

torowego i ołowiu zwykłego) dowiodły, że istnieją pierwiastki jednakowe pod względem chemicznym i nierozdzielne zwykłymi metodami analizy chemicznej, które jednak posiadają różne ciężary atomowe («izotopy»). Jeżeli pierwiastki takie są pochodzenia promieniotwórczego, wówczas rozróżnić je możemy na podstawie ich okresów półtrwania albo ich pochodzenia. Jeżeli jednak natrafilibyśmy w przyrodzie na mieszaninę kilku izotopów, to nie moglibyśmy stwierdzić zwykłymi metodami, czy mamy do czynienia z czystym pierwiastkiem czy też z «mieszaniną izotopów». ☒

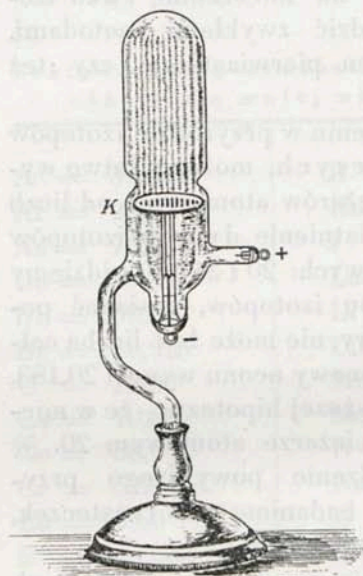
☒ Wychodząc z założenia o istnieniu w przyrodzie izotopów pierwiastków niepromieniotwórczych, możemy łatwo wytłumaczyć odstępstwa niektórych ciężarów atomowych od liczb całkowitych. Jeżeli np. przypuścimy istnienie dwóch izotopów neonu o całkowitych ciężarach atomowych: 20 i 21 to dojdziemy do wniosku, że mieszanina obu izotopów, posiadać powinna «średni» ciężar atomowy, który nie może być liczbą całkowitą. W rzeczywistości ciężar atomowy neonu wynosi 20,183, co dowodzi — z punktu widzenia powyższej hipotezy — że w mieszaninie przeważa ilość izotopu o ciężarze atomowym 20. ☒

☒ Doświadczenia potwierdzenie powyższego przypuszczenia zostało osiągnięte dzięki badaniom mas cząsteczek, zawartych w promieniach «kanalikowych». ☒

☒ *G. Promienie kanalikowe.* Wiemy, że w próżniowych rurkach, w których ciśnienie pozostałego gazu wynosi mniej, niż 0,0001 mm Hg, powstają pod wpływem wyładowań elektrycznych «promienie katodowe», będące strumieniami elektronów, biegnących w kierunku prostopadłym do katody (niezależnie od położenia anody w rurce). Odpowiednikiem promieni «katodowych», unoszących z sobą ładunki ujemne, są promienie «dodatnie», biegnące również od katody, lecz w kierunku odwrotnym. Promienie «dodatnie» zostały wykryte poraz pierwszy przez Goldsteina w r. 1886 dzięki zastosowaniu dziurkowanej katody, przedstawionej na rys. 108. W rurce tej promienie katodowe biegną od katody *K* ku dolnemu końcowi rurki, podczas gdy promienie «dodatnie» przechodzą przez liczne drobne otworki (czyli «kanaliki») katody *K* i biegną w górę. Stąd pochodzi nazwa promieni «kanalikowych». ☒

☒ Zapomocą pomiarów odchylenia promieni «kanalikowych» w polu elektrycznym i magnetycznym udało się oznaczyć

ładunek »właściwy« cząstek dodatnich, tworzących te promienie, czyli stosunek ładunku do masy: $\frac{e}{m}$, — podobnie jak to uczyniono w badaniach nad promieniami katodowymi (por. str. 258). Pomiary te wykazały znaczną różnicę masy cząstek ujemnych i dodatnich. Podczas gdy masa cząstek ujemnych (elektronów) jest bardzo mała (1840 razy mniejsza od masy atomu wodoru), masa cząstek dodatnich jest znacznie większa: należy ona do wielkości tego samego rzędu, co masa atomów materialnych. ☒



Rys. 108.

Rurka katodowa z dziurkowaną katodą, służącą do demonstrowania promieni »kanalikowych« według Goldsteina.

☒ W istocie dalsze badania Goldsteina i innych autorów dowiodły, że ładunki dodatnie promieni kanalikowych przeważnie związane są z materją, a mianowicie z atomami lub cząsteczkami tego gazu, którego resztki znajdują się w badanej rurce katodowej. Odwrotnie więc możemy przez badanie odchylenia promieni »kanalikowych« w polu elektrycznym i magnetycznym oznaczać bezpośrednio masę tych atomów i cząsteczek, które wchodzą w skład badanych promieni. ☒

☒ *H. Metoda Astona.* Metodę tę zastosował poraz pierwszy J. J.

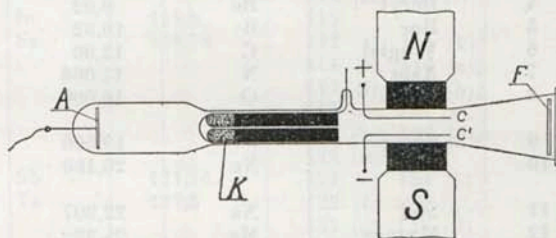
Thomson w r. 1913 do oznaczenia ciężarów atomowych izotopów. Znacznie udoskonalił ją F. W. Aston, który potwierdził w ten sposób słuszność hipotezy Prouta. ☒

☒ Na rys. 109 przedstawiony jest »masowy spektrograf« Astona dawniejszej konstrukcji, który podajemy tu, jako prostszy. Lewa strona przyrządu stanowi nieco zmodyfikowaną »rurkę katodową«, w której *A* oznacza anodę, a *K* — katodę, zaopatrzoną w długi pojedynczy kanał. Promienie kanalikowe gazu, znajdującego się w rurce katodowej, wychodzą z niej przez kanał i ulegają odchyleniu w polu elektrycznym pomiędzy elektrodami *C* i *C'*, jednocześnie zaś ulegają odchyleniu

pod wpływem pola magnetycznego, wywołanego przez bieguny elektromagnesu N i S . Wskutek tego odchylenia, któremu w niejednakowy sposób ulegają atomy o różnych masach, promienie kanalikowe zostają rozszczepione, poczem natrafiają w komorze F na płytę fotograficzną.

