

P
T
F

2495

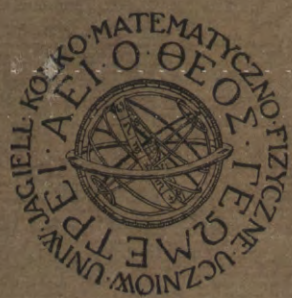
Wskie
Fizyczne

~~2454~~

PROF. DR. LUDWIK BRUNER

EWOLUCYA MATERYI

ZARYS NAUKI O PROMIENIOTWÓRCZOŚCI



KRAKÓW

NAKŁADEM KÓŁKA MATEMATYCZNO-FIZYCZNEGO UCZNIÓW UNIW. JAGIELL.
SKŁADY: G. GEBETHNER I SKA W KRAKOWIE, E. WENDE I SKA W WARSZAWIE.

1909

~~W 2407~~
Warszawskie
Towarzystwo Filozoficzne

EWOLUCYA MATERII

~~Nr 2454~~ Warszawskie
Towarzystwo Filozoficzne

~~Nr 2454~~

PROF. DR. LUDWIK BRUNER

2495

EWOLUCYA MATERYI

ZARYS NAUKI O PROMIENIOTWÓRCZOŚCI



Nr. Lin 3102

KRAKÓW

NAKŁADEM KÓŁKA MATEMATYCZNO-FIZYCZNEGO U. U. J.

1909

29002494000000

Połączone Biblioteki WFIS UW, IFIS PAN i PTF

T.2495



00000100000000



chr. inw. 3102

SKŁADY: G. GEBETHNER I SKA W KRAKOWIE, E. WENDE I SKA W WARSZAWIE.
DRUKARNIA UNIWERSYTETU JAGIELL. POD ZARZĄDEM J. FILIPOWSKIEGO.

PRZEDMOWA.

Książka niniejsza powstała z wykładów wygłoszonych w ciągu jednej godziny półrocza zimowego dla szerszego grona słuchaczy nauk przyrodniczych w Uniwersytecie Jagiellońskim. Na uprzejmą propozycję Kółka matem.-fizycznego U. U. J. by ogłosić te wykłady drukiem, zgodziłem się tym chętniej, że w naszej literaturze brak książki, któraby w sposób treściwy, dostępny a ścisły obznajomić mogła ze współczesnym stanem radiochemii, z metodami badania i rozumowania w tej, tak nowej, a tak już bogatej i doniosłej dziedzinie wiedzy. Posiadamy wprawdzie przekład epokowej tezy doktorskiej pani Skłodowskiej-Curie: »Badania nad ciałami promieniotwórczemi«, ale dzieło to przeznaczone jest przede wszystkim dla specjalistów fizyków i chemików i pochodzi z okresu, poprzedzającego jeszcze tak ważne odkrycia i teorie Rutherforda.

W toku książki, zwracającej się do szerokiego ogółu osób, interesujących się postęпами nauk przyrodniczych, główną uwagę skupiłem na chemicznej stronie nauki o promieniotwórczości, na dokładnem rozpatrzeniu szeregów przemian promieniotwórczych, mniej natomiast poświęciłem

miejsca dociekaniom czysto fizycznym nad własnościami promieniowań.

Wykład faktyczny starałem się uzupełnić pracami nawet najnowszemi. Wzmianki o nich zaopatrzone są w cytaty do rozpraw oryginalnych; natomiast opuściłem odnośniki do tych wszystkich prac, które już uwzględnione są w ostatniem z r. 1907 (niemieckiem) wydaniu klasycznego dzieła Rutherforda: »Radioactivity«. Do dzieła tego odeśłać należy wszystkich, którzy zapragną głębiej zapoznać się z nauką o promieniotwórczości.

Kraków, w lipcu 1909.

Autor.

SPIS RZECZY.

I. Wstęp. Odkrycie zjawisk promieniotwórczych	1
II. Zjawiska przewodzenia elektryczności w gazach	7
Główne prawa jonizacji gazów — 6. Rodzaje jonów, promienie katodowe — 18. Promienie α — 25. Promienie β — 32. Promienie γ — 36.	
III. Rad	38
Otrzymywanie i własności chemiczne radu — 38. Promieniotwórcze własności radu — 43. Własności promieniotwórcze emanacji — 50. Prawa rozkładu ciał promieniotwórczych — 53. Oznaczenie peryodu radu — 60. Produkty rozkładu emanacji radowej — 70. Szybkość wywiązywania helu z radu — 78. Dalsze produkty rozkładu radu. Rad <i>D</i> , Rad <i>E</i> , Rad <i>F</i> . Polon — 79. Koniec i początek szeregu radowego — 85. Uran, Uran X, Jonium — 96.	
IV. Energetyka przemian promieniotwórczych	102
V. Szeregi promieniotwórcze toru i aktynu	111
Tor i jego produkty — 112. Aktyn i jego produkty — 119.	
VI. Rozpowszechnienie radu w przyrodzie	123
Zawartość radu w atmosferze — 125. Zawartość radu w wodach źródłanych — 128. Zawartość radu w skałach — 130. Znaczenie radu dla zjawisk kosmicznych — 132.	
VII. Promieniotwórczość z wyklęch pierwiastków	137

przeważnie angielskich i francuskich, i oto w bardzo krótkim przeciągu lat ośmiu, nauka o promieniotwórczości doprowadziła do ustalenia niezmiernie płodnej i doskonałej teorii, która pozornie nieprzebrany chaos faktów zamieniła na skończoną budowę naukową.

Przypomnijmy w krótkości najważniejsze etapy, które doprowadziły do odkrycia zjawisk promieniotwórczych. W r. 1895 Roentgen odkrywa nie-



Fig. 1.

znane promienie, które odtąd noszą jego miano. Jeżeli przez rurę próżniową (Fig. 1), rozrzedzoną do ok. 0.001 mm, przepuścimy wyładowanie elektryczne, to od katody K rozchodzą się po liniach prostych promienie r , znane już przed Roentgenem, które nazywamy promieniami katodowymi. O istocie tych promieni będziemy mieli jeszcze sposobność mówić w następnym ciągu. Przeciwległa katodzie część rury, na którą padają promienie katodowe, poczyna widocznie fluoryzować, a zarazem te części szkła, fluoryzujące pod wpływem promieni katodowych, stają się źródłem nowego zjawiska, źródłem promieni Roentgena.

Dwie są najważniejsze cechy, które obecność promieni Roentgena się zdradza: 1) na podobieństwo promieni świetlnych wywołują one pewne reakcje chemiczne, a przede wszystkim czernienie klisz fotograficznych, i to nawet wówczas, gdy klisza będzie zasłonięta n. p. papierem, drzewem lub

skórą, co świadczy, że cały szereg ciał lekkich, nieprzeźroczystych dla światła, łatwo przepuszcza promienie Roentgena. 2) Przewodnik naładowany, n. p. naładowany elektroskop, bardzo szybko utraci swój ładunek w powietrzu, przez które przechodzą promienie Roentgena. Powietrze zatem (a również i inne gazy) pod wpływem promieni roentgenowskich przestaje być stosunkowo bardzo dobrym izolatorem i przez to w nim ładunki elektryczne bez straty utrzymać się nie mogą.

Promienie Roentgena, wychodzące z jakiegoś punktu, rozchodzą się po liniach prostych i z tego właśnie powodu nazwano je promieniami.

Wobec tego, że w początkowych doświadczeniach roentgenowskich wywoływano te promienie w zwykłych rurach próżniowych z powierzchni szklanej, przypuszczano pierwiastkowo, że istnieje może związek pomiędzy tymi promieniami a jednocześnie z nimi fluorescencją.

Wiadomo dziś, że promienie Roentgena mogą być wywołane promieniami katodowymi z wszelkiego rodzaju ciał, zgoła nie fluoryzujących, n. p. z metali. Jednak ta błędna myśl o związku między fluorescencją a promieniami Roentgena w r. 1896 skłoniła niedawno zmarłego fizyka francuskiego, Henryka Becquerel'a, do badań nad kwestią, czy ciała, fluoryzujące pod wpływem światła zwykłego, są również źródłem promieni roentgenowskich. Aby kwestyę tę rozstrzygnąć, Becquerel począł badać, czy sole uranu, które posiadają piękną żółto-zieloną fluorescencję, mogą również działać

po dłuższej ekspozycji na zasłoniętą płytkę fotograficzną. Doświadczenie dało wynik dodatni, ale zaraz w dalszym ciągu badań Becquerel stwierdził, że odkryta przezeń własność nie ma nic wspólnego z fluorescencją, gdyż sole uranowe, otrzymane i wykrystalizowane w ciemności, a więc nigdy nie pobudzone do fluorescencji, oraz zgoła nie fluoryzujące związki uranu, jak n. p. tlenek uranu lub sam uran metaliczny również działać mogą na płytkę fotograficzną. Becquerel przekonał się dalej, że badane przezeń promieniowanie jest własnością atomową uranu i nie zależy od rodzaju połączenia, w jakim uran się znajduje. Efekt fotograficzny jest bowiem wprost proporcjonalny do ilości uranu, zawartej w rozmaitych badanych związkach uranu.

Odkrycie tak niespodziewanej własności u jednego z pierwiastków chemicznych pobudziło oczywiście natychmiast do systematycznych prób, czy inne jeszcze ciała posiadają taką samą zdolność. Próby w tym kierunku, przedsiębrane przez panią Skłodowską-Curie nad ogromną liczbą związków chemicznych oraz minerałów, doprowadziły zaraz do odkrycia, że oprócz uranu, również i tor jest pierwiastkiem »promieniotwórczym« i że wśród zbadanych minerałów, promieniotwórczymi okazały się tylko te, które zawierają uran lub tor. Jednak ilościowe badanie własności promieniotwórczych takich minerałów uranowych dało wynik nieoczekiwany — okazało się bowiem, że niektóre z nich, n. p. blenda uranowa z Joachimsthalu w Czechach, lub karnotyt — były silniej promieniotwórcze, aniżeli by

to odpowiadało ilości zawartego w nich uranu. Skoro zaś w czystych solach uranowych siła promieniowania zależy li tylko od ilości uranu, to jako wniosek z tych doświadczeń nasuwała się myśl, że w minerałach uranowych znajduje się jeszcze inny, nieznaný dotąd pierwiastek promieniotwórczy o mocy promieniowania wiele większej niż ta, która właściwą jest uranowi. Myśl ta okazała się słuszną: przez systematyczną przeróbkę chemiczną wielkiej ilości rudy uranowej, przeróbkę, kontrolowaną stałymi pomiarami promieniotwórczości otrzymywanych związków, p. Skłodowskiej-Curie udało się w r. 1898 odkryć i wyodrębnić inny, najsilniejszy i najważniejszy dziś pierwiastek promieniotwórczy, *rad*, który poza promieniotwórczością, wszystkimi własnościami fizycznymi i chemicznymi zbliżony jest do metali ziem alkalicznych, a przede wszystkim do baru.

Oprócz radu w odpadkach rud uranowych, fizyk francuski, p. Debiérne, nieco później odkrył jeszcze jeden pierwiastek promieniotwórczy *aktyn*, który jednak obecny jest tam w ilościach tak minimalnych, że tylko stwierdzić się daje przez swe własności promieniotwórcze i nie mógł być wyosobniony w postaci chemicznie czystej, dostępnej zwykłym metodom chemicznym.

Poszukiwanie, poznawanie i odróżnianie ciał promieniotwórczych wymaga subtelniejszych, a przede wszystkim ściślejszych metod do mierzenia promieniowań, wysyłanych przez ciała promieniotwórcze. Płytką fotograficzną bowiem może wprawdzie

prawie zawsze wskazać nam z wielką czułością, czy ciało jest promieniotwórcze, ale nie może nam podać, ile razy jakieś promieniowanie jest silniejsze od drugiego. Czułe metody mierzenia promieniowania ciał promieniotwórczych możemy atoli oprzeć na tem, że pod wpływem tych promieniowań, podobnie jak pod wpływem promieni Roentgena, gazy stają się przewodnikami elektryczności i przez to ładunki elektryczne, w nich umieszczone, szybko się rozpraszają. Przeważna zatem większość pomiarów nad promieniotwórczością opiera się na pomiarach elektrometrycznych, na pomiarze zmian, jakim ulega ładunek elektryczny, zetknięty z gazem, który przewodzi elektryczność pod wpływem badanego ciała promieniotwórczego. Zanim więc przystąpimy do analizy promieniowania, oraz do charakterystyki szczegółowej ciał i przemian promieniotwórczych, musimy się najpierw zapoznać z najważniejszymi zjawiskami przewodzenia elektryczności w gazach, tem więcej, że niektóre zjawiska, tu się odnoszące, n. p. promienie katodowe, są — jak zobaczymy dalej — pod wielu względami pokrewne promieniowaniom, wysyłanym przez ciała promieniotwórcze.

II.

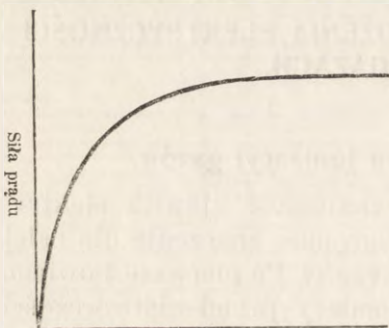
ZJAWISKA PRZEWODZENIA ELEKTRYCZNOŚCI W GAZACH.

Główne prawa jonizacji gazów.

Z dwu względów znajomość zjawisk elektrycznych w gazach ma ogromne znaczenie dla całej nauki o promieniotwórczości. Po pierwsze bowiem, jak wspomnieliśmy, pomiary promieniotwórczości sprowadzają się prawie zawsze do pomiarów elektrometrycznych; powtóre zaś — i co ważniejsza jeszcze — pojęcia, wytworzone przez teorię przewodzenia w gazach, dały się doskonale przystosować do zjawisk promieniotwórczych tak, iż dwie te dziedziny zbudowane są w jednym stylu naukowym. Styl ten jest atomistyczno-kinetyczny: opiera się na hipotezie o nieciągłej, atomistycznej naturze ładunków elektrycznych; przewodzenie zaś elektryczności rozpatruje, jako ruch naładowanych cząstek materialnych — jonów. Zjawiska przewodzenia elektryczności w gazach tłumaczą się więc przez wytworzenie jonów, przez jonizację gazu.

Streścimy pokrótce najważniejsze tu dla nas

zjawiska elektryczne w gazach. Gazy pod zwykłym ciśnieniem ładunków elektrycznych nie przenoszą prawie wcale, a więc w znikomym zaledwie stopniu są zjonizowane. Pod wpływem całego szeregu czynników jednak poczynają przewodzić: jonizują się. Czynnikiem takim jonizującymi są n. p. wysoka temperatura (n. p. w gazach płomieni), promienie



Napięcie
Fig. 2.

Roentgena, promienie wysyłane przez metale naświetlone światłem pozajądowym, wreszcie promieniowanie ciał promieniotwórczych.

Wszystkie te czynniki wywołują w gazach znaczną jonizację tak, iż przez gaz nawet z niewielkim

napięciem n. p. kilkuset woltów przechodzą prądy nieraz do 1 miliampera wynoszące.

Gdy w tak zjonizowanym gazie będziemy badali zależność między napięciem na płytach elektrodowych, a siłą prądu, przepływającego przez gaz i mierzonego n. p. czułym galwanometrem, to przekonamy się, że do przewodzenia w gazach prawo Ohma się nie stosuje: siła prądu nie jest proporcjonalna wprost do napięcia na elektrodach, ale przeciwnie zbliża się do pewnej granicy maksymalnej, której, bez względu na dalszy wzrost napięcia, już nie przekracza. Zależność między siłą

prądu, przechodzącego przez gaz zjonizowany a napięciem, wyobrazić się więc daje krzywą, przedstawioną na rysunku (fig. 2), gdzie na osi odciętych umieszczamy wielkość napięcia, na osi rzędnych zaś — odpowiednie siły prądu. Ów prąd maksymalny »nasycony«, dalej nieprzekroczony, służyć więc może, jako miara jonizacji, wywołanej w gazie.

Jeżeli w gazie równomiernie zjonizowanym w całej swej objętości przez jakiś czynnik jonizujący, n. p. przez promienie Roentgena, oddalać będziemy od siebie płyty elektrod, wówczas okaże się, że prąd nie osłabnie, jakby to miało miejsce u przewodników metalowych lub elektrolitycznych, lecz przeciwnie, wzrośnie i to proporcjonalnie do odległości dzielącej płyty.

Te na pozór zadziwiające stosunki w gazach, zjonizowanych pod zwykłym ciśnieniem, dają się łatwo wyjaśnić z założeń teorii jonizacji. Działalność czynnika jonizującego, n. p. promieni Roentgena, sprawia, że w każdej objętości gazu, n. p. w 1 cm^3 z drobin gazu powstaje w każdej sekundzie pewna liczba jonów, n. p. N zależna li tylko od natury czynnika jonizującego i warunków gazu.

Liczba jonów w gazie nie będzie jednak rosła dowolnie: swobodnie się poruszające jony w miarę, jak powstają, poczynają na nowo znikać, gdyż przez zderzenie się jonów dodatnich z jonami ujemnymi ładunki ich się zobojętniają i powstają znów obojętne elektrycznie drobiny gazu. Liczba jonów R , znikających przez zderzenie jest oczywiście

w każdej sekundzie proporcjonalna do stężenia jonów dodatnich i jonów ujemnych n , czyli mamy

$$R = \alpha \cdot n^2,$$

gdzie α jest współczynnikiem proporcjonalności.

Wkrótce więc w gazie ustanowić się musi stan równowagi i wówczas liczba jonów N , powstających co sekunda będzie równa liczbie znikających przez zderzenie, czyli wówczas

$$N = R = \alpha n^2.$$

Gdy w gazie zjonizowanym wytworzymy między płytami kondensatora pole elektryczne, prąd pocznie przepływać wskutek tego, że jony dodatnie udadzą się ku płycie ujemnej, jony ujemne — ku płycie dodatniej. Liczba jonów w tym razie zmniejsza się nie tylko wskutek wzajemnych zderzeń, lecz również wskutek tego, że jony, są wyrzucane i zobojętniane na elektrodach. Oczywiście, jeżeli użyte pole elektryczne jest tak silne, że zdoła wszystkie, co sekunda utworzone, jony wypchnąć na elektrody, zanim choć część ich zdoła się zderzyć ze sobą i zobojętnić, wówczas w każdej jednostce czasu przeniesiona będzie największa ilość elektryczności, jaka w ogóle w tych warunkach jonizacji przeniesiona być może, i dalsze wzmoczenie pola pozostać musi bez wpływu na siłę prądu, jak też dzieje się w istocie.

Oznaczmy przez S liczbę jonów wydzielanych w 1 cm^3 gazu na 1 cm^2 powierzchni płyt kondensatora, przez l — odległość płyt, przez e —

ładunek elektryczny, znajdujący się na każdym jonie, wówczas siła prądu i na jednostkę powierzchni elektrod będzie równa iloczynowi

$$i = S \cdot l \cdot e \quad (1)$$

$$S = \frac{i}{l \cdot e}$$

Jeżeli pole jest tak silne, że wszystkie jony wytworzone N zużyte są do przewodzenia, wówczas oczywiście

$$N = S,$$

a zatem z (1)

$$N = \frac{i}{l \cdot e}$$

$$i = N \cdot l \cdot e = J \quad (2)$$

Tyle wynosi prąd maksymalny z powierzchni 1 cm²; jeśli powierzchnia płyt kondensatora jest f , prąd będzie oczywiście równy

$$J = N \cdot e \cdot l \cdot f. \quad (2a)$$

A więc teoria wskazuje nam zgodnie z doświadczeniem, że prąd maksymalny w gazie zjonizowanym jest proporcjonalny do odległości płyt i niezależny od wielkości pola. Zarazem skutek proporcjonalności J do N prąd ów maksymalny może nam służyć za miarę N , za miarę liczby jonów wytwarzanych w jednostce czasu przez przyczynę jonizującą.

Gdy pole nie jest dość silne, by wydalić wszystkie jony przed zubożeniem przez zderzenie, wów-

czas część jonów znika przez zderzenie, część zaś przez przewodzenie ku elektrodom i mamy wtedy

$$(3) \quad N = R + S = \alpha n^2 + \frac{i}{le}$$

Jeżeli szybkość przeciętna jonów w polu właśnie rozpatrywanem wynosi U , to prąd w tym polu, gdy liczba jonów jest n , jest

$$i = n \cdot U \cdot e,$$

tyle bowiem wyniesie przeniesiona w jednostce czasu ilość elektryczności. Ztąd mamy

$$n = \frac{i}{eU},$$

co podstawione do wzoru (3), daje

$$N = \alpha \cdot \frac{i^2}{e^2 U^2} + \frac{i}{l \cdot e}$$

$$Nle = \frac{\alpha \cdot i^2 \cdot l}{e \cdot U^2} + i,$$

a że $Nle = J$, czyli prądowi maksymalnemu, otrzymujemy

$$(4) \quad i + \frac{\alpha \cdot i^2 \cdot l}{e \cdot U^2} = J.$$

Równanie to jest właśnie równaniem krzywej na fig. 2; szybkość jonów U możemy uważać za proporcjonalną do natężenia pola, więc linia rzędnych może nam wyobrażać zarówno natężenie pola jak i szybkość jonów.

Wielkości, które wchodzić we wzór (4), dają się obliczyć z całego szeregu rozmaitych doświadczeń

i zgodność liczb, w różny sposób otrzymany, uzasadnia właśnie doniosłość hipotezy jonizacji.

A więc najpierw zakładaliśmy, że każdy jon posiada pewien określony ładunek elektryczny $+e$, lub $-e$. Wielkość tego ładunku wynika między innymi z prawa Faradaya. Aby w elektrolizie n. p. kwasu solnego, siarkowego lub jakiegobądź innego wydzielić 1g wodoru, należy przez roztwór przepuścić 9650 jednostek ładunku elektrycznego. 1g wodoru zajmuje w zwykłych warunkach objętość 11500 cm^3 , a w jednym cm^3 gazu zawiera się, według założeń kinetycznej teorii gazów, $2.75 \cdot 10^{19}$ drobin, czyli wobec dwuatomowych drobin wodoru $5.5 \cdot 10^{19}$ atomów.

Na każdym pojedynczym atomie wodoru zatem, który w roztworze stanowi jon wodorowy, znajduje się ilość elektryczności równa

$$e = \frac{9650}{11500 \cdot 5.5 \cdot 10^{19}} = 1.5 \cdot 10^{-20}$$

jednostek elektromagnetycznych.

W jednostkach elektrostatycznych, które są $3 \cdot 10^{10}$ większe od elektromagnetycznych, i z którymi pospoliciej będziemy tu mieli do czynienia:

$$e = 1.5 \cdot 10^{-20} \cdot 3 \cdot 10^{10} = 4.5 \cdot 10^{-10}$$

Wielkość ładunku e można zmierzyć również bezpośrednio dla jonów gazowych.

Jeżeli wywołamy jonizację w gazie, przesyconym parą wodną, wówczas jony — w pewnych warunkach zaś tylko jony ujemne — stają się

ośrodkami, około których następuje skroplenie pary i wytwarza się mgła.

Chwyciwszy całą mgłę, opadającą w przyrządzie, na izolowaną płytę, połączoną z elektrometrem, możemy zmierzyć jej całkowity ładunek elektryczny; z szybkości opadania mgły możemy obliczyć wielkość składających ją kropelek wilgoci, ztąd zaś i ze znanego ciężaru mgły otrzymujemy liczbę kropelek wilgoci równą liczbie jonów, które były ośrodkami kondensacji. Przez podzielenie więc całkowitego ładunku elektrycznego utworzonej mgły przez liczbę jej cząstek, otrzymamy ładunek elektryczny poszczególnego jonu. Wyniki takich doświadczeń, pomyślanych przez fizyka angielskiego J. J. Thomsona, okazały, że ładunek jonów gazowych jest taki sam, jaki obliczyliśmy dla jonów w elektrolizie i wynosi w jednostkach elektromagnetycznych okrągło $e = \text{ok. } 4 \cdot 10^{-10}$ ¹⁾.

W żadnych zjawiskach elektrycznych jakiegokolwiek bądź rodzaju nie napotykamy mniejszych

¹⁾ Liczby te poprawiono według ostatnich badań Rutherforda, p. *Proceedings Roy Soc.* **81** (A) (1908), 162.

Dawniejsze oznaczenia na wielkość e dawały przeważnie $e = 3 \cdot 4 \cdot 10^{-10}$. W ostatnich czasach badania Rutherforda czynią bardzo prawdopodobnem, że liczba ta, do niedawna powszechnie przyjęta, jest za mała i że prawdziwa wielkość e zbliża się do $4 \cdot 6 \cdot 10^{-10}$. Kwestya ta nie rozstrzygnięta jest ostatecznie — bowiem pomiar e należy do bardzo trudnych doświadczeń. — W niektórych zastosowaniach dla nas nie ma znaczenia, gdyż często wystarczy nam znać stosunek e/m (p. niżej, str. 22), którego wielkość liczbowa nie podlega takim niepewnościom.

ładunków elektrycznych; ta wielkość ładunku e jest więc dla nas istotnym atomem elektryczności: wszelki ładunek elektryczny będziemy uważali za sumę mniejszej lub większej liczby tych ładunków elementarnych.

Ze wzoru zasadniczego na wielkość prądu maksymalnego

$$J = Nel$$

możemy więc obecnie, znając e , l — oraz J , dane przez doświadczenie, obliczać N , t. j. liczbę jonów, wytwarzanych przez rozmaite czynniki jonizujące w 1 cm^3 gazu na sekundę. Liczba N jest wogóle zawsze tylko bardzo drobnym ułamkiem ogólnej liczby drobin gazu. Gdybyśmy n. p. nawet 1 gram czystego radu rozpostarli na płycie kondensatora o kilku cm^2 powierzchni, to liczba jonów N , wytwarzanych w powietrzu wśród płyt kondensatora, wynosiłaby zaledwie około 10^{12} , podczas gdy liczba drobin w 1 cm^3 wynosi okragło $2 \cdot 7 \cdot 10^{19}$. Im słabszy czynnik jonizujący, tem mniejsze oczywiście jest N . Nawet w gazie, nie poddanym specjalnym wpływom jonizującym, ładunki elektryczne, aczkolwiek bardzo wolno, jednak się rozpraszają, a więc i wówczas — może pod wpływem promieniowania ścian przyrządów, oraz śladów ciał promieniotwórczych, zawartych w powietrzu i t. p. — tworzą się jony. Ta »naturalna«, jak się wyrażamy jonizacya gazu, jest bardzo nieznaczna. Wielkość N , która ją charakteryzuje, wynosi od kilku do kilkunastu jonów na sekundę.

Zasady pomiarów promieniotwórczości.

Wielkość prądu maksymalnego J jest proporcjonalna do N , zależnego od mocy czynnika jonizującego, a więc ów prąd maksymalny J możemy brać za miarę tego czynnika jonizującego. We wszystkich pomiarach elektrometrycznych nad ciałami promieniotwórczemi musimy oczywiście używać napięcia wystarczającego, by uzyskać prąd maksymalny. Im większa jonizacja, tem większego potrzeba napięcia, aby osiągnąć prąd maksymalny, dalej już od wzrostu napięcia niezależny. Promieniowanie zbyt silnych preparatów promieniotwórczych osłabia się zwykle w tym celu przez należytą absorpcyę w odpowiedniej grubości płytkach metalowych. Zwykle pomiar ustawia się tak, by napięcie kilkuset woltów mniej więcej wystarczyło do wywołania prądu maksymalnego.

Zwykle prądy, z którymi mamy do czynienia w badaniu promieniowań ciał promieniotwórczych, są zbyt słabe, aby się wygodnie dały mierzyć za pomocą galwanometrów. To też najpospoliciej używamy do tego celu elektrometru, a szybkość, z jaką się nabój elektrometru rozprasza, pozwala nam obliczyć prąd, przebiegający w gazie, zjonizowanym przez ciało promieniotwórcze. Podczas gdy najczulsze i bardzo precyzyjne galwanometry pozwalają mierzyć prądy o sile ok. 10^{-11} Ampera, za pomocą elektrometru możemy bardzo łatwo mierzyć prądy, dochodzące do 10^{-16} Ampera.

