

Rozdział III. Fizyka jądrowa i cząstki elementarne

3.1. W poszukiwaniu elementarnego składnika

Koniec XIX wieku obfitował w odkrycia fizyczne. W listopadzie 1895 roku Wilhelm Röntgen odkrył „niewidzialne” promienie, które w rzeczywistości są falami elektromagnetycznymi, tylko że o małej długości fali (rzędu Å), czyli o energii fotonów rzędu keV. Promienie Röntgena mają wszechstronne zastosowania – od medycyny i stomatologii, do badania materiałów, sprawdzania bagaży na lotniskach i prześwietlania egipskich mumii. W szczególności, jak to pokazaliśmy na fot. 2.35 promienie Röntgena mogą służyć do obrazowania pojedynczych atomów, a nawet orbitali elektronów w tych atomach.

W 1897 roku „oficjalnie” przez J. J. Thompsona został odkryty elektron, a dokładniej zmierzony stosunek e/m jego ładunku e do masy m . Zastosowana przez Thompsona metoda, odchyłania wiązki elektronów przez pole elektryczne i magnetyczne jest stosowana w kineskopach telewizyjnych (tj. odbiornikach TV starszego typu). Metoda Thompsona stosowana jest nadal w spektrometrach masowych, zob. fot. 2.17, elektron zaś pozostaje jedną z niewielu cząstek naprawdę niepodzielnych. Nie są takimi niepodzielnymi cząstkami atomy¹, z których potrafimy odłączyć elektrony.

W tym samym czasie, gdy odkrywano elektron i promienie Röntgena, w lutym 1896 roku Henri Becquerel zauważył, że papier fotograficzny leżący w pobliżu soli uranu uległ częściowemu zaczernieniu. Zaczernienie to nie było spowodowane światłem, jako że papier fotograficzny był od światła osłonięty. Zainteresowania naukowe Henri Becquerela były bardzo szerokie; po kilku latach prace nad nowymi promieniami, jako mało obiecujące zlecił swojej doktorantce, Marii Skłodowskiej.

3.2. Pracowita doktorantka

Maria Skłodowska (1867-1934) w wieku 10 lat straciła matkę, co nie przeszkodziło jej skończyć szkołę średnią ze złotym medalem. Do wieku 24 lat pracowała jako prywatna nauczycielka w bogatych rodzinach (w Warszawie, Lublinie, Sopocie). W tamtych czasach kobiety nie mogły studiować na Uniwersytecie Warszawskim (pod zaborem rosyjskim) wyjechała więc do siostry Broni do Paryża i tam podjęła studia na Sorbonie. W ciągu dwóch lat ukończyła, jako pierwsza ze swego rocznika licencjat z fizyki, rok później z matematyki. Wróciła do Warszawy, ale latem 1895 roku przyjęła oświadczyzny Pierre’a Curie i wyszła za niego za mąż, zob. fot. 3.1. Pierre, profesor w Szkole miejskiej Fizyki i Chemii Przemysłowej w Paryżu był już w tym czasie uznanym naukowcem².

Maria w 1897 urodziła córkę i podjęła studia doktoranckie. W odróżnieniu od innych badaczy zajmujących się promieniami Becquerela podjęła prace ilościowe, nie tylko jakościowe nad tym zjawiskiem. Aby ocenić „intensywność” promieniowania, mierzyła bardzo małe prądy elektryczne, przepływające w gazie w obecności związków uranu; korzystała z elektrometru skonstruowanego przez męża. Już w marcu 1898 roku zauważyła³, że rudy uranu są bardziej aktywne niż czysty uran, zob. ryc. 3.2. Pracując dalej z mężem i

¹ Grecki *a-tomos*, czyli nie-podzielny.

² Pierre Curie odkrył m.in. że ściskany kwarc elektryzuje się i że substancje magnetyczne (tzw. ferromagnetyki) jak nikiel i żelazo tracą swe własności w temperaturach kilkuset stopni Celsjusza. Pierwsze zjawisko, tzw. efekt piezoelektryczny zapewnia stabilizację częstości pracy komputerów, telefonów komórkowych itd.

³ *Rayons émis par les composés de l'uranium et du thorium*, Note de M. Curie. Académie des sciences (France), Comptes Rendus, T. 126 (1898) 1101-03

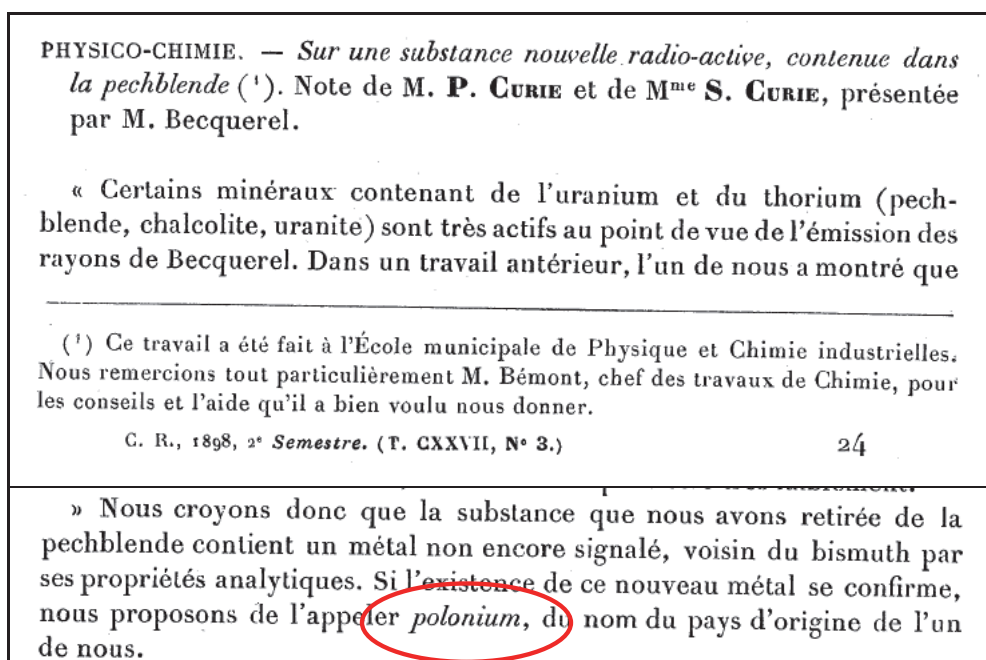
http://www.academie-sciences.fr/activite/archive/dossiers/Curie/Curie_publi.htm

wykorzystując tak metody fizyki jak chemii, jeszcze w lipcu tego samego roku stwierdziła, że w rudach uranu musi znajdować się nowy, nieznanym metal, przypominający chemicznie bizmut ale 400 razy bardziej „radio-aktywny” niż uran. „-Jeżeli istnienie tego nowego metalu zostanie potwierdzone, proponujemy nazwać go *polonium*, od imienia kraju pochodzenia jednej z nas”, ryc. 3.2. Kolejny odkryty przez Państwa Curie pierwiastek radioaktywny przypomina chemicznie bar i został przez nich nazwany *radem*.



Fot. 3.1. Dwa zdjęcia, wystawione w 2005 roku w Instytucie Curie w Paryżu: **a)** podróż poślubna rowerami, po Normandii, 1895 rok; **b)** Maria z córkami po śmierci męża w 1906 roku (foto GK)

Za odkrycie „radio-aktywności”, jak promieniowanie Becquerela nazwała Pani S. Curie, ona z mężem ($\frac{1}{2}$) i Becquerel otrzymali nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki w 1903 roku. W 1911 roku, już jako wdowa, Marie Skłodowska-Curie odbierała Nagrodę w dziedzinie chemii, za odkrycie polonu i radu i „właściwości tych niezwykłych pierwiastków”.



Fot. 3.2. Fragmenty artykułu, w którym ogłoszono odkrycie polonu, Académie des sciences (France), *Comptes Rendus*, T. 127 (1898) 175-178

Jeszcze w 1902 roku Państwo Curie poddawali krytyce myśl, że energia wydzielana przez rad może pochodzić ze zmian w strukturze atomu; żadnych zmian nie obserwowali. Nikt wówczas nie wiedział, że zmiany zachodzą nie w całym atomie ale w jego centralnym jądrze i że źródłem energii jest znikająca *masa*. Potrzebny był nowy pomysł (1905 r.), niejakiego Alberta Einsteina.

