

ROZDZIAŁ IV

SZTUCZNA PROMIENIOTWÓRCZOŚĆ

A. Uwagi ogólne.

Jak to zaznaczaliśmy kilkakrotnie, reakcje jądrowe prowadzące do powstawania nietrwałych jąder mogą być badane w szczególnie dogodny sposób za pomocą promieniotwórczości utworzonych pierwiastków. Tej cennej metodzie zawdzięczamy odkrycie licznych faktów wielkiej doniosłości, np. pochłaniania selektywnego powolnych neutronów oraz niesprężystego rozpraszania prędkich neutronów, poznanie własności gazu neutronowego itp. Metoda polega na mierzeniu ilości radiopierwiastka utworzonego w określonych warunkach doświadczalnych, ilości, która jest *ceteris paribus* proporcjonalna do natężenia czynnika wywołującego reakcję. W ten sposób możemy badać zmiany natężenia, tj. liczby cząstek w zależności od zmiennych warunków doświadczalnych.

W innych bardzo licznych przypadkach chemiczne rozpoznanie radiopierwiastka pozwala ustalić rodzaj reakcji jądrowej, w której ten pierwiastek został utworzony.

W tym rozdziale będziemy rozpatrywali sztuczną promieniotwórczość z innego punktu widzenia, mianowicie zwrócimy uwagę na związki pomiędzy podstawowymi faktami nowej i dawnej promieniotwórczości.

Liczba znanych sztucznych radiopierwiastków jest bardzo wielka. Dziełko *Bethego* i *Livingstona* «Nuclear Physics, Experimental Part», ogłoszone w roku 1937, podaje 218 tych radiopierwiastków; w chwili obecnej znamy ich znacznie więcej¹⁾. Z wyjątkiem wodoru oraz pierwiastków o liczbie atomowej zawartej między 84 (*Po*) i 88 (*Ra*), których silna promieniotwórczość naturalna uniemożliwia badania tego rodzaju, zdołano otrzymać radioizotopy wszystkich innych pierwiastków, a nawet znamy radiopierwiastki o liczbach atomowych 43 i 61, nie reprezentowanych, jak wiadomo, przez trwałe pierwiastki. We wszystkich przypadkach, w których zdołano wyznaczyć liczbę masy radioizotopu w spo-

¹⁾ Spis znanych obecnie sztucznych radiopierwiastków jest podany w tablicy II Uzupełnień.

sób zupełnie pewny, liczba ta jest różna od wszystkich liczb masy przysługujących trwałym izotopom tego samego pierwiastka¹⁾). Natomiast liczba radioizotopów o danej wartości Z bywa niekiedy tak znaczna, że nie ma możliwości przypisywania każdemu z nich różnej masy; ten fakt doprowadził do odkrycia tzw. izomerii jądrowej, tj. istnienia par pierwiastków posiadających jednakowe liczby masy i liczby atomowe i różniących się tylko cechami promieniotwórczości.

Radiopierwiastki sztuczne ulegają najczęściej przemianie, której towarzyszy emisja promieni β lub pozytonów. Na ogół jest rzeczą możliwą określić *a priori*, na podstawie wartości Z i A radiopierwiastka, który z tych rodzajów przemiany zachodzi. Jeżeli radiopierwiastek posiada tylko jeden izobar trwały, to mamy do czynienia z przemianą β w przypadku, kiedy liczba atomowa tego izobaru jest większa od liczby atomowej radiopierwiastka, z przemianą pozytonową zaś w przypadku przeciwnym. Jeżeli istnieją dwa izobary trwałe — których liczby atomowe, jak to najczęściej się zdarza, różnią się o 2 — to najczęściej zachodzi przemiana β , z wyjątkiem przypadku, gdy izobar z większym Z jest najlżejszy spośród izotopów tej samej liczby Z ; wówczas mamy do czynienia z przemianą pozytonową lub z rozgałęzieniem, tj. z obiema przemianami równocześnie.

Przemiany sztucznych radiopierwiastków są prawie zawsze pojedyncze, tj. prowadzą bezpośrednio do utworzenia pierwiastka trwałego. Fakt ten tłumaczy się tym, że wszystkim liczbom całkowitym od 1 do 200 odpowiadają trwałe izotopy, a ponadto istnieje znaczna liczba par izobarów. Jedyny może wyjątek od tej zasady stanowią podwójne przemiany $^{88}\text{Se} \rightarrow ^{88}\text{Br} \rightarrow ^{88}\text{Kr}$ oraz $^{120}\text{Te} \rightarrow ^{120}\text{I} \rightarrow ^{120}\text{X}$ składające się z dwóch kolejnych przemian β . Natomiast z pierwiastków najcięższych, a zatem naturalnie promieniotwórczych, można otrzymać drogą doświadczalną radiopierwiastki stanowiące pierwsze wyrazy rodzin promieniotwórczych.

Sposób powstawania tych radiopierwiastków, biorących początek w *podziale* jądra uranu lub toru, będzie opisany w ustępie D.

B. Promieniowanie.

Promienie β lub pozytony wysyłane przez radiopierwiastki tworzą widma ciągłe, posiadające dobrze określoną górną granicę energii Q . Zgodnie z teorią promieniowania β wielkość Q jest równa energii wydzielonej w przemianie *jądra*.

Z punktu widzenia doświadczalnego interesujemy się nie tyle tą ostatnią wartością, ile energią W wydzieloną w przemianie *pierwiastka*, gdyż tylko znajomość tej energii W pozwala wyliczyć różnicę mas atomowych pierwiastka macierzystego i pochodnego. W przypadku prze-

¹⁾ W ostatnich czasach znaleziono niektóre wyjątki od tej zasady.

miany β , $W = Q$, natomiast w przemianie pozytonowej $W = Q + 2mc^2$. W istocie po przemianie jądra atom zawiera liczbę elektronów o 1 większą lub o 1 mniejszą od liczby odpowiadającej zmienionej wartości Z , musi przeto utracić lub przyłączyć jeden elektron; z drugiej strony w przemianie powstaje zawsze cząstka o masie elektronu m (pozyton lub elektron). Z tego wynika, że w przypadku przemiany β mamy:

$$W = Q + mc^2 - mc^2 = Q,$$

w przypadku emisji pozytonu:

$$W = Q + mc^2 + mc^2 = Q + 2mc^2.$$

Widzimy zatem, że przemiana pozytonowa wymaga większej ilości energii rozporządzalnej niż przemiana β , oczywiście w założeniu, że górna granica Q widma jest w obu przypadkach jednakowa. Tej okoliczności należy zapewne przypisać znacznie większą obfitość przemian β .

