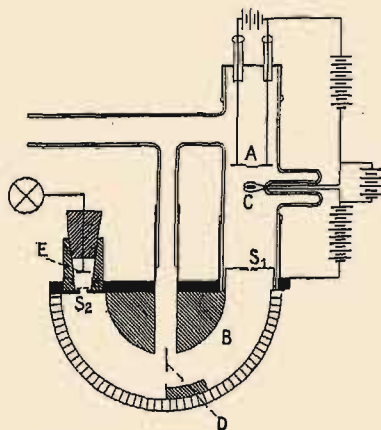
Pomiar  $e/m$  jest podstawą doniosłej metody analizy chemicznej. Zdjęcia otrzymywane metodą parabol świadczą o wielkiej różnorodności jonów dodatnich, powstających w wyładowaniu pod niskim ciśnieniem gazu. Tak np. w wodorze można łatwo obserwować parabole jednowartościowego jonu atomowego  $H^+$  i jonu molekularnego  $H_2^+$ ,

w azocie i w tlenie powstają parabole analogiczne. Jony atomowe są w wielu przypadkach wielowartościowe, jony drobinowe prawie zawsze jednowartościowe. Niektóre rodzaje jonów powstających w rurce nie są znane w postaci drobin obojętnych; znamy np. szereg  $CH^+$ ,  $CH^{2+}$ ,  $CH^{3+}$  oraz szereg  $OH^+$ ,  $OH^{2+}$ ,  $OH^{3+}$ . Związki przedstawione tymi wzorami są zatem trwałe tylko wtedy, gdy drobinę posiadają nabój elektryczny.

Tablica II rys. 1 przedstawia dwa zdjęcia parabol otrzymane przez *J. J. Thomsona*. Atom wodoru posiada zawsze ładunek elementarny: jon  $H^+$  otrzymał nazwę *protonu*.

Neon, którego ciężar atomowy wynosi 20,2, daje dwie parabole: jednej z nich, mocnej, odpowiada masa 20, drugiej, słabszej, masa 22. *J. J. Thomson* założył, że neon jest mieszaniną dwóch gazów, których własności chemiczne są bardzo zbliżone do siebie. *Aston* pokazał, że oddzielenie obu składników jest sprawą niezwykle trudną. Te wyniki były zgodne z teorią rozwiniętą przez *Soddy'ego* na podstawie badania radiopierwiałków, teorią, według której mogą istnieć pierwiastki mające jednakowe własności chemiczne pomimo różnych ciężarów atomowych. Grupa takich pierwiastków zwanych izotopami stanowi określony typ chemiczny i zajmuje wspólne miejsce w układzie periodycznym pierwiastków (tablica 5, Przypisy). Izotopy charakteryzują się jednakową wartością dodatniego ładunku jądra atomowego.

Analiza mas, zastosowana do wszystkich pierwiastków, które można wprowadzić w postaci lotnych związków do komory wyładowań lub zamieniać w jony drogą parowania z rozżarzonej anody, pokazała, że większość pierwiastków posiada budowę złożoną i składa się z izotopów. Ponadto *Aston* pokazał, że z wyjątkiem wodoru, którego ciężar atomowy wynosi 1,0078<sup>1)</sup>, masy atomowe czystych izotopów wyrażają się liczbami całkowitymi z dokładnością do jednej tysięcznej, jeżeli jako podstawę obieramy masę atomową tlenu = 16. Jeżeli zatem ciężary atomowe nie są liczbami całkowitymi, dzieje się to dlatego, że są to średnie wartości ciężarów atomowych czystych izotopów. W świetle tego

