

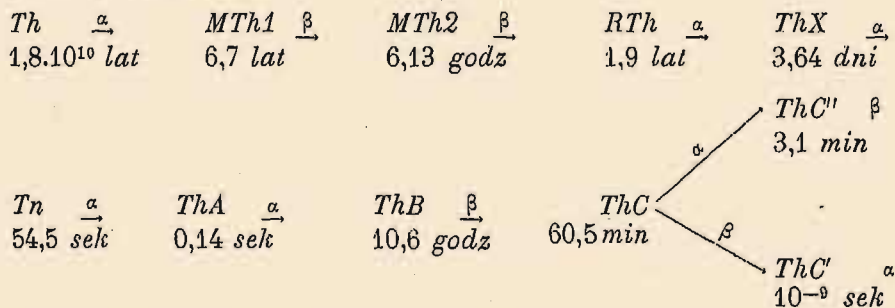
## ROZDZIAŁ XXVI

### RODZINA TOROWA

#### § 135. Skład rodziny. Tor.

Pierwszy pierwiastek tej rodziny jest to tor. Nieprawidłowości dostrzeżone w pomiarach aktywności toru doprowadziły do odkrycia emanacji toru, czyli toronu, oraz osadu aktywnego powstającego w przemianie toronu. Próby, mające na celu sprawdzenie czy aktywność związków torowych powinna być przypisana samemu torowi, dały w wyniku oddzielenie toru X. Wreszcie przeróbka torianitu w celu wydobycia radu doprowadziła do odkrycia mezotoru i radiotoru. W następstwie przekonano się, że mezotor jest to ciało złożone z dwóch ciał, które otrzymały nazwę mezotoru 1 i mezotoru 2.

Podajemy schemat stosunków genetycznych ze wskazaniem rodzajów przemian i okresów.



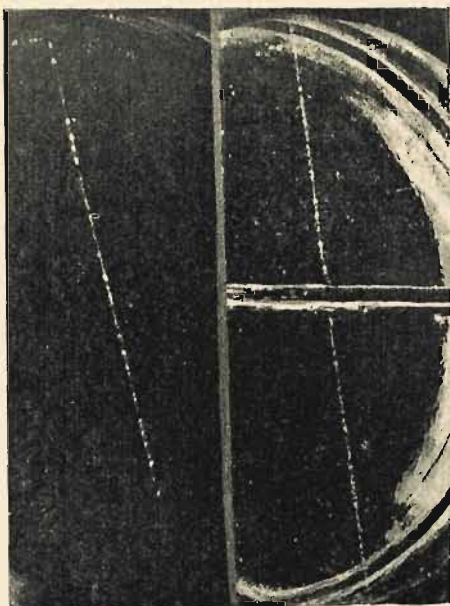


Fig. 1.

Fig. 2.

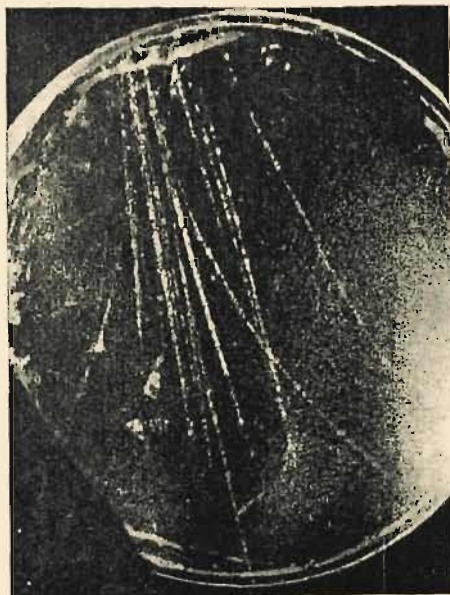


Fig. 3.

Fig. 1. Tor prosty, energia  $10^6$  ew.,  $H = 2000$  oerst.

Fig. 2. Tor prosty cząstki przechodzącej przez płytkę ołowianą. Energia  $> 3 \cdot 10^6$  ew.,  $H = 2000$  oerst.

Fig. 3. Pęk 16 torów. Pole 3100 oerst. Na lewo dwa tory elektronów o energii zbliżonej do  $15 \cdot 10^6$  ew., na prawo dwa tory pozytonów o energiach  $12 \cdot 10^6$  ew. i  $45 \cdot 10^6$  ew.

Fig. 1, 2, 3. Z pracy Blacketta i Occhialini'ego, Proc. Roy. Soc. 139 (1933).

Charakter przemian promieniotwórczych rodziny torowej sprawia, że jest rzeczą bardzo trudną otrzymać tor bez ciał pochodnych (por. § 139). Oprócz tych ostatnich tor może zawierać inną domieszkę promieniotwórczą w postaci własnego izotopu jonu, który zazwyczaj znajduje się również w minerałach torowych i pochodzi od zawartego w tych minerałach uranu. Z tego powodu dane dotyczące promieniowania i okresu toru są jeszcze niezbyt dokładne.

Tor wysyła jedną grupę promieni  $\alpha$ , których zasięg w powietrzu w  $15^\circ$  pod ciśnieniem normalnym wynosi 2,6 cm. Jest to ciało bardzo długotrwałe, toteż dla wyznaczenia okresu musimy posługiwać się liczeniem cząstek  $\alpha$ . Jeżeli źródłem tych cząstek jest preparat  $Th$  w równowadze z pierwiastkami pochodnymi, to zliczone cząstki  $\alpha$  należą w równych ilościach do 6 grup cząstek  $\alpha$ . W najnowszych pracach wykonanych w ten sposób znaleziono, że okres  $T$  wynosi  $1,8 \cdot 10^{10}$  lat. Liczby tego samego rzędu wielkości otrzymano drogą mierzenia prądu jonowego, wytwarzanego przez bardzo cienkie warstwy substancji.

