

ROZDZIAŁ X

OSADY AKTYWNE

§ 52. Promieniotwórczość wzbudzona.¹⁾ Ogólne cechy. Osad aktywny.

Przemijająca aktywność, uzyskiwana przez ciała umieszczone w pobliżu związków radu, toru lub aktynu, otrzymała nazwę promieniotwórczości wzbudzonej. W ten sposób można aktywować kartki papieru lub płytki metalowe, które następnie wysyłają promieniowanie składające się z promieni α , β i γ .²⁾

Główne prawa rządzące tym zjawiskiem są następujące:

Aktywacja zachodzi wtedy, kiedy jakieś ciało stałe znajduje się w bezpośrednim zetknięciu z jedną z emanacyj, tj. z radonem, toronem lub aktynonem. W celu zaktywowania ciała można je umieścić bądź w zamkniętym naczyniu, zawierającym nieco radu, toru lub aktynu, bądź w prądzie powietrza unoszącym jedną z emanacyj; w przypadku radonu wystarczy wprowadzić radon do naczynia, w którym znajduje się ciało aktywowane.

Jeżeli za pomocą odpowiedniego urządzenia utrzymujemy niezmienną koncentrację emanacji w naczyniu, wówczas wszystkie ciała, umieszczone w tym naczyniu, uzyskują promieniotwórczość wzbudzoną; ta *aktywacja* wzrasta zgodnie z określonym prawem i dąży do granicy zwanej *aktywacją nasyconą*. W przypadku radonu i aktynonu granica jest osiągnięta po upływie około trzech godzin, w przypadku toronu po upływie trzech dni. Zjawisko aktywacji jest niezależne od rodzaju aktywowanej materii (papier, metal itp.).

Ciało aktywowane, usunięte z naczynia i nie znajdujące się w zetknięciu z emanacją, wykazuje aktywność, która zmienia się z czasem według określonego prawa i w końcu zanika po upływie czasu tego samego rzędu wielkości, co czas potrzebny do uzyskania aktywacji nasyconej. Prawo dezaktywacji, podobnie jak prawo aktywacji, jest charakterystyczne dla substancji aktywującej i pozwala ją rozpoznać w sposób jednoznaczny.

¹⁾ Termin «promieniotwórczość wzbudzona» nie jest obecnie używany, gdyż wobec odkrycia sztucznej promieniotwórczości może prowadzić do nieporozumień (L.W.).

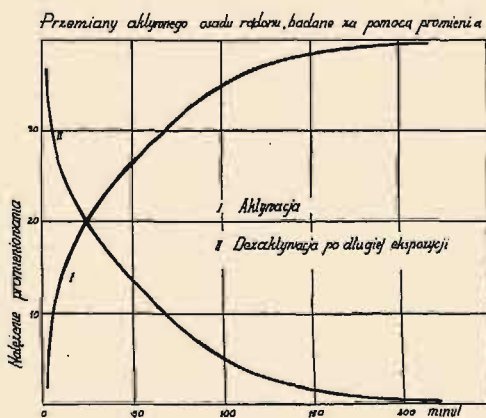
²⁾ P. Curie i M. Curie, E. Rutherford i F. Soddy, A. Debierne.

Jeżeli aktywacja odbywa się w gazie, którego gęstość jest normalna, aktywność wzbudzona skupia się głównie na ciałach naładowanych ujemnie; w gazach rozrzedzonych różnica ta nie występuje. Ponadto w zwykłych warunkach ciśnienia można stwierdzić, że aktywacja powierzchni ciała stałego jest tym wydatniejsza, im większa jest swobodna przestrzeń w pobliżu tej powierzchni, oczywiście w założeniu, że koncentracja emanacji w naczyniu jest wszędzie jednakowa.

