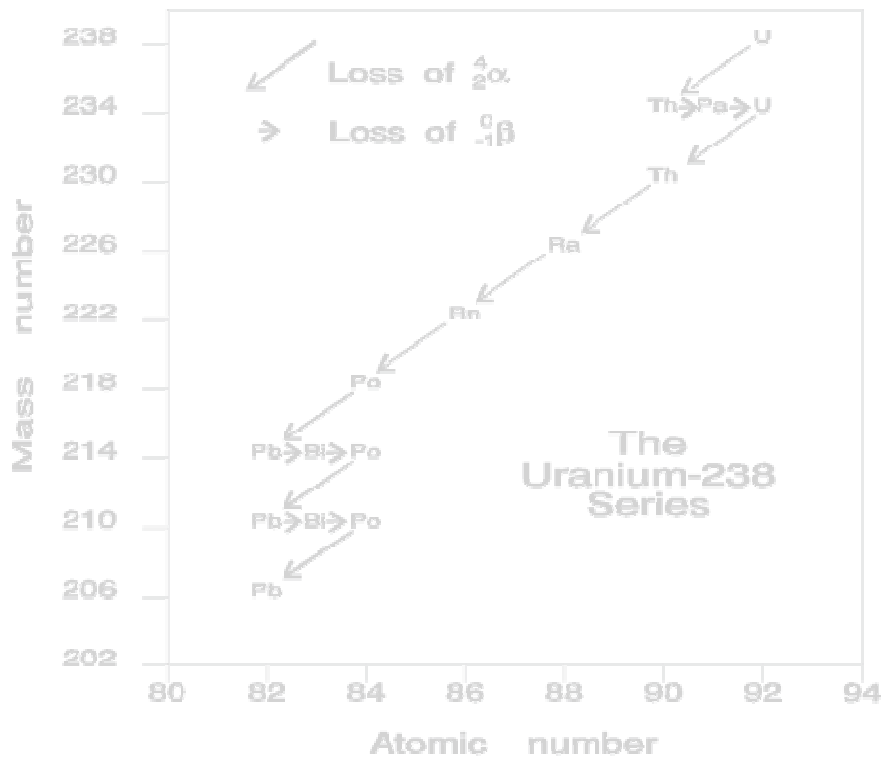


Czas (połowicznego) rozpadu uranu  $^{238}\text{U}$  wynosi 4,468 mld lat, prawie tyle, co wiek Ziemi. Z proporcji między uranem  $^{238}\text{U}$  a znajdującym się w tym samym kawałku skały ołowiem  $^{206}\text{Pb}$  możemy wnioskować o wieku skały, a także całej planety Ziemia.

Radon, znajdujący się w połowie cyklu uranowego przedstawionego powyżej, jest o tyle niebezpieczny, że jako gaz może znaleźć się w płucach człowieka. W ciągu kilku dni zachodzi kilka różnych rozpadów, większość z nich alfa, aż do polonu  $^{210}\text{Po}$ , w związku z tym „spustoszenie” radiacyjne w płucach jest spore. Gaz ten występuje na terenach ze skałami pochodzenia magmowego w podłożu (np. Val Rendena w Trentino, Włochy). Aby się ustrzec przed przedostawaniem się radonu do pomieszczeń mieszkalnych, w tradycyjnym budownictwie pozostawiano piwnice z wietrzonymi oknami.



Ryc. 3.6. Łańcuch rozpadu uranu  $^{238}\text{U}$  we współrzędnych  $A$  i  $Z$ ; przemiany z emisją cząstek alfa zmniejszają liczbę masową  $A$  o 4 i liczbę atomową  $Z$  o 2; przemiany beta nie zmieniają liczby masowej a zwiększają liczbę atomową o 1.

Aby wyjaśnić, skąd w jądrze biorą się (gotowe) cząstki alfa, musimy powiedzieć nieco więcej o strukturze jądra, a w zasadzie również o strukturze protonu i neutronu.