Schemat pomiaru promieniowania ciał promieniotwórczych przedstawia się więc wogóle w sposób

następujący (Fig. 3). Elektrometr złączony jest z jedną płytą kondensatora *B*; druga płyta *A*, gdzie umieszczone jest ciało promieniotwórcze, połączona jest z odprowadzoną do ziemi

baterią. Elektrometr ładujemy przez zetknięcie ze stosem suchym lub biegunem baterji akumulatorów, której drugi biegun odprowadzony jest do ziemi. Niechaj pojemność elektrometru, połączonego z płytą kondensatora, wynosi *C*, a niechaj w przeciągu *t* sekund

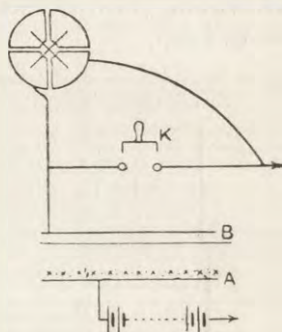


Fig. 3.

potencjał kwadrantów elektrometru wzrośnie z V_0 na V_1 , w takim razie prąd wynosi oczywiście

$$(5) \quad J = \frac{V_1 - V_0}{t} \cdot C,$$

a ztąd, znając powierzchnię *f* i odległość *l* płyt kondensatora, możemy według wzoru

$$J = N \cdot e \cdot l \cdot f$$

wyliczyć liczbę jonów *N*, stwarzanych co sekundę w 1 cm³ powietrza przez ciało promieniotwórcze.

W znakomitej większości przypadków rachunek podobny jest jednak zbyt techniczny, gdyż chodzi zwykle o porównanie siły promieniowania różnych produktów promieniotwórczych. W takim razie wprost stosunek szybkości rozpraszania ładunków $\frac{V_1 - V_0}{t}$

— szybkość tę mierzymy, obserwując o ile podziałek przesuwa się na sekundę zwierciadełko elektrometru — daje nam stosunek mocy promieniowania porównywanych produktów promieniotwórczych.

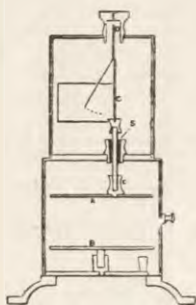


Fig. 4 a

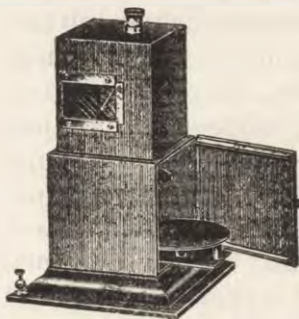


Fig. 4 b

To też w wielu przypadkach, zamiast elektrometrów do pomiarów promieniowania ciał promieniotwórczych, użyć możemy zwykłych elektroskopów listkowych, jak n. p. wyobrażone na fig. 4. Ciało badane umieszcza się na dolnym talerzyku elektroskopu lub też pod skrzynką elektroskopową; szybkość opadania listka elektroskopu obserwuje się z chronometrem przez słaby mikroskop, zaopatrzony w podziałkę na okularze. Elektroskop naładować można chociażby potartą laską laku.

Rodzaje jonów. Promienie katodowe.

Rozpatrzyliśmy powyżej najogólniejsze prawa jonizacji gazów o tyle, o ile one są niezbędne dla

wyjaśnienia pomiarów elektrometrycznych, najpospolitszych w radiochemii.

Specyalne badania nad jonami w gazach, nad ich szybkością w polu elektrycznym, nad dyfuzją jonów i t. d. doprowadziły do głębszej znajomości owych indywidualów. Szybkość jonów jest stosunkowo nieznaczna w porównaniu z szybkością zwykłego prostoliniowego ruchu drobin gazowych i wynosi około 1 do 2 cm na sekundę pod działaniem pola 1 wolta na centymetr odległości. W każdym razie jest to więc szybkość o wiele (ok. 1000 razy) większa od szybkości jonów w roztworach. Szybkość jonu ujemnego jest zawsze nieco większa od szybkości jonu dodatniego: ok. 1·1 do 1·3 razy (zależnie od natury gazu). Stosunkowo niewielka szybkość jonów skłania nas do wniosku, że muszą one posiadać dość znaczną masę. Szczegółowo mechanizm jonizacji wyobrażać sobie więc będziemy w ten sposób, że przez działanie przyczyny jonizującej obojętna drobina gazu utracą elementarny ładunek elektryczny — jak zobaczymy następnie, mianowicie ładunek ujemny — e , i wskutek tego ładuje się dodatnio, podczas gdy ów elementarny nabój elektryczny ujemny, t. zw. *elektron*, jest zatrzymany w innej jakiej drobinie gazu i ładuje się oczywiście ujemnie. Około tak naładowanych drobin skupia się większa lub mniejsza liczba drobin obojętnych — zależnie od ciśnienia gazu, jego wilgotności i t. p. — i tak złożone układy: z naładowanego jądra niejako i z kilkudziesięciu

mniej więcej drobin otaczających, są właśnie rozpatrywanymi przez nas jonami gazowymi.

Tak w najogólniejszych zarysach przedstawiają się zjawiska jonizacji w gazach pod zwykłym ciśnieniem. W miarę, jak zmniejszać będziemy ciśnienie gazu, zjawiska obserwowane będą się zmieniały, a najważniejsze tu dla nas zjawiska wystąpią wówczas, gdy ciśnienie gazu, przez który przesyłamy wyładowanie elektryczne, spadnie do 0·001 mm mniej więcej. W takiej rurze próżniowej napięcie kilku tysięcy woltów wystarcza do przejścia ładunków elektrycznych bez poprzedniej jonizacji jakimś zewnętrznym środkiem jonizacyjnym: zarazem w rurze obserwujemy wychodzące od katody charakterystyczne t. zw. promienie katodowe, które, uderzając o szkło rury, pobudzają je do fluorescencji i wysyłania promieni roentgenowskich. Promienie katodowe, jak wskazuje fig. 1, wychodzą zawsze w kierunku prostopadłym do katody, bez względu na to, w której stronie umieszczona będzie anoda. Oprócz promieni katodowych w rurze próżniowej dostrzedz też możemy inne promieniowanie słabsze: jeżeli katoda jest podziurkowana, to za katodę w tył przechodzą słabiej widoczne promienie, odpychane od bieguna dodatniego, od anody. Promienie te zwiemy promieniami kanalikowymi lub anodowymi.

Jakaż jest istota tych promieni? Rozwiązanie tego zagadnienia miało rozstrzygający wpływ na badanie ciał promieniotwórczych, gdyż tłumaczenie zupełnie analogiczne dało się zastosować do pro-

mieniowań przez te ciała wysyłanych. Z dwu teorii, które przyzywano do wyjaśnienia promieni katodowych, jedna uważała je za zjawiska analogiczne do światła zwykłego. Za impulsy eterowe, druga, rozwijana przeważnie przez fizyków angielskich, rozpatrywała je kinetycznie, jako strumień bardzo szybko pędzących, elektrycznie ujemnie naładowanych, cząstek. Ten drugi pogląd przeważał stanowczo, gdy doświadczeniem udało się zmierzyć i wyliczyć wszystkie poszczególne wielkości wchodzące w skład tej teorii. Dla poznania promieni katodowych w myśl teorii »korpuskularnej« zmierzyć należy ich szybkość, oraz ładunek i masę poszczególnej cząstki. Uczynić to można zapomocą kilku metod. Promienie katodowe, jako ujemnie naładowane cząstki, odchylają się w polu elektrycznym ku biegunowi dodatniemu; jako pędzące cząstki elektryczne zachowują się jak prąd elektryczny i odchylają się również w polu magnetycznym, n. p. wprost za zbliżeniem biegunów silnego magnesu, według znanego prawa Biot-Savarta. Z powodu, że wiązka promieni katodowych, uderzając o przegrodę szklaną n. p., pobudza ją do fluorescencji i w ten sposób daje nam swój obraz, możemy łatwo zmierzyć odchylenie takiej wiązki raz w polu elektrycznym, a następnie w polu magnetycznym, zależnie od natężenia każdego z tych pól. Pomiary te dadzą nam dwa równania między znanym natężeniem pola elektrycznego i magnetycznego a szybkością V , ładunkiem e i masą m cząstki promienia katodowego. Z tych

dwu równań możemy obliczyć V , oraz stosunek e/m . Wielkości te mają bardzo ważne znaczenie, gdyż wszelkie promieniowania natury korpuskularnej charakteryzujemy zawsze przez szybkość wyrzucanej cząstki, znak — dodatni lub ujemny — jej ładunku elektrycznego oraz przez stosunek ładunku do masy e/m , co wobec znanej już nam wielkości ładunku elementarnego, pozwala nam wnioskować o masie cząstki.

Z badań takich, przeprowadzonych nad promieniami katodowymi, wynika, że szybkość ich — zależna zresztą od potencjału, z jakim wyładowanie przechodzi przez rurkę próżniową — wynosi około $\frac{1}{3}$ szybkości światła, t. j. ok. $1 \cdot 10^{10}$ cm na sekundę. Szybkość ta wzrasta ze wzrostem napięcia w rurce próżniowej. Stosunek zaś e/m , o ile promienie katodowe nie posiadają szybkości większej nad 0.9 szybkości światła, pozostaje niezmienny, niezależny od natury gazu znajdującego się w rurce, ani też od materiału elektrody i wynosi wedle najlepszych pomiarów ¹⁾

$$\frac{e}{m} = 1.73 \cdot 10^7.$$

Widzieliśmy wyżej, że dla jonu wodorowego w elektrolitach, jonu, gdzie nabój elementarny znajduje się w najlżejszym znanym atomie, stosunek

¹⁾ p. A. Bucherer. Phys. Zeit. 1908 (755). Do niedawna powszechnie przyjętą wartością dla e/m było $1.86 \cdot 10^7$.

ów e/m wynosi okragło 10^4 . U promieni katodowych stosunek ten jest więc zatem prawie 2000 razy większy. Nieprawdopodobna przypuścić, by ta wielkość była spowodowana przez licznik e , by — jednym słowem — cząstka promienia katodowego posiadała ładunek 2000 razy większy od ładunku zwykłego jonu gazowego: ładunek taki, znajdujący się wtedy na jednym atomie, musiałby się rozpaść na ładunki elementarne. Musimy zatem odwrotnie przyjąć, że w cząstce katodowego promienia masa m jest ok. 2000 razy mniejsza od najmniejszej znanej uprzednio masy, od masy atomu wodoru.

Wynik ten, otrzymany w badaniu promieni katodowych, poraz pierwszy otworzył przed nauką horyzonty dalsze, nie zamknięte pojęciem atomu, który stanowił dotąd ostateczny element w kinetycznym pojmowaniu przyrody. W promieniach katodowych — oraz w innych pokrewnych dziedzinach, n. p. w jonizującym działaniu metali naświetlonych światłem pozafioletowym — mamy do czynienia ze zjawiskami, które się dają konsekwentnie wyjaśnić, zakładając istnienie mas 2000 razy mniejszych od atomu wodoru i powstałych oczywiście przez częściową dezintegrację, rozpad atomu. Ta drobna, naładowana ujemnie cząstka, — *elektron*, jest — jak wskazuje doświadczenie — niezależna od natury ciała, od którego została oderwana, a więc jest ona wspólnym składnikiem wszystkich pierwiastków, które przestają być za-

tem zupełnie odrębnymi, niczem ze sobą niepowiązanymi rodzajami materii.

Wszystkie te początki nowego genetycznego poglądu na całokształt świata materialnego rozwinęły się następnie i wyspecjalizowały w badaniu własności ciał promieniotwórczych.

Te same idee, które się okazały tak płodnymi dla poznania promieni katodowych, zastosowano nieco później do promieni kanalikowych w rurce próżniowej. Tylko strona doświadczalna napotyka w tym razie na więcej trudności, gdyż promienie kanalikowe o wiele słabiej odchylać się dają w elektrycznym, czy w magnetycznym polu. Z pomiarów nad temi odchyleniami obliczono dla promieni kanalikowych, podobnie jak dla promieni katodowych, szybkość V , oraz stosunek dodatniego ich ładunku do masy e/m . Szybkość tych promieni wynosi zwykle tylko około $1/10$ szybkości światła, stosunek zaś e/m zmienia się z naturą gazu, wypełniającego rurę próżniową i równa się ok. 10^3 , ztąd wnioskujemy, że masa tych promieni jest masą zwykłych atomów, obdarzonych dodatnim nabojem elektrycznym.

Mówiliśmy dotąd bez wyszczególnienia o promieniowaniu ciał promieniotwórczych. Bardzo proste doświadczenia wskazać nam mogą, że promieniowanie to nie jest zgoła jednolite i składa się z kilku części o zgoła odmiennych własnościach. Na płytce elektroskopu, jak wyobrażony na fig. 4, umieścimy mały talerzyk z ciałem słabo promieniotwórczym, n. p. z kilku gramami sproszko-

wanej rudy uranowej. Listek elektroskopu opadnie całkowicie w przeciągu 3—4 minut. Nakryjmy obecnie związek promieniotwórczy kawałkiem tektury: szybkość wyładowania elektroskopu zmniejszy się wielokrotnie, listek bardzo wolno opada. Przeważna więc część promieniowania, które wywołuje jonizację gazu, zatrzymuje się bardzo łatwo i jest pochłaniana już przez milimetrową warstwę papieru. Około 99% całej jonizacji, wywołanej przez nienakryty preparat promieniotwórczy, pochodzi właśnie od też łatwo pochłanianego t. zw. promieniowania α .

Gdy jednak w ciemności na kliszy fotograficznej umieścimy rudę uranową bądź wprost, bądź też owinięty w tekturę i po 24 godzinach n. p. wywołamą kliszę, czarna plama obrazu fotograficznego będzie w obu przypadkach prawie jednako: promieniowanie, działające łatwo na płytę fotograficzną, jest więc odmienne i niezależne od promieniowania znacznie jonizującego gazy: jest zarazem o wiele więcej od tamtego przenikliwe.

Szczegółowa analiza promieniowania ciał promieniotwórczych, którą tu dalej obszerniej omówimy, doprowadziła do rozróżnienia trzech zupełnie odmiennych rodzajów promieniowania, przy czym rozmaite ciała promieniotwórcze wysyłają bądź wszystkie trzy rodzaje promieni, bądź też dwa, lub jeden tylko.

Promienie α .

Promienie α są bardzo mało przenikliwe, gdyż zatrzymywane już przez blaszkę glinową o grubo-

ści ok. 0.02 mm. Promienie te składają się z cząstek naładowanych dodatnio — co wynika z kierunku, w którym się odchylają w polu elektrycznym lub magnetycznym; ich

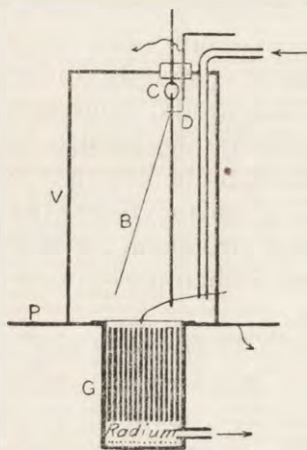


Fig. 5.

szybkość nie jest zawsze jednakowa, lecz jest u różnych ciał promieniotwórczych różna i wynosi od 1.6 do $5.5 \cdot 10^9$ cm na sekundę. Natomiast stosunek ładunku do masy e/m jest stały bez względu na to, z jakiego ciała promieniotwórczego promienie α są wysyłane, i równa się

$$e/m = 5 \cdot 10^8.$$

Z powodu, że promienie α posiadają znaczną masę, wykazać i zmierzyć ich odchylenie w polu elektrycznym, czy magnetycznym, jest rzeczą trudną. Trudności te poraz pierwszy przewyciężył Rutherford, używając przyrządu, wyobrażonego na fig. 5. Pod elektroskopem, zamkniętym bardzo cienką blaszką aluminiową, taką, by jeszcze przepuszczała promienie α , znajduje się pudełko G, gdzie na dnie umieszczony jest preparat promieniotwórczy, a wzdłuż naczynka G umieszczony jest cały szereg gęsto (co $\frac{1}{2}$ —1 mm) ustawionych płytek mosiężnych; przez szczeliny między temi płytkami

promienie α przedostają się do elektroskopu. Gdy pudło G umieścimy między biegunami elektromagnesu lub też między płytami kondensatora, naładowanego do bardzo wysokiego potencjału, promienie się nieznacznie odchylą, a wobec długiej drogi, jaką przebiegają między płytkami metalowymi, już nieznaczne odchylenie wystarczy, by cząstki α uderzyły i zostały pochłonięte w płytkach metalowych i nie mogły się dostać do elektroskopu. Doświadczenie wykonywa się w atmosferze wodoru, wprowadzanego rurką D , gdyż w wodrze cząstki α dłuższą mogą przebiec drogę. Jeśli zmierzmy szybkość wyładowania elektroskopu najpierw bez pola, a następnie z pudłem G , umieszczonym w polu magnetycznym lub elektrycznym, możemy obliczyć, jaka część promieniowania została odchylona.

Charakterystyczny dla wszystkich promieni α stosunek

$$\frac{e}{m} = 5 \cdot 10^3$$

pozwała — z pewnymi zastrzeżeniami — wyprowadzić bardzo ważne wnioski co do natury materjalnej tych promieni. Widzieliśmy, że nawet dla jonu wodorowego stosunek ten jest dwa razy większy i wynosi 10^4 . W promieniach α mamy zatem do czynienia albo z masą dwa razy większą, opatrzoną w elementarny ładunek elektryczny, bowiem skoro

$$e_{/1} = 10^4, \text{ to}$$

$$e_{/2 \cdot 1} = 5 \cdot 10^3,$$

albo też musimy przypuścić, że na każdej cząstce α znajduje się kilka ładunków elementarnych, a wtedy oczywiście zależnie od tego, ile takich ładunków przypuścimy, odmienne otrzymamy masy cząstki α . Jeśli n. p. weźmiemy $e_\alpha = 2e$, to dla masy m_α otrzymamy wartość 4, bo

$$\frac{2e}{4} = \frac{e}{2.1} = 5.10^3.$$

W pierwszym razie, mając masę cząstki $\alpha = 2$, musielibyśmy przypuścić, że składa się ona z drobin wodoru H_2 , nie ma bowiem ani jednego innego ciała prostego lub złożonego, któregoby masa drobinowa (względnie atomowa) wynosiła 2. Wniosek jednak, że cząstki α składają się z dodatnio naładowanych drobin wodoru jest wysoce nieprawdopodobny, choćby z tego powodu, że minerały promieniotwórcze nigdy nie zawierają okudowanego wodoru w większej ilości.

W drugim razie, zakładając e_α równe dwu ładunkom elementarnym, otrzymujemy na masę α cząstki liczbę 4, która jest identyczna z ciężarem atomowym pierwiastku helu, należącego do grupy gazów nieczynnych, znajdujących się w atmosferze ¹⁾.

¹⁾ Grupa gazów nieczynnych obejmuje pierwiastki hel (cięż. atom = 4), neon (c. at. = 20), argon (c. at. = 39.9), krypton (c. at. = 65) i ksenon (c. at. = 128). Z wyjątkiem helu, którego istnienie stwierdzono w atmosferze słonecznej za pomocą analizy widmowej, wszystkie pozostałe gazy odkrył po raz pierwszy w powietrzu Sir William Ramsay między

Wniosek, że cząstki α składają się z atomów helu, opatrzonych zatem dwoma ładunkami elektrycznymi, ma za sobą wiele prawdopodobieństwa. Istotnie bowiem hel towarzyszy zawsze minerałom promieniotwórczym, które okludowanego helu zawierają tem więcej, im bogatsze są w ciała promieniotwórcze. Minerale promieniotwórcze są nawet jedynymi obfitszemi źródłami otrzymywania helu.

Że w promieniach α mamy do czynienia z naładowanymi atomami helu, to w ostatnich czasach ¹⁾ udało się potwierdzić bezpośrednio doświadczeniem, niezależnie od własności elektrycznych promieniowania α . Do bardzo cienkiej rurki kapilarnej, której grubość ścianek wynosi zaledwie około 0.01 mm, wprowadzamy mocne ciało promieniotwórcze, n. p. gaz promieniotwórczy, zwany emanacją radową (p. niżej). Po zalutowaniu, rurkę kapilarną umieszcza się w innej obszerniejszej rurce szklanej, w której uczyniono jak najdoskonalszą próżnię i która połączona jest z rurką do badania widmowego. Przez cienkie ściany rurki kapilarnej cząstki α wskutek swej wielkiej szybkości mogą jeszcze przenikać, natomiast sam hel o atomach nie naładowanych, jak wykazują doświadczenia

r. 1894—1897. Są to ciała nieczynne, które dotąd w żadnych znanych nam warunkach związków tworzyć nie mogą. Ich drobiny są jednoatomowe, w układzie peryodycznym przypadają między silnie elektroujemnymi chlorowcami a elektronajbardziej dodatnimi potasowcami.

¹⁾ Rutheford, Phil. Magazine 17 (1909) 282—286.

kontrolne, nawet przez tak cienkie szkło przedostać się nie może. Po kilku dniach w rurce widmowej występuje wyraźnie charakterystyczne widmo helu: hel zebrać się tu mógł oczywiście jedynie z α cząstek, które utraciły na ścianach zewnętrznych swe ładunki elektryczne. Cząstki α materialnie są więc identyczne z helem¹⁾.

Najistotniejsza część promieniotwórczego działania ciał promieniotwórczych polega więc na tem, że ciała te rozkładają się, wyrzucając z siebie naładowane dodatnio atomy helu. Promieniowanie ciał promieniotwórczych jest rozkładem ich atomów, a jednym ze stałych produktów tego rozkładu jest hel; jakie zaś inne jeszcze ciała powstają przez rozkład ciał promieniotwórczych, zobaczymy w ciągu dalszym, gdy szczegółowiej rozpatrzemy te przemiany.

Widzieliśmy, że cząstki α są bardzo mało przenikliwe; z tego powodu i w powietrzu nawet mogą one przebiec zwykle bardzo tylko niewielką drogę, która nigdy nie wynosi więcej nad 6—8 cm. Im większa jest szybkość cząstek α , tem dalszą oczywiście drogę — w tych zakreślonych granicach — przebiec mogą. Rozmaite więc ciała promienio-

¹⁾ Pojedyncze α cząstki muszą zatem posiadać dwa ładunki elementarne. Wniosek ten potwierdzono istotnie, mierząc z jednej strony całkowitą ilość elektryczności przeniesioną przez cząstki α , z drugiej zaś — liczbę wyrzucanych cząstek α . Jak można zliczyć, ile cząstek α jakieś ciało promieniotwórcze wyrzuca, omówimy szczegółowiej w rozdziale o radzie.

twórcze dadzą się też scharakteryzować przez odległość, do której wyrzucane przez nie cząstki α dolecieć mogą: odległość ta dla różnych ciał promieniotwórczych daje się ściśle oznaczyć i jest zupełnie niezmienna.

Dzielność jonizacyjna, a również i fotograficzna promieni α — gdyż i promienie α działają na płytę fotograficzną, aczkolwiek dopiero po dłuższej eks-

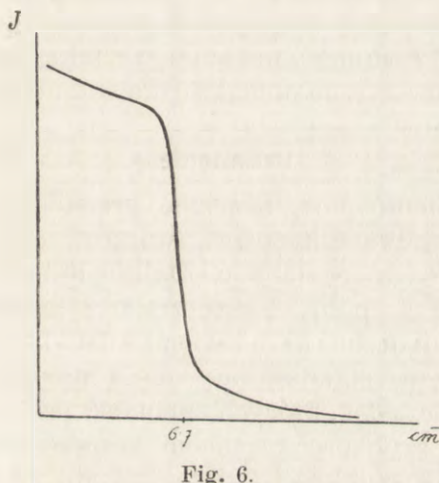


Fig. 6.

pozycji — gwałtownie i odrazu zanika, gdy promienie te przebiegły kilkucentymetrową drogę w powietrzu. Szybkość promieni α zmniejsza się więc wskutek kolizyj z drobinami gazu, a poniżej pewnej granicznej szybkości promienie te już ani działań jonizacyjnych, ani fotograficznych wywieść nie mogą.

Oznaczyć tę graniczną odległość możemy w ten

sposób, że nad preparatem promieniotwórczym, rozpostartym na płycie, zbliżamy kondensator, połączony jak zwykle z elektrometrem i z ziemią, którego dolna płyta zastąpiona jest przez siatkę drucianą — co pozwala cząstkom α wpadać między siatkę a drugi biegun kondensatora. Mierzymy jonizację w różnych odległościach dolnej siatki kondensatora od ciała promieniotwórczego i otrzymujemy wówczas krzywą o następującym w ogóle kształcie. Gwałtowny spadek krzywej w punkcie T , na ryc. 6·7 cm n. p., wskazuje, że taka jest właśnie charakterystyczna odległość rzutu α cząstek w tym przypadku.

Promienie β .

Promienie β są znacznie przenikliwsze, gdyż dopiero kilkumilimetrowa warstwa ołowiu zdoła je całkowicie pochłoniąć. Dają się bardzo łatwo odchyłać w polu elektrycznym i magnetycznym i z doświadczeń nad takimi odchyleniami wnioskujemy, że składają się one z ujemnie naładowanych cząstek, których szybkość jest nieraz większa od szybkości promieni katodowych i zbliża się do 0·9 szybkości światła, t. j. do $2\cdot7\cdot10^{10}$ cm na sek. Dla promieni β , których szybkość nie przekracza 0·1 szybkości światła stosunek e/m jest stały i taki sam jaki mamy w promieniach katodowych $= 1\cdot73\cdot10^7$, a więc mamy i tu do czynienia z cząstkami elektrycznie ujemnymi, których »masa« wynosi ok. $1/2000$ atomu wodoru. Dla szybszych promieni β , wysyłanych n. p. przez preparaty radowe, stosunek e/m maleje i spada trzy-

krotnie n. p. do $0.6 \cdot 10^7$, a więc im szybsze są cząstki β tym masa ich wydaje się mniejsza — elementarny ładunek bowiem zmniejszyć się nie może. Zwiększenie się »masy« szybko pędzących cząstek β pochodzi stąd, że takie cząstki elektryczne, których szybkość nie jest już bardzo drobna wobec szybkości rozchodzenia się fal elektromagnetycznych (światła), okazują bezwładność również wskutek samoindukcji elektrycznej. Przynajmniej część więc »masy« cząstek β jest pozorna, wywołana przez przyczyny elektryczne. Kwestya co do stosunku istotnej i pozornej masy cząstek β , elektronów — jest niezmiernie doniosła, gdyż otwiera perspektywę, że zwykle zjawiska mechaniczne są wywołane przez siły elektromagnetyczne, — dla teorii ciał promieniotwórczych ma jednak ona w tej chwili drugorzędne tylko znaczenie i dla tego poprzestać możemy na tej krótkiej wzmiance. W dalszych rozumowaniach — o ile będą wchodziły promienie β , masę ich prowizorycznie uważać będziemy za masę rzeczywistą, materjalną.

Wskutek tak znacznie mniejszej masy, a więc i mniejszej energii kinetycznej promienie β posiadają daleko słabszą zdolność jonizacyjną, aniżeli promienie α . W jonizacji wywołanej przez ciało promieniotwórcze, wysyłające jednocześnie α i β promienie, na rzecz promieni β wypada zwykle zaledwie 1% całej obserwowanej jonizacji. Natomiast oddziałują bardzo mocno na płytkę foto-

graficzną, i przez to ich działanie badać możemy ciała promieniotwórcze metodą fotograficzną.

Promienie β wysyłane przez ciało promieniotwórcze są zwykle bardzo niejednolite, obdarzone rozmaitemi szybkościami. Jeżeli więc wiązkę takich promieni odchylimy w polu magnetycznym lub elektrycznym, zamiast odchylonej wiązki zobaczymy zwykle całe pasemko: »widmo magnetyczne« promieni β , szybsze bowiem promienie będą mniej — promienie powolne więcej odchylone. Osobliwie niejednolite są n. p. promienie β wysyłane przez rad; stosunkowo dość jednolite są zaś promienie β pochodzące z uranu. Fig. 7 na drugim i trzecim pasemku fotograficznym przedstawia właśnie obraz takiego magnetycznego rozszczepienia wiązki promieni β .



»Widmo magnetyczne« promieni β .

Fig. 7.

Inny sposób stwierdzenia jednolitości lub niejednolitości promieni β polegać może na badaniu ich absorpcyi. Jeśli promienie są jednolite, to absorpcya ich odbywa się według prawa logarytmicznego: jeśli jedna płytka absorbująca przepu-

szeza $1/n$ promieni β , to x płytek przepuści $(1/n)x$ promieni. Gdy promienie są niejednolite, powolne promienie absorbują się najpierw, a pozostają promienie β szybsze, które się trudniej absorbują, więc obliczony współczynnik absorpcji się zmniejsza i promieni przechodzi więcej, niżby powinno według powyższego stosunku potęgowego.