Inna metoda polega na tym, że w mineralu nie zawierającym zwykłego ołowiu oznacza się z jednej strony stosunek  $Th/U$ , z drugiej zaś strony stosunek  $Pb_U/Pb_{Th}$ , gdzie  $Pb_U$  i  $Pb_{Th}$  są to ilości ołowiu wytworzonego wskutek przemiany  $U$  i  $Th$  od chwili powstania mineralu. W założeniu, że ciężary atomowe ołowiu są znane, możemy oznaczyć stosunek ilości obu rodzajów ołowiu na podstawie średniego ciężaru atomowego ich mieszaniny (por. § 140). Badanie kilku próbek dobrze wykryształizowanego torianitu dało następujące wyniki (*G. Kirsch*). Zawartość uranu wynosiła 11,8%, toru — 68,9%, ołowiu — 2,34%; średni ciężar atomowy ołowiu wynosił 207,2, tj. równał się ciężarowi atomowemu zwykłego ołowiu. Na tej podstawie obliczamy, że względne ilości ołowiu uranowego (ciężar atomowy 206) i ołowiu torowego (ciężar atomowy 208) wynoszą 0,96% i 1,38%. Z tego wynika, że  $Pb_U/U = 0,0815$ ;  $Pb_{Th}/Th = 0,020$ . Przechodząc z kolei do liczby atomów mnożymy pierwszy stosunek przez  $238,2/226 = 1,15$ , drugi zaś przez  $232,1/208 = 1,12$ . Otrzymujemy wreszcie w przybliżeniu:

$$\lambda_U/\lambda_{Th} = 1,15 \cdot 0,0815/1,12 \cdot 0,02 = 4,2.$$

Zanik  $Th$  jest cztery razy powolniejszy od zaniku  $U$ , okres  $Th$  wynosi zatem  $1,8 \cdot 10^{10}$  lat w założeniu, że okres  $U$  wynosi  $4,4 \cdot 10^9$  lat. Wobec tego, że ten rachunek jest przybliżony, ilość przeobrażonej substancji promieniotwórczej została odniesiona do ilości końcowej zamiast początkowej.

### § 136. Mezotor 1 i mezotor 2.

Mezotor 1, pierwszy pochodny pierwiastek toru, jest to izotop radu i bywa oddzielany razem z radem z minerałów torowych, zawierających zawsze nieco uranu. Liczba atomowa wynosi  $Z = 88$ , ciężar atomowy zaś około 228. Mezotor jest otrzymywany w przemyśle jako produkt uboczny wyodrębniania toru (§ 42). Mezotor nie posiada dostrzegalnego



promieniowania, przypisujemy mu jednak emisję jądrowych promieni  $\beta$  małej energii, towarzyszących przemianie promieniotwórczej. W tej przemianie powstaje mezotor 2, którego okres jest znacznie krótszy od okresu mezotoru 1 i który osiąga stan równowagi w ciągu 2 dni. Mezotor 2 wysyła promienie  $\beta$  i bardzo przenikliwe promienie  $\gamma$ ; jest to izotop aktywny i może być oddzielony od *MTh1* drogą strącenia amoniakiem w obecności porywacza.

Okres *MTh2* może być wyznaczony drogą badania zaniku preparatów nie zawierających domieszek promieniotwórczych. Te pomiary mogą być z łatwością wykonywane za pomocą promieniowania  $\gamma$ , jeżeli aktywność substancji jest dostateczna. Obecnie przyjęta wartość okresu wynosi 6,13 godz. Pomiary promieniowania  $\gamma$  *MTh2*, którego równowaga z *MTh1* ustala się szybko, mogą służyć do oznaczania ilości *MTh1*. Tę metodę oznaczania komplikuje obecność radu oraz radioru i jego pochodnych. Badanie krzywej zmian promieniowania  $\gamma$  w czasie pozwala oznaczyć okres mezotoru 1, wynoszący 5,7 lat (por. § 139).

Ponieważ *MTh1* wydziela się z minerału razem z mieszaniną *Ba* i *Ra*, i ponieważ frakcjonowanie usuwające *Ba* nie zmienia stosunku *MTh2/Ra*, przeto ten stosunek zmienia się tylko dlatego, że zanik *MTh1* jest szybszy od zaniku *Ra*. Jeżeli *Ba* został usunięty całkowicie, substancja pozostała składa się ilościowo prawie wyłącznie z radu; względna zawartość mezotoru 1 jest zawsze bardzo mała, nawet w chwili początkowej, a jednak pochodzące od niego promieniowanie  $\gamma$  może być silniejsze od promieniowania  $\gamma$  radu.

Weźmy jako przykład monazyt zawierający  $x\%$  uranu i  $y\%$  toru. Liczba atomów uranu lub radu w równowadze z uranem, ulegających przemianie w jednostce czasu, jest proporcjonalna do  $x\lambda_U/A_U$ ; analogiczna liczba dotycząca toru i pozostającego z nim w równowadze mezotoru 1 jest proporcjonalna do  $y\lambda_{Th}/A_{Th}$ . W założeniu, że mieszanina *Ra* + *MTh1* została wydobyta dość szybko, by można było zaniedbać zanik *MTh1*, znajdujemy, że liczby atomowych przemian *MTh1* i *Ra* pozostają względem siebie w stosunku  $y\lambda_{Th}A_U/x\lambda_UA_{Th}$ . Jeżeli  $x = 1$ ,  $y = 10$ , stosunek ten wynosi 2,5, z czego wynika, że w komorze jonizacyjnej do promieni  $\gamma$ , w której współczynniki aktywności *Ra*, działającego za pośrednictwem *RaC*, i *MTh1*, działającego za pośrednictwem *MTh2* są jednakowe, promieniowanie  $\gamma$  *MTh2* w równowadze z *MTh1* powinno być 2,5 razy silniejsze od promieniowania  $\gamma$  *RaC* w równowadze z *Ra*. Ponieważ jednak okres *MTh1* wynosi 6,7 lat, okres zaś *Ra* — 1600 lat, przeto stosunek liczb atomów obu rodzajów równa się  $2,5 \cdot 6,7/1600$ , tj. około 0,01; początkowa zawartość *MTh1* w mieszaninie wynosi zatem zaledwie około 1% zawartości radu. Obliczamy, że minerał zawiera na tonę toru 0,3 mg *MTh1* i 34 mg *Ra*, gdy tymczasem na podstawie promieniowania  $\gamma$  *MTh2* w stanie równowagi stwierdzamy, że ilość *MTh2* towarzyszącego 34 mg *Ra* jest równoważna  $2,5 \cdot 34$ , tj. 85 mg *Ra*.

Przeróbka wielkich ilości minerału dla otrzymywania mezotoru daje wyniki w przybliżeniu zgodne z powyższymi obliczeniami, nie posiadamy jednak dokładnych wiadomości o tej sprawie.

Z soli torowych, oczyszczonych po ich sporządzeniu, można otrzymać mezotor 1 nie zawierający, praktycznie biorąc, radu; te sole są pozbawione uranu i radu, lecz jon nie został oddzielony. Powstawanie *MTh1* odbywa się znacznie szybciej niż radu; po upływie czasu równego okresowi *MTh1*, tj. 6,7 lat, otrzymamy połowę ilości *MTh1* odpowiadającej równowadze z torem, natomiast ilość *Ra* utworzona w ciągu tego samego czasu wyniesie tylko bardzo mały ułamek (około 0,00006) ilości, która mogłaby być wydobyta razem z mezotorem z minerału użytego dla otrzymania danej ilości soli toru. Szybkość powstawania *MTh1* jest wystarczająca, aby opłaciło się otrzymywanie *MTh1* w skali przemysłowej za pomocą wspomnianej metody, w której rolę surowca odgrywałyby wielkie ilości toru.