W poniższej tablicy podajemy górne granice niektórych widm radiopierwiastków.

Jak widzimy, Q zmienia się w szerokich granicach, największe wartości Q znajdujemy w przemianach ${}^8\text{Li}$ i ${}^{12}\text{B}$.

TABLICA IV

Pierwiastek	Q	τ (sek)
${}^{13}\text{N}$	1,28 <i>Mew</i>	660
${}^{17}\text{F}$	2,5	70
${}^{27}\text{Mg}$	1,89	620
${}^8\text{Li}$	11,1	0,5
${}^{12}\text{B}$	13,2	0,02
${}^{24}\text{Na}$	2,1	54000
${}^{28}\text{Al}$	4,0	180

Zgodnie z teorią opisaną w streszczeniu w książce p. Curie, istnieje zależność pomiędzy stałą przemiany radiopierwiastka a górną granicą jego widma β lub pozytonowego.

Przemiana, której towarzyszy emisja promieni β (lub pozytonów), polega na tym, że neutron (proton) zamienia się w proton (neutron), jednocześnie zaś tworzy się i wybiega elektron (lub pozyton) i neutrino. Suma energii obu lekkich cząstek, tj. elektronu (pozytonu) i neutrino, równa się górnej granicy widma Q . Prawdopodobieństwo tego potrójnego procesu — czyli stała przemiany promieniotwórczej — daje się przedstawić jako iloczyn trzech wielkości. Pierwszą z nich piszemy jako g^2 , gdzie g jest to tzw. stała *Fermiego*. Druga wielkość P jest to prawdopodobieństwo przemiany neutron-proton (lub odwrotnej). Wreszcie

trzecia wielkość jest to prawdopodobieństwo W utworzenia i emisji elektronu (pozytonu) oraz neutrino. Mamy przy tym $W = \int w dE$, gdzie w jest to prawdopodobieństwo emisji elektronu (pozytonu) o energii E i neutrino o energii $Q - E$. Częstkowe prawdopodobieństwo w wyliczamy za pomocą następujących rozważań. Zgodnie ze statystyką kwantową istnieje pewna maksymalna gęstość gazu osiągnięta wówczas, gdy gaz jest w danej temperaturze zupełnie zwyrodniały, tj. gdy wszystkie stany kwantowe są obsadzone. Wyobraźmy sobie, że jądro jest otoczone zwyrodniałym gazem elektronów (pozytonów) oraz takim samym gazem neutrino w temperaturze dosyć wysokiej, aby niektóre elektrony (pozytony) posiadały energię równą granicy widma promieni β danego radioelementu. Gęstość i rozkład energetyczny obu gazów byłyby dokładnie określone; w szczególności można by obrachować liczby $\rho_e dE$ i $\rho_n dE$ cząstek obu rodzajów o energii zawartej w przedziale $E, E + dE$. Otóż prawdopodobieństwo w jest to szybko rosnąca funkcja fikcyjnych gęstości ρ_e i ρ_n ; dokładna postać tej funkcji jest różna w różnych odmianach teorii przemian β . $W = \int w dE$ zależy tylko w nieznacznym stopniu od liczby atomowej, mianowicie tylko z tego powodu, że fikcyjne gęstości elektronów wzrastają wraz z ładunkiem jądra. Natomiast wielkość P jest w bardzo znacznym stopniu zależna od tego, czy przemiana neutron-proton (lub odwrotna) jest to proces dozwolony (w znaczeniu dobrze znanym w teorii widm optycznych) lub wzbroniony, tj. czy w tej przemianie zmienia się lub pozostaje niezmienna liczba kwantowa j momentu obrotowego jądra. Jeżeli $\Delta j = 0$, P jest zbliżone do 1, jeżeli $\Delta j = 1$ (większe zmiany zdarzają się rzadko), rząd wielkości P jest około 100 razy mniejszy¹⁾.

Możemy podzielić przemiany β (pozytonowe) na dwie grupy. W pierwszej grupie moment obrotowy jądra pozostaje bez zmiany, w drugiej zmienia się o 1. W każdej grupie iloczyn średniego czasu życia i wielkości W , stanowiącej określoną funkcję energii przemiany, posiada wartość, z gruba biorąc, stałą; w drugiej grupie ta wartość jest około 100 razy większa niż w pierwszej.

Podajemy tablicę (str. 548), z której widać, w jakim stopniu te wnioski zgadzają się z doświadczeniem.

W celu otrzymania krzywej, przedstawiającej liczbę elektronów (pozytonów) w zależności od ich energii kinetycznej, możemy posługiwać się metodą *Gurney'a* (Promieniotwórczość, str. 240). Krzywa na rys. 10 przedstawia rozkład pozytonów ^{206}Ag , krzywa rys. 11 — rozkład elektronów ^{32}P (15 dni), w zależności od iloczynu HR ; krzywa ta jest zupeł-

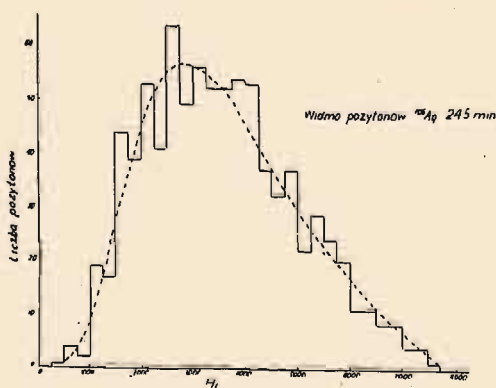
¹⁾ Odkrycie ciężkiego elektronu (mezonu), o którym wspominaliśmy w ustępie o siłach jądrowych, zmieniło pogląd na istotę przemian związanych z emisją cząstek β i pozytonów. Zakładamy obecnie, że pierwotne zjawisko w tej przemianie polega na emisji ujemnego (dodatniego) mezonu przez neutron (proton); mezon jest to cząstka nietrwała i natychmiast po utworzeniu rozpada się na elektron i neutrino. Ogniwu pośrednie nie może być obserwowane i zgodnie z postulatami mechaniki kwantowej nie musi spełniać zasady zachowania energii. Natomiast ta zasada stosuje się do całkowitej przemiany, z czego wynika, że wnioski, do których prowadzi nowa teoria są w zasadzie identyczne z wnioskami teorii *Fermiego*.

nie podobna do znanych nam krzywych naturalnego promieniowania β . Jej maximum przypada w punkcie, którego odcięta E wynosi w przybliżeniu $Q/3$, gdzie Q jest to granica widma. Należy zaznaczyć, że zgodnie z teorią *Fermiego*, krzywa powinna posiadać postać bardziej symetryczną, mianowicie maximum w okolicy $E=Q/2$. Natomiast teoria zmody-

