

## Budowa atomu

### Pojęcie atomu:

- filozofowie w starożytnej Grecji (*atomos* – niepodzielny)
- John Dalton – początek XIX wieku (prawo stosunków wielokrotnych) – atom, jako najmniejsza, niepodzielna cząstka pierwiastka chemicznego

### Budowa atomu:

- odkrycie elektronu i atomowych jonów dodatnich przez J. J. Thomsona (1897) – model atomu jako „ciasta z rodzynkami”
- odkrycie jądra atomowego przez E. Rutherforda (1911) – planetarny model atomu
- odkrycie protonu przez E. Rutherforda (1919/1925)
- odkrycie neutronu przez J. Chadwicka (1932)

### Cząstki tworzące atom (podane są wartości przybliżone):

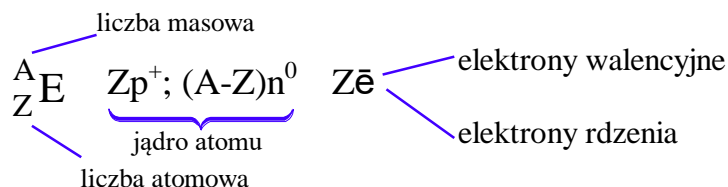
- jądro atomowe:
  - o proton,  $p^+$ , o masie  $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,0073 \text{ u} = 1836 m_e$ , ładunku elektrycznym  $q_{p^+} = +q_e = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  (dodatni ładunek elementarny), promieniu ok.  $10^{-15} \text{ m}$ , zbudowany z 2 kwarków górnych i 1 dolnego (uud)
  - o neutron,  $n^0$ , o masie  $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,0087 \text{ u} = 1839 m_e$ , zerowym ładunku elektrycznym,  $q_n = 0$ , promieniu ok.  $10^{-15} \text{ m}$ , zbudowany z 2 kwarków dolnych i 1 górnego (udd)
- elektrony:
  - o elektron,  $e^-$ , o masie  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ u}$ , ładunku elektrycznym  $q_{e^-} = -q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  (ujemny ładunek elementarny), promieniu rzędu  $10^{-18} \text{ m}$  lub mniejszym, nie wykazuje struktury wewnętrznej

Atom jest elektrycznie obojętny, ma promień rzędu  $10^{-10} \text{ m}$ , masę bliską całkowitej wielokrotności masy protonu/neutronu.

### Parametry atomu:

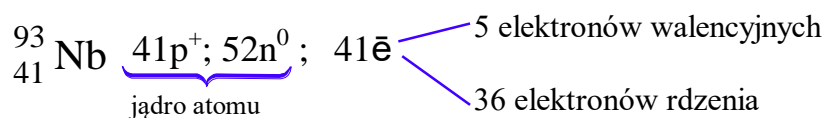
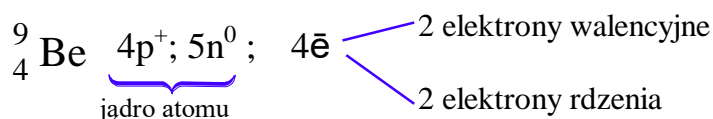
- liczba atomowa,  $Z$ , określa liczbę protonów w jądrze atomu, a tym samym liczbę elektronów w obojętnym atomie (ładunek elektronu jest dokładnie przeciwny ładunkowi protonu, a atom obojętny elektrycznie)
- liczba masowa,  $A$ , określa łączną liczbę protonów i neutronów (łącznie: nukleonów) w jądrze atomu; jest w przybliżeniu równa masie atomu w jednostkach masy atomowej, ponieważ każda z tych cząstek ma masę około 1 jednostki, a wkład elektronów do masy atomu można, praktycznie, pominąć, jako mających masę ok. 2000 razy mniejszą od masy każdego z nukleonów.

Schematycznie, budowę (skład) atomu można zapisać następująco:



Liczbę elektronów walencyjnych ustala się na podstawie numeru grupy w układzie okresowym, w której znajduje się dany pierwiastek. Z pewnymi zastrzeżeniami można przyjąć, że dla grup 1. – 11. jest to numer grupy, dla grup 12. – 17. – numer grupy minus 10, a dla grupy 18. – zero. Pozostałe elektrony w atomie tworzą tzw. rdzeń lub zrąb atomowy.

Przykłady:



### Nuklidy, izotopy, pierwiastki chemiczne:

Zbiór identycznych atomów, które mają daną liczbę atomową i masową nazywa się **nuklidem**. Słowo *nuklid* zaproponował T. P. Kohman w 1947 r. jako „rodzaj atomu, scharakteryzowany przez skład jego jądra”, określony przez zawartość określonej liczby protonów i neutronów.

**Izotopy**, to odmiany danego pierwiastka chemicznego, różniące się liczbą masową, a więc liczbą neutronów w jądrze atomowym, przy tej samej liczbie protonów.

Termin *izotopy* pochodzi od greckich słów *izos* – taki sam i *topos* – miejsce, w odniesieniu do tego samego miejsca w układzie okresowym, zajmowanego przez te, różniące się masą, atomy. Został zaproponowany przez M. Todd w 1913 r., gdy Frederick Soddy odkrył taki przypadek, badając pewne produkty rozpadu promieniotwórczego.

**Pierwiastek chemiczny** można zatem zdefiniować jako zbiór atomów o danej liczbie atomowej lub jako substancję, która zawiera atomy o identycznej liczbie atomowej.