### 3.7. Energia i szybkość rozpadu; neutrino

Kilkakrotnie wspominaliśmy „okres” rozpadu jąder promieniotwórczych, np. w porównaniu do wieku Ziemi. Sprecyzujemy teraz, jak liczymy ten okres i od czego on zależy. Zaczniemy od tego, że rozpady promieniotwórcze to zjawisko świata atomowego, i rządzą się prawami tego świata, czyli zasadami *mechaniki kwantowej*.

Protony, cząstki alfa, neutrony, są uwięzione w jądrami przez siły wzajemnego oddziaływania<sup>12</sup>, coś w rodzaju bariery, która ogranicza ich wydostanie się na zewnątrz. Mechanika kwantowa mówi jednak, że nawet jeśli cząstka nie ma energii dostatecznie dużej aby przejść *ponad* taką barierą, może ona przeniknąć *przez* tę barierę, zob. ryc. 2.29. Efekt ten

<sup>12</sup> Oddziaływania w jądrze między protonami i neutronami nazywamy oddziaływaniami *silnymi*. Są one krótkozasięgowe i jak pokazaliśmy w zadaniu 3.4, muszą one być silniejsze niż oddziaływania elektryczne, aby wiązać dodatnie protony (plus neutrony) w stabilne jądro.

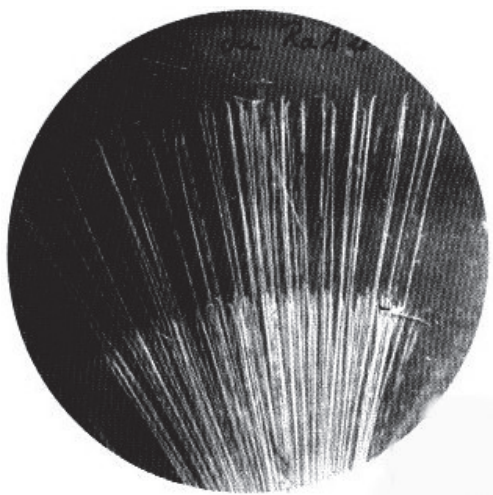
nazywamy efektem tunelowym a *prawdopodobieństwo* przeniknięcia przez barierę zależy do jej szerokości, wysokości oraz energii cząstki padającej. Rozpady alfa to zjawisko kwantowego tunelowania tych cząstek przez barierę potencjału. Podając prawa świata kwantowego wspomnieliśmy o równaniu Schrödingera: określa ono *prawdopodobieństwo* zdarzeń.

Innymi słowy, rozpadami promieniotwórczymi rządzą prawa *prawdopodobieństwa*. Dla każdego izotopu (i kanału rozpadu) definiujemy „czas połowicznego rozpadu”. Jest to czas, po którym *połowa* z początkowej ilości izotopu ulegnie rozpadowi. Jeżeli okres połowicznego rozpadu uranu  $^{238}\text{U}$  wynosi 4,2 mld lat, to po 4,2 mld lat z kilograma uranu pozostanie jedynie pół kilograma wyjściowego materiału. Pozostałe pół rozpadło się w cyklu rozpadów promieniotwórczych. Jeżeli okres połowicznego rozpadu polonu  $^{210}\text{Po}$  wynosi 138 dni, to z jednego grama polonu po 138 dniach zostanie pół grama, po kolejnych 138 dniach – ¼ grama, po kolejnych 138 dniach – 1/8 grama itd. Proces rozpadu jest rządzony przez prawa *prawdopodobieństwa*.

