

## ROZDZIAŁ XXIV

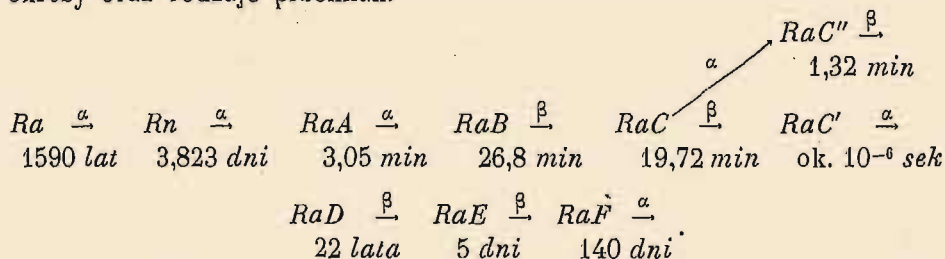
### R O D Z I N A R A D U

#### § 127. Skład rodziny. Rad.

Rad, którego ciężar atomowy wynosi 226,0, zajmuje w układzie periodycznym miejsce oznaczone liczbą atomową  $Z = 88$ , położone w ostatnim wierszu i w drugiej grupie.

Z radu powstają liczne pierwiastki pochodne, z których pierwszy jest to radon, gaz promieniotwórczy; przemiana radonu prowadzi do szeregu pierwiastków krótkotrwałych (osad aktywny krótkotrwały); ostatni spośród nich wytwarza *RaD*, zaliczany wraz ze swymi pochodnymi do długotrwałego osadu aktywnego.

W podanym poniżej schemacie przemian tej rodziny są zaznaczone okresy oraz rodzaje przemian.



Rad. Metody służące do oznaczenia średniego czasu życia zostały opisane w poprzednich rozdziałach (§§ 78 i 79, por. § 130). Przypominamy, że ta stała może być oznaczona bądź za pomocą metod fizycznych, bądź drogą chemiczną. Metody fizyczne polegają na liczeniu cząstek  $\alpha$  wysyłanych w sekundzie przez 1 g *Ra* lub na mierzeniu ładunku przeniesionego przez cząstki  $\alpha$ . W metodzie chemicznej bada się szybkość powstawania radu ze znanej ilości jonu, pozostającej w mineralu w równowadze ze znaną ilością radu.

Metody fizyczne dają wartości okresu, różniące się o kilka procentów (od 1600 do 1700 lat); najlepsze doświadczenia wykonane metodą chemiczną prowadzą do wartości okresu, wynoszącej 1680 lat. Wartość przyjęta w roku 1930 przez Komisję Stałych Promieniotwórczości wynosi 1590 lat.

Rad został otrzymany w postaci czystej soli oraz w postaci metalu. Ciężar atomowy radu został oznaczony z dużą dokładnością. Własności chemiczne radu, opisane w §§ 38 i 41, można w zupełności scharakteryzować na podstawie izomorfizmu soli radowych i barowych. Widmo optyczne radu jest zbadane dokładnie i wyczerpująco; znany kilka poziomów absorpcji promieni  $X$  w atomach radu.

Promienie  $\alpha$  (zasięg 3,39 *cm* w powietrzu w  $15^\circ$  pod ciśnieniem 760 *mm*), wysyłane w przemianie radu, składają się oprócz grupy głównej z nielicznej grupy cząstek mniejszej prędkości (subtelna budowa, § 69). Ponadto wykryto za pomocą analizy magnetycznej trzy grupy promieni  $\beta$ , powstające drogą wewnętrznej konwersji niezbyt przenikliwego promieniowania  $\gamma$  (189 *ekw*).

W celu dokładnego oznaczania ilości radu posługujemy się pomiarami wydzielanego radonu (§ 49) lub promieniowania  $\gamma$  (§ 97).

Na podstawie znajomości liczby cząstek  $\alpha$  wysyłanych przez 1 *g Ra* oraz liczby jonów wytworzonych przez jedną cząstkę znajdujemy, że w warunkach zupełnej absorpcji w powietrzu promieniowania wysyłanego we wszystkich kierunkach można otrzymać prąd jonowy o natężeniu  $2,4 \cdot 10^6$  *j. es*.

Pomiary jonizacji wytworzonej przez cienkie warstwy soli odparowanej z rozcieńczonego roztworu dają wyniki zgodne z tymi obliczeniami. Tak np. stwierdzono, że całkowita aktywność radu pozbawionego pierwiastków pochodnych jest większa od aktywności takiej samej ilości uranu ( $UI + UII$ ) w stosunku  $2,4 \cdot 10^6 / 1,4 = 1,7 \cdot 10^6$ .