Interpretacja tych wszystkich zjawisk jest następująca. Przemiana atomów każdej z emanacji prowadzi do powstawania atomów substancji promieniotwórczej o własnościach ciała stałego, tworzących w powietrzu niezmiernie subtelną zawiesinę, która stopniowo dyfunduje ku powierzchniom ciał stałych i przylega do nich siłami spójności, tworząc *aktywny osad* danej emanacji. W gazie rozrzedzonym atomy osadu mogą bezpośrednio dosięgnąć ścianek naczynia, ponieważ w chwili powstawania uzyskują pewną prędkość początkową. W gazie, którego ciśnienie jest normalne, atomy zatrzymują się po przebyciu bardzo krótkiej drogi; ponieważ jednak są naładowane, zachowują się jak jony i mogą być uniesione działaniem pola elektrycznego. Wszystkie trzy rodzaje osadu aktywnego są złożone i stanowią mieszaniny składników analogicznych; wszelako w przypadku radonu osad aktywny, stosunkowo krótkotrwały, daje pozostałość zwaną *długotrwałym osadem aktywnym*, ponieważ można go obserwować w ciągu kilku lat; toron i aktynon nie tworzą żadnej podobnej pozostałości.

§ 53. Przemiany aktywnego osadu radonu. Ciała *A, B, C*.
Osad długotrwały: ciała *D, E i F*.

W celu zbadania przemian osadu aktywnego aktywujemy zazwyczaj płytkę metalową z jednej tylko strony, eksponując ją w powietrzu zawierającym emanację, w polu elektrycznym lub bez pola; następnie badamy w komorze jonizacyjnej promieniowanie płytki w zależności od czasu; można przy tym mierzyć bądź promieniowanie całkowite (promienie α), bądź też tylko promienie przenikliwe (promienie β i γ), tj. przechodzące przez ekrany pochłaniające promienie α . Prawo zmian promieniowania w czasie ma postać zależną od rodzaju zużytkowanego promieniowania i od czasu aktywacji τ zwanego także czasem ekspozycji.



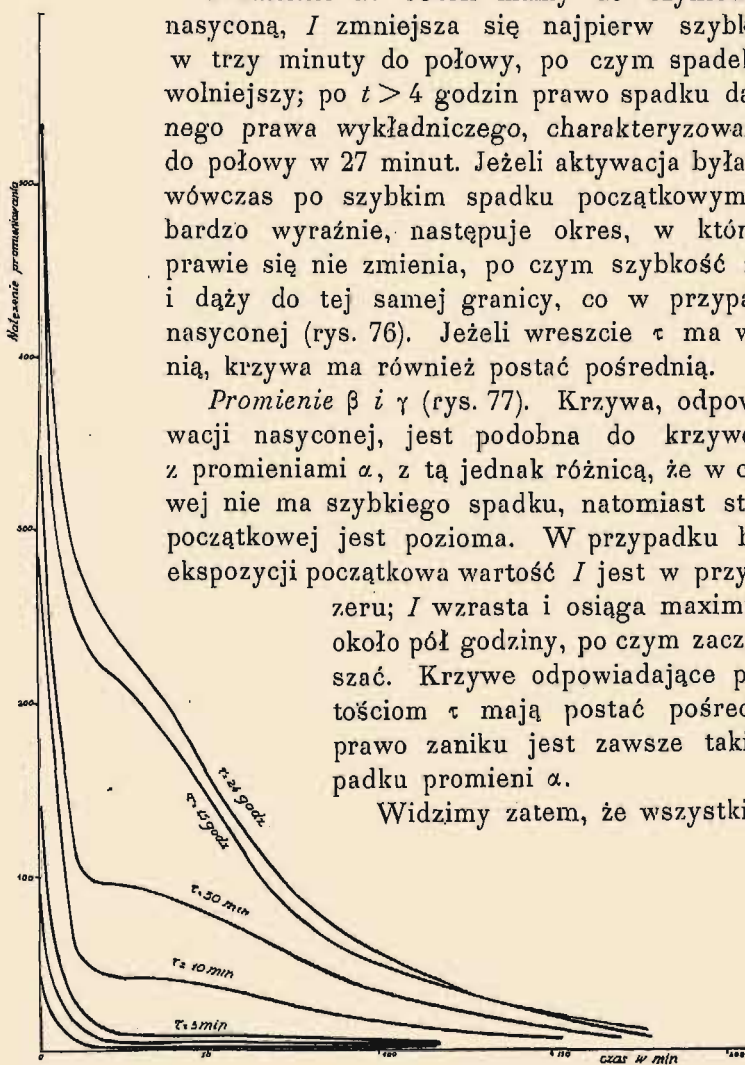
Rys. 75.