Absorpcya promieni β — podobnie jak absorpcya promieni Roentgenowskich — nie zależy od chemicznej natury, ale prawie wyłącznie od gęstości ciała absorbującego: dla ciał tak rozmaitych jak n. p. drzewo, szkło i platyna jest zawsze jeszcze proporcjonalna do gęstości tych ciał.

Odmierna przenikliwość promieni α i β sprawia, że ciało promieniotwórcze umieszczone n. p. w zwykłej rurce szklanej musi się ładować dodatnio, gdyż ujemnie naładowane promienie β przenikną swobodnie przez cienkie szkło, promienie α zaś będą zatrzymane całkowicie. Doświadczeniem istotnie łatwo to okazać: należy tylko rurkę *A* (fig. 8) z ciałem promieniotwórczym umieścić w rurce *E* bardzo starannie wypróżnionej, a to mianowicie po to, by przez jonizacyę gazu uzyskany ładunek się nie rozpraszał. Preparat promieniotwórczy *A* ładuje się dodatnio, a wskutek tego połączone z nim listki elektroskopowe *C C* odchylają się. Z kilku centygramami

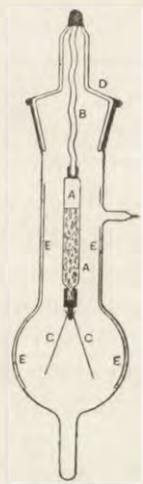


Fig. 8.

czystej soli radowej zupełne rozchylenie listków występuje już po upływie kilkudziesięciu sekund.

Ładunki elektryczne, przenoszone przez promienie α i β , które w tylko co opisanem doświadczeniu ukazane są jakościowo, dają się oczywiście schwyć na odpowiednio izolowany przewodnik, połączony z elektrometrem o znanej pojemności, i przez to zmierzyć dokładnie.

Promienie γ .

Ciała promieniotwórcze wysyłają również bardzo przenikliwe promieniowanie, które dopiero w kilkunastocentymetrowej warstwie ołowiu zupełnie pochłonięte być może. Promieniowanie to jest nieczule na pole elektryczne i magnetyczne i odchyłać się nie daje. Na płytkę fotograficzną działa bardzo silnie. Mamy tu więc zapewne do czynienia z bardzo przenikliwymi, intensywnymi promieniami Roentgenowskimi, których natura nie jest ostatecznie wyświetlona. Według jednych teoryj promienie γ składać się mają z połączonych bliźniaczych elektronów dodatnich i ujemnych i to tłómaczyłoby ich obojętność w polu magnetycznem; według innych — są to nieprawidłowe potężne impulsy elektromagnetyczne w eterze.

Dla teoryi przemian promieniotwórczych promienie γ mają dość małą dotąd doniosłość. Korzysta się z nich nieraz dla oznaczania i mierzenia większych ilości ciał promieniotwórczych, n. p. dla oznaczania ilości radu w dużych bryłach minerałów uranowych. Działanie γ promieni takiej

rudy porównywa się elektroskopowo z działaniem znanego okazu soli radowej.

Promienie γ są niewątpliwie przyczyną opisywanych nieraz uszkodzeń na skórze, jakich doznawali różni badacze, gdy dłuższy czas przy sobie nosili mocne preparaty radowe. Jak wiadomo i mniej intensywne zwykle promienie Roentgenowskie też takie zadrażnienie skóry łatwo wywołują.

III.

R A D.

Otrzymywanie i własności chemiczne radu.

Wspominaliśmy we wstępie, że do odkrycia radu przez p. Skłodowską-Curie doprowadziło spostrzeżenie, iż rudy uranowe okazują silniejszą promieniotwórczość, niżby to odpowiadało ilości zawartego w nich uranu. Wyprowadzono stąd wniosek, że w rudzie uranowej znajdują się inne jeszcze ciała silniej promieniujące aniżeli uran, ale w drobnej tylko ilości. Przez analizę chemiczną, kontrolowaną atoli pomiarami promieniotwórczości, wyodrębniono początkowo dwa ciała nazwane polonem i radem.

Wniosek, że rada uranowa prócz uranu zawiera inne jeszcze ciała promieniotwórcze okazał się słusznym w daleko większym stopniu, niż początkowi badacze tej dziedziny przypuszczać śmieli. Istotnie, rudy uranowe zawierają bardzo wiele rozmaitych ciał promieniotwórczych; lecz dopiero nieco późniejsze badania Rutherforda i innych, opierających się o jego teorię, wyjaśniły wzajemny stosunek i pochodzenie tych wszystkich indywiduów

promieniotwórczych, z których najważniejszym — gdyż może być otrzymany w stosunkowo większych ilościach — jest rad.

Źródłem do otrzymywania radu są zawsze i wyłącznie rudy uranowe. Zobaczymy w dalszym ciągu, że nie możemy się spodziewać znaleźć innego źródła radu, gdyż dwa te ciała: uran i rad są połączone węzłem genetycznym, tak, że pewnej ilości uranu w rudzie odpowiadać musi pewna oznaczona ilość radu.

Do przeróbki na rad najważniejsze znaczenie mają rudy uranowe północno amerykańskie (w stanie Karolina) oraz głównie t. zw. blenda smolista (Pecherz) czeska, spotykana w okolicach Joachimsthal w Czechach. Jestto minerał czarny, twardy o wzorze odpowiadającym U_3O_8 , zawierający po zatem bardzo wiele jeszcze innych ubocznych składników, jakoto, tor, cer, lantan, ołów, bizmut, bar. Ruda ta w Czechach oddawna była przerabiana na związki uranu, które mają zastosowanie do wyrobu szkieł kolorowych żółtych, do malowania na porcelanie i t. p. Pozostają przy tej przeróbce odpadki rad uranowych, które zawierają jeszcze trochę uranu oraz prawie wszystkie uboczne składniki rudy uranowej: w tych odpadkach również zbierają się zawarte w rudzie ciała promieniotwórcze. Te odpadki uranowe — bezwartościowe już dla dalszego otrzymywania uranu — są źródłem, skąd się wyosabnia rad.

Przeróbka tych odpadków z kopalń rządowych w Czechach, stanowi dziś monopol rządu austriya-

ckiego, który odpadków więcej nikomu nie sprzedaje. Przeróbka prowadzi się zwykłymi metodami analizy chemiczno-technicznej i zmierza do rozdzielenia składników zwykłych, zawartych w odpadkach ¹⁾. W biegu analizy wykonywanej w rozmiarach fabrycznych, rad towarzyszy znajdującym się w rudzie solom barowym: w rezultacie przez fabryczną przeróbkę 1 tonny odpadków (co odpowiada 3·3 tonnom rudy pierwotnej) otrzymuje się 2 kg chlorku barowo radowego, o sile promieniotwórczej 300 (w odniesieniu do takiego samego ciężaru uranu przyjętego za jedność). Oddzielenie radu od baru w tym produkcji odbywa się już w laboratorium i polega na cząstkowej krystalizacji; chlorek i bromek radowy bowiem są o wiele trudniej rozpuszczalne w wodzie, niż odpowiednie sole barowe: w pierwszych porcjach wydzielających się kryształów zbiera się zatem przeważnie sól radowa. Zwłaszcza przy użyciu bromków wystarcza 6—8 krotna krystalizacja, by rad oddzielić od baru ²⁾.

¹⁾ Co do szczegółów por. sprawozdanie dyrektorów fabryki uranu w Joachimsthal pp. Haitingera i Ulricha Zeit. für Electrochemie 14 (1908), 619.

²⁾ Przeróbka odpadków uranowych dokonana ostatnio z polecenia rządu austriackiego dała ogółem ok. 3 gr. chlorku radowego. Preparatu tego przeważnie nie oczyszczono aż do czystej soli radowej, lecz poprzestano na sporządzeniu preparatu chlorku baru zawierającego około 7% chlorku radu, do większości bowiem fizycznych i chemicznych badań chemicznie czysta sól radowa nie jest niezbędna, a ostateczne oczyszczenie jest najkłopotliwsze.

Dzięki otrzymaniu znaczniejszych ilości radu, możemy już dzisiaj z całą łatwością określić jego cechy chemiczne. Rad jest pierwiastkiem posiadającym wszystkie istotne cechy pierwiastka grupy ziem alkalicznych, należy więc on do szeregu: wapń, stront, bar, rad. Sole jego są białe, w roztworach bezbarwne, izomorficzne z solami barowemi. Rad tworzy stosunkowo łatwo rozpuszczalne chlorek, bromek, azotan i bardzo trudno rozpuszczalny siarczan. Metalicznego radu nie otrzymano dotąd, gdyż operacje do tego celu prowadzące n. p. elektroliza soli radowej i dystylacja amalgamatu radowego nie dałyby się wykonać bez pewnej straty dziś tak drogiego materiału. Nie może być jednak wątpliwości, że metaliczny rad będzie posiadał te cechy, które wynikają dlań z jego pozycyi w układzie peryodycznym. Przewidzieć można, że będzie to metal o ciężarze właściwym ok. 4, barwie i połysku srebrzystym, który łatwo będzie rozkładał wodę tworząc zasadowy wodorotlenek radowy.

Oznaczenie ciężaru atomowego radu daje się

Znaczne części otrzymanego radu wypożyczano znakomitym badaczom radiochemii: Rutherfordowi, Ramsayowi i in.

Wkrótce powstać ma w Wiedniu specjalny instytut poświęcony wyłącznie badaniom radiologicznym.

Z powodu zakazu sprzedaży odpadków uranowych w Austrii ceny radu niesłychanie podskoczyły w górę. Podczas gdy koło roku 1903—1904 miligram soli radowej kosztował ok. 15 koron, dzisiaj cena za miligram wynosi prawie 400 k.

dziś skutecznie zupełnie łatwo, określając n. p. ilości chloru w chlorku radowym, któremu przypisujemy przez analogię z solami barowymi wzór RaCl_2 . Pomiaru wykonane w r. ubiegłym przez p. Skłodowską-Curie nad najściślej oczyszczonymi próbkami soli radowych dały na rad ciężar atomowy 226.4. Ciężar ten przypada doskonale na odpowiednie miejsce w tablicy peryodycznej pierwiastków.

Sole radowe zabarwiają płomień lampki gazowej na ciemno karminową barwę; barwa ta występuje tylko wtedy, gdy nie jest obecny bar, może zatem służyć również jako kryterium czystości soli radowej. Badany w spektroskopie płomień soli radowej wykazuje charakterystyczne zupełnie swoiste widmo, podobne do widma innych metali ziem alkalicznych. Najwyraźniejsze linie leżą w części niebieskiej i fioletowej: ich długości fali wynoszą 0.46830, 0.43406, 0.38147, 0.36496 μ . Suma wszystkich tych cech nie pozostawia najmniejszej wątpliwości co do pierwiastkowej natury radu.

Nietylko czyste sole radu, ale i mocno zagęszczone preparaty barowo-radowe (n. p. 5%) mocno świecą charakterystycznym blado zielonawym światłem. Światło to jest wywołane przez fluorescencyę substancji soli pod wpływem α i β promieni radu. Podobnie świeci n. p. szkło, w którym znajdują się n. p. gazy promieniotwórcze, o których niżej mówić będziemy.

Promieniotwórcze własności radu.

Teoria rozkładu ciał promieniotwórczych, którą stosujemy dziś do objaśniania wszystkich zjawisk obserwowanych w ciałach promieniotwórczych, nie została początkowo wysnuta z badania promieniotwórczości radu i ciał z nim związanych. Epokowe badania Rutherforda rozpoczęły się pierwotnie nad torem i uranem. Był to historycznie niewątpliwie pomyślny zbieg okoliczności, gdyż zwłaszcza u uranu stosunki te przedstawiają się prościej, aniżeli u radu. Obecnie jednak możemy już od razu przystąpić do rozpatrzenia zjawisk promieniotwórczych radu z punktu widzenia tej teorii.

Jakież więc będą teraz najważniejsze fakty promieniotwórcze, które na słabych nawet preparatach radowych łatwo obserwować możemy? Wymieńmy je kolejno.

1. Preparat radowy dawny — przynajmniej w miesiąc po otrzymaniu — okazuje w dostępnym nam przeciągu lat promieniotwórczość stałą, niezmienną co do natężenia i wydziela ze siebie promienie α , β i γ .

2. Przez kilkogodzinne wyprażenie, łatwiej zaś jeszcze przez rozpuszczenie w wodzie i kilkogodzinne gotowanie, możemy promieniotwórczość preparatu radowego bardzo znacznie osłabić. Preparat tak wygotowany wysyła w pierwszej chwili wyłącznie promienie α i to w ilości, wynoszącej zaledwie około 25% pierwotnego promieniowania α .

Promieni β i γ początkowo nie wysyła zupełnie. Z biegiem czasu jednak promieniotwórczość jego wzrasta i po upływie kilku tygodni powróci do dawnej mocy i składu promieniowania z promieni α , β , γ .

3. Wszelkie ciała, znajdujące się w sąsiedztwie preparatów radowych — zwłaszcza gdy preparaty te są rozpuszczone — stają się również promieniotwórczymi. Ta promieniotwórczość »indukowana« nie zależy zupełnie od natury ciała, w którym jest wywołana, i po usunięciu obecności radu znika w dość krótkim przeciągu czasu.

Fakty 1. i 2. wskazują nam wymownie, że preparat radowy — za którego składnik uważaliśmy wyłącznie rad (wraz z nieczynnym barem) — zawiera niewątpliwie inne jeszcze substancje promieniotwórcze, które można zeń wydzielić zwykłymi sposobami, podobnymi w tym przypadku do tych sposobów, jakich się zawsze używa do wydzielenia gazów rozpuszczonych lub okludowanych. Substancje te jednak nie mogą być domieszkami soli radowej, ale z radu właśnie pochodzą i powstają, gdyż według faktu 2-go preparat, tych substancyj pozbawiony, z biegiem czasu samorzutnie znowu się w nie wzbogaca. Przez rozkład promieniotwórczego radu samorzutnie więc powstają inne ciała, również promieniotwórcze.

Fakt 3. w pierwszej chwili trudniejszy jest do interpretacji. Istotnie możnaby przypuścić, że promieniotwórczość »indukowana« wywołana jest przez to, że promienie ciała promieniotwórczego

powodują pewne zmiany w atomach ciała indukowanego i udzielają mu przez to przejściowej promieniotwórczości. Przeciwno takiej hipotezie przemawia jednak najpierw to, że promieniotwórczość indukowana nie zależy od natury ciała indukowanego, powtóre zaś — że promieniotwórczość indukowana występuje nawet wówczas, gdy roztwór soli radowej od płytki indukowanej odzielimy np. grubą warstwą ołowiu. Rycina 9 przedstawia schemat doświadczeń, wykonanych przez ś. p. Curie.

W *a* znajduje się roztwór soli radowej, promieniotwórczość indukowana w płytce *D*, przegrodzonej od roztworu radu ołowianą płytą *P*

jest nie mniejsza, niż na jednakowych płytkach *A*, *B*, *C*, *E*, umieszczonych swobodnie w rozmaitych miejscach zamkniętego pudła.

Promieniotwórczość indukowana w otoczeniu rozchodzi się więc tak, jak gdyby przenośnikiem jej był jakiś gaz promieniotwórczy, który rozkłada się i osadza pewien osad na ciałach, z którymi się zetknie.

Aczkolwiek już sam Curie doświadczeniami swemi dowiódł, że promieniotwórczość indukowana nie może być wyjaśniona przez żadne zwykłe zjawisko, rozchodzące się promienisto, jednak

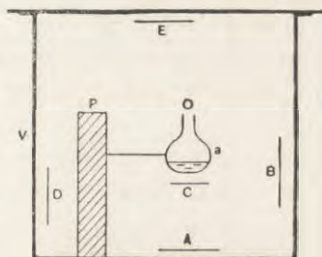
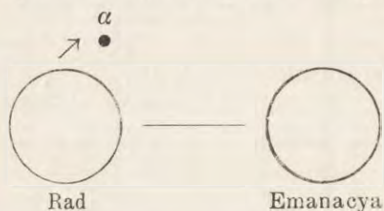


Fig. 9.

nie odważył się uznać materialnej natury tego przenośnika, dostępnego wówczas tylko pomiarom elektrometrycznym. Ośmielił się to uczynić Rutherford i odkrył niezmiernie doniosłe gazy promieniotwórcze, powstające przez rozkład niektórych ciał promieniotwórczych. Gazy te przyjęto nazywać emanacjami, w tym razie więc emanacją radową.

Widzieliśmy, że preparat radowy po wygotowaniu (a więc po usunięciu emanacji) wysyła początkowo li tylko promienie α . Emanacja zatem powstaje z radu przez rozkład radu z wydzielaniem cząstki α : możemy to uzmysłwić wzorem.



Emanacja radowa.

Wskutek otrzymania większych ilości radu, można obecnie uzyskać stosunkowo znaczniejsze, na ułamki mm³ liczące się, ilości emanacji, które więc dostępne będą zwykłym metodom badań fizyczno-chemicznym. Zapomocą samego jednak badania promieniotwórczości, można było okazać i poznać najistotniejsze własności emanacji radowej. Do wykrycia emanacji służyć może np. doświadczenie według schematu następującego (Fig. 10). Strumień powietrza z gazometru przecho-

dzi przez płóczkę *A* i następnie przez rurkę *C*, gdzie znajduje się ciało promieniotwórcze, np. rad.

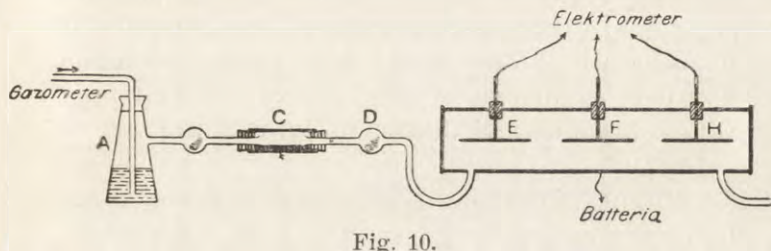


Fig. 10.

W *D* jest korek z waty, który usuwa utworzone w powietrzu jony, oraz zatrzymać może porwane cząstki stałe preparatu. Powietrze wraz z emanacją przechodzi do rury mierniczej metalowej, która połączona jest z baterią akumulatorów i w której znajdują się izolowane elektrody *E*, *F*, *H*, połączone z elektrometrem. Powietrze, zawierające emanację promieniotwórczą, jest zjonizowane i wskutek tego obserwujemy ładowanie się elektrometru przez *E*, *F* lub *H*.

Materyalna natura emanacji może być okazana bardzo łatwo przez skroplenie emanacji. Jeżeli rurkę między *D* a rurą mierniczą zanurzymy do ciekłego powietrza, a więc oziębimy do -180° , elektrometry przestaną się ładować, gdyż emanacja skrapla się w tej niskiej temperaturze. Jeżeli rurkę wyjmemy następnie z ciekłego powietrza i wydmuchamy strumieniem gazu wprost z gazometru do elektroskopu, natychmiast wystąpi ładowanie elektrometru, gdyż emanacja

poczyna się ulatniać i strumień gazu ją porywa. W ten sposób można było zmierzyć temperaturę, jaką ma rurka w chwili, gdy emanacja poczyna się z niej dostrzegalnie ulatniać, oraz naodwrot temperaturę, którą mieć musi rurka oziębiona, aby całą emanację w sobie zatrzymać. Ta temperatura kondensacji dla emanacji radowej wynosi -150° .¹⁾

Własności chemiczne emanacji radowej mogą być np. zbadane w ten sposób, że w doświadczeniu opisanem wyżej między *D* a rurką mierniczą wstawiamy opłuczki lub rury wypełnione różnemi substancjami chemicznemi, których działanie na emanacją wypróbować chcemy. Doświadczenia tak wykonane dowiodły, że emanacja nie zmienia się zupełnie pod działaniem choćby najsilniejszych znanych nam czynników chemicznych. Stężony kwas siarkowy, stężony ług potasowy, fosfor, rozżarzony magnez i t. d., zupełnie na nią nie działają. Wśród wszystkich znanych nam ciał tylko gazy nieczynne grupy argonowej posiadają takie własności: w emanacji radowej mamy zatem gaz promieniotwórczy, należący do grupy jednoatomowych gazów nieczynnych.

Ciężar atomowy emanacji radowej teoretycznie

¹⁾ Dzięki większym ilościom emanacji w ostatnich czasach — Ramsay skroplił ją na ciecz, którą można było obserwować w postaci trwałej, statycznej. Emanacja ciekła jest to według Ramsaya ciecz ciężka o ciężarze właściwym 6·8 (względem wody); fluoryzuje piękną stalowo błękitną barwą. (Z. f. Electr. 14, 1909 (228)).

powiedzieć się daje na 222; skoro bowiem ciężar atomowy radu, jak widzieliśmy, wynosi 226,4, emanacja zaś powstaje z radu przez utratę jednej α cząstki, t. j. naładowanego atomu helu o ciężarze atomowym okrągło 4, więc na ciężar atomowy emanacji pozostaje 222. Oczywiście nawet obecnie ciężar atomowy emanacji nie daje się zmierzyć przez bezpośredni pomiar gęstości, a więc przez pomiar ciężaru i objętości pewnej masy emanacji. W tym razie, jak i u innych emanacji, dostępnych tylko w jeszcze mniejszych ilościach, dla oznaczenia ich gęstości posługujemy się pomiarami nad szybkością dyfuzji emanacji: opieramy się tu na prawie Bunsena, że szybkość dyfuzji dla gazów ma się odwrotnie, jak pierwiastki kwadratowe z ich gęstości. Porównujemy więc np. szybkość dyfuzji bezwodnika węglowego lub pary eteru z szybkością dyfuzji emanacji, której postęp mierzyć możemy elektrometrycznie. Pomiaru takie są wogóle trudne i ze względów eksperymentalnych wymagają szeregu poprawek rachunkowych, to też nie dziwnego, że przez długi czas doświadczenie potwierdzało tylko, iż w emanacji mamy do czynienia z gazem ciężkim, ale na jej ciężar atomowy otrzymywano liczby niezgodne i nieścisłe, wahające się od 80 do 180. Dopiero w ostatnich czasach uczyniono tę metodę dla emanacji radowej o wiele ściślejszą, przez to, że porównano jej gęstość z gęstością gazu niewiele odeń się gęstością różniącego. Mianowicie porównując dyfuzję emanacji z dyfuzją pary rtęciowej, której

ciężar atomowy jest 200, stwierdzono dokładnie, że ciężar atomowy emanacji jest większy od ciężaru atomowego rtęci¹⁾. Zważywszy trudność doświadczenia, wynik ten jest dostatecznie zgodny z teoretycznie przewidywanym, niewątpliwie słusznym, ciężarem atomowym 222.

Widmo emanacji radowej, obserwowane po raz pierwszy w r. 1904, zbadano obecnie o wiele dokładniej: jest ono zupełnie analogiczne do widm innych pierwiastków z grupy argonowej: najwybitniejszymi liniami tego widma są linie o długościach fali: 0·5805 (żółta), 0·5595, 0·4985 μ .

Własności promieniotwórcze emanacji.

Zjawiska promieniotwórcze, obserwowane w emanacji radowej, zmieniają się z biegiem czasu i to w okresach stosunkowo krótkich, łatwo dostępnym doświadczeniu, a więc nadają się doskonale, aby na nich właśnie poznać ogólne zasady i prawa przemiany ciał promieniotwórczych.

Zwróćmy przedewszystkiem uwagę na następujące trzy fakty:

1. Jeżeli powietrze, zawierające emanację, wprowadzimy do szczelnie zamkniętego elektroskopolu i badać będziemy jonizację, wywołaną wówczas prawie wyłącznie przez promienie α — to przekonamy się, że promieniowanie α początkowo bardzo szybko wzrasta i osiąga pewne maximum po upływie 3 godzin, maximum około trzy razy więk-

¹⁾ p. P. B. Perkins. American Journal of Science 25 (1908) 461.

sze od wartości początkowej, poczem zaczyna się zmniejszać, aż po upływie kilku tygodni zanika prawie zupełnie.

2. Jeżeli powietrze, zawierające emanację, zamkniemy w zalutowanej rurce szklanej i mierzyć będziemy promieniotwórczość tak zamkniętej emanacji (i ciał zeń powstałych) — mierzymy zaś w takim razie tylko promienie β i γ , bo promienie α są zaabsorbowane w szkło — wówczas przekonamy się, że promieniowanie β i γ jest początkowo zupełnie nieobecne, pojawia się jednak i wzrasta szybko tak, że po upływie również 3-godzinnym osiąga pewne maximum, od którego

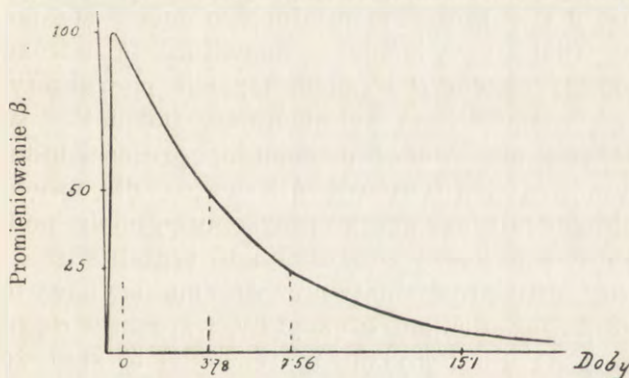


Fig. 11.

począwszy, poczyną spadać w tem samym tempie, w jakim spada również promieniowanie α . (p. fig. 11).

3. Ciała, zanurzone w powietrzu z emanacją przybierają promieniotwórczość, która po wyjęciu

tych ciał z emanacji znika prawie zupełnie w ciągu kilku godzin.

Te zasadnicze fakty wskazują nam niezbicie, że emanacja radowa, ów niewątpliwy gaz grupy argonowej, jest ciałem krótkotrwałem, śmiertelnem, który po upływie kilku tygodni przestaje istnieć zupełnie. Skoro w emanacji nie możemy początkowo dostrzedz promieniowania β , γ , to jasnym jest, że atomy emanacji rozkładają się podobnie, jak rad, wyrzucając z siebie tylko cząstki α , i wytwarzają się wówczas inne ciała promieniotwórcze: te zaś wyrzucają zarówno promienie α — których ilość wzrasta wskutek tego — oraz promienie β i γ , które zatem dopiero mogą się pojawić. Ciała te właśnie — nazwijmy je odrazu radem *A*, radem *B* i radem *C*; ich charakterystyką i własnościami zajmiemy się później — są przyczyną tak zwanej promieniotwórczości indukowanej; są one bardzo krótkotrwałe, dla swego zupełnego bowiem zaniku potrzebują godzin, podczas gdy emanacja zużywa na to tygodnie.

Gdy więc promieniotwórczość emanacji, czy to mierzona promieniami α , czy β i γ , wzrasta w ciągu pierwszych kilku godzin, to pochodzi to stąd, że z niej wytwarzają się nowe ciała promieniotwórcze. Po kilku godzinach ustanawia się jednak »równowaga« promieniotwórcza, równowaga statystyczna, gdzie w każdej jednostce czasu rozkłada się np. tyleż atomów radu *A*, ile ich tworzy się przez rozkład emanacji. Wówczas rad *A* oraz inne znajdować się już muszą w ilości ściśle propor-

cyonalnej do ilości emanacyi i ilość ich zmieniać się może tylko w miarę ubywania samej emanacyi, przyczem proporcjonalność pozostaje jednak ciągle niezmieniona. To też otrzymamy to samo tempo zanikania, czy będziemy obserwowali je zapomocą promieni α , do których przyczynia się również sama emanacya, czy np. zapomocą promieni β i γ , których emanacya nie wydziela i które pochodzą od jednego z jej produktów, tak zw. radu C (p. niżej).