### § 128. Radon i krótkotrwałe osad aktywne.

W rozdziale IX podaliśmy szczegółowy opis własności radonu. Jest to gaz promieniotwórczy, powstający bezpośrednio z radu; okres radonu, wynoszący 3,823 dni, mógł być wyznaczony z wielką dokładnością dzięki udoskonaleniu metod pomiarowych, opartych na stosowaniu przenikliwych promieni  $\gamma$  wysyłanych przez pierwiastki pochodne radonu (por. tabl. 11 Przypisów i rozdz. IX).

Radon jest to gaz szlachetny,  $Z = 86$ ; pomimo stosunkowo krótkiego życia zdołano go otrzymać w czystym stanie. 1 curie radonu zajmuje pod ciśnieniem atmosferycznym i w  $0^\circ$  objętość 0,64 *mm*<sup>3</sup>. Na podstawie ciężaru atomowego radonu, wynoszącego 222, obliczamy, że 1 curie radonu waży  $6,5 \cdot 10^{-6}$  *g*. 1 curie zawiera  $1,83 \cdot 10^{16}$  atomów.

Radon może być skondensowany w temperaturze ciekłego powietrza drogą adsorpcji na oziębionych ściankach; zabieg ten bywa często stosowany w celu oczyszczania radonu. Używając stosunkowo znacznych ilości radonu można wyznaczyć ciśnienie jego pary nasyconej w zależności od temperatury. Punkt wrzenia radonu wynosi —  $65^\circ \text{C}$ .

Widmo optyczne radonu zostało zbadane bardzo starannie. W miarę jak radon zanika, pojawia się widmo gazu helu.

Przemianie radonu towarzyszy emisja cząstek  $\alpha$  o zasięgu 4,12 *cm* w powietrzu w temperaturze 15° i pod ciśnieniem normalnym. Nie znamy żadnego innego promieniowania radonu.

Przyrządzanie rurek z radonem jest czynnością wykonywaną często na użytek laboratoryjny i leczniczy.

Z radonu powstaje osad aktywny, składający się z trzech pierwiastków: *RaA*, *RaB* i *RaC* (rozdz. X), których okresy wynoszą 3,05 minut, 26,8 minut i 19,7 minut. Rad *A* wysyła promienie  $\alpha$  o zasięgu 4,72 *cm* (w powietrzu w 15° i pod ciśnieniem normalnym); rad *B* wysyła promienie  $\beta$  i  $\gamma$ . Rad *C* występuje zawsze wraz z dwoma krótkotrwałymi pierwiastkami pochodnymi *RaC'* i *RaC''*; promieniowanie tej mieszaniny jest złożone z promieni  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ . Przemiana *RaC* należy do typu rozgałęzień; bardzo znaczna większość atomów wysyła promienie  $\beta$  i zamienia się na *RaC'*, niewielki zaś ułamek, wynoszący około 0,03%, wysyła promienie  $\alpha$  i zamienia się na *RaC''*.

Główna grupa promieni  $\alpha$  posiada zasięg 6,96 *cm* w powietrzu i jest wysyłana w przemianie *RaC'*. Zgodnie z prawem *Geigera-Nuttalla* znaczna długość tego zasięgu świadczy o tym, że czas trwania *RaC'* musi być niezmiernie krótki. Te wnioski zostały sprawdzone doświadczalnie, za pomocą metody opartej na odskoku  $\beta$  (§ 87). Jest to zarazem dowód istnienia pierwiastka *RaC'*, ostatniego ogniwa pomiędzy *RaC* i długotrwałym pierwiastkiem *RaD*.

*RaC''* został oddzielony od *RaC* za pomocą odskoku atomów powstających w częściowej przemianie  $\alpha$  *RaC*. Okres *RaC''* wynosi 1,3 *min*; ciało to wysyła promienie  $\beta$  i  $\gamma$  podobne do promieni *RaC*, lecz znacznie słabsze. Przemiana *RaC''* prowadzi do ciała posiadającego ten sam ciężar atomowy i tę samą liczbę atomową co *RaD*.

Na tablicy 14 Przypisów znajdują się wartości liczbowe, służące do obliczania wzrostu i zaniku osadu aktywnego.

Chemiczne i elektrochemiczne własności składników osadu aktywnego mogą być scharakteryzowane na podstawie izotopii. Stwierdzono doświadczalnie, że *RaA* jest to izotop *Po*, *RaB* — izotop *Pb*, *RaC* — izotop *Bi*. Reguła przesunięć pozwala przewidzieć chemiczne własności *RaC'* i *RaC''*; pierwszy z tych pierwiastków jest to izotop *Po*, drugi zaś izotop *Tl*.