3.3. Einstein i równoważność energii i masy

Kolejna romantyczna historia z przełomu XIX i XX wieku to małżeństwo Alberta i Milewy. Albert Einstein miał młodość pełną zmian: urodzony w Ulm, chodził do liceum w Monachium ale za rodzicami przeniósł się do Pawii we Włoszech. W konsekwencji nie miał matury, którą kończył dopiero w Szwajcarii. Jego narzeczona, studentka matematyki w Zurychu, Mileva Marić była Serbką, obywatelką Cesarstwa Austriacko – Węgierskiego a w Szwajcarii emigrantką. Po zakończeniu studiów z fizyki, a nie inżynierii elektrycznej jak chciał ojciec, Albert nie otrzymał obiecanej pracy na uniwersytecie i został urzędnikiem biura patentowego w Bernie. Dopiero w 1903 roku żeni się z Milewą a w 1905 roku rodzi mu się syn. W tym samym roku pisze cztery artykuły, które zrewolucjonizowały całą fizykę⁴. Jest wśród tych artykułów słynne równanie równoważności masy m i energii E

$$E = mc^2 \quad (3.1)$$

Równanie to mówi np., że jeżeli w atomie elektron przechodzi na wyższy poziom energetyczny (tzn. rośnie energia atomu), to rośnie również jego masa. Obliczmy, o ile rośnie masa atomu wodoru przy przejściu elektronu na wyższy poziom energetyczny.

Zadanie 3.1:

Atom wodoru pochłoniął kwant światła o energii 10,2 eV i pozostaje w tym stanie wzbudzonym. O ile wzrosła jego masa?

Dane: $\Delta E = 10,2 \text{ eV}$

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Szukane: $\Delta m = ?$

Rozwiązanie:

Po pierwsze przeliczmy jednostki energii eV na dżule, wg zależności $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

$$\Delta E = 10,2 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} = 16,3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Ta zmiana energii obawia się jako zmiana masy o

$$\Delta m = \Delta E / c^2 = 16,3 \cdot 10^{-19} / (3 \cdot 10^8)^2 = 5,4 \cdot 10^{-35} \text{ kg}$$

Masa atomu wodoru to $m_H = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ więc zmiana masy to mniej więcej o 0,000003%, absolutnie nie do zmierzenia.

Zadanie 3.2. Elektron w spotkaniu z anty-elektronem (zob. ryc. 1.10b) *anihiluje*, to znaczy masa tych dwóch cząstek zamienia się w energię pola elektromagnetycznego (w dwa kwanty „światła”). Jaką energię ma każdy z tych kwantów (w eV)? Masa elektronu (i antyelektronu) wynosi $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

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

Szukane: $E = ?$

⁴ Zob. też artykuły GK „Albert i Milewa” i „Cztery rękopisy, co zmieniły świat”
http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/annalen.html
http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/posters/einst5.ppt

Rozwiązanie:

Zauważmy, że jeżeli w anihilacji z dwóch cząstek o masie elektronu powstają dwa identyczne kwanty światła, to obliczenie możemy przeprowadzić dla jednego elektronu.

W trakcie anihilacji masa elektronu m zamienia się w energię kwantu światła E . Energia ta wynosi $E = mc^2 = 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 81,9 \cdot 10^{-15} \text{ J}$

Przeliczmy jednostki energii z dżuli na eV, dzieląc powyższy wynik przez przelicznik $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}$

$$E = 81,9 \cdot 10^{-15} \text{ J} / (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}) = 51,1 \cdot 10^4 \text{ eV} = 511 \text{ keV}$$

Uzyskana energia wynosi 1022 keV. Sumaryczna energia dwóch kwantów światła (w tym przypadku nazywamy je kwantami „gamma”) powstających w wyniku anihilacji elektronu i pozytonu jest ogromna: ponad milion eV.

Zadanie 3.3. Gdybyśmy potrafili wytworzyć (i zmagazynować) antymaterię, byłoby to znakomite paliwo. Oblicz, zakładając, że cała energia uzyskana z anihilacji może przyjąć formę energii elektrycznej, na jak długo starczyłaby szklanka (250 gramów) antywody dla miasta Torunia (200 tys. mieszkańców). Przyjmij, że miesięcznie jedna osoba „zużywa” 50 kWh energii elektrycznej.

Dane: $m = 250 \text{ g} = 0,25 \text{ kg}$.

Szukane: $E = ?$

Rozwiązanie:

W tym przypadku musimy uwzględnić podwójną masę m (250 gramów antywody anihiluje z 250 gramami wody)

$$E = mc^2 = 0,5 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 4,5 \cdot 10^{16} \text{ J}$$

Obliczmy teraz miesięczne zapotrzebowanie Torunia na energię elektryczną, zamieniając najpierw jednostkę kWh na dżule

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Miesięczne zapotrzebowanie Torunia wynosi więc

$$E_1 = 200\,000 \cdot 50 \cdot 3,6 \cdot 10^6 = 36 \cdot 10^{12} \text{ J}.$$

Jest to ogromna ilość ale z jednej szklanki antywody uzyskalibyśmy energię dla Torunia na $E/E_1 = 4,5 \cdot 10^{16} / 3,6 \cdot 10^{13} \approx 1,2 \cdot 10^3$ miesięcy, czyli 100 lat!

Planuje się wykorzystać antymaterię jako paliwo do lotów międzygwiazdnych. Oczywiście, dla uzyskania 250 g antywody wszystkie elektrownie Torunia też musiałyby pracować przez 100 lat.

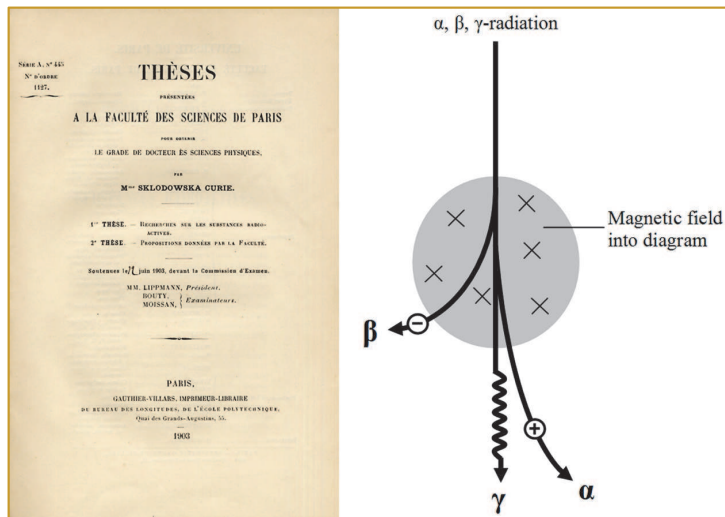
Zasada Einsteina równoważności masy i energii mówi, że masa i energia są dwoma formami tej samej wielkości. Energia może zamieniać się w masę a masa w energię. Przelicznikiem jednostek jest c^2 , zgodnie ze wzorem:

$$E = mc^2$$

Okazuje się, że źródłem energii promieniowania radu są tego rodzaju przemiany: masy w energię. Aby to zrozumieć, wróćmy do badań Marii Skłodowskiej – Curie.

3.4. Rozpady promieniotwórcze

Po odkryciu promieni Becquerela kilku badaczy niezależnie sprawdzało, czy odchylają się one w polu magnetycznym. Promienie katodowe (czyli elektrony) badane przez J.J. Thompsona odchylają się pod wpływem magnesu; promienie Röntgena – nie odchylają się. Maria i Pierre Curie stwierdzili, że „promieniowanie” wysyłane przez polon ma dwoistą naturę: „promieniowanie” mało przenikliwe, zanikające w powietrzu po paru centymetrach odchyła się w polu magnetycznym (tak jakby były to cząstki o ładunku dodatnim) zaś promieniowanie przenikliwe nie odchyła się. W rozpadach z udziałem radu „promieniowanie” nieprzenikliwe, według Państwa Curie, niesie ładunek *ujemny*.



Fot. 3.3. a) Okładka pracy doktorskiej Marii Skłodowskiej – Curie (1903 r.); **b)** schemat rozpadów promieniotwórczych według Ernesta Rutherforda: cząstki naładowane są odchylane przez pole magnetyczne, kwanty gamma nie są odchylane.

Prace Państwa Curie stały się punktem wyjścia do badań przeprowadzonych przez Ernesta Rutherforda: cząstki odchylające się pod wpływem pola magnetycznego zostały nazwane *alfa* i *beta* a promieniowanie nieodchylające się – *gamma*.

W myśl dzisiejszej wiedzy tylko to ostatnie (gamma) powinno nosić nazwę *promieniowanie*. Dwa pozostałe procesy to *rozpady* – odpowiednio *alfa* i *beta*. W rozpadach emitowane są *cząstki* – nazwane *alfa* i *beta*. Cząstki *beta* to dobrze już nam znane elektrony. Aby wyjaśnić, co to są cząstki alfa i skąd się biorą, musimy zdefiniować składniki atomu: elektrony, protony i neutrony.

