

## ROZDZIAŁ IX

### GAZY PROMIENIOTWÓRCZE

#### § 43. Emanacje.

Wśród krótkotrwałych pierwiastków pochodzących od uranu i toru spotykamy trzy promieniotwórcze gazy zwane dawniej powszechnie *emanacjami* radu, toru i aktynu;<sup>1)</sup> obecnie przyjęte są inne nazwy, mianowicie: radon, toron i aktynon (symbole:  $Rn$ ,  $Tn$ ,  $An$ ). Radon wydziela się ze związków radu, który jest jego bezpośrednim rodzicem; toron powstaje ze związków toru, zawierających substancję macierzystą toronu  $X$ ; wreszcie aktynon pochodzi od aktynu za pośrednictwem radioaktynu i aktynu  $X$ .

W celu otrzymania któregośkolwiek z tych gazów wystarcza zebrać powietrze, które pozostawało w ciągu pewnego czasu w zetknięciu z substancjami macierzystymi; prąd jakiegokolwiek gazu, przechodzący przez te substancje unosi wytwarzane przez nie emanacje. Wszystkie emanacje zachowują się w ten sam sposób co zwykle, bardzo rozcieńczone gazy.

Możemy wykryć istnienie emanacji w badanym gazie wprowadzając go do komory jonizacyjnej lub do naczynia, zawierającego jakąś substancję fosforyzującą, np. siarczek cynku; ciała tego rodzaju świecą w obecności emanacji.

Każda z trzech emanacyj ulega przemianie dając początek szeregowi pierwiastków pochodnych, nazwanych *osadem aktywnym*, ponieważ są to ciała stałe, osiadające na ściankach znajdujących się w zetknięciu z emanacją. Osady aktywne posiadają własne promieniowanie, składające się z promieni  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ . Emanacje wysyłają promienie  $\alpha$ ; jak dotąd, stwierdzono istnienie promieni przenikliwych tylko w przypadku aktynonu. Emanacje mogą być badane w określonych warunkach za pomocą promieni przenikliwych, wysyłanych przez należące do nich aktywne osady. W następnym rozdziale zajmiemy się szczegółowo zagadnieniem osadów aktywnych.

## § 44. Wyznaczanie stałej zaniku emanacji.

Każdy radiopierwiastek ulega przemianie w ten sposób, że jego ilość  $q$  w chwili  $t$  wyraża się wzorem:

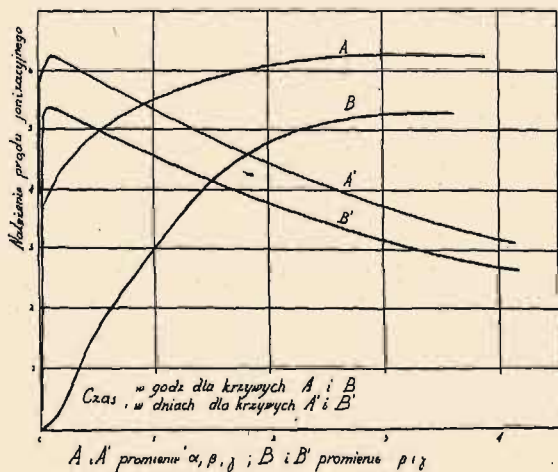
$$q = q_0 e^{-\lambda t},$$

gdzie  $q_0$  jest to ilość początkowa,  $\lambda$  *stała zaniku* charakteryzująca dany pierwiastek (rozdz. XI); ilość  $q$  zmniejsza się do połowy w ciągu czasu  $T$ , niezależnego od  $q$  i zwanego *okresem*:

$$e^{\lambda T} = 2; \quad \lambda T = \ln 2 = 0,693.$$

Krzywa przedstawiająca zależność  $\log q$  od  $t$  jest to prosta, z której nachylenia można wyliczyć  $\lambda$ .

*Radon.* W najprostszej metodzie badania stałej radonu wprowadza się gaz zawierający stosowną ilość radonu, powstającego w roztworze radu, do szczelnej, uprzednio opróżnionej, komory jonizacyjnej. Na rys. 63 krzywe  $A$  i  $A'$  (narysowane w różnych skalach czasu) przedstawiają natężenie prądu jonowego, jako funkcji czasu, w założeniu, że wprowadzenie gazu odbyło się w ciągu czasu nieskończenie krótkiego. Prąd posiada wartość początkową  $I_0$  i wzrasta najpierw szybko, potem wolniej, przechodzi przez maximum po upływie około 3 godzin, po czym zmniejsza się w sposób prawidłowy. Prawo zaniku dąży do postaci wykładniczej z okresem zbliżonym do 3,8 dni, charakterystycznym dla radonu. Prąd początkowy pochodzi od promieni  $\alpha$  radonu; wzrost obserwowany pod-



Rys. 63.

czas pierwszych trzech godzin jest spowodowany stopniowym powstawaniem osadu promieniotwórczego, którego działanie pochodzi głównie od promieniowania  $\alpha$ , częściowo jednak również od promieniowania  $\beta$  i  $\gamma$ . Po upływie trzech godzin ustala się określony, niezmienny stosunek między ilością radonu a ilościami składników osadu; całość zmniejsza się wówczas zgodnie z prawem zaniku radonu (§ 62).

Zamiast wprowadzać radon do komory jonizacyjnej, można również zamknąć go w zalutowanej ampułce szklanej i mierzyć promieniowanie przenikliwe jako funkcję czasu (rys. 64). Po upływie trzech godzin od chwili wprowadzenia radonu do ampułki stwierdzamy, że prawo zaniku

jest takie samo jak w poprzednim doświadczeniu, efekt początkowy jest jednak w tym przypadku równy zero (rys. 63, krzywe  $B$  i  $B'$ )<sup>1)</sup>, co dowodzi, że promienie  $\beta$  i  $\gamma$  należy przypisywać osadowi promieniotwórczemu, nie zaś radonowi.

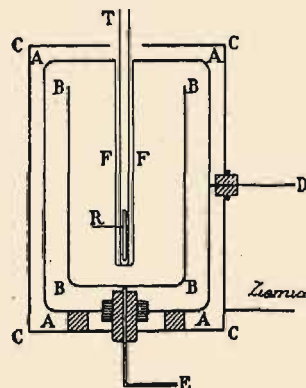
Następująca metoda pozwala badać zanik radonu niezależnie od osadu promieniotwórczego: daną ilość radonu dzielimy w *znanym stosunku* na kilka części; te części wprowadza się kolejno w określonych chwilach do komory jonizacyjnej; w każdym przypadku mierzy się prąd początkowy, po czym komorę się opróżnia, aby mogła być użyta do następnej frakcji. Wszystkie opisane tu metody dały wyniki zupełnie zgodne.

Ponieważ stała radonu ma wielkie znaczenie zarówno z punktu widzenia teoretycznego jak i praktycznego, przeto była przedmiotem pomiarów, wykonanych za pomocą specjalnie opracowanych precyzyjnych metod (*Bothe, I. Curie i C. Chamié*). Sądzymy dziś, że wartość tej stałej jest znana z dokładnością do 0,05% i wynosi

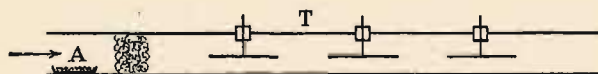
$$\lambda = 2,0985 \cdot 10^{-6} \text{ sek}^{-1}, \quad T = 3,823 \text{ dni.}$$

*Toron.* Toron otrzymujemy zazwyczaj drogą wydzielania ze stałego wodorotlenku toru. Można go wpuszczać wraz z powietrzem otaczającym substancję, w której powstaje, do gazowej komory jonizacyjnej i badać za pomocą metody stałego odchylenia natężenie prądu jonizacyjnego w zależności od czasu (§ 4). Natężenie prądu spada szybko wskutek zaniku toronu, natomiast ciała  $B$  i  $C$  tworzą się tak wolno, że nie odgrywają żadnej roli (p. § 54).