Istnieją sposoby oddzielania ciał *A*, *B* i *C*. Prawie zupełnie czysty *RaA* można otrzymać aktywując dowolne ciało w radonie w ciągu bardzo krótkiego czasu. Najdogodniejszy sposób otrzymywania czystego *RaB* polega na zbieraniu w ciągu krótkiego czasu atomów odskoku, wyrzucanych w przemianie  $\alpha$  *RaA*. Wreszcie czysty *RaC*, wolny od *RaB* można otrzymać drogą osadzania go na płycie niklowej, zanurzonej w roztworze *Ra(B + C)* w kwasie solnym.



## § 129. Osad długotrwały.

*RaD* powstaje pośrednio z *RaC* za pośrednictwem *RaC'*. Promienowanie *RaD*, bardzo słabe i wykryte stosunkowo niedawno, składa się z kilku grup promieni  $\beta$ , powstających w zjawisku wewnętrznej konwersji jądrowego promieniowania  $\gamma$  o energii  $47 \text{ ekw}$  (§ 94), którego współczynnik absorpcji w glinie jest zbliżony do  $1 \text{ cm}^{-1}$ . Istnieje grupa promieni  $\gamma$  znacznie mniejszych, o współczynniku absorpcji  $\mu = 45 \text{ cm}^{-1}$ ; jest to promienowanie charakterystyczne serii *L* pierwiastka 82, gdyż *RaD* jest to izotop ołowiu.

Jak wynika z reguły przesunięć, *RaD* musi wysyłać jądrowe promienie  $\beta$ , dotąd mało jeszcze zbadane. Za pomocą metody *Wilsona* można uwidocznic promienie  $\beta$  pochodzenia fotoelektrycznego, których zasięg jest zbliżony do  $1 \text{ cm}$ , oraz promienie o zasięgu jeszcze krótszym; jest rzeczą możliwą, że te ostatnie są to jądrowe promienie  $\beta$  *RaD*.

*RaE* powstający w przemianie *RaD* posiada promienowanie składające się prawie wyłącznie z promieni  $\beta$ , stosunkowo przenikliwych, tworzących widmo ciągłe, a zatem związanych bezpośrednio z przemianą promieniotwórczą; ponadto istnieje słabe promienowanie  $\gamma$ , dosyć przenikliwe:  $\mu_{Al} = 0,34 \text{ cm}^{-1}$ . *RaE* zamienia się w polon (*RaF*). Polon wysyła promienie  $\alpha$  o zasięgu  $3,87 \text{ cm}$  w powietrzu (w temperaturze  $15^\circ$  i pod ciśnieniem normalnym) i zamienia się na pierwiastek niepromieniotwórczy, mianowicie izotop ołowiu. Preparaty polonu wysyłają również słabe, lecz bardzo przenikliwe jądrowe promienowanie  $\gamma$  oraz jeszcze słabsze i bardzo miękkie promienowanie  $\gamma$  o naturze promienowania charakterystycznego, wzbudzonego przez promienie  $\alpha$  w polonie i w metalu, na którym ten pierwiastek został osadzony.

Polon może być oddzielony od *RaE*; okresy obu ciał zostały zmierzone metodą bezpośrednią. Przyjęta wartość okresu *RaE* wynosi  $5,0 \text{ dni}$ ; okresu polonu —  $140 \text{ dni}$ . Zanik *RaE* jest przedstawiony graficznie na rys. 161, I, zanik polonu na rys. 162, I.

Okres *RaD* może być zbadany tylko na podstawie promienowania jego pochodnych. Najdawniej używana metoda, nie wymagająca obserwacji w ciągu zbyt długiego czasu, polega na tym, że wyznacza się ilość polonu wytworzonego po upływie danego czasu przez *RaD*, który powstał ze znanej ilości radonu.

Z początkowej liczby  $Q$  atomów *Rn* powstaje taka sama liczba atomów *RaD*; liczba atomów *Po* utworzonych po upływie czasu  $t$  wynosi  $q = QF(t)$ , gdzie  $F(t)$  jest to funkcja, której znajomość pozwala obliczyć okres *RaD* (por. rys. 162). W ten sposób otrzymano wartość  $T = 16 \text{ lat}$ , którą aż do ostatnich czasów uważano za prawdziwą. Bezpośrednie pomiary zaniku *RaD* w równowadze przejściowej z *RaE* i *Po* wykazały jednak, że ta wartość jest zbyt mała. Pomiary te były wykonywane w ciągu 20 lat. Posługiwano się promienowaniem  $\beta$  *RaE* oraz promie-

niowaniem  $\alpha$  *Po*; znaleziono, że okres wynosi około 20 lat. Wyniki te znalazły potwierdzenie w nowszych badaniach, wykonanych za pomocą metody analogicznej do metody stosowanej dawniej. Można przyjąć, że najbardziej prawdopodobna wartość  $T$  wynosi 22 lata. Zanik *RaD* jest przedstawiony na rys. 162 III.