3.5. Protony i neutrony

Kolejne pierwiastki w tablicy Mendelejewa różnią się ilością elektronów: atom wodoru posiada jeden elektron, hel – dwa, lit – trzy. Okazuje się jednak, że masy tych atomów nie rosną jak kolejne liczby naturalne. W porównywalnych jednostkach masa wodoru wynosi jeden a helu już cztery. Za pomocą spektroskopii masowej stwierdzono, że dla atomów neonu obok masy 20 może występować, w znacznie mniejszej koncentracji, masa 22.

Aby atom pozostawał elektrycznie obojętny, liczba elektronów musi być równa ilości cząstek dodatnich. Jak wspomnieliśmy przy omawianiu modelu atomu Bohra, cząstki dodatnie są skoncentrowane w małym obszarze (10^{-15} m) w środku atomu – w tzw. jądrze. Cząstki o ładunku dodatnim w jądrze nazywamy *protonami*. Masa protonu jest 1837 razy większa niż masa elektronu. To masę jednego protonu użyliśmy (w przybliżeniu) jako miarę masy atomów.

Neon posiada 10 elektronów, w jego jądrze jest więc 10 protonów. Brakującą masę wnoszą cząstki o masie bardzo zbliżonej do masy protonu, ale nie posiadające ładunku. Cząstki te nazywamy *neutronami*. O ich istnieniu wiedziano od początku XX wieku, ale zostały odkryte doświadczalnie dopiero w 1931 roku.

Składnikami atomu są:

- ujemne elektrony, krążące dookoła jądra
- dodatnie protony i neutralne neutrony, skupione w jądrze.

Atomy o tej samej liczbie protonów a różnej liczbie neutronów nazywamy izotopami.

Liczba atomowa Z określa ilość protonów w jądrze, liczba masowa A – łączną liczbę protonów i neutronów.

Atomy neonu mogą więc mieć w jądrze, oprócz 10 protonów, 10, 11 lub 12 neutronów⁵. Atomy o różnej liczbie neutronów w jądrze, a tej samej liczbie protonów, nazywamy *izotopami*. Atom neonu ma 3 izotopy stabilne: o masie 20, 21 i 22.

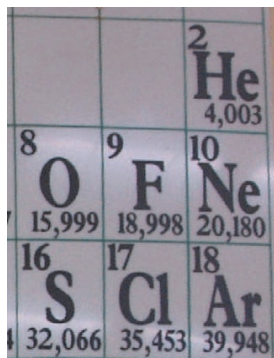
Istotne w budowie atomu X są więc: ilość protonów w jądrze – czyli liczba *atomowa* (oznaczana przez Z) i sumaryczna ilość protonów i neutronów – czyli liczba *masowa* (oznaczana przez A). Liczbę masową zapisujemy na górze, liczbę atomową na dole – przy symbolu pierwiastka

$$\begin{array}{c} A - \text{liczba masowa} \\ Z - \text{liczba atomowa} \end{array} X$$

(3.2)

Przykładowo, stabilne izotopy neonu to ${}^{20}_{10}\text{Ne}$, ${}^{21}_{10}\text{Ne}$, ${}^{22}_{10}\text{Ne}$.

Występowanie izotopów jest przyczyną, że masy atomowe pierwiastków nie są liczbami całkowitymi. Jednym z ciekawszych przykładów jest chlor, którego masa atomowa, uśredniona po izotopach, wynosi 35,5.



		2 He 4,003
8 O 15,999	9 F 18,998	10 Ne 20,180
16 S 32,066	17 Cl 35,453	18 Ar 39,948

Fot. 3.4. Fragment tablicy Mendelejewa z fot. 2.32: masy pierwiastków, uśrednione po względnym rozpowszechnieniu *izotopów* nie są liczbami całkowitymi. W neonie, obok izotopu ${}^{20}\text{Ne}$ znajdujemy w naturze 9% izotopu ${}^{22}\text{Ne}$, stąd średnia masa 20,18. Średnia masa pierwiastka chemicznego chloru wynosi 35,45.

W cięższych pierwiastkach przeważają neutrony nad protonami. I tak np. najbardziej rozpowszechniony izotop baru ($Z = 56$), o liczbie masowej $A = 138$, ma w jądrze 56 protonów i aż 82 neutrony (${}^{56+82=138}_{56}\text{Ba}$).

Okazuje się, że neutrony są niezbędne aby „wiązać” jądro w całość. Już w jądrze helu ${}^4_2\text{He}$, obok dwóch protonów znajdujemy dwa neutrony. Neutrony „dostarczają” wiązań, aby z wielu protonów stworzyć stabilne jądro atomu.

Zadanie 3.4.

Z jaką siłą odpychają się elektrycznie dwa protony w jądrze helu? Załóżmy wzajemną odległość protonów od siebie $r = 1 \cdot 10^{-15}$ m; masa protonu jest 1837 razy większa od masy elektronu a masa elektronu to $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg. Ładunek protonu jest równy ładunkowi elektronu ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C). Gdyby protony nie były związane siłami jądrowymi, z jakim przyspieszeniem rozleciałyby się dla tej odległości r ?

⁵ Ogólnie, jądro atomu neonu może zawierać od 6 do 24 neutronów, ale tylko *izotopy* zawierające 10, 11 lub 12 neutronów są stabilne. Najbardziej rozpowszechnionym jest izotop z 10 neutronami (rozpowszechnienie 90%) i z 12 neutronami (9%).

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



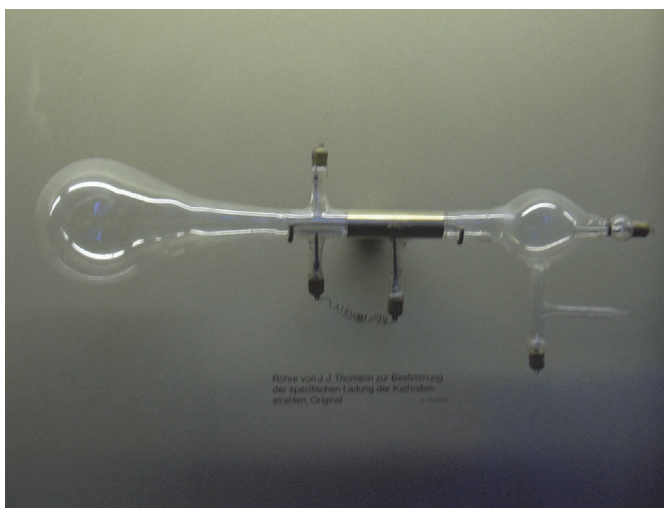
Rozpady promieniotwórcze są więc pewnego rodzaju „alchemią” – możemy zamieniać jeden pierwiastek chemiczny na inny. W przykładzie (3.3) neon zamienia się w sód.

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

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, odchyłanie 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.

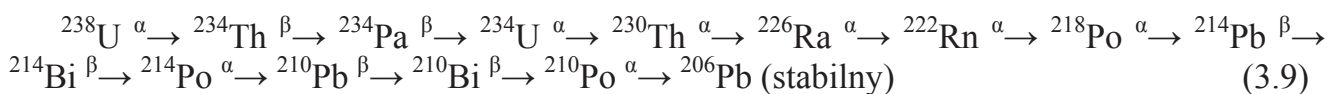
Rozpady beta są rozpadami, w których emitowane są cząstki o ujemnym ładunku elektrycznym (elektrony), w rozpadach alfa – cząstki o ładunku dodatnim, ale nie pojedyncze protony i neutrony, jakby tego można oczekiwać, tylko „zlepki” tych cząstek, w postaci „gotowego” jądra helu. Okazuje się, że takie gotowe 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



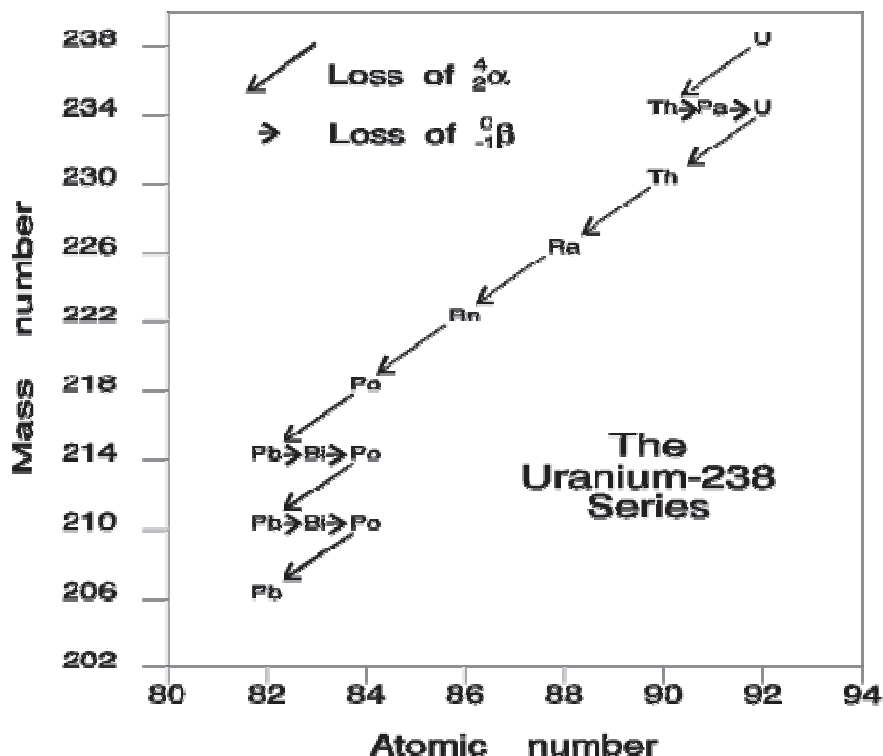
Powstający izotop toru ${}^{234}\text{Th}$ jest nietrwały i rozpada się w czasie 24 dni; w kolejnych reakcjach powstaje pluton, inne izotopy uranu i toru, rad, radon (szlachetny gaz, radioaktywny) itd. Cały łańcuch rozpadu uranu ${}^{238}\text{U}$ jest skomplikowany i obejmuje zarówno przemiany α jak 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.