### § 137. Radiotor. Tor X.

Radiotor został odkryty w najbardziej rozpuszczalnych frakcjach, otrzymywanych podczas cząstkowej krystalizacji radonośnego baru, pochodzącego z torianitu (§§ 39 i 42). Radiotor jest to izotop toru ( $Z=90$ ) i wydzielił się razem z torem z minerałów. Jeżeli jednak wydobyto z minerału starannie oczyszczoną mieszaninę *MTh1 + Ra*, to ta mieszanina nie zawiera toru; toteż radiotor, nagromadzający się jako produkt przemiany mezotoru, może być wydzielony bez toru w bardzo kwaśnym roztworze, w którym odbywa się krystalizacja chlorków. W celu strącenia radiotoru z tego roztworu można używać  $NH_3$  lub  $H_2O_2$  w obecności odpowiednio dobranego porywacza. Jednocześnie oddzielane radio-pierwiastki: *ThB*, *ThC*, *RaB*, *RaC* mogą być łatwo strącone jako siarczki w kwaśnym roztworze, w którym pozostaje *RTh*. Pierwiastek pochodzący bezpośrednio od *RTh* jest to *ThX*, który pozostaje w roztworze, gdy *RTh* strącamy  $NH_3$ . W ten sposób można otrzymać *RTh* bez wszelkich domieszek promieniotwórczych; jego domniemany ciężar atomowy wynosi 224.

Radiotor wysyła jedną grupę cząstek  $\alpha$ , których zasięg w powietrzu w  $15^\circ$  pod ciśnieniem normalnym wynosi 4,02 cm. Jest jednak rzeczą prawdopodobną, że istnieje jeszcze inna grupa. Radiotor wysyła również promieniowanie  $\beta$  i promieniowanie  $\gamma$ ; promienie  $\gamma$  należą, jak się zdaje, do serii K powstającego pierwiastka  $Z=88$ , wzbudzonej działaniem promieni  $\alpha$ , promienie  $\beta$  zaś składają się z 6 grup fotoelektronów związanych z tymi promieniami  $\gamma$ .

Radiotor daje początek szeregowi stosunkowo krótkotrwałych pierwiastków pochodnych i jeżeli toron nie może wydzielać się na zewnątrz, równowaga ustala się po upływie około miesiąca. W miarę narastania aktywnego osadu toronu pojawiają się promienie  $\beta$  i bardzo przenikliwe promienie  $\gamma$ ; te ostatnie są używane do oznaczania radiotoru.

Okres radiotoru został wyznaczony drogą badania zaniku promienio-



wania  $\gamma$  osadu aktywnego w równowadze  $RTh$ . Obecnie przyjęta wartość wynosi 1,9 lat.

Radiator jest otrzymywany w przemyśle w dosyć znacznych ilościach i bywa używany do sporządzania świetlnych barw, oraz znajduje zastosowanie w lecznictwie jako źródło toru  $X$ . Najprostszy sposób otrzymywania radiatoru polega na wytrącaniu go od czasu do czasu z mezotoru, który jest jego substancją macierzystą. Znajdujemy radiator w osadach niektórych źródeł leczniczych; w tym przypadku wody zawierają również mezotor.

W laboratoriach używa się radiatoru dla otrzymywania toronu, który powstaje z pierwiastka pochodnego  $ThX$ . Wydzielanie toronu pozwala zbierać aktywny osad toru na powierzchniach ciał umieszczonych w tym celu w pobliżu preparatu; jest rzeczą wskazaną nadawać tym powierzchniom ujemny ładunek.

W celu otrzymania toru  $X$  strąca się tor z roztworu amoniakiem; tor  $X$  pozostaje w roztworze. Ponieważ jednak tor  $X$  jest to pierwiastek bezpośrednio pochodzący od  $RTh$ , przeto można go również otrzymać ze skoncentrowanych roztworów  $RTh$  za pomocą reakcyj, służących do oddzielania soli torowych.

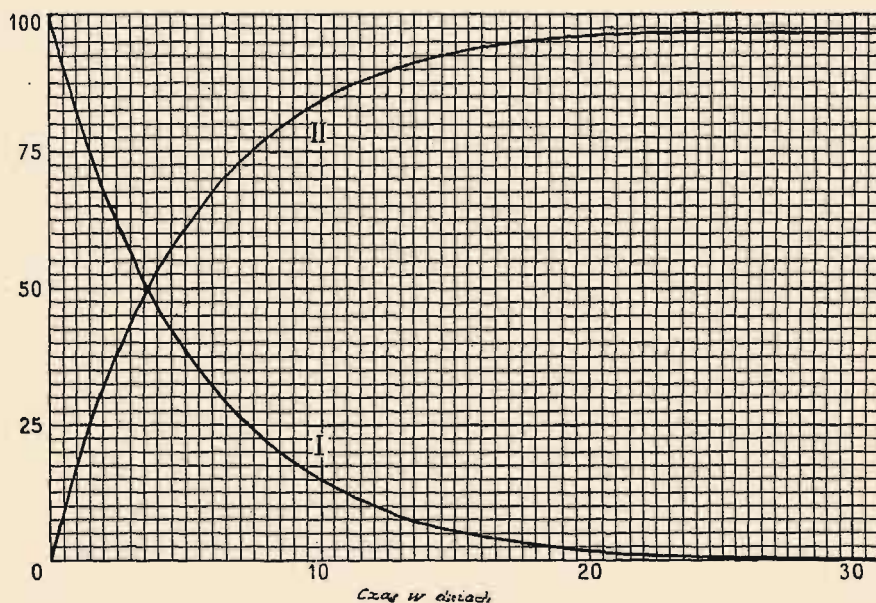
Tor  $X$  jest to izotop radu i mezotoru 1. Jeżeli zatem oddzielamy sole torowe, to towarzyszy mu  $MTh1$ ; natomiast posługując się radiotorem otrzymujemy tor  $X$  bez  $MTh1$ . Domniemany ciężar atomowy  $ThX$  wynosi 220.

Tor  $X$  wytwarza bezpośrednio toron, z którego powstaje osad aktywny; równowaga z tymi pochodnymi ustala się w ciągu 3 dni. Możemy usunąć pochodne  $ThX$  przepuszczając prąd powietrza, który nieustannie porywa powstający toron i strącając składniki aktywnego osadu za pomocą  $H_2S$  lub  $NH_3$ . Stwierdzamy, że czysty  $ThX$  wysyła jedną grupę cząstek  $\alpha$  o zasięgu 4,35 cm w powietrzu w  $15^\circ$  i pod ciśnieniem normalnym.