Można również używać metody prądu gazowego (rys. 65). Substancję wydzielającą toron umieszcza się w łódeczce  $A$ ; filtrowany przez watę



Rys. 64.  $A$  — komora jonizacyjna połączona w  $D$  z baterią;  $B$  — elektroda połączona w  $E$  z elektrometrem;  $C$  — osłona elektrostyczna połączona z ziemią;  $T$  — rurka wchodząca w zamknięty u dołu walec przymocowany do górnej podstawy komory  $A$ ;  $R$  — rurka zawierająca radon umieszczona w rurce  $T$ . Jonizacja w komorze  $A$  jest wytworzona przez promienie  $\beta$  i  $\gamma$  wychodzące z  $R$  po przejściu przez ścianki rurek  $T$  i  $F$ .



Rys. 65.

prąd powietrza, którego prędkość jest znana, porywa toron wzdłuż rury  $T$ , zawierającej elektrody rozmieszczone w równych odległościach. Mierzmy jonowy prąd nasycenia, płynący między rurą i każdą z elektrod,

<sup>1)</sup> Wyrysowane w różnych skalach czasu.



nateżenie prądu maleje wraz z odległością od substancji wskutek zaniku toronu podczas przepływu.

Za pomocą obu opisanych metod znaleziono, że okres toronu wynosi 54,5 sekund.

*Aktynon.* Zanik aktynonu jest jeszcze szybszy niż toronu, toteż mógł być badany tylko zapomocą metody prądu gazowego; jako źródła aktynonu używa się jakiejkolwiek ziemi rzadkiej, zawierającej aktyon. Osad aktywny tworzy się szybko i nie może być zaniedbany; jeżeli prąd powietrza przepływa ze stałą prędkością w ciągu trzech godzin, ilość osadu aktynowego na ściankach rury i na elektrodach osiąga wartość proporcjonalną do koncentracji w okolicy danego przekroju rury. Wartość okresu wynosi 3,9 sekund (*Debierne*).

#### § 45. Dyfuzja. Wpływ.

Emanacje dyfundują w powietrzu jak zwykłe gazy w stanie bardzo wielkiego rozcieńczenia, jednakże odległość na jaką mogą oddalić się od miejsca powstawania, jest zależna od czasu ich życia, gdyż emanacje ulegają zanikowi podczas dyfuzji. Tak np. w zwykłym powietrzu radon może wypełnić równomiernie nawet naczynie o dużych rozmiarach, w którym znajduje się roztwór radu, jeżeli zaś mamy dwa zbiorniki połączone, to w każdym z nich ustala się ilość proporcjonalna do objętości o ile temperatury są jednakowe. Natomiast w przypadku toronu i aktynonu, a zwłaszcza tego ostatniego, koncentracja w powietrzu zmniejsza się wraz z odległością od źródła. W naczyniu opróżnionym wszystkie emanacje osiągają jednostajną koncentrację.

Współczynnik dyfuzji  $D$  emanacji w powietrzu lub w innym gazie określamy wzorem

$$n u_x = - D \frac{\partial n}{\partial x},$$

gdzie  $n$  jest to koncentracja emanacji w danym punkcie,  $\frac{\partial n}{\partial x}$  składowa gradienta koncentracji w kierunku  $x$ ,  $u_x$  składowa prędkości dyfuzji w tym samym kierunku; inaczej mówiąc  $n u_x$  jest to ilość emanacji, przechodząca w jednostce czasu przez jednostkę powierzchni prostopadłej do kierunku  $x$ .

W celu wyznaczenia współczynnika  $D$  radonu zastosowano następującą metodę (*Curie i Danne*). Radon znajduje się w zbiorniku  $A$  o objętości  $v$  (rys. 66), który możemy połączyć z wielkim zbiornikiem  $B$  za pomocą rury włoskowatej o długości  $l$  i przekroju  $s$ . Za pomocą promieniowania przenikliwego, wchodzącego do komory jonizacyjnej, wyznacza się ilość radonu w zbiorniku  $A$  po ustaleniu się równowagi z osadem promieniotwórczym. Dopóki połączenie z rurką włoskowatą jest zamknięte, promieniowanie zmniejsza się zgodnie ze zwykłym prawem wykładniczym radonu

$$q = q_0 e^{-\lambda t}; \quad dq/dt = -\lambda q.$$

Z chwilą jednak, gdy połączenie jest otwarte, spadek staje się szybszy wskutek odpływu emanacji przez rurkę. Jeżeli zbiornik  $B$  jest dostatecznie wielki, aby można było zaniedbać koncentrację radonu przy końcu rurki, wówczas w stanie statecznym gradient koncentracji w rurce posiada wartość stałą i równą  $n/l$ , gdzie  $n$  jest to koncentracja w zbiorniku  $A$ ; przez każdy przekrój rurki przechodzi zatem w jednostce czasu ilość radonu równa  $Dns/l = Dqs/lv$ . Prawo zmniejszania się  $q$  jest wówczas następujące

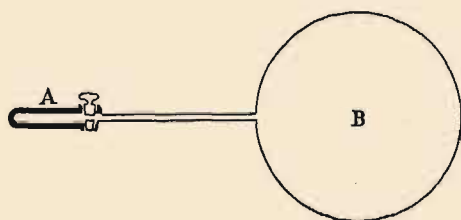
$$dq/dt = -(\lambda + Ds/lv)q = -\mu q, \text{ gdzie } \mu = \lambda + Ds/lv.$$

Promieniowanie zbiornika  $A$  zmniejsza się zgodnie z prawem wykładniczym; wyznaczając doświadczalnie wartość wykładnika  $\mu$  możemy wyliczyć  $D$ . Podczas trwania doświadczenia ciśnienie i temperatura w całej aparaturze muszą pozostawać niezmiennie.

Znaleziono, że współczynnik dyfuzji radonu w powietrzu w normalnych warunkach temperatury i ciśnienia wynosi  $D = 0,100 \text{ cm}^2/\text{sek}$ . Zgodnie z wymaganiami teorii kinetycznej gazów, współczynnik  $D$  wzrasta wraz z temperaturą i jest odwrotnie proporcjonalny do ciśnienia.

Opisana metoda nie nadaje się do pomiaru współczynników dyfuzji toronu i aktynonu, gdyż ich życie jest zbyt krótkie. W tym przypadku można używać metody następującej (Rutherford, Debierne).

Weźmy pod uwagę dyfuzję jednego z tych gazów w kierunku  $Ox$  (rys. 67) wewnątrz zbiornika, posiadającego niewielki przekrój  $A$  (naczynie cylindryczne lub pryzmatyczne o prostokątnym przekroju). Na dnie



Rys. 66.



Rys. 67.

zbiornika, na poziomie  $x = 0$ , znajduje się substancja  $R$ , wydzielająca ze stałą szybkością toron i aktynon, które wskutek samorzutnego rozpadu mają ograniczoną możność wznoszenia się w górę. W tych warunkach ustala się stan, w którym koncentracja  $n$  zmniejsza się wraz ze wzrostem  $x$ ; możemy założyć, że przy górnym końcu naczynia koncentracja jest znikomo mała. Zakładając, że w stanie statecznym ilość toronu lub aktynonu, zanikająca w warstwie grubości  $dx$ , równa się różnicy między ilością wchodzącą przez dolny przekrój i wychodzącą przez górny przekrój warstwy, otrzymujemy równanie:

$$D \frac{d^2 n}{dx^2} = \lambda n,$$

którego całka, z warunkiem  $n_0 = 0$  dla  $x = 0$ , jest

$$n = n_0 e^{-x\sqrt{\lambda/D}},$$

gdzie  $n_0$  jest to koncentracja w punkcie  $x = 0$ .