Zanikanie emanacyi odbywa się zupełnie ściśle wedle fundamentalnego prawa, które bez wyjątku kieruje wszelkimi przemianami ciał promieniotwórczych. Dopiero poznanie tego prawa w całej rozciągłości przez Rutherforda pozwoliło opanować i wyjaśnić poprzednio często obserwowane, ale zupełnie nierozumiane zmiany w dzielności promieniotwórczej rozmaitych preparatów promieniotwórczych. Rozkład ciał promieniotwórczych odbywa się zawsze w ten sposób, że liczba atomów, która się rozkłada w jednostce czasu (sekundzie), jest zawsze proporcjonalna do całkowitej liczby atomów tego ciała, w tej chwili się znajdujących. We wzorze więc oznaczywszy przez n liczbę atomów, mamy

$$-\frac{dn}{dt} = \lambda n,$$

To równanie różniczkowe możemy bardzo łatwo zcałkować w zupełnie określonej postaci, zakła-

dając np., że w czasie $t = 0$, ilość ciała promieniotwórczego była np. N_0 . Otrzymamy wówczas

$$n_t = N_0 e^{-\lambda t}$$

albo w postaci logarytmicznej

$$\lambda = \frac{1}{t} \ln \frac{N_0}{n_t} \quad (1)$$

gdzie λ jest pewną stałą, charakterystyczną wielkością, którą tu podobnie, jak w chemii teoretycznej przyjęto nazywać współczynnikiem szybkości. Do liczb N_0 i n_t t. j. do ilości ciała promieniotwórczego w różnych momentach jest oczywiście proporcjonalna jonizacja przez nie wywołana, a więc i maksymalna siła prądu obserwowana w elektrometrze. Podstawiawszy więc zamiast N_0 i n_t odpowiednie siły prądu J_0 i i_t , otrzymamy

$$i_t = J_0 e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = \frac{1}{t} \ln \frac{J_0}{i_t}$$

Podobny przebieg szybkości zjawiska nazywamy przebiegiem logarytmicznym: w ten sposób przebiega bardzo wiele reakcyi chemicznych, np. rozpuszczanie się ciał stałych, rozkład arsenowodoru na arsen i wodór, inwersya cukru trzcinowego — wogóle wszystkie te reakcyje, w których bierze udział tylko jeden rodzaj drobin.

Ze wzoru łatwo dostrzedz, że gdy okresy czasu tworzą szereg arytmetyczny, odpowiednie ilości

rozłożonego ciała promieniotwórczego tworzą szereg geometryczny. Jeżeli n. p. w pewnym przeciągu czasu t ilość ciała promieniotwórczego spadła do połowy np., to w ciągu czasu $2t$ spadnie do $(\frac{1}{2})^2 =$ t. j. do $\frac{1}{4}$, w przeciągu $3t$ do $(\frac{1}{2})^3$ t. j. do $\frac{1}{8}$ itd. Zawsze, by z pewnej ilości ciała promieniotwórczego pozostała tylko połowa, trzeba będzie okresu czasu t , bez względu na to, ile ciała promieniotwórczego było na początku okresu.

W chemii dla charakterystyki przebiegu reakcyi przyjęto z pomiarów dokonanych w rozmaitych okresach czasu oznaczać wedle wzoru (1) wielkość λ . Wielkość tę oznacza się również w ten sam sposób dla przemian ciał promieniotwórczych, ale jako wynik ostateczny przyjęto zamiast λ , obrachowywać czas potrzebny do rozkładu połowy uważanego właśnie ciała promieniotwórczego. Znając więc λ , kładziemy $n_t = N_0/2$ i mamy wówczas ze wzoru

$$t_{N/2} = T = \frac{1}{\lambda} \ln 2.$$

Ten sposób przedstawienia wyników ma zaletę większej jasności i lepiej przemawia do wyobraźni, niż liczba oderwana λ . Ów okres czasu potrzebny do zamiany połowy ciała promieniotwórczego będziemy nadal nazywali peryodem tego ciała.

Oczywiście, aby np. ciało promieniotwórcze znikło do $\frac{1}{1000}$ części, t. j. praktycznie biorąc aż do nieznaczących śladów, na to potrzeba będzie — skoro:

$$\frac{1}{1024} = \left(\frac{1}{2}\right)^{10}$$

okresu czasu dziesięćkroć dłuższego, niż wynosi peryod tego ciała.

Rozpatrzyliśmy prawa, według których rozkłada się ciało promieniotwórcze, n. p. emanacya,

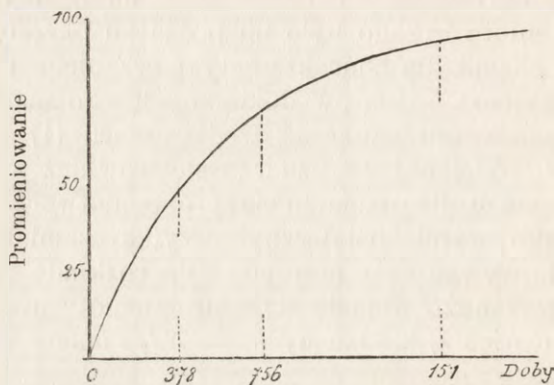


Fig. 12.

usunięte od swego ciała macierzystego, w tym razie od radu. Łatwo dostrzedz, że wzór, według którego narastać będzie takie ciało z swego ciała macierzystego, które je wytwarza ze stałą szybkością, — wzór ten będzie dopełnieniem wyprowadzonego wyżej wzoru (1) na str. 54, i krzywa narastania będzie symetryczna do krzywej zanikania. Wyobraźmy sobie, że w preparacie radowym wygotowanym, z którego więc usunięto emanacyę oraz rad *A*, rad *B* i rad *C*, badamy w elektro-

skopie narastanie promieniowania β . Po kilkogodzinnym przeciągu, gdy już rad A , rad B , rad C ustawi się w równowadze z emanacją, promieniowanie β jest miarą tworzącej się emanacji. Otrzymamy wówczas krzywą, jak na fig. 12; krzywa ta jest dokładnie odwróceniem krzywej na str. 51.

Wzór narastania możemy łatwo wyprowadzić. Niechaj liczba atomów radu będzie N , i przypuśćmy, że w porównaniu z rozkładem emanacji rozkład radu jest na tyle powolny, iż liczbę jego atomów można w tym przeciągu czasu uznać za niezmienną. Wtedy też szybkość rozkładu radu jest niezmienna. Niechaj się na sekundę rozkłada q atomów radu: tyleż więc atomów emanacji musi się tworzyć. Niechaj po upływie czasu t zebrało się n_t atomów emanacji: w każdej jednostce czasu rozkłada się emanacji $dn = \lambda n_t$.

Przyrost emanacji w tym momencie czasu wynosi zatem

$$\frac{dn}{dt} = q - \lambda n_t$$

Całka tego wzoru, wobec tego, że dla czasu $t = 0$ i $n = 0$, a dla $t = \infty$, n osiąga pewną wielkość maksymalną N_∞ , przedstawi się jako

$$n = N_\infty (1 - e^{-\lambda t}).$$

Wzór ten odpowiada właśnie krzywej, wyrysowanej na ryc. 12.

Od reakcyj, rozpatrywanych w chemii drobin, w chemii zwykłej, przebieg przemian promienio-

twórczych różni się przedewszystkiem pod jednym bardzo ważnym względem, który właśnie pomiarom rozkładów promieniotwórczych osobliwą daje doniosłość. Podczas gdy szybkość reakcyj chemicznych może być nader łatwo zmieniana w rozmaity sposób — np. już podwyższenie temperatury o 10^0 zwykle podwaja wielkość współczynnika λ — szybkość rozkładu ciał promieniotwórczych okazała się dotąd absolutnie niezależna od wszelkich zmian warunków nam dostępnych¹⁾. Oziębienie do temperatury ciekłego powietrza, jakoteż np. ogrzanie powyżej 1000^0 , nie są w stanie zmienić charakterystycznego peryodu ciała promieniotwórczego. Również stan skupienia, rozтворzenie w rozcynninach kwasowych, czy alkalicznych nie wywierają nań żadnego wpływu. Określony peryod jest więc charakterystyczną niezmienną cechą każdego ciała promieniotwórczego, które zapomocą tej cechy właśnie daje się odróżnić od innych. Ta to przedewszystkiem cecha służy nam do odróżniania ciał promieniotwórczych takich, których ilości są zbyt drobne, by mogły być wykryte na innej drodze, prócz badań promieniotwórczych.

Peryod emanacyi radowej wedle najlepszych pomiarów, czy to zapomocą promieni α , czy β i γ ,

¹⁾ W bardzo wysokich temperaturach niektórzy autorowie chcieli dostrzegać zmiany peryodu, wynoszące jednak zaledwie kilka procentów — wyniki tych doświadczeń nie są jednak zgoła pewne i prawdopodobnie polegają na błędach doświadczalnych.

wynosi 378 doby; λ dla emanacji równa się zatem $2 \cdot 11 \cdot 10^{-6}$.sek.⁻¹. Poznamy następnie inne jeszcze emanacje promieniotwórcze, np. emanację toru, należące również chemicznie do grupy gazów nieczynnych i to o niezbyt odmiennym od emanacji radowej ciężarze atomowym. Można je jednak zawsze odróżnić od emanacji radowej — gdybyśmy nawet nie znali ciał, z których te emanacje powstają — gdyż ich peryody są odmiennie, a mianowicie o wiele krótsze, liczące się zaledwie na sekundy.

O ile peryod jakiegoś ciała promieniotwórczego jest dość krótki, może być zawsze oznaczony przez pomiary elektrometryczne w należytych odstępach czasu. Niepodobna jednak w ten sposób bezpośredni oznaczać długich peryodów takich ciał promieniotwórczych, które rozkładają się do połowy dopiero np. w ciągu setek, tysięcy lub nawet miliardów lat. Widzieliśmy np. że promieniotwórczość preparatów radowych — skoro osiągnie swoje maximum po wytworzeniu maksymalnej ilości emanacji — jest dalej niezmienna. Gdy jednak obserwujemy niezbitcie, że emanacja powstaje, rodzi się z radu, więc wnosić musimy, że rad się rozkłada — lecz tylko peryod jego jest tak długi, że w dostępnych nam okresach czasu zmian w ilości radu ani badaniami promieniotwórczemi, ani tem mniej wagą dostrzedz niepodobna.

I w takich przypadkach możemy jednak pośrednio oznaczyć długość peryodu i to kilkoma nawet metodami, z których jedne posługują się wyłącznie obserwacyami promieniotwórczemi, inne

prócz tych opierają się jeszcze na wnioskach kinetycznej teorii budowy materii. Metoda pierwsza polega na tem, że jeżeli mamy jednakowe ilości dwu ciał promieniotwórczych A i B, to silniej promieniotwórczem będzie oczywiście to, które rozkłada się prędzej — założywszy oczywiście, że szybkość wyrzucanych tu i tam α cząstek nie jest odmienna, co z pewnem przybliżeniem uczynić można. Peryody tych obu ciał A i B, będą się zatem miały tak, jak dzielnosci promieniotwórcze — porównane oczywiście w identycznych warunkach. Metoda ta dać może tylko dość przybliżone wyniki, gdyż trudno jest porównywać ściśle dzielnosc promieniotwórczą ciał o bardzo odmiennej mocy, jakie tu oczywiście mieć musimy — gdzie B jest ciałem o peryodzie bezpośrednio mierzyć się dającym, A zaś ciałem o bardzo długim peryodzie. Metoda ta do oznaczenia peryodu radu n. p. już z tego powodu trudno dałaby się zastosować, że promieniowania α , ciała stałego i gazu nie dałyby się porównać w identycznych warunkach n. p. ze względu na absorpcyę w samym ciele promieniotwórczem. Metody tej użyjemy jednak następnie n. p. do oznaczenia peryodu uranu.

Oznaczenie peryodu radu.

Obecnie gdy rad znajduje się w nieco większej ilości, peryod jego można oznaczyć w ten sposób, że zmierzymy dokładnie, jaka maksymalna objętość emanaeyi znajdować się może w równowadze

z 1 gr radu n. p. Ilość emanacji w preparacie radowym wzrasta bowiem dopóty, aż ustawi się równowaga promieniotwórcza, t. j. gdy w jednostce czasu tyleż emanacji będzie się rozkładało, ile jej z radu powstaje. Doświadczenie, o jakim tu mowa, polega zatem na wypędzeniu w próżni całej emanacji ze znanej ilości preparatu radowego i na zmierzeniu jej objętości w rurce kapilarnej. Doświadczenia takie wykonane przez Ramsaya, Soddyego, a następnie powtórzone dokładniej przez Rutherforda są trudne ze względu na bardzo małe ilości gazu, które zmierzyć należy i które muszą być absolutnie oczyszczone od wszelkiej przypadkowej domieszki. Ryc. 13 (str. 62) przedstawia schemat przyrządu używanego do takich doświadczeń ¹⁾.

Emanacja, wypędzona z małą ilością gazów obcych (powietrza i śladów bezwodnika węglowego) w objętości łącznej około 1 cm³, wprowadza się przez rurkę syfonową w kąpiel rtęciowej do zbiornika *C*, a następnie do zbiornika *D* wypełnionego stałym wodorotlenkiem potasowym dla usunięcia CO₂. Po upływie 24 godzin przez obniżenie zbiornika połączonego z naczyniem *C*, sprowadza się emanację i powietrze napowrót do *C* i przez pompowanie wypróżnia przez kurki *B* i *A* zgiętą rurkę kapillarną, oraz naczynia *E* i *F*. Po zamknięciu kurków *A* i *B* wprowadza się emanację z powietrzem do zgiętej kapillary i następnie oziębiwszy kapillarę ciekłym powietrzem, pom-

¹⁾ p. Rutherford. *Philosophical Magazine* 16 (1908) 300.

puje znów przez otworzony kurek *B*. Emanacja skroplona pozostaje w rurze kapilarnej, natomiast powietrze z nią zmieszane usunięte jest przez to wypompowanie.

Zamknąwszy kurek *B*, otwieramy obecnie kurek *A*, wskutek czego emanacja wpada do wy-

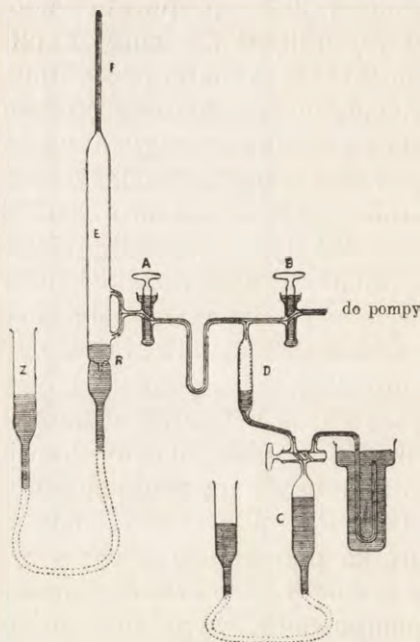


Fig. 13.

próżnionego naczynia *E*; po zamknięciu *A* przez podniesienie zbiornika z rtęcią *Z* wpędza się emanację z *E* do kapilarnej kalibrowanej rurki *F*, gdzie się wówczas odmierza jej objętość i z po-

ziomów rtęci w Z i F odczytuje wywarte na emanację ciśnienie.

Według najlepszych dzisiejszych pomiarów 1 gramowi radu w stanie równowagi radioaktywnej odpowiada 0.585 mm^3 emanacji w normalnych warunkach temperatury i ciśnienia ¹⁾. Skoro wiemy, że ciężar drobinowy emanacji wynosi 222, to możemy obliczyć ile waży ta objętość emanacji. Według zasady Avogadry bowiem 222 gr emanacji zajmowałyby (okrągło) objętość 22 litrów.

0.585 mm^3 waży zatem

$$\frac{222 \cdot 0.585}{22 \cdot 10^3 \cdot 10^3} = 5.8 \cdot 10^{-6} \text{ g.}$$

Skoro zaś stała szybkości rozkładu emanacji wynosi $\lambda_{em} = 2.11 \cdot 10^{-6}$ to w jednostce czasu z $5.8 \cdot 10^{-6} \text{ g.}$ rozkłada się gramów

$$\lambda_{em} \cdot 5.8 \cdot 10^{-6} \text{ g} = 1.22 \cdot 10^{-11} \text{ g.}$$

Że zaś wyliczona poprzednio ilość emanacji była w równowadze promieniotwórczej z 1 gramem radu, więc i z 1 g. radu rozkłada się na sekundę też $1.22 \cdot 10^{-11} \text{ g.}$

Mamy więc

$$dn_{rad} = 1.22 \cdot 10^{-11}, \quad N_{rad} = 1 \text{ g}$$

$$\text{więc } \lambda_{rad} = \frac{dn}{N} = 1.22 \cdot 10^{-11}$$

¹⁾ Ramsay otrzymywał początkowo liczby większe, niezgodne z wynikami pomiarów nad promieniotwórczością. Wyniki jego były jednak wywołane przez obecność obcych gazów w emanacji.

a zatem peryod

$$T = \frac{10^{11}}{1.22} \ln 2 = 5.6 \cdot 10^{10} \text{ sek.} = 1780 \text{ lat.}$$

Peryod radu jest zatem tak znaczny, że zmian ilości radu w krótkich naszych okresach czasu dostrzedz nie możemy.

Inny sposób określenia peryodu radu polegać będzie na tem, by zliczyć bezpośrednio, ile α cząstek wyrzuca w jednostce czasu pewna określona ilość radu. Doświadczenie podobne daje się w istocie rzeczy wykonać według następującego schematu.

Zliczenie liczby wyrzucanych α cząstek według Rutherforda. Zasadnicza idea takiego doświadczenia polega na tem, by po pierwsze użyć bardzo słabego preparatu i w bardzo małej ilości tak, by liczba wyrzuconych cząstek α była nieznaczna, — powtóre zaś jonizację wywołaną przez α cząstki mierzyć tak daleko od źródła promieniowania, by przez otwór do przestrzeni jonizacyjnej wpadały tylko poszczególne, pojedyncze α cząstki. Przyrząd użyty do takich doświadczeń przedstawiony jest na ryc. 14 (str. 64). *E* jest mniej więcej czterometrową rurą szklaną, z której zapomocą pompy usuwa się powietrze do ciśnienia kilku mm. Taka ewakuacja jest niezbędna, w przeciwnym razie bowiem cząstki α nie mogłyby w powietrzu pod zwykłym ciśnieniem przebieść tak długiej drogi. W *C*, na końcu rury, znajduje się na szkiełku drobna ilość ciała promieniotwórczego,

otrzymana przez odparowanie oznaczonej objętości bardzo rozcieńzonego roztworu. Zapomocą kurka *F* rura szklana łączy się z przytwierdzoną do

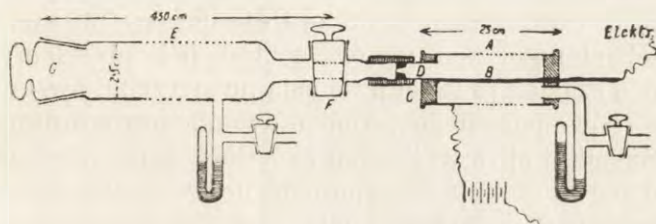


Fig. 14.

niej rurę metalową *A*, przez której środek przechodzi izolowana elektroda *B* połączona z elektrometrem, podczas gdy rura metalowa naładowana jest do wysokiego potencjału zapomocą baterii akumulatorów. Gdy kurek *F* jest zamknięty zwierciadło elektrometru pozostaje w spoczynku, uderzające bowiem cząstki α są pochłaniane w szkło; gdy jednak kurek otworzymy dostrzegamy, że zwierciadło elektrometru co pewien czas — zależny od dzielności promieniotwórczej użytego preparatu — wychyla się z równowagi o pewien kąt niezmienny w granicach błędu i który obserwować możemy na podziałce skali. Długość rury i dzielność preparatu promieniotwórczego dobiera się tak, by wychylenia dały się jeszcze łatwo zliczyć, by n. p. na minutę przypadało 6—7 odchyleń. Każde wychylenie jest wywołane przez to, że pojedyncza α cząstka wpada do przestrzeni joni-

zacyjnej i tu wywołuje jonizację, wskutek czego pewien ładunek elektryczny dostaje się do elektrometru. Znając wielkość otworu w kurku oraz odległość jego od preparatu, możemy obliczyć, jaką część powierzchni kuli zakreślonej promieniem CF , stanowi ten otwór, a ztąd już obliczamy, ile α cząstek przypada na całą powierzchnię wskutek równomiernego promieniowania preparatu na wszystkie strony. Znając zaś ilość radu użytego do doświadczenia, otrzymujemy ilość α cząstek, które wyrzucą 1 gram tego ciała.

Doświadczenie Rutherforda, tu w ogólnym zarysie podane, jest niezmiernie doniosłe, gdyż w sposób niezbity dowodzi, że promieniowanie ciał promieniotwórczych jest zjawiskiem korpuskularnym, nieciągłym, wywołanym przez rozkład atomowy.

Oznaczenie liczby wyrzucanych α cząstek daje się też wykonać przez obserwację t. zw. scintylacji, wywołanej przez te cząstki. Płytką powleczona siarczkiem cynkowym, (zwłaszcza zawierającym nieco domieszek, np. manganu i wapnia), okazuje za zbliżeniem preparatu promieniotwórczego charakterystyczne zjawisko: gdy na taką płytkę położymy mianowicie płytkę szklaną z bardzo drobnymi ilościami radu np., i będziemy ciemne pole widzenia obserwowali w ciemności przez przyłożoną lupę, to zobaczymy, że na ciemnym tle pojawiają się w różnych miejscach błyski świetlne. Zjawisko to — t. zw. scintylacja blendy cynkowej — odkryte przez Crookesa, sprawia

wrażenie podobne do tego, jakby na ciemnym tle nieba zapalały się gwiazdy i gasły.

Analiza tego zjawiska dowiodła, że mamy tu do czynienia z błyskaniem, wywołanem przez uderzenia α cząstek o kryształki blendy cynkowej. Każda α cząstka uderzająca o preparat cynkowy, wywołuje błysnięcie. Jeśli więc użyjemy znanej, bardzo drobnej ilości ciała promieniotwórczego, że liczbę błysków wywołanych co sekunda zliczyć można jednym rzutem oka, posiadamy już drugi sposób — prócz elektrycznej metody Rutherforda — by bezpośrednio obliczyć ilość α cząstek, wyrzucanych z jakiegokolwiek ilości ciała promieniotwórczego.

Zgodność liczb otrzymanych tą metodą a metodą elektryczną Rutherforda, dowodzi nam właśnie, że istotnie każda α cząstka, padająca na blendę cynkową, wywołuje taki charakterystyczny błysk ¹⁾.

¹⁾ Wobec tego, że promieniowanie ciał promieniotwórczych ponad wszelką wątpliwość jest zjawiskiem atomowem, samorzutnem, równowaga, stałość promieniowania preparatu promieniotwórczego ma charakter statystyczny. Atomy ciał promieniotwórczych znajdują się w stanie nietrwałym, wskutek tego w każdej jednostce czasu rozkłada się pewien określony ułamek całkowitej liczby obecnych atomów. Im starszy jest jakiś pojedynczy atom ciała promieniotwórczego, tem więcej prawdopodobieństwa, że właśnie w uważanej chwili się rozłoży; im jest młodszy — tem prawdopodobiejsze, że jeszcze dłuższy czas przetrwa nierozłożony. Promieniowanie ciała promieniotwórczego, np. radu, którego ilość w ciągu uważanego okresu możemy rozpatrywać za

Z doświadczeń Rutherforda wynika, że 1 gr radu wydziela na sekundę $3.4 \cdot 10^{10}$ cząstek α . Z ki-

niezmienną — nie może być zatem absolutnie stała i niezmienna: przeciwnie, w myśl praw teorii prawdopodobieństwa, wahać się ono musi koło pewnej przeciętnej, przyczem odchylenia im większe, tem będą rzadsze. Tak zw. zasada wielkich liczb wymaga dalej, że im silniejszy preparat, t. j. im większa liczba atomów rozkłada się co sekundę, tem drobniejsze będą odchylenia od wartości przeciętnej; im mniej atomów, podlegających rozkładowi, tem większe będą odchylenia od przeciętnej.

Doświadczenie najzupełniej potwierdza te wnioski. W eksperymentach Rutherforda, opisanych wyżej, liczba α cząstek wpadających co sekunda do rury mierniczej, wynosiła:

sekunda:	1 ^a	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10 ^a
liczba α cząstek:	4	3	5	4	3	4	2	3	3	4

Przeciętna jest 3.5: raz tylko jeden wpadło aż 5 cząstek i raz tylko dwie zaledwie.

Wahania promieniotwórczości »niezmiennego« preparatu promieniotwórczego obserwować możemy wprost zapomocą dostatecznie czułych elektrometrów. Zwierciadelko bardzo czułego elektrometru nigdy nie ustali się w spoczynku, ale zawsze wykonywać będzie oscylacje około pewnego położenia przeciętnej. Na rysunku (p. fig. 15) zamiast idealnej linii prostej, wyrażającej przeciętną promieniotwórczość, otrzymamy wówczas zyg-zakowatą krzywą, odpowiadającą ciągle obserwowanym uchyleniom od przeciętnej.

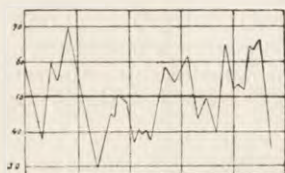


Fig. 15.

Kinetyczna teoria materji zawsze prowadzi nas do rozpatrywania zjawisk w świetle teorii prawdopodobieństwa:

netycznej teorii materii wynika, że 1 gr wodoru (a więc pół mola H_2), zajmujący w normalnych warunkach 11 l., zawiera okrągło $6 \cdot 0 \cdot 10^{23}$ atomów, a więc 1 gr radu o ciężarze atomowym 226 zawierać będzie atomów 226 razy mniej, t. j.

$$\frac{6 \cdot 0 \cdot 10^{23}}{226} = 2 \cdot 7 \cdot 10^{21}.$$

Z tej liczby atomów na sekundę rozkłada się oczywiście tyle, ile jest wyrzuconych α cząstek t. j. $3 \cdot 4 \cdot 10^{10}$. Mamy zatem $N = 2 \cdot 7 \cdot 10^{21}$, $dn = 3 \cdot 4 \cdot 10^{10}$, stąd

$$\lambda_{rad} = \frac{dn}{N} = \frac{3 \cdot 4 \cdot 10^{10}}{2 \cdot 7 \cdot 10^{21}} = 1 \cdot 25 \cdot 10^{-11}$$

$$\text{zaś } T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{10^{11}}{1 \cdot 25} \ln 2 = 5 \cdot 4 \cdot 10^{10} \text{ sek.} = 1700 \text{ lat.}$$

Otrzymujemy zatem wynik zgodny z tym, jaki uzyskaliśmy przez pomiar objętości emanacji. Zważywszy trudność i subtelność takich pomiarów z tak drobnymi ilościami, zgodność uznać możemy za bardzo dobrą.

Aczkolwiek peryod radu jest stosunkowo do okresu doświadczeń ludzkich długi, jednak jest on bardzo nieznaczny w porównaniu z trwaniem okresów geologicznych. Jeśli więc w ogóle rad jeszcze spotykamy w przyrodzie, musi on być wi-

na ciałach promioniotwórczych wnioski płynące z rachunku prawdopodobieństwa wprost bezpośrednim eksperymentem potwierdzać się dają.

docznie ciągle wytwarzany przez inne ciało o daleko dłuższym okresie istnienia. Kwestyę tę o pochodzeniu radu rozpatrzymy następnie (p. str. 88) i przekonamy się istotnie, że rad jest ciałem powstającym przez rozkład uranu.

Produkty rozkładu emanacji radowej.

Widzieliśmy, że emanacja rozkłada się, wyrzucając α cząstkę, z peryodem równym 3·78 doby. Skoro jak poznaliśmy α cząstki są identyczne z helem to musimy w rurce zawierającej emanację zauważyć nagromadzenie się helu. Istotnie jeszcze w samym początku teorii przemian promieniotwórczych, w r. 1903 takie odkrycie uczynili Ramsay i Soddy: za pomocą badania widma dostrzegli przemianę — jak wówczas sądzono — emanacji na hel. Odkrycie to — pierwsze spostrzeżenie przemienności pierwiastków, prowadzącej do utworzenia ciała dawno znanego ze wszystkich swych własności i uznanego niezbitcie za pierwiastek — wywołało wówczas ogromne wrażenie. Dziś wiemy, że przemiana ta jest w istocie tylko wydzieleniem helu przez rozkład ciała promieniotwórczego, które zamienia się na inne ciała; wspominały tu jednak o ówczesnym odkryciu Ramsaya ze względu na jego doniosłość historyczną.

Przez rozkład emanacji tworzą się, jak wspominaliśmy wyżej, ciała promieniotwórcze, które na podobieństwo opadów, osiadają na wszelkich przedmiotach, z którymi emanacja się styka. Te ciała promieniotwórcze, stanowiące to co nazywano

dawniej »promieniotwórczością« indukowaną, mają tylko bardzo krótki okres życia, gdyż już po upływie kilku godzin znikają prawie w zupełności. Wobec tego jasnym jest, że nawet przez rozkład największych dostępnych nam ilości emanacji utworzona ich ilość jest tylko niezmiernie drobna i nie może być nigdy stwierdzona innymi metodami, prócz badań promieniotwórczości. W takich przypadkach najpospolitszych właśnie również i w szeregu przemian innych pierwiastków promieniotwórczych — możemy te ciała rozróżnić i scharakteryzować za pomocą metody następującej.