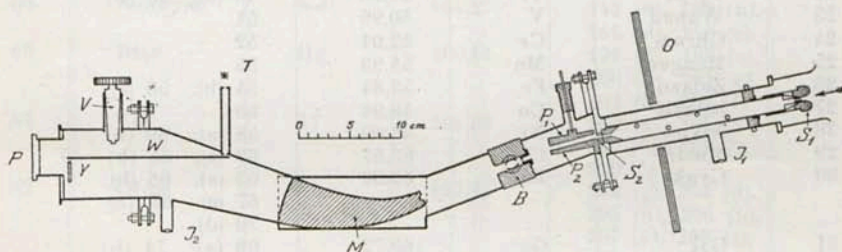
Tutaj otrzymujemy kilka punktów naświetlonych (w rzeczywistości kilka linii podobnych do parabol, ze względu na niejednakową szybkość początkową pojedynczych cząstek), z których każdy odpowiada atomowi, cząsteczce albo rodnikowi o określonej masie. ☒

☒ Do ścisłych oznaczeń ciężarów atomowych różnych izotopów tego samego pierwiastka Aston używał bardziej udoskonalonego przyrządu (przedstawionego na rys. 110), za-



Rys. 109.

Masowy spektrograf Astona w pierwotnej konstrukcji.



Rys. 110.

Udoskonalony »spektrograf masowy« Astona.

pomocą którego można wykonywać pomiary z dokładnością do 0,01%. Na podanym tu rysunku właściwa rurka katodowa znajduje się z prawej strony. S_1 i S_2 oznaczają dwie przepony, oddzielające bardzo wąską wiązkę promieni, które dalej ulegają raz odchyleniu w polu elektrycznym pomiędzy płytami P_1 i P_2 , a następnie powtórnemu odchyleniu w polu magnetycznym M . To ostatnie znajduje się w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny pola elektrycznego (t. zn. prostopadłej do płaszczyzny rysunku). Siła pola magnetycznego jest

Izotopy pierwiastków

Liczba porz.	Pierwiastek	Symbol	Ciężar atomowy	Ciężary atomowe izotopów
1	Wodór	H	1,0078	1,0078 (a), 2,01353 (b).
2	Hel	He	4,002	4
3	Lit	Li	6,940	6 (b), 7 (a)
4	Beryl	Be	9,02	9
5	Bor	B	10,82	10 (b), 11 (a)
6	Węgiel	C	12,00	12
7	Azot	N	14,008	14
8	Tlen	O	16,000	16 (a), 17 (b), 18 (c)
9	Fluor	F	19,000	19
10	Neon	Ne	20,183	20 (a), 21 (c), 22 (b)
11	Sód	Na	22,997	23
12	Magnez	Mg	24,32	24 (a), 25 (b), 26 (c)
13	Glin	Al	26,97	27
14	Krzem	Si	28,06	28 (a), 29 (b), 30 (c)
15	Fosfor	P	31,02	31
16	Siarka	S	32,06	32 (a), 33 (b), 34 (c)
17	Chlor	Cl	35,457	35 (a), 37 (b)
18	Argon	A	39,944	36 (b), 40 (a)
19	Potas	K	39,10	39 (a), 41 (b)
20	Wapń	Ca	40,08	40 (a), 44 (b)
21	Skand	Sc	45,10	45
22	Tytan	Ti	47,90	48 (a), 50 (b)
23	Wanad	V	50,95	51
24	Chrom	Cr	52,01	52
25	Mangan	Mn	54,93	55
26	Żelazo	Fe	55,84	54 (b), 56 (a)
27	Kobalt	Co	58,94	59
28	Nikiel	Ni	58,69	58 (a), 60 (b)
29	Miedź	Cu	63,57	63 (a), 65 (b)
30	Cynk	Zn	65,38	63 (a), 66 (b), 67 (c), 68 (c) 70 (d)
31	Gal	Ga	69,72	69 (a), 71 (b)
32	German	Ge	72,60	70 (c), 72 (b), 74 (a)
33	Arsen	As	74,93	75
34	Selen	Se	79,2	74 (f), 76 (c), 77 (e), 78 (b) 80 (a), 82 (d)
35	Brom	Br	79,916	79 (a), 81 (b)
36	Krypton	Kr	83,7	78 (f), 80 (e) 82 (c), 83 (d), 84 (a), 86 (b)
37	Rubid	Rb	85,44	85 (a), 87 (c)
38	Stront	Sr	87,63	86 (b), 87 (c) 88 (a)
39	Ytr	Y	88,92	89
40	Cyrkon	Zr	91,22	90 (a), 92 (c), 94 (b), 96 (d)
42	Molibden	Mo	96,0	92 (d), 94 (e), 95 (c), 96 (b), 97 (g), 98 (a), 100 (f)

Litery (a, b, c i t. d.) oznaczają stosunkowe ilości izotopów w pierwiastku mieszanym (a — najwięcej, b — mniej, c — jeszcze mniej i t. d.).

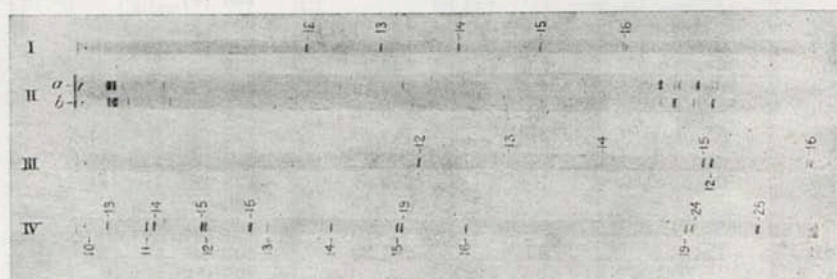
Liczba porz.	Pierwiastek	Symbol	Ciep̄zar atomowy	Ciep̄zary atomowe izotopów
47	Srebro	Ag	107,880	107 (a), 109 (b)
48	Kadm	Cd	112,41	110 (c), 111 (e), 112 (b), 113 (d), 115 (a), 116 (f)
49	Ind	In	114,8	115
50	Cyna	Sn	118,70	112 (i), 114 (k) 115 (l), 116 (c), 117 (f), 118 (b), 119 (e), 120 (a), 121 (h), 122 (g), 124 (d)
51	Antymon	Sb	121,76	121 (a), 123 (b)
52	Telur	Te	127,5	122 (f), 123 (g), 124 (e), 125 (d), 126 (c), 128 (b), 130 (a)
53	Jod	J	126,92	127
54	Ksenon	X	131,3	124 (i), 126 (b), 128 (f), 129 (a), 130 (g), 131 (c), 132 (b), 134 (d), 136 (e)
55	Cez	Cs	132,81	133
56	Bar	Ba	137,36	136 (b), 138 (a)
57	Lantan	La	138,92	139
58	Cer	Ce	140,13	140 (a), 142 (b)
59	Przeodym	Pr	140,92	141
60	Neodym	Nd	144,27	142 (a), 144 (b), 145 (d), 146 (c)
80	Rtęć	Hg	200,61	198 (d), 199 (c), 200 (b), 201 (e), 202 (a), 204 (f)
81	Tal	Tl	204,39	203 (a), 205 (b), 207 (*), 208 (*), 210 (*)
82	Ołów	Pb	207,22	202 (g), 204 (d), 205 (h), 206 (b), 207 (c), 208 (a), 209 (e), 210 (f) 211 (*), 212 (*), 214 (*)
83	Bizmut	Bi	209,00	209 (a), 210 (*), 211 (*), 212 (*), 214 (*)
84	Polon	Po	—	210 (*), 211 (*), 212 (*), 214 (*), 215 (*), 216 (*), 218 (*)
86	Emanacje	Rn, Thn, Acn	222	219 (*), 220 (*), 222 (*)
88	Rad	Ra	225,97	223 (*), 224 (*), 226 (*), 228 (*)
89	Aktyn	Ac	—	227 (*), 228 (*)
90	Tor	Th	232,12	227 (*), 228 (*), 230 (*), 231 (*), 234 (*)
91	Protaktyn	Pa	—	231 (*), 234 (*)
92	Uran	U	238,14	234 (*), 238 (*)