TABLICA V

$\Delta j = 0$		$\Delta j = 1$	
Pierwiastek	τW	Pierwiastek	τW
^{13}N	$4 \cdot 10^4$	^8Li	$15 \cdot 10^6$
^{17}F	$13 \cdot 10^4$	^{12}B	$26 \cdot 10^6$
^{27}Mg	$28 \cdot 10^4$	^{24}Na	$34 \cdot 10^6$
		^{28}Al	$7 \cdot 10^6$
		^{31}S	$6 \cdot 10^6$

fikowana przez *Konopinskiego* i *Uhlenbecka* tłumaczy w sposób zadowalający wspomnianą dysymetrię. Niemniej interesująca jest część krzywej w okolicy górnej granicy widma. Jak widzimy, krzywa zbliża się ku osi x -ów w ten sposób, że jest w granicy do niej styczna. Ta sprawa posiada wielkie znaczenie dla zagadnienia masy neutrino. Udowodniono,



Rys. 10.

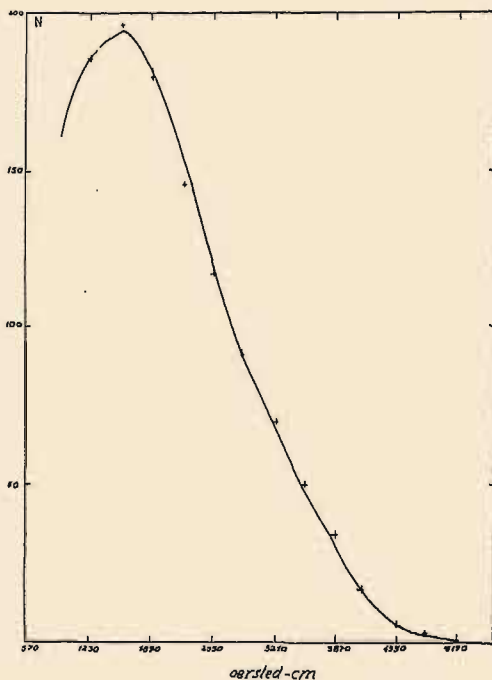
że gdyby masa neutrino była różna od zera, styczna do krzywej powinna w granicy tworzyć z osią x -ów kąt różny od zera, tym większy, im domniemana masa neutrino jest większa. Wnosimy zatem, że masa spoczynkowa neutrino jest równa zeru. Dodajmy, że jest to jedyna mniej więcej pewna wiadomość, jaką posiadamy o właściwościach neutrino.

Promieniowaniu β lub pozytonowemu sztucznych radio-

pierwiastków towarzyszy niekiedy promieniowanie γ , którego energia kwantowa jest tego samego rzędu wielkości, co w przypadku radiopierwiastków naturalnych. Jest rzeczą prawdopodobną, że w związku z tym promieniowaniem γ zachodzą zjawiska konwersji wewnętrznej, a zatem występuje widmo prążkowe promieni β ; dotąd nie zdołano jednak ujawnić tego widma, zapewne dlatego, że całkowite natężenie promieniowania jest zbyt słabe.

Od jądrowych promieni γ należy odróżnić promieniowanie γ , wynikające z dematerializacji pozytonów, które dostrzegamy w przypadku pierwiastków ulegających przemianie pozytonowej, np. ^{30}P .

Z teorii *Fermiego* wynika bardzo interesujący wniosek. Przemiana $Z + 1 \rightarrow Z$, której zazwyczaj towarzyszy emisja pozytonu, może również zachodzić drogą schwywania elektronu położonego w pobliżu jądra, np. na poziomie K , oraz jednoczesnej emisji neutrino. Jeżeli energia wydzielona w przemianie zostaje przekazana neutrino, to przemiana przebiega bez żadnego dostrzegalnego działania, z wyjątkiem promieniowania X , należącego do serii K przeobrażonego atomu i powstającego wskutek przejścia jednego z zewnętrznych elektronów na opróżnione miejsce poziomu K . Może również zdarzyć się, że jądro po schwyтaniu elektronu K zachowa część energii w postaci wzbudzenia; w tym przypadku będziemy mieli do czynienia z emisją promieniowania γ . Zgodnie z teorią, stosunek prawdopodobieństwa tego nowego typu przemiany jądrowej do prawdopodobieństwa emisji pozytonu wzrasta szybko wraz z liczbą atomową i jest tym większy, im całkowita energia przemiany jest mniejsza. Jak dotąd stwierdzono, w niektórych przypadkach przemiana drogą schwywania elektronu zachodzi w ilości porównywalnej z przemianą pozytonową. Tak np. radioizotopy ^{48}V (okres 16 dni), ^{67}Ga (82. godz) i ^{180}T (8,2 godz), przechodzące w pierwiastki trwałe ^{48}Ti , ^{67}Zn i ^{180}Hf , wysyłają oprócz pozytonów promieniowanie X , należące do serii K tytanu, cynku i hafnu. Promieniowanie to można wykryć drogą obserwacji elektronów *Comptona*, wytworzonych przez fotony K w komorze *Wilsona*; można również posługiwać się licznikiem *Geigera-Müllera*, którego ścianki dostarczają elektronów *Comptona*. Względna liczba przemian związanych ze schwyтaniem elektronu (tj. stosunek tej liczby do liczby przemian pozytonowych) jest większa w przypadku ^{180}T niż ^{48}V , co pozostaje w zgodności ze wspomnianymi rozważaniami teoretycznymi. Podobne fakty zachodzą również w przemianie ^{106}Ag ; zjawiska te są jednak skomplikowane i jeszcze niezupełnie wyjaśnione.



Rys. 11. Widmo promieni β ^{32}P .

C. Sztuczne radiopierwiastki. Izomeria jądrowa. Chemia sztucznych radiopierwiastków.

Dany radiopierwiastek można zazwyczaj otrzymać kilkoma różnymi sposobami. W niektórych przypadkach bezpośrednia analiza chemiczna wystarcza zarówno do dokładnej identyfikacji radiopierwiastka, jak i do wyjaśnienia typu reakcji, w której dany pierwiastek został utworzony. Dzieje się to wówczas, gdy naświetlamy pierwiastek, składający się z tylko jednego izotopu i ulegający przemianie na pierwiastek o innym typie chemicznym. Tak np. z ^{27}Al ($Z = 13$) bombardowanego szybkimi neutronami powstaje pierwiastek promieniotwórczy o okresie 10,2 *min*; analiza chemiczna wykazuje, że jest to izotop magnezu ($Z = 12$). Reakcja musi zatem należeć do rodzaju (n, p) ; możemy bowiem wykluczyć możliwość reakcji (n, d) , która nie została dotąd nigdy dostrzeżona. Utworzony radiomagnez, musi to być izobar glinu: $^{27}\text{Al} + {}^1_0\text{n} = {}^{27}\text{Mg} + {}^1_1\text{H}$.