Ciała, na których mają się osadzić osady promieniotwórcze, n. p. odpowiednich rozmiarów płytki metalowe, pozostawiamy w zetknięciu z emanacją przez rozmaite przeciągi czasu a następnie mierzymy zmiany, jakim promieniotwórczość osadów na tych płytkach ulega z biegiem czasu — i to zarówno co do promieniowania promieni α , jakoteż β , γ . Otrzymujemy wówczas szereg krzywych, których interpretacja i analiza na krzywe logarytmiczne wyjaśnia nam przemiany, którym osady promieniotwórcze podległy.

Zarazem staramy się za pomocą zwykłych metod fizycznych, n. p. za pomocą ogrzewania do wysokiej temperatury, te lub inne z osadzonych ciał promieniotwórczych z badanego przedmiotu usunąć — a wówczas zmiany w promieniotwórczości w ten sposób wywołane mogą nam inter-

pretację poprzednich krzywych wyjaśnić i ułatwić.

Podobna analiza krzywych, wyrażających dzielność promieniotwórczości indukowanej, jako funkcję czasu, nie jest w ogóle rzeczą łatwą: nieraz ostateczne rozwikłanie obrazu takich przemian wymaga szeregu długich prób, zwłaszcza w przypadkach przemian licznych a szybkich. Tu ograniczymy się tylko do szczegółowego rozpatrzenia przemian, jakim ulega osad, utworzony przez emanację radową.

Osady promieniotwórcze tworzą się na wszystkich przedmiotach, które się stykają z emanacją. Możemy je jednak łatwo skupić na małej przestrzeni i przez to ułatwić sobie badanie nawet bardzo małych ilości emanacji wskutek tego, że te osady promieniotwórcze w polu elektrycznym skupiają się prawie zupełnie na biegunie ujemnym¹⁾.

¹⁾ Przyczyna tego zachowania nie jest ostatecznie wyjaśniona. Skoro emanacja utracą cząstkę α , dodatnią, ciało powstające winno być naładowane ujemnie, a więc nie mogłoby się udawać do elektrody ujemnej. Możliwość przypuścić, że jednocześnie z cząstką α wydzielają się ujemne elektrony, obdarzone małą szybkością, które już nie działają jonizująco, ale produktowi rozkładu udzielają po swej utracie ładunku dodatniego.

Jest rzeczą interesującą, że osady promieniotwórcze z emanacji, która się znajduje w bardzo rozrzedzonym gazie np. do ciśnienia 2—3 mm. już się na elektrodzie ujemnej prawie wcale nie skupiają. Skupianie ma miejsce tylko wtedy, gdy emanacja jest w gazie pod ciśnieniem normalnym lub mało co różnym od normalnego.

Do skupiania osadów emanacyjnych użyć więc możemy przyrządu, wyobrażonego na rycinie 16.

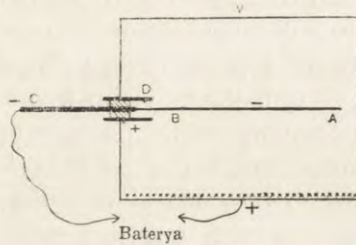


Fig. 16.

Elektroda *ABC* jest naładowana do ujemnego potencjału np. 100 woltów, metalowe pudełko, zawierające emanację odprowadzone jest do ziemi, lub połączone z biegunem dodatnim.

Jeżeli w ten sposób z emanacją radową wykonamy pomiary wyżej wzmiankowane, otrzyma-

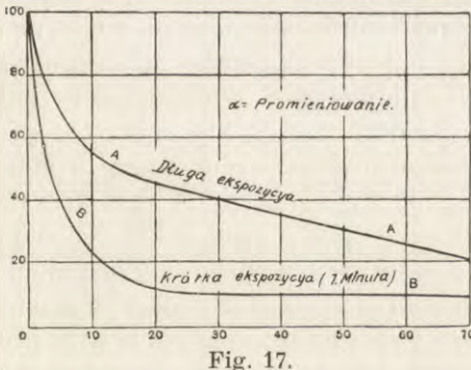


Fig. 17.

my krzywe wyobrażone na ryc. 17 i 18. Zajmijmy się obecnie ich analizą.

Krzywe α promieniowania, po krótkiej ekspozycji (do 30 minut), składają się wyraźnie z 3 części. Początkowo zauważamy bardzo silny spadek promieniotwórczości, który mniej więcej po upływie 10 minut jest ukończony. Następnie przez pewien czas — tym dłuższy, im krótsza była ekspozycja — promieniowanie pozostaje bez zmiany, a potem zanika zwolna z przebiegiem logarytmicznym, którego peryod wynosi około 26 minut. Pierwsza część krzywej B odpowiada przebiegowi również logarytmicznemu o bardzo krótkim peryodzie około 3 minut. Z krzywej tej zatem wnioskujemy, że przez rozkład emanacji najpierw tworzy się ciało promieniotwórcze o krótkim istnieniu (peryod 3 minuty) — nazwiemy je Radem A , a w końcu ciało o nieco dłuższym peryodzie (peryod 26 minut) — Rad C . Jak wskazuje dokładna analiza algebraiczna kształtu krzywej stan stacjonarny po krótkiej ekspozycji wyjaśnić się daje tem, że rad A nie zamienia się bezpośrednio na rad C , lecz poprzednio tworzy jeszcze jeden produkt przejściowy rad B , którego rozkład nie jest jednak połączony z wyrzucaniem promieni działających jonizacyjnie. Z przebiegu krzywych możemy zatem odkryć nawet takie przemiany, którym nie towarzyszy wydzielanie promieni.

Przebieg krzywych, wyrażających promieniowanie β lub β i γ (p. ryc. 18), — gdyż te dwa promieniowania zawsze sobie towarzyszą, — jest zarówno po krótkiej, jak i po długiej ekspozycji odmienny od krzywych promieniowania α . Nie mamy tutaj zgoła

owego początkowego szybkiego zanikania z peryodem $T=3$ min.; przeciwnie promieniowanie β najpierw jest nieznaczne, po upływie 36 minut

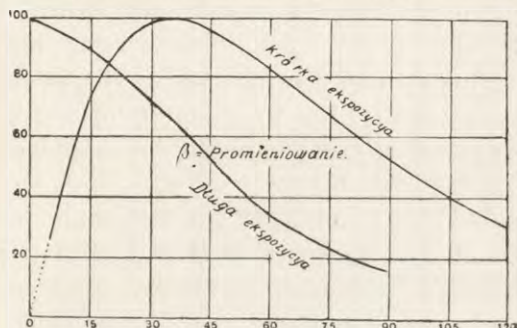


Fig. 18.

dochodzi do pewnego maximum, a następnie po upływie 70 minut poczyną dalej zanikać z charakterystycznym peryodem 26 minut. Wnioskujemy stąd 1) że rozkład radu A wywiązuje wyłącznie promienie α , inaczej bowiem przebieg krzywych α i β musiałby być analogiczny; 2) że rozkład radu C , oprócz promieni α , wytwarza również promienie β i γ , bowiem ostatni peryod zanikania jest identyczny, czy mierzymy go promieniami α , czy promieniami β .

Istnienia radu B , prócz analizy krzywej, można też dowieść za pomocą doświadczeń z ogrzewaniem, substancya ta bowiem, jak się okazuje, jest łatwiej lotna od produktu następnego, od radu C . Jeżeli drut platynowy indukowany emanacją i zawierający rad A , rad B i rad C , ogrzejemy np.

przez kilka minut prądem elektrycznym, do temperatury około 1000° , uprzednio otoczywszy drut metalowym cylindrem, wówczas zauważymy, że po ostygnięciu promieniotwórczość drutu będzie zanikała odrazu z peryodem 26 minut, natomiast ściany cylindra metalowego stały się promieniotwórcze i zmiany tej promieniotwórczości odpowiadają zupełnie dalszemu biegowi krzywej B na ryc. 17.

Zachowanie podobne tłómaczyć sobie możemy przez ulotnienie z drutu radu B , który osiadł na chłodnych ścianach cylindra. Zmiany promieniotwórczości cylindra muszą tu być takie same, jak po ekspozycji w emanacji — z wyjątkiem pierwszego krótkiego okresu szybkiego zaniku, wywołanego przez rad A , który tutaj był oczywiście nieobecny. Promieniotwórczość zaś drutu zanikająca odrazu według prostego prawa logarytmicznego wskazuje, że na drucie pozostała już tylko jedna substancja promieniotwórcza, mianowicie ów rad C , wysyłający promienie α , β , γ ¹⁾.

¹⁾ Badanie skomplikowanego przebiegu krzywych promieniotwórczości, — zwłaszcza u ciał tak szybko się rozkładających — napotyka na znaczne trudności zarówno eksperymentalne, jak i teoretyczne, dlatego też wnioski ostateczne co do natury i peryodów rozkładających się tu ciał promieniotwórczych ulegają nieraz pewnym zmianom i wahaniom w miarę nowych wyników doświadczalnych. W przedstawieniu własności radu A , radu B i radu C trzymaliśmy się tu najprostszych wyników, nie uwzględniając licznych kontrowersyj i sporów naukowych, które się nad tym przed-

Jak widzimy więc, stary preparat radowy, który okludował swą emanację, jest zbiorem radu samego, emanacji, radu *A*, radu *B* i radu *C*. Jego promieniowanie β , γ pochodzi od radu *C*; na jego promieniowanie α składają się wszystkie cztery ciała: rad, emanacja, rad *A* i rad *C*. Powstaje zatem pytanie, w jakim stosunku każde z tych ciał przyczynia się do całkowitej obserwowanej wartości promieniowania. Zagadnienia podobne dają się ściśle rozwiązać, gdybyśmy znali szybkość cząstek wyrzucanych przez każde z tych ciał promieniotwórczych oddzielnie. W danym przypadku możemy je rozwiązać tylko w sposób przybliżony. Sam rad, przez wygotowanie pozbawiony emanacji i ciał z niej pochodzących, posiada, jak wspominaliśmy (p. str. 43), tylko 25% pierwotnej promieniotwórczości. Przez szybkie usunięcie samej tylko emanacji (np. przez bardzo szybkie ogrzanie do wysokiej temperatury) osłabienie promieniotwórczości wynosi tylko ok. 17%. Zakładając — do czego na zasadzie pewnych pomiarów mamy prawo — że dzielność promieniotwórcza radu *A* i radu *C* jest jednakowa, otrzymujemy następujący przybliżony bilans ogólny promieniotwórczości takiego dawnego preparatu:

miotem jeszcze toczyć mogą. Rzecz tyczy się bowiem w każdym razie drobnych tylko szczegółów co do długości peryodów, a sama analiza całej kwestyi interesuje nas tu głównie z punktu widzenia metodologicznego.

	% Promieniotwórczości całkowitej (w promieniowaniu α)
Rad	25
Emanacya	17
Rad <i>A</i>	29
Rad <i>B</i>	0
Rad <i>C</i>	29

Szybkość wywiązywania helu z radu.

Streszczone wyżej wyniki co do szeregu promieniotwórczego radu znajdują dziś znakomite potwierdzenie w badaniach doświadczalnych nad ilością helu, wytwarzanego przez preparaty radowe.

Widzieliśmy, że bezpośredni pomiar podaje nam $3.4 \cdot 10^{10}$, jako liczbę cząstek α , a więc atomów helu, wyrzucanych przez 1 gram samego radu. W preparacie radowym po upływie pewnego czasu (ok. 1 miesiąca) znajdują się w równowadze radioaktywnej 4 produkty wyrzucające α cząstki: rad, emanacya radowa, rad *A* i rad *C*. Preparat taki zatem wyrzuca na sekundę $4 \cdot 3.4 \cdot 10^{10} = 1.36 \cdot 10^{11}$ cząstek $\alpha =$ atomów helu. Skoro zaś w jednym cm^3 w normalnych warunkach znajduje się według kinetycznej teorii gazów $2.72 \cdot 10^{19}$ drobin, zaś drobiny helu, jak wiemy, są jednoatomowe, to na sekundę wytwarza się zatem

$$\frac{1.36 \cdot 10^{11}}{2.72 \cdot 10^{19}} \text{ cm.}^3$$

helu, co przerachowane na milimetry sześciennie i na

dobę daje 0·43 mm³ helu z jednego grama radu (+ Eman. + Rad A + Rad C) na dobę.

W ostatnich czasach Dewar¹⁾, — mając do rozporządzenia około 70 mgr. radu, — wykonał istotnie pomiary nad ilością helu, wydzielanego stale z preparatów radowych. Doświadczenia jego wykazały ostatecznie, że hel wydziela się ciągle, równomiernie: ilość jego jest proporcjonalna do czasu, w ciągu którego gaz zbieramy. Jako wydajność na gram radu i na dobę, Dewar znalazł 0·37 mm³ helu. Zgodność z liczbą obliczoną jest doskonała — zważywszy trudność eksperymentowania z tak małymi ilościami gazu.

Dalsze produkty rozkładu radu. Rad D, Rad E, Rad F. Polon.

Gdy w szybko zmiennym osadzie promieniotwórczym, pozostawionym przez emanację radową, rad C rozłoży się zupełnie, co ma miejsce po upływie kilkunastu godzin, — mimo to pozostaje jeszcze pewna bardzo drobna promieniotwórczość, która podobnie, jak poprzednia, nie zależy zupełnie od natury ciała, na którym osady promieniotwórcze skupiono. Zgodnie z zasadami, poprzednio wyłuszczone, tę pozostałą promieniotwórczość tłómaczymy sobie przez to, że rad C wydzielił z siebie inny następny produkt promieniotwórczy: rad D. Skoro zaś owa pozostała promieniotwórczość jest bardzo drobna w porównaniu z pro-

¹⁾ Proc. Roy. Soc. 81 A (1908), 280.

mieniotwórczością radu A i radu C , — wynosi ona początkowo zaledwie $\frac{1}{300000}$ ich dzielności — wnioskujemy zatem, że w radzie D musimy mieć ciało o stosunkowo długim peryodzie i tylko bardzo nieznaczna część jego atomów rozkłada się w każdej sekundzie.

Jakie inne własności ma rad D , ile i jakie tworzą się zeń ciała promieniotwórcze — to poznać znów będziemy mogli, badając szczegółowo zmienność promieniowania radu D w czasie.

§ Krzywa, która wyraża tę zmienność dla promieniowania α mamy na ryc. 19. Promieniowa-

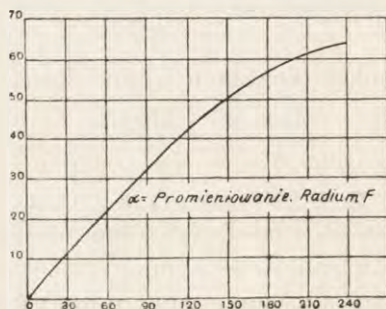


Fig. 19.

nie α jest po zupełnym rozkładzie radu C niezmiernie małe, ale wzrasta stale i dopiero po upływie kilkadziesiąt miesięcy (na rysunku mamy tylko krzywą na 8 miesięcy) zbliża się do maximum.

Promieniowanie β również znikomo drobne na początku, wzrasta jednak o wiele szybciej i już po

upływie ok. 40 dni dosięga maximum, które dalej pozostawało niezmiennie w ciągu roku całego, podczas którego dalej wykonywano pomiary. Peryod narastania promieniowania β wynosi 6·2 doby.

Wnioskujemy zatem 1) że promieniowania α i β są wydzielane przez 2 rozmaite substancye, gdyż tempo ich jest odmienne, 2) że rad D przemienia się bez wyrzucania promieni — gdyż na początku promieniotwórczość jest znikoma, 3) że peryod radu D musi być znaczny, skoro po osiągnięciu maximum promieniowania β , przez rok żadna zmiana w niem nie zaszła. Rad D więc wytwarza dwa produkty promieniotwórcze rad E i rad F ; pozostaje tylko określić jeszcze ich następstwo oraz wykryć, do którego z nich należy promieniowanie α , a do którego promieniowanie β .

Na pytanie to można odpowiedzieć przez rozdzielenie ciał wysyłających α i β promienie; rozdzielić je zaś można bądź przez ogrzanie blaszki platynowej, na której są skupione, do 1000°, bądź też jeszcze łatwiej za pomocą reakcyj chemicznych. Mianowicie pewne obserwacye, o których mówić będziemy później, wskazywały na to, że ciało wysyłające α promienie jest analogiczne do bizmutu; skoro zaś posiadać musi ciężar atomowy większy od bizmutu, musi mieć też bardziej metaliczne, kationowe własności i powinno się osadzać z roztworu na blasze bizmutowej, podobnie, jak np. z roztworu azotanu srebra srebro osadza się na blaszce miedzianej. Istotnie zamknijmy emanację radową w rurze szklanej, a następnie po

dłuższym przeciągu czasu, np. po miesiącu, rurkę opluczmy wewnątrz rozcieńczonym kwasem siarkowym: otrzymamy roztwór zawierający, jak wskazuje badanie promieniotwórczości, rad D , rad E i rad F . Płytką bizmutu zanurzona do takiego roztworu, zabiera prawie całkowicie promieniowanie α , pozostawiając nietkniętym ciało wysyłające promienie β . Ciało osadzone na płytce bizmutowej wydziela tylko promienie α , promieniotwórczość jego zanika z peryodem $T = 143$ dni, zaś promieniowanie β zgoła się nie pojawia: ciało o promieniach α jest więc ostatniem w szeregu, jest to rad F .

Roztwór natomiast, którego promieniotwórczość β się nie zmieniła, odzyskuje z biegiem czasu i promieniotwórczość α : narasta ona oczywiście z tym samym peryodem $T = 143$ doby. Promieniowanie β jest więc cechą ciała przejściowego, radu E .

Jakiż jednak będzie peryod radu D ? Aczkolwiek ciało to samo nie wysyła promieni, jednak mimo to możemy ocenić jego peryod. Widzieliśmy, że po miesiącu rad D jest w równowadze promieniotwórczej z radem E : ilość wysyłanych wówczas β promieni zależy oczywiście tylko od ilości radu D , który jest substancją macierzystą β promieniotwórczego radu E . Widzieliśmy podobnie wyżej, że po upływie kilku godzin, gdy już ustali się równowaga promieniotwórcza emanacji radowej z radem A , radem B i radem C , ilość β promieni radu C jest wyłącznie zależna od ilości

emanacyi i stale do niej proporcjonalna. Skoro zaś dzielność promieniotwórcza ciała jest oczywiście odwrotnie proporcjonalna do jego peryodu¹⁾, do jego trwałości, to oczywiście peryod radu *D* będzie tyle razy większy od znanego peryodu emanacyi, ile razy β promieniotwórczość radu *E* jest słabsza od promieniotwórczości równoważnej mu ilości radu *C*. Do rury szklanej wprowadzamy więc pewną ilość emanacyi i po kilku godzinach mierzymy β promieniowanie rurki. Następnie po upływie 5—6 tygodni, gdy emanacja już się rozłożyła, a rad *E* jest już w równowadze z radem *D*, mierzymy β promieniotwórczość ponownie: doświadczenie okazuje, że jest ona wtedy około 4000 razy słabsza. Zatem mamy

$$T_{\text{rad } D} = T_{\text{Eman.}} \times 4000 = 3.78 \cdot 4000 \text{ doby} = \text{ok. 40 lat.}$$

Wyodrębnienie radu *D*, radu *E* i radu *F* z minerałów promieniotwórczych. Rudy uranowe, które zawierają rad, muszą też oczywiście zawierać w sobie wszystkie następne produkty dezintegracyi tego pierwiastku. Wyodrębnienie oddzielne ciał takich, jak rad *A*, rad *B* i rad *C* jest oczywiście niemożliwe, gdyż operacje chemiczne, niezbędne w przeróbce rudy, trwają o wiele dłużej, niż czas zupełnego zaniku tych ciał krótkotrwałych. Inaczej się jednak rzecz ma z radem *D*, z radem *E* i radem *F*: żyją one dostatecznie długo, by mogły się utrzymać w ciągu operacyj

¹⁾ przy jednakowej oczywiście szybkości α i β cząstek.

chemicznych, przedsięwziętych dla ich oddzielenia. Istotnie też ciała te zostały wyodrębnione wprzód jeszcze, zanim badania dokładne nad promieniotwórczością indukowaną emanacji radowej wyświetliły ich należyte położenie w szeregu przemian promieniotwórczych.

W chemicznej przeróbce rudy uranowej poszczególne długotrwałe indywidua promieniotwórcze towarzyszą rozmaitym pierwiastkom chemicznym, strącanym w postaci tych lub innych charakterystycznych osadów. Już w samym początku badań nad promieniotwórczością pani Skłodowska-Curie, oprócz radu, który towarzyszył solom barowym, wyosobniła inne ciało promieniotwórcze, które w reakcyach wydzielalo się z bizmutem. Częściowo można było zagęszczać je w siarczku bizmutu przez sublimację siarczku: części, które sublimowały najpierw, zawierały więcej ciała promieniotwórczego, niż te, które pozostały nieprzesublimowane. Jednak i w takich najczynniejszych preparatach metodami analizy zwykłej nic, prócz bizmutu, wykryć nie było podobna. Ciało promieniotwórcze, znajdujące się w tych preparatach, nazwała pani Skłodowska polonem. Wysyłało ono wyłącznie promienie α , nie okazywało działania na płytę fotograficzną i po upływie kilku lat dzielność jego promieniotwórcza bardzo osłabła. Wykonane pod wpływem teorii Rutherforda ściśle badania nad zanikaniem promieniotwórczości polonu wykazało, że peryod tego ciała wynosi ok. 140 dni, a więc jest identyczny z peryodem radu F' ,

otrzymanego przez dezintegrację emanacji radowej¹⁾.

Koniec i początek szeregu radowego.

Rad *F* jest ostatnim produktem przemiany radu, którą możemy śledzić za pomocą pomiaru promieniotwórczości. Gdy ciało to, polon, zaniknie, nie pozostaje nic, coby własnościami promieniotwórczymi się zdradzało. Metody rozumowania, którymiśmy poprzednio się posługiwali, stają się tu więc bezsilne, musimy się więc uciec do mniej już pewnych hipotez i szukać następnie spostrze-

¹⁾ Dla należytej oceny stanowiska poszczególnych indywidualów promieniotwórczych badanie własności promieniotwórczych jest o wiele ważniejsze od znajomości reakcji chemicznych, które prowadziły do wyodrębnienia takiego indywidualum. Z pewnych prób rudy uranowej Marek-wald wyodrębnił był np. ciało, które w jego przeróbce towarzyszyło tellurowi i dlatego nazwał je radio-tellurem. I to ciało jednak po bliższym badaniu cech promieniotwórczych, a przede wszystkim rodzaju promieniowania i okresu zanikania, okazało się identyczne ze znanym już polonem, czyli radem *F*.

Również z rudy uranowej chemik niemiecki Hoffmann wyodrębnił był preparaty promieniotwórcze, których główną substancją chemiczną był ołów, i dlatego istotę promieniotwórczą, która miała tam być obecna, nazwał radioołowiem. Znowu jednak badanie promieniotwórczości wskazało, że ów rzekomy radioołów jest tylko mieszaniną nienależycie rozdzieloną radu *D*, radu *E* i radu *F* i musi być zatem wykreślony z rzędu istotnych nowych pierwiastków promieniotwórczych.

zeń, któreby prawdziwość tych hipotez potwierdzały.

Wiedząc, że promieniowanie α składa się z atomów helu i znając ciężar atomowy radu, możemy łatwo obliczyć ciężary atomowe wszystkich produktów szeregu radowego. Otrzymujemy wówczas, że ciężar atomowy emanacji wynosi okragło 222, radu A — 218, radu B i radu C (skoro przemiana radu B jest niepromieniotwórcza) — 214, radu D , radu E (tylko β promieniotwórczego) i radu F — 210; wreszcie na produkt powstający z radu F przypadnie liczba 206, a właściwie liczba o kilka dziesiątych większa, gdyż ciężar atomowy helu jest cokolwiek mniejszy od 4. Ciężar atomowy 206 z ułamkiem znajdujemy istotnie w tablicy pierwiastków: jest to ciężar atomowy ołowiu: nasze rozumowanie wskazuje nam zatem na ołów, jako możliwy i prawdopodobny produkt dezintegracji radu. Jeśli hipoteza taka jest słuszna, to musimy się spodziewać, że rudy uranowe, zawierające rad, będą też zawierały ołów: występowanie tych ciał w przyrodzie może nam zatem dać wskazówkę co do ich ewentualnego genetycznego związku. I w rzeczy samej minerały uranowe zawsze zawierają ołów. Z teorii naszej możemy jeszcze wyprowadzić bardziej ściśle, nietylko jakościowe wnioski, co do niezbędnej obecności ołowiu w rudach uranowych. Wszak rozkład tych ciał promieniotwórczych, prowadzący prawdopodobnie do utworzenia ołowiu, polega na wyrzucaniu atomów helu: w rudach uranowych wraz z ołowiem

musi się nagromadzać hel i skoro te dwa ciała tworzą się równorzędnie, to ilość helu musi być wogóle proporcjonalna do ilości znajdującego się ołowiu. I ten wniosek ogólnie się potwierdza: im więcej helu zawiera się w jakimś mineralu uranowym, tem większa też jest z nim zawartość ołowiu. Bardzo ścisłej proporcjonalności nie możemy się jednak spodziewać, gdyż w ciągu przemian geologicznych mniejsze lub większe straty okludowanego helu oczywiście zawsze zachodzić musiały. W każdym razie uwzględnienie przyrodzonego występowania pierwiastków nabiera teraz dla nas pierwszorzędnej doniosłości: teoria przemian promieniotwórczych ukazała nam w tem bowiem nie rzecz przypadku, ale wynik ściśle prawidłowego, obliczyć się dającego genetycznego rozwoju.

Rozumowanie na tych zasadach oparte — z większą pewnością, aniżeli kwestyą ostatecznej dezintegracyi radu na ołów — potrafiło rozwiązać pytanie, co do pochodzenia radu. Pytanie to dla teoryi przemian promieniotwórczych większe bodaj posiada znaczenie. Wprawdzie peryod radu dla naszych okresów czasu jest, jak widzieliśmy (str. 64 i 69), dość długi, by preparaty radowe pozornie nie zmieniały swej mocy, jednak peryod ten jest znikomy w porównaniu z okresami geologicznymi, a więc rad musi niewątpliwie stale być wytwarzany przez inne jakieś ciało o wiele dłuższym peryodzie. Ciała takie, których istnienie mimo własności promieniotwórczych chwilowo nie

mniej i nie więcej wymaga tłumaczenia, niż istnienie przyrody całej, nazwijmy pierwotnymi ciałami promieniotwórczemi: rad nie należy do ich liczby.

Kwestyę pochodzenia radu rozstrzygnęły przedewszystkiem piękne badania chemika amerykańskiego B. B. Boltwooda. Zwrócił on uwagę na to, że rad otrzymuje się wyłącznie z rud uranowych, a więc niezmiernie prawdopodobne już jest, że ciałem macierzystem radu musi być uran. Peryod uranu możemy z łatwością oszacować, a peryod ten jest dość długi, aby mózdz uran uważać za ciało pierwotnie promieniotwórcze: istotnie w równej masie, np. na 1 g ciała, promieniotwórczość uranu jest około 2 miliony słabsza od promieniotwórczości radu, a zatem peryod jego tyleż razy od peryodu radu dłuższym być musi (p. str. 60). Na peryod uranu otrzymujemy zatem liczbę $1.8 \cdot 10^8$ (peryod radu) $\times 2 \cdot 10^6 = 3.6 \cdot 10^9$ lat, a więc przeszło miliard lat.

Zważmy dalej, że peryod radu jest tak krótki, że już po upływie jakich 20.000 lat nagromadzić się musi w uranie ilość radu maksymalna, odpowiadająca równowadze promieniotwórczej. Jeśli więc hipoteza, co do pochodzenia radu z uranu jest słuszna, to musi istnieć we wszystkich minerałach stały zupełnie stosunek, trwała proporcjonalność między ilościami znajdującego się radu a ilościami uranu.

Badania Boltwooda wykazały, że tak jest istotnie.