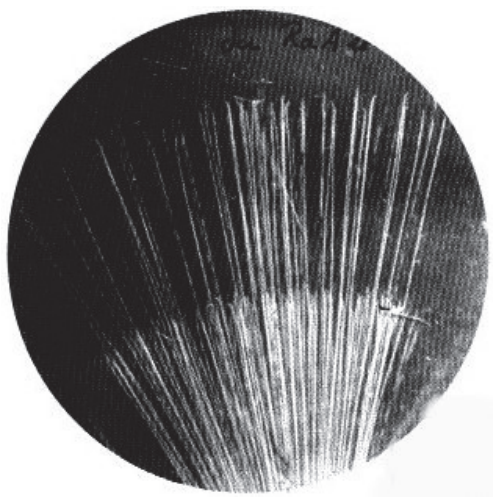
nazywamy efektem tunelowym a *prawdopodobieństwo* przeniknięcia przez barierę zależy do jej szerokości, wysokości oraz energii cząstki padającej. Rozpady alfa to zjawisko kwantowego tunelowania tych cząstek przez barierę potencjału. Podając prawa świata kwantowego wspomnieliśmy o równaniu Schrödingera: 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}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}Po wynosi 138 dni, to z jednego grama polonu po 138 dniach zostanie pół grama, po kolejnych 138 dniach – $\frac{1}{4}$ grama, po kolejnych 138 dniach – $\frac{1}{8}$ 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}U i ^{40}K izotopy nawet tego samego pierwiastka chemicznego mogą mieć bardzo różne czasy połowicznego rozpadu¹³. 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 β); bizmut $^{214}_{83}\text{Bi}$ - 20 minut; w kolejnym rozpadzie β 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 α) 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)

¹³ 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 τ ; $T_{1/2} = \tau \ln 2$

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 nastręcza 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!¹⁴

W latach 30-tych XX wieku zauważono jeszcze jedną trudność z wynikami doświadczeń na rozpadach 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*¹⁵).

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 Słońca¹⁶. W każdej sekundzie przez 1 cm² powierzchni naszego ciała przechodzi 65·10⁹ 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.

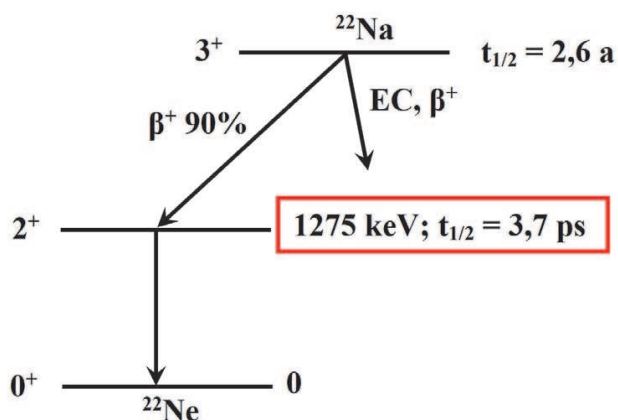
Promieniowanie gamma może towarzyszyć zarówno rozpadom alfa jak beta. Na rys. 3.8 pokazujemy schemat rozpadu β^+ , czyli z powstaniem antyelektronu, dla jądra sztucznego izotopu sodu, ²²Na. Kwant gamma, o energii 1,2 MeV jest emitowany bardzo krótko po rozpadzie neutronu i jego emisja związana jest z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

¹⁴ Prawo zachowania spinu jest w fizyce tak samo ważne jak prawo zachowania energii.

¹⁵ Według wszelkich obecnych danych antyneutrino różni się od neutrino tylko spinem.

¹⁶ 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 β^+ sztucznego izotopu sodu ^{22}Na o czasie połowicznego rozpadu 2,6 roku; powstaje jądro neonu ^{22}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.

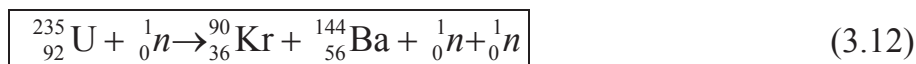
Fizycy, poczynawszy od prac córki Marii Skłodowskiej – Curie, Ewy i jej męża Fryderyka Joliot, nauczyli się wytwarzać wiele sztucznych izotopów bombardując inne za pomocą neutronów, protonów, cząstek alfa itd. Powstające sztucznie wytworzone izotopy w wielu przypadkach są nietrwałe, ale mają ważne zastosowania.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

Możliwy jest na przykład wspomniany już rozpad β^+ - z emisją pozytonu, w izotopach ze względny nadmiarem protonów. Przykładem jest sód ^{22}Na rozpadający się¹⁷ z czasem połowicznego zaniku 2,6 roku na rzadki izotop neonu ^{22}Ne . Emitowane pozytony wykorzystywane są do wykrywania mikro-defektów, np. w materiałach półprzewodnikowych. Innym izotopem rozpadającym się w procesie β^+ jest fluor ^{18}F ($T_{1/2} = 110$ min) używany w tomografii anihilacji pozytonów (PET) do wykrywania nowotworów.

3.8. Reakcje jądrowe

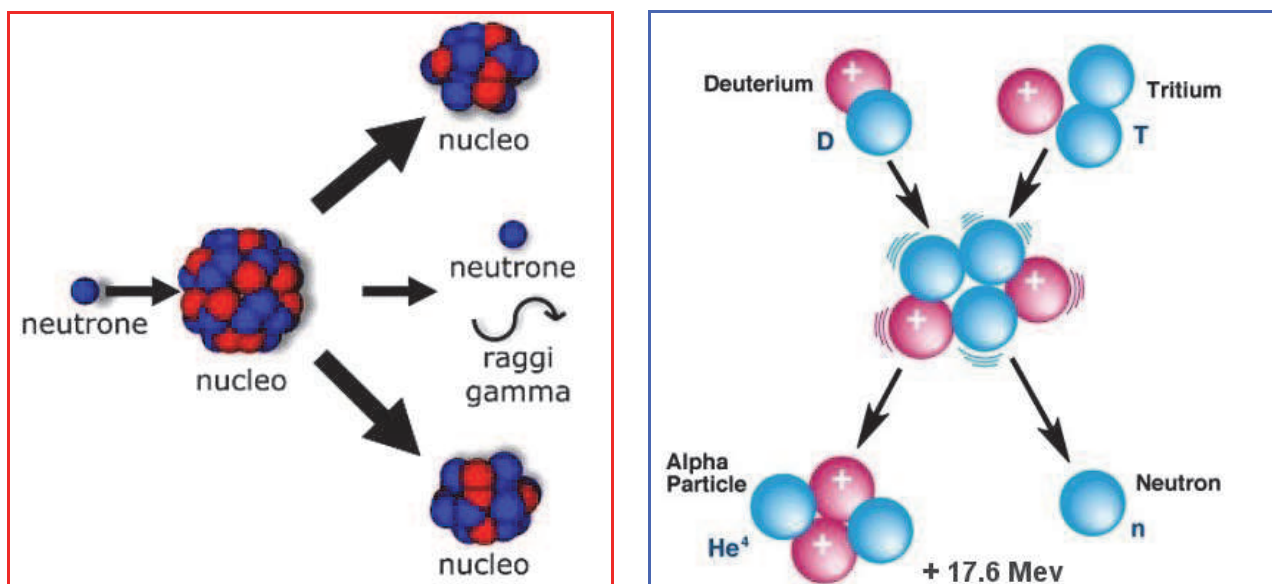
Krótko przed II wojną światową dwójka niemieckich uczonych, Lisa Meitner i Otto Hahn zauważyli, że rzadziej występujący izotop uranu ^{235}U po pochłonięciu neutronu nie podlega żadnej ze znanych wówczas przemian jądrowych, ale, żartobliwie mówiąc „rozpada się na dwie nierówne połowy”.