Jeżeli naświetlany pierwiastek składa się z kilku izotopów, to dla zupełnej identyfikacji chemicznej konieczna jest znajomość kilku reakcyj dających ten sam radiopierwiastek. Tak np. w magnezie bombardowanym cząstkami α powstaje izotop glinu o okresie 2,38 *min*. Ponieważ magnez składa się z trzech izotopów o masie atomowej 24, 25, 26, przeto utworzony radioglin mógłby posiadać masę atomową 28 lub 29 zgodnie z reakcją $^{25,26}\text{Mg} + {}^4_2\text{He} = {}^{29,30}\text{Al} + {}^1_0\text{n}$ (masa 27 należy do izotopu trwałego). Z drugiej strony, ten sam radiopierwiastek powstaje drogą działania powolnych neutronów oraz deuteronów na glin. Jak wiadomo, powolne neutrony powodują reakcję (n, γ) , deuterony zaś mogą przeobrażać pierwiastek izotopowo tylko drogą reakcji (d, p) . Z tych rozważań wynika z zupełną pewnością, że radiopierwiastek o okresie 2,38 *min* jest to ^{28}Al .

Na szczególną uwagę zasługuje przypadek, gdy powstaje izotop naświetlanego pierwiastka. Jeżeli do wywołania transmutacji użyto deuteronów, to wiemy na pewno, że jest to reakcja (d, p) . Promienie γ dają tylko reakcję (γ, n) , neutrony powolne zaś reakcję (n, γ) ; w przypadku prędkich neutronów może zachodzić zarówno (n, γ) jak i $(n, 2n)$. Często zdarza się, że radiopierwiastek utworzony w reakcji izotopowej można również otrzymać z pierwiastków o większej lub mniejszej liczbie atomowej za pomocą jednej z następujących reakcyj: (α, n) , (α, p) , (d, n) , (d, α) , (p, n) , (n, p) i (n, α) .

W wielu przypadkach stwierdzamy istnienie kilku radioizotopów tego samego pierwiastka; identyfikacja każdego z nich wymaga wówczas wzięcia pod uwagę całego szeregu okoliczności. W rozważaniach tego rodzaju kierowano się najpierw zasadą, zgodnie z którą dwóm różnym pierwiastkom muszą odpowiadać różne *pary* liczb A i Z . Doświadczenie wykazało jednak, że ta zasada nie jest słuszna; w licznych przypadkach

musimy dwóm różnym izotopom przypisać jednakowe pary wartości A i Z . Pary radioizotopów tego rodzaju otrzymały nazwę *izomerów jądrowych*.

Dla wyjaśnienia tego zagadnienia rozpatrzmy grupę radioizotopów bromu, której badanie dostarczyło pierwszego dowodu istnienia izomerii jądrowej. Naświetlając brom neutronami otrzymujemy 4 różne izotopy, mianowicie o okresach: *a)* 6,3 min, *b)* 18 min, *c)* 4,5 godz, *d)* 36 godz. Neutrony powolne dają tylko okresy *b)*, *c)* i *d)*, natomiast za pomocą prędkich neutronów otrzymujemy *a)*, *b)* i *c)* z małą domieszką *d)*. Te same okresy *a)*, *b)* i *c)*, lecz bez *d)* powstają również w bromie naświetlanym promieniami γ o energii 17 Mev, pochodzącymi ze źródła ${}^7\text{Li} + {}^1\text{H}$. Trudność identyfikacji tych pierwiastków wynika z tego, że brom posiada tylko dwa trwałe izotopy: 79 i 81. Okresy *b)*, *c)* i *d)* otrzymywane za pomocą reakcji (n, γ) mogą zatem należeć tylko do ${}^{80}\text{Br}$ i ${}^{82}\text{Br}$, gdy tymczasem okresy *a)*, *b)* i *c)* wzbudzone działaniem promieni $\gamma(\gamma, n)$ należą oczywiście do ${}^{78}\text{Br}$ i ${}^{80}\text{Br}$. Wyniki otrzymane za pomocą prędkich neutronów prowadzą do wniosków zgodnych z poprzednimi, ponieważ prędkie neutrony dają reakcję $(n, 2n)$, której następstwa są dokładnie takie same, jak reakcji (γ, n) . Jest przeto rzeczą niewątpliwą, że pierwiastki o okresach *b)* i *c)*, tj. 18 min i 4,5 godz, posiadają jednakowy ciężar atomowy 80 i jednakową liczbę atomową 35 — są to izomery jądrowe. Wkrótce po odkryciu izomerii bromu znaleziono kilka analogicznych przykładów wśród innych pierwiastków. Obecnie znamy sporą liczbę par izomerycznych (${}^{106}\text{Ag}$, okresy 25 min i 8 dni, ${}^{104}\text{Rh}$, okresy 44 sek i 3,9 min, ${}^{116}\text{In}$, okresy 13 sek i 54 min).

Wyłomaczenie izomerii jądrowej nie nastęczałoby żadnej trudności, gdyby można było założyć, że liczby A i Z nie wystarczają do jednoznacznego określenia budowy jądra, np. gdyby oprócz neutronów i protonów istniały jeszcze inne cząstki elementarne. Gamow przypuszczał, że mogą to być ujemne protony, tj. cząstki o masie 1 i o ujemnym ładunku elementarnym. Na korzyść tej hipotezy nie można jednak przytoczyć żadnego faktu doświadczalnego; podejmowane wielokrotnie próby wykrycia ujemnego protonu nie dały żadnego wyniku. Obecnie zapatrujemy się inaczej na to zagadnienie. Sądzymy, że izomeryczne jądra posiadają ten sam skład, lecz różnią się stanami kwantowymi. W istocie jądro promieniotwórcze może powstać w stanie wzbudzonym. Na ogół taki stan zanika natychmiast, gdyż następuje przejście do stanu normalnego, związane z emisją promieni γ . Może jednak zdarzyć się, że początkowy stan wzbudzenia jest metatrwały, tj. że przejście z tego stanu do stanu normalnego jest wzbronione; emisja fotonu jest wówczas niemożliwa lub przynajmniej znacznie opóźniona; jądro może utracić nagromadzoną energię wzbudzenia tylko w zjawisku bardziej skomplikowanym, mianowicie w przemianie na jądro

trwałe¹⁾. Promieniowanie β towarzyszące tej przemianie wyzwała nie tylko energię wzbudzenia, lecz również energię «normalnej» przemiany promieniotwórczej. Innymi słowy, przemiana β (lub pozytonowa) może nastąpić zanim energia wzbudzenia ulegnie rozproszeniu w zwykły sposób. Ta przemiana przebiega inaczej niż przemiana biorąca początek w normalnym stanie jądra i dlatego granice widma promieniowania β , a zatem i okresy przemiany są w obu przypadkach różne.