Krzywe na rysunku 75, 76 i 77 przedstawiają, w zależności od czasu, natężenie I promieniowania α oraz promieniowania β i γ płytki aktywowanej w ciągu czasu τ , którego wartość jest różna na różnych krzywych i waha się od czasu bardzo krótkiego do czasu wystarczającego dla aktywacji nasyconej.

Promienie α . Jeżeli mamy do czynienia z aktywacją nasyconą, I zmniejsza się najpierw szybko, mianowicie w trzy minuty do połowy, po czym spadek staje się powolniejszy; po $t > 4$ godzin prawo spadku dąży do granicznego prawa wykładniczego, charakteryzowanego spadkiem do połowy w 27 minut. Jeżeli aktywacja była bardzo krótka, wówczas po szybkim spadku początkowym, zaznaczonym bardzo wyraźnie, następuje okres, w którym aktywność prawie się nie zmienia, po czym szybkość zaniku wzrasta i dąży do tej samej granicy, co w przypadku aktywacji nasyconej (rys. 76). Jeżeli wreszcie τ ma wartość pośrednią, krzywa ma również postać pośrednią.

Promienie β i γ (rys. 77). Krzywa, odpowiadająca aktywacji nasyconej, jest podobna do krzywej, otrzymanej z promieniami α , z tą jednak różnicą, że w części początkowej nie ma szybkiego spadku, natomiast styczna w chwili początkowej jest pozioma. W przypadku bardzo krótkiej ekspozycji początkowa wartość I jest w przybliżeniu równa zeru; I wzrasta i osiąga maximum po upływie około pół godziny, po czym zaczyna się zmniejszać. Krzywe odpowiadające pośrednim wartościom τ mają postać pośrednią. Końcowe prawo zaniku jest zawsze takie, jak w przypadku promieni α .

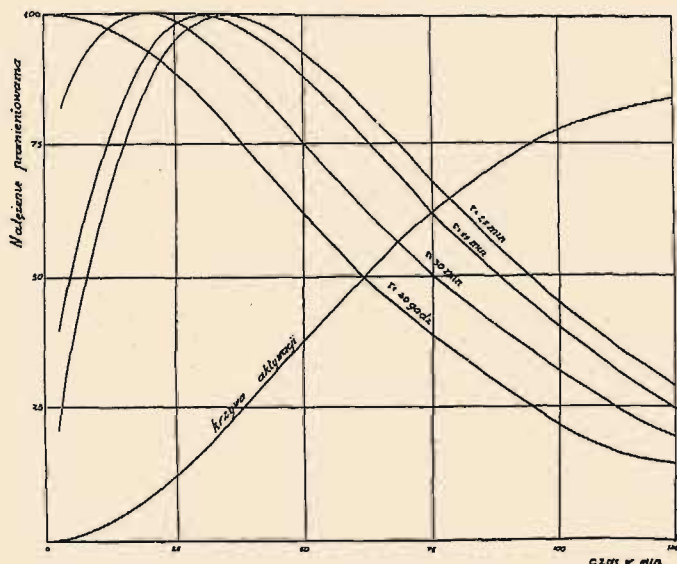
Widzimy zatem, że wszystkie krzywe ewo-



Rys. 76.

lucji promieniotwórczości wzbudzonej pochodzącej od radu posiadają wspólną cechę: spadek końcowy, przebiegający zgodnie z prawem wykładniczym o okresie 27 minut. Jeżeli zatem przedstawiamy $\log I$ jako funkcję czasu, wszystkie krzywe przechodzą w granicy w proste równoległe.

