

Dane: $m = 1837 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Szukane: $F = ?$; $a = ?$

Rozwiązanie:

Skorzystamy ze wzoru na siłę Coulomba (2.17)

$$F = \frac{ke^2}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2 / (1 \cdot 10^{-15})^2 = 144 \text{ N}$$

Obliczmy przyspieszenie, z jakim rozbiegłyby się protony, gdyby nie były związane innymi siłami.

$$a = F/m = 144 / 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 86 \cdot 10^{27} \text{ m/s}^2.$$

Trudno sobie nawet takie przyspieszenie wyobrazić!

Możemy również obliczyć energię, jaka wyzwoliłaby się gdyby dwa protony odleciały od siebie na nieskończoną odległość. Skorzystamy ze wzoru (2.17)⁶

$$E = \frac{ke^2}{r} = 9 \cdot 10^9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2 / (1 \cdot 10^{-15}) = 14,4 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

Przeliczmy tę energię na elektronowolty

$$E = 14,4 \cdot 10^{-14} \text{ J} / (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}) = 9 \cdot 10^5 \text{ eV} = 0,9 \text{ MeV}$$

Energia odpychania się dwóch protonów w jądrze, nawet w tym prostym oszacowaniu, jest ogromna. Jest ona ogromna również w rzeczywistości i musi być co najmniej zrównoważona przez siły wzajemnego *przyciągania* między protonami i neutronami, ale jądro się nie rozpadło. O tym za chwilę. Sprecyzujmy najpierw jednostkę masy atomowej.

Jednostka masy atomowej

Liczba masowa to łączna liczba protonów i neutronów. Można by więc przyjąć za jednostkę masy atomowej masę protonu (czyli jądra wodoru ^1H), ale jest ona nieco różna od masy neutronu⁷. Dodatkowo, obok izotopu ^1H wodoru w naturze występuje 0,01% cięższego izotopu, zwanego *deuterem* ^2_1H , którego jądro zawiera jeden proton i jeden neutron. Trudno jest zważyć z zadowalającą dokładnością pojedyncze protony lub neutrony. Z tych względów, za jednostkę masy atomowej przyjęto 1/12 masy atomu węgla, izotopu ^{12}C .

Jednostka masy atomowej to masa 1/12 masy atomu węgla, izotopu ^{12}C .

3.6. Rozpady beta i alfa

Protony, podobnie jak elektrony, są cząstkami *trwałymi* – żadne dane doświadczalne (ani teoria) nie wskazują, aby mogły się rozpadać. Neutrony natomiast są nietrwałe – swobodne, tzn. poza jądrem atomowym rozpadają się średnio po 15 minutach.

Neutron, w dużym uproszczeniu, rozpada się na proton i elektron. Tu mamy pierwszy klucz do rozpadów promieniotwórczych: w rozpadach beta jeden neutron w jądrze zamienia się w proton i elektron. Elektron jest emitowany z jądra i obserwowany w doświadczeniach, jak te przeprowadzane przez Marię Skłodowską – Curie, jako cząstka „ β ”.

⁶ Pomijamy znak minus we wzorze (2.17), jako że dwa protony się odpychają, więc energia *układu* jest dodatnia.

⁷ Zauważmy, że przemiana neutronu w proton w rozpadzie β^- to nie jest „uwolnienie” elektronu, jako składnika neutronu. Różnica mas neutronu i protonu to $939,57 - 938,28 = 1,29 \text{ MeV}$ a masa elektronu to zaledwie $0,51 \text{ MeV}$

Rozpady beta

Rozpady beta zachodzą w jądrach, w których jest (względny) nadmiar neutronów w stosunku do protonów. W sztucznie wytworzonym jądrze neonu o nadmiarze neutronów, jak izotop ${}_{10}^{23}\text{Ne}$, jeden neutron rozpada się dość szybko (w ciągu 37 sekund⁸) na proton a emitowany jest elektron. Rośnie liczba protonów w jądrze, czyli liczba atomowa. Z uwagi na to, że masa protonu i neutronu są w przybliżeniu takie same, liczba masowa się *nie zmienia*.