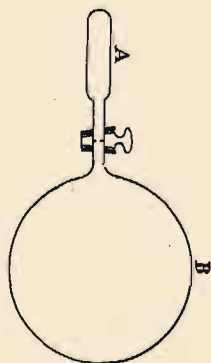
Widzimy zatem, że koncentracja  $n$  maleje wraz ze wzrostem wysokości  $x$  według prawa wykładniczego,  $\log n$  zmniejsza się zatem liniowo, co pozwala wyliczyć  $D$ , jeżeli znamy  $\lambda$ . Koncentracji  $n$  nie mierzymy bezpośrednio, lecz drogą badania osadu powstającego na ścianie  $P$  wstawionej poprzecznie do naczynia; koncentracja osadu jest w każdym miejscu proporcjonalna do  $D$ . Znalezione, że pod ciśnieniem normalnym i w temperaturze  $15^\circ$   $D$  toronu w powietrzu wynosi 0,09 do 0,1,  $D$  aktywno: 0,112 w powietrzu, 0,027 w bezwodniku węglowym i 0,412 w wodorze (*A. Debierne, G. Bruhat*). W przypadku aktywno stwierdzono, że  $D$  jest odwrotnie proporcjonalne do ciśnienia.

Wszystkie trzy emanacje posiadają współczynniki dyfuzji w powietrzu tego samego rzędu wielkości co gazy lub pary, których ciężar drobinowy jest dosyć znaczny, jak np. para eteru lub alkoholu. Ciężar drobinowy emanacji jest jednak znacznie większy niżby to wynikało z wartości współczynnika dyfuzji. W założeniu, że drobina tego gazu jest jednoatomowa i że powstaje z atomu radu ( $Ra = 226$ ) drogą utraty atomu helu ( $He = 4$ ) obliczono, że ciężar drobinowy radonu powinien wynosić 222. W przypadku toronu i aktywno powinniśmy mieć 220 i 219. Wnioski teoretyczne, dotyczące radonu, sprawdzono w doświadczeniach, w których radon ważono bezpośrednio za pomocą czułej mikrowagi (*Ramsay i Gray*). Analogiczny wynik otrzymano przez zastosowanie metody wypływu.

Metoda ta polega na badaniu prędkości z jaką gaz wypływa przez otwór w cienkiej ścianie. Teoria zjawiska jest bardzo prosta w przypadku mieszaniny gazów znajdujących się pod bardzo niskim ciśnieniem (*Knudsen*); mianowicie każdy gaz wypływa z prędkością niezależną od obecności innych gazów; jego ciśnienie cząstkowe w zbiorniku  $A$ , zawierającym początkowo mieszaninę, zmniejsza się

z czasem według prawa wykładniczego  $p = p_0 e^{-\mu t}$ , jeżeli ciśnienie w zbiorniku  $B$ , do którego gazy odpływają, jest znikomo małe. W danych warunkach doświadczalnych współczynnik  $\mu$  jest odwrotnie proporcjonalny do ciężaru drobinowego gazu.

*A. Debierne* zastosował to prawo do wyznaczenia ciężaru drobinowego radonu, ściślej biorąc, stosunku tego ciężaru do znanych ciężarów drobinowych tlenu i argonu. Zbiornik cylindryczny  $A$  zawierający radon można było łączyć z kolbą o pojemności  $B$  za pomocą kranu z szerokim otworem (rys. 68); kanał kranu był zamknięty cienką blaszką platynową, w której



Rys. 68.



zrobiono bardzo mały otworek. W doświadczeniach z czystym tlenem i czystym argonem ciśnienie początkowe wynosiło od 0,2 mm do 0,002 mm, spadek ciśnienia w zbiorniku A badano za pomocą miarki *Mac Leoda*. W doświadczeniach wykonanych z radonem ciśnienie było wielokrotnie mniejsze, toteż ilość radonu wyznaczano na podstawie przenikliwego promieniowania wychodzącego ze zbiornika A; należało przy tym wziąć pod uwagę rozpad promieniotwórczy radonu. Jako ciężar drobinowy radonu otrzymano 221; w granicach dokładności doświadczenia wartość ta zgadza się doskonale z teorią.

Dokonano również próby zastosowania tej metody do toronu. Trudności doświadczenia były w tym przypadku znacznie większe, tym niemniej otrzymano wartość zbliżoną do poprzedniej<sup>1)</sup>.

#### § 46. Absorpcja w cieczach i ciałach stałych. Rozpuszczalność.

##### Kondensacja w niskich temperaturach.

Emanacje są do pewnego stopnia rozpuszczalne w wodzie i innych cieczach, są również absorbowane przez niektóre ciała stałe, jednakże w znacznie mniejszym stopniu<sup>2)</sup>.

Radon dyfunduje w wodzie podobnie jak w powietrzu; zdołano nawet wyznaczyć współczynnik dyfuzji w podobny sposób jak w przypadku dyfuzji aktynonu i toronu w powietrzu; znaleziona wartość wynosi 0,91  $\text{cm}^2/\text{sek}$  w temperaturze 18°.

Badanie rozpuszczalności radonu w wodzie ma duże znaczenie praktyczne, wynikające stąd, że radon znajduje się w wodach źródeł naturalnych i że roztwory radonu bywają sporządzane w celach leczniczych. Zgodnie z prawem rozpuszczalności gazów współczynnik rozpuszczalności radonu w cieczy definiujemy jako stosunek  $\alpha$  koncentracji w cieczy i w powietrzu nad wodą, w stanie równowagi i w określonej temperaturze. Jeżeli objętości powietrza i cieczy pozostających z sobą w zetknięciu wynoszą  $v$  i  $v'$ , jeżeli  $q$ ,  $q'$  są to ilości radonu w powietrzu i cieczy w stanie równowagi,  $c$  i  $c'$  koncentracje radonu, odpowiadające tym ilościom,  $\alpha$  — współczynnik rozpuszczalności, wówczas mamy

$$\begin{aligned} q &= cv, & q' &= c'v', & c/c' &= \alpha, \\ q + q' &= cv + c'v' = c(v + \alpha v'). \end{aligned}$$

Jeżeli zatem objętości  $v$  i  $v'$  są znane, można obliczyć  $\alpha$  wyznaczając całkowitą ilość radonu oraz jego koncentrację w powietrzu. W celu osiągnięcia równowagi między fazą gazową i ciekłą należy ciecz wy-

<sup>1)</sup> Prędkość dyfuzji gazów izotopowych w tym samym obcym gazie powinna być tym większa, im ciężar cząsteczkowy jest mniejszy; toron powinien zatem dyfundować szybciej niż radon. Sprawdzenie tego wniosku wymagałoby doświadczeń dokładniejszych niż tu opisane.

<sup>2)</sup> P. Curie, A. Debierne, F. Himstedt, H. Mache, Rausch v. Trautenberg i in.

kłócać bądź wstrząsając mieszaninę gazu i cieczy, bądź przepuszczając prąd gazu, krążący przez ciecz w zamkniętym obiegu.

Rys. 69 przedstawia proste urządzenie do mierzenia rozpuszczalności (*E. Ramstedt*): dwa jednakowe zbiorniki *A* i *B* są połączone kranem o szerokim otworze; do zbiornika *A* wprowadza się ciecz, do zbiornika *B* powietrze zawierające radon, którego ilość mierzy się za pomocą promieniowania przenikliwego; następnie otwiera się kran i przyspiesza się osiągnięcie równowagi odwracając kilkakrotnie aparat tak, aby gaz mieszał się z cieczą; wreszcie gaz oddziela się znowu od cieczy i mierzy się ilość radonu, pozostałą w zbiorniku, po upływie czasu potrzebnego do osiągnięcia równowagi między radonem i osadem promieniotwórczym. Należy przy tym wziąć pod uwagę znikanie radonu wskutek promieniotwórczości.