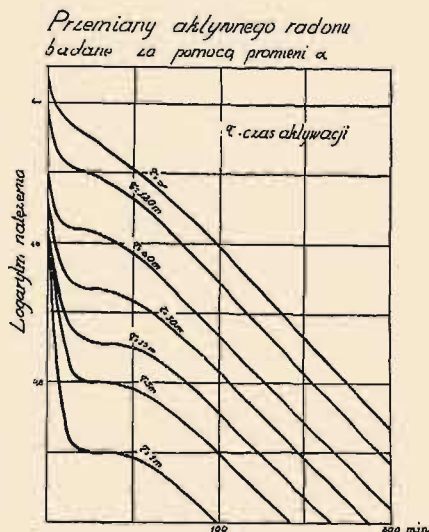
Badanie tych krzywych wykazuje, że nie możemy traktować aktywnego osadu radonu jako substancji prostej. W celu interpretacji krzywych czynimy założenie, że osad składa się z trzech pierwiastków: rad A , wytwarzany bezpośrednio przez radon, zamienia się na rad B ,



Rys. 77.

który z kolei przeobraża się w rad C . Rad A posiada okres równy 3 minutom i wysyła promienie α ; rad B , którego okres wynosi 27 minut, wysyła promienie β i γ . Początkowy szybki spadek promieniotwórczości α pochodzi od radu A , początkowy wzrost promieniotwórczości β i γ , obserwowany po krótkiej ekspozycji, tłumaczy się stopniowym powstawaniem radu B i radu C z zanikającego radu A ; wreszcie końcowe prawo wykładnicze ($T = 27 \text{ min.}$) odpowiada ustaleniu się równowagi przejściowej między radem C i B i posiada okres radu B , ponieważ ten ostatni jest dłuższy od okresu radu C (§ 62).

W późniejszych badaniach wykryto, że RaC ulega dwojakiej przemianie. Znaczna większość atomów RaC zamienia się na RaC' i wysyła promienie β ; drobny ułamek liczby tych atomów wysyła promienie α



Rys. 78.

i zamienia się na RaC'' . Pierwiastki pochodne RaC' i RaC'' są bardzo krótkotrwałe (§ 128).

Na tablicy 14 Przypisów czytelnik znajdzie dokładne dane liczbowe, dotyczące spadku aktywnego osadu radonu po aktywacji nasyconej.

Pozostałość długotrwała. Badanie tej pozostałości jest tym łatwiejsze, im aktywacja była dłuższa i ilość radonu większa. Po upływie jednego dnia krótkotrwały osad aktywny znika całkowicie, aktywowana płytką wysyła jednak promienie α i β , których natężenie powoli wzrasta. Promieniowanie β osiąga kres po upływie około miesiąca i odtąd pozostaje z pozoru niezmiennie, promieniowanie α wzrasta w ciągu dwóch lat i również dąży do wartości granicznej, wszelako pomiary czynione w ciągu dostatecznie długiego czasu wykazały, że po przejściu przez maximum natężenie promieni β jak również i promieni α zmniejsza się bardzo powoli.

Zjawiska te tłumaczymy w następujący sposób; rad $(C + C' + C'')$, ostatni złożony składnik krótkotrwałego osadu aktywnego, ulega znikowi zamieniając się na rad D , pierwiastek długotrwały, posiadający okres 22 lat i wysyłający promienie β pozbawione dostrzegalnej zdolności jonizacyjnej; pierwiastek ten zamienia się na RaE , który wysyła promienie β i zanika do połowy w 5 dni; wreszcie RaE zamienia się na RaF , który wysyła promienie α i posiada okres równy 140 dniom. Wzrastanie promieniowania β i α jest wynikiem powstawania ciał E i F z radu D , końcowy zanik odbywa się z okresem radu D , ponieważ ustala się równowaga przejściowa pomiędzy RaD i jego pochodnymi. RaF został zidentyfikowany z polonem, ponieważ ma dokładnie ten sam okres, jednakowe promieniowanie, jednakowe własności chemiczne; zarazem udowodniono, że polon znajdujący w minerałach promieniotwórczych pochodzi z przemiany radu.