(*) oznacza izotopy promieniotwórcze. ☒

tak uregulowana w stosunku do siły pola elektrycznego, że rozproszenie cząstek o jednakowej masie, wywołane przez różnice ich szybkości początkowych w polu elektrycznym, zostaje skompensowane przez pole magnetyczne, dzięki czemu cząstki o jednakowej masie zbierają się w jednym prążku na płycie fotograficznej, umieszczonej w *W*. ☒

☒ Na rys. 111 wskazaliśmy kilka spektrogramów, otrzymanych przez Astona za pomocą udoskonalonego spektrografu. Na taśmie I widzimy ślady, otrzymane na płycie fotograficznej przez promienie kanalikowe metanu i tlenu, odpowiadające rodnikom: C (12), CH (13), CH₂ (14), CH₃ (15), i CH₄ oraz O (16). Na taśmie drugiej oznaczone są linie bromu i bromowodoru. Na taśmie trzeciej jeszcze raz linie metanu, na czwartej zaś linie fluoru i boru. ☒

☒ Wyniki pomiarów, wykonanych przez Astona i jego współpracowników, początkowo z gazami, następnie zaś roz-



Rys. 111.

Spektrogramy metanu i tlenu (I), Br i HBr (II), CH₄ (III) i F i B (IV) (według Astona).

szerzonych na pary substancji ciekłych i stałych, zawarte są w tablicy 64, podanej na str. 332 i następnej. Z przytoczonych w tej tablicy liczb możemy wyciągnąć następujące wnioski. ☒

☒ 1) Znaczna większość zbadanych dotąd pierwiastków należy do »pierwiastków mieszanych«. Tylko 18 pierwiastków oparło się dotąd próbom rozszczepienia ich na izotopy, a mianowicie: He (2), Be (4), F (9), Na (11), Al (13), P (15), Sc (21), V (23), Mn (25), Co (27), As (33), Y (39), In (49), J (53), Cs (55), La (57), Pr (59) i Bi (38). ☒

☒ 2) Pierwiastki »mieszane« składają się nieraz z bardzo wielkiej ilości izotopów; dotyczy to w szczególności pierwiast-

ków promieniotwórczych. Ale i wśród pierwiastków zwykłych wielką ilością izotopów odznaczają się: cyna, ksenon i rtęć. ☒

☒ 3) Ciężary atomowe poszczególnych izotopów są liczbami całkowitemi, lub raczej są bardzo bliskie liczb całkowitych. Wykazują one jednak pewne wyraźne odchylenia, o których przyczynie wkrótce pomówimy obszerniej. ☒

☒ 4) Stosunek poszczególnych izotopów w pierwiastkach »mieszanych« jest jednakowy we wszystkich minerałach, niezależnie od ich pochodzenia. Wynika stąd, że »średni« ciężar atomowy każdego pierwiastka (t. j. ten ciężar atomowy, który się przejawia w jego związkach chemicznych) jest zawsze jednakowy. Dotyczy to nie tylko minerałów ziemskich, ale także minerałów pochodzenia kosmicznego, t. j. meteorytów. Tylko pierwiastki promieniotwórcze, zarówno jak produkty ich rozpadu (np. ołów) posiadają zmienne ciężary atomowe »średnie«, zależne od ich pochodzenia. ☒

☒ Stałość »średnich« ciężarów atomowych pierwiastków, wskazująca na stały stosunek izotopów nie tylko na ziemi, lecz w ogóle we wszechświecie, nastrocza pewne trudności wytłumaczenia. Należałoby bowiem przypuścić, że niegdyś, podczas powstawania pierwiastków wszystkie pierwiastki stanowiły jedną wspólną masę, w której stężenia pojedynczych izotopów doskonale zostały wyrównane. Inne przypuszczenie, które się tu nasuwa i które wydawać się może prawdopodobniejsze, polega na tem, że izotopy powstawały nie jednocześnie, ale zawsze i wszędzie na podstawie pewnego wspólnego nieznanego dotąd prawa. ☒

☒ 1. *Próby rozszczepienia pierwiastków na izotopy.* Jakkolwiek zwykle fizykochemiczne metody rozdzielania mieszanin nie prowadzą w ogólności do rozdzielania izotopów, to jednak niektóre z nich, a mianowicie te, które są oparte na niejednakowym zachowaniu się składników, posiadających różne masy, doprowadziły do pozytywnych wyników. ☒

☒ Jedną z takich metod opiera się na szybkości dyfuzji gazów i par, która, jak wiadomo, jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z ciężaru cząsteczkowego składników. W rzeczywistości Harkins, Hayes i Milliken rozdzielili zapomocą wielokrotnej dyfuzji chlorowodoru przez porowate ścianki gaz ten na dwie frakcje, z których jedna zawierała nadmiar lżejszego izotopu chloru (35),—pod-

czas gdy cięższa frakcja zawierała nadmiar izotopu Cl_{37} . Ciężar atomowy chloru »naturalnego« wynosi, jak wiemy, 35,457. ☒

☒ Inną metodę rozdziału izotopów stosowali Brönsted i Havesy. Poddali oni rtęć destylacji frakcjonowanej w próżni. Po 18-krotnym powtórzeniu destylacji otrzymali oni frakcje, różniące się pomiędzy sobą gęstością o 0,15%. Odpowiada to różnicy ciężarów atomowych o 0,1. Podobne doświadczenia wykonane zostały przez Havesyego i Lögstrupa w roku 1928 nad potasem. Autorzy stwierdzili w mniej lotnej frakcji nagromadzenie izotopu K_{41} , któremu towarzyszyło równoczesne zwiększenie się promieniotwórczości potasu. Stąd wniosek, że promieniotwórczość potasu (por. str. 288) stanowi cechę właściwą izotopu o ciężarze atomowym $= 41$. ☒

☒ Nadmienić należy tutaj również, że widma izotopów w dziedzinie fal widzialnych i pozafioletkowych wykazują pewne nieznaczne różnice. ☒