Toron i tor  $A$  tworzą się w ciągu około 10 minut, a wraz z nimi powstają nowe grupy promieni  $\alpha$ ; tor  $B$  razem z następującymi po nim pochodnymi tworzy się znacznie powolniej, co się zaznacza stopniowym przyrostem dodatkowych grup promieni  $\alpha$ , promieni  $\beta$  oraz bardzo przenikliwych promieni  $\gamma$ . Promieniowanie  $\alpha$  preparatu  $ThX$  wzrasta przeto od pewnej wartości początkowej aż do maximum i następnie zmniejsza się zgodnie z okresem  $ThX$ . Promieniowanie  $\beta$  i  $\gamma$  posiada natężenie z początku równe 0, po czym przechodzi również przez maximum i zanika według tego samego prawa granicznego, co poprzednio; to prawo charakteryzuje się okresem toru  $X$ , wynoszącym 3,64 dni. W pierwszym przybliżeniu można opisać powstawanie aktywnego osadu jako zagadnienie dwóch substancyj, z których jedna jest to grupa  $ThX$ ,  $Tn$  i  $ThA$ , druga zaś  $ThB$  w równowadze z  $ThC$ ,  $ThC'$  i  $ThC''$ . Z tego wynika, że maximum promieniowania  $\beta$  i  $\gamma$  jest osiągnięte w tej samej chwili co maximum  $ThB$ ,

mianowicie po upływie około 40 godzin (przyjmujemy jako okres  $ThB$  10,6 godzin). Maximum promieniowania  $\alpha$  odpowiada wcześniejszej chwili, zależnej od stopnia, w jakim różne grupy promieni  $\alpha$  są zużytkowane w komorze jonizacyjnej. Po upływie 40 dni ilość  $ThX$  spada do  $5 \cdot 10^{-4}$  ilości początkowej.

Powstawanie  $ThX$  w solach torowych odbywa się zgodnie z prawem  $q = q_{\infty}(1 - e^{-\lambda t})$ , gdzie  $q_{\infty}$  jest to ilość graniczna,  $q$ —ilość nagromadzona w chwili  $t$ ,  $\lambda$  zaś—stała zaniku  $ThX$ . Rolę substancyj pośrednich od-



Rys. 166. I—zanik  $ThX$ ; II—powstawanie  $ThX$  z  $RTh$ . Krzywa I—liczba atomów  $ThX$  zanikających w jednostce czasu, w procentach liczby początkowej. Krzywa II—liczba atomów  $ThX$  zanikających w jednostce czasu w założeniu, że w chwili  $t=0$  liczba atomów  $RTh$  zanikających w jednostce czasu jest równa 100.

grywają w tym przypadku  $MTh$  i  $RTh$ ; ta ostatnia substancja jest używana do sporządzania  $ThX$  służącego w lecznictwie do wstrzyknięć. Powstawanie  $ThX$  z  $RTh$  odbywa się również zgodnie z powyższym prawem, gdyż okres  $ThX$  jest mały wobec okresu  $RTh$  (rys. 166).

Jeżeli strącamy  $RTh$  wodą utlenioną zamiast amoniakiem, to osad aktywny pozostaje w roztworze razem z  $ThX$ , co daje większą aktywność początkową.

Można otrzymać  $ThX$  z  $RTh$  za pomocą odskoku; wyrzucane atomy unoszą dodatni ładunek i mogą być zebrane przy pomocy pola elektrycznego.



## § 138. Toron i osad aktywny toronu.

Toron jest to gaz promieniotwórczy, izotop radonu ( $Z=86$ ). Właściwości toronu zostały opisane w rozdziale IX. Okres wynosi 54,5 *sek*. Domniemany ciężar atomowy wynosi 220. Jest to pierwiastek bezpośrednio pochodzący od *ThX*. Dla otrzymywania osadu aktywnego jest jednak rzeczą korzystniejszą używać preparatu *RTh*, którego trwanie jest znacznie dłuższe i który bywa zazwyczaj przechowywany w postaci wodorotlenku, niekiedy zmieszanego z wodorotlenkiem żelazowym lub innymi substancjami w stanie wielkiego rozproszenia.

Można również otrzymywać toron z *ThX* za pomocą odskoku; w tym przypadku jednak wyrzucane atomy nie są naładowane ani w powietrzu, ani w żadnym innym gazie.

Tor wysyła cząstki  $\alpha$  o zasięgu 5,06 *cm* w powietrzu w 15° i pod ciśnieniem normalnym.

W doświadczeniach wykonywanych z toronem dużą rolę odgrywa krótkotrwały pierwiastek pochodny, tor *A*, którego nie można oddzielić w dostrzegalnej ilości od toronu. Okres *ThA* wynosi 0,14 *sek*, promieniowanie składa się z cząstek  $\alpha$  o zasięgu 5,48 *cm* w powietrzu w 15° pod ciśnieniem normalnym. Analogia z *RaA* wskazuje, że tor *A* jest to izotop polonu i zajmuje miejsce oznaczone liczbą  $Z=84$ . Ciężar atomowy *ThA* wynosi 216.

Tor *B* powstający w przemianie toru *A* jest to izotop ołowiu ( $Z=82$ ), o ciężarze atomowym 216. Okres wyznaczony na podstawie granicznego prawa zaniku osadu aktywnego wynosi 10,6 *godz*. Promieniowanie składa się z promieni  $\beta$  i z promieni  $\gamma$ , na ogół łatwo pochłanianych przez materię. Średni współczynnik absorpcji promieni  $\beta$  w *Al* wynosi około 153 *cm*<sup>-1</sup>; w widmie magnetycznym znajdujemy kilka grup, spośród których wyróżniają się natężeniem grupy o energii 150 *ekw* i 225 *ekw* ( $\beta=0,636$  i  $0,720$ ). Promieniowanie  $\beta$  składa się ponadto z widma ciągłego, utworzonego z elektronów powstających bezpośrednio w przemianie. Jądrowe promienie  $\gamma$  składają się z grup, z których najbardziej przenikliwa posiada długość fali około 41 *j.X* i energię około 300 *ekw*.

Tor *C*, pierwiastek bezpośrednio pochodzący od toru *B*, jest to izotop bizmutu ( $Z=83$ ) o ciężarze atomowym 212 i może być otrzymany z roztworu osadu aktywnego drogą osadzania na niklu. Na podstawie szybkości zanikania toru *C* w równowadze z pochodnymi znajdujemy, że okres wynosi 60,5 *min*. Promieniowanie toru *C* składa się z dwóch głównych grup cząstek  $\alpha$ , o zasięgach 4,72 *cm* i 8,61 *cm* w powietrzu w 15° pod ciśnieniem normalnym (por. rys. 92 i 105), oraz promieni  $\beta$  i  $\gamma$ .