Na podstawie własności chemicznych i elektrochemicznych zaliczamy *RaD* do izotopów ołowiu ( $Z = 82$ ). Tak np. z minerałów uranowych *RaD* wydziela się wraz z zawartym w nich ołowiem. Liczne bezskuteczne próby oddzielenia *RaD* od ołowiu miały wielkie znaczenie, gdyż przyczyniły się do utworzenia pojęcia izotopii.

*RaD* może być osadzony elektrolitycznie podobnie jak ołów bądź jako metal na katodzie, bądź jako nadtlenek na anodzie (§ 118).

Możemy wydobywać *RaD* bezpośrednio z minerałów promieniotwórczych, w ten sposób jednak otrzymuje się go w stanie bardzo małej koncentracji, ponieważ jest zmieszany z ołowiem w stosunku 1:10<sup>7</sup> — 10<sup>8</sup>.

Inny, dogodniejszy sposób polega na tym, że wydziela się *RaD* nagromadzony w preparatach radu, przechowywanych w ciągu długiego czasu. Doświadczenie to zostało wykonane w kilku laboratoriach: do roztworu soli radowej dodaje się niewielką ilość metali porywających *RaD*, np. *Cu* lub *Bi*, które strąca się siarkowodorem w obecności *HCl*. Rad *E* oraz polon zostają wówczas strącone razem z *RaD*. W roztworze radu, pozbawionym zawartego w nim *RaD*, pierwiastek ten tworzy się znowu i po upływie kilku lat można powtórzyć to doświadczenie.

Ilość *RaD* powstająca w ciągu roku z 1 g *Ra* wynosi około 0,4 mg; ilość nagromadzona po upływie 22 lat, tj. czasu równego okresowi, wynosi 6,3 mg, ilość zaś odpowiadająca stanowi równowagi 12,7 mg. *RaD* otrzymany z *Ra* po upływie niezbyt długiego czasu nie zawiera, praktycznie biorąc, żadnych innych izotopów ołowiu; jeżeli jednak czas nagromadzania *RaD* jest bardzo długi, to do *RaD* przyłącza się nieaktywny ołów o ciężarze atomowym 206, biorący początek w przemianie *RaD*, którego ciężar atomowy wynosi 210. Po 22 latach z jednego gramu *Ra* powstaje 2,5 mg <sup>206</sup>*Pb*. Stosunek ilości obu izotopów równa się zatem 0,4. Stosunek ten wzrasta nieustannie w miarę jak rad ulega zanikowi.

Można wreszcie używać jako źródeł radu *D* rurek z radonem, przyrządzanych w laboratoriach oraz w niektórych szpitalach.

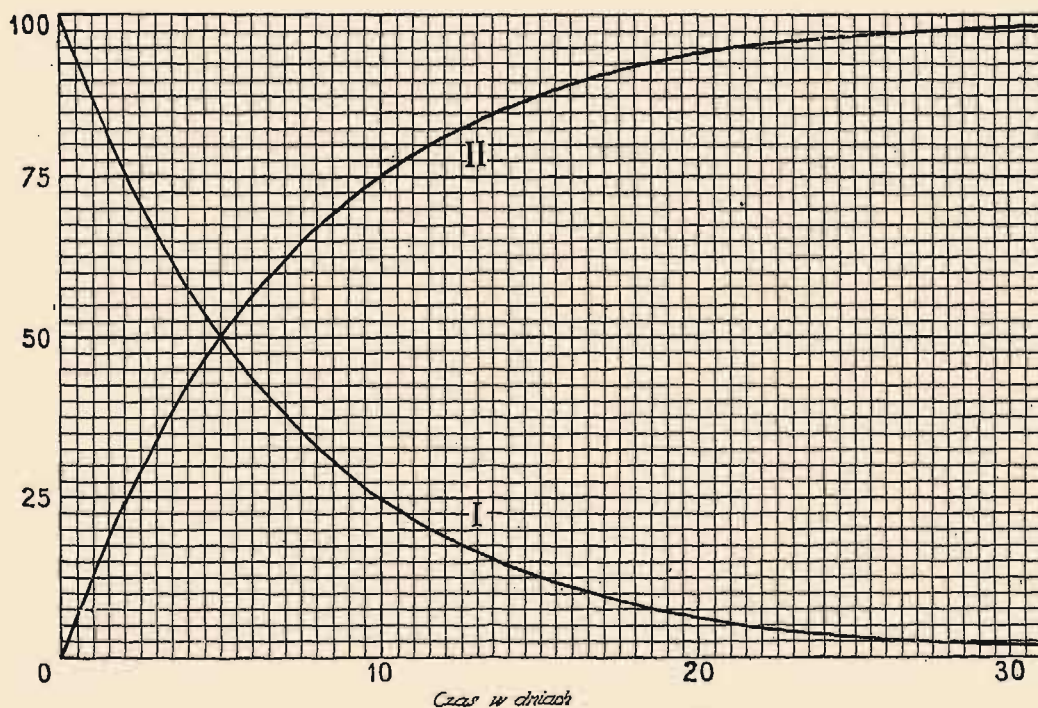
W tym celu zbiera się większą partię takich rurek po zaniku radonu. Po powierzchniowym wymyciu rurek zalewa się je wodą królewską, która rozpuszcza ciała *D*, *E* i *F*. Jednocześnie do roztworu przechodzi nieco szkła wraz z zawartymi w nim metalami, w szczególności zaś z ołowiem, którego ilość wystarcza zupełnie do strącenia *RaD* i jego pochodnych. W ten sposób otrzymuje się co najwyżej kilka mg ołowiu, który oczyszcza się chemicznie i zamienia na azotan. Tak otrzymany *RaD* należy przechowywać w flakonie z kwarcu lub pireksu.