Oznaczenie drobnych ilości radu, z jakimi tu mamy do czynienia, polega zawsze na tem, że badane ciało np. rudę uranową roztwarza się tak, by nie doznać straty wywiązujących się gazów — służyć będą do tego rozmaite dość proste przyrządy, zależnie od tego, w czym rudę roztwa-

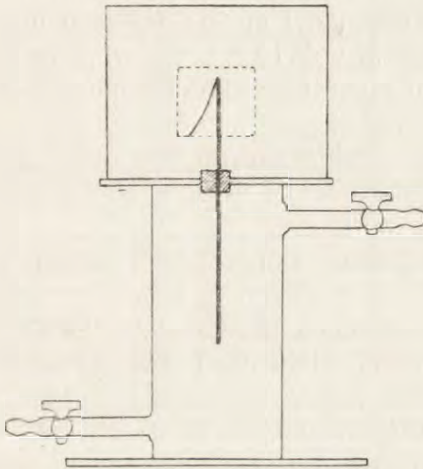


Fig. 20.

rzamy — a następnie roztwór się wygotowuje przez czas dłuższy, zbierając cały zasób wygotowanych gazów i powietrza np. do flaszek tubulowanych. Powietrze to wraz z zawartą w niem emanacją przeprowadza się następnie do elektroskopu (p. ryc. 20), który w tym celu poprzednio się nieco ewakuuje. Po upływie 3 godzin od chwili przepędzenia emanacji do elektroskopu, gdy więc

emanacja wytworzy już maksymalne swe ilości radu *A*, radu *B* i radu *C*, mierzy się szybkość wyładowywania elektroskopu. Elektroskop kalibruje się mierząc w nim emanację wygotowaną z oznaczonej ilości radu, np. z 10^{-5} g radu (zawartej np. w chlorku baro-radowym o znanej procentowości radu). W ten sposób za pomocą pomiarów emanacji można ściśle oznaczać ilości radu, wynoszące ok. 10^{-12} g — a więc ilości znacznie mniejsze, niż te, które są dostępne nawet dla analizy widmowej.

W próbie minerału po wygotowaniu oznacza się zawartość uranu zwykłymi metodami analizy chemicznej.

Doświadczenia Boltwooda wykonane były nad minerałami uranowymi rozmaitego pochodzenia: z Ameryki północnej, z Czech, z Norwegii, zarówno nad takimi, gdzie uran jest głównym składnikiem, jak np. smoła uranowa z 70⁰/₀ uranu, uranofan z 50⁰/₀, karnotyt z 22⁰/₀, jak też nad takimi, gdzie uran jest tylko nieznaczną domieszką, jak np. w fergusonicie (5⁰/₀ uranu), w monazycie (0.4⁰/₀ uranu). We wszystkich tych przypadkach, ze ścisłością nie mniejszą nad 10⁰/₀ wykryto proporcjonalność między ilością uranu a ilością radu, mierzoną przez wyładowanie elektroskopu, jak podano wyżej. Skoro zaś minerały takie, jak toryt i monazyt zawierają przeważnie tor, ciało równie, jak uran, pierwotnie promieniotwórcze (p. niżej str. 111) — a mimo to i tam stosunek radu do uranu jest niezmienny — to wynika ztąd, że tylko

uran jest ciałem macierzystym radu, tor zaś, ani żadne inne pierwotne promieniotwórcze ciało radu w swym cyklu rozwojowym nie tworzy.

Z przeciętnej doświadczeń Boltwooda wynika, że w stanie równowagi promieniotwórczej na 1 g uranu przypada $3.4 \cdot 10^{-7}$ g radu¹⁾. Oczywiście więc, że nie mogą istnieć rudy uboższe i bogatsze w rad: wszystkie zawierają stosunkowo tę samą ilość radu, a najlepszymi oczywiście do przeróbki będą te, które zawierają najwięcej uranu — do takich należą zwłaszcza blenda czeska i półnoen amerykańska.

Wspominaliśmy wyżej, że według danych dyrektorów fabryk rządowych w Joachimstal z 3.3 ton rudy otrzymuje się 1 g RaCl_2 . Kładąc zawartość uranu w blendzie czeskiej okrągło na ok. 75% i zważywszy, że według ciężarów atomowych w chlorku radowym jest (okrągło) 78% radu,

¹⁾ p. B. B. Boltwood. American Journal of Science 25. (1908) 296.

Ztąd, jeżeli chodzi o jednostkę zawartości radu — zamiast preparatów baro-radowych, dostarczanych przez fabryki, za których ścisłość i uczciwość ręczyć niepodobna — można wziąć pierwszy lepszy minerał uranowy, np. blendę joachimstalską o znanej według analizy chemicznej zawartości uranu. W pewnej ilości takiego minerału znana więc już jest również ilość radu i ta może być wzięta za jednostkę do kalibrowania przyrządów i redukcowania pomiarów. Jestto zwłaszcza wygodne w badaniach nad ciałami słabo promieniotwórczymi, np. nad wodami mineralnymi, skałami i t. d.

widzimy, że w przeróbce masowej wyzyskano z 1 g uranu

$$\frac{0.78}{2.20 \cdot 10^6} = 3.5 \cdot 10^{-7} \text{ g radu,}$$

a więc stosunek ściśle maksymalny, ten sam, co znaleziony przez Boltwooda.

Skoro, jak widzieliśmy, rad w stosunkowo niedługim czasie, bo już po upływie ok. 400 lat (10 razy peryod radu D) znaleźć się musi w równowadze z produktami swej dezintegracji, więc minerały uranowe, gdzie już równowaga promieniotwórcza: uran-rad jest osiągnięta, zawierają również w stanie równowagi wszystkie inne następne produkty. Ponieważ ilości ciał promieniotwórczych, które znajdują się ze sobą w równowadze, mają się do siebie odwrotnie, jak ich peryody — więc możemy obliczyć, ile każdego ze składników promieniotwórczych szeregu uranoradowego znajduje się w mineralu promieniotwórczym i ztąd wyliczyć dalej, ile każdy z nich przyczynia się do ogólnej promieniotwórczości mineralu. Wspominaliśmy we wstępie, że minerały uranowe mają promieniotwórczość — mówimy tu teraz tylko o α promieniotwórczości — ok. 5 razy większą od promieniotwórczości takiej samej ilości uranu. Widzimy teraz, że możemy nawet obliczyć, z jakich części, odpowiadających poszczególnym ciałom promieniotwórczym, promieniotwórczość ta się składa. Z drugiej strony za pomocą szczegółowej analizy chemiczno-promieniotwórczej Boltwood porozdzielał produkty

α promieniotwórcze z rud uranowych i zmierzył ich stosunkową dzielność. Bilans α promieniotwórczości uranowej w jednostkach α promieniotwórczości uranu przedstawia się według doświadczeń Boltwooda¹⁾ w sposób następujący:

Pierwiastek	Dzielność α promieniotwórcza
Uran	1'00
Jonium ²⁾	0'34
Rad	0'45
Emanacya radowa	0'62
Rad <i>A</i>	0'54
Rad <i>C</i>	0'91
Rad <i>F</i> (polon)	0'46
Ciała aktynowe ²⁾	0'28
<hr/>	
Promieniotw. całkowita	4'64 \times Dzieln. uranu.

¹⁾ p. Amer. Jour. of Science 25, (1908) 297. Metoda Boltwooda polega na tem, że zapomocą wielokrotnie powtarzanych strącań i rozdzielań chemicznych rozłącza on poszczególne ciała promieniotwórcze, i ich dzielność promieniotwórczą, co do α promieni, bada w identycznych warunkach, mianowicie tak, by absorpcya α promieni w samym ciele promieniującym była znikoma. W tym celu z ciała badanego, które składa się z produktu promieniotwórczego, oraz z objętego ciała niepromieniotwórczego, z którym tamto zostało strącone, sporządza się cieniutkie warstewki, rozprawdzając szczoteczką zawieszinę tego ciała w chloroformie. Po ulotnieniu chloroformu pozostaje cieniutka warstewka, mocno przylegająca, o powierzchni kilku cm², ważąca kilka centigramów; warstewka ta jest tak cienka, że absorpcyę α promieni w niej można pominąć.

²⁾ Co do jonium i ciał aktynowych p. niżej str. 98 i str. 119.

Promieniotwórczość rudy uranowej, obliczona natomiast z ilości składników promieniotwórczych, znajdujących się w równowadze w rudzie uranowej, daje na promieniotwórczość liczbę $4.69 \times \text{Ur.}$, a więc wynik ściśle zgodny z wynikiem doświadczenia.

Skoro proporcjonalność między ilością uranu i radu w rudach uranowych wskazuje niezbitcie na uran, jako na substancję macierzystą radu, to oczywiście powstaje pytanie, czy nie możemy eksperymentalnie wprost zaobserwować tworzenia się, narastania radu z uranu. Znając peryod radu i znając maksymalną ilość radu, która na gram uranu przypada w minerałach ($3.4 \cdot 10^{-7}$ g) można łatwo obliczyć, ile z 1 g uranu powstałoby mogło radu w pewnym określonym przeciągu czasu. Istotnie, jak wiadomo z wzoru logarytmicznego, w ciągu peryodu narasta połowa ilości maksymalnej, t. j. w ciągu 2000 lat z 1 g uranu powstanie $1.7 \cdot 10^{-7}$ g radu, w ciągu 1000 lat połowa, w ciągu 500 — ćwierć tej ilości i t. d. W ciągu 2 lat zatem z 1 g uranu powstałoby więc powinno okrągło

$$\frac{1.7 \cdot 10^{-7}}{2^{10}} = 1.6 \cdot 10^{-10} \text{ g radu.}$$

W roztworze zawierającym np. kilkaset gramów soli uranowej, po upływie 2 lat znalazłaby się ilość radu wynosząca około 10^{-8} g radu, a tę już ilość bardzo łatwo oznaczyć i zmierzyć można przez wypędzenie emanacji, którą ona wywiązuje.

To też istotnie doświadczenia takie wykonywano wielokrotnie — zawsze jednak z ujemnym wynikiem. W czystych solach uranowych tworząca się ilość radu była zawsze wielokroć razy mniejsza od tej, którą obliczyliśmy poprzednio na zasadzie znanego peryodu radu.

Rachunek nasz jest jednak słuszny tylko w przypuszczeniu, że rad jest bezpośrednim produktem uranu, lub też że ciała przejściowe między temi dwoma pierwiastkami mają peryody znacznie krótsze od okresu, w ciągu którego robiono doświadczenia. Jeśli bowiem w szeregu genetycznym między uranem a radem przypada jakiś pierwiastek o dłuższym peryodzie, to oczywiście ilość utworzonego radu z uranu musi się okazać mniejszą, bo najpierw nagromadzić się musi ów produkt przejściowy, a dopiero później ustawi się jego równowaga promieniotwórcza z radem.

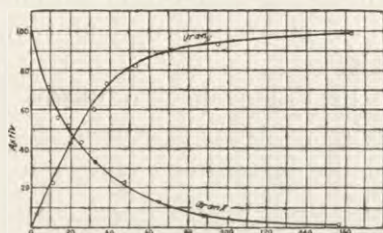
Dochodzimy zatem do wniosku, że rad nie jest bezpośrednim produktem rozkładu uranu, lecz że muszą między nimi istnieć inne ciała promieniotwórcze. Wzgląd na ciężary atomowe tych pierwiastków skłania nas do tego samego wniosku. Uran bowiem ma ciężar atomowy 238,5, zaś rad 226, najprawdopodobniej więc aż 2 produkty α promieniotwórcze muszą przedzielać te pierwiastki (o ciężarach atomowych ok. 234 i 230). Rozpatrzmy więc teraz szczegółowiej szereg promieniotwórczy, rozpoczynający się od uranu.

Uran, Uran X i Jonium.

Sole uranu, od których badania rozpoczęła się nauka promieniotwórczości, okazują zarówno α i β promieniowanie. Na solach uranu właśnie stwierdzono po raz pierwszy, że ciała znane tylko z cech promieniotwórczych, mogą być rozdzielane za pomocą metod chemicznych i że są one określone indywiduami, o których tak, jak o innych ciałach, chemicznie rozumować możemy. W roku 1900 William Crookes okazał, że α i β promieniotwórczość soli uranowych łatwo rozdzielić się dają i są zatem wywołane przez oddzielne ciała. Rozdział taki daje się dokonać w rozmaity sposób: jeśli n. p. roztwór azotanu uranowego skłócimy z eterem, przeważna część soli rozpuści się w eterze i będzie posiadała prawie wyłącznie α promieniotwórczość; natomiast część rozpuszczona w wodzie będzie okazywała prawie całą β promieniotwórczość. Również przez wyklócenie roztworu soli uranowej z węglem drzewnym lub świeżo strąconym wodorotlenkiem żelazowym można w tych ciałach stałych zaabsorbować całe ciało β promieniotwórcze¹⁾. Crookes nazwał to

¹⁾ Istota zjawisk, na których polega »chemiczne« oddzielanie jednych ciał promieniotwórczych od innych, nie jest jeszcze należycie wyświetlona. Wobec niezmiernie drobnych ilości ciał promieniotwórczych, z którymi mamy tu do czynienia, są to prawdopodobnie zjawiska absorpcji, a nie zwykle chemiczne strącanie lub roztwarzanie. Czy zawsze pierwiastek promieniotwórczy jest chemicznie analogiczny do niepromieniotwórczego pierwiastka, któremu w reakcjach

ciało UrX i nazwa ta utrzymała się dotąd, choć niezgodna jest z ogólnie przyjętą zasadą terminologii ciał promieniotwórczych, gdzie kolejne produkty dezintegracji przyjęto nazywać porządkowymi literami alfabetu A, B, C i t. d.



Ryc. 21.

Uran X ma stosunkowo krótki peryod 22 dni i jest bezpośrednim produktem uranu¹⁾. Uran, pozbawiony uranu X , z wolna odzyskuje β promieniotwórczość — krzywa narastania UrX wykazuje ten sam peryod 22 dni, wedle którego zanika β promieniotwórczość oddzielonego UrX . (p. ryc. 21).

towarzyszy — jest to kwestya nierozstrzygnięta, choć doniosła, gdyż mogłaby rzucić światło na własności tych ciał promieniotwórczych, które innemi metodami poznane być nie mogą. Ze względu na nieskomplikowane przemiany, którym ulega, UrX dobrze się nadaje do takich badań.

¹⁾ W ostatnich czasach J. Debierne (Le Radium 4, (1909) podał wiadomość o nowym pierwiastku promieniotwórczym, radiouranie, którego miejsce w szeregu genetycznym przypadałoby między uranem a uranem X . Zawczasem jednak jeszcze sprawę radiouranu uważać za rozstrzygniętą.

Ani uran, ani uran X nie wywołują promieniotwórczości indukowanej — nie wydzielają zatem żadnej emanacji gazowej.

Po zupełnym zaniku UrX , co trwa około kilku miesięcy, nie obserwujemy już żadnych zjawisk promieniotwórczych, następnym zatem produktem musi być jakieś ciało niepromieniotwórcze o długim peryodzie.

Jeden z brakujących produktów promieniotwórczych między UrX a radem — ten, który jest zapewne bezpośredniem ciałem macierzystem radu — odkrył w roku ubiegłym B. B. Boltwood w rudzie uranowej, gdzie oczywiście muszą się znajdować w równowadze promieniotwórczej wszystkie produkty dezintegracji uranu. Pierwiastek ten nazwał Boltwood »Jonium«. W reakcyach chemicznych towarzyszy on torowi tak uporczywie, że nie udało się dotąd oddzielić go od toru i w torze zagęszczać, rozłączając frakcye toro-joniumowe na frakcye bogatsze i uboższe w jonium. Ciało to wysyła α i β promienie, przyczem jego α promienie są wyjątkowo słabo przenikliwe, gdyż w powietrzu pod zwykłym ciśnieniem przebiegają zaledwie ok. 2·8 cm.

Stanowisko jonium w szeregu urano-radowym i to bezpośrednio przed radem, stwierdza się tem, że promieniotwórczość jonium wydaje się niezmienna — a więc jest to ciało o długim peryodzie — i tem, że w jonium ciągle narasta rad z szybkością, która w krótkich nam dostępnych przeciągach czasu jest stała i niezmienna. Jonium i rad

więc, albo nie są przedzielone żadnym ciałem promieniotwórczym, albo też mogą istnieć między nimi tylko produkty o bardzo krótkim życiu — co do których istnienia nie mamy jednak żadnych prawdopodobnych wskazówek.

Wykrycie jonium, z którego wytwarza się rad, pozwala zmierzyć bezpośrednio peryod radu. Ilość jonium, którą wydobyć można z minerału uranowego, jest oczywiście tą ilością, która była w równowadze z ilością obecnego uranu i radu. Zmierzywszy szybkość, z jaką ta właśnie ilość jonium rozkłada się na rad, mierzymy tem samem ilość radu, która ze znanej nam, całkowitej obecnej w mineralu ilości się rozkłada. Mamy zatem ilość radu J_0 , która się ma rozłożyć, i szybkość początkowego rozkładu

$$\frac{dJ_0}{dt} = \lambda J_0$$

z tą możemy więc wyliczyć λ , a zatem dalej i peryod

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Doświadczenia Boltwooda na peryod radu dały przeciętnie od 1900 do 2400¹⁾ lat. Peryod ten wynosi zatem okrągło ok. 2000 lat, zgodnie z tem, jak określiliśmy go poprzednio innemi metodami. Ścisłość metody Boltwooda zależy od zupełnego wyodrębnienia jonium z rudy i zebrania całej ilości

¹⁾ Amer. Journ. of Science 25. (1908) 506.

obecnego jonium — podobnie, jak w metodzie polegającej na zmierzeniu objętości emanacji (p. str. 63), wynik zależy od absolutnej czystości zebranej emanacji. Że wyniki tak dwu odmiennych rodzajów doświadczeń okazały się zgodne i identyczne z rezultatami pomiarów elektrycznych — to świadczy wymownie, do jakiego stopnia ścisłości posuwały się dzisiaj metody radiochemiczne.

Szereg genetyczny urano-radowy, który omówiliśmy szczegółowo w tym rozdziale, daje się przedstawić w następującej tablicy ogólnej (p. str. 101).

Szereg urano-radowy.

TABL. I.

Ciało promieniotwórcze i rodzaj promieniowania	Ciężar atomowy	Peryod	Ilość znajdująca się w równowadze z 1 gramem
Uran $\nearrow \alpha$	238.5	10 ⁹ lat	1 g
↓ $\nearrow \beta + \gamma$ UrX	234 ?	22 dni	
↓ $\nearrow \alpha$ Jonium		ok. 2 lat	
↓ $\nearrow \alpha$ Rad	226.4	ok. 1800 lat	$\left\{ \frac{3.4 \cdot 10^{-7} \text{ g}}{1 \text{ g}} \right.$
↑ $\nearrow \alpha$ Emanacya	222	3.78 dni	
↓ $\nearrow \alpha$ RaA	218 ?	3 min.	
↓ RaB	214 ?		
↓ $\nearrow \alpha$ RaC $\rightarrow \beta + \gamma$	214 ?	26 min.	
↓ RaD	210 ?	ok. 40 lat	2.10 ⁻² g
↓ $\nearrow \beta$ RaE	210 ?	6.2 dni	
↓ $\nearrow \alpha$ RaF	210 ?	143 dni	2.10 ⁻⁴ g
↓ Ołów ?	206.9		

IV.

ENERGETYKA PRZEMIAN PROMIENIOWÓRCZYCH.

Rozpatrzyliśmy dotąd przemiany promieniotwórcze ze względu na ciała, które w tych przemianach powstają. Obecnie musimy rozpatrzeć zmiany energii, które tym zjawiskom towarzyszą. Już w r. 1903, kiedy otrzymano silniejsze preparaty radowe, Curie i Laborde dostrzegli, że preparat taki jest stale cieplejszy od otoczenia: różnica wynosiła około 1° . Preparat radowy wydziela więc stale ciepło i o ile nie zdąży się ono dość szybko rozejść w otoczeniu, powoduje to stale wyższą temperaturę związków radowych. Dezintegracja ciał promieniotwórczych jest więc procesem silnie egzotermicznym.

Oznaczenie ilości ciepła, wydzielanego przez rad, wykonać się daje dzisiaj zapomocą zwykłych metod kalorymetrycznych: według najnowszych pomiarów, wykonanych z preparatami radu, należącymi do Akademii Wiedeńskiej, okazuje się, że 1 g radu w równowadze ze swemi krótkotrwa-

łemi produktami rozkładu: emanacją aż do radu *C* wydziela na godzinę 113 kaloryi. W tem wywiązaniu ciepła biorą udział wszystkie α promieniotwórcze ciała znajdujące się w radzie: a to mianowicie sam rad daje około 25% całkowitej ilości ciepła, emanacja i rad *A* — ok. 44%, rad *C* wreszcie — ok. 31%. Produkty nie wydzielające promieni α , np. rad *B* tylko w znikomo drobnym stopniu przyczyniają się do wywiązania ciepła. Ciepło, wytwarzane przez rad, pochodzi zatem z kinetycznej energii cząstek α : gdy te w swym pędzie są zatrzymane i zaabsorbowane bądź przez samo ciało promieniotwórcze, bądź przez szkło rurki, w którym ciało to się znajduje, ich energia kinetyczna zamienia się na ruch molekularny, który odczuwamy jak ciepło.

Skoro znamy zaś liczbę, masę i szybkość wyrzucanych α cząstek, możemy łatwo zliczyć ich zasób energii kinetycznej, a więc i ciepło, które wytworzyć powinny. Wiemy, że masa cząstki α równa się $6.7 \cdot 10^{-24}$ g, v zaś zależnie od produktu promieniotwórczego waha się od 1.6 do $2.5 \cdot 10^9$ cm/sec, przeciętnie zatem $2 \cdot 10^9$ cm/sec; liczba wyrzucanych cząstek z radu, emanacji, radu *A* i radu *C* wynosi zaś $4.34 \cdot 10^{10}$. Energia kinetyczna wynosi więc

$$4.34 \cdot 10^{10} \cdot 6.7 \cdot 10^{-24} \frac{(2 \cdot 10^9)^2}{2} = 1.82 \cdot 10^6 \text{ ergów}$$

na sekundę, czyli 156 kaloryi na godzinę.

Liczba ta, jak widzimy, z liczbą znalezioną przez doświadczenie, zgadza się dobrze — skoro

zważymy, że za v wzięliśmy tylko nieścisłą wartość przeciętną.

Łatwo możemy wyliczyć dalej, że ilości energii, wydzielane w przemianach promieniotwórczych są bez porównania większe od tych, jakie spotykamy we wszelkich innych znanych nam zjawiskach chemicznych.

Dla przykładu obliczmy np. ilość energii, którą w ciągu swego rozkładu wydać może ilość emanacji, wywiązana z 1 g radu. Jeden gram radu wraz z produktami dezintegracji wydaje na godzinę 113 kaloryi, w czym na rad sam przypada 25⁰/. Na emanację zatem i produkty po niej następujące przypada okrągło 85 kaloryi. W ciągu całego życia tej emanacji, która aż do zupełnego zniknięcia potrzebuje kilku tygodni, ilość energii wydzielona okaże się około 11000 kaloryi¹⁾. Objętość emanacji, która tę ilość ciepła przez całkowity rozkład swój wydała, wynosi, jak widzieliśmy (p. str. 63), 0·58 mm³. Jeden centymetr sześcienny emanacji wywiązałby zatem okrągło $2.10^3 \cdot 11000 = 2.2 \cdot 10^7$ kaloryj.

Ze znanych reakcyj chemicznych jedną z najbardziej egzotermicznych jest spalanie wodoru na wodę. Spalenie 1 cm³ wodoru w tlenie wywiązuje

¹⁾ Ilość ta otrzymuje się, jako całka ze wszystkich ilości ciepła, wydzielanych w każdej jednostce czasu. Te ilości zanikają według znanego nam już wzoru logarytmicznego:

$$E = \int_0^{\infty} 85 \cdot e^{-\lambda t} dt = \frac{85}{\lambda} = \frac{85}{0.0076} = 11000 \text{ kaloryj.}$$

jednak tylko ok. 3 kaloryi. A zatem emanacja w rozkładzie swym wywiązuje $\frac{2 \cdot 2 \cdot 10^7}{3} = 7 \cdot 10^6$,

a więc siedm milionów razy więcej ciepła, niż ta sama objętość wodoru, w najbardziej egzotermicznej swej reakcyi. Przemianom promieniotwórczym towarzyszą wydzielania energii zupełnie innego rzędu, niż te, które obserwujemy w reakcyach chemicznych; to również potwierdza teorię, która w zjawiskach promieniotwórczości upatruje reakcyę odbywającą się wewnątrz atomów. Ogromny zasób energii wydzielanej w przemianach promieniotwórczych tłómaczy nam też, dlaczego nie możemy np. za pomocą podwyższenia temperatury zmienić szybkości tych przemian. Podniesienie temperatury zwiększa wprawdzie zasób energii rozkładającego się ciała promieniotwórczego, ale zmiana ta jest nader drobna w porównaniu z zasobami energii atomowej, która objawia się w rozkładzie¹⁾.

Ten wielki zasób energii, towarzyszący przemianom atomowym, wyjaśnia też dlaczego próby

¹⁾ Prócz tego, wpływ temperatury na reakcyę chemiczną polega głównie na zmianie tych niezupełnie jeszcze ściśle określonych własności, którym nadać możemy ogólną nazwę »oporu chemicznego« (p. Nernst. Theoret. Chemie, V. Wyd. str. 670). W budowie atomu, który w rozmaity sposób wyobrażamy sobie jako poruszający się kompleks ładunków elektrycznych dodatnich i ujemnych, nie przewidujemy zjawisk analogicznych do tego oporu chemicznego, lub do tarcia w mechanice.

dowolnej przemiany zwykłych pierwiastków niepromieniotwórczych, nie były dotąd uwieńczone powodzeniem i pomyślny ich wynik jest nadal bardzo wątpliwy. Dla przemiany pierwiastków musielibyśmy bowiem nagromadzić w możliwie małej masie potężne zasoby energii — a środki wszystkie, które do wytwarzania energii posiadamy, do celu tego zapewne okażą się za słabe.

Może najprędzej możliwą byłaby dowolna synteza pierwiastku w szeregu promieniotwórczym. Skoro rozkład radu na emanację i hel wytwarza ciepło, to możliwość odwrotnej syntezy radu z emanacji i helu dałaby się teoretycznie przewidzieć przez podniesienie tych ciał do wysokiej temperatury i przez zwiększenie koncentracji jednego z nich, a więc helu. Przepuszczanie iskier elektrycznych przez emanację, rozproszoną w helu zjonizowanym pod zwykłym ciśnieniem n. p., mogłoby urzeczywistnić te warunki.

Z liczb, podanych wyżej, łatwo możemy obrać, że n. p. 1 kilogram emanacji radowej mógłby w ciągu kilku tygodni swego rozkładu dostarczyć ogółem 10^{12} kilogrammetrów i miałby początkowo dzielność ok. 20.000 koni parowych. Zważmy, jak kolosalną musi być instalacja maszynowa, która mogłaby dawać tę ilość energii i przypomnijmy, że kilogram emanacji (skroplonej) zająłby zaledwie 150 cm^3 , czyli zmieściłby się w niewielkiej szklance, a łatwo możemy już wyobrazić sobie, jak potężne zasoby energii potencjalnej nagromadzone są w atomach i jak niezmierny

przewrót techniczny musiałby powstać, gdyby te zasoby mogły się nam stać dostępne. Nie możemy ich jednak dotąd wyzyskiwać dowolnie, lecz jedynie dają się one obserwować w przemianach ciał promieniotwórczych, których ilość, a zwłaszcza koncentracja, zbyt są małe, by mogły mieć znaczenie dla przemysłowych celów ludzkości.

Sole radowe, jako źródło energii, są w stanie wywoływać cały szereg reakcji chemicznych, przede wszystkim zaś rozkładów, połączonych z pobraniem energii.

Działanie to wyjaśnić sobie możemy w ten sposób, że cząstki α uderzając z wielkim pędem o drobiny, rozbijają je na składowe części i wywołują rozkład.

Jeszcze w roku 1903, gdy otrzymano mocniejsze preparaty radowe, Curie dostrzegł, że roztwór radu w wodzie stale wywiązuje wodór i tlen, a więc że woda tego roztworu się rozkłada. Z całej ilości energii wydzielanej przez rad w roztworze tylko drobna ilość, wynosząca ok. 1%, zużywa się na ten rozkład: reszta wydziela się w postaci ciepła, a więc cząstki α , uderzając o drobiny wody, w której się absorbują, tylko w stosunkowo rzadkich zderzeniach rozbijają te drobiny.

Badania nad reakcjami chemicznymi, wywołowanymi przez α promienie, prowadził następnie znacznie obszerniej Ramsay, używając do tego celu przeważnie emanacji radowej. Emanację radową wprowadza się w zetknięcie z badanymi

gazami lub roztworami, i po przeciągu kilku tygodni, gdy emanacja się już rozłożyła — bada się wynik działania spektroskopowo lub zwykłymi metodami chemicznymi.