Rys. 69.

Wartości  $\alpha$  otrzymane przez różnych badaczy w przypadku wody w 15° wahają się od 0,25 do 0,30; innymi słowy, jeżeli objętości wody i powietrza są w przybliżeniu równe, wówczas czwarta część ilości radonu znajduje się w wodzie, trzy czwarte zaś w powietrzu.  $\alpha$  zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury; wrzenie całkowicie wypędza radon z cieczy. Radon jest mniej rozpuszczalny w roztworach niektórych soli niż w czystej wodzie, natomiast rozpuszcza się znacznie więcej w niektórych cieczach organicznych, które z tego powodu można traktować jako absorbenty radonu, zwłaszcza w niskich temperaturach (nafta, dwusiarczek węgla).

Załączona tablica zawiera wartości współczynników rozpuszczalności w wodzie i niektórych innych cieczach. Rozpuszczalność toronu i aktyonu nie była dotąd przedmiotem dokładnych wyznaczeń:

	$\alpha$ (18—20°)	Woda w t°	$\alpha$
Woda . . . . .	0,25	5°	0,51
Alkohol. . . . .	62	10°	0,35
Nafta . . . . .	10	20°	0,25
Benzol . . . . .	13	30°	0,20
Heksan. . . . .	17	50°	0,14
Dwusiarczek węgla . . . . .	23	80°	0,11
		100°	0,10

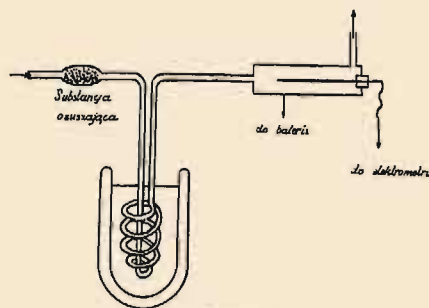
Ścianki szklane lub metalowe pochłaniają w zwykłej temperaturze tylko ślady radonu; silniej absorbują radon substancje tłuszczowe oraz kauczuk. Najwydatniejszy efekt absorpcji zachodzi jednak na węglu, który nawet w zwykłej temperaturze może pochłaniać całkowitą ilość radonu pozostającego z nim w zetknięciu; gdy następnie ogrzewamy węgiel, radon wydziela się stopniowo, w zupełności zaś w temperaturze



wynoszącej od 300-400°; skuteczność absorpcji zależy od rodzaju użytego węgla<sup>1)</sup>.

Wszystkie ciała, nawet nie pochłaniające radonu w zwykłej temperaturze, kondensują go w bardzo silnym stopniu w niskich temperaturach (*Rutherford* i *Soddy*); toron i aktynon zachowują się w podobny sposób. Można to pokazać za pomocą następującego urządzenia (rys. 70). Prąd osuszonego gazu zawierającego radon przepływa przez węzownicę zanurzoną w kąpeli chłodzącej i wchodzi do komory jonizacyjnej A. Jeżeli kąpiel posiada temperaturę ciekłego powietrza ( $-180^{\circ}$ ), emanacja jest całkowicie skondensowana w węzownicy. Gdy następnie temperatura kąpeli się podnosi, dostrzegamy nagłe pojawienie się prądu w komorze jonizacyjnej, odpowiadające temperaturze zbliżonej do  $-152^{\circ}$ .

Kondensacja radonu w temperaturze ciekłego powietrza znalazła zastosowanie jako powszechnie używany sposób oczyszczania radonu. Kondensujemy radon w rurce szklanej (rurka zatopiona na końcu lub rurka



Rys. 70.

w kształcie litery U zanurzona w kąpeli); osad tworzy się na niewielkiej powierzchni, której silna luminescencja bardzo ułatwia obserwację zjawiska.

Kondensacja jest zjawiskiem różnym od skraplania radonu, zachodzącego pod ciśnieniem atmosferycznym w temperaturze  $-65^{\circ}$ . Na ogół nie obserwujemy skraplania radonu, gdyż stopień rozcieńczenia tego gazu jest zbyt wielki, aby mogła utworzyć się równowaga między fazą ciekłą i gazową. Kondensacja w niskich temperaturach jest to zjawisko zależne od adsorpcji radonu na ściankach.

#### § 47. Własności chemiczne. Promieniowanie.

Emanacje traktujemy jako izotopowe gazy szlachetne, reprezentujące wyższy homolog ksenonu w grupie gazów szlachetnych. W istocie nie zauważono nigdy oznaki jakiegokolwiek połączenia emanacji pod działaniem różnych czynników chemicznych (próby utlenienia, redukcji, pochłaniania w roztworach kwaśnych lub zasadowych, stosowanie wyładowań elektrycznych). Zakładamy, że drobina emanacji jest jednoatomowa i że liczba atomowa wynosi 86, co wynika z teorii przemian promieniotwórczych.

Emanacjom przypisujemy promieniowanie  $\alpha$ . Jeżeli prąd powietrza zawierającego którąkolwiek z emanacyj przechodzi przez płaskie pu-

<sup>1)</sup> Jest to zjawisko absorpcji na ściankach mikrostruktury węgla; węgiel aktywny znalazł zastosowanie do pochłaniania radonu.

dełko, przykryte cienką ścianką (np. folią glinową grubości 0,1 mm) nie dostrzega się zrazu żadnego promieniowania przenikającego przez tę ściankę; promieniowanie to pojawia się jednak stopniowo wskutek nagromadzania się aktywnego osadu na wewnętrznej powierzchni pudełka. Poprzednio wspominaliśmy, że rurka, zalutowana natychmiast po wprowadzeniu do niej radonu, również nie daje żadnego promieniowania przenikliwego w chwili początkowej. Wszelako w przypadku aktynonu dokładniejsze doświadczenia wykazały obecność promieni  $\beta$  i  $\gamma$ .

Usiłowano stwierdzić czy emanacje, a w szczególności radon, posiadają w zwykłych warunkach ładunek elektryczny. Następujący fakt dowodzi, że tak nie jest: pole elektryczne przyłożone poprzecznie do wąskiej rurki, nie ma żadnego wpływu na zachodzącą wzdłuż rurki dyfuzję radonu.

#### § 48. Powstawanie i nagromadzanie się radonu. Definicja curie.

Przemiana radu jest bardzo powolna, toteż można przyjąć, że radon wytwarza się z szybkością, praktycznie biorąc, niezmienną, proporcjonalną do ilości radu i niezależną od żadnych innych okoliczności. Utworzony radon ulatnia się w przestrzeni otaczającej substancję macierzystą: zbadamy zatem prawo nagromadzania się radonu w zamkniętym naczyniu, zawierającym stałą sól lub roztwór radu.

Niech będzie  $p$  masa radu zawartego w zbiorniku,  $\Delta$ —ilość emanacji wytwarzanej w jednostce czasu przez gram radu,  $q$ —ilość radonu w zbiorniku w chwili  $t$ ,  $\lambda$ —stała zaniku radonu; szybkość wzrastania  $q$  równa się różnicy między szybkością wytwarzania i szybkością samorzutnego zaniku; mamy zatem:

$$\frac{dq}{dt} = p\Delta - \lambda q.$$

Całka tego równania z warunkiem:  $q = q_0$  w chwili  $t = 0$ , jest

$$q = q_0 e^{-\lambda t} + \frac{p\Delta}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}).$$

Pierwszy wyraz po prawej stronie równania oznacza pozostałość w chwili  $t = 0$  ilości  $q_0$ , która znajdowała się początkowo w zbiorniku, drugi wyraz przedstawia stopniowe narastanie radonu począwszy od stanu, w którym radon był całkowicie usunięty z aparatury. Niezależnie jednak od warunków początkowych, ilość  $q$  dąży zawsze do określonej granicy

$$q_{\infty} = \frac{p\Delta}{\lambda};$$

jest to ilość radonu w równowadze promieniotwórczej z daną ilością  $p$  radu.