$RaE$ , izotop bizmutu ( $Z = 83$ ), bywa wydobywany z roztworów  $RaD$ , z którym osiąga równowagę przejściową po upływie miesiąca.

$RaE$  otrzymuje się najczęściej za pomocą elektrolizy lub osadza się go na płytce niklowej, zanurzonej w ciepłym roztworze tego pierwiastka w kwasie solnym. Potencjał katody, na której  $RaE$  osiada podczas elektrolizy, powinien wynosić od  $-0,1$  do  $-0,44$  wolta względem elektrody normalnej. W obu przypadkach polon zawarty w roztworze wypada razem z  $RaE$ , ponieważ jest szlachetniejszy od tego ostatniego. Z tego powodu polon należy wydobyć najpierw, zwłaszcza wtedy, kiedy znajduje się w roztworze w znacznej ilości. Z roztworu chlorku lub azotanu ołowiowego, zawierającego mieszaninę  $RaD$  i jego pochodnych, można oddzielić  $RaD$  drogą krystalizacji frakcjonowanej; otrzymane kryształy są prawie zupełnie wolne od  $RaE$  i  $RaF$  (polonu), które pozostają w roztworze.

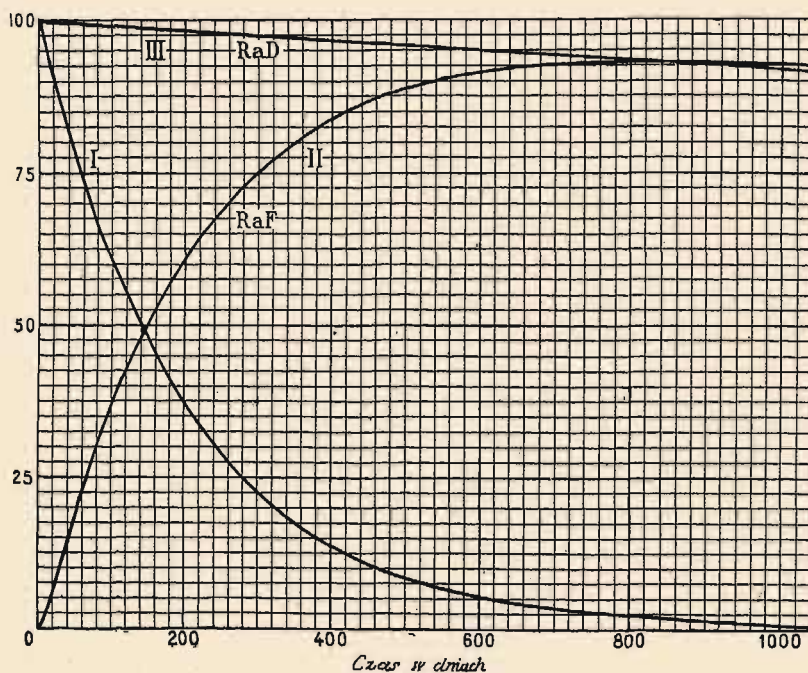
Polon ( $Z = 84$ ) jest reprezentantem typu chemicznego, który może być badany tylko metodami nauki o promieniotwórczości. O własnościach chemicznych i elektrochemicznych polonu była mowa w §§ 39 i 118. Polonu nie otrzymuje się na ogół z minerałów, lecz najczęściej wydobywa się go z roztworu  $RaD$ . Nagromadzony polon może być usuwany od czasu do czasu w ten sposób, że osadza się go z roztworu na



Rys. 161. I — zanik  $RaE$ . II — powstawanie  $RaE$  z  $RaD$ . Krzywa I — liczba atomów zanikających w jednostce czasu, w procentach liczby początkowej. Krzywa II — liczba atomów zanikających w jednostce czasu w założeniu, że w chwili  $t = 0$  liczba atomów  $RaD$  ulegających zanikowi jest równa 100.

płytkę srebrnej, wprawionej w ruch obrotowy. Roztwór powinien być słabo kwaśny i zawierać nieco kwasu solnego obok kwasu octowego lub azotowego. W celu oczyszczenia polonu lub przeniesienia go z jednego podłoża na inne stosuje się najczęściej destylację polonu lub jego związków.