Ramsay przekonał się, że pod wpływem emanacji radowej amoniak NH_3 rozkłada się na azot i wodór, podobnież arsenowodór AsH_3 na arsen i wodór; chlorowodór HCl — na chlor i wodór, bezwodnik węglowy CO_2 na tlen, węgiel i tlenek węgla. Działanie emanacji nie polega jednak zawsze i wyłącznie na rozkładzie; przeciwnie pod wpływem emanacji mogą również zachodzić i syntezy egzotermiczne: wodór i tlen łączą się częściowo na parę wodną, tlenek węgla i tlen dają bezwodnik węglowy.

Prawa, a nawet prawidłowości tych reakcji, wywołanych przez emanację — nie są jeszcze dostatecznie poznane, gdyż do ich badania potrzebne są znaczne ilości emanacji, takie np., jakie otrzymać można z kilku decygramów radu, a takimi ilościami tego ciała tylko niewielu uczonych rozporządzać może.

Wśród reakcyj, opisanych przez Ramsaya, powszechne zainteresowanie wzbudził podany przezeń rzekomy rozkład miedzi na lit. Ramsay twierdził, że w roztworach soli miedziowej, które dłuższy czas stykały się z emanacją radową, odnaleźć można następnie za pomocą spektroskopu sód i zwłaszcza lit. Doświadczenia swoje tłumaczył Ramsay w ten sposób, że pod wpływem

promieni α atomy miedzi ulegają rozkładowi, podobnie jak to czynią drobiny rozmaitych związków chemicznych. Przez rozkład taki powstają z pierwiastków o wyższych ciężarach atomowych pierwiastki o ciężarach mniejszych, należące jednak do tego samego szeregu w układzie peryodycznym: a więc z miedzi np. pierwiastki potasowcowe, jakimi są sól i lit. Podobnież z roztworu azotanu torowego miał Ramsay otrzymywać bezwodnik węglowy — a więc byłaby to zamiana toru na węgiel, stojący w tym samym szeregu peryodycznym.

Doświadczenia te, któreby po raz pierwszy ziściły dowolną transmutację pierwiastków, nie ostały się jednak wobec krytyki innych eksperymentatorów: ci nie potwierdzili ani razu wyników Ramsaya. Pani Skłodowska-Curie powtórzyła próby Ramsaya w naczyniach platynowych, inni w naczyniach kwarcowych — i nie dostrzeżono zgoła wytwarzania się litu. Z drugiej zaś strony badanie spektroskopowe nad rozmaitemi zwykłymi ciałami: nad rozmaitemi rodzajami szkła, lub różnymi solami, znajdującymi się w handlu — okazały, że lit jest w małych, spektroskopowych ilościach pierwiastkiem pospolitym, od którego obecności niełatwo się ustrzedz. Takie zatem przypadkowe zanieczyszczenia spowodowały zapewne wynik doświadczeń Ramsaya: zapowiedziana przezeń dowolna transmutacja pierwiastków — aczkolwiek w tej formie prawdopodobna — pozostaje jednak

jeszcze do odkrycia i dotąd jeszcze nie jest skuteczniona ¹⁾).

¹⁾ Również eksperymentalnie w ostatnim roku obalono rzekomo dokonaną przez Ramsaya zamianę emanacji na neon. Ramsay twierdził, że emanacja, gdy się rozkłada w obecności wody, wytwarza neon, który dostrzeżono spektroskopowo. Z punktu widzenia tak świetnie potwierdzonej wciąż teorii przemian promieniotwórczych, odkrycie Ramsaya jest zupełnie nieprawdopodobne, bowiem α promieniowanie polega na wywiązywaniu helu, zaś ostatecznym rezultatem dezintegracji radu jest zapewne ołów, lub dla krótszych przeciągów czasu chwilowo rad *D*. Kierunek zaś przemian nie może się zmienić, czy cząstki α są pochłaniane wprost w szkłe przyrządu, czy też w obecnej tam wodzie.

Istotnie też Rutherford kilkakrotnie powtórzył doświadczenie Ramsaya — zawsze ze skutkiem ujemnym. Nieszczelność przyrządu zapewne spowodowała przedostanie się powietrza i zawartego w niem neonu.

V.

SZEREGI PROMIENIOTWÓRCZE TORU I AKTYNU.

Szereg promieniotwórczy urano-radowy nie jest jedynym, jaki znamy. Przeciwnie, już w roku 1898 dostrzeżono, że również i związki toru posiadają własności promieniotwórcze; zaś w r. 1900 Debierne w odpadkach rudy uranowej wykrył obecność nowego jeszcze ciała promieniotwórczego — aktynu.

Rozpatrzmy obecnie ciąg przemian, którym ciała te ulegają. Nie są one jeszcze tak dokładnie zbadane, gdyż — jak zobaczymy następnie — między ich charakterystycznymi emanacjami a ciałami pierwotnie promieniotwórczemi stoją ciała przejściowe o własnościach ciał stałych, których oddzielenie i identyfikowanie napotyka na wielkie trudności.

Badanie przemian toru zasługuje na specjalną uwagę ze względów historycznych, na związkach toru bowiem Rutherford poraz pierwszy w r. 1902 odkrył materialną naturę emanacji, oraz ustalił teorię przemian: zanikania i odradzania się ciał promieniotwórczych.

Ówczesne badania Rutherforda wykazały, że z preparatów torowych można przez kilkakrotne strącanie toru amoniakiem otrzymać tlenek (lub wodorotlenek) torowy, o daleko słabszej promieniotwórczości, natomiast po odparowaniu roztworu otrzymywano pozostałość bardzo czynną. Ta pozostałość utracala swą promieniotwórczość według prawa logarytmicznego z peryodem 3·6 doby — z takim samym peryodem narastała też promieniotwórczość wielokrotnie strąconego tlenku toru. Stosunki więc mamy tu zupełnie analogiczne do tych, które spotykaliśmy u uranu — z tą tylko różnicą, że mamy tu do czynienia w obu ciałach z promieniowaniem α . Z preparatów torowych daje się wyodrębnić zatem pewne ciało ThX , — o peryodzie, jak wzmiankowaliśmy, 3·6 doby.

Preparaty torowe — ale tylko gdy nie są pozabawione ThX — wydzielają ze siebie charakterystyczną emanacją: emanacja ta więc jest produktem rozkładu ThX i to produktem bezpośrednim, gdyż ilości emanacji, wydzielone w rozmaitych czasach z ThX , są coraz mniejsze, według wzoru logarytmicznego o peryodzie ThX właściwym.

Własności emanacji torowej poznaje się za pomocą tych samych metod, które szczegółowiej opisaliśmy u radu. Ze względu jednak na krótki okres życia emanacji torowej, — o wiele krótszy, aniżeli okresy powstających z niej produktów, — peryod zanikania emanacji musi być oznaczony bezpośrednio zapomocą promieniowania samej emanacji, a nie zapomocą jej produktów.

Uskutecznić to można np. w przyrządzie wyobrażonym już poprzednio na rycinie 10 (str. 47). Przez przyrząd przepuszcza się strumień powietrza, który porywa emanację z preparatu torowego. Następnie szybko zamyka się wypływ i dopływ powietrza do kamery jonizacyjnej i elektrometrycznie przez kompensację szybko mierzy się dzielność promieniowania. Okazuje się w ten sposób, że peryod emanacji torowej jest bardzo krótki, wynosi bowiem zaledwie 54 sek., a więc już po upływie 10 minut wszelka wydzielona ilość emanacji torowej aż do śladów się rozłoży. Przepędzając emanację torową nad rozmaitymi odczynnikami chemicznymi, przekonano się, że należy ona, podobnie jak emanacja radowa, do grupy helowców — gazów nieczynnych. Skrapla się ok. -130° .

Emanacja torowa wywołuje również zjawiska promieniotwórczości indukowanej, co podobnie, jak u radu, tłumaczy się przez powstanie nowych ciał radioaktywnych, o których naturze i własnościach krzywa zanikania, oraz próby rozdziału więcej powiedzieć mogą. Dla wyjaśnienia zjawisk tu obserwowanych wystarczyło przyjąć, że przez rozkład emanacji, która sama jest tylko α -promieniotwórczą, powstaje najpierw ciało *ThA*, β promieniotwórcze o peryodzie 10 \cdot 6 godzin, następnie *ThB* niepromieniotwórczy z peryodem 55 minut, i wreszcie *ThC*, wydzielający promienie α , β , γ , o peryodzie bardzo krótkim, wynoszącym kilkanaście sekund. Z tego powodu osady promieniotwórcze emanacji torowej (a więc *ThA*+*ThB*+*ThC*)

+ ThC) po upływie kilkudziesięciu minut potrzebnych do wytworzenia równoważnej ilości ThB i ThC , zanikają następnie z całkowitym pozornym peryodem 10·6 godzin, a więc z peryodem ThA , które jest ciałem najdłużej żyjącem z tych wszystkich trzech produktów. Na istnienie ciał tych ThA , ThB i ThC prócz krzywych aktywności wskazują jeszcze również próby rozdzielania ich np. przez ogrzewanie.

Na zasadzie opisanych tu faktów nie możemy być jednak jeszcze pewni, czy ThX jest bezpośrednim produktem toru, czy też nie. Istotnie wyobraźmy sobie, że między torem a ThX znajduje się pewien jeszcze produkt przejściowy, ale że nie znamy reakcyi, które pozwoliłyby go odzielić od toru, zaś środek, którym ThX oddzielaliśmy od toru (mianowicie strącanie amoniakiem) pozostawia ów produkt przy torze. Właściwości, które zatem dotąd przypisywaliśmy torowi, byłyby w istocie rzeczy własnościami toru wraz z owym produktem przejściowym.

W rzeczy samej okazało się też istotnie, że szereg toru tak, jak go wykryły początkowe badania Rutherforda, nie był zupełny. W przeróbce chemicznej pewnego minerału torowego, torianitu cejlońskiego, bardzo bogatego w tor (ok. 78% ThO_2), O. Hahn wykrył ciało promieniotwórcze, które nie zawierało już toru i na tę samą masę było przeszło 200.000 razy od zwykłego toru czynniejsze. Ciało to jednak tworzyło ThX i wydzielało zwykłą emanację torową, należało zatem nie-

wątpliwie do szeregu toru, a miejsce jego przypadać musi przed ThX , który zeń bezpośrednio powstaje. Ciało to nazwano radiotorem: wytwarza ono wyłącznie α promienie.

Radiotor ma stosunkowo dość długi peryod, wynoszący ok. 2 lat — oddzielenie go od preparatów torowych jest rzeczą bardzo trudną, do czego niema jeszcze pewnej metody.

Dokładniejsze badanie pozwala dalej rozstrzygnąć kwestyę, czy radiotor jest bezpośrednim produktem toru, czy też nie. Jeżeli w technicznej przeróbce toru radiotor nie oddzielił się z innymi substancjami od toru, w takim razie preparaty stare i świeże powinnyby mieć stałą, tę samą promieniotwórczość. Tak jednak nie jest: preparaty, mające kilka lat, są słabsze od preparatów świeżo sporządzonych. Preparat świeży, jeśli go będziemy obserwowali przez czas dłuższy, najprzód okazuje promieniotwórczość taką, jaką ma ta sama ilość toru w mineralu torowym, np. w torianicie, a zatem tor jest tu ze swą maksymalną ilością radiotoru. Następnie promieniotwórczość preparatu torowego zmniejsza się w ciągu lat kilku, poczem znowu poczyną wzrastać. Badanie tego zagadnienia nie jest jeszcze ukończone stanowczo, ale tylko co wzmiankowane zmiany w sile promieniowania zdają się wskazywać na to, że radiotor nie jest bezpośrednim produktem toru. W istocie, jeśli przypuścimy, że między radiotorem a torem znajduje się jakiś produkt przejściowy nieczynny — nazwijmy go za Hahnem — mezotorem — wów-

czas zmiany aktywności toru łatwo dają się wyjaśnić. Preparat torowy zawiera w takim razie tor i radiotor: promieniotwórczość zmniejsza się, bo radiotor się rozkłada, a tor tworzyć musi najpierw nieczynny mezotor, z którego dopiero później utworzy się radiotor. Podobnie, jak maximum β promieniowania w promieniotwórczości indukowanej radem wskazuje na produkt nieczynny: Rad B (p. str. 75), tak samo tutaj po 3 latach życia preparatu obserwowane minimum promieniotwórczości wskazuje na nieczynny również mezotor. Peryod mezotoru wynosi zapewne około 7 lat.

Istnienie mezotoru udało się potwierdzić następnie i przez to, że w preparatach otrzymywanych w technicznej przeróbce toru dostrzeżono powstawanie radiotoru, choć preparaty te nie zawierały toru samego. Tor sam w świetle najnowszych tych badań jest zapewne ciałem nieczynnym¹⁾.

Szereg genetyczny toru przedstawia się zatem w dzisiejszym stanie badań, jak następuje (patrz tabl. II).

Jasnym jest, że ze względu na krótkie peryody wszystkich tych ciał, prócz ciała pierwotnego, nie mogą być one zebrane w ilościach dostępnych

¹⁾ p. O. Hahn. Ber. Deut. Ch. Gesell. **40** (1907), 1462. Nierozstrzygniętą jeszcze kwestyę produktów torowych omówiliśmy nieco obszerniej, by wskazać rozumowania, które kierują poszukiwaniem nowych pierwiastków promieniotwórczych.

Szereg toru.

TABL. II.

Ciało promieniotwórcze i rodzaj promieniowania	Ciężar atomowy	Peryod
Tor	232	10 ⁹ lat
↓		
Mezotor	?	ok. 7 lat
↗ ^α		
Radiotor	228 ?	ok. 2 lat
↘ ^α		
↓ ↗ ^α		
Tor X	224 ?	3·6 doby
↖ ^α		
↑ ↗ ^α		
Emanacya toru	ok. 220	54 sek.
↘ ^β		
↓ ↗		
Tor A	216 ?	10·6 doby
↓		
Tor B	216 ?	55 minut
↘ ^α		
↓ ↗ ^α → β+γ		
Tor C		kilka sekund

badaniu chemicznemu lub nawet widmowemu. Ciała te wszystkie identyfikujemy tylko przez ich własności promieniotwórcze.

Jeśli przyjmiemy znów, że przemiany nieczynne nie wysyłają żadnych zgoła promieni ¹⁾, to dla szeregu torowego otrzymamy ciężary atomowe, jak uwidocznione w tablicy. Dla emanacji torowej — w tym szeregu jedyny to produkt, którego własności są nam dość pewnie znane, — otrzymujemy ciężar atomowy 220, a więc bardzo zbliżony do ciężaru emanacji radowej. Dwa ciała te z tej samej grupy helowców, gazów nieczynnych, stałyby więc do siebie w takim stosunku, jak np. nikiel i kobalt, lub metale z grupy ciężkich i lekkich platynowców (np. platyna i iryd, lub rod i pallad). Warto może zwrócić uwagę, że takie tryady (dla emanacyj znamy dopiero dyadę ²⁾), występują tylko na krańcach układu peryodycznego, w grupie zero-wartościowej i w grupie ośmio-wartościowej. W innych zaś miejscach tablicy peryodycznej — z wyjątkiem po części ziem rzadkich — małe różnice w ciężarze atomowym odpowiadają zawsze znacznym różnicom cech chemicznych.

W przemianach promieniotwórczych szeregu torowego wydzielają się również ilości ciepła tego samego rzędu, co i w przemianach radowych. Tor

¹⁾ Moglibyśmy bowiem również przyjąć, że wysyłają też np. α promienie, ale z szybkością mniejszą od 10^9 *cm/sec*, tak powolne bowiem α promienie już nie wywołują jonizacji i dotąd nie umielibyśmy istnienia ich stwierdzić.

²⁾ o emanacji aktywny p. niżej str. 120.

i jego produkty są przeciętnie 2 miliony razy słabiej promieniotwórcze od radu z jego produktami. Jeden gram toru (z produktami dezintegracyi) na godzinę będzie zatem wywiązywał okrągło $5 \cdot 10^{-5}$ kaloryi. Ilość taka daje się już zaobserwować, gdy użyć wielkiej masy materiału. Jeśli we flaszcze próżniowej umieścimy kilka kilogramów tlenku toru, to zapomocą czułych metod termoelektrycznych można stwierdzić, że ciało to jest stale ok. $0^{\circ}04^{\circ}$ cieplejsze od swego otoczenia o stałej temperaturze. Wydzielanie ciepła, obliczone na podstawie takich doświadczeń, wynosi na godzinę i gram toru ok. $8 \cdot 10^{-5}$ kaloryj, a więc wynik zgodny z liczbą przewidywaną.

Trzeciemu pierwotnemu ciałem promieniotwórczem jest aktywny, stale występujący również w rudach uranowych: otrzymuje się go z odpadków tych rud, które zbiera się w fabrykach uranu. Ciała tego nie udało się dotąd wyodrębnić w ilościach dostępnych zwykłemu badaniu: w reakcyach towarzyszy ono zwykle ziemiom rzadkim, zwłaszcza zaś lantanowi. Z powodu, że preparaty, zawierające takie ślady aktywności, są jednak bardzo silnie promieniotwórcze, wnosić możemy, że aktywność co do dzielności promieniotwórczej przewyższa zapewne rad. Głównym środkiem odróżnienia aktywności od ciał innych szeregu promieniotwórczych jest jego charakterystyczna emanacja.

Przez operacye chemiczne można z preparatów aktywności oddzielić produkty, których charaktery-

styczne krzywe zanikania i narastania wskazują na istnienie dwu produktów i to wyłącznie α promieniotwórczych: są to radioaktywność o peryodzie 19·5 doby, oraz aktywność X o peryodzie 10·2 doby. Aktywność preparaty po oddzieleniu tych dwu substancji prawie wcale już promieniotwórczości nie okazują — aktywność sam więc zapewne jest ciałem nieczynnym, przez którego rozkład dopiero powstają ciała promieniotwórcze.

Aktywność X wydziela charakterystyczną emanację, która podobnie, jak inne emanacje, należy do grupy gazów nieczynnych. Emanacja aktywna ma wyjątkowo krótki okres życia, peryod jej wynosi bowiem zaledwie 3·9 sekundy. Utrudnia to znacznie pomiary nad własnościami tego ciała.

Emanacja aktywna jest również wyłącznie α promieniotwórczą i przez rozkład jej powstają charakterystyczne osady — promieniotwórczość indukowana aktywność. Zanikanie ich — wogóle szybkie — wskazuje na to, że mamy tu do czynienia z dwiema przemianami: z emanacji powstaje najpierw nieczynny aktywność A o peryodzie 36 minut, a zeń tworzy się aktywność B , ciało α , β , γ promieniotwórcze o peryodzie 2·15 minut. Ciała więc indukowane przez czas dłuższy emanacją aktywną zanikają następnie odrazu z peryodem 36 minut, gdyż już nanich równowaga $A \rightleftharpoons B$ — $A \rightleftharpoons B$ zdążyła się ustalić. Ciała indukowane zaś przez czas krótki, np. przez 1 lub 2 minuty, wykazują najpierw pewne, szybko osiągnięte maxi-

mun promieniotwórczości, poczem dalej znów zanikają z okresem 36 minut.

Jest rzeczą niezmiernie doniosłą, jakie jest ewentualne stanowisko aktynu i jego produktów w układzie znanych nam pierwiastków. Pewnych wskazówek w tej mierze dostarczyć nam może tylko badanie emanacji aktynowej, jako jedynej ciała tego szeregu, o którego własnościach chemicznych pewne dane posiadać można. Oznaczono w ostatnich czasach¹⁾ współczynnik dyfuzji emanacji aktynowej w porównaniu ze współczynnikiem emanacji torowej: z doświadczeń tych wynika, że współczynnik dyfuzji dla emanacji aktynowej jest 1·19 razy większy od współczynnika emanacji torowej. Gęstość zatem, a również więc i ciężar atomowy emanacji aktynu są zatem $(1·19)^2 = 1·42$ razy mniejsze od gęstości ciężaru atomowego emanacji toru. Skoro zaś emanacja toru musi mieć ciężar atomowy ok. 220, to dla emanacji aktynu wypada

$$220 : 1·40 = 155.$$

Na aktyn sam więc przypadłby ciężar atomowy około 160. Ciężar ten kazałby zaliczać aktyn do szeregu t. zw. ziem rzadkich (jak np. erb, yterb, lantan i t. d.), którym też aktyn zwykle w reakcjach towarzyszy. Zarazem ten mały ciężar atomowy okazuje dosadnie i na tej drodze, że

¹⁾ S. Russ. Philos. Magaz. 17. (1909) 412.

aktyn nie jest przejściowym lub ubocznym członem szeregu urano-radowego, jak dawniej nieraz przypuszczać chciano.

Szereg genetyczny aktynu przedstawia nam załączona niżej tablica III.

TABL. III. Szereg aktynu.

Ciało promieniotwórcze i rodzaj promieniowania	Ciężar atomowy	Peryod
Aktyń $\downarrow \nearrow \alpha$ Radioaktyń		19·5 doby
$\downarrow \nearrow \alpha$ Aktyń X		10·2 doby
$\downarrow \nearrow \alpha$ Emanacja aktynu	ok. 150	3·9 sekundy
\downarrow Aktyń A		36 minut
$\downarrow \nearrow \alpha$ $\rightarrow \beta + \gamma$ Aktyń B		2·15 minut

VI.

ROZPOWSZECHNIENIE RADU W PRZYRODZIE.

Widzieliśmy, że istnienie radu jest związane w sposób przyczynowy z istnieniem uranu: wybitnym źródłem do otrzymywania radu mogą być wyłącznie rudy uranowe. O ile rudy uranowe są wogóle ciałami dość rzadkimi, o tyle jednak drobne ilości uranu mogą być bardzo rozpowszechnione, a wraz z nimi rad mógłby być też ciałem bardzo pospolitem w drobnych ilościach. Kwestya ta daje się łatwo rozstrzygnąć ze względu na wielką czułość metod używanych do wykazywania radu. Taki rodzaj występowania pierwiastków jest dość powszedni dla bardzo wielu pierwiastków pozornie uważanych za ciała rzadkie. Wśród metali n. p. lit, z metaloidów n. p. fluor w drobnych śladach są bardzo rozpowszechnione, natomiast minerały, których te ciała byłyby głównym składnikiem, są stosunkowo rzadkie.

Podobnie i rad jest ciałem bardzo rozpowszechnionem w przyrodzie: w pewnych razach możemy przypuścić, że w ciałach, gdzie go znajdujemy, występuje też i odpowiednia ilość uranu, ale usuwa się z pod obserwacji z powodu tylekroć mniej czułych metod chemicznych, służących

do wykrycia uranu; w innych znów przypadkach obecność radu da się wytłómaczyć przez wypłukanie tego ciała z pierwotnych rud uranowych, które go wytworzyły i zawierały.

Na znaczne rozpowszechnienie radu w skorupie ziemskiej wskazuje przedewszystkiem obecność emanacyj promieniotwórczych w atmosferze. Zwykła jonizacja, którą okazuje powietrze, jest przeważnie wywołana przez emanacje, znajdujące się w powietrzu, i da się np. usunąć przez wymrożenie tych emanacyj zapomocą ciekłego powietrza.

Dla poznania emanacji, znajdujących się w powietrzu, możemy badać, albo jonizację powietrza wprost (ewentualnie zebrawszy emanację ze znacznej objętości powietrza przez oziębienie) — lub też, co częściej się czyni — zbiera się tylko produkty powstające przez rozkład tych emanacji. Emanacje w powietrzu znajdują się oczywiście w równowadze ze swemi produktami rozkładu: z radem $A-C$ i np. z $ThA-ThC$. Jeśli więc w powietrzu rozepniemy długi drut (np. 20-metrowy) naładowany do bardzo wysokiego potencjału ujemnego, to ze znacznej objętości powietrza naokoło drutu osady promieniotwórcze skupią się na tym ujemnym przewodniku. Następnie po upływie kilkunastu godzin odłącza się drut od baterji elektrycznej i nawiązawszy na ramę, bada się za pomocą elektroskopu rodzaj promieniotwórczości indukowanej na drucie, oraz peryod jej zanikania. Że mamy tu do czynienia z osadami promieniotwórczemi, wynika już z tego, że zjawiska obser-

wowane nie zależą od tego, z jakiego metalu jest drut sporządzony. Dalej przez otarcie drutu szmatką, zwilżoną w kwasach, można promieniotwórczość usunąć z drutu, a natomiast skupić ją na tej szmatce i t. p. Badając krzywe zanikania tych promieniotwórczości indukowanych z atmosfery, przekonujemy się, z jakich emanacji one powstały: osady promieniotwórcze torowe zanikają bowiem z peryodem 11-godzinny (p. str. 114), osady radowe — po pierwszym okresie dojścia do równowagi — z peryodem ok. 28-minutowym (p. str. 74).

Wynika z doświadczeń takich, że w powietrzu przeważa bardzo znacznie emanacja radowa: zwykle emanacja torowa wynosi 3—5%, wyjątkowo tylko 15% całkowitej ilości emanacji. Emanacji aktywowej w atmosferze dotąd nie dostrzegano.

Absolutna ilość emanacji w powietrzu zmienia się bardzo znacznie, zależnie od miejsca, warunków atmosferycznych i t. d. Wogóle powiedzieć jednak można, że bliżej gruntu np. w pieczarach, w piwnicach, a jeszcze więcej w dołach świeżo w ziemi wykopanych, ilość jej jest większa, niż gdzieindziej. Świadczy to o tem, że emanacja z szczelin ziemi przedostaje się do atmosfery przez dyfuzję z gruntu, gdzie się wytwarza z obecnych soli radowych i torowych.

Jest rzeczą bardzo doniosłą zmierzyć, ile emanacji radowej przeciętnie znajduje się w atmosferze i jakiej ilości czystej soli radowej emanacja ta odpowiada. Doświadczenie takie daje się wy-

konać w ten sposób, że w dużej zamkniętej przestrzeni powietrza (wynoszącej np. kilkanaście metrów sześciennych), w ciągu oznaczonego czasu zbiera się na ujemnie naładowanym przewodniku całą ilość wydzielających się osadów promieniotwórczych. Następnie do tej przestrzeni wpędza się emanację wygotowaną ze znanego roztworu soli radowej i jak poprzednio, zbiera pochodzące z tej emanacji osady promieniotwórcze. Przez porównanie promieniotwórczości, zebranej na przewodniku w jednym i w drugim przypadku, otrzymujemy zawartość emanacji w powietrzu w pierwszym doświadczeniu.

Z pomiarów takich, wykonanych w laboratorium Rutherforda, wynika, że w 1 m^3 powietrza znajduje się ilość emanacji, maksymalnie odpowiadająca $3 \cdot 10^{-11}$ g radu.

Przypuśćmy teraz, że emanacja znajduje się tylko w atmosferze, pokrywającej lądy ($= \frac{1}{4}$ powierzchni ziemskiej), nieobecna zaś jest nad powierzchnią oceanów — przypuśćmy dalej, że jest równomiernie rozmieszczona do przeciętnej wysokości 5 kilometrów — łatwo wtedy obliczyć możemy, że całkowity zasób emanacji w atmosferze odpowiada stanowi równowagi emanacji z 250 tonami radu. Taka ilość radu winnaby się zatem znajdować w powierzchniowych warstwach skorupy ziemskiej, gdyż tylko z tych górnych warstw przez dyfuzję emanacja w powietrzu uzupełniać

¹⁾ Tonna = 10^3 kg.

się może. Oceńmy grubość tych warstw na 15 metrów — jeśli przypuścimy dalej, że koncentracja radu jest w całej kuli ziemskiej taka sama, jaką tu przewidujemy dla warstw powierzchniowych — to wyrachujemy wówczas, że cały zapas radu w kuli ziemskiej wynosić musi około 300 milionów ton, — ilość zatem kolosalna, której wyzyskaniu tylko mała koncentracja stać musi na przeszkodzie. Znaczenie takich ilości radu dla kwestyi wieku i ciepła ziemi omówimy zaraz następnie.

Podobnie, jak znajdujemy emanację radową w atmosferze, znajdujemy ją również, jakoteż drobne ilości radu (czasem też i radioru), w gazach, wydobywających się ze źródeł, oraz w wodach źródłanych. Oczywiście wody z okolic uranowych — jak np. źródła czeskie w okolicach Joachimstalu, zawierają radu więcej od innych; choć nieraz źródła nie stojące w związku ze znamiem nam obfite występowaniem radu (np. Gastein w Górnej Austrii, lub źródła na wyspie włoskiej Ischia) również są bogate w produkty promieniotwórcze.