§ 54. Przemiany osadów aktywnych toronu i aktynonu.

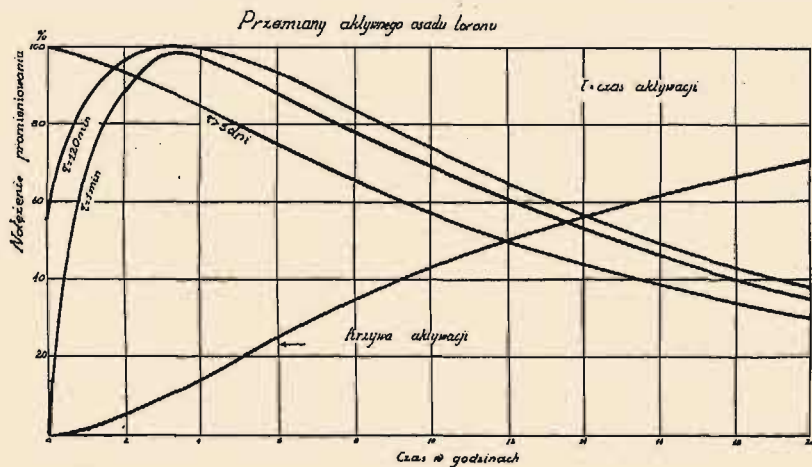
Te przemiany są przedstawione na krzywych rys. 79 i 80 w przypadku różnych wartości τ . Prawo dezaktywacji, otrzymane za pomocą promieni α czy promieniowania przenikliwego $\beta + \gamma$, ma postać podobną. Prawo to interpretujemy w pierwszym przybliżeniu zakładając, że każdy z osadów składa się z dwóch ciał: toru B , toru C oraz aktynu B i aktynu C . Podobnie jak w przypadku osadu aktywnego radonu, ciała B wysyłają tylko promienie β i γ , gdy tymczasem ciała C są bardziej krótkotrwałe i wysyłają promienie α , β i γ ; promienie przenikliwe ciał B jonizują stosunkowo nieznacznie. Jeżeli aktywacja jest nasycona, promieniowanie pozostaje przez pewien czas prawie niezmiennie, potem zmniejsza się zgodnie z prawem, które w granicy staje się identyczne z prawem ciał B . Jeżeli aktywacja była bardzo krótka, to w chwili początkowej istnieją tylko ciała B , a ponieważ ich promieniowanie jest

słabe, przeto stopniowe powstawanie ciał C sprawia, że promieniowanie najpierw wzrasta, później przechodzi przez maximum i wreszcie zanika; prawo graniczne jest takie samo, jak w przypadku aktywacji nasyconej.

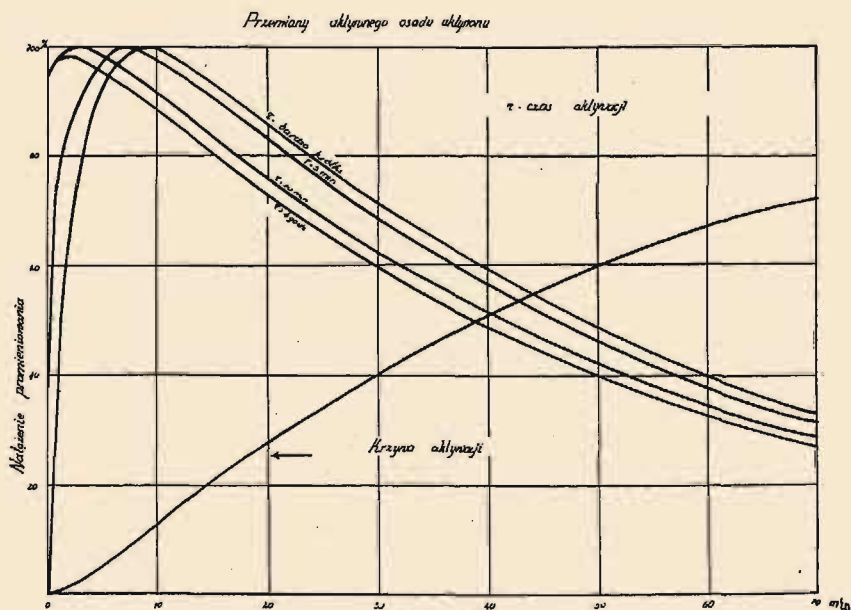
Otrzymano następujące wartości okresów:

Tor B	$T = 10,6$ godz.	aktywność B	$T = 36$ min.
„ C	$T = 60,5$ min.	„ C	$T = 2,16$ min.

Na podstawie analogii między kolejnością przemian trzech osadów aktywnych można było przypuszczać, że istnieją również pierwiastki tor



Rys. 79.



Rys. 80.

i aktywności A , analogiczne do radu A , nie dostrzeżone z powodu zbyt krótkiego życia. W istocie udało się wykryć te ciała za pomocą specjalnie opracowanych metod. Podajemy opis jednej z tych metod.

Substancja aktywna znajduje się w łódeczce, umieszczonej w pudełku zaopatrzonej w dwa przeciwległe otwory, przez które przesuwają się ciągłym ruchem wstążka bez końca. Przechodząc ponad substancją wstążka aktywuje się, po czym po wyjściu z pudełka działa na ekran powleczony siarczkiem cynku, który w tych warunkach rozświecila się. Jeżeli odległość ekranu od pudełka jest odpowiednio dobrana i jeżeli prędkość wstążki jest dostateczna, to można zaobserwować świecenie ekranu pochodzące od ciał bardzo krótkotrwałych i wysyłających promienie α ; w ten sposób stwierdzono, że okres toru A wynosi 0,2 sek, okres aktywności A 0,002 sek.

Substancje ThC i AcC ulegają przemianom podobnym do przemian radu C , mianowicie wytwarzają pochodne ThC' i ThC'' oraz AcC' i AcC'' . Istnieje zatem zupełna analogia pomiędzy trzema krótkotrwałymi osadami aktywnymi.

Na tablicach 15 i 16 Przypisów znajdują się dane liczbowe, dotyczące przemian aktywnych osadów toronu i aktynonu po ekspozycji nasyconej.

Osady aktywne mogą służyć do rozpoznawania natury substancji, od których pochodzą; w istocie każdy osad aktywny posiada zupełnie charakterystyczne prawo graniczne; doświadczenia wykonywane w ciągu dostatecznie długiego czasu pozwalają bądź rozpoznać każdy z osadów, bądź stwierdzić, że ma się do czynienia z ich mieszaniną. Substancję aktywną stałą lub ciekłą umieszcza się w płytce kuwecie, na którą zamiast przykrywką nakłada się aktywowaną płytkę. Należy przy tym zwracać uwagę na to, aby nie było bezpośredniego zetknięcia płytki z substancją aktywną; eksponowaną w ten sposób płytkę pozostawia się na pewien czas, po czym bada się jej promieniowanie w ciągu kilku dni.

Osad aktywny toronu bywa używany w pomiarach służących do oznaczania radiotoru, zawartego w związkach toru; konieczne jest przy tym, aby tor X znajdował się w równowadze z radiotorem; oznaczane roztwory powinny zawierać zawsze jednakową ilość materii i znajdować się w naczyniach jednakowego kształtu; w takim samym naczyniu umieszcza się roztwór wzorcowy.

§ 55. Chemiczne i elektrochemiczne własności aktywnych osadów.

Destylacja. Oddzielanie składników.

Osady aktywne są to substancje stałe, znajdujące się na aktywowanych ciałach w niezmiernie małej ilości; pocierając papierem aktywną powierzchnię możemy zabrać część aktywności, a nawet usunąć ją zupełnie, jeżeli tarcie było dosyć energiczne.