Chemia sztucznych radiopierwiastków. Chemiczna analiza sztucznych radiopierwiastków stanowi uderzający przykład przydatności analizy promieniotwórczej, której początki znajdujemy w podstawowych pracach p. Curie i która w obecnej postaci opiera się głównie na zużytkowaniu zjawiska izotopii. Do pierwiastka naświetlanego dodajemy niewielką ilość domniemanego trwałego izotopu powstającego radiopierwiastka i strącamy go za pomocą zwykłych metod chemii analitycznej. Jeżeli radiopierwiastek ulega również strąceniu, wnosimy, że przypuszczenie było słuszne. Oprócz rozpoznania radiopierwiastka zyskujemy w ten sposób możliwość otrzymywania preparatów o znacznej promieniotwórczości specyficznej, tj. skoncentrowanej w bardzo małej ilości substancji. Jest to szczególnie użyteczne w przypadku, gdy transmutacja jest spowodowana przez neutrony lub promienie γ , gdyż przenikliwość tych obu rodzajów promieniowania pozwala działać na wielkie ilości materii, a zatem otrzymywać stosunkowo znaczne ilości radiopierwiastka. W celu należytego wykorzystania wytworzonej promieniotwórczości musimy ją jednak skoncentrować, ponieważ promienie β są na ogół mało przenikliwe, np. działanie grubej warstwy radiopierwiastka nie różni się zbytnio od działania cienkiej warstwy.

Jako przykład przytoczymy rozpoznanie magnezu ^{27}Mg (okres 10,2 min), utworzonego z ^{27}Al w reakcji (n, p). Naświetlamy blachę glinową, po czym rozpuszczamy ją w ługu sodowym; dodajemy nieco magnezu, który strącamy w postaci fosforomolibdenianu. Osad porywa znaczną część aktywności.

Jeżeli radiopierwiastek nie może być oddzielony drogą dodania żadnego pierwiastka umieszczonego w układzie periodycznym w okolicy pierwiastka naświetlanego, to wnioskujemy, że badana reakcja jądrowa

¹⁾ Możliwe jest jednak również przejście ze stanu metatrwałego do stanu normalnego; w tym przypadku izomer metatrwały wysyła tylko promienie γ , promienie β zaś należą do «normalnego» izomeru. Segré znalazł, że jeden z izomerów bromu, posiadający dłuższy okres (4,5 godz), zamienia się na drugi (18 min) drogą emisji promieniowania γ . Jest to możliwe w założeniu, że stan metatrwały odpowiada długiemu okresowi. Doświadczenie polegało na tym, że izomer krótkotrwały zdołano oddzielić od długotrwałego za pomocą metody Chalmersa i Szilarda (p. str. 553) w kilka godzin po ukończeniu naświetlania preparatu, tj. w chwili, kiedy preparat nie powinien był już zawierać dostrzegalnej ilości ciała o okresie 18 min; obecność tego ciała świadczyła zatem o tym, że jest ono wytwarzane przez ciało o okresie 4,5 godz.

należy do rodzaju reakcyj izotopowych, tj. że radiopierwiastek jest izotopem pierwiastka, z którego został otrzymany. Posługując się tą metodą *Fermi* zdołał udowodnić, że wiele transmutacyj spowodowanych przez powolne neutrony posiada charakter izotopowy.

Z początku sądzono, zgodnie z ogólnymi wiadomościami o izotopach, że w tym przypadku oddzielenie ciała promieniotwórczego jest niemożliwe. *Chalmers* i *Szilard* obmyślili niezmiernie użyteczną metodę pozwalającą oddzielić oba izotopy, trwałe i nietrwałe, w przypadku gdy naświetlany pierwiastek znajduje się w postaci związku organicznego. Nieco później *Fermi* wraz ze współpracownikami uogólnił tę metodę stosując ją do pierwiastków, które w roztworze wodnym mogą występować w dwóch trwałych i nie reagujących ze sobą odmianach, mianowicie jako jony proste oraz jako jony utlenione. Ta tzw. «reakcja *Chalmersa* i *Szilarda*» została zastosowana najpierw do izotopów chloru, bromu i jodu. *Chalmers* i *Szilard* naświetlali neutronami związek organiczny badanego chlorowca, np. BrC_2H_5 . Atom, w którym zachodzi transmutacja wskutek schwywania (n, γ) lub utraty ($n, 2n$) neutronu, uzyskuje na ogół energię kinetyczną, wystarczającą do rozluźnienia wiązania chemicznego i oddziela się od drobiny jako swobodny atom. W przypadku reakcji ($n, 2n$) źródłem tej energii jest pęd neutronu, w reakcji (n, γ) mamy zapewne do czynienia z odskokiem towarzyszącym emisji fotonu γ . Po naświetleniu bromek etylu zawiera nieco swobodnego aktywnego bromu; dodajemy kilka *mg* zwykłego bromu i oddzielamy go za pomocą dobrze znanych metod (np. drogą wytrząsania z roztworem $AgNO_3$). Podobnie postępujemy w przypadku, gdy dla otrzymania radiobromu posługujemy się promieniami $\gamma(\gamma, n)$ lub deutronami (d, p)¹⁾. *Fermi* i jego współpracownicy naświetlali bromiany, chlorany i jodany. Radioizotopy powstają wówczas w postaci jonów Cl' , Br' , J' i mogą być oddzielone jako takie. W podobny sposób można otrzymać radiomangan z naświetlonego nadmanganianu potasowego po dodaniu małej ilości MnO_2 lub kilku kropel alkoholu, redukującego $KMnO_4$ na MnO_2 . Radioarsen można strącić jako siarczek z kwasu kakodylowego.

Radioizotopy wymienionych pierwiastków mogą być również oddzielane za pomocą metod porywania i adsorpcji. Jako adsorbenty nadają się: aktywny węgiel, koloidalny wodzion żelazowy, siarczany baru itp.