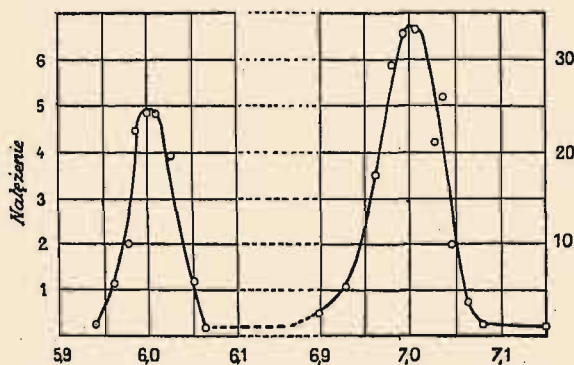


Rys. 38. *A* — anoda, *C* — katoda; *B* — półcylinder mosiężny umieszczony w polu magnetycznym prostopadłym do płaszczyzny rysunku, w której należy sobie wyobrazić tor kołowy opisywany przez wiązkę; *S*<sub>1</sub>, *S*<sub>2</sub> — szczeliny ograniczające wiązkę; *D* — diafragma służąca do usuwania promieni rozproszonych; *E* — elektroda izolowana połączona z czułym elektrometrem.

<sup>1)</sup> Nowsze badania pokazały, że ciężary atomowe izotopów wodoru, litu, berylu, boru, węgla, azotu różnią się również od liczb całkowitych (p. uzupełnienie).

faktu nabiera nowego znaczenia teoria jedności materii *Prouta*, która nie mogła ostać się wobec niemożności wytłumaczenia ułamkowych ciężarów atomowych.

Spośród pierwiastków, których złożoność została ujawniona metodą analizy mas, wymieniamy: chlor utworzony z dwóch izotopów 35 i 37 czyli  $^{35}_{17}\text{Cl}$  i  $^{37}_{17}\text{Cl}$ , lit z dwoma składnikami  $^6_3\text{Li}$  i  $^7_3\text{Li}$ , potas  $^{39}_{19}\text{K}$  i  $^{41}_{19}\text{K}$ , wapń  $^{40}_{20}\text{Ca}$  i  $^{44}_{20}\text{Ca}$ ; argon ma 2 izotopy, krypton — 6, krzem — 9, cyna — 11; wielka



Rys. 39. Lit. Maxima krzywej odpowiadają dwóm izotopom o masie 6 i 7, z wielkim nadmiarem drugiego względem pierwszego, jak tego należy spodziewać się na podstawie ciężaru atomowego 6, 94.

obfitość izotopów istnieje wśród radiopierwiastków. Jak się wydaje, złożoność struktury izotopowej wzrasta wraz z ciężarem atomowym. Na tablicy II, rys. 2 widzimy niektóre zdjęcia widm masowych *Astona* ilustrujące skład izotopowy kilku pierwiastków. Rys. 39 przedstawia skład izotopowy litu podług *Dempstera*. Tabl. 5 Przypisów zawiera spis izotopów dotąd poznanych.

### Analiza za pomocą widm optycznych.

Izotopy posiadają w pierwszym przybliżeniu jednakowe widmo optyczne. Dokładniejsze badanie ujawnia drobne różnice między odpowiadającymi sobie prążkami różnych izotopów. Różnice te przypisujemy nieznacznemu wpływowi masy<sup>1)</sup> jądra na częstość wyrazów seryj optycznych, częstość zależną w pierwszym przybliżeniu tylko od rozmieszczenia ładunków w układzie utworzonym z jądra i elektronów.

Badanie widm pasmowych, zwłaszcza absorpcyjnych, stanowi czułą metodę wykrywania izotopów. Te widma położone w podczerwieni są wysyłane przez drobiny w odróżnieniu od widm prążkowych, których źródłem są atomy. Drobina  $\text{HCl}$  może wirować dookoła osi prostopadłej do linii łączącej jądra; ponadto jądra mogą wykonywać drgania wzdłuż tej linii. Widmo drobinowe tego typu składa się z szeregu prążków rozmieszczonych bardzo gęsto i z pozoru zlewających się w pasma; pasma te jednak można rozdzielić na prążki. Częstość każdego prążka jest sumą częstości oscylacyjnej i częstości rotacyjnej, różnica częstości dwóch sąsiednich prążków równa się  $\sqrt{h/4\pi^2 I}$  gdzie  $I$  jest to moment bezwładności drobiny; badanie widma prowadzi do znajomości  $I$ . Tak np. pasmo absorpcyjne  $\text{HCl}$ , którego  $\lambda = 1,76$  daje się rozdzielić na prążki, z których każdy ma słabego towarzysza odsuniętego w skali długości fal

<sup>1)</sup> Oraz «spinu jądra» — przyp. tłumacza.