**Okresem połowicznego rozpadu  $T_{1/2}$  nazywamy czas, po jakim z początkowej ilości substancji promieniotwórczej zostanie jej połowa.**

Czasy połowicznego rozpadu dla różnych izotopów różnią się bardzo: oprócz czasów „geologicznych”, jak wspomnianych  $^{238}\text{U}$  i  $^{40}\text{K}$  izotopy nawet tego samego pierwiastka chemicznego mogą mieć bardzo różne czasy połowicznego rozpadu<sup>13</sup>. Wymienione w cyklu rozpadu uranu, ryc. 3.6, produkty przejściowe mają bardzo różne czasy połowicznego rozpadu: rad  $^{226}_{88}\text{Ra}$  - 1600 lat, gaz radon  $^{222}_{86}\text{Rn}$  - 3,8 dnia, polon  $^{218}_{84}\text{Po}$  - 3 minuty, ołów  $^{214}_{82}\text{Pb}$  - 27 minut (ten rozpada się przez proces  $\beta$ ); bizmut  $^{214}_{83}\text{Bi}$  - 20 minut; w kolejnym rozpadzie  $\beta$  powstaje ponownie polon, ale inny izotop,  $^{214}_{84}\text{Po}$  żyjący zaledwie 0,16 milisekundy, itd. Spośród różnych izotopów nowego sztucznego pierwiastka o liczbie atomowej  $Z = 112$  (czyli chemicznie przypominającego rtęć), nazwanego w 2006 roku Copernicium, najdłużej żyjący ma liczbę masową  $A = 277$  i czas życia „aż” 1,1 ms.

Niezależnie od bardzo różnych czasów rozpadów w procesach alfa, uzyskiwana energia (unoszona głównie przez cząstki  $\alpha$ ) jest podobna – od ułamków do kilku MeV. To też jest spowodowane mechanizmem rozpadu – kwantowym przejściem przez barierę potencjału. Od prędkości cząstek zależy ich zasięg. Cząstki alfa są, jak na świat cząstek elementarnych, dość ciężkie, więc tej samej energii odpowiada mniejszy zasięg. I tak zasięg cząstek alfa w powietrzu wynosi kilka centymetrów a zatrzymuje je kartka papieru.



**Fot. 3.7.** Emisja cząstek alfa ze źródła radowego – zasięg tych cząstek w emulsji fotograficznej wynosi kilka milimetrów; dwa różne zasięgi wskazują na współobecność dwóch różnych izotopów/ pierwiastków; badania Ewy Joliot - Curie (Źródło: Armandi Editore)

<sup>13</sup> Zamiennie, zamiast „czas połowicznego rozpadu” możemy używać pojęcia „czas życia” – nie są to pojęcia równoważne, ale zbliżone – czas połowicznego  $T_{1/2}$  zaniku to  $0,69 (= \ln 2)$  czasu życia  $\tau$ ;  $T_{1/2} = \tau \ln 2$

Cząstki beta (czyli elektrony), przy tej samej energii co cząstki alfa, mają większą prędkość. Ich zasięg w powietrzu to kilkadziesiąt centymetrów a prawie całkowicie zatrzymuje je aluminiowa blacha o grubości 1 mm. Najbardziej niebezpieczne jest promieniowanie gamma.

Z rozpadami *beta* wiąże się inny naukowy „kłopot”. O ile w rozpadach alfa wyrzucane cząstki istnieją wewnątrz jądra, elektrony powstać muszą z rozpadu neutronu. Rozpad ten następuje jednak pewien problem: jeśli zachodziłby on zgodnie ze schematem (3.4) to po lewej stronie tego równania mamy 1 neutron (o spinie  $\frac{1}{2}$ ) a po prawej stronie jeden proton (też o spinie  $\frac{1}{2}$ ) i jeden elektron (o spinie  $\frac{1}{2}$ ). Niezachowany byłby sumaryczny spin!<sup>14</sup>

W latach 30-tych XX wieku zauważono jeszcze jedną trudność z wynikami doświadczeń na rozpadami beta: brakowało energii! O ile cząstki alfa mają dobrze określony zasięg w różnych materiałach (zob. fot. 3.7) to cząstki beta zatrzymują się na różnych głębokościach: od zera do pewnej głębokości maksymalnej. Enrico Fermi, włoski fizyk jądrowy a w XX wojny światowej kierownik naukowy prac nad bombą atomową w USA, wydedukował o istnieniu dodatkowej cząstki w produktach rozpadu (3.4). Nazwał tę cząstkę „małym neutronem”, po włosku *neutrino*. Na co znany już nam Wolfgang Pauli odpowiedział sarkastycznie: „-Ale jej nigdy nie znajdziecie”. Pauli miał trochę racji – istnienie neutrino potwierdzono dopiero doświadczalnie dopiero w 1956 roku.