Z roztworu zawierającego *RaD*, *RaE* i *RaF* w stanie równowagi możemy wydobyć najpierw polon, następnie *RaE* i ustalić odpowiedniość



Rys. 162. I—zanik *RaF*. II—powstawanie *RaE* z *RaD*. III—zanik *RaD*. Rzędne krzywych I i III są to liczby atomów zanikających w jednostce czasu, wyrażone w procentach liczby początkowej. Rzędne krzywej II są to liczby atomów *RaE* zanikających w jednostce czasu, obliczone w założeniu, że w chwili  $t$  liczba atomów *RaD* zanikających w jednostce czasu jest równa 100. Przecięcie krzywych II i III odpowiada równowadze między *RaD* i *RaF*.

między ilością polonu i natężeniem promieniowania *RaE*, zmierzonym w określonych warunkach. Na tej podstawie można oznaczyć ilościowo *RaD* i *RaE*<sup>1)</sup>.

Jeżeli *RaD* w chwili początkowej został pozbawiony swych pierwiastków pochodnych, to ilość każdego z nich narasta według innego prawa. Powstawanie *RaE* jest to szczególny przypadek zagadnienia dwóch substancyj (§ 60); ilość  $q$  wzrasta w czasie, przechodzi przez maximum

<sup>1)</sup> W jednym z przyrządów używanych w tym celu w Paryskim Instytucie Radowym ilość *Po* dająca 10000 *j.es.*, odpowiada ilości *RaE* dającej 1 *j.es.*; masa tej ilości *Po* wynosi  $q = 1,65 \cdot 10^{-8}$  g; masa *RaE* około  $5q/140$ , masa zaś *RaD*  $22,365q/140$ , tj. około  $5,9 \cdot 10^{-8}$  g *RaE* i  $9,5 \cdot 10^{-5}$  g *RaD*.



po upływie około 50 dni, po czym powoli zanika zgodnie z prawem wykładniczym charakteryzującym zanik  $RaD$ . Stała zaniku  $RaE$  jest tak wielka wobec stałej  $RaD$ , że proces narastania  $RaE$  może być przedstawiony z dostateczną dokładnością za pomocą wzoru:  $q = q_{\infty}(1 - e^{-\lambda t})$ , gdzie  $q_{\infty}$  jest to ilość maksymalna (rys. 161, II).

Natomiast powstawanie polonu (rys. 162, II) musi być rozpatrywane jako zagadnienie trzech substancji (§ 61). Niech będzie  $N_3$  liczba atomów polonu nagromadzonych w chwili  $t$ ,  $N_{1,0}$  — początkowa liczba atomów  $RaD$ . Otrzymujemy (por. § 61, rozdz. XI) wyrażenie postaci:  $\lambda_3 N_3 / \lambda_1 N_{1,0} = P e^{-\lambda_1 t} + Q e^{-\lambda_2 t} + R e^{-\lambda_3 t}$ <sup>1)</sup>, gdzie  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  są to stałe zaniku  $RaD, RaE$  i  $RaF$ . Po upływie dwóch miesięcy drugi wyraz może być zaniebany wobec dwóch pozostałych.

$N_3$  przechodzi przez maximum w chwili  $t = 3$  lata, po czym zmniejsza się w ten sam sposób, co  $RaD$ . Stałe zaniku posiadają wartości, z których układu wynika, że stosunek  $RaE$  do  $RaD$  w stanie równowagi przejściowej jest taki sam jak w chwili, kiedy ilość  $RaE$  przechodzi przez maximum, stosunek zaś  $Po$  do  $RaD$  jest większy tylko o 2% od stosunku w chwili maximum.

Opierając się na tym wzorze i dokonywając w określonych odstępach czasu ekstrakcji polonu, przekonywamy się, że przemiany w roztworze radu  $D$  odbywają się zgodnie z teorią.