Rys. 71 przedstawia prawo narastania radonu,  $q = q_{\infty}(1 - e^{-\lambda t})$  tudzież prawo samorzutnego zaniku ilości  $q_{\infty}$ , oddzielonej od radu. Odpowiednie

krzywe nazywamy *dopełniającymi się*, ponieważ suma rzędnych odpowiadających tej samej chwili jest stała i równa  $q_\infty$ .

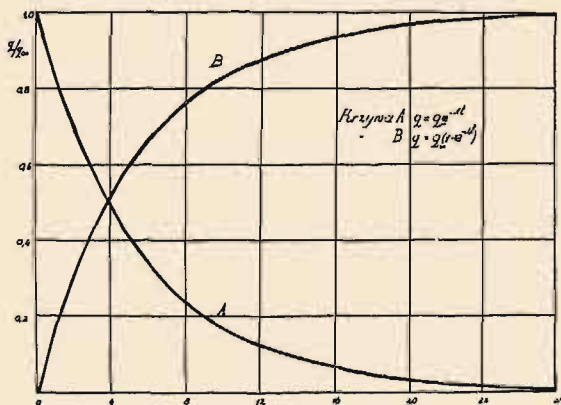
Wartość otrzymana po upływie miesiąca różni się tylko o 0,5% od wartości granicznej, połowa tej wartości jest osiągnięta po upływie 3,82 dni, czyli okresu radonu.

Niech będzie  $q$  ilość radonu utworzona w ciągu czasu  $t$ , dana przez powyższy wzór. Obliczmy jaki czas byłby potrzebny do otrzymania tej samej ilości, gdyby zanikanie samorzutne nie miało miejsca: otrzymamy w ten sposób tzw. *zredukowany czas*  $t_r$  wyrażony wzorem:

$$q = p \Delta t_r; \quad t_r = \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}).$$

Czas zredukowany jest zawsze mniejszy od  $t$  i wzrasta wraz z  $t$  od 0 do wartości granicznej  $\theta = \frac{1}{\lambda}$ .

zwanej *średnim czasem życia radonu*. Mamy  $\lambda = 0,00755 \text{ godz}^{-1}$ ,  $\theta = 132,4 \text{ godz} = 5,525 \text{ dni}$ .



Rys. 71.

W wielu zagadnieniach teoretycznych i doświadczalnych jest rzeczą bardzo ważną charakteryzowanie ilości radonu za pomocą ilości radu pozostającej z nią w równowadze. Kongres Nauki o Promieniotwórczości, odbyty w Brukseli w 1910 r., postanowił utworzyć jednostkę radonu: *curie* określoną jako *ilość radonu w równowadze promieniotwórczej z jednym gramem radu*. Ta jednostka jest obecnie używana powszechnie podobnie jak mniejsze jednostki pochodne: *milicurie*, *mikrocurie* i *milimikrocurie*.

Ilość radonu, utworzona przez gram radu w jednostce czasu, wyrażona w curie równa się liczbowo stałej  $\lambda$ ; mianowicie 0,0075 curie lub 7,5 milicurie, jeżeli jako jednostkę czasu obieramy godzinę.

Świeżo wykrystalizowana sól radu nie zawiera ani radonu, ani osadu aktywnego; mówimy że rad znajduje się w *minimum aktywności*. Aktywność wzrasta następnie stopniowo wskutek narastania radonu i osadu aktywnego. Jeżeli radon pozostaje uwięziony w ziarnkach soli i jeżeli strata wskutek dyfuzji jest znikomo mała, wówczas ilość radonu wzrasta według tego samego prawa, co w zamkniętym naczyniu; równowaga jest osiągnięta w przybliżeniu po upływie miesiąca. Aktywność, mierzona za pomocą promieni  $\alpha$  po osiągnięciu maximum, jest 5 razy większa od aktywności początkowej. Jeżeli natomiast mierzymy tylko działanie pro-



mieni  $\beta$  i  $\gamma$ , stwierdzamy, że aktywność początkowa soli jest równa zeru i wzrasta zgodnie z prawem wytwarzania się radonu. Jeżeli radon wydziela się z soli, aktywność jest zmniejszona w obu przypadkach.

#### § 49. Oznaczanie radonu. Oznaczanie radu za pomocą utworzonego radonu.

W tym ustępie zajmujemy się pomiarami małych ilości radonu i radu za pomocą komór jonizacyjnych do badania gazów. W innej części książki (§ 97) będzie mowa o pomiarach wykonywanych za pomocą promieni  $\gamma$ .

W celu oznaczenia ilości radonu mierzymy prąd nasycenia dawany przez tę ilość w szczelnej komorze jonizacyjnej. Należy przy tym wziąć pod uwagę następujące okoliczności:

1°. Ponieważ prąd jest zależny od czasu, należy dokładnie oznaczyć chwilę, w której wykonywa się pomiar. Najczęściej obiera się chwilę przejścia prądu przez maximum, co ma miejsce wtedy, kiedy osad aktywny jest całkowicie utworzony i znajduje się w równowadze promieniotwórczej z radonem. Maximum jest szerokie, można przeto obrać dowolną chwilę między trzema i czterema godzinami po wprowadzeniu radonu do komory.

2°. Prąd zmierzony w określonej chwili zależy od rozmiarów i od kształtu użytej komory jonizacyjnej; w komorach podobnego kształtu wzrasta wraz z rozmiarami, z powodu coraz zupełniejszego wykorzystania promieni. Prąd wzrasta również wraz z gęstością powietrza zawartego w komorze.

3°. W celu otrzymania wartości bezwzględnych należy wycechować komorę; czynność ta polega na mierzeniu prądu nasycenia, otrzymywanego w stanie równowagi promieniotwórczej po wprowadzeniu do komory *znanej* ilości radonu, np. ilości nagromadzonej w ciągu określonego czasu w roztworze wzorcowym, zawierającym znaną ilość radu.

Za pomocą tej metody można oznaczać dokładnie ilości radonu od jednego mikrocurie do jednego milimikrocurie ( $10^{-6}$  do  $10^{-9}$  curie), a nawet jeszcze mniejsze.