Badania nad promieniotwórczością źródeł — zwłaszcza zaś źródeł leczniczych, ze względu na ewentualne zalety terapeutyczne radu i jego emanacji — były wykonywane bardzo licznie: poznano pod tym względem większość źródeł niemieckich, francuskich i angielskich¹⁾. Trudno do-

¹⁾ Badanie najważniejszych w Polsce źródeł galicyjskich niedługo się rozpocznie. O innych źródłach p. referat F. Henricha z Erlangen. Zeit. f. Electroch. 13 (1907), 393.

tąd z tych danych wyprowadzić donioślejsze ogólne wnioski. Uderza wogóle, że promieniotwórczość cieplic jest większa od promieniotwórczości źródeł zimnych — przyczem jednak cieplice najgorętsze mniej są czynne od cieplic bardziej umiarkowanych. W tej samej nawet miejscowości, tam nawet, gdzie źródła na bardzo małej przestrzeni są umieszczone (jak np. w Wiesbaden), spotykamy znaczne różnice w promieniotwórczości poszczególnych źródeł. To samo źródło okazuje nieraz w ciągu roku wahania swych własności promieniotwórczych i to nawet w tych przypadkach, gdzie chemicznie jak najdokładniej zbadany skład źródła w ciągu długich nawet okresów żadnym nie ulegał zmianom.

Iły i osady, towarzyszące źródłom mineralnym, okazują też wyraźną promieniotwórczość, zwykle większą nawet od promieniotwórczości samych źródeł. W nich znajdujemy zwykle podstawowe substancje promieniotwórcze o długich okresach życia: rad, jako źródło emanacji radowej, i zwykle radiotor, jako ciało macierzyste produktów szeregu torowego.

Promieniotwórczość źródeł mineralnych jest, być może, jedną z przyczyn zjawiska obserwowanego nieraz przez lekarzy, że skuteczność wód, używanych w miejscu leczniczym u źródła, jest zwykle większa, niż tych samych nawet wód po przesyłce, lub też odpowiednich wód sztucznych. Istotnie bowiem w wodach przesyłanych i użytych po długim przeciągu czasu, emanacja radowa

zdażyła się rozłożyć: w wodach sztucznych oczywiście wcale jej nie było.

Wspominaliśmy poprzednio, że z obecności emanacyj w powietrzu możemy obrachować przypuszczalną masę radu, która znajdować się musi w powierzchniowych warstwach skorupy ziemskiej i dostarczyć może tę ilość emanacji, którą ostatecznie obserwujemy w atmosferze. Wobec 250 milionów ton radu na kulę ziemską, wypada na 1 cm^3 kuli ziemskiej zawartość radu okragło 10^{-15} g, czyli kładąc średnią gęstość skorupy ziemskiej = 2, otrzymamy $0.5 \cdot 10^{-15}$ na 1 g. masy. Doświadczenia nad zawartością radu w różnych minerałach i skałach tworzących skorupę ziemską, były dotąd najobszerniej prowadzone przez R. J. Strutta.

Przez roztwarzanie minerałów i wygotowanie zawartej w nich emanacji, R. J. Strutt przekonał się, że prawie wszystkie minerały zawierają rad — wyjątek stanowiły n. p. tylko czyste kryształy kwarcu, berylu, rutyłu. Ilość radu na 1 g ciała waha się w granicach od 0.25 do $5.8 \cdot 10^{-12}$ g.¹⁾ radu: jest mniej więcej jednakowa w skałach osadowych, jak i wulkanicznych. Granity zawierają radu stosunkowo najwięcej, najmniej zaś — skały o charakterze chemicznym zasadowym. Z zawar-

¹⁾ Tej ilości radu odpowiada według stosunku

$$\frac{\text{rad}}{\text{uran}} = 3.4 \cdot 10^{-7}, \text{ okragło } 10^{-5} \text{ g Ur.}$$

na 1 g. skały, czy minerału. Ilość ta t. j. 0.01% uranu mogła dotąd ująć łatwo miedostrzeżona z powodu, że stoi już ona na krańcach ścisłości zwykłych metod chemicznych.

tości radu w różnych minerałach wynika, że rozmieszczenie radu w skałach nie może być jednostajne: z minerałów skałotwórczych bowiem jedne zawierają dużo, inne zaś, np. kwarc, — znacznie mniej radu.

Istotnie np. przez szlamowanie granitu można było zebrać część cięższą, wynoszącą zaledwie 10% całego ciężaru — w której jednak zawierała się przeszło połowa promieniotwórczości próbki całkowitej.

Gdybyśmy według analiz Strutta obliczyli zawartość radu w całej kuli ziemskiej — zakładając, że we wnętrzu ziemi koncentracja radu jest taka sama, jak w skorupie ziemskiej, otrzymalibyśmy na zapas radu liczbę daleko większą jeszcze od tej, którą uzyskaliśmy, szacując zawartość radu wedle ilości emanacji, znajdowanej w atmosferze.

Obecność radu w materyałach, składających skorupę ziemską, w zupełnie nowem świetle stawia cały szereg zagadnień, mających pierwszorzędne znaczenie dla całej kosmogonii. Wiąże się ona bowiem najściślej z kwestją wieku ziemi i z kwestją źródła energii, które pokrywa straty promienionowania ziemskiego i słonecznego. W ciałach promieniotwórczych, a przedewszystkiem w radzie, mamy bowiem nowe potężne źródło energii, które we wszelkich rozumowaniach kosmogonicznych uwzględnić musimy.

Ilość energii, wypromieniowywanej przez słońce, jest nam znana z pomiarów nad wielkością insolacji na powierzchni ziemi. Wynika z nich,

że słońce na godzinę z 1 cm^2 swej powierzchni wypromieniowuje $8 \cdot 28 \cdot 10^6$ gramokalorii. Wiemy dalej, że rad przez swój rozkład jest potężnym źródłem energii: 1 g radu wydziela na godzinę 113 gr kalorii. Znając objętość słońca i przeciętną jego gęstość ($=1.44$), możemy już łatwo obliczyć, że wystarczy, by w masie słonecznej na 1 g przypadało $2.5 \cdot 10^{-6}$ g radu, aby ilość ciepła, dostarczana przez ten rad pokrywała zupełnie stratę ciepła słonecznego przez promieniowanie.

Wprawdzie badanie widma słonecznego nie wykryło na niem radu, ale obecność helu w atmosferze słonecznej wskazuje, że przemiany promieniotwórcze musiały się odbywać i zapewne odbywają się jeszcze na tej gwiazdzie.

Ocena wieku słońca została dokonana przez Lorda Kelvina: obliczył on był, jak wielka ilość energii musiała się wydzielić przez zagęszczenie rozprzeczłej w nieskończoności masy słonecznej, aż do dzisiejszej jej objętości. Z rachunku tego Kelvin wywnioskował, że zapewne niema jeszcze 100,000.000 lat od chwili, gdy ziemia korzysta ze światła słonecznego; prawie napewne okres ten musi być krótszy, niż 500 milionów lat. Inni astronomowie, według tej samej idei Kelvina, używając tylko dokładniejszych liczb na stałe promieniowania słonecznego — otrzymali na istnienie naszego układu słonecznego jeszcze krótsze okresy czasu od 16 do 12 milionów lat. Wszystkie te obrachunki upadają jednak, gdy zważymy, że na słońcu możemy mieć inne, donioślejsze źródło energii, niż

powolne kurczenie się masy słonecznej i że obecność tego źródła bardzo znacznie wydłużać nam każe okresy kosmogoniczne.

Podobnież zmienić się muszą poglądy nasze na dawność ziemi. Wiek ziemi oszacował Kelvin, opierając się na prawach ostygania ciał. W skorupie ziemskiej dziś na każdy metr posuwania się w głąb temperatura wzrasta o $0\cdot037^{\circ}$; możemy stąd obliczyć, ile czasu upłynęło od chwili gdy powierzchnia ziemska składała się jeszcze z masy ognisto-płynnej. Z rachunku takiego wynika, że przed 100 milionami lat ziemia jeszcze płynną być musiała. W tem rozumowaniu zakłada się, że jedynym źródłem ciepła ziemi jest początkowa wysoka temperatura stopionej masy ziemskiej. Inaczej jednak przedstawi się rachunek, jeśli uwzględnimy obecność radu na kuli ziemskiej.

Obliczmy teraz np. ile radu potrzebnem być może, by w zupełności pokryć straty, jakie kula ziemska obecnie ponosi wskutek promieniowania. Oznaczmy współczynnik powodzenia cieplnego skorupy ziemskiej przez K ($= 0\cdot004$ jednostek absol.), przez ϑ spadek temperatury w skorupie ziemskiej ($= 0\cdot00037^{\circ}$ na 1 cm), przez R — promień ziemi. Wówczas do powierzchni ziemi z wnętrza w ciągu jednej sekundy przybywa ilość ciepła

$$Q = 4\pi R^2 K \vartheta \text{ kaloryj.}$$

Oznaczmy przez X ilość ciepła, która w każdym centymetrze sześciennym kuli ziemskiej w ciągu

sekundy wytwarza się wskutek dezintegracji radu: wtedy w całej kuli ziemskiej wytwarza się ilość ciepła Q' .

$$Q' = \frac{4}{3}\pi R^3 \text{ (objętość ziemi). } X.$$

Założmy $Q = Q'$, to mamy

$$\frac{4}{3}\pi R^3 X = 4\pi R^2 \cdot K\vartheta$$

$$X = \frac{3K\vartheta}{R} = \frac{3 \cdot 0 \cdot 004 \cdot 0 \cdot 00037}{R} = 7 \cdot 10^{-15} \text{ kaloryj}$$

na sekundę, czyli przez rok = $2 \cdot 2 \cdot 10^{-7}$ kaloryj.

Aby zatem zupełnie pokryć stratę promienionowania ziemskiego, należy w każdym cm^3 masy ziemskiej wywiązać $7 \cdot 10^{-15}$ kal. Ponieważ zaś 1 g radu wywiązuje na sekundę $3 \cdot 10^{-2}$ kal., a więc dla tej ilości ciepła wystarczy, by w każdym cm^3 ziemi znajdowało się

$$\frac{7 \cdot 10^{-15}}{3 \cdot 10^{-2}} = 2 \cdot 3 \cdot 10^{-13} \text{ g radu;}$$

czyli zważywszy, że przeciętna gęstość ziemi wynosi 5,5, na 1 g masy ziemi, wystarczyłaby ilość radu

$$\frac{2 \cdot 3 \cdot 10^{-13}}{5 \cdot 5} = 4 \cdot 1 \cdot 10^{-14} \text{ g}$$

Doświadczenia Strutta nad zawartością radu w ciałach skorupy ziemskiej wykazują liczby od 20 do 100 razy nawet większe. A więc ilość radu, obliczona w przypuszczeniu, że roz-

mieszczenie radu jest równomierne w całej kuli ziemskiej, nie tylko pokryłaby straty ciepła ziemi przez promieniowanie, ale nawet musiałaby wywołać stałe ogrzewanie kuli ziemskiej. Z tej trudności możemy wybrnąć, jeśli przypuścimy, że w środku ziemi ilość radu jest mniejsza, niż ta, która znajduje się w materiałach na powierzchni ziemskiej. Jakbądź, uwzględniając ilość radu na ziemi, dochodzimy do wniosku, że okres zastygnięcia kuli ziemskiej, obliczany na podstawie temperatury skorupy ziemskiej, jest znacznie za krótki — przeciwnie skorupa ziemska w tym stanie mogła istnieć o wiele więcej milionów lat, pokrywając ciepło wypromieniowywane rozkładem substancji promieniotwórczych.

Obalając dawne metody obliczania okresów geologicznych, nauka o promieniotwórczości daje nam natomiast inne, na zasadzie których bezpośrednio niejako zmierzyć możemy te okresy. Polegają one na badaniu zawartości helu w minerałach. Poznaliśmy np., że jeden gram radu wydziela na dobę okrągło 0.4 mm^3 , co wynosi 0.14 cm^3 na rok. Jeżeli więc wiemy teraz, ile radu znajduje się w 1 g jakiego minerału, a zarazem, jeśli zmierzymy, ile helu wywiązuje teraz jeden gram tego ciała, to możemy obliczyć, ile lat musiało upłynąć, aby taka właśnie ilość helu w ciele tego skupić się mogła. Jako przykład rozpatrzmy minerał fergusonit, który zawiera 7% uranu: z 1 gramu tego minerału można przeciętnie uzyskać

1.81 cm³ helu. Biorąc znany stosunek uranu do radu ($3.4 \cdot 10^{-7}$, p. str. 91), obliczamy, że 1 g fergusonitu zawiera $2.6 \cdot 10^{-8}$ g radu i zatem na rok musiałby dawać $0.4 \cdot 10^{-8}$ cm³ helu. Skoro zaś helu znajdujemy 1.81 cm³, to ilość czasu na takie skupienie helu potrzebna wynosi:

$$\frac{1.81}{0.4 \cdot 10^{-8}} = 4.5 \cdot 10^8$$

a więc przeszło 400 milionów lat.

W innych minerałach, np. w torianicie, zawierającym 75% toru i 12% uranu, przypada jeszcze większa zawartość helu: przeszło 9 cm³ na 1 g minerału. Torianit zatem zapewne do wcześniejszych jeszcze epok odniesiony być musi.

Obliczenia takie nie mogą być jeszcze zupełnie ściśle, gdyż zaledwie dla samego radu znamy dość dobrze szybkość wywiązywania helu. Zamało znamy dotąd peryody i własności ciał szeregu torowego, byśmy o szybkości wytwarzania helu przez szereg torowy należycie byli poinformowani. Uwzględnienie helu, wytwarzanego przez tor i jego pochodne, skróci oczywiście obliczaną przez nas długość okresów geologicznych; natomiast fakt, iż mało prawdopodobnym jest, by w ciągu istnienia swego minerał nie utracił nic ze swego helu, wpłynąłby na przydłużenie okresu.

Jakbądź metoda, którą geologii daje nauka o promieniotwórczości, przyniesie nam niewątpliwie najściślejsze rozwiązanie zagadnienia długości

okresów geologicznych; już dzisiaj wskazuje nam ona, że zwykle dotąd przyjęta ich długość musi być znacznie powiększona.

Te przykłady dostatecznie wskazują, jak dla całego przyrodoznawstwa doniosłe znaczenie mieć musi nauka o promieniotwórczości.

VII.

PROMIENIOTWÓRCZOŚĆ ZWYKŁYCH PIERWIASTKÓW.

Widzieliśmy wyżej, że pierwiastki wybitnie promieniotwórcze, takie, jak uran, tor, rad, lub emanacya radowa, we wszystkich pozostałych swych cechach niczem się nie różnią od innych zwykłych pierwiastków chemicznych. Pozostaje nam tu obecnie rozważyć kwestyę, czy promieniotwórczość jest własnością ograniczoną tylko do rozpatrzonych już wyżej szeregów promieniotwórczych, czy też jest ona ogólną powszechną własnością materji. Jest to, jak łatwo ocenić, jedna z najważniejszych — dotąd nie rozstrzygniętych jeszcze — kwestyj kosmogonicznych. Mamy bowiem rozstrzygnąć, czy formy pierwiastkowe, w których nam się materja teraz objawia, ulegają ciągle dalszym przeobrażeniom, tworząc ciała o coraz mniejszych ciężarach atomowych, czy też są one ostatecznym kresem ewolucyi, której tylko ostatnie jeszcze stadya udało się nam dostrzedz.

Promieniotwórczość ciał zwykłych jest w każdym razie niezmiernie drobna i ta właśnie małość efektów, które obserwować mamy, jest powodem, że rozstrzygnąć kwestyi dotąd jeszcze się nie udało.

W badaniu promieniotwórczości ciał zwykłych posiłkujemy się najpowszechniej metodą elektroskopową: buduje się duże elektroskopy, których ściany mogą być sporządzane z rozmaitych metali, i obserwuje się naturalną jonizację powietrza w tych zbiornikach. R. J. Strutt dostrzegł, a następnie inni badacze potwierdzili wielokrotnie, że jonizacja w takich elektroskopach zmienia się wraz z naturą metalu, z którego sporządzony jest elektroskop. Najśłabszą jonizację obserwuje się w elektroskopach cynkowych lub glinowych, największą — nieraz trzykroć większą — w elektroskopach ołowianych. Z ciał »niepromieniotwórczych« ołów wogóle największą zawsze wywołuje jonizację.

Na podstawie tych doświadczeń byłoby jednak przedwczesnie wszystkim metalom przypisywać odmienną, ściśle charakterystyczną promieniotwórczość. Przedewszystkiem rozmaite okazy tego samego nawet metalu wywołują działanie rozmaite, różne nieraz o kilkaset procentów, — ta okoliczność przemawia przeciw temu, jakoby jonizacja spowodowana była przez metal sam. Przyczyną obserwowanej niezmiernie słabej promieniotwórczości mogą być bowiem osady promieniotwórcze, na powierzchni wszystkich ciał osadzone, przez emanacje, znajdujące się w atmosferze.

Powtórę wreszcie, mogą też w grę wchodzić zanieczyszczenia istotnymi ciałami promieniotwórczymi, zanieczyszczenia, pochodzące jeszcze z rud, z których metal otrzymano. Za tem ostatniem wyjaśnieniem przemawia np. to, że ołów jest ciałem stosunkowo najaktywniejszem. W ołowiu podejrzewamy bowiem ostatnie ogniwo szeregu uranoradowego, z ołowiem dalej idzie w reakcyach chemicznych rad *D* (p. str. 85), a więc obecność produktów radowych w ołowiu jest osobiwie prawdopodobna. Jak niezmiernie drobne zanieczyszczenia wystarczyłyby mogły, aby złudzić pozorną promieniotwórczością wszystkich ciał, wynika n. p. ztąd, że promieniotwórczość ciał zwykłych odpowiada przeciętnie rozkładowi jednego atomu na sekundę (wyrzuceniu jednej α cząstki) z jednego grama, podczas gdy 1 g radu w tym samym czasie wyrzuca $3.4 \cdot 10^{10}$ cząstek α . Obecność więc $3 \cdot 10^{-11}$ g radu w gramie substancji wystarczyłoby, by wywołać obserwowane skutki promieniowania ciał zwykłych.

Przez ściślejsze badanie promieniotwórczości ciał zwykłych, N. J. Campbell¹⁾ odkrył, że sole potasu posiadają własności promieniotwórcze o wiele większe od innych soli, — aczkolwiek promieniotwórczość związków potasowych wynosi dopiero zaledwie $\frac{1}{1000}$ dzielności promieniotwórczej uranu. Spostrzeżenie to zostało powszechnie potwierdzone: sole potasowe wysyłają wyłącznie β promieniowanie;

1) Proc. Cambr. Philos. Soc. 14 (1907), 15—21.

działają zatem na płytę fotograficzną. Natomiast co do przyczyny tego promieniowania soli potasowych wyniki są jeszcze podzielone: podczas gdy jedni uważają je za własność atomową potasu: co opiera się na tem, że znajdują oni, iż dzielność promieniotwórcza rozmaitych soli potasowych jest proporcjonalna do ilości zawartego w nich potasu, — inni, nie znajdując takiej proporcjonalności, skłonni są uważać, że mamy tu raczej do czynienia z jakąś nieoddzieloną domieszką promieniotwórczą towarzyszącą solom potasowym.

Zagadnienie o promieniotwórczości zwykłych pierwiastków jest najważniejszym może problemem we współczesnym stanie radiochemii. Jego rozstrzygnięcie odsłoni nam tajemnicę ewolucji materji, tajemnicę, której rąbek dopiero uchyliły dotychczasowe, choć tak świetne odkrycia w dziedzinie promieniotwórczości.



Promienie β 32.
Promienie γ 36.
Promieniotwórczość minera-
łów i skał 127, 130.
Promieniotwór. źródeł 127.
Promieniotwórcz. zwykłych
pierwiastków 138.

Rad 38.
Radu otrzymywanie 40.
Ramsay 1, 108.
Radu promieniowanie 43.
Rad *A* 74.
Rad *B* 74.
Rad *C* 74.
Rad *D* 79.
Rad *E* 81.
Rad *F* 82.
Radiotor 114.
Radioaktywność 120.
Radioołów 85.

Röntgen 1.
Rozkład ciał promieniotwór-
czych 53.
Radiouran 97.
Rutherford 26, 53, 60, 64, 110.
Skłodowska-Curie 4, 84,
109.
Strutt 129.
Thomson 14.
Tor 4, 111.
Tor *X* 112.
Tor *A* 113.
Tor *B* 114.
Tor *C* 114.
Uran 4, 96.
Uran *X* 97.
Wiek ziemi 132.



NAKŁADEM KÓŁKA MATEMATYCZNO-FIZYCZNEGO
U. U. J. W KRAKOWIE, ULICA ŚW. ANNY L. 12.

WYSZŁY DOTYCHCZAS NASTĘPUJĄCE DZIEŁA:

AUTOGRAFIOWANE:

- | | |
|--|-------|
| 1. Zaremba Stanisław Prof. Dr. <i>Wstęp do analizy</i> wyd. 2. | K. 6— |
| 2. — <i>Teorya ciągów i szeregów nieskończonych</i> wyd. 2. | " 3— |
| 3. Żorawski Kazimierz Prof. Dr. <i>Geometrya analityczna Cz. I.</i>
wyd. 3. | " 9— |
| 4. — <i>Geometrya analityczna Cz. II.</i> | " 9— |

Według wykładów Prof. Dra A. Witkowskiego

- | | |
|--|------|
| 5. <i>Fizyka doświadczalna</i> wyd. 8. Cz. 1. | " 7— |
| 6. <i>Fizyka doświadczalna Cz. II.</i> wyd. 6. | " 7— |
| 7. <i>Wstęp do fizyki teoretycznej</i> wyd. 2. | " 5— |
| 8. <i>Teorya ciepła</i> | " 6— |
| 9. <i>Elektryczność i magnetyzm</i> | " 8— |

Według wykładów Prof. Dra Wł. Natansona

- | | |
|---|------|
| 10. <i>Elektryczność i magnetyzm</i> (wyczerpane) | " 8— |
|---|------|

Według wykładów Prof. Dra C. Russjana

- | | |
|---|------|
| 11. <i>Równania różniczkowe zwyczajne</i> | " 3— |
| 12. <i>Równania różniczkowe cząstkowe</i> | " 2— |
| 13. <i>Rachunek wariacyjny</i> | " 2— |
| 14. <i>Geometrya rzutowa</i> | " 2— |

DRUKOWANE:

- | | |
|---|------|
| 15. Zaremba Stanisław Prof. Dr. <i>Teorya wyznaczników i równań liniowych</i> | " 3— |
| 16. Bruner Ludwik Prof. Dr. <i>Ewolucya materji. Zarys nauki o promieniotwórczości.</i> | " 3— |

POSIADA NADTO NA SKŁADZIE:

- | | |
|---|--------|
| 17. Zaremba Stanisław Prof. Dr. <i>Zarys pierwszych zasad teoryi liczb całkowitych</i> wyd. Akademii Umiejętności Kraków 1907 | " 4— |
| 18. Rudzki Maurycy Prof. Dr. <i>Fizyka ziemi.</i> Wyd. Akad. Umiej. Kraków 1909. | " 10— |
| 19. F. P. Treadwell Prof. <i>Chemia analityczna ilościowa.</i> Przekład z IV wydania oryginału pod redakcyą Dra L. Brunera str. 647; Kraków 1908. | " 11— |
| 20. Ludwik Bruner Dr. <i>Pojęcia i teorye chemii.</i> Warszawa 1905. (T. Paprocki i Ska) str. 241. | " 4:50 |
| 21. L. Bruner i S. Tołłoczko. <i>Chemia nieorganiczna.</i> Wydanie III. (Warszawa 1908. Gebethner i Ska) str. 323. | " 3:60 |
| 22. L. Bruner i S. Tołłoczko. <i>Chemia organiczna.</i> (Warszawa 1908 Gebethner i Ska) str. 256. | " 3:40 |

Pascal Ernesto przekład S. Dicksteina

- | | |
|---|---------|
| 23. <i>Rachunek różniczkowy</i> | " 5:20 |
| 24. <i>Rachunek całkowity</i> | " 5:20 |
| 25. <i>Rachunek wariacyjny</i> | " 5:20 |
| 26. <i>Repertoryum analizy</i> | " 10:40 |
| 27. <i>Repertoryum geometryi</i> | " 13— |
| 28. <i>Stóncniczek matematyczny</i> niem.-pol. i pol.-niem. Wydanie Kółka matematyczno-technicznego w Zurichu | " 1— |

WYDZIAŁ FIZYKI I CHEMII
KATEDRA FIZYKI

Przedmiot: FIZYKA
Temat: ...

Wykonali: ...

Opiekun: ...

Data: ...

Miejsce: ...

Wzrost: ...

Waga: ...

Temperatura: ...

Wiek: ...



Wzrost: ...
Waga: ...
Temperatura: ...
Wiek: ...

NAKŁADEM KÓŁKA MATEMATYCZNO-FIZYCZNEGO
 U. U. J. W KRAKOWIE, ULICA ŚW. ANNY L. 12.
 WYSZYŁY DOTYCHCZAS NASTĘPUJĄCE DZIEŁA:

AUTOGRAFIOWANE:

- | | |
|--|-------|
| 1. Zaremba Stanisław Prof. Dr. <i>Wstęp do analizy</i> wyd. 2. | K. 6— |
| 2. — <i>Teorya ciągów i szeregów nieskończonych</i> wyd. 2. | " 3— |
| 3. Żorawski Kazimierz Prof. Dr. <i>Geometrya analityczna Cz. I.</i>
wyd. 3. | " 9— |
| 4. — <i>Geometrya analityczna Cz. II.</i> | " 9— |
| Według wykładów Prof. Dra A. Witkowskiego | |
| 5. <i>Fizyka doświadczalna</i> wyd. 8. Cz. I. | " 7— |
| 6. <i>Fizyka doświadczalna Cz. II.</i> wyd. 6. | " 7— |
| 7. <i>Wstęp do fizyki teoretycznej</i> wyd. 2. | " 5— |
| 8. <i>Teorya ciepła</i> | " 6— |
| 9. <i>Elektryczność i magnetyzm</i> | " 8— |
| Według wykładów Prof. Dra Wł. Natansona | |
| 10. <i>Elektryczność i magnetyzm</i> (wyczerpane) | " 8— |
| Według wykładów Prof. Dra C. Russjana | |
| 11. <i>Równania różniczkowe zwyczajne</i> | " 3— |
| 12. <i>Równania różniczkowe czastkowe</i> | " 2— |
| 13. <i>Rachunek wariacyjny</i> | " 2— |
| 14. <i>Geometrya rzutowa</i> | " 2— |

DRUKOWANE:

- | | |
|---|------|
| 15. Zaremba Stanisław Prof. Dr. <i>Teorya wyznaczników i równań liniowych</i> | " 3— |
| 16. Bruner Ludwik Prof. Dr. <i>Ewolucya materji. Zarys nauki o promieniotwórczości.</i> | " 3— |

POSIADA NADTO NA SKŁADZIE:

- | | |
|---|--------|
| 17. Zaremba Stanisław Prof. Dr. <i>Zarys pierwotnych zasad teoryi liczb całkowitych</i> wyd. Akademii Umiejętności Kraków 1907 | " 4— |
| 18. Rudzki Maurycy Prof. Dr. <i>Fizyka ziemi.</i> Wyd. Akad. Umiej. Kraków 1909. | " 10— |
| 19. F. P. Treadwell Prof. <i>Chemia analityczna ilościowa.</i> Przekład z IV wydania oryginału pod redakcyą Dra L. Brunera str. 647; Kraków 1908. | " 11— |
| 20. Ludwik Bruner Dr. <i>Pojęcia i teorye chemii.</i> Warszawa 1905. (T. Paprocki i Ska) str. 241. | " 4:50 |
| 21. L. Bruner i S. Tołłoczko. <i>Chemia nieorganiczna.</i> Wydanie III. (Warszawa 1908. Gebethner i Ska) str. 323. | " 3:60 |
| 22. L. Bruner i S. Tołłoczko. <i>Chemia organiczna.</i> (Warszawa 1908 Gebethner i Ska) str. 256. | " 3:40 |

Pascal Ernesto przekład S. Dicksteina

- | | |
|--|---------|
| 23. <i>Rachunek różniczkowy</i> | " 5:20 |
| 24. <i>Rachunek całkowity</i> | " 5:20 |
| 25. <i>Rachunek wariacyjny</i> | " 5:20 |
| 26. <i>Repertoryum analizy</i> | " 10:40 |
| 27. <i>Repertoryum geometryi</i> | " 13— |
| 28. <i>Słowniczek matematyczny</i> niem.-pol. i pol.-niem. Wydanie Kółka matematyczno-technicznego w Zurichu | " 1— |

