

## ROZDZIAŁ XVI

### ZWIĄZKI ENERGETYCZNE POMIĘDZY JĄDROWYMI PROMIENIAMI $\gamma$ I PROMIENIAMI $\alpha$

#### § 98. Promienie $\gamma$ i poziomy jądrowe.

Niektóre spośród promieni  $\gamma$  ciał promieniotwórczych mogą być interpretowane jako promieniowanie charakterystyczne atomu, wzbudzone wskutek zaburzenia, którego doznaje atom w chwili, gdy zmienia się konfiguracja elektronów (§§ 75, 92). Najważniejsza jednak część promieniowania  $\gamma$  jest pochodzenia jądrowego i składa się również z grup monochromatycznych określonej długości fali i energii. Te grupy są wysyłane w następstwie zaburzenia, które powstaje w atomie po emisji cząstki  $\beta$  lub cząstki  $\alpha$ . Możemy założyć, że jądro posiada budowę charakteryzującą się istnieniem *jądrowych poziomów energii*, które w stanie normalnym są obsadzone przez cząstki należące do jądra. Jeżeli jedna lub kilka cząstek przechodzi na wyższy poziom, jądro jest w stanie *wzbudzonym* i może wrócić do stanu normalnego drogą emisji monochromatycznych promieni  $\gamma$ .

Nie należy jednak rozumieć tej analogii między budową jądra i atomu w ten sposób, że wzbudzenie jądra wynika ze zmiany poziomu jakiegoś elektronu jądrowego. Jak wiemy, elektrony wysyłane w przemianach promieniotwórczych nie posiadają określonej prędkości (§ 83), nie można przeto dopatrywać się jakiegokolwiek związku liczbowego między energią promieni  $\beta$  i energią jądrowych promieni  $\gamma$ . Natomiast promienie  $\alpha$  należące do danej grupy są monokinetyczne, możemy przeto przyjąć, że cząstka  $\alpha$  należąca do jądra znajduje się w określonym stanie kwantowym, któremu odpowiada określona energia kwantowa. *Gammow* założył, że przejście cząstki  $\alpha$  z normalnego poziomu w jądrze do poziomu wzbudzonego może być następstwem przemiany promieniotwórczej, której towarzyszy emisja cząstki  $\alpha$ . W tym przypadku energia promieniowania  $\gamma$  wysyłanego podczas powrotu do stanu normalnego jest zależna od energii cząstki  $\alpha$ .

Jądro może również ulec wzbudzeniu w następstwie emisji cząstki  $\beta$ ; mianowicie może nastąpić przejście cząstki  $\alpha$  lub protonu na wyższy

poziom. Wynikająca stąd emisja promieni  $\gamma$  pozostaje w związku z możliwą w tym przypadku emisją cząstek  $\alpha$  długiego zasięgu; nie rozumiemy jednak dotąd istoty związku między promieniowaniem  $\beta$  i wzbudzeniem jądrowym.

### § 99. Odpowiedniość między grupami cząstek $\alpha$ i promieni $\gamma$ .

Rozważymy kolejno przypadek głównych grup cząstek  $\alpha$  oraz przypadek grup długiego zasięgu.

a) Główne grupy. Widmo magnetyczne tzw. normalnych cząstek  $\alpha$  wysyłanych przez dany radiopierwiastek składa się z jednego prążka lub z kilku zbliżonych do siebie prążków, z których każdy charakteryzuje grupę o określonej prędkości i energii (§ 69). Tworzymy wszystkie możliwe różnice  $\Delta$  pomiędzy energiami tych grup i zestawiamy je z kwantowymi energiami  $U$  promieni  $\gamma$ , wysyłanych w tej samej przemianie promieniotwórczej. Zgodnie z *Gamowem* grupa promieni  $\alpha$  największej energii pochodzi z normalnego poziomu jądrowego. Niektóre jednak cząstki  $\alpha$  pozostawiają jądro  $A$  w stanie wzbudzonym, co wynika z tego, że przekazują część swej energii innej cząstce  $\alpha$ , powodując jej przejście z poziomu normalnego na wyższy poziom; energia wysyłanych cząstek  $\alpha$  jest zatem mniejsza od energii normalnej; są to cząstki jednej z grup całkowitego promieniowania. Natomiast jądrowa cząstka  $\alpha$ , która uzyskała nadmiar energii  $\Delta$ , traci go w chwili powrotu do stanu normalnego w postaci energii kwantowej  $U$  promieniowania  $\gamma$ , wysyłanego przez jądro  $B$  powstające w przemianie  $A \rightarrow B$ . Energia  $U$  jest równa  $\Delta$ . Energia ta może być wysłana bądź w postaci jednego fotonu, bądź szeregu kolejnych fotonów.