Liczenie cząstek  $\alpha$  za pomocą metody scyntylacyjnej oraz metody torów mgiełkowych wykazało, że na 35% cząstek o zasięgu 4,7 *cm* przypada 65% o zasięgu 8,6 *cm*. Ponadto istnieją w bardzo małej ilości cząstki o bardzo długim zasięgu 9,8 *cm* i 11,7 *cm*.

Grupę o zasięgu 4,7 *cm* przypisujemy *ThC*, natomiast pochodzenie



grupy 8,6 *cm* upatrujemy w pierwiastku pochodnym  $ThC'$ , którego życie jest niezmiernie krótkie i który powstaje z  $ThC$  drogą przemiany obejmującej 65% całkowitej liczby atomów i połączonej z emisją promieni  $\beta$ . Na podstawie długości zasięgu cząstek  $\alpha$  wnioskujemy, że okres  $ThC'$  jest krótszy od  $10^{-8}$  *sek*.

Promienie  $\alpha$   $ThC$  nie są jednorodne, lecz posiadają subtelną budowę i składają się z 6 grup; największa i najmniejsza prędkość różnią się o około 4% (§ 69, tabl. IX, fig. 4 i 6).

$ThC''$  jest to izotop talu ( $Z = 81$ ), powstaje z  $ThC$  drogą przemiany obejmującej 35% całkowitej liczby atomów i związanej z emisją promieni  $\alpha$  i może być otrzymany za pomocą odskoku towarzyszącego tej przemianie. Promieniowanie  $ThC''$  składa się z promieni  $\beta$  i  $\gamma$ ; okres zmierzony na podstawie szybkości zaniku wynosi 3,1 *min*.

Promieniowanie  $\beta$  i  $\gamma$  pochodzi od  $ThC$  oraz  $ThC''$ . Dokładne oznaczenie udziału obu tych substancyj jest utrudnione z powodu krótkości życia  $ThC''$ . To promieniowanie zawiera najszybsze promienie  $\beta$  i najbardziej przenikliwe promienie  $\gamma$ , jakie znamy w rodzinie torowej; współczynniki absorpcji w glinie wynoszą  $\mu = 14,4$  *cm*<sup>-1</sup> (promienie  $\beta$   $ThC$ ) i  $\mu = 21,6$  *cm*<sup>-1</sup> (promienie  $\beta$   $ThC''$ ). Promienie  $\gamma$  pochodzą od  $ThC$  i  $ThC''$ , ich współczynnik absorpcji w ołowiu wynosi 0,46 *cm*<sup>-1</sup>. Granice energii promieni  $\beta$  i  $\gamma$ , odpowiadające tym współczynnikom absorpcji, są tego samego rzędu wielkości, co w przypadku  $RaC$ , tj. rzędu kilku milionów elektronowoltów.

Ewolucja aktywnego osadu toru może być traktowana jako zagadnienie dwóch substancyj, z których jedna jest to  $ThB$ , wytwarzający  $ThC$  w równowadze z  $ThC'$  i  $ThC''$ . Jeżeli w chwili początkowej  $ThB$  jest wolny od  $ThC$ , to ilość tego ostatniego przechodzi przez maximum po upływie 3,8 *godzin*. Osad aktywny zanika do 1% początkowej ilości po upływie 3 *dni*.

Zależność pomiędzy promieniowaniem  $\alpha$  i promieniowaniem  $\gamma$   $ThC'$  była przedmiotem badań mających na celu opracowanie metody oznaczania preparatów torowych. Zazwyczaj wyrażamy natężenie promieniowania  $\gamma$  jako równoważną liczbę miligramów  $Ra$ . Ponieważ jednak przenikliwość promieni  $\gamma$   $RaC$  jest różna od przenikliwości promieni  $\gamma$   $ThC''$ , przeto otrzymane liczby są zależne od rodzaju aparatury, w szczególności zaś od grubości ołowiu użytego jako filtr. Dla przykładu podamy, że jeżeli natężenie promieni  $\gamma$  mierzy się po przejściu przez 10 *mm* ołowiu, to preparat  $Th(C + C' + C'')$ , równoważny 1 *mg*  $Ra$  pod względem promieniowania  $\gamma$ , wysyła w sekundzie  $4,2 \cdot 10^7$  cząstek  $\alpha$ . Jeżeli ten preparat jest w równowadze z  $RTh$  lub  $ThX$ , to stosunek między liczbą cząstek  $\alpha$  i liczbą wyrażającą natężenie promieni  $\gamma$  jest nieco większy. W istocie, liczby atomów  $ThC''$  i  $ThC$  ulegających przemianie w jednostce czasu pozostają względem siebie w stosunku 1,05 : 1, jeżeli  $ThC''$  znajduje się w stanie równowagi przejściowej z  $ThC$ , natomiast są sobie równe w przypadku równowagi osadu z  $RTh$ ; preparat  $ThC''$  pozostający w równowadze z  $RTh$  i równoważny 1 *mg*  $Ra$  daje  $4,4 \cdot 10^7$  cząstek  $\alpha$  w sekundzie.