# TABLICA II.

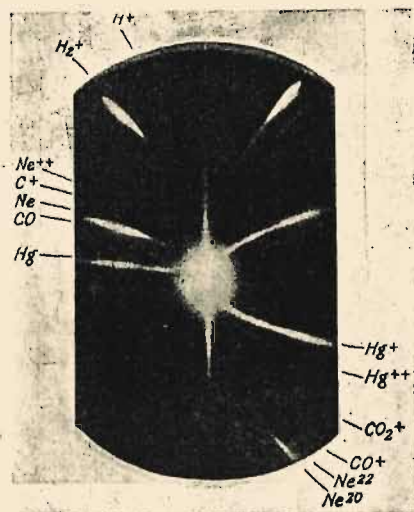


Fig. 1.

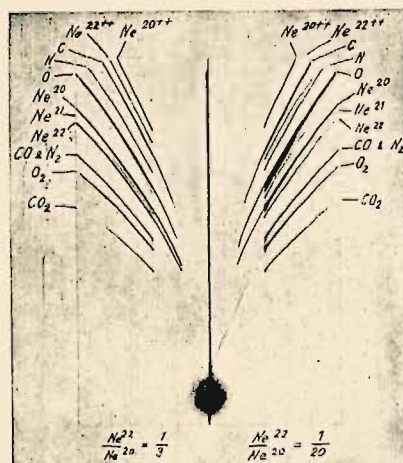


Fig. 2.



Fig. 3.

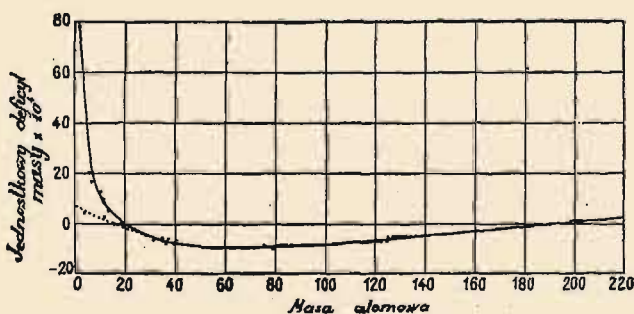
o około  $14 A^0$ , tj.  $8.10^{-4}\lambda$ . To rozdzielenie prążków tłumaczy się różnicą częstości drgań  $HCl_{35}$  i  $HCl_{37}$ ; mniejsza częstość należy do cięższej drobiny.

Dzięki czułości metod optycznych zdołano odkryć nieznane dotąd izotopy, których istnienie zostało później potwierdzone drogą analizy mas. Tak np. wykryto w powietrzu izotop tlenu, którego masa wynosi 18, zawartość zaś jest 600 razy mniejsza niż  $^{16}_8O$ , oraz izotop  $^{17}_8O$  jeszcze rzadszy. Podobnie wykryto izotopy  $^{15}_7N$  i  $^{13}_6C$ . Wreszcie w wodorze stwierdzono istnienie w nader małej ilości izotopu  $^2_1H$  o masie  $2,0135^1$ .

Masy izotopów, których istnienie zostało ujawnione tylko drogą badania widm optycznych, są opatrzone na tablicy 5 Przypisów literami *Sp*.

Ze złożoności tlenu wynika nieznaczna różnica (ok. 0,02%) między ciężarami atomowymi obliczonymi na podstawie  $O = 16$ , oraz ciężarami atomowymi odniesionymi zgodnie ze spektrografią mas do masy izotopu  $^{16}_8O = 16$ .