### § 130. Ewolucja radu.

Ewolucja przemian radu jest bardzo zawiła z powodu znacznej liczby i różnorodności pierwiastków pochodnych. Weźmy pod uwagę sól radową, która została zamknięta w zalutowanej rurce po usunięciu wszystkich pierwiastków pochodnych drogą krystalizacji i oczyszczania. Aktywność soli jest wówczas najmniejsza; jej promieniowanie składa się w przeważnej części z jednej tylko grupy promieni  $\alpha$ . Podczas pierwszego miesiąca po sporządzeniu preparatu, w kryształach i w rurce nagromadzają się krótkotrwałe produkty przemian, mianowicie radon i osad aktywny. Jednocześnie pojawiają się w promieniowaniu trzy nowe grupy promieni  $\alpha$  oraz wydadne promieniowanie  $\beta$  i  $\gamma$   $RaB$  i  $RaC$ . Po tej ewolucji, zakończonej w ciągu miesiąca, następują zmiany znacznie powolniejsze, polegające na nagromadzeniu się ciał  $D, E$  i  $F$ , i uzależnione głównie od szybkości powstawania  $RaD$ . Wraz z pojawieniem się  $RaD$  i jego pochodnych ukazuje się nowa grupa promieni  $\beta$  wysyłanych przez  $RaE$  oraz piąta grupa promieni  $\alpha$  wysyłanych przez  $Po$ .

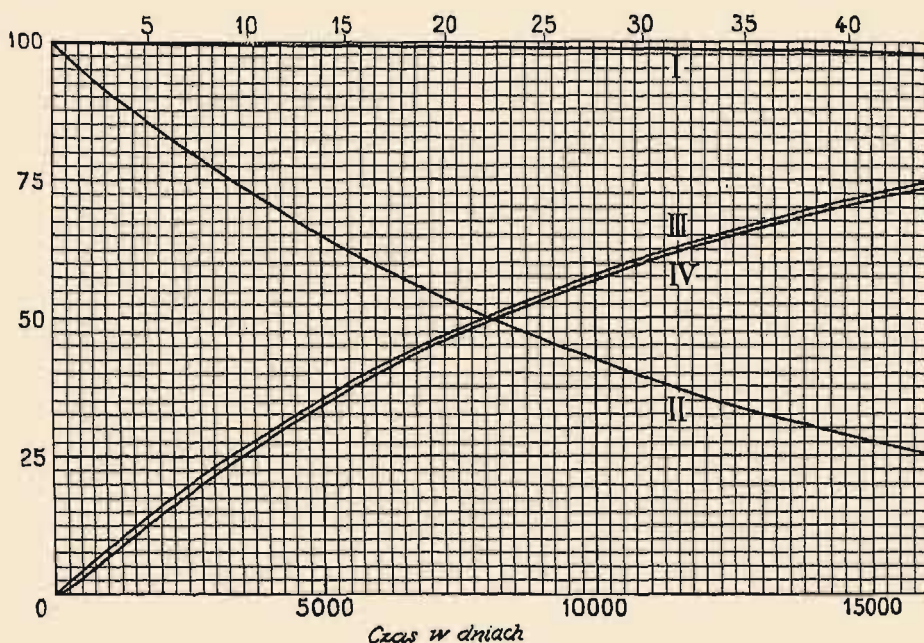
Okres szybkiej ewolucji daje się opisać z dosyć znacznym przybliżeniem jako zagadnienie dwóch substancji, z których jedna, mianowicie

<sup>1)</sup>  $P = \lambda_2 \lambda_3 / (\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)$ ;  $Q = \lambda_2 \lambda_3 / (\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)$ ;  $R = \lambda_2 \lambda_3 / (\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)$ .

Wartości liczbowe odpowiadające przyjętym wartościom okresów: 22 lata, 5 dni, 140 dni są następujące:  $P = 1,01837$ ;  $Q/P = 0,03639$ ;  $R/P = -1,03639$ .



macierzysta, jest to rad, druga zaś, pochodna, jest to radon wraz z ciałami  $RaA$ ,  $RaB$  i  $RaC$ , narastający według prawa  $q = q_{\infty}(1 - e^{-\lambda t})$ , gdzie  $q_{\infty}$  jest to ilość radonu w stanie równowagi,  $\lambda$  zaś jest to stała radonu. W podobny sposób możemy traktować powolną ewolucję jako zagadnienie dwóch substancji, w którym rolę substancji macierzystej odgrywa rad wraz z wszystkimi pierwiastkami pochodnymi aż do  $RaC'$  włącznie, rolę zaś pierwiastka pochodnego—grupa  $RaD$ ,  $RaE$  i  $RaF$  (rys. 163, II). Przypisując pierwszej grupie stałą zaniku radu, drugiej zaś stałą zaniku radu  $D$ , znajdujemy, że połowa maksymalnej ilości  $Ra(D + E + F)$  powstaje po upływie 22 lat i że równowaga z radem jest osiągnięta w ciągu około



Rys. 163. I—zanik  $Ra$ . II—zanik  $RaD$ . III—powstawanie  $RaD$  z  $Ra$ . IV—powstawanie  $RaF$  z  $Ra$ . Krzywe I i II—liczby atomów każdej substancji zanikających w jednostce czasu, w procentach liczby początkowej. Krzywe III i IV—liczby atomów  $RaD$  i  $RaF$  zanikających w jednostce czasu, w założeniu, że w chwili  $t=0$  liczba atomów  $Ra$  zanikających w jednostce czasu jest równa 100.