Można również oddzielić aktywny osad od podłoża, rozpuszczając go w rozcieńczonym kwasie. Jeżeli płytka aktywna jest wyrobiona ze szlachetnego metalu, np. z platyny lub ze złota i jeżeli traktujemy ją na gorąco rozcieńczonym kwasem azotowym lub solnym, wówczas aktywny osad przechodzi do roztworu.

Składniki *A*, *B*, *C* każdego osadu aktywnego posiadają określone własności chemiczne. Ciała te mogą być strącone z roztworów za pomocą różnych reaktywów w obecności związków, które posiadają własność «porywania» osadów. Doświadczenia wykonane drogą strącania i cząstkowej krystalizacji pozwalają rozpoznać naturę chemiczną osadu (patrz § 118). W ten sposób udowodniono, że trzy ciała *B* są to izotopy ołowiu, trzy zaś ciała *C* — izotopy bizmutu. Rad *A* jest to izotop polonu; zakładamy również, że to samo stosuje się do toru *A* i aktynu *A*. Spośród pierwiastków długotrwałego osadu radonu rad *D* jest to izotop ołowiu, rad *E* — bizmutu; natomiast polon reprezentuje własny typ chemiczny (liczba atomowa 84).

Substancje, z których składają się osady aktywne, mogą być wydzielane z roztworów za pomocą elektrolizy lub elektrochemicznego strącania na odpowiednio dobranym metalu, zanurzonego w roztworze (*Lerch*). Otrzymane wyniki są zgodne z wynikami przewidywanymi na podstawie własności chemicznych.

Aktywny osad, zebrany na drucie metalowym lub na płytce, ulatnia się w dostatecznie wysokiej temperaturze; można go przedestylować na ochłodzoną powierzchnię umieszczoną w bezpośrednim sąsiedztwie źródła.

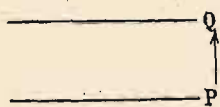
Jeżeli wykonywamy jakiejkolwiek czynności chemiczne lub elektrochemiczne z osadem aktywnym lub jeżeli poddajemy go destylacji, otrzymujemy na ogół częściowe oddzielenie składników. Tak np. zanurzając płytkę niklową w roztworze osadu aktywnego w kwasie solnym, otrzymujemy na płytce tylko ciało *C* bez śladu obecności ciała *B*, co można stwierdzić na podstawie prawa zaniku aktywności; podobnie w roztworze długotrwałego osadu rad *F* (polon) osiada na srebrze, gdy tymczasem rad *D* i rad *E* pozostają w roztworze.

§ 56. Pochodzenie osadu aktywnego. Zjawisko odskoku.

Zgodnie z teorią przemian promieniotwórczych rad *A*, pierwszy składnik aktywnego osadu, jest to pozostałość atomu radonu po wyrzuceniu jądra helu w postaci cząstki α . Jak wynika z prawa zachowania pędu, ta pozostała część atomu musi być odrzucona w przeciwną stronę, stosunek uzyskanej przez nią początkowej prędkości do prędkości cząstki α jest równy odwrotności stosunku mas, wynosi zatem około 0,02. W ten sposób powstaje pocisk «odskoku», który w rozrzedzonym powietrzu przebiega dosyć znaczną odległość, posiada jednak bardzo krótki zasięg rzędu 0,1 mm w powietrzu pod ciśnieniem atmosferycznym. Po utracie prędkości atomy radu *A* pozostają w powietrzu w stanie zawie-

siny naładowanej dodatnio i posiadającej własności jonów dodatnich; atomy te mogą ulegać rekombinacji z jonami ujemnymi, znajdującymi się w gazie lub też wędrować ku katodzie w polu elektrycznym.