Energia wiązania jądrowego. Jak to już było zaznaczone, ciężar atomowy wodoru różni się od liczby całkowitej stosunkowo więcej (o ok. 1%) niż ciężary atomowe innych czystych izotopów. Ponieważ analiza mas jest bardzo dokładna, możemy twierdzić, że w innych przypadkach odchylenie od liczby całkowitej nie przekracza 0,1 do 0,01% ciężaru atomowego (obliczonego na podstawie  $^{16}_8O = 16$ ). Stąd wynika, że proton związany w ciężkim jądrze posiada mniejszą masę niż w stanie swobodnym; jest to efekt wiązania (*packing effect*). Nazywamy



Rys. 40.

współczynnikiem wiązania (*packing fraction*) iloraz z odchylenia rzeczywistej masy od najbliższej liczby całkowitej przez tę liczbę, tj. średnie odchylenie obliczone na jedną cząstkę elementarną jądra. Ta wielkość przedstawiona na krzywej Astona (rys. 40), zmniejsza się zrazu szybko wraz ze wzrostem masy, przechodzi przez zero w okolicy  $m = 20$ , osiąga najmniejszą ujemną wartość w okolicy  $m = 60$ , po czym stale wzrasta i przechodzi ponownie przez zero w punkcie  $m = 190$ .

<sup>1)</sup> Urey, Brickwedde, Murphy, Bainbridge.



Efekt wiązania tłumaczymy różnicami wewnętrznej energii jąder atomowych. Stratę energii  $E$  obliczamy za pomocą wzoru Einsteina  $E = \Delta m \cdot c^2$ , gdzie  $\Delta m$  jest to strata masy,  $c$  — prędkość światła. Strata masy jest bardzo duża w przypadku atomu helu traktowanego jako połączenie 4 atomów wodoru. Ponieważ masy atomowe odniesione do  $^{16}_8\text{O} = 16$  wynoszą  $H = 1,00778$  i  $He = 4,0021$ , przeto strata masy na 1 gram helu wynosi  $4 \cdot 1,00778 - 4,00216 = 0,029 \text{ g}$ , na 1 atom helu  $0,029/N$  ( $N = 6,06 \cdot 10^{23}$  jest to liczba Avogadro), wreszcie strata energii atomowej równa się  $0,029 \cdot 9 \cdot 10^{20}/N = 4,3 \cdot 10^{-5}$  ergów lub  $27 \cdot 10^6$  elektronowoltów. Jest to energia większa od energii kinetycznej najszybszych cząstek  $\alpha$ , a zatem od energii wydzielonej w samoistnej przemianie  $\alpha$  atomu promieniotwórczego (§ 69).

Jak wynika z wielkości współczynników wiązania, atomy wszystkich znanych pierwiastków możemy traktować jako połączenie cząstek elementarnych utworzone ze znaczną stratą masy.

Niektórzy uczeni proponowali, aby jako jednostkę masy obrać zamiast masy atomu tlenu, masę atomu helu lub lepiej jądra helu  $He^{++}$ , czyli atomu helu, który utracił dwa towarzyszące mu elektrony.

Każde jądro jest otoczone elektronami pozajądrowymi, których liczba równa się *liczbie atomowej*, czyli liczbie wskazującej miejsce danego pierwiastka w układzie periodycznym. Analiza mas za pomocą promieni dodatnich dotyczy zawsze drobin lub atomów zjonizowanych. Jeżeli chcemy obliczyć masę atomu obojętnego musimy w zasadzie dodać masę oderwanych elektronów; poprawka ta jest zresztą na ogół bez znaczenia. Chcąc obliczyć masę jądra musimy odjąć masę wszystkich elektronów pozajądrowych.