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



¹⁷ Stabilny izotop sodu to ^{23}Na .

W reakcji tej ciężkie jądro, obfite w neutrony, po wchłonięciu dodatkowego neutronu staje się niestabilne i rozpada się na dwa lżejsze fragmenty. W lżejszych jądrach proporcje między protonami i neutronami są bliższe 1:1, w związku z tym po rozpadzie uranu pozostają dwa lub trzy „nadmiarowe” neutrony. One mogą spowodować rozpady kolejnych jąder: rozwija się reakcja łańcuchowa. W każdej reakcji wyzwala się energia kilkuset MeV - tak działa bomba „atomowa”, a właściwiej *jądrowa*; na tej zasadzie działają również elektrownie *jądrowe*.



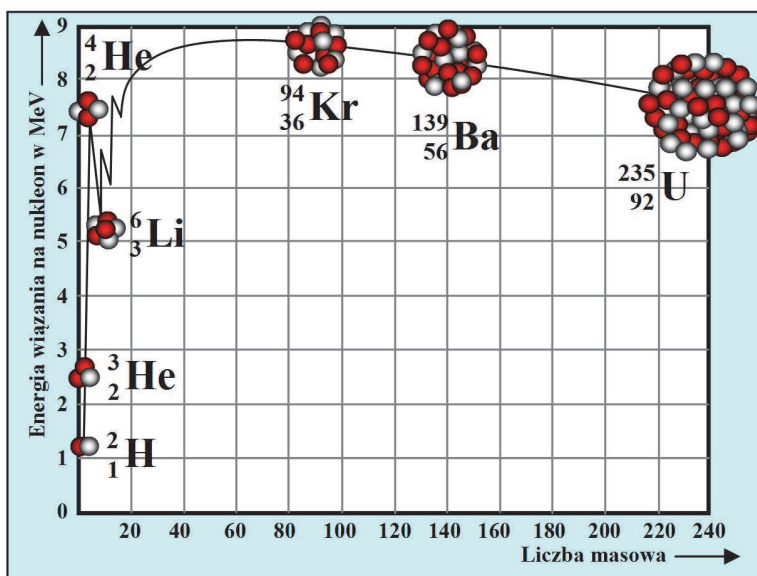
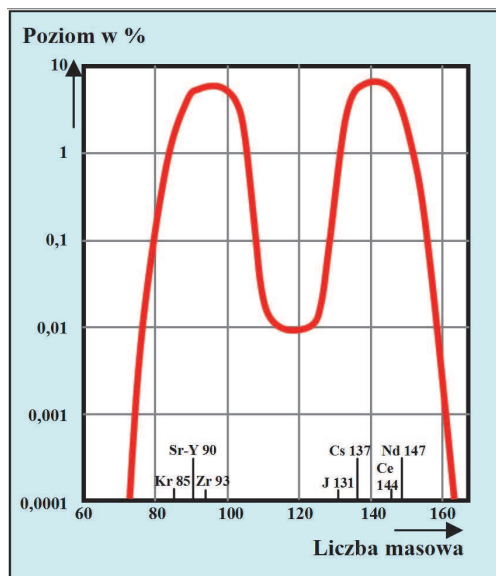
Ryc. 3.9. Dwie reakcje jądrowe dostarczające ogromnych ilości energii: **a)** rozszczepienie jądra, np. uranu ^{235}U po pochłonięciu neutronu; **b)** synteza (fuzja) dwóch jąder wodoru – deuteru 2H i trytu 3H w jądro helu 4He ; z fuzji pozostaje jeden neutron – część z 17,6 MeV energii jest unoszona przez 4He część przez neutron (Źródło: DeAgostini, i Every Day Science Blog)

Produkty reakcji rozszczepienia jądra uranu ^{235}U mogą być różne a zachowana jest jedynie sumaryczna liczba protonów (czyli liczba atomowa), zob. rys. 3.10. Jądro uranu to, modelowo, duża kropla, która rozpada się na dwie mniejsze, o rozmiarach trudnych do przewidzenia. To oznacza, że w wypalonym paliwie jądrowym znajdują się najróżniejsze pierwiastki chemiczne i izotopy o różnych czasach połowicznego zaniku – od pojedynczych dni do milionów lat.

Różnorodność powstających pierwiastków chemicznych stwarza poważne problemy bezpieczeństwa w przechowywaniu i/lub re-cyklingu produktów rozszczepienia uranu (także plutonu i innych pierwiastków). W produktach rozszczepienia znajdujemy też izotopy, które mogą zostać zaabsorbowane przez organizm człowieka, jak cez ^{137}Cs ($T_{1/2}=30$ lat), stront ^{90}Sr ($T_{1/2}=30$ lat), jod ^{131}I ($T_{1/2}=8$ dni), przez co technologie jądrowe wymagają szczególnych środków ostrożności.

W reakcji (3.12) rozszczepienia jąder uranu uzyskuje się duże (jak na potrzeby człowieka) ilości energii. Powodem tego jest specyficzna zależność energii wiązania jąder. Wspomnieliśmy już, że protony się odpychają, w związku z tym konieczna jest w jądrach obecność neutronów. Okazuje się, że po przekroczeniu pewnej sumarycznej liczby protonów i neutronów, energia wiążąca jądro w całość nie rośnie, ale maleje. Energię tę odnosimy do jednego nukleonu (czyli protonu lub neutronu). Energia wiązania cząstek alfa 4_2He wynosiła około 28 MeV, w przeliczeniu na jeden *nukleon* 7 MeV, znacznie więcej niż np. dla lżejszego izotopu helu 3_2He lub litu 6_3Li , zob. ryc. 3.10b. Z tego powodu cząstka alfa jest tak stabilna.

Z wykresu 3.10b wynika również inna, bardzo ważna konsekwencja praktyczna. Energię możemy uzyskiwać w reakcjach jądrowych *rozszczenia* ciężkich jąder, ale także *syntezy*, czyli „sklejania” większych jąder z mniejszych fragmentów.



Ryc. 3.10. a) Produkty rozszczepienia uranu ^{235}U (na dwa fragmenty) obejmują szeroki rozkład izotopów od $A = 70$ do $A = 170$; zwróć uwagę, że skala pionowa jest względna (0,1, 1, 10); **b)** energia wiązania na jeden nukleon w zależności od liczby masowej A ; cząstka alfa, czyli ^4He ma dużą energię wiązania; maksimum krzywa osiąga około żelaza ^{56}Fe ; dla jąder poniżej masy żelaza korzystna energetycznie jest synteza, powyżej żelaza – rozszczepienie (Źródło: European Nuclear Society)

Przykład 3.5.

Oblicz energię wiązania cząstek alfa ^4He . Masa jądra helu wynosi $3727,38 \text{ MeV}/c^2$, masa neutronu $939,57 \text{ MeV}/c^2$ a masa protonu $938,28 \text{ MeV}/c^2$.

Dane: $m_{\text{He}} = 3727,38 \text{ MeV}/c^2$, $m_n = 939,57 \text{ MeV}/c^2$, $m_p = 938,28 \text{ MeV}/c^2$

Jednostki: podane masy są w jednostkach bardzo wygodnych dla fizyków jądrowych. Są to masy już przeliczone na energie, według wzoru Einsteina (3.1) $E = mc^2$, i w dodatku podane nie w dżulach, ale bezpośrednio w elektronowoltach.

Suma mas wynosi $(2 \cdot 939,57 + 2 \cdot 938,28) = 3755,70 \text{ MeV}/c^2$.

Defekt masy wynosi więc $3755,70 - 3727,38 = 28,32 \text{ MeV}/c^2$.

Uzyskany wynik jest zgodny z podaną wcześniej wartością energii wiązania (stąd ją doświadczalnie znamy). Defekt masy jest całkiem duży: 0,8% masy jądra helu. To wyjaśnia, dlaczego energie uzyskiwane z przemian jądrowych są tak duże.

Zadanie (na sprawdzian): znajdź w internecie wartości masy protonu i neutronu wyrażone w kg i powtórz to obliczenie korzystając z równania Einsteina. Wynik wyraż z dżulach.

Z powyższego przykładu wynika jasno, że w reakcji



uzyskać można aż 28 MeV energii. Taki typ syntezy, z udziałem aż czterech cząstek nie jest możliwy do realizacji w warunkach ziemskich (jest on zapewne możliwy wewnątrz bardzo ciężkich gwiazd *neutronowych*). Tak w gwiazdach „zwykłych” w rodzaju Słońca jak do zastosowań energetycznych na Ziemi wykorzystywaną reakcją *syntezy termojądrowej* jest synteza helu z dwóch ciężkich izotopów wodoru – deuteru ^2H i trytu ^3T według wzoru



W reakcji tej wydzielą się 17,6 MeV. Wydaje się to mniej niż w reakcji rozszczepienia uranu, ale w odniesieniu do masy paliwa w reakcji **termojądrowej** wydzielą się około 4 razy więcej energii niż w reakcji „jądrowej”. Eksplozja bomby termojądrowej o „sile” równoważnej 15

mln ton trotylu na atolu Bikini na Pacyfiku w 1954 roku była jednym z elementów narastającej po II Wojnie Światowej wrogości między USA i Związkiem Radzieckim.