☒ *J. Ciężki wodór.* Wodór, ów prapierwiastek, z którego jąder utworzone są, jak to widzieliśmy, jądra wszystkich innych cięższych pierwiastków, uchodził do roku 1932 za pierwiastek »czysty«, t. j. taki, który składał się tylko z jednego izotopu o ciężarze atomowym 1,0078. Urey, Brickwedde i Murphy odkryli poraz pierwszy w widmie resztek, pozostałych od destylacji dużych ilości ciekłego wodoru, prążki charakterystyczne, które przypisali istnieniu izotopu wodoru o ciężarze atomowym bliskim 2. Porównanie natężenia tych prążków z natężeniem prążków widma »naturalnego wodoru« wykazało, że zawartość ciężkiego izotopu w zwykłym wodorze jest bardzo nieznaczna: wynosi ona bowiem zaledwie 1 część na 4000 części zwykłego wodoru. Pomimo tej nieznacznej zawartości udało się »nagromadzić« ciężki wodór zapomocą t. zw. cząstkowej elektrolizy wody. Przemysł chemiczny otrzymuje, jak wiadomo, wielkie ilości wodoru zapomocą elektrolizy wody. Podczas tego procesu wodór »lekki« wydziela się łatwiej (t. j. pod mniejszym napięciem) niż wodór ciężki. W ciągu elektrolizy pozostają więc w wodzie coraz większe ilości ciężkiego wodoru (oczywiście w postaci »ciężkiej wody«). W rzeczywistości Urey dowiódł, że w resztkach wody, pozostałej po wieloletniej elektrolizie, ciężki izotop wodoru gromadzi się w tak znacznych ilościach, że może być wydosobniony zapomocą zwykłej destylacji. ☒

☒ W ten sposób udało się poraz pierwszy rozdzielić pierwiastek naturalny, jakim jest »zwykły« wodór, na jego izotopy: »lekki« wodór o ciężarze atomowym 1,00778 i »ciężki« wodór o ciężarze atomowym 2,01356. W symbolice chemicznej przyjęto oznaczać »lekki« wodór nadal symbolem H, »ciężki« zaś wodór nazwano »deuterem«, nadając mu symbol D. ☒

☒ Wydaje się rzeczą dziwną, że znaleziono ten nowy izotop w pierwiastku tak rozpowszechnionym i tak dawno znanym i badanym, jak wodór. Nasuwa się pytanie, czemu w tym właśnie pierwiastku udało się poraz pierwszy osiągnąć całkowity rozdział izotopów. Nietrudno znaleźć na to pytanie zadowalającą odpowiedź. We wszystkich innych pierwiastkach różnice ciężarów atomowych poszczególnych izotopów wynoszą zaledwie kilka jednostek (por. tabl. 64 na str. 332). Ponieważ jednak ciężary atomowe tych pierwiastków są znaczne, więc »procentowa« różnica bywa zwykle bardzo mała. Dlatego różnice własności izotopów są tak nieznaczne, że ich rozdzielenie jest prawie niemożliwe (o ile będziemy stosowali zwykle metody chemiczne, oparte na różnicy temperatur topnienia, temperatur wrzenia, rozpuszczalności i t. p. cech fizycznych). Natomiast różnica ciężarów atomowych obu izotopów wodoru wynosi 100%! Tem się więc tłumaczy znaczna różnica własności fizycznych i chemicznych obu izotopów wodoru, pozwalająca je całkowicie rozdzielić. ☒

☒ W tablicy 65 podajemy stałe fizykochemiczne wodoru i deuteru. ☒

☒

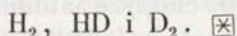
TABLICA 65.

Stale fizykochemiczne wodoru H_2 i deuteru D_2 .

	H_2	D_2
Ciężar atomowy pierwiastka	1,00778	2,01353
Temperatura wrzenia . . .	20,38°K	23,5°K
Temperatura zamarzania . .	13,92°K	18,58°K
Objętość molarna w stanie stałym	26,15 cm ³	23,17 cm ³
Ciepło parowania	183 kal	276 kal
Ciepło topnienia	28 kal	53 kal ☒

☒ Wychodząc z założenia, że istnieją dwa izotopy wodoru atomowego, łatwo wyprowadzić możliwość istnienia trzech izo-

topowych odmian *wodoru cząsteczkowego*, odpowiadających formułkom następującym:



\boxtimes Dotąd zbadane zostały dokładnie tylko dwie odmiany: H_2 i D_2 (których własności podaliśmy w tablicy 65. \boxtimes)

\boxtimes Różnica w zachowaniu się musi się oczywiście przejawiać nie tylko w różnych odmianach wodoru pierwiastkowego ale również we wszystkich związkach, zawierających różne izotopy wodoru. Przejawia się ona przede wszystkim w istnieniu dwóch odmian wody: wody lekkiej H_2O , utworzonej przez lekki izotop wodoru, i wody ciężkiej D_2O , zawierającej ciężki izotop wodoru czyli deuter. Jakkolwiek zawartość »ciężkiej« wody w wodzie »naturalnej« jest bardzo nieznaczna, jednak udało się wyodrębnić ciężką wodę różnymi metodami. \boxtimes

\boxtimes Ogólna metoda rozdzielania izotopów wodoru, polegająca na różnicy szybkości dyfuzji wodoru, stosowana była przez Hertza. Jest ona jednak bardzo kłopotliwa. Druga metoda polega na elektrolizie wody. Podczas elektrolizy wydzielą się bowiem, jak już wspomnieliśmy, łatwiej lekki wodór, niż ciężki. W ten sposób Mac Donald i Lewis otrzymali poraz pierwszy dwa centymetry sześciennego »ciężkiej« wody, zawierającej 99,99% D_2O . Metoda ta jest jednak dość droga. Tańsza natomiast jest metoda, polegająca na oddzieleniu ciężkiej wody przez cząstkową destylację. Stosowana ona była przez Lewisa i Cornisha oraz Ureya. Obecnie »ciężka« woda otrzymuje się technicznie w wielkich ilościach. Koszt jej wynosi około 1 \$ za 1 gram D_2O . \boxtimes

\boxtimes Jakież są własności tego rzadkiego preparatu chemicznego? Przede wszystkim temperatura zamarzania jest znacznie wyższa ($+3,8^\circ$). Wyższa jest też temperatura wrzenia ($101,42^\circ$) i gęstość (1,1066). Inne własności »ciężkiej« wody podane są w tablicy 66 (str. 339). \boxtimes

\boxtimes Wobec różnicy własności fizycznych obu odmian wody jest rzeczą oczywistą, że obie te odmiany posiadać muszą również różne własności chemiczne. W istocie stwierdzono, że szybkość inwersji cukru w ciężkiej wodzie, zawierającej 90% D_2O , jest prawie 4-krotnie większa niż w zwykłej wodzie. Bardzo nieoczekiwany był wynik badań biologicznych, przeprowadzonych z ciężką wodą. Badania te dowiodły, że 100%-owa



TABLICA 66.