D. Sztuczna promieniotwórczość uranu i toru.

W ust. A, str. 545 była mowa o tym, że uran i tor poddane działaniu neutronów uzyskują przemijającą promieniotwórczość, która oczywiście nie ma nic wspólnego z naturalną promieniotwórczością

¹⁾ Ta sama metoda może być zastosowana do oddzielania izomerów w przypadku, gdy jeden z nich powstaje z innego drogą emisji promieniowania γ ; odskok towarzyszący emisji fotonu może bowiem wystarczyć do dysocjacji drobiny chemicznej (por. str. 552).

tych pierwiastków. Zachodzą przy tym zjawiska bardzo zawiłe, które zdołano wyjaśnić dopiero w ostatnich czasach. Na podstawie dawniejszych prac sądzono, że w naświetlanym uranie powstają «sztuczne» rodziny promieniotwórcze, składające się z pierwiastków pozauranowych, tj. posiadających liczby atomowe większe niż 92, z toru zaś powstają rodziny złożone z izotopów toru, radu, aktynu i protaktynu. Nowsze prace doprowadziły do wniosku, że sposób powstawania nowych radiopierwiastków różni się zasadniczo od sposobów opisanych w poprzednich ustępach Uzupełnień. Jądro uranu lub toru po schwytaniu neutronu może ulec prawdziwej eksplozji, której następstwem jest podział na dwa lżejsze jądra, różniące się między sobą nieznacznie masą i liczbą atomową. Ta reakcja jądrowa nowego typu jest obecnie badana usilnie w wielu laboratoriach; w niniejszym ustępie ograniczymy się do historycznego zarysu wiadomości o tej dziedzinie i do podania niektórych nowych wyników.

Sztuczna promieniotwórczość uranu i toru została odkryta przez *Fermiego* i jego współpracowników. Ci uczeni stwierdzili, że wszystkie ciała powstające pod działaniem neutronów w uranie i torze wysyłają promienie β ; okresy są bardzo różne i wahają się od kilku sekund do kilkunastu godzin. Spośród radiopierwiastków wytworzonych z uranu zdołano wyróżnić z pewnością jeden izotop uranu; pozostałe pierwiastki wykazywały jednak własności nie spotykane wśród znanych pierwiastków zajmujących ostatnie miejsca w układzie pierwiastków, natomiast w pewnym stopniu analogiczne do własności renu i platynowców; *Fermi* założył, że są to wyższe homologe tych pierwiastków, między innymi zaś ekaren ($Z=93$), powstający z ^{239}U drogą przemiany β . W następstwie *O. Hahn*, *L. Meitner* i *F. Strassmann* otrzymali wyniki, które doprowadziły ich do wniosku, że pierwiastki «pozauranowe» istotnie powstają, a nawet są liczniejsze niż to przypuszczał *Fermi*. Dzisiaj wiemy, że chociaż te doświadczenia były wykonane bardzo starannie, interpretacja była zupełnie błędna; możemy stąd wyprowadzić wniosek, że metody czysto radiochemiczne mogą okazać się nie wystarczające wówczas, gdy chodzi o wykrywanie nowych pierwiastków i powinny być uzupełniane doświadczeniami innego rodzaju. Argumentacja *Hahna*, p. *Meitnerówny* i *Strassmanna* opierała się głównie na tym, że pierwiastki «pozauranowe» zachowywały się w reakcjach elektrochemicznych i w reakcji strącania siarkowodorem w sposób zupełnie podobny do renu oraz do grupy *Os, Ir, Pt*. Wspomniani autorzy opracowali zupełny schemat przemian, obejmujący trzy rodziny promieniotwórcze wywodzące się od uranu; schemat ten zawierał okresy, liczby atomowe i związki genetyczne wszystkich «transuranów». Ponieważ dane te mają obecnie znaczenie tylko historyczne, ograniczymy się do stwierdzenia, że pierwszymi wyrazami rodzin są niewątpliwie izotopy uranu o okresach 10 sek, 40 sek i 23 min oraz że istnieją między innymi radiopierwiastki o okresach 16 min, 59 min, 2,5 godz, 5,7 godz i 66 godz.

Najbardziej uderzającym rysem tego schematu było to, że składał się ze stosunkowo długich szeregów kolejnych przemian β . W rodzinach radiopierwiastków naturalnych nie znamy takich szeregów; na ogół spotykamy po dwie kolejne przemiany β (w wyjątkowych przypadkach trzy), po których następują przemiany α , wskutek czego stosunek liczby protonów do neutronów w jądrze przybiera wartość bardziej zbliżoną do wartości charakteryzującej układ trwały. Natomiast w szeregach «pozaauranowych» ładunki jądrowe kolejnych wyrazów, a zatem również stosunki liczb protonów do liczb neutronów, osiągają wartości nadmiernie wielkie.

Liczne radiopierwiastki powstają również z toru naświetlanego neutronami, nie tworzą jednak takich długich szeregów, jak w przypadku uranu. Sztuczna promieniotwórczość toru była badana bardzo starannie przez *I. Curie*, *Preiswerka* i *H. Halbana* oraz przez p. *Meitner*, *Hahna* i *Strassmanna*.

Schematy przemian opracowane na podstawie badania sztucznej promieniotwórczości uranu i toru nie były wolne od zastrzeżeń natury teoretycznej, ujmowały jednak w sposób zadowalający wszystkie znane fakty z tej dziedziny. Dopiero w r. 1938 *I. Curie* i *Savitch* dokonali odkrycia, które trudno było interpretować na gruncie tych schematów, mianowicie wydzielili z naświetlonego uranu nowe ciało o okresie 3,5 godz, które, jak się wydawało zrazu, posiadało własności zbliżone do aktynu. Próby frakcjonowania lantanu, użytego do porywania tego ciała, wykazały jednak, że nowe ciało oddziela się wyraźnie od aktynu i towarzyszy niezmiennie lantanowi w jego reakcjach. W następstwie tego odkrycia *Hahn* i p. *Meitner*, później zaś *Hahn* i *Strassmann* wykonali szereg nowych doświadczeń, które doprowadziły do zupełnej zmiany poglądów na sztuczną promieniotwórczość uranu i toru. Najpierw okazało się, że ciało odkryte przez *I. Curie* i *Savitcha* składa się z kilku pierwiastków, niewątpliwie izotopów lantanu, jak to już wydawało się prawdopodobne na podstawie wspomnianych prób frakcjonowania. Ponadto stwierdzono, że w uranie naświetlanym neutronami powstaje również kilka izotopów baru. Te fakty były zadziwiające, ponieważ lantan i bar są to pierwiastki położone w układzie periodycznym daleko od uranu i należałoby raczej spodziewać się powstawania ich wyższych homologów: radu i aktynu. Wobec tej trudności *Hahn* i *Strassmann* podjęli próby frakcjonowania baru zawierającego domniemane izotopy, do którego dodawali niewielkie ilości znanych izotopów radu: toru *X* i mezotoru 1. Okazało się, że mezotor i tor *X* można było oddzielić zwykłymi sposobami, natomiast nowe ciała towarzyszyły barowi w stałym stosunku. Według *Hahna* i *Strassmanna* izotopy lantanu powstają z izotopów baru drogą przemiany β i tworzą następujące 4 szeregi:

1. $Ba \quad (1 \text{ min}) \xrightarrow{\beta} La \quad (30 \text{ min}) \xrightarrow{\beta}$
2. $Ba \quad (14 \text{ min}) \xrightarrow{\beta} La \quad (2,5 \text{ godz}) \xrightarrow{\beta}$
3. $Ba \quad (300 \text{ godz}) \xrightarrow{\beta} La \quad (40 \text{ godz}) \xrightarrow{\beta}$
4. $Ba \quad (86 \text{ min}) \xrightarrow{\beta} \dots$

W przypadku toru stwierdzono, że pierwiastki rozpatrywane dawniej jako izotopy radu i aktynu są w rzeczywistości izotopami baru i lantanu.