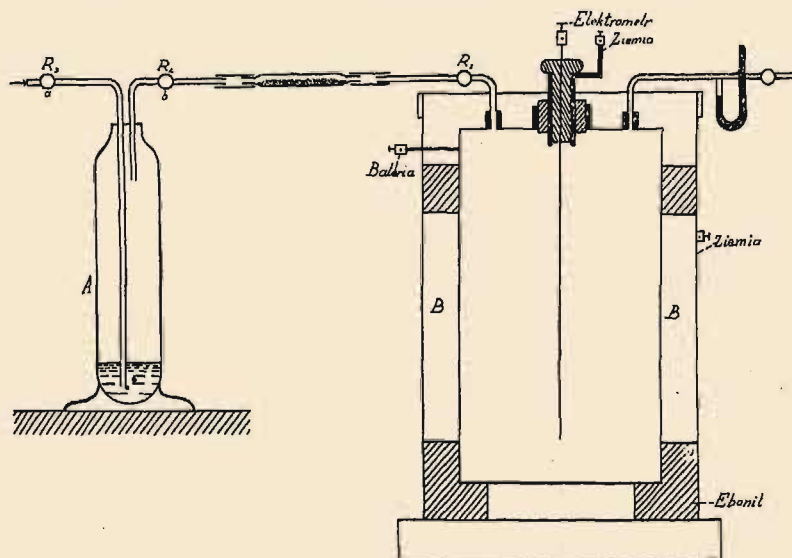
Z tego, co było powiedziane poprzednio, wynika, że jest to zarazem metoda oznaczania małych ilości radu. Niechaj roztwór zawiera  $p$  gramów radu; załóżmy, że najpierw całkowicie usunięto radon z roztworu, następnie zbierano go w szczelnie zamkniętym naczyniu w ciągu znanego czasu  $t$ , wreszcie przeniesiono radon w całości do wycechowanej komory jonizacyjnej, w której w stanie równowagi otrzymano prąd nasycenia  $I$ . Niech  $t_r$  będzie to czas zredukowany, odpowiadający czasowi  $t$ ;

stosunek  $\frac{I}{t_r}$  jest niezależny od czasu nagromadzania radonu i jest proporcjonalny do  $p$ , może zatem służyć do obliczenia  $p$ .

W oznaczeniach tego rodzaju radon bywa najczęściej ekstrahowany

drogą płukania w temperaturze pokojowej, lub doprowadzania radonu do wrzenia. Pierwszy z tych sposobów nadaje się w przypadku roztworów małej objętości (jeden lub kilka centymetrów sześciennych), natomiast drugi sposób, mniej dogodny w użyciu i na ogół mniej dokładny, jest wskazany w przypadku, gdy mamy do czynienia z kilkoma litrami cieczy.

Metoda płukania w temperaturze pokojowej. Roztwór, który chcemy oznaczyć, znajduje się w płuczce szklanej, zaopatrzonej w dwie rurki, *a* i *b* (rys. 72), których objętość jest mała wobec objętości komory jonizacyjnej *B*. Najpierw wypędzamy z roztworu zawarty w nim radon przepuszczając przez płuczkę prąd powietrza w ciągu 10 minut przy pomocy próżniowej pompy; następnie zamykamy płuczkę zapisując chwilę, w której to miało miejsce. Nagromadzanie radonu trwa na ogół od jednego do trzech dni. W celu przeniesienia zebranego radonu do



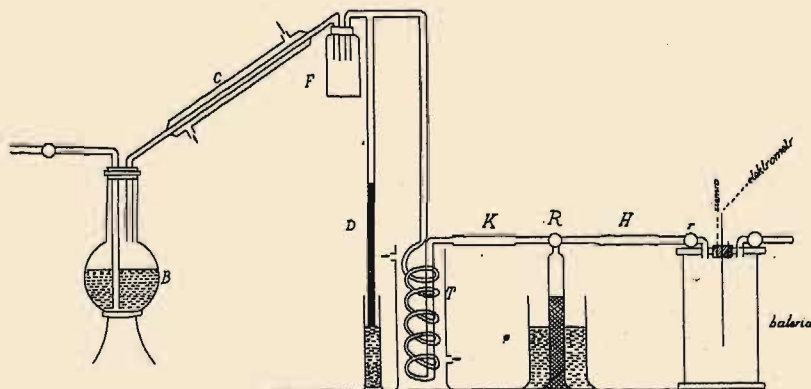
Rys. 72.

komory jonizacyjnej, robimy w tej ostatniej próżnię, po czym łączymy ją z rurką *b* płuczki. Otwierając i zamykając krany  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  w łatwo zrozumiałej kolejności przepędzamy kilkakrotnie gaz z płuczki do komory, po czym przywracamy w komorze ciśnienie atmosferyczne wpuuszczając do niej powietrze z zewnątrz poprzez roztwór; zapisujemy chwilę zakończenia tych czynności; odstęp pomiędzy tą chwilą i zapisaną poprzednio jest to czas nagromadzania radonu. Pomiar prądu powinien nastąpić w 3 lub 4 godziny po pobraniu radonu.

W oznaczeniach radonu można osiągnąć znaczną dokładność, dochodzącą do 0,5%, muszą one jednak być wykonane z wielką starannością; płuczki muszą być dobrze oczyszczone, roztwory klarowne, należy wreszcie unikać rozpryskiwania cieczy. Za pomocą poprawki ustalonej doświadczalnie sprowadza się wszystkie pomiary do określonej gęstości

powietrza w komorze. Komora nie powinna posiadać «biegu własnego»; należy przeto po każdym pomiarze usuwać wszelkie ślady pozostałego w niej radonu.

**Metoda wrzenia.** Roztwór umieszcza się w kolbie o pojemności 1 do 3 litrów (rys. 73) i doprowadza się go do wrzenia w celu wypędzenia zawartego w nim radonu, następnie zamyka się kolbę na określony przeciąg czasu. W celu zebrania wytworzonego radonu doprowadza się znowu roztwór do wrzenia, kolba musi być zaopatrzona w chłodnicę



Rys. 73. *B* — kolba; *C* — chłodnica zwrotna; *F* — flakon bezpieczeństwa; *D* — manometr; *T* — wężyk służący do skraplania wydzielonych gazów; *G* — klosz do zbierania gazów; *R* — kran trójdrożny; *K* i *H* — rurki zawierające watę szklaną i reaktywy osuszające; *A* — komora jonizacyjna zaopatrzona w krany *r* i *r'*.

zwrotną, gazy zaś przechodzą do odwróconej, wypełnionej rtęcią probówki, z której można je skierować do poprzednio opróżnionej komory jonizacyjnej. Ten sam przyrząd może służyć do oznaczania radonu zawartego w różnych cieczach, np. w wodzie pochodzącej ze źródeł leczniczych. W tym przypadku należy przenieść roztwór do kolby w taki sposób, aby strata gazu była możliwie najmniejsza i natychmiast przystąpić do wypędzania radonu za pomocą wrzenia. Należy dokładnie zapisać chwilę pobrania próbki ze źródła, co umożliwi zrobienie poprawki wynikającej z samorzutnego znikania radonu.

**Zastosowania.** Metoda przepłukiwania w temperaturze pokojowej jest używana głównie do oznaczania radonu w minerałach uranowych. W tym celu proszkuje się niewielką ilość (1—2 g) minerału, do którego dodaje się ok. 0,1 g chlorku baru, służącego do porywania radu. Mieszaninę tę należy poddać czynnościom chemicznym mającym na celu całkowite wydzielenie radonośnego baru; roztwór otrzymanej soli barowej wprowadza się do płuczki i oznacza się zawartość radu w próbce. W ten sposób można zbadać dowolną substancję zawierającą rad w ilości porównywalnej z ilością radu w minerałach. Jeżeli ta ilość jest zbyt wielka dla bezpośredniego pomiaru, pobiera się określoną część substancji lub roztworu.

Można również oznaczać rad w minerałach za pomocą metody wrzenia, mianowicie w przypadku gdy otrzymuje się roztwór klarowny, lecz zawierający zbyt wiele substancji, aby skoncentrowanie go w małej objętości było możliwe. Ta sama metoda bywa używana w zastosowaniu



do wód mineralnych naturalnych lub do sztucznych płynów promieniotwórczych, jeżeli do pomiaru konieczne jest pobranie jednego lub dwóch litrów.

Niekiedy bywa używany jeszcze inny sposób oznaczania radu, polegający na tym, że substancję radonośną poddaje się działaniu czynników chemicznych powodujących wydzielanie się radonu (np. stężony gorący  $H_2SO_4$ ; stopienie z kwaśnymi siarczanami alkalicznymi itp.). Doświadczenie wykazuje, że substancja stopiona lub rozłożona może wydzielić całkowicie radon.