Własność	H ₂ O	D ₂ O
Gęstość w 20°C	0,9982	1,1056
Objętość molowa (względ- na)	1	1,0037
Temperatura topnienia . .	0°	+ 3,82°
Temperatura wrzenia . .	100°	101,42°
„ krytyczna . .	374,2°	371,5°
Temperatura maksimum gęstości	4°	11,6°
Molowe ciepło topnienia .	1,436 Kal	1,510 Kal
„ „ parowania .	9,70 Kal	9,96 Kal
Lepkość w 20°	10,09	12,6
Napięcie powierzchniowe .	72,75	67,8
Współczynnik załamania światła D n ₂₀	1,33300	1,32844
Stała dielektryczna . . .	82	80,5
Objętość elementarnego kryształu	131.10 ⁻²⁴ cm ³	128.10 ⁻²⁴ cm ³
Stała siatki krystalicznej lodu: a	4,525 Å	4,505 Å
Stała siatki krystalicznej lodu: c	7,39 Å	7,36 Å
Rozpuszczalność NaCl w 25°	0,359 g/g wody	0,305 g/g wody
„ BaCl ₂ w 25°	0,357 g/g wody	0,289 g/g wody
Ruchliwość jonów K ⁺ . .	64,2	54,5
„ „ Cl ⁻ . .	65,2	55,3



»ciężka« woda jest trucizną dla wyższych organizmów. Niższe organizmy natomiast zachowują w niej zdolność do życia, jakkolwiek rozwój ich zanika. W mieszaninach »lekkiej« i »ciężkiej« wody życie nie zamiera, ale zdolność rozrodcza i szybkość rozwoju zmniejszają się mniej więcej proporcjonalnie do zawartości w nich wody »ciężkiej«. W ogólności badania fizjologiczne nie zostały dotąd posunięte tak dalece, aby można było już myśleć o zastosowaniu tego preparatu w lecznictwie. ⊗

⊗ Jeżeli zważymy, że istnieć może również kilka izotopów

tlenu, mianowicie $^{16}_8\text{O}$, $^{17}_8\text{O}$ i $^{18}_8\text{O}$, to możemy łatwo obliczyć, ile istnieć może »gatunków« wody. Przyjmując pod uwagę, że izotop $^{17}_8\text{O}$ jest nietrwały, otrzymamy następujące sześć izotopowych odmian wody:

$\text{H.H.}^{16}_8\text{O}$	$\text{H.D.}^{16}_8\text{O}$	$\text{D.D.}^{16}_8\text{O}$
woda: lekka	średnia	ciężka (I)
$\text{H.H.}^{18}_8\text{O}$	$\text{H.D.}^{18}_8\text{O}$	$\text{D.D.}^{18}_8\text{O}$
ciężka (II)	cięższa	najcięższa. ☒

☒ Daleko większą rozmaitość izotopowych odmian znajdziemy wśród związków organicznych. A więc należy przypuścić istnienie pięciu odmian izotopowych metanu: CH_4 , CH_3D , CH_2D_2 , CHD_3 i CD_4 . Benzen powinien istnieć w trzynastu odmianach, mianowicie:

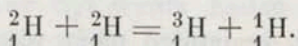
C_6H_6 , $\text{C}_6\text{H}_5\text{D}$, $\text{C}_6\text{H}_4\text{D}_2$ (trzy izomery: orto, meta i para), $\text{C}_6\text{H}_3\text{D}_3$,
(trzy izomery), $\text{C}_6\text{H}_2\text{D}_4$, (3 izomery), C_6HD_5 i CD_6 .

Prawdopodobnie istnieje pewien stan równowagi pomiędzy temi odmianami izotopowymi. ☒

☒ Zaznaczyć należy, że odmiany izotopowe różnią się od siebie nie tylko fizycznymi własnościami lecz również ze względu na zachowanie się chemiczne. W ogólności można stwierdzić, że szybkość reakcyj chemicznych jest znacznie większa dla związków, zawierających lekki wodór, podczas kiedy związki, zbudowane z ciężkiego wodoru, są pod względem chemicznym bardziej »ociężałe«. ☒

☒ Najważniejsze zastosowanie ciężki wodór znalazł w badaniach nad »rozbijaniem atomów«, o których będzie mowa w następnym rozdziale. Ponieważ jądra atomów ciężkiego wodoru (zwane »deutonami«) posiadają dwukrotnie większą masę od protonów, przeto posiadają one wobec jednakowej szybkości dwukrotną ilość energii i mogą wywołać silniejszy efekt podczas zderzeń z jądrami innych atomów. ☒

☒ *K. Trzeci izotop wodoru.* Oliphant, Harteck i Rutherford otrzymali w r. 1934 trzeci izotop wodoru, ^3_1H przez działanie deutoniów na ND_4Cl według następującego równania:



Ciężar atomowy tego izotopu wodoru wynosi 3,0151. Jego zawartość w zwykłej wodzie jest bardzo nieznaczna: wynosi ona

$${}^3_1\text{H} : {}^1_1\text{H} = 1 : 2.10^5.$$

W roku 1934 Dee przeprowadził zapomocą komory Wilsona dowód eksperymentalny istnienia trzeciego izotopu wodoru. ☒

☒ *L. Skład jądra.* Jakkolwiek dotąd próby *syntezy* pierwiastków nie doprowadziły do pożądaných wyników (za wyjątkiem doświadczeń Cockcrofta i Waltona, o których będzie mowa w następnym rozdziale), to jednak na podstawie badań Astona, potwierdzających hipotezę Prouta o całkowitości ciężarów atomowych, a także na podstawie doświadczeń Rutherforda, stwierdzających wydzielanie się protonów podczas rozbijania atomów, — możemy z wielką dozą prawdopodobieństwa uznać, że jądra atomów wszystkich pierwiastków zawierają całkowite ilości jąder wodorowych, czyli protonów. Dawniej przypuszczano, że jądro atomu składa się z pewnej ilości protonów i z pewnej ilości elektronów. Przyjmując to założenie, można łatwo obliczyć, z ilu elementów dodatnich, t. j. protonów i z ilu elementów ujemnych, czyli elektronów składać się powinno jądro danego pierwiastka. Przypuśćmy, że mamy pierwiastek albo izotop, którego ciężar atomowy wyraża się całkowitą liczbą A . Zgodnie z hipotezą Prouta jądro tego pierwiastka zawiera A protonów. Ponieważ zaś każdy proton posiada jednostkę dodatniego ładunku, przeto ładunek jądra powinienby wynosić A jednostek. Z drugiej strony jednak wiemy, że dodatni ładunek jądra równać się powinien liczbie porządkowej pierwiastka Z . Ponieważ A jest zawsze większe od Z (jak to wynika z tablicy ciężarów atomowych, podanej na str. 332), przeto ów nadmiar ładunków dodatnich jądra, wynoszący: $(A - Z)$, musi być zobojętniony przez równą mu liczbę elektronów. Wynika stąd, że jądro atomowe pierwiastka powinno zawierać conajmniej A protonów i jednocześnie $(A - Z)$ elektronów. Trudno jednak było wytłumaczyć, w jaki sposób rozmieszczone są te elementy budowy wewnątrz jądra, jeszcze trudniej zaś było pojąć, w jaki sposób są one ze sobą scementowane. ☒

☒ Odkąd poznano neutrony, jako składniki jądra atomu (str. 316), sprawa budowy jądra została znacznie uproszczona.

