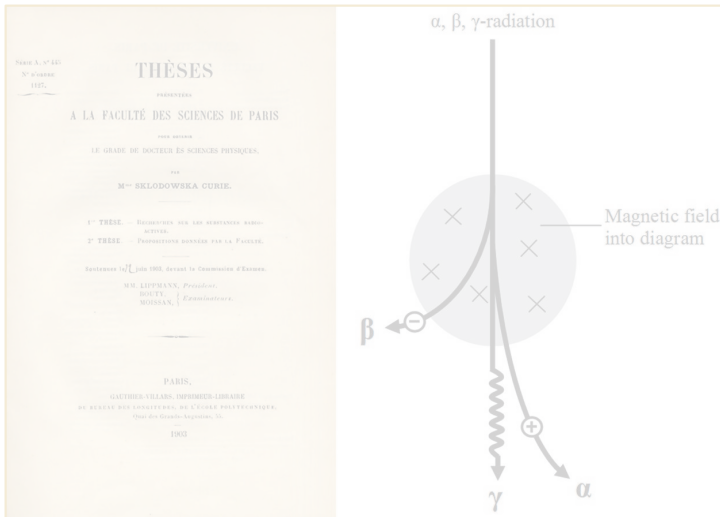


### 3.4. Rozpady promieniotwórcze

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 neutronów<sup>5</sup>. 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

$$\begin{array}{l} A - \text{liczba masowa} \\ Z - \text{liczba atomowa} \end{array} X \quad (3.2)$$

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

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 ( ${}_{56}^{56+82=138}\text{Ba}$ ).

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  $r$ ?

<sup>5</sup> 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)<sup>6</sup>

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

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  $^1\text{H}$ ), ale jest ona nieco różna od masy neutronu<sup>7</sup>. Dodatkowo, obok izotopu  $^1\text{H}$  wodoru w naturze występuje 0,01% cięższego izotopu, zwanego *deuterem*  $^2_1\text{H}$ , 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  $^{12}\text{C}$ .

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

### 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 „ $\beta$ ”.

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

<sup>7</sup> Zauważmy, że przemiana neutronu w proton w rozpadzie  $\beta^-$  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  $0,51 \text{ MeV}$