W fizyce jądrowej stosuje się dodatkowo pojęcia:

- izotony – nuklidy o identycznej liczbie neutronów w jądrze,
- izobary – nuklidy o identycznej liczbie masowej,
- izomery jądrowe – atomy, mające identyczny skład jądra, ale różniące się jego energią.

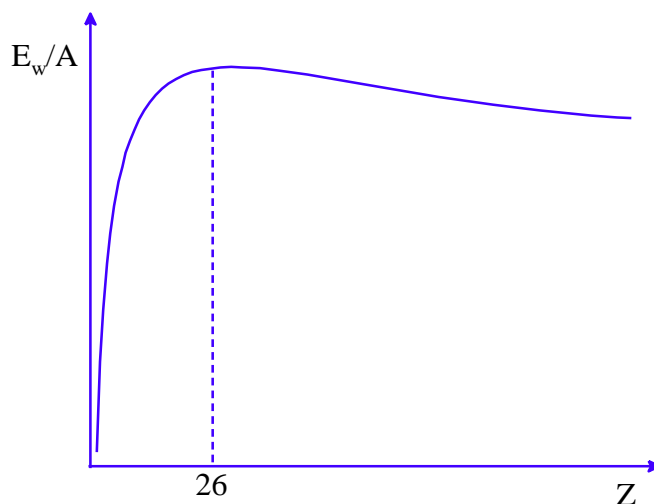
Pierwiastki chemiczne występujące w przyrodzie mogą być zarówno nuklidami, np. sód, fluor, złoto, jak i zawierać od dwóch do 10 trwałych (lub praktycznie trwałych) izotopów. Przykłady: wodór zawiera dwa trwałe izotopy  ${}^1_1\text{H}$  – tzw. prot,  ${}^2_1\text{H}$ , czyli  ${}^2_1\text{D}$  – deuter lub tzw. ciężki wodór, oraz śladowe ilości nietrwałego  ${}^3_1\text{H}$ , czyli  ${}^3_1\text{T}$  – trytu. Najwięcej, 10 trwałych izotopów, zawiera cyna.

## Masa atomowa:

Już w definicji Daltona każdy atom ma określoną masę. Z pomiarów ilościowego składu związków chemicznych można obliczyć proporcje mas atomów. Pomijając dość złożoną historię definicji, można powiedzieć, że masa atomowa, to masa atomu w jednostkach masy atomowej (oznaczanych jako „u”, od *unit*, „Da” – *dalton*, „amu” – *atomic mass unit*). Sens tej jednostki jest taki, że najlżejszy atom, atom wodoru  ${}^1_1\text{H}$ , ma masę, mniej więcej, jednej jednostki. Ze względów praktyki pomiarowej, po różnych ustaleniach przyjęto, że jednostka masy atomowej równa jest 1/12 masy atomu węgla  ${}^{12}_6\text{C}$ , niezwiązanego chemicznie, będącego w stanie o najniższej energii. Zatem:  $1u = \frac{1}{12}m_{{}^{12}_6\text{C}}$ , czyli  $m_{\text{at}}({}^{12}\text{C}) = 12,000\dots u$ . Jednostka masy atomowej wyrażona w kilogramach, to, w przybliżeniu,  $1,6605 \cdot 10^{-27}$  kg, a w stosunku do masy elektronu to około 1822,9  $m_e$ .

Łatwo zauważyć, że zarówno proton, jak i neutron mają masy większe niż jednostka masy atomowej. Jest tak dlatego, że w procesie tworzenia z nukleonów jądra atomowego wydzielą się olbrzymia energia, równoważna utracie masy spoczynkowej (tzw. defektowi masy), zgodnie ze znanym wzorem Einsteina,  $E = mc^2$ , w przypadku zmiany masy:  $\Delta E = \Delta mc^2$ . Energia ta, zwana energią wiązania nukleonów, jest wiele rzędów wielkości większa niż energia zwykłych przemian chemicznych, w których defekt masy jest praktycznie niezauważalny.

Warto odnotować, że energia wiązania przypadająca na jeden nukleon w jądrze, zależy od konkretnego składu jądra atomowego i jest największa dla atomów  ${}^{56}\text{Fe}$ . Najlżejsze jądra atomowe, łącząc się w tzw. procesach termojądrowych, np. we wnętrzu gwiazd, dając cięższe jądra, do żelaza-56 włącznie, wydzielają energię. Podobnie najcięższe jądra, w procesach rozpadu, np. w reaktorze atomowym, dają lżejsze, również wydzielając energię.



Ponieważ w jądrze atomowym każdego nuklidu energia wiązania nukleonów ma inną wartość, jedynie atom węgla-12 ma – na mocy definicji – masę całkowitą, 12u. Wszystkie inne nuklidy mają masy atomowe ułamkowe, zwykle równe ich liczbie masowej z dokładnością 2 do 3 miejsc po przecinku. Masy takie można zmierzyć bardzo dokładnie, dlatego wszystkie pierwiastki chemiczne będące nuklidami mają masy atomowe zapisane z dokładnością 5 i więcej cyfr po przecinku. Pozostałe pierwiastki, zawierające izotopy, mają masy atomowe zapisane z dokładnością 2 do 4 cyfr po przecinku, ponieważ zawartość izotopów w próbkach pochodzących z różnych źródeł jest mniej lub bardziej zmienna.

Masa atomowa pierwiastka zawierającego izotopy jest średnią ważoną mas atomowych tych izotopów z uwzględnieniem ich procentowego udziału w liczbie wszystkich atomów (tzw. procent atomowy):

$$m_