Doświadczenia wykonane z cząstkami  $\alpha$  *ThC* i promieniami  $\gamma$  *Th(C + C' + C'')* potwierdziły istnienie przewidywanych zgodności energetycznych (*Rosenblum* i *Valadarès*). Wyniki są podane na poniższej tablicy; energie są wyrażone w elektronokilowoltach<sup>1)</sup>. Spośród 15 możliwych różnic energetycznych pomiędzy 6 grupami cząstek  $\alpha$  prawie wszystkie odpowiadają grupom promieni  $\gamma$ , z których 8 podano na tablicy.

|                               |      |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>ThC</i> . . . . . $\Delta$ | 40,7 | 292 | 294 | 332 | 437 | 458 | 478 | 627 |
| <i>Th(C + C' + C'')</i> $U$   | 40,0 | 287 | 298 | 327 | 432 | 451 | 471 | 617 |

Analogiczne wyniki otrzymano w przypadku promieni  $\alpha$  i  $\gamma$  *RAc*.

|                               |      |      |      |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>RAc</i> . . . . . $\Delta$ | 33,6 | 41   | 60   | 100 | 191 | 275 | 295 | 309 |
| <i>RAc</i> . . . . . $U$      | 31,5 | 43,7 | 61,4 | 101 | 195 | 282 | 300 | 300 |

Podobna zgodność istnieje w przypadku *AcC* (grupa  $\gamma$  350 *ekw*) i w przypadku *Ra* (grupa  $\gamma$  189 *ekw*).

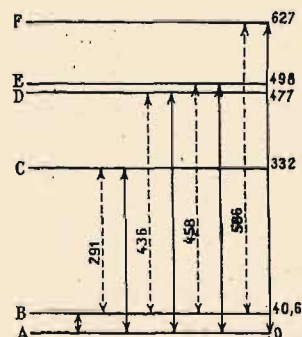
<sup>1)</sup> W celu obliczenia  $\Delta$  należy do energii cząstki  $\alpha$  dodać energię odskoku powstającego atomu.

Promienie  $\alpha$  oraz promienie  $\gamma$   $RaC$  są wysyłane w przemianie  $RaC \xrightarrow{\alpha} AcX$ . Promienie  $\alpha$   $ThC$  są wysyłane w przemianie  $ThC \xrightarrow{\alpha} ThC''$ ; promienie  $\gamma$   $Th(C + C' + C'')$  przypisywano dawniej przemianie  $ThC'' \xrightarrow{\gamma} ThD$ , zdołano jednak udowodnić, że grupy odgrywające rolę w subtelnej budowie są wysyłane w przemianie  $ThC \xrightarrow{\alpha} ThC''$  zgodnie z wymaganiami teorii.

Teoria *Gamowa* interpretuje te doświadczenia w ten sposób, że pierwiastek powstający w przemianie  $\alpha$  posiada co najmniej tyle jądrowych poziomów energii, ile istnieje różnych grup promieni  $\alpha$ . Energia  $E_n$  jednego z tych poziomów ma postać  $E_0 + \Delta_{0n}$ , gdzie  $E_0$  jest to energia poziomu normalnego (czyli podstawowego),  $\Delta_{0n}$  jest to różnica energii między normalną grupą promieni  $\alpha$  i grupą mniejszej energii rzędu  $n$ . Na rys. 138 przedstawiono schemat poziomów jądrowych  $ThC''$ , znaleziony na podstawie grup promieni  $\alpha$   $ThC$ . Jest rzeczą prawdopodobną, że istnieją reguły wyboru wzbraniające niektórych przejść między poziomami, podobnie jak to się dzieje w przypadku promieni  $X$ .

b) Grupy długiego zasięgu. Oprócz głównych grup niektóre radiopierwiastki wysyłają tzw. cząstki  $\alpha$  «długiego zasięgu», których liczba jest niezmiernie mała w porównaniu z liczbą cząstek zwykłego typu. Emisję tego rodzaju odkryto w przypadku  $Ra(C + C' + C'')$ ,  $Th(C + C' + C'')$ , w ostatnich zaś czasach w przypadku  $Ac(B + C + C' + C'')$ ; przypisujemy ją radiopierwiastkom  $RaC'$ ,  $ThC'$  i  $AcC'$ , które wysyłają cząstki  $\alpha$  i powstają w przemianie  $\beta$   $RaC$ ,  $ThC$  i  $AcC$ .

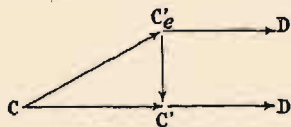
Według *Gamowa* w przemianie  $C \xrightarrow{\beta} C'$  po odejściu elektronu pozostaje jądro  $C'$  w stanie wzbudzonym, w którym jedna z cząstek zajmuje poziom  $E_n$ , wyższy od poziomu podstawowego  $E_0$ . Wzbudzone jądro  $C'$  może powrócić do stanu normalnego  $E_0$  wysyłając kwant promieniowania  $\gamma$  o częstości  $\nu$  i następnie ulec przemianie  $C' \rightarrow D$ , której towarzyszy emisja cząstki  $\alpha$  o energii  $E_0$ ; prawdopodobieństwo  $\theta$  tego przejścia jest bardzo wielkie. Istnieje jednak również małe prawdopodobieństwo  $\lambda$  procesu, w którym  $C'$  zamienia się bezpośrednio w  $D$  i wysyła cząstkę  $\alpha$  długiego zasięgu o energii  $E_0 + \Delta$ , gdzie  $\Delta = h\nu$ . Liczba  $n$  cząstek tego rodzaju może być obliczona na podstawie wzoru  $n/(p-n) = \lambda/\theta$ , gdzie  $p$  jest to względna liczba atomów  $C'$  powstających w stanie wzbudzonym,  $(p-n)$  — liczba fotonów odniesiona do przemiany jednego atomu. Rozważania te możemy uogólnić w przypadku, gdy zniknięciu stanu wzbudzenia towarzyszy emisja kilku fotonów. Najprostszy schemat jest przedstawiony na rys. 139.



Rys. 138. Układ poziomów jądra  $ThC'$ . Poziom podstawowy A. Poziomy wzbudzone B do F. Nadmiar energii każdego z nich ponad energią poziomów A lub B jest podany w *ekw.* Strzałki wskazują przejścia.



Znaleziono, że  $RaC'$  wysyła 12 grup długiego zasięgu (*Rutherford* i jego współpracownicy) i udowodniono, że te grupy pozostają w związku z głównymi grupami promieni  $\gamma$   $RaC$ . Tak np. grupa cząstek  $\alpha$ , których  $\Delta = 607 \text{ ekw}$ , odpowiada grupie promieni  $\gamma$  o energii  $\Delta$ . Grupie  $\Delta = 2880 \text{ ekw}$  odpowiada emisja dwóch następujących po sobie kwantów  $(1761 + 1120) \text{ ekw}$ , itd. Najsilniejsza grupa, o zasięgu  $9,13 \text{ cm}$



Rys. 139.

(w  $15^\circ$  pod ciśnieniem normalnym), odpowiada, jak się zdaje, grupie promieni  $\gamma$ ,  $h\nu = 1414 \text{ ekw}$ , która ujawnia się tylko w emisji fotoelektronów konwersji wewnętrznej. Jeżeli  $n$  i  $p - n$  są dane doświadczalnie, to powyższy wzór pozwala wyliczyć  $\theta$ , ponieważ wartość  $\lambda$  może być otrzymana na podstawie zasięgu (§ 70)

lub jeszcze lepiej na podstawie teorii mechaniki falowej § 114. Otrzymuje się wartości  $\theta$  zawarte między  $10^{14} \text{ sek}^{-1}$  i  $10^{16} \text{ sek}^{-1}$ , co daje się pogodzić z przewidywaniami teoretycznymi.

Na podstawie odpowiedniości między promieniami  $\alpha$  długiego zasięgu i promieniami  $\gamma$  można zbudować układ poziomów radiopierwiastka najlepiej zbadanego pod tym względem, mianowicie  $RaC'$ .

Jeżeli na podstawie widma cząstek  $\alpha$  nie możemy wysnuć żadnych wniosków dotyczących poziomów jądrowych, to znajomość tych poziomów opieramy wyłącznie na prawie kombinacji, zgodnie z którym energie niektórych grup promieni  $\gamma$  są równe różnicy energii dwóch innych grup. W tym przypadku jednak obliczanie poziomów jest nieco dowolne, co sprawia, że otrzymane w ten sposób schematy należy traktować z pewnymi zastrzeżeniami.

Fakty wyłożone w tym rozdziale rzucają pewne światło na pochodzenie jądrowych promieni  $\gamma$ , ponieważ dowodzą, że emisja monochromatycznych promieni  $\gamma$  jest uzależniona od tych samych elementów budowy jądra co emisja promieni  $\alpha$ , nie znamy jednak zupełnie związków energetycznych pomiędzy emisją jądrowych promieni  $\beta$  i następujących po niej promieni  $\gamma$ .