Reakcja (3.13) jest „motorem napędowym” gwiazd. W warunkach ziemskich synteza termojądrowa byłaby źródłem ogromnych ilości stosunkowo „czystej” energii. Trudnością w jej praktycznym zastosowaniu jest konieczność stosowania ogromnych temperatur dla zainicjowania reakcji (3.13). Temperatury te są niezbędne, aby zbliżyć odpychające się elektrostatycznie jądra na odległości, w których zaczynają działać przyciągające siły jądrowe. We wnętrzu gwiazd panuje temperatura 15 mln K i ogromne ciśnienia wynikające z siły ciężenia; w warunkach laboratoryjnych niezbędne jest uzyskanie temperatury 150 mln K. Warunki takie udało się już uzyskać w próbnej instalacji termojądrowej w Anglii.

Znamy dwa sposoby uzyskania znacznych ilości energii z przemian jądrowych:

- w reakcji rozszczepiania, np. rzadkiego izotopu uranu ^{235}U na dwa fragmenty; reakcja jest powodowana pochłonięciem neutronu; jest to mechanizm działania elektrowni jądrowych

- w reakcji syntezy (termojądrowej), gdy z lżejszych jąder powstają cięższe, aż do żelaza; to jest mechanizm wytwarzający energię w gwiazdach.

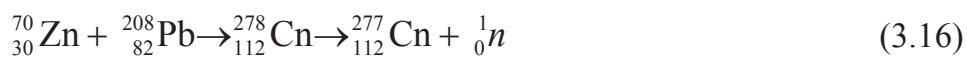
Podane reakcje (3.12) rozszczepienia jąder uranu ^{235}U i termojądrowej syntezy helu z deuteru i trytu (3.14) to dwie tylko z bardzo wielu możliwych *reakcji jądrowych*. Służą one np. do otrzymywania sztucznych, zazwyczaj nietrwałych izotopów, np. do zastosowań w medycynie (jak izotop ^{18}F stosowany w tomografii PET). Pierwsza sztuczna reakcja jądrowa została odkryta przez E. Rutherforda w 1919 roku – w wyniku bombardowania jąder azotu za pomocą cząstek alfa powstaje niestabilny izotop tlenu i emitowany jest proton, według wzoru



Reakcje jądrowe zachodzące w atmosferze, pod wpływem wysokoenergetycznego promieniowania kosmicznego¹⁸ są źródłem izotopów wykorzystywanych np. do datowania osadów organicznych. Izotopem takim, niezwykle przydatnym do datowania np. drewnianych prehistorycznych palisad, jest izotop węgla ^{14}C , o czasie połowicznego zaniku $T_{1/2} = 5370$ lat



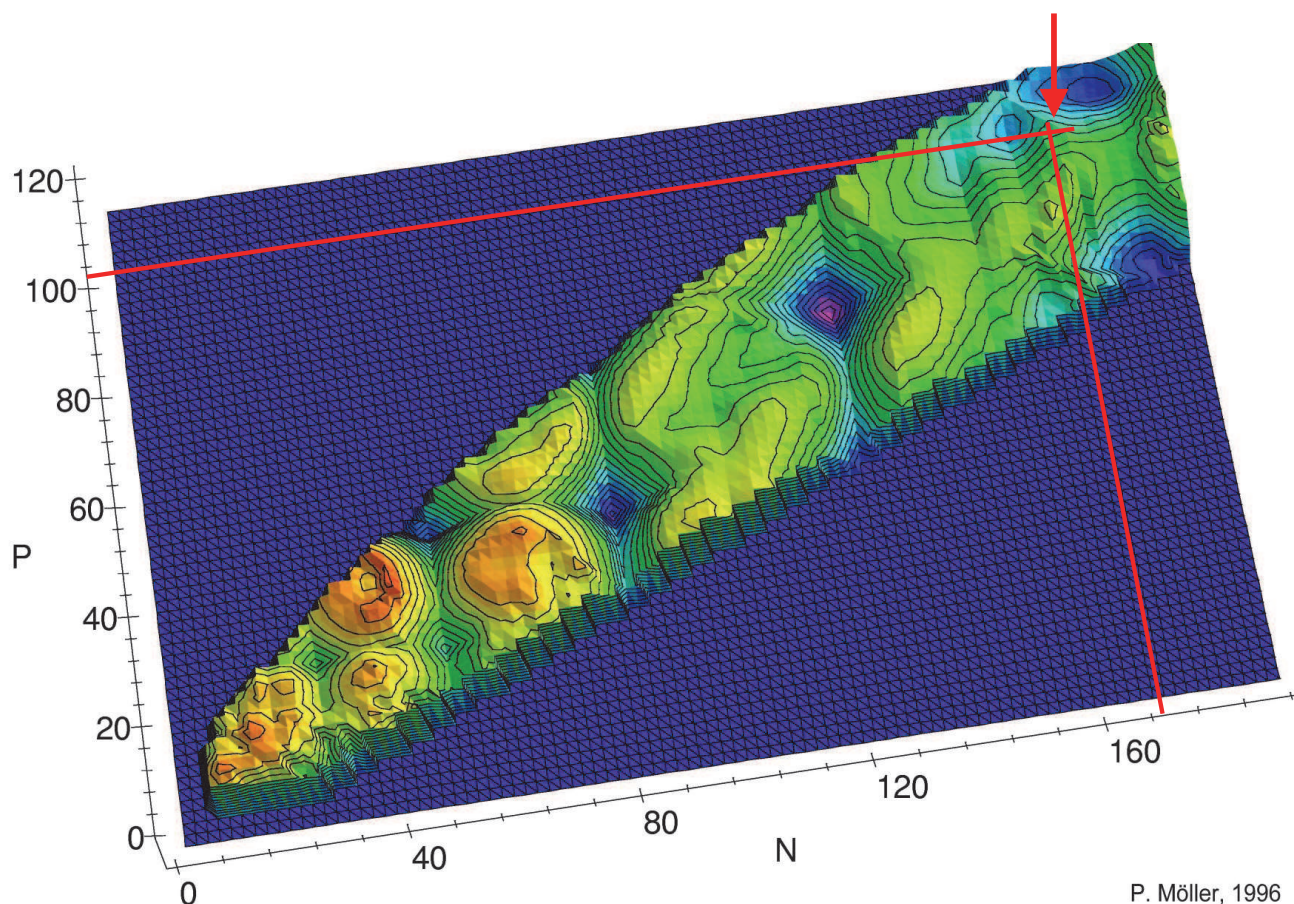
Metodą „sklejania” jąder atomowych rozpędzonych do wielkich energii fizycy potrafią również wytwarzać pierwiastki chemiczne nigdzie nie spotykane w naturze. Wspomniany już Copernicium $^{277}_{112}\text{Cn}$ powstał w wyniku zderzenia jąder cynku $^{70}_{30}\text{Zn}$ i ołowiu $^{208}_{82}\text{Pb}$ a nadmiarowy neutron „odparował” po zderzeniu.



Nazwa copernicium została nadana w dzień urodzin Kopernika, 19.02.2010 roku. Jest to pierwiastek przypominający chemicznie (zapewne) rtęć, i przypuszczalnie pierwszy z pierwiastków na hipotetycznej „wyspie stabilności”¹⁹.

¹⁸ W promieniowaniu kosmicznym znajdujemy protony, neutrony, alfa, miony, mezony π , kwanty gamma itd.

¹⁹ Stabilność jąder zależy zarówno od ilości protonów jak neutronów. Stwierdzono, że jądra o niektórych ilościach neutronów i protonów są silniej związane (stabilniejsze) niż inne. Tzw. „liczby magiczne” dla protonów to 2 (stąd, ^4_2He), 8 ($^{16}_8\text{O}$), 20 ($^{40}_{20}\text{Ca}$), 28 ($^{56}_{26}\text{Fe}$, choć niedokładnie), 50 ($^{120}_{50}\text{Sn}$), 82 i 114 (a 126 dla neutronów, stąd stabilny izotop $^{208}_{82}\text{Pb}$). Rozpowszechnienie pierwiastków chemicznych na Ziemi (i w kosmosie) wynika m.in. z tych liczb magicznych.