## § 139. Ewolucja toru i mezotoru.

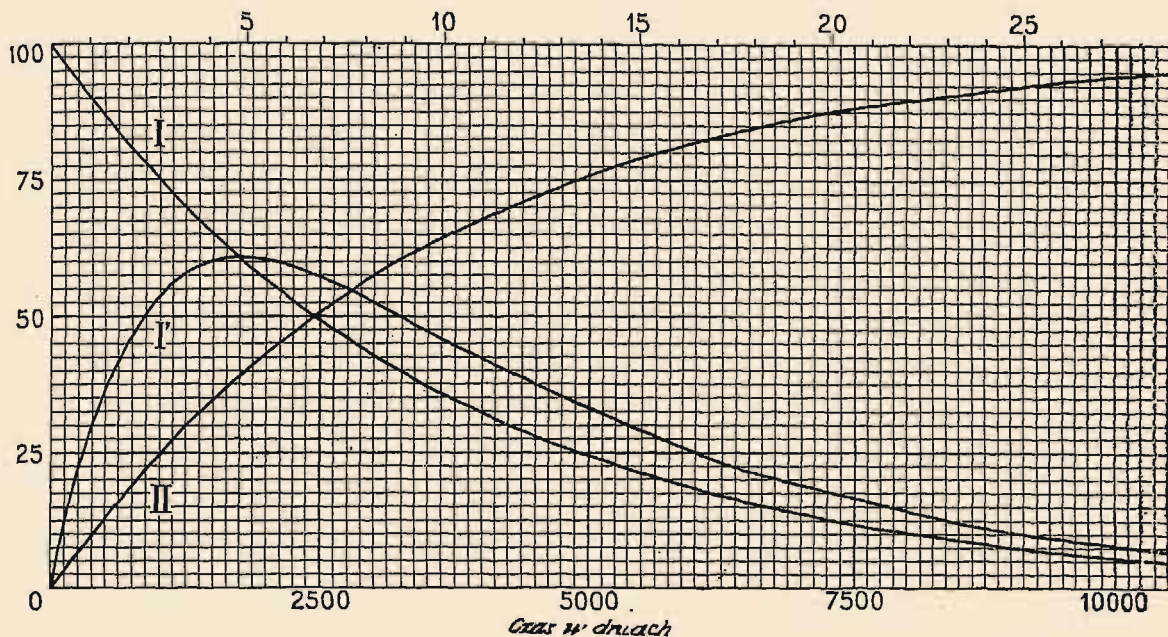
Tor świeżo wydobyty z minerału jest wolny od mezotoru, zawiera jednak całkowitą ilość radiotoru, z którym pozostawał w równowadze. Po upływie około miesiąca od chwili wydobywania toru, radiotor znajduje się w stanie równowagi ze swymi pierwiastkami pochodnymi. Różnica pomiędzy obserwowanym w tych warunkach promieniowaniem i promieniowaniem toru w minerałach polega na tym, że w pierwszym przypadku brak promieni  $\beta$  i  $\gamma$  *MTh2* towarzyszącego *MTh1*; natomiast promieniowanie  $\alpha$  jest prawie jednakowe. Wszelako stan rzeczy istniejący w oddzielonej soli torowej nie jest trwały, gdyż zanik radiotoru nie jest skompensowany jego powstawaniem, wskutek czego ten pierwiastek zanika wraz ze swymi pochodnymi. Z drugiej strony ponieważ *MTh1* stopniowo odtwarza się, ilość *RTh* po przejściu przez minimum znowu wzrasta i po upływie 50 lat osiąga w przybliżeniu stan równowagi z *Th* i *MTh1*. Z punktu widzenia teoretycznego jest to zagadnienie trzech substancji, z których pierwsza, *Th*, jest praktycznie biorąc niezmienna, druga jest to grupa *MTh1* + *MTh2*, o okresie 6,7 lat, trzecia zaś — *RTh* + + pochodne, o okresie 1,9 lat. Zaznaczmy, że po oddzieleniu *MTh* od *Th* w równowadze z *MTh1* + *RTh*, przemiany obu oddzielonych części odbywają się według prawa ewolucji uzupełniającej. Jeżeli zatem zaniedbamy zakłócenie początkowe, wynikające z tego, że razem z *MTh2* oddziela się również *ThX*, to zachowanie się obu części można przedstawić następującymi wzorami:

$$\begin{aligned} \text{I. } N_I &= N_\infty e^{-\lambda t}; N'_I = \lambda' N'_\infty (e^{-\lambda t} - e^{-\lambda' t})/(\lambda' - \lambda), \\ \text{II. } N_{II} &= N_\infty (1 - e^{-\lambda t}); N'_{II} = N'_\infty [1 - \lambda' (e^{-\lambda t} - e^{-\lambda' t})/(\lambda' - \lambda)], \end{aligned}$$

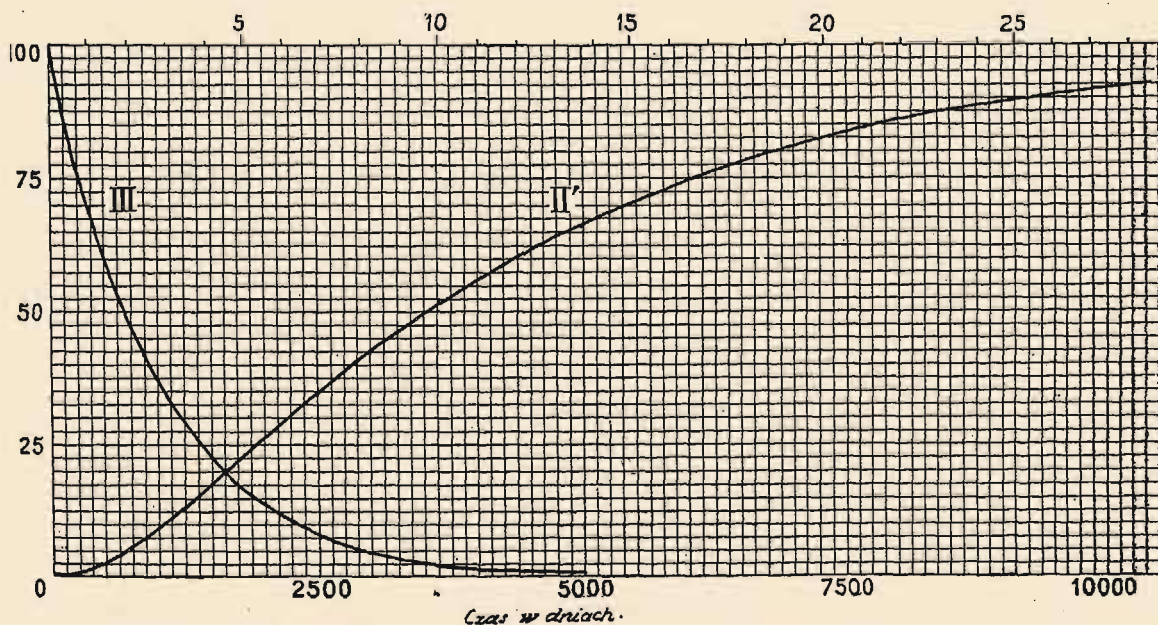
gdzie  $N$  i  $N'$  są to liczby atomów *MTh1* i *RTh*,  $N_\infty$  i  $N'_\infty$  są to te same liczby w stanie równowagi z *Th*,  $\lambda$  i  $\lambda'$  — stałe zaniku *MTh* i *RTh* ( $\lambda = 0,103 \text{ lat}^{-1}$ ,  $\lambda' = 0,365 \text{ lat}^{-1}$ ). Równania I opisują przemiany zachodzące w oddzielnym *MTh*, równania II dotyczą stanu rzeczy w *Th*, z którego wydzielono *MTh*. Łatwo zauważyć, że ilość *RTh* przechodzi przez maximum w części I i przez minimum w części II w tej samej chwili, mianowicie po upływie 4,83 lat (rys. 167 i 168).