Obecnie ogólnie przyjęty jest pogląd, że jądro jest zbudowane tylko z dwóch elementów: z protonów i neutronów. Ponieważ ilość protonów w jądrze równa się liczbie porządkowej pierwiastka Z , suma zaś protonów i neutronów musi wynosić tyleż, ile wynosi ciężar atomowy pierwiastka A , przeto łatwo obliczyć ilość neutronów N w jądrze według następującego równania:

$$N = A - Z.$$

»Izotopy« jednego i tego samego pierwiastka różnią się zatem od siebie tylko ilością neutronów, wchodzących w skład ich jąder,—podczas kiedy ilości protonów są w nich jednakowe. Odwrotnie zaś »izobary« zawierają jednakowe ilości neutronów, różnią się zaś od siebie ilością zawartych w ich jądrach protonów. ☒

☒ Z tablicy 64 (str. 332) wynika, że ciężary atomowe izotopów są zawarte przeważnie w dość wąskich granicach, różnice pomiędzy nimi nie przekraczają bowiem 12 (ksenon, ołów). Stąd można wnioskować, że zarówno nadmiar protonów, jak nadmiar neutronów wpływa szkodliwie na trwałość jąder. Obliczając stosunek $\frac{N}{P}$ dla pierwiastków lekkich (od helu

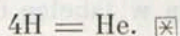
do wapnia z liczbą porządkową 20), przekonywujemy się, że stosunek ten waha się około 1. W wielu pierwiastkach wynosi on ściśle 1 (albo jest nieco więkrszy od 1). W pierwiastkach ciężkich natomiast, zawierających więcej niż 20 protonów w jądrze, stosunek ten bywa zawsze większy od 1. Możemy wytłumaczyć sobie ten fakt w następujący sposób. Wskutek nagromadzenia w jądrze protonów o ładunkach dodatnich zmniejsza się trwałość jądra. Do utrzymania protonów w równowadze i do przezwyciężenia odpychających sił elektrostatycznych między nimi potrzebna jest większa ilość neutronów, niż w jądrach, zawierających małą ilość protonów. Neutrony są więc tym ośrodkiem dielektrycznym, którego obecność osłabia siły elektrostatyczne pomiędzy protonami wewnątrz jądra. ☒

☒ Ze względu na to, że wiele ciężarów atomowych stanowi wielokrotności 4, można przypuścić, że oprócz protonów w skład jąder wchodzi jeszcze jądra helu o podwójnym ładunku dodatnim (»t. zw. heljony«). Na potwierdzenie tego przypuszczenia można przytoczyć fakt, że pierwiastki, których ciężary atomowe są wielokrotnościami 4, bardzo trudno ulegają rozbiciu. ☒

⊗ Porównanie ciężarów atomowych niektórych pierwiastków z ciężarami atomowymi protonu i heljonu prowadzi do ciekawych wniosków, dotyczących energii, która zostaje wydzielana albo pochłaniana wtedy, gdy jądra atomów różnych pierwiastków tworzą się z najprostszych składników. ⊗

⊗ *M. Strata masy.* Wspomnieliśmy już (na str. 335), że nawet ciężary atomowe pojedynczych izotopów nie wyrażają się ściśle liczbami całkowitymi, ale wykazują pewne, zresztą nieznaczne odstępstwa. Początkowo Aston nie zwracał na to uwagi. W miarę udoskonalenia spektrografu masowego wyszło na jaw, że odchylenia te znacznie przewyższają możliwe błędy pomiarów. Uwzględnienie masy elektronów nie może skompensować tych odstępstw, ponieważ masa elektronu, jak wiemy, wynosi mniej niż 0,0005. ⊗

⊗ Jako najprostszy przykład weźmiemy proces powstawania atomów helu z 4-ch jąder wodorowych podług równania



⊗ Uwzględniając ciężary atomowe wodoru (1,0078) i helu (4,0022), możemy napisać następujące równanie mas:

$$4 \cdot 1,0078 = 4,0022 + 0,0290.$$

Stąd wniosek, że podczas kondensacji 4 protonów, prowadzącej do wytworzenia jednego atomu helu, zauważyć się daje »strata masy« wynosząca 0,029. Wiemy zaś, że strata masy musi być skompensowana przez wydzielenie się równoważnej ilości energii, którą obliczyć możemy na podstawie równania Einsteina (por. str. 260):

$$E = m \cdot c^2 = \frac{0,0290 \cdot 10^{20}}{4,2 \cdot 10^7} = 6,2 \cdot 10^{11} \text{ kal.}$$

Jeszcze większą stratę masy otrzymamy oczywiście podczas powstawania cięższych atomów z protonów. Jeżeli np. przypuścimy, że przez kondensację 16 protonów powstaje atom tlenu, którego ciężar atomowy wyraża się liczbą całkowitą: 16,0000, — wówczas strata masy wyniesie:

$$m = 16 \cdot 0,0078 = 0,1248 \text{ g.}$$

Tej stracie masy odpowiada efekt energetyczny, wynoszący:

$$E = m \cdot c^2 = 16 \cdot 0,0078 \cdot 9 \cdot 10^{20} \text{ erg. czyli } 2,6 \cdot 10^{12} \text{ kal.}$$

Są to ilości energii jeszcze większe, niż te, które towarzyszą procesom promieniotwórczym. ⊗

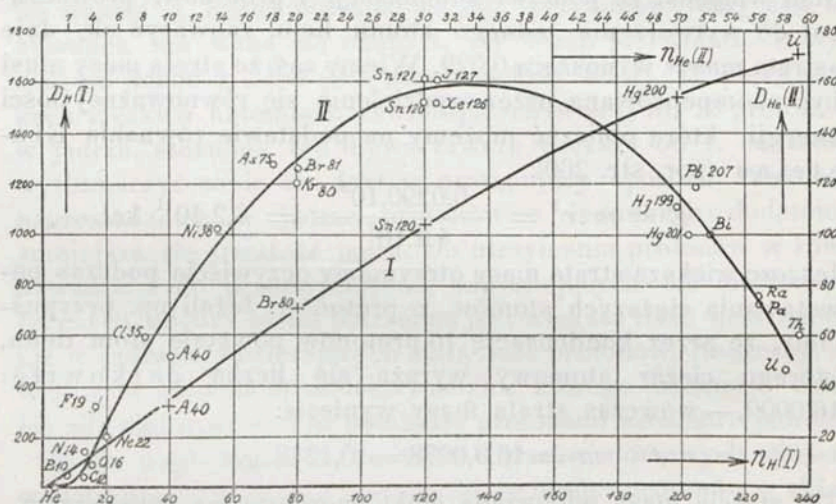
⊗ Na podstawie równania Einsteina o równoważności masy i energii możemy też wytłumaczyć sobie odchylenia ciężarów atomowych pojedynczych izotopów od liczb całkowitych, zakładając, że (nieznaczne) zwiększenie się ciężaru atomowego pierwiastka jest skutkiem pochłaniania energii podczas kondensacji protonów, — odwrotnie zaś (nieznaczne) zmniejszenie się ciężaru atomowego wynika ze straty energii. ⊗