P. Möller, 1996

Ryc. 3.11. Półwysep znanych izotopów (oś X – liczba neutronów, oś Y – liczb protonów) jest szeroki, ale tylko niektóre z jąder, w jego centralnej części są stabilne; widoczne „doliny” większej energii wiązania dla protonowych i neutronowych liczb magicznych; duży niebieski „basen” to ołów; copernicium $_{112}\text{Cn}$ zaznaczone strzałką (Źródło: prof. S. Hoffmann, wykład na UMK 26.03.2011)

3.9. Proton i neutron: kwarki

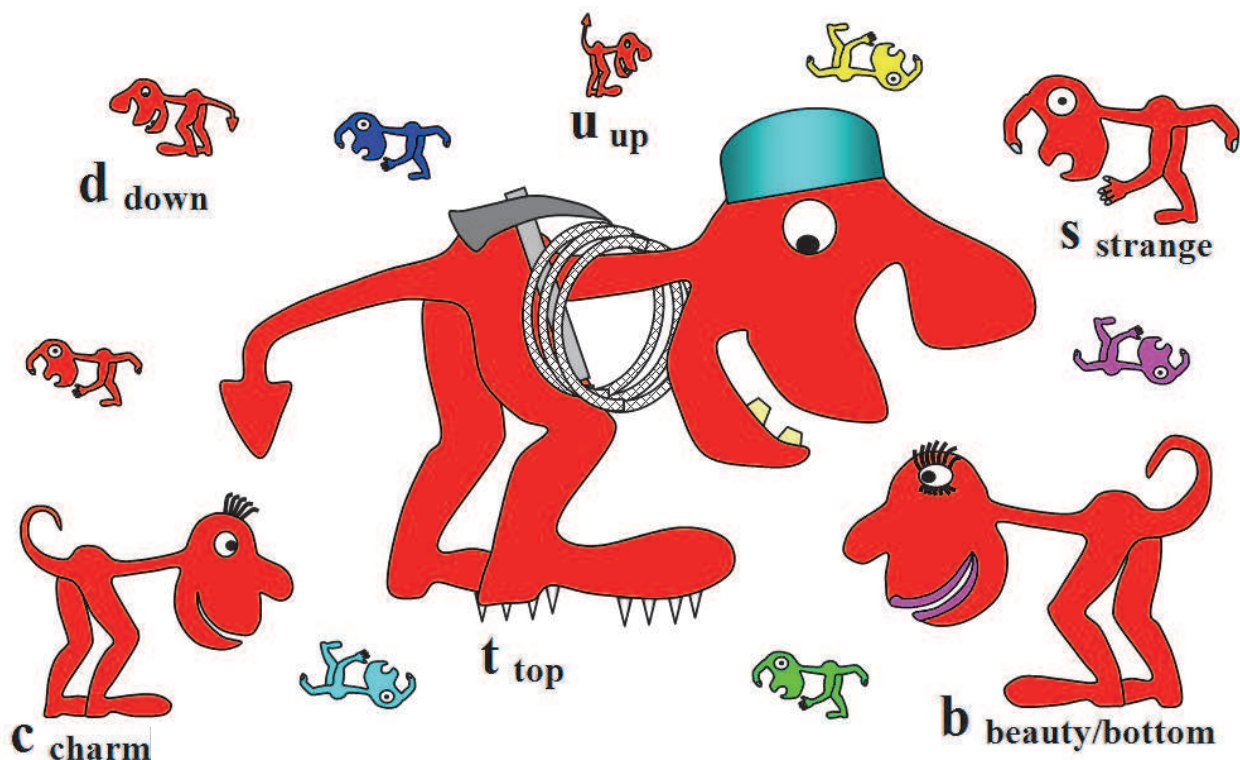
W par. 3.6 o rozpadach promieniotwórczych omówiliśmy najpierw rozpad beta minus (tzn. z emisją elektronu) a później rozpad alfa. Okazało się jednak, że rozpad alfa jest stosunkowo prosty do wyjaśnienia: „skotłowane” w jądrze protony i neutrony mają sporą szansę na utworzenie dość stabilnej struktury w postaci cząstki alfa ^4_2He a ta, poprzez efekt tunelowy, może z jądra uciec. Rozpad beta, czyli przeistoczenie się neutronu w proton wydawało się reakcją prostą, a w rzeczywistości wymaga istnienia „egzotycznej” cząstki – neutrino, praktycznie nieoddziałującego z materią.

Dodatkowo, stwierdzono, że w niektóre jądra (jak ^{22}Na , ^{19}F) rozpadają się w tzw. procesach „beta plus”, czyli z emisją dodatniego elektronu, czyli pozytonu (anty-elektronu). Zachodziłaby więc reakcja rozpadu protonu na neutron, pozyton i neutrino. Z kolei masa protonu jest mniejsza niż masa neutronu. Trudności w zrozumieniu rozpadów beta jest wiele. Widocznie i proton i neutron nie są wcale cząstkami elementarnymi, ale się jeszcze z czegoś składają.

Kolejnym argumentem za złożoną strukturą protonu i neutronu były odkrycia innych „cząstek elementarnych”, począwszy od lat 40-tych ubiegłego wieku, zob. par. 3.10. Jeżeli proton i neutron są w jądrze związane silnymi a krótko-zasięgowymi oddziaływaniami, to musi istnieć cząstka je wiążąca. Postępy w badaniu *promieniowania kosmicznego* oraz budowa przyspieszaczy cząstek, czyli *akceleratorów* otworzyły prawdziwy „róg obfitości” dla badaczy cząstek elementarnych.

Wszystkie te badania doprowadziły do wniosku, że proton i neutron muszą składać się z mniejszych części, nazwanych²⁰ przez M. Gell-Manna „kwarkami”. Dane doświadczalne wskazywały, że są dwa rodzaje kwarków – nazwano je *up* i *down* (górny i dolny). Kwarki w protonie i neutronie są trzy, więc mają ułamkowe ładunki elektryczne: kwark *up* ma ładunek $+2/3e$ a kwark *down* $-1/3e$, gdzie e jest, jak zwykle, ładunkiem elektronu²¹.

Na ryc. 1.10b przedstawiliśmy trzy kwarki w protonie i anty-protonie za włoskim rysownikiem, który wyobraża je sobie jako kolorowe kuleczki. Ziemia z dalekiego kosmosu też wygląda jak mała kuleczka, a ma swoich mieszkańców i ich miasta. Może więc i kwarki mają jakąś postać? Na ryc. 3.12 przedstawiamy kwarkowe „zoo”, tak jak je sobie wyobraża dr. T. Wróblewski z Akademii Pedagogicznej w Słupsku.



Ryc. 3.12. Kwarkowe „zoo”, według dr T. Wróblewskiego; rozmiary kwarków są tak dobrane, że czwarta potęga ich rozmiarów liniowych jest proporcjonalna do ich masy; „morda” kwarka – prawo, lewo wskazuje na znak ładunku, kwarki występują w trzech kolorach. © TW i GK

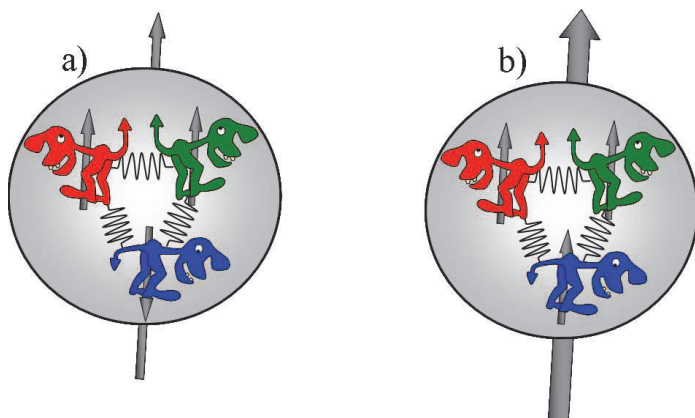
Kwarków jest sześć, pogrupowanych w trzy rodziny. Tylko dwa najbliższe z nich, kwark *up* i *down* wchodzi w skład „zwykłej” materii. Proton składa się z dwóch kwarków *up* i jednego cięższego, *down*. Neutron składa się z dwóch kwarków *down* i jednego *up*. Rozpad β^- (beta minus) polega na przemianie jednego kwarka *down* w neutronie w kwark *up*, rozpad β^+ na przemianie jednego kwarka *up* w protonie na kwark *down*. Reakcję rozpadu β^- (3.10) możemy więc zapisać jeszcze raz, tym razem jako rozpad kwarku *down*.



Łatwo zauważyć, że ładunek sumaryczny jest zachowany. Kwarki są fermionami, mają spin połówkowy, więc i sumaryczny spin w równaniu (3.16) jest zachowany. Jak się sumują spiny kwarków wewnątrz protonu i „cięższego protonu”, tzn. hiperonu delta Δ^+ , przedstawia rys. 3.13.