Możemy więc zapisać sposób kompletny reakcję rozpadu neutronu



a w konsekwencji również rozpad beta



gdzie przez  $\bar{\nu}$  oznaczyliśmy neutrino (a dokładniej *antyneutrino*<sup>15</sup>).

Neutrino jest cząstką, dzięki której w rozpadach beta zostaje zachowany spin i energia: energia rozpadu dzieli się między energię kinetyczną elektronu i antyneutrino. Neutrino oddziałują z materią bardzo słabo – aby zmniejszyć natężenie wiązki neutronów emitowanych ze Słońca o połowę potrzebna byłaby warstwa ołowiu o grubości równej odległości Ziemi od Słońca<sup>16</sup>. W każdej sekundzie przez 1 cm<sup>2</sup> powierzchni naszego ciała przechodzi  $65 \cdot 10^9$  neutronów, nie powodując żadnego efektu biologicznego.

## Promieniowanie gamma

Dochodzimy wreszcie do wyjaśnienia, dlaczego w myśl dzisiejszej nomenklatury „rozpad gamma” są określeniem błędnym. Otóż, przemiany jądrowe (nie tylko rozpad alfa i beta) powodują przebudowanie struktury jądra. Podobnie jak w przypadku atomów, przebudowa struktury związana jest z emisją (lub absorpcją) kwantu promieniowania elektromagnetycznego. W tym przypadku energie kwantów są znacznie wyższe niż w przypadku przeskoków elektronów między orbitami w atomie wodoru – powstające promieniowanie nazywamy *gamma* i ma ono energię od dziesiątych części (np. dla rozpadów plutonu) do kilku mega-elektronowoltów.

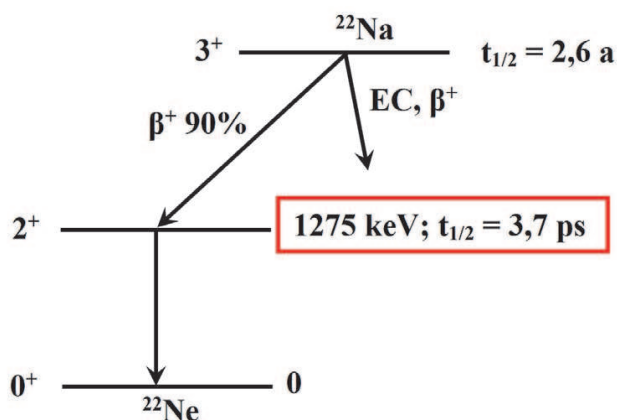
Promieniowanie gamma może towarzyszyć zarówno rozpadom alfa jak beta. Na rys. 3.8 pokazujemy schemat rozpadu  $\beta^+$ , czyli z powstaniem antyelektronu, dla jądra sztucznego izotopu sodu, <sup>22</sup>Na. Kwant gamma, o energii 1,2 MeV jest emitowany bardzo krótko po rozpadzie neutronu i jego emisja związana jest z przejściem powstałego jądra neonu <sup>22</sup>Ne ze stanu wzbudzonego do stanu podstawowego.

<sup>14</sup> Prawo zachowania spinu jest w fizyce tak samo ważne jak prawo zachowania energii.

<sup>15</sup> Według wszelkich obecnych danych antyneutrino różni się od neutrino tylko spinem.

<sup>16</sup> To oszacowanie jest bardzo przybliżone; w wodzie zasięg neutronów to 100 lat świetlnych.