⊗ Zakładając, że atomy wszystkich pierwiastków zbudowane są z odpowiednich ilości protonów, możemy obliczyć »straty masy«, powstałe podczas kondensacji protonów podług prostego równania:

$$m = P \cdot 1,0078 - A,$$

w którym m oznacza stratę masy, P — ilość protonów w jądrze atomowym (obliczoną na podstawie przybliżonego całkowitego ciężaru atomowego danego izotopu), A — rzeczywisty ciężar atomowy danego izotopu. Obliczone w ten sposób wielkości »strat mas« m , podane są w tabelce 67 (str. 345). ⊗

⊗ Z tablicy wynika, że »strata masy« m_1 wzrasta stale w miarę wzrostu ciężaru atomowego, jak to wykazuje krzywa I, podana na załączonym niżej rys. 117. Inaczej przedstawia się ta zależność, jeżeli przypuścimy, że atomy wyżej przytoczonych



Rys. 112.

Zależność straty masy od ciężaru atomowego pierwiastka: I straty masy m_1 , obliczone w założeniu polimeryzacji jąder wodorowych; II straty masy m_2 , obliczone z polimeryzacji jąder helowych.

⊗

TABLICA 67.

Straty mas pewnych izotopów.

Pierwiastek	Liczba porz.	Ciężar atomowy przybliżony	Ciężar atomowy dokładny	m_1 w mg	m_2 w mg
He	2	5	4,0022	29,0	—
Li	3	6	6,012	34,7	5,7
Li	3	7	7,012	42,5	13,5
B	5	10	10,0135	64,3	6,4
C	6	12	12,0036	89,8	2,9
O	8	16	16,0000	124,5	8,6
F	9	19	19,0000	147,8	32,0
Ne	10	20	20,0000	155,2	10,4
Ne	10	22	22,0048	166,4	21,6
Cl	17	35	34,983	289	57,5
Cl	17	37	36,980	308	47,2
A	18	40	39,971	340	50,6
As	33	75	74,934	650	128
Kr	36	80	79,026	696	117
Sn	50	128	119,912	1021	153
Sn	50	121	120,911	1030	161
J	53	127	126,932	1056	158
X	54	126	126,933	1047	149
Hg	80	199	199,016	1532	113
Hg	80	200	200,016	1540	92
Hg	80	201	201,016	1548	100
Bi	83	209	209,02	1606	100
Ra	88	226	225,99	1768	147
Pa	91	231	231,072	1725	74
U	92	238	238,084	1768	59 ⊗

pierwiastków powstają nie z protonów, lecz z jąder helowych (t. j. z cząstek α). Uwzględniając ciężar atomowy helu (4,0022), otrzymamy w tym przypadku następującą stratę masy podczas kondensacji jąder helowych:

$$m_2 = \frac{1}{4} n \cdot 4,0022 - A.$$

Wartości m_2 podane są w ostatniej kolumnie tablicy 67, wykres zaś tych wartości w zależności od ciężarów atomowych pierwiastków oznaczono na rys. 112 liczbą II. ⊗

⊗ *N. Teorja Gamowa.* Z krzywej II, podanej na rys. 117 wynika, że zasób energii atomów różnych pierwiastków początkowo wzrasta, potem osiąga najwyższą (dla $\text{Sn } m_2 = 153$), poczem znów spada. Stąd wniosek, że największą trwałość stosunkową powinny posiadać te pierwiastki, które znajdują się na wierzchołku krzywej II, jak np. cyna (jako najbardziej egzotermiczne). W miarę zaś zmniejszania się lub zwiększania się ciężaru atomowego stopień trwałości pierwiastków powinien się zmniejszać, ponieważ ilość energii, wydzielanej podczas tworzenia się tych atomów z jąder helowych, stale spada. Wniosek ten zgadza się z tem, że zjawiska promieniotwórczości, połączone z rozpadem jąder atomowych, występują dopiero u pierwiastków o wysokim ciężarze atomowym, których liczba porządkowa jest większa od 81. ⊗

⊗ Nie daje się jednak zaprzeczyć, że mechanizm powstawania jąder atomowych z tych cegiełek, które mają stosownie do wyluszczonej tutaj teorii służyć do ich budowy, nasuwa jeszcze ogromne trudności przy ich tłumaczeniu. Wiemy bowiem, że jądra wodorowe, zarówno jak i jądra helowe podczas zbliżania się do sfery działania jądra atomowego ulegają bardzo silnemu odpychaniu, ponieważ posiadają one jednoimienne ładunki dodatnie (jak to wynika z rys. 104 na str. 319). ⊗

⊗ W istocie widzieliśmy na stronie 319 tomu II, że siła odpychająca wzrasta w myśl prawa Coulomba odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości tych cząstek (H lub α) od jądra atomu. Jeżeliby więc prawo odpychania Coulomba działało w całym obszarze, aż do samego środka jądra, wówczas protony i heljony, wchodzące w skład jądra, byłyby gwałtownie odpychane i w razie rozpadu atomu powinnyby być wyrzucane z bardzo wielkimi szybkościami początkowymi. Doświadczenie wykazuje jednak, że tak nie jest: dowodzi ono że cząstki α wylatują z jądra z szybkością początkową $= 0$. Szybkość ta zwiększa się stopniowo w miarę oddalania od środka jądra. Dowodzi to, że energia potencjalna takiej cząstki stale się zmniejsza wraz ze wzrostem odległości, podobnie jak energia potencjalna kamienia, spadającego z wysokości na ziemię. ⊗

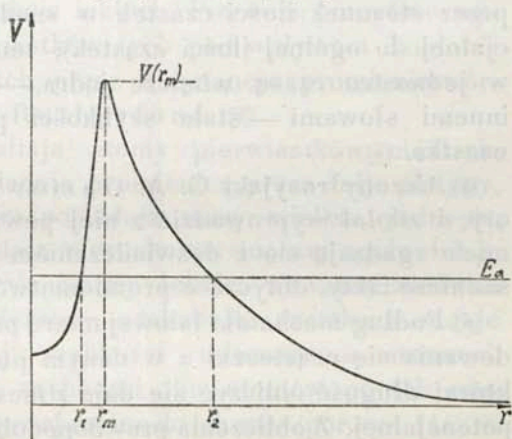
⊗ Wynika stąd, że wewnątrz jądra odpychające siły elektryczne przestają działać i ustępują miejsca siłom odwrotnym, t. j. siłom przyciągania, które mogą być porównane do siły przyciągania kosmicznego. W istocie pomiary odchylenia czą-

stek α w pobliżu jąder atomowych, o których była mowa na str. 319, dowiodły, że w odległościach rzędu 10^{-12} cm prawo Coulomba przestaje działać. Tylko w ten sposób wytłomaczyć sobie możemy, że dodatnie cząstki, z których ma być zbudowane jądro, trzymają się razem i nie rozlatują się. ☒