## § 22. Chemiczny ciężar atomowy. Liczba atomowa. Oddzielanie izotopów.

Zdołano wykryć niektóre prawa statystyczne rządzące liczbą i obfitością izotopów. Średni ciężar atomowy wzrasta prawidłowo — jeżeli pominiemy nieliczne wyjątki — wraz z liczbą atomową. Średni ciężar atomowy nazywamy także chemicznym ciężarem atomowym. Jest to wielkość dobrze określona; w istocie stwierdzono, że jest ze znacznym stopniem przybliżenia niezależna od pochodzenia danego pierwiastka i od metody użytej do otrzymania go w stanie czystym. Minerale spotykane w naturze zawierają izotopy każdego pierwiastka w stałym stosunku wzajemnym; ich oddzielenie jest sprawą bardzo trudną. Jest rzeczą prawdopodobną, że izotopy powstały w układzie słonecznym w określonej stałej proporcji.

Dwa pierwiastki należące do tego samego typu chemicznego mogą różnić się ciężarem atomowym, np.  $^{35}_{17}\text{Cl}$  i  $^{37}_{17}\text{Cl}$ ; zdarza się również, że dwa pierwiastki mające jednakowy ciężar atomowy należą do różnych typów chemicznych, np.  $^{40}_{18}\text{Ar}$  i  $^{40}_{20}\text{Ca}$ . Takie pierwiastki nazywamy *izobarami*.

Wiele prac poświęcono oddzielaniu izotopów. Pierwsze próby wykonane z radiopierwiałkami pokazały, że metody chemiczne nie dają nawet częściowego oddzielenia (rozdział XXII). Spośród wielu innych metod opisanych w rozprawach specjalnych na szczególną uwagę zasługują sposoby oparte na własnościach zależnych od masy drobin. Najlepsze wyniki otrzymano dotąd przy użyciu metod opartych na prawie ekwipartycji energii kinetycznej  $\frac{1}{2} m v^2$  drobin. Wistocie z tego prawa wynika, że prędkości  $v$  drobin posiadających różne masy muszą być różne.

Do metod tego typu należy metoda destylacji nieodwracalnej (*Bronsted i Hevesy*). Rtęć ogrzana do  $100^\circ$  paruje w próżni w naczyniu z podwójnymi ściankami; para zawiera nadmiar lżejszych atomów i zostala się na powierzchni pokrywy oziębionej do temperatury ciekłego powietrza. W ten sposób otrzymuje się rtęć, której średni ciężar atomowy jest o 0,1 mniejszy od normalnego; względna zmiana wynosi 5 dziesięciotysięcznych. Ponieważ izotopy mają jednakową objętość atomową, gęstość oddzielonej rtęci jest zmniejszona w tym samym stosunku co ciężar atomowy (§ 142).

W innej metodzie izotopowa mieszanina gazów dyfunduje przez otwór w cienkiej ściance lub przez ścianki rurki z substancji porowatej. Drobin lżejsze dyfundują szybciej, wskutek czego pozostałość wzbogaca się w cięższy składnik. *Harkins* wraz ze współpracownikami poddał dyfuzji w porowatych rurkach 25000 litrów  $HCl$  i otrzymał pozostałość w ilości 3 litrów zawierającą chlor, którego ciężar atomowy wynosił 35,51 zamiast 35,46.

Używane dotąd metody oddzielania izotopów są na ogół mało wydajne w stosunku do włożonej w nie pracy. Wyjątek stanowi wodór, gdyż w tym przypadku względna różnica ciężarów atomowych jest bardzo znaczna. Izotopy wodoru dają się oddzielić za pomocą frakcjonowanej destylacji lub lepiej frakcjonowanej elektrolizy. W niektórych przypadkach zupełne oddzielenie izotopów udaje się za pomocą spektrografu mas, który rozdziela dodatnie jony izotopów na osobne wiązki. W ten sposób zdołano oddzielić w bardzo małych ilościach  ${}^6_3Li$  i  ${}^7_3Li$  oraz  ${}^{39}_{19}K$  i  ${}^{41}_{19}K$ .

---