Grupa *MTh1* + *MTh2* nie wysyła promieni  $\alpha$  i z tego powodu liczba cząstek  $\alpha$  wysyłanych w jednostce czasu przez frakcję I jest proporcjonalna do  $N'_I$ ; to samo można powiedzieć o wszystkich zjawiskach zależnych od promieniowania  $\alpha$ . Np. prąd jonowy pochodzący od promieni  $\alpha$  równa się z początku zeru, przechodzi przez maximum po upływie 4,83 lat i następnie zmniejsza się według prawa przechodzącego w granicy w prawo zaniku *MTh1*. Natomiast we frakcji II prąd jonowy wytworzony przez promienie  $\alpha$  składa się z dwóch części, z których jedna, pochodząca od *Th*, jest niezmienna w czasie, druga zaś, pochodząca od grupy *RTh* + pochodne, jest proporcjonalna do  $N'_{II}$ ; wartość początkowa





Rys. 167. I — zanik  $MThI$ . II — powstawanie  $MThI$  z  $Th$ . I' — powstawanie  $RTh$  z  $Th$ . Krzywa I — liczba atomów zanikających w jednostce czasu, w procentach liczby początkowej. Krzywa I' i II — liczby atomów  $RTh$  i  $MThI$  zanikających w jednostce czasu w założeniu, że w chwili  $t=0$  liczba atomów  $Th$  zanikających w jednostce czasu jest równa 100.



Rys. 168. II — powstawanie  $RTh$  z  $Th$ . III — zanik  $RTh$ . Krzywa II' — liczba atomów zanikających w jednostce czasu w założeniu, że w chwili  $t=0$  liczba atomów  $Th$  zanikających w jednostce czasu jest równa 100. Krzywa III — liczba atomów zanikających w jednostce czasu, w procentach liczby początkowej.



nie różni się od wartości obserwowanej przed wydobyciem mezotoru, następnie zmniejsza się, przechodzi przez minimum po 4,83 latach i stopniowo powraca do wartości pierwotnej.

Pomiary aktywności toru i jego pochodnych w minerałach i w czystych solach torowych dają wyniki zgodne z powyższymi obliczeniami, zresztą częściowo opartymi na tych pomiarach. Bardzo cienkie warstwy, sporządzane z różnych minerałów torowych: torianitu, torytu, oranżytu, monazytu dają prąd jonowy proporcjonalny do zawartości toru; musimy jednak uprzednio odjąć od tego prądu część pochodzącą od uranu i jego pochodnych, które znajdowały się w minerałach. Natomiast handlowe preparaty soli torowych dają prąd jonowy, który po przeliczeniu na gram toru jest zawsze słabszy od prądu dawanego przez  $Th$  w minerałach (*Boltwood*) i może wynosić tylko połowę tego ostatniego.

Analogiczne wyniki zostały otrzymane drogą badania wydzielanego toronu i powstającego osadu aktywnego; oba te zjawiska przebiegają proporcjonalnie do ilości  $RTh$  (za pośrednictwem  $ThX$ ). W tych doświadczeniach używano identycznych kuwetek, z których każda zawierała jednakową objętość roztworu minerału lub soli towarowej; każda kuwetka była przykryta płytką służącą do zbierania aktywnego osadu. Znalezione, że promieniowanie  $\alpha$  płytek eksponowanych w ciągu jednakowego czasu w obecności roztworów różnych minerałów jest proporcjonalne do zawartości toru; natomiast sole torowe dawały po przeliczeniu na 1 g toru natężenie około 2 razy mniejsze (*Dadourian*).

Porównywanie soli torowych różnego i znanego wieku dostarczyło pierwszych danych o okresie mezotoru. Dokładniejsze wyniki zostały następnie otrzymane drogą badania promieniotwórczej ewolucji mezotoru w ciągu szeregu lat. Jeżeli stała  $\lambda$   $RTh$  została wyznaczona za pomocą pomiarów zaniku promieniotwórczego, który daje się łatwiej zaobserwować niż zanik  $MTh1$ , to równania I pozwalają obliczyć stałą promieniotwórczości  $\lambda$   $MTh1$  na podstawie pomiarów narastania  $RTh$ . Możemy obliczyć ilość  $RTh$  mierząc promieniowanie  $\alpha$  preparatu i odejmując część pochodzącą od radu i jego pochodnych. Pomiary promieniowania  $\gamma$  są dokładniejsze od pomiarów promieniowania  $\alpha$  głównie dlatego, że w tym przypadku można używać preparatów przechowywanych w zalutowanych rurkach, z których toron nie wydziela się. W tym przypadku jednak należy wziąć pod uwagę promieniowanie  $\gamma$  wysyłane przez grupę  $MTh1 + MTh2$ .

Promieniowanie  $\gamma$  może być przedstawione wzorem:

$$I = K\lambda N + K'\lambda'N'$$

gdzie  $K$  i  $K'$  są to współczynniki aktywności, tj. ładunki elektryczne, otrzymywane w komorze jonizacyjnej jako skutek przemiany jednego atomu  $MTh1$  oraz  $RTh$ . Ponieważ przenikliwość promieni  $\gamma$   $MTh2$  i  $ThC'$  nie jest jednakowa, przeto stosunek  $K'/K$  jest zależny od przyrządu pomiarowego, głównie zaś od grubości ołowiu użytego jako filtr. Sposób obliczania polega na tym, że dobiera się wartości  $\lambda$  i  $K'/K$  tak, aby

otrzymać dobrą zgodność z teoretycznym prawem ewolucji. Jeżeli mezotor zawiera rad, należy oznaczyć ilość tego ostatniego i odjąć natężenie promieniowania  $\gamma$  radu od natężenia całkowitego. Chwila przejścia przez maximum jest zależna od wartości stosunku  $K'/K$ . Kładąc  $\lambda = 0,103 \text{ lat}^{-1}$ ,  $\lambda' = 0,365 \text{ lat}^{-1}$  otrzymujemy następujące wartości czasu  $\tau$  odpowiadającego maximum w przypadku niektórych wartości  $K'/K$ .

|                    |      |      |      |          |
|--------------------|------|------|------|----------|
| $K'/K$             | 0,5  | 1,0  | 1,5  | $\infty$ |
| $\tau \text{ lat}$ | 1,43 | 2,76 | 3,34 | 4,83     |

Znaleziono, że jeżeli promienie  $\gamma$  przechodzą przez 5 mm ołowiu, wartość  $K'/K$  wynosi około 1,5; ten stosunek wzrasta wraz z grubością ołowiu. Ten wynik tłumaczymy jako skutek filtrowania promieni. Promienie  $\gamma$  *MTh2*, których współczynnik absorpcji wynosi  $0,64 \text{ cm}^{-1}$ , są usuwane przez dany ekran w większej ilości niż promienie  $\gamma$  *ThC''*, których  $\mu = 0,46 \text{ cm}^{-1}$ . Odwrotne zjawisko obserwujemy w przypadku, gdy mamy do czynienia z mieszaniną promieni  $\gamma$  *MTh2* i promieni  $\gamma$  *RaC*, których  $\mu = 0,5 \text{ cm}^{-1}$ . W tym przypadku stosunek  $K/K_0$  aktywności przeliczonych na przemianę jednego atomu ( $K_0$  oznacza współczynnik aktywności *RaC*) zmniejsza się, gdy grubość zużytego ołowiu wzrasta.