W podobny sposób powstawaniu atomu radu B z atomu radu A towarzyszy emisja cząstki α oraz promieniotwórczy odskok pozostałości atomowej. Płytkę metalową P , świeżo aktywowaną radonem, stanowi źródło odskoku atomów radu B dopóty, dopóki na niej znajduje się jeszcze rad A . Jeżeli doświadczenie jest wykonane w próżni, to wyrzucone atomy radu B mogą być zebrane na płytce Q umieszczonej na wprost P , natomiast pod ciśnieniem atmosferycznym wyrzucone atomy



Rys. 81.

zatrzymują się jako dodatnie jony tuż przy płytce P i mogą być również przeniesione na płytkę Q przy pomocy pola elektrycznego, skierowanego od P do Q (rys. 81). Opisane tu sposoby pozwalają zatem otrzymywać na płytce Q czysty rad B , który następnie zamienia się stopniowo na rad C . Ruchli-

wość K jonów radu B , oznaczona metodą zmiennego pola (§ 7), wynosi $K = 1,3 \text{ cm/sek}$ w powietrzu oraz $5,6 \text{ cm/sek}$ w wodorze (pole w woltach na centymetr), jest zatem bardzo zbliżona do ruchliwości jonów dodatnich w gazach.

Teoria odskoku promieniotwórczego pozwoliła odkryć kilka bardzo krótkotrwałych radiopierwiałków, które udało się oddzielić dzięki zjawisku odskoku towarzyszącego emisji cząstek α z ciała C (Hahn i Meitner): są to rad C'' , tor C'' i aktyn C'' , pierwiastki towarzyszące ciałom C ; przypisujemy im promieniowanie β oraz γ .

Istnieje również zjawisko odskoku towarzyszące emisji promieni β , wszelako pęd i energia wyrzucanego atomu są znacznie słabsze w tym przypadku niż w poprzednim, co czyni obserwację zjawiska znacznie trudniejszą.

Na podstawie analizy krzywych dezaktywacji można obrachować względne liczby atomów ciał A , B i C , osadzonych na powierzchni ciała stałego (§ 63). Jeżeli aktywacja odbywa się w radonie między dwiema zbliżonymi do siebie płytkami, między którymi istnieje pole elektryczne, to rad A jest usuwany z gazu w miarę jak powstaje i na katodzie osiada tylko rad A , ponieważ w tych warunkach ani rad B , ani rad C nie mogą nagromadzać się w gazie. Rad B i rad C , wykrywane na katodzie aktywowanej w ten sposób, pochodzą zatem z przemian osadzonego radu A . Jeżeli natomiast odległość między płytkami jest znaczna, pole zaś nie istnieje lub jest bardzo słabe, wówczas dodatnie jony radu A ulegają rekombinacji przed osiągnięciem katody i ich przemiany promieniotwórcze odbywają się w gazie; stąd wynika, że w gazie znajduje się rad B i C w stanie jonów, których część osiada bezpośrednio na katodzie. Krzywe otrzymane doświadczalnie najczęściej odpowiadają ilościom osadzania nieomal czystego radu A ; zdołano jednak zreali-

zować również przypadek, w którym ciało aktywowane pobiera z gazu nie tylko rad *A*, lecz również rad *B* i rad *C*. Anoda otrzymuje na ogół niewielką ilość osadu aktywnego, co dowodzi, że gaz zawiera ujemne jony radu *A*; dodatni jon tego pierwiastka może zatem ulec rekombinacji z jonem ujemnym, a następnie schwytąć jon ujemny lub elektron. Te zjawiska wymiany jonowej są tym żywsze, im jonizacja jest silniejsza.

Jeżeli koncentracja jonów jest wielka, to siły elektryczne wywierane na jony przekazują się masie gazu i powodują zjawisko «wiatru elektrycznego», modyfikujące rozkład osadu aktywnego w przestrzeni.

W gazach rozrzedzonych aktywacja odbywa się głównie drogą odskoku; na powierzchni wystawionej na działanie radonu osiada tylko rad *A*, jeżeli atomy odskoku, pochodzące z wszystkich części gazu, mogą dobiec do tej powierzchni.

Analogiczne rozważania stosują się również do aktywnych osadów toronu i aktynonu. Zagadnieniem odskoku zajmiemy się bardziej szczegółowo w ustępach 76 i 87.