Jest rzeczą oczywistą, że żadna z reakcyj jądrowych, o których była mowa w poprzednich ustępach, nie może prowadzić do powstawania *Ba* lub *La* z uranu lub toru. Dla wytłumaczenia tego faktu musimy założyć, że jądra *U* oraz *Th*, silnie wzbudzone wskutek przyłączenia do nich neutronu, stają się siedliskiem reakcji wybuchowej i dzielą się na dwa lżejsze jądra. Wkrótce po ogłoszeniu pracy *Hahna* i *Strassmanna*, *L. Meitner*, *F. Joliot* i *N. Bohr* wyrazili niezależnie od siebie myśl, że rozszczepienie jądra uranu jest nie tylko możliwe ze względu na stosunki energetyczne, ale nawet może być wytłumaczone teoretycznie w stosunkowo prosty sposób. Jeżeli bar ($Z = 56$) stanowi jeden z produktów eksplozji jądrowej, to jest rzeczą prawdopodobną, że jednocześnie powstaje krypton ($Z = 36$). (Można również założyć, że eksplozja przebiega w inny sposób). Zarówno bar jak i krypton zajmują w układzie periodycznym miejsca w okolicy, w której masy atomowe czystych izotopów są bardzo zbliżone (nieznacznie mniejsze) do liczb całkowitych, gdy tymczasem ciężar atomowy uranu (składającego się prawie wyłącznie z jednego izotopu) wynosi 238,14. Rachunek wykazuje, że podziałowi jądra uranu na jądra kryptonu i baru powinno towarzyszyć wydzielenie się energii w ilości przekraczającej 200 *Mew*, a zatem energii tego samego rzędu wielkości, co energia cząstek promieniowania kosmicznego. Jądra unoszące tę energię w postaci energii kinetycznej, powinny posiadać zasięg zbliżony do zasięgu cząstek α . Na tej podstawie można otrzymywać w czystej postaci (tj. bez substancji podłoża) radio-pierwiastki powstające wskutek eksplozji. W istocie *F. Joliot* wykazał, że na powierzchni ciała nie aktywującego się pod działaniem neutronów (np. bakielitu lub innej substancji organicznej), umieszczonego w odległości kilku *mm* od warstwy uranu naświetlanej neutronami, powstaje promieniotwórczość zanikająca z czasem. Ustawiając ekrany absorpcyjne między takim receptorem i warstwą uranu, *Joliot* stwierdził, że zasięg wyrzucanych jąder jest zbliżony do 3 *cm* w powietrzu. Podobne doświadczenia zostały wykonane również w innych laboratoriach. Ponadto znaleziono, że bardzo cienka warstwa uranu, umieszczona w komorze jonizacyjnej, wysyła podczas naświetlania neutronami cząstki bardzo silnie jonizujące, których całkowita energia kinetyczna, zmierzona za pomocą wzmacniacza proporcjonalnego, jest rzędu wielkości 100 *Mew*.

Wreszcie zaznaczymy, że zdołano sfotografować w komorze *Wilsona* tory tych cząstek (*F. Joliot*).

Zupełnie podobne zjawiska zaobserwowano w przypadku toru. Rozbić jądra toru zachodzi jednak tylko wówczas, gdy tor poddajemy działaniu prędkich neutronów, gdy tymczasem w przypadku uranu czynne są zarówno prędkie, jak i powolne, a nawet «cieplne» neutrony. Te ostatnie są znacznie skuteczniejsze. Przekrój czynny jądra uranu w zja-

wisku rozbicia ciepłymi neutronami jest rzędu wielkości 10^{-24} cm^2 , gdy tymczasem prędkim neutronom odpowiada przekrój czynny rzędu wielkości 10^{-26} cm^2 (zarówno w przypadku uranu, jak i toru).

Bardzo ważna jest sprawa związku między promieniotwórczymi produktami rozpadu i rzekomymi pierwiastkami «pozaauranowymi». Jest rzeczą jasną, że jadra wynikające z rozpadu ^{235}U muszą zawierać znacznie więcej neutronów, niż to spotykamy wśród trwałych pierwiastków o tej samej liczbie atomowej. Stan trwały może być osiągnięty tylko drogą kolejnych przemian β , z których każda powiększa liczbę atomową, a zatem zmniejsza stosunek liczby neutronów do liczby protonów. Gdyby pierwiastki rozpatrywane dawniej jako pozaauranowe pochodziły w rzeczywistości od produktów rozpadu, istnienie długich łańcuchów przemian β , stanowiące trudność dawniejszej koncepcji, byłoby zupełnie zrozumiałe. Niewątpliwie pierwiastki opisane przez *Hahna* i innych jako pozaauranowe, są różne od izotopów baru i lantanu, jest jednak rzeczą możliwą, że istnieją różne sposoby rozpadu jądra uranu. Sprawa nie jest jeszcze w zupełności wyjaśniona, większość jednak badaczy skłania się do wniosku, że pierwiastki «pozaauranowe» są to w rzeczywistości izotopy pierwiastków zwykłych, np. — oprócz wymienionych już baru i lantanu — kryptonu, rubidu, strontu, ksenonu, cezu, antymonu, teluru, bromu i jodu. Ta obfitość tłumaczy się zapewne z jednej strony istnieniem licznych przemian β , z drugiej zaś strony tym, że rozpad może przebiegać w różny sposób. Badania radiochemiczne i analiza krzywych rozpadu są obecnie ułatwione dzięki stosowaniu cyklotronu i generatorów wysokich napięć do wytwarzania neutronów. Całkowite rozwiązanie tego zagadnienia będzie wymagało wielu wysiłków; spośród otrzymanych już wyników wspomnimy tylko o tym, że zdołano już zidentyfikować niektóre «transurany» jako izotopy zwykłych pierwiastków, np. rzekomy «ekairyd» o okresie 66 *godz* jest to izotop teluru.