Przemiana ta ma więc postać⁹



Po rozpadzie β zmienia się liczba atomowa (rośnie o 1) a liczba masowa pozostaje niezmienna. Rozpad β można zapisać symbolicznie w postaci



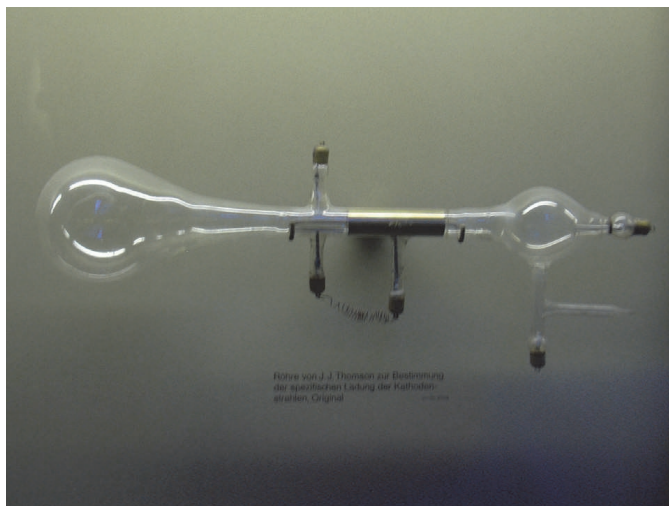
Rozpady promieniotwórcze są więc pewnego rodzaju „alchemią” – możemy zamieniać jeden pierwiastek chemiczny na inny. W przykładzie (3.3) neon zamienia się w sód.

W rozpadach beta liczba masowa nie zmienia się - a powstaje jądro pierwiastka leżącego na prawo w tablicy Mendelejewa.

Bardzo ważne znaczenie, dla badania historii Ziemi ma rozpad beta izotopu potasu o $A = 40$, czyli ${}_{19}^{40}\text{K}$. Izotop ten występuje naturalnie w znikomych ilościach (0,01%) i rozpada się z czasem, który możemy nazwać „geologicznym” – 1,2 mld lat; według reakcji



Czas (połowicznego) rozpadu ${}^{40}\text{K}$ jest tylko czterokrotnie mniejszy niż wiek Ziemi, stąd izotop ${}^{40}\text{K}$ jest, obok uranu i ołowiu, jednym z najlepszych „zegarów” dla geologów.



Fot. 3.5. Dwa epokowe doświadczenia z końca XIX wieku w Deutsches Museum w Monachium: **a)** E. Rutherforda, pokazujące że w rozpadzie polonu powstaje hel (kopia); **b)** J. J. Thompsona, odkrycie elektronu, odchylenie promieni katodowych przez pole elektryczne i magnetyczne (oryginał)

⁸ Czas rozpadu zdefiniujemy dokładniej za chwilę.

⁹ Równanie (3.3) nie jest jeszcze dokładne: brakuje po prawej stronie równania trzeciej cząstki - *antyneutrino*.

¹⁰ Uwaga: równanie jest niekompletne; poprawną formę przytoczymy w (3.10)

Rozpady alfa

Rozpady alfa to najczęstszy typ „naturalnych” rozpadów promieniotwórczych. Dziś, metodami fizyki jądrowej potrafimy wytworzyć wiele sztucznych izotopów, ale Maria Skłodowska – Curie obserwowała jedynie „naturalne” rozpady jądrowe, w ciężkich pierwiastkach – uranie, torze itp¹¹. Te ciężkie pierwiastki rozpadają się emitując dodatnio naładowaną cząstkę, nazwaną przez E. Rutherforda „alfa”.

Już sam Rutherford sprawdził, że cząstki alfa to jądra helu ${}^4_2\text{He}$, przeprowadzając bardzo pomysłowe doświadczenie, fot. 3.5. Badał rozpad polonu i w szklanej ampulce zbierał produkty rozpadu. Następnie zbadał widmo powstałego gazu – był to hel!



Przykładem rozpadu alfa jest rozpad polonu ${}^{210}_{84}\text{Po}$. Rozpada się on według schematu



Powstający izotop ołowiu jest stabilny a w reakcji wydziela się 5,4 MeV energii (unoszonej przez wyrzucaną cząstkę alfa, ${}^4_2\text{He}$). Czas (połowicznego) rozpadu polonu jest dość długi, 138 dni a moc wydzielona w jednym gramie wynosi 140 W; z tego powodu polon jest używany jako źródło energii w bateriach termoelektrycznych dla satelitów.

W rozpadach alfa liczba masowa zmniejsza się o 4, a liczba atomowa zmniejsza się o 2: powstaje jądro pierwiastka leżącego o dwa miejsca na lewo w tablicy Mendelejewa.