140 lat. Po upływie tego czasu ilość  $RaD$  przechodzi przez maximum i następnie zmniejsza się zgodnie z prawem zaniku radu. Biorąc rzeczy dokładniej, obliczanie wzrostu polonu stanowi zagadnienie trzech substancji:  $Ra \rightarrow RaD \rightarrow Po$  (rys. 163, IV)<sup>1)</sup>.

Bardzo przenikliwe promieniowanie  $\gamma$  należy tylko do  $RaC$ , który osiąga stan równowagi z  $Ra$  już po miesiącu od chwili zaniknięcia rurki

<sup>1)</sup> Krzywa IV na rys. 163 może być przedstawiona wzorem:

$$\lambda_F N_F / \lambda_{Ra} N_{Ra, D} = 1,01428 [e^{-\lambda_{Ra} t} - 1,01749 e^{-\lambda_D t} + 0,01749 e^{-\lambda_F t}].$$

zawierającej sól radową. Dalsza ewolucja nie wpływa zatem na przenikliwe promieniowanie  $\gamma$ ; stosunek promieniowania  $\gamma$  dwóch rurek pozostaje niezmienny i równy stosunkowi ich zawartości radu, niezależnie od wieku preparatów po zakończeniu fazy początkowej.

Sprawy mają się inaczej, jeżeli mierzymy promieniowanie  $\beta$  lub słabo filtrowane promieniowanie  $\gamma$ . W tym przypadku część jonizacji pochodzi od  $RaD$  i  $RaE$ , z czego wynika, że stosunek promieniowania starego preparatu do promieniowania preparatu niedawno sporządzonego jest większy od stosunku ilości radu w obu preparatach.

Stosunek pomiędzy promieniowaniem  $\alpha$  «starego» i «świeżego» preparatu jest również większy od stosunku zawartości radu, ponieważ pierwszy preparat zawiera stosunkowo większą ilość polonu. Wydzielanie ciepła, przynajmniej w części zależnej od energii promieni  $\alpha$ , wzrasta również wraz z wiekiem preparatu. Doświadczenie wykazuje, że stosunek ilości ciepła wydzielanego przez «starą» i «świeżą» rurkę jest większy od stosunku natężeń bardzo przenikliwego promieniowania  $\gamma$ . Różnica wynosi około 10% w przypadku, gdy wiek jednej rurki wynosi 17 lat, druga zaś została świeżo sporządzona; jest to zgodne z obliczeniami opartymi na wartościach stałych zaniku oraz energii grup promieni  $\alpha$ .

Jednocześnie z przemianami radu i jego pochodnych odbywa się narastanie nieaktywnych ciał, stanowiących ostateczny wynik przemian. Są to hel i ołów o ciężarze atomowym 206. Ilość tych ciał wzrasta z czasem w ten sposób, że granica teoretyczna jest osiągnięta dopiero po całkowitym zaniku substancji promieniotwórczej. Cała początkowa ilość radu byłaby wówczas zastąpiona przez  $Pb$  i  $He$ , których wzajemny stosunek powinien wynosić 206/20. Mielibyśmy zatem 910 mg ołowiu i 90 mg helu na gram radu.

Już po 22 latach, tj. po czasie równym okresowi  $RaD$ , ilość nieaktywnego ołowiu wynosi 2,5 mg na gram  $Ra$ , ilość zaś helu 0,71 mg, tj. 4  $cm^3$ . Rachunek wykazuje, że ilość helu powstającego po upływie kilku lat w rurce zawierającej około decygrama radu wystarcza do powstania ciśnienia wewnętrznego, mogącego przekroczyć dwie atmosfery, co jest oczywiście niebezpieczne dla preparatu. Jest zatem rzeczą wskazaną otwierać rurkę od czasu do czasu w celu wypuszczenia nagromadzonego helu.

Ponieważ w zalutowanej rurce zawierającej sól radową produkty przemiany  $Pb$  i  $He$  pozostają uwieszone, przeto strata masy preparatu może wynikać tylko ze straty energii  $\Delta E$ , której towarzyszy ubytek masy  $\Delta m$  według wzoru  $\Delta E = \Delta mc^2$ . Strata energii w całkowitej przemianie jednego grama radu, zmierzona jako skutek cieplny, wynosi  $3,4 \cdot 10^9$  kal, czemu odpowiada strata masy  $1,6 \cdot 10^{-4}$  g. Obliczone w ten sposób straty masy są zbyt nikłe, aby można je było wykryć drogą ważenia, toteż próby stwierdzenia zmiany ciężaru zalutowanych rurek zawierających rad dały wyniki ujemne.