Cechowanie komór. Roztwory i sole wzorcowe. Podstawą cechowania jest dokładne oznaczenie ciężaru czystej i dobrze określonej soli radowej. Dla otrzymania dostatecznej dokładności należy użyć 10—20 mg soli oczyszczonej i zważonej z taką samą starannością, jak do oznaczenia ciężaru atomowego. Z tej soli sporządza się roztwór pierwotny, następnie roztwór wtórny drogą rozcieńczenia określonej części tego ostatniego; wreszcie z roztworu wtórnego pobiera się próbki do płuczek.

Jeżeli laboratorium posiada wzorzec radowy (§ 97), tj. zalutowaną ampulkę zawierającą znaną ilość radu, to można oznaczyć ilość radu użytą do roztworu pierwotnego na podstawie promieniowania  $\gamma$ , które porównywa się z promieniowaniem wzorca; w tym przypadku można użyć soli mniej czystej niż do oznaczeń wagowych.

Roztwory wzorcowe są przechowywane w zamkniętych flakonach lub zalutowanych ampulkach; w celu zachowania ich przez długi czas w dobrym stanie należy je sporządzać z wielką starannością i używać możliwie najczystszych reagentów i naczyń. Można również przyrządzać sól wzorcową, np. radonośny węglan baru otrzymany w stanie jednorodnej mieszaniny drogą strącenia w odpowiednich warunkach; mianowicie dobiera się koncentrację radu w ten sposób, aby ilość odpowiednia dla jednej płuczki wynosiła od 1—2 decygramów soli, a zatem mogła być dokładnie zważona; do rozpuszczenia tej soli wystarcza mała ilość rozcieńczonego kwasu solnego.

W celu wycechowania komory trzeba zmierzyć w chwili maximum prąd jonizacyjny, pochodzący od radonu wytworzonego w ciągu określonego czasu w roztworze wzorcowym i ekstrahowanego metodą przepłukiwania w temperaturze pokojowej<sup>1)</sup>.

Dla przykładu podajemy szczegóły ilościowe, dotyczące aparatury używanej w Paryskim Instytucie Radowym.

Komora jonizacyjna: wysokość 12,5 cm, średnica wewnętrzna 6,7 cm, objętość 440 cm<sup>3</sup>; elektroda wewnętrzna ma postać pręta o średnicy 3 mm, którego dolny koniec znajduje się 1 cm ponad dnem. Jeżeli komora jest napełniona powietrzem w temperaturze 15° i pod ciśnieniem normalnym, wówczas maksymalny prąd nasycenia na 1 gram radu i 1 godzinę zredukowanego czasu wynosi  $I = 1,62 \cdot 10^4$  j.es. Maksymalny prąd nasycenia na 1 curie wynosi  $I \times \theta$ , gdzie  $\theta$  jest to średni czas życia radonu; mamy  $I \cdot \theta = 2,62 \cdot 10^4 \times 132,4 = 3,47 \cdot 10^6$  j.es.

Przy końcu książki znajduje się tablica służąca do ułatwienia rachunków, dotyczących zanikania radonu i oznaczania radu na podstawie wytworzonego radonu (tabl. 13, 14, Przypisy).

<sup>1)</sup> Niektóre laboratoria dostarczają osobom zainteresowanym roztwory wzorcowe lub próbki soli wzorcowej.

### § 50. Wytwarzanie i wydzielanie się toronu i aktynonu.

Prace eksperymentalne z gazami krótkotrwałymi, toronem i aktynem, są trudniejsze niż z radonem i dlatego te ciała nie zostały zbadane w tym samym stopniu. Stwierdzono, że roztwór toru jest stałym źródłem powstawania toronu, jednakże tylko w tym przypadku, gdy tor jest w równowadze ze swymi pierwiastkami pochodnymi, w szczególności z torem X, bezpośrednim rodzicem toronu.

Na ogół nie używa się roztworów do otrzymywania toronu i aktynonu; najczęściej posługujemy się w tym celu substancjami stałymi; w przypadku toronu — wodorotlenkiem toru, zawierającym pochodne toru aż do toru X; w przypadku aktynonu — wodorotlenkiem rzadkich ziem, zawierających aktyn, radioaktyn i aktyn X. Są to substancje bardzo rozdrobnione i wydzielające obficie toron lub aktynon; natomiast prądenie zamienia je na tlenki bardziej spójne i wskutek tego dające znacznie mniejszą wydajność emanacji.

Robiono próby oznaczania toru i aktynu drogą przepędzania wytworzonego i wydzielonego toronu lub aktynonu do komory jonizacyjnej stałym prądem powietrza. Technika tych pomiarów nie została udoskonalona w tym stopniu, co w przypadku radonu i nie weszła w powszechne użycie; należy przy tym zaznaczyć, że oznaczenie nie dotyczy głównej substancji macierzystej, lecz tylko bezpośredniego rodzica, tj. toru X lub aktynu X; ta niedogodność nie zachodzi przy oznaczaniu radu za pomocą radonu.

### § 51. Otrzymywanie czystego radonu. Widmo. Objętość jednego curie.

Radon zdołano wydzielić w czystym stanie; jest to fakt wielkiego znaczenia dla nauki o promieniotwórczości. Preparaty silnie skoncentrowanego radonu są często używane w badaniach naukowych lub w lecznictwie. Technika otrzymywania preparatów tego rodzaju jest obecnie bardzo udoskonalona.

Radon otrzymuje się z roztworu chlorku lub bromku radu. Roztwór tych soli wydziela stale tlen i wodór, które powstają wskutek tego, że promienie radu i jego pochodnych (głównie promienie  $\alpha$ ) rozkładają wodę. W mieszaninie gazów znajdujemy również parę wodną, niewielką ilość gazów zawierających węgiel i pochodzących z utlenienia śladów substancyj organicznych (np. smar do kranów), wreszcie w niezmiernie małej ilości hel, utworzony w przemianie promieniotwórczej radu i jego pochodnych oraz radon, powstający z radu.

Objętość gazu piorunującego utworzonego w jednostce czasu zależy od stopnia zużytkowania promieni w aparaturze, a zatem od jej kształtu; objętość ta jest rzędu wielkości  $1 \text{ cm}^3$  gazu na godzinę i na gram radu. Ponieważ roztwór radu znajduje się w naczyniu pozbawionym powietrza,



ciśnienie gazów stopniowo wzrasta, toteż należy je usuwać w określonych odstępach czasu; wszelako zdarza się, że ciśnienie przybiera wartość stateczną wskutek łączenia się wodoru z tlenem (również pod działaniem promieni), kompensującego powstawanie tych gazów. Radon narasta zgodnie z prawem podanym poprzednio (§ 48), aż do osiągnięcia granicy zależnej od ilości radu.

W celu oddzielenia radonu od gazów, z którymi jest zmieszany, najpierw wyciąga się mieszaninę za pomocą pompy rtęciowej i wprowadza do doskonale opróżnionej aparatury, w której odbywa się oczyszczanie. W aparaturze znajduje się siatka miedziana i tlenek miedzi, ogrzane do czerwoności i służące do pochłaniania tlenu oraz utleniania wodoru, bezwodnik fosforowy do pochłaniania pary wodnej i ług potasowy do pochłaniania bezwodnika węglowego. Jeżeli celem doświadczenia nie jest otrzymywanie zupełnie czystego radonu, wystarczy zebrać niewielką pozostałość gazu, zawierającą radon i ślady zanieczyszczeń; w tym celu włącza się tę pozostałość do rurki włoskowatej, którą następnie odlutowuje się za pomocą dmuchawki. Można również skondensować radon w rurce włoskowatej, zamkniętej na końcu i zanurzonej w ciekłym powietrzu i odlutować tę rurkę w chwili, gdy kondensacja jest zupełna; kondensacja jest widoczna wskutek świecenia rurki (tabl. XX rys. 3). Schemat aparatu jest przedstawiony na rys. 74.