Inne interesujące pytanie dotyczy natury bezpośrednich produktów rozpadu. Spośród szeregu możliwych par takich produktów wymienimy: bar (56) i krypton (36), stront (38) i ksenon (54), brom (35) i lantan (57). Powstawanie gazu (zapewne mieszaniny ksenonu i kryptonu) w zjawisku rozpadu udowodniono w ten sposób, że przepuszczano prąd powietrza przez naświetlany roztwór uranu i stwierdzono, że prąd porywa ciała promieniotwórcze, które można zebrać w płuczce lub w stosownym absorbencie (węgiel).

Inna metoda polega na tym, że prąd gazu przechodzi najpierw przez uran, następnie zaś przez licznik *Geigera-Müllera* (*Wertenstein*).

Wspominaliśmy już, że jadra powstające w następstwie rozpadu posiadają znaczny nadmiar neutronów. Tak np. w przypadku podziału jądra uranu na jadra kryptonu i baru najprawdopodobniejsze liczby neutronów w tych jądrach wynosiłyby 55 i 92, gdy tymczasem najcięższe trwałe izotopy tych pierwiastków zawierają tylko 50 i 82 neutronów.

Z tej nadmiernej obfitości neutronów wynika, że jądro uranu w chwili wybuchu posiada skłonność do pozbywania się neutronów, co jest tym bardziej zrozumiałe, że to jądro znajduje się w stanie bardzo silnego wzbudzenia. W celu wykrycia tej wtórnej emisji neutronów *Halban*, *Joliot* i *Kowarski* naświetlali roztwór azotanu uranylu w wielkiej ilości wody neutronami małej energii ($< 0,5 \text{ Mew}$), otrzymywanymi działaniem promieni γ radu na beryl i badali rozmieszczanie neutronów w roztworze za pomocą detektora powolnych neutronów (dysprozu, aktywującego się bardzo wydawnie ciepłymi neutronami). Stwierdzono, że roztwór zawiera istotnie więcej neutronów, niż to zachodzi w nieobecności uranu. Ponadto stwierdzono, że neutrony wtórne są prędsze od pierwotnych, np. wytwarzają endoergiczną reakcję $Cl(n, p)S$, wymagającą energii neutronów ok. 2 Mew . Badając to samo zagadnienie *Rolblat* stwierdził, że działanie aktywujące prędkich neutronów jest zwiększone, jeżeli neutrony przechodzą przez warstwę uranu, co również świadczy o wtórnej emisji neutronów. Według *Halbana*, *Joliot* i *Kowarskiego* średnia liczba neutronów wysyłanych w chwili wybuchu jądra uranu wynosi ok. 4. Zjawisko to jest bardzo interesujące z tego powodu, że stwarza w zasadzie możliwość wybuchowej reakcji łańcuchowej, tj. takiej, w której neutrony wtórne, pochodzące z rozpadu jąder uranu, są chwytywane przez inne jądra, wywołują nowe rozpady itd. Obliczono (*F. Perrin*), że w odpowiednio dobranych warunkach wielka masa uranu, naświetlana dowolnym źródłem neutronów, powinna ulec całkowitemu rozpadowi, wydzielając przy tym olbrzymią ilość energii.

E. Chemiczne i biologiczne zastosowania sztucznych radiopierwiałków.

Jak wiadomo, radiopierwiałki naturalne, posiadające izotopy wśród pierwiałków trwałych, okazały się wielce użyteczne jako wskaźniki wielu reakcyj chemicznych i procesów fizyczno-chemicznych. W ten sposób zdołano zbadać zachowanie się tych pierwiałków w przypadkach, w których posługiwanie się zwykłymi metodami byłoby niedogodne lub zgoła niemożliwe. Przytoczymy jako przykłady dyfuzję w stanie stałym, adsorpcję, zjawiska wymiany itp.

Małżonkowie *Joliot-Curie* pierwsi zwrócili uwagę na to, że sztuczne radiopierwiałki są powołane do odegrania analogicznej roli w chemii pierwiałków zwykłych. Użyteczność tych radiopierwiałków może być bardzo wielka, gdy zważymy, że spotykamy je we wszystkich miejscach układu periodycznego.

Jak dotąd badania tego typu znajdują się w stadium początkowym. Radioizotopy *Br* i *I* znalazły zastosowanie w zjawiskach wymiany między jonową i drobinową postacią bromu i jodu w roztworach wodnych (*Lind* i *Shiflett*, *Herszfinkel* i *Grünstein* i inni). Należy zaznaczyć, że możliwość oddzielania radiopierwiałków metodą *Chalmersa* i *Szilarda*

wynika z tego, że radiopierwiastek powstaje w modyfikacji nie ulegającej wymianie z pierwiastkiem naświetlanym.

Zastosowania biologiczne. Małżonkowie *Joliot-Curie* wyrazili również pogląd, że nowe radiopierwiastki powinny znaleźć zastosowanie w biologii. Myśl ta została podjęta przez *Hevesy*'ego, który w szeregu interesujących prac posługiwał się radiopierwiastkami jako wskaźnikami procesów zachodzących w organizmie. Do tego celu nadaje się m. i. radiofosfor, otrzymywany dzisiaj w stosunkowo znacznej ilości za pomocą cyklotronu lub silnych preparatów berylowo-radowych (albo berylowo-radonowych). W istocie z jednej strony fosfor należy do pierwiastków o dużym znaczeniu biologicznym, z drugiej zaś strony długi okres (15 dni) radiofosforu ^{32}P umożliwia badanie przemian zwykłego fosforu w organizmach roślinnych i zwierzęcych. Przytoczmy następujący przykład ilustrujący charakter doświadczeń tego rodzaju. Słonecznik został umieszczony bezpośrednio po wykiełkowaniu w kulturze odżywczej, zawierającej zwykły fosfor. Po rozwinięciu się pewnej liczby liści roślinę przeniesiono do zupełnie podobnej kultury, do której dodano nieco radiofosforu. Roślina rozwijała się nadal; liście wyrastały w górnej części rośliny. Oznaczono osobno zawartość fosforu w górnych i dolnych liściach i zmierzono promieniotwórczość specyficzną, tj. względną zawartość radiofosforu w obu frakcjach. Okazało się, że promieniotwórczość jest w przybliżeniu jednakowa, co świadczy o tym, że odżywczy fosfor nie zostaje związany w sposób trwały, lecz że zachodzi nieustanne krążenie atomów fosforu w całym organizmie rośliny.