☒ Przypuszczając istnienie sił przyciągających wewnątrz jądra atomowego, musimy założyć, że w samym środku jądra energia potencjalna musi równać się 0, (podobnie jak energia potencjalna ciała spadającego do środka ziemi równać się powinna 0 w jej środku). W miarę oddalania się cząstki α od środka jądra energia potencjalna będzie wzrastała (podobnie jak wzrasta energia potencjalna kamienia, wyrzuconego w górę) — aż do tego miejsca, w którym natężenie pola grawitacyjnego zanika, powstaje natomiast pole odpychania elektrostatycznego. W tym miejscu energia potencjalna powinna osiągnąć maksimum, poczem wobec dalszego zwiększania się odległości będzie ona stale spadała, stosownie do prawa Coulomba. To maksimum energii potencjalnej powinno więc odpowiadać 10^{-12} cm, t. j. tej odległości, która, jak wiadomo, odpowiada w przybliżeniu wymiarom jądra atomowego. ☒

☒ Poglądowo możemy przedstawić zależność energii potencjalnej cząstki, wylatującej ze środka jądra, od jej odległości zapomocą krzywej, przedstawionej na rys. 113. ☒

☒ Widzimy, że krzywa osiąga najwyższą w punkcie V, odpowiadającym pewnej odległości r_m od środka jądra. Istnieje zatem pewna »barjera energii«, którą musi przebyć każda cząstka, wyrzucana ze środka jądra podczas promieniotwórczego rozpadu atomu. Wylania się tutaj kwestja, w jaki sposób pewna cząstka, posiadająca energję potencjalną E_a (jak



Rys. 113.

Zależność energii potencjalnej cząstki od jej odległości od środka jądra według dzieła Szczeniowskiego i Ziemeckiego: »Promieniowanie i Materja«.

to zaznaczono na rys. 113) i znajdująca się początkowo w odległości r_1 od środka jądra, może opuścić jądro, przeskakując przez »barjerę potencjału« V ? ☒

☒ Odpowiedź na to pytanie możemy znaleźć przez zastosowanie zasad mechaniki falowej. Należy tu zauważyć, że położenie jednej pojedynczej cząstki wewnątrz jądra nie daje się w ogólności ściśle określić; nieokreślona jest również wielkość energii potencjalnej pojedynczej cząstki. Tylko rozważając bardzo wielką ilość cząstek w bardzo wielkiej ilości jąder, możemy mówić o prawdopodobnej wielkości energii potencjalnej pewnej idealnej cząstki i o prawdopodobnym jej położeniu wewnątrz jądra. W ogólności jednak pamiętać winniśmy, że istnieją cząstki o większym i mniejszym zasobie energii potencjalnej. W każdym przypadku istnieje pewne prawdopodobieństwo występowania pewnej ilości cząstek, których energia potencjalna jest większa od V , i które mogą opuścić wnętrze jądra, ulegając elektrostatycznej sile odpychania. Im większe jest tego rodzaju prawdopodobieństwo (mierzone przez stosunek ilości cząstek o »nadmiernej« energii potencjalnej do ogólnej ilości cząstek), tem więcej cząstek opuści w jednostce czasu wnętrze jądra, — tem większa będzie — innymi słowami — stała szybkości przemiany danego pierwiastka. ☒

☒ Uczony rosyjski G. A. Gamow rozwinął głębiej tę teorię i zdołał wyprowadzić z niej pewne wnioski, które znakomicie zgadzają się z doświadczeniem i pięknie objaśniają zasadnicze fakty, dotyczące promieniotwórczości pierwiastków. ☒

☒ Podług mechaniki falowej miarą prawdopodobieństwa znajdowania się cząsteczki α w danym punkcie jest natężenie fali, której długość obliczyć się daje z masy cząsteczki i jej energii potencjalnej. Z obliczenia prawdopodobieństwa przeskoku cząstek α przez »barjerę energii« otrzymujemy zasadnicze prawo promieniotwórczości:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N,$$

w którym N oznacza ilość atomów pierwiastka promieniotwórczego, a λ stałą rozpadu (por. str. 268). Ponieważ dalej wiadomo, że zasięg promieni α jest wprost proporcjonalny do energii cząstek, ta ostatnia zaś jest proporcjonalna do prawdopodobieństwa przeskoku cząstek α przez »barjerę energii«, prze-

to wyprowadzić się daje prosty związek pomiędzy stałą przemiany λ i zasięgiem R wyrzucanych przez dany pierwiastek cząstek α :

$$\log \lambda = a + b \log R,$$

które znalezione zostało na drodze doświadczalnej przez Geigera i Nuttalla (tom II str. 281). ☒

4. PRZEMIANY JĄDROWE.

☒ A. *Wymuszone przemiany pierwiastków lekkich.* W rozdziale poprzednim, omawiając »naturalny« rozpad pierwiastków promieniotwórczych, mieliśmy do czynienia przeważnie z pierwiastkami ciężkimi, których numery porządkowe są większe od 80. Wyjątki od tej reguły stanowią tylko dwa pierwiastki: potas (Nr 19) i rubid (Nr. 37). Samorzutny rozpad pierwiastków lekkich nie został dotąd doświadczalnie stwierdzony. Posiadamy natomiast liczne dowody sztucznie wywołanych przemian pierwiastków lekkich. Pierwsze pomyślne wyniki »transmutacji« pierwiastków tych pod wpływem działania cząstek »alfa«, wyrzucanych przez substancje promieniotwórcze, otrzymał w r. 1918 Rutherford. ☒

☒ Jeżeli cząstki α trafiają atomy pierwiastków ciężkich, jak np. podczas przechodzenia promieni α przez folie platyny, złota i t. p., których jądra posiadają masy wielkie, jądra te, praktycznie biorąc, pozostają nieruchome. Inaczej zgoła dzieje się, gdy cząstki α uderzają atomy lekkie: wówczas zarówno cząstka α , jak i atom uderzony odskakują: cząstka α oddaje wówczas część własnej szybkości uderzonemu atomowi. Podług prawa mechaniki, szybkości obu atomów po ich zderzeniu będą odwrotnie proporcjonalne do ich mas (por. rys. 114). ☒

☒ Jeżeli natomiast cząstka α uderzy np. atom wodoru, którego masa jest 4 razy mniejsza od masy cząstki α , to tor cząstki α zostanie nieznacznie odchyłony, atom wodoru natomiast zostanie gwałtownie odrzucony w bok, jak to uwidocznia fotografia, otrzymana w komorze wilsonowskiej, przedstawiona na rys. 115. W tym przypadku jądro wodoru osiągnie po zderzeniu większą szybkość, niż pierwotna szybkość cząstki α , i oczywiście większy zasięg. W istocie Marsden dowiódł, że cząstki α , biegnące przez wodór lub przez związki wodorowe