Dla otrzymania zupełnie czystego radonu jest rzeczą wskazaną dołączyć do głównej aparatury drugą podobną, lecz znacznie mniejszą, w której dokonywa się oczyszczania ostatecznego, polegającego między innymi na oddzielaniu radonu od helu; w tym celu należy skondensować radon w rurce oziębionej do temperatury ciekłego powietrza i usunąć hel łącząc aparaturę na krótki przeciąg czasu z pompą próżniową. Następnie, po wyparowaniu skondensowanego radonu, włącza się rtęcią czysty gaz do rurki włoskowatej; doświadczenie może być wykonane w ten sposób, aby można było sfotografować widmo czystego radonu i zmierzyć jego objętość pod znanym ciśnieniem.

Czysty radon posiada charakterystyczne widmo iskrowe zbadane najpierw przez *Rutherforda* i *Roydsa*<sup>1)</sup>.

Oto niektóre główne prążki radonu w angströmach:

3664,6	3982,0	4308,3	4625,9
3753,6	4018,0	4350,3	4644,7
3957,5	4166,6	4460,0	4681,1
3971,9	4203,7	4509,0	5582,2

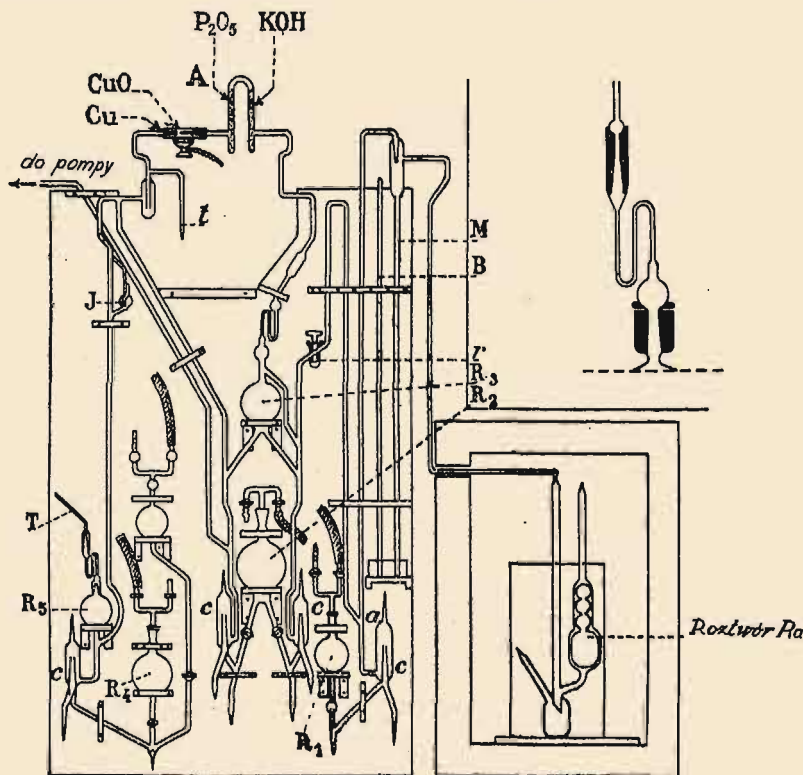
Natychmiast po przyrządzeniu radon daje tylko własne widmo. Ponieważ jednak hel powstaje w dostrzegalnej ilości już po krótkim czasie

<sup>1)</sup> *Rasmussen* zbadał szczegółowo widmo radonu i podał jego interpretację na podstawie dzisiejszych poglądów teoretycznych (L. W.).



wskutek przemiany radonu i osadu aktywnego, przeto stopniowo pojawia się widmo helu nakładające się na widmo radonu, to ostatnie zaś staje się coraz słabsze i znika po upływie około miesiąca.

Objętość czystego radonu zmienia się wraz z ciśnieniem zgodnie z prawami gazów szlachetnych. Wszelako na samym początku doświadczenia daje się zauważyć szybkie kurczenie się gazu, aż do pewnej gra-



Rys. 74. Roztwór *Ra* znajduje się w zbiorniku kwarcowym, umieszczonym dla bezpieczeństwa w innym naczyniu; *M* i *B* — manometr i barometr do mierzenia ciśnienia gazów nad roztworem; *R*<sub>1</sub> — zbiornik rtęciowy służący do podnoszenia rtęci tak, aby można było odciąć połączenie między roztworem i aparaturą *A* lub też otworzyć to połączenie po uprzednim zrobieniu dobrej próżni w *A*; *r* — kran służący do wpuszczania gazów do przyrządu *A*; *R*<sub>2</sub> i *R*<sub>3</sub> — zbiorniki rtęci służące jako pompa do wyciągania gazów i wtłaczania ich do *A*; *J* — miarka *Mac Leoda* do mierzenia ciśnienia gazów pozostałych po oczyszczeniu mieszaniny gazowej za pomocą reagentów umieszczonych w przyrządzie *A*; *R*<sub>4</sub> i *R*<sub>5</sub> — zbiorniki służące jako pompa do wyciągania oczyszczonych gazów i wtłaczania ich w włoskowatą rurkę *T*; *t* — rurka włoskowata, którą można zanurzyć w ciepłym powietrzu w celu skroplenia radonu; *cccc* — płuczki służące do usuwania pęcherzyków powietrza porywanych przez rtęć.

nicznej objętości. Jak się zdaje, zjawisko to polega na pochłanianiu śladów zanieczyszczeń przez ścianki wskutek zderzeń z cząstkami  $\alpha$ .

Mierzac ciśnienie radonu w zależności od jego objętości i w różnych temperaturach, możemy zaobserwować skraplanie się radonu, oznaczyć ciśnienie jego pary nasyconej oraz temperaturę wrzenia wynoszącą — 65°

(*Ramsay, Rutherford*). *Ramsay* podaje, że radon zestala się w temperaturze  $-71^{\circ}$ , czego oznaką ma być pojawienie się silnie błyszczącego punktu na ściankach rurki.

Objętość jednego curie jest to jedna z podstawowych stałych nauki o promieniotwórczości; dla oznaczenia tej wielkości należy w zasadzie zmierzyć objętość czystego radonu, wydzielonego przez znaną ilość radu w ciągu znanego czasu. Ponieważ jednak nie można liczyć na to, że wytworzony radon został wydobyty w całości, przeto lepiej jest oznaczyć ilość radonu w rurce drogą porównania jej promieniowania  $\gamma$  z promieniowaniem wzorca radowego. W ten sposób znaleziono, że objętość jednego curie w normalnych warunkach ciśnienia i temperatury wynosi około  $0,6 \text{ mm}^3$  (*Rutherford, Ramsay, Debierne, Wertenstein*<sup>1)</sup>); wartość ta jest zgodna z przewidywaniami teoretycznymi (por. § 71 i 72).

Ilości radonu użyte w tych doświadczeniach były rzędu 100 millicurie; taka ilość zajmuje pod ciśnieniem atmosferycznym długość ok. 2 mm w rurce o średnicy wewnętrznej 0,2 mm.

Wskutek stopniowego powstawania helu objętość wzrasta w miarę znikania radonu, ponieważ zamiast każdego znikającego atomu radonu powstają kolejno trzy atomy helu; zjawisko jednak jest skomplikowane, gdyż część wyrzucanych atomów helu zostaje okludowana w ściankach.

---

<sup>1)</sup> W doświadczeniach *Wertensteina* zastosowano metodę mierzenia współczynnika tłumienia drgań nici kwarcowej w celu badania czystości gazu i oznaczania ilości domieszek.