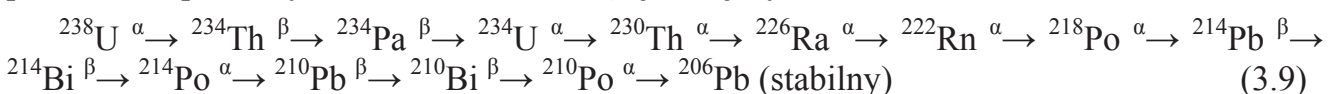
Rozpady beta są rozpadami, w których emitowane są cząstki o ujemnym ładunku elektrycznym (elektrony), w rozpadach alfa – cząstki o ładunku dodatnim, ale nie pojedyncze protony i neutrony, jakby tego można oczekiwać, tylko „zlepki” tych cząstek, w postaci „gotowego” jądra helu. Okazuje się, że takie gotowe jądro ${}^4_2\text{He}$ jest szczególnie stabilne, tzn. energia jego wiązania jest szczególnie wysoka.

Ocenialiśmy w zadaniu 3.4 energię elektrostatycznego „rozpychania” się dwóch protonów, rzędu MeV. Otóż, dzięki obecności dwóch neutronów, energia **wiązania** jądra helu ${}^4_2\text{He}$ wynosi aż 28,3 MeV!

Innym przykładem rozpadu alfa jest rozpad naturalnie występującego izotopu uranu o liczbie masowej $A = 238$, zachodzący według schematu



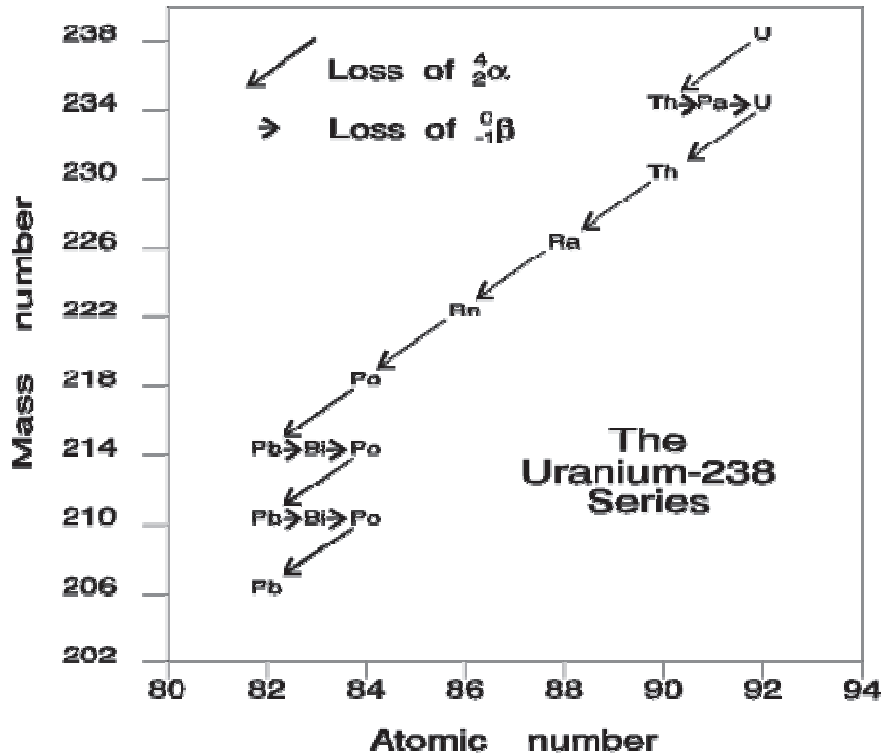
Powstający izotop toru ${}^{234}\text{Th}$ jest nietrwały i rozpada się w czasie 24 dni; w kolejnych reakcjach powstaje pluton, inne izotopy uranu i toru, rad, radon (szlachetny gaz, radioaktywny) itd. Cały łańcuch rozpadu uranu ${}^{238}\text{U}$ jest skomplikowany i obejmuje zarówno przemiany α jak β . Cały cykl, prowadzący do powstania ołowiu ${}^{206}\text{Pb}$ w reakcji (3.7) przedstawia poniższy schemat a w rozwiniętej wersji ryc. 3.6.



¹¹ Przez „itp.” rozumiemy nietrwałe izotopy będące *produktami* rozpadu, jak rad i polon, które same rozpadają się dalej na lżejsze fragmenty.

Czas (połowicznego) rozpadu uranu ^{238}U wynosi 4,468 mld lat, prawie tyle, co wiek Ziemi. Z proporcji między uranem ^{238}U a znajdującym się w tym samym kawałku skały ołowiem ^{206}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}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}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 jądrach przez siły wzajemnego oddziaływania¹², 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

¹² 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.