²⁰ Terminu „quark”, po niemiecku „twaróg” użył irlandzki pisarz James Joyce w „Trenie Finnegana”

²¹ Dokładniej, przez e oznaczyliśmy tu wartość bezwzględną ładunku elektronu.



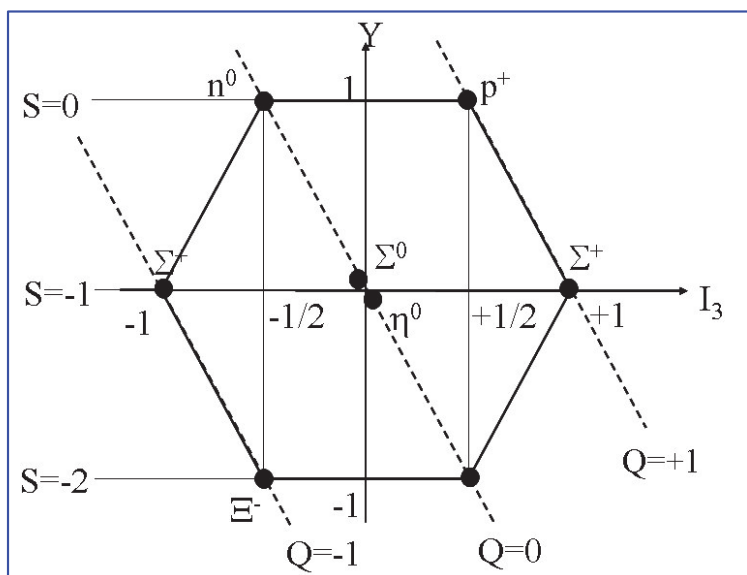
Ryc. 3.13. Proton (a) i cząstka Δ^+ są zbudowane tak samo – z dwóch kwarków *up* i jednego kwarku *down*; różnią się jedynie spinem, co powoduje, że cząstka Δ^+ jest aż o 30% cięższa niż proton (rys. dr T. Wróblewski © TW i GK)

Pozostaje jeszcze kwestia masy kwarków – i to jest problem „delikatny”. Mimo, że w każdym z nas są miliardy miliardów miliardów ($>10^{27}$) kwarków, ich masy znamy z bardzo kiepską dokładnością. Według najlepszych oczarowań, tak doświadczalnych jak teoretycznych, masa kwarku *up* zawiera się między $1,5 < m_{up} < 5$ a masa kwarku *down* między $5 < m_{down} < 9$, gdzie użytą jednostką jest stosowany już przez nas MeV/c^2 .

Zadziwiające jest, że tak lekkie (trzy) kwarki, nieco cięższe jedynie od elektronu $m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2$, składają się na tak ciężkie *nukleony* (przypominamy, o masach około $938 \text{ MeV}/c^2$). Jest to oczywiście, efekt relatywistyczny – kwarki w nukleonach są tak „rozpędzone”, że ich gigantyczną energię kinetyczną obserwujemy jako wzrost masy. Kto to wyjaśni dokładniej, uzyska bez wątpienia Nagrodę Nobla!

3.10. Cząstki elementarne

Hipoteza kwarków okazała się niezwykle cenna dla badań teoretycznych (również doświadczalnych) nad cząstkami elementarnymi. Podobnie jak Sommerfeld w 1916 roku, tak fizycy jądrowi w latach 60-tych XX wieku wyszukiwali nowe liczby kwantowe, zachowane w przemianach cząstek „elementarnych”. Tworzyli również schematy, przypominające tablicę Mendelejewa. Przypominamy jedną z takich klasyfikacji, dla cząstek „ciężkich”, tzw. barionów.



Ryc. 3.14. Próba klasyfikacji „ciężkich” cząstek elementarnych, tzw. barionów: oktet barionowy; obserwowane cząstki zostały uporządkowane według spinu S i ładunku elektrycznego Q ; neutron znajdujemy w lewym górnym rogu a proton w prawym (rys. TW)

Wprowadzenie pojęcia kwarku bardzo uprościło klasyfikację cząstek. Według naszej obecnej wiedzy, kwarki mogą łączyć się jedynie w grupy po dwa (kwark + anty-kwark) lub w grupy po trzy, jak $uud = \text{proton}$, $udd = \text{neutron}$.

Zestawy kwark + anty-kwark nazywamy *mezonami*, czyli cząstkami „pośrednimi”. Rzeczywiście, pierwszy (w 1949 r.) odkryty mezon, π^+ , ma masę $139 \text{ MeV}/c^2$. Składa się on z

kwarku up i antykwarku $\bar{d}$. Jego antycząstka, mezon π^- ma identyczną masę ale ładunek przeciwny; składa się z anty-kwarku up , $\bar{u}$ i kwarku $down$, d : $\pi^- = (\bar{u}d)$. Mezon obojętny elektrycznie π^0 jest kwantową „mieszaniną” mezonów π^+ i π^- : $\pi^0 = 1/\sqrt{2}(u\bar{u} + d\bar{d})$.

Mezony są niezwykle ważne: to one „sklejają” składniki jądra – protony i neutrony. Tak jak pole elektromagnetyczne (fotony) są przyczyną oddziaływania między ładunkami elektrycznymi, tak piony wymieniane bez przerwy między protonami i neutronami są przyczyną oddziaływań silnych (w jądrze). Rzuca to nowe światło na strukturę jądra: nie możemy w jądrze rozróżnić protonów od neutronów, bo bez przerwy wymieniają one między sobą własne składniki, czyli zespoły kwarków.

W ten sposób, związane przez kwarki w mezonach protony są neutronami a neutrony protonami. Od czasu do czasu, w cięższych jądrach powstaje przejściowy twór, cząstka alfa i może ona jądro opuścić. W reakcjach jądrowych, po przegrupowaniu kwarków, czasem zostaje namiarowy neutron, czasem proton. Reakcja przemiany dwóch kwarków, jak (3.16) również podlega zasadom prawdopodobieństwa – rozpad kwarków jest rządzone przez tzw. oddziaływania *słabe*.

Które z obserwowanych cząstek możemy zakwalifikować jako „elementarne”? Z pewnością *foton* i *elektron*. Mimo, że w produktach zderzeń wysokoenergetycznych elektronów np. z pozytonami obserwujemy roje innych cząstek, to pochodzą one z einsteinowego $E = mc^2$, czyli zamiany energii kinetycznej cząstek na masę innych cząstek. Nie zaobserwowano nigdy rozpadu elektronu na mniejsze fragmenty – jest to cząstka elementarna.

Elektron ma dwóch cięższych „partnerów”, które żyją bardzo krótko i rozpadają się m.in. na elektron. Są to tzw. miony, μ (masa 207 razy większa niż elektron) i cząstka tau (τ) o masie 3477 razy większej niż masa elektronu. Rodzinę tych trzech cząstek nazywamy *leptonami*, czyli cząstkami lekkimi. Trzy leptony (i trzy anty-leptony) to też cząstki elementarne.

Również kwarki tworzą trzy rodziny (generacje): *up – down*, *strange – charm*, *top – bottom*, o rosnących masach. Wyższe generacje kwarków nie są stabilne. Pierwszy kwark „egzotyczny”, *strange* – dziwny odkryli w 1952 roku Polacy, M. Danysz i J. Pniewski. Kolejne kwarki odkrywano były za pomocą wielkich akceleratorów. Czy już wszystko wiemy?²²

Model teoretyczny zakładający trzy generacje kwarków i leptonów jak do tej pory się sprawdza. Nie bardzo potrafimy przewidzieć np. masę protonu, ale model ten, oparty na parametrach uzyskany z wieloletnich doświadczeń, dobrze wyjaśnia obserwowane różne reakcje między cząstkami.

Podjęto wiele prób rozszerzenia/ zmiany tego modelu. Wymienimy tu teorię strun, hipotezy o ukrytych wymiarach czasoprzestrzeni, grawitację kwantową itd. Żadna z nich nie daje tak rewolucyjnych wniosków o świecie wokół nas, jak to dały np. prawa Maxwella. Tymczasem, wydaje się, że nadciąga burza, podobna do hipotezy Plancka.

W rozważaniach o Wszechświecie, „nie zgadza” się bilans 96% masy i energii. Na razie, roboczo, nieobserwowalny (a z pewnością istniejący) Wszechświat nazwaliśmy *ciemną masą* i *ciemną energią*. Co to jest, dziś (01/07/2012) tak naprawdę nie mamy nawet mglistego pojęcia.

²² Dodatkowe materiały, stworzone w ramach projektu UE „Physics is Fun” koordynowanego przez autora, znajdzie Czytelnik na stronach internetowych ZDF UMK w wersji polskiej http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/index-pl.html i rozbudowanej wielojęzycznej http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/html/index-en.html W szczególności, cząstkom elementarnym zostało poświęconych 5 plakatów dydaktycznych, zob. np. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pliki/Kwarki_plakaty/enigma5pl.pdf