Z tego wynika, że równoważnik  $x$  badanego promieniowania  $\gamma$  wyrażonego w *mg* radu zmienia się wraz z grubością ołowiu, mianowicie wzrasta w przypadku *RTh*, zmniejsza się zaś w przypadku *MTh*. Powstawanie *RTh* w preparatach *MTh* sprawia, że zmiany równoważnika  $x$  w zależności od grubości  $l$  stają się najpierw coraz mniejsze, a następnie zachodzą w odwrotnym kierunku.

Na poniższej tablicy są podane według *Bothego* ilości radu, stanowiące równoważnik preparatów *MTh* różnego wieku, nie zawierających radu, badanych przy użyciu filtrów różnych grubości. Zakładamy, że w chwili początkowej preparat nie zawiera *RTh*.

| wiek<br>w latach     | 0     | 1,0   | 2,0   | 3,0   | 4,0   | 5,0   | 6,0   | 8,0   | 10,0  |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $l = 0,5 \text{ cm}$ | 0,777 | 1,041 | 1,175 | 1,225 | 1,218 | 1,179 | 1,117 | 0,971 | 0,818 |
| $l = 1,0 \text{ „}$  | 0,719 | 1,006 | 1,154 | 1,214 | 1,214 | 1,180 | 1,121 | 0,976 | 0,825 |
| $l = 2,0 \text{ „}$  | 0,631 | 0,953 | 1,124 | 1,200 | 1,210 | 1,181 | 1,127 | 0,986 | 0,835 |
| $l = 3,0 \text{ „}$  | 0,556 | 0,909 | 1,103 | 1,192 | 1,211 | 1,188 | 1,137 | 0,998 | 0,847 |
| $l = 4,0 \text{ „}$  | 0,494 | 0,879 | 1,091 | 1,194 | 1,220 | 1,203 | 1,154 | 1,016 | 0,864 |
| $l = 5,0 \text{ „}$  | 0,448 | 0,857 | 1,087 | 1,200 | 1,233 | 1,219 | 1,172 | 1,035 | 0,881 |

Jak widać z tych liczb, zmienność równoważnika  $x$  w zależności od  $l$  i od wieku preparatu jest wyraźnie zaznaczona, zwłaszcza w przypadku świeżego preparatu (wiek mniejszy od 2 lat) i w nieco mniejszym stopniu w przypadku starego preparatu (ponad 6 lat). Natomiast równoważnik  $x$  preparatów mających od 3 do 5 lat jest prawie niezmienny; we wszystkich zaś przypadkach obecność *Ra* w preparacie sprawia, że wielkość  $x$  jest lepiej określona. Badając bardzo dokładnie absorpcję promieniowania można do pewnego stopnia ocenić względną zawartość *Ra*, *MTh* i *RTh* w preparacie przechowywanym w zalutowanej rurce. Wyniki są pewniejsze, jeżeli istnieje możliwość wykonywania pomiarów w ciągu kilku miesięcy.



Weźmy wreszcie pod uwagę zmiany ilości ciepła wydzielanego przez preparat *MTh*. Ponieważ ciepło pochodzi głównie od promieni  $\alpha$ , przeto możemy w pierwszym przybliżeniu zaniedbać udział promieni  $\beta$  i promieni  $\gamma$ . W tym przybliżeniu preparaty *MTh*1 + *MTh*2, nie zawierające radu i *RTh*, nie wydzielają początkowo ciepła, skutek zaś cieplny wzrasta stopniowo proporcjonalnie do ilości *RTh*. Oznaczmy przez  $\Delta$  ilość ciepła wydzielanego w jednostce czasu, w odniesieniu do wzorca radowego nie zawierającego *RaD* i polonu, *I* zaś — promieniowanie  $\gamma$  zmierzone względem tego samego wzorca; znajdziemy, że stosunek  $\Delta/I$  najpierw równa się zeru, następnie zaś wzrasta z czasem według wzoru:

$$\Delta/I = q' h / (u + hu'),$$

w którym  $h$  jest to stosunek  $\lambda'N'/\lambda N$  liczb atomów *RTh* i *MTh*, ulegających przemianom w jednostce czasu,  $u$  i  $u'$  zaś są to stosunki współczynników  $K$  i  $K'$  do współczynnika aktywności promieni  $\gamma$  radu w równowadze z *RaC*.  $q'$  wreszcie jest to stosunek ilości ciepła, wydzielanego przez jeden atom *RTh* i wszystkie następne w szeregu przemian grupy *RTh* + pochodne, do analogicznej ilości ciepła, wydzielanego w szeregu przemian *Ra* + pochodne; w tym ostatnim przypadku urywamy szereg na ostatnim wyrazie przed *RaD*. Wartość  $q'$  obliczona na podstawie energii cząstek  $\alpha$  wynosi 1,335. Można wyznaczyć współczynnik  $q'$  mierząc  $\Delta/I$  w przypadku preparatu *RTh* w równowadze z pochodnymi. Krzywa wzrostu  $\Delta/I$  w zależności od czasu, otrzymana drogą badania preparatu *MTh* daje wówczas wartość  $u$ . Jeżeli preparat *MTh* zawiera również rad, wzór dający  $\Delta/I$  musi być uzupełniony. Ponieważ  $h$  jest znane, można posługiwać się tym wzorem w celu wyliczenia wartości  $u$  oraz wieku preparatu.

Zmiany  $\Delta/I$  preparatu *MTh* nie zawierającego radu, obserwowane w ciągu 4 lat, okazały się zgodne z przewidywaniami teoretycznymi.

Obecność uranu w minerałach torowych nasunęła przypuszczenie, że między tymi pierwiastkami może istnieć bliższy związek, tak np. tor mógłby być pierwiastkiem pochodnym izotopu uranu o ciężarze atomowym 236. Badanie stosunków ilościowych pomiędzy *U* i *Th* w niektórych starych nienaruszonych minerałach dostarczyło zrazu argumentów na korzyść tej hipotezy; późniejsze doświadczenia wykazały jednak, że byłoby rzeczą przedwczesną wyciągać z tych faktów jakiegokolwiek wniosek.