W odróżnieniu od cząstek alfa i elektronów, promieniowanie gamma jest bardzo przenikliwe. Dla zatrzymania cząstki alfa o energii 1 MeV wystarczy kartka papieru, elektronów o tej energii – blacha Al o grubości 1 mm. Osłabienie o połowę promieniowania gamma o tej energii wymaga ołowianej cegły o grubości 5 cm! Promieniowanie gamma jest jednocześnie bardzo energetyczne – to ono czyni główne spustoszenie w organizmie człowieka, powodując wiele przypadków nowotworów.



**Fot. 3.8.** Rozpad  $\beta^+$  sztucznego izotopu sodu  $^{22}\text{Na}$  o czasie połowicznego rozpadu 2,6 roku; powstaje jądro neonu  $^{22}\text{Ne}$ , ale w stanie wzbudzonym; przechodzi ono do stanu podstawowego po 3,7 ps emitując kwant gamma o energii 1,3 MeV.

Źródłem promieniowania gamma są wszelkie tzw. materiały radioaktywne. Uran jest dość rozpowszechniony w skorupie ziemskiej. Radioaktywne są więc np. popioły ze spalania węgla. Źródłem promieniowania gamma jest też „kosmos” – natężenie promieniowania gamma na wysokości 10 km jest 10-20 razy większe niż na poziomie morza. Zarówno promieniowanie gamma, promieniowanie Röntgena, promieniowanie nadfioletowe dla skóry jak i liczne czynniki chemiczne (benzen w benzynie bezołowiowej, dym nikotynowy itd.) mają działanie *rakotwórcze*. Istotna jest zazwyczaj suma tych czynników – należy więc unikać *zbędnych zagrożeń*.

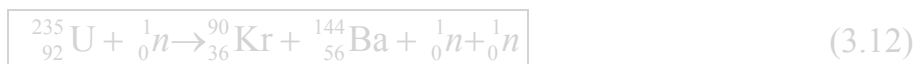
Fizycy, począwszy od prac córki Marii Skłodowskiej – Curie, Ewy i jej męża Fryderyka Joliot, nauczyli się wytwarzać wiele sztucznych izotopów bombardując inne za pomocą neutronów, protonów, cząstek alfa itd. Powstające sztucznie wytworzone izotopy w wielu przypadkach są nietrwałe, ale mają ważne zastosowania. Izotopy te rozpadają się na wiele sposobów – są możliwe również inne rozpady radioaktywne, poza omówionymi  $\alpha$  i  $\beta$ .

Możliwy jest na przykład wspomniany już rozpad  $\beta^+$  - z emisją pozytonu, w izotopach ze względny nadmiarem protonów. Przykładem jest sód  $^{22}\text{Na}$  rozpadający się<sup>17</sup> z czasem połowicznego zaniku 2,6 roku na rzadki izotop neonu  $^{22}\text{Ne}$ . Emitowane pozytony wykorzystywane są do wykrywania mikro-defektów, np. w materiałach półprzewodnikowych. Innym izotopem rozpadającym się w procesie  $\beta^+$  jest fluor  $^{18}\text{F}$  ( $T_{1/2} = 110 \text{ min}$ ) używany w tomografii anihilacji pozytonów (PET) do wykrywania nowotworów.

### 3.8. Reakcje jądrowe

Krótko przed II wojną światową dwójka niemieckich uczonych, Lisa Meitner i Otto Hahn zauważyli, że rzadziej występujący izotop uranu  $^{235}\text{U}$  po pochłonięciu neutronu nie podlega żadnej ze znanych wówczas przemian jądrowych, ale, żartobliwie mówiąc „rozpada się na dwie nierówne połowy”.

Reakcja, nazywana reakcją *rozszczepienia*, może mieć przebieg, np.



<sup>17</sup> Stabilny izotop sodu to  $^{23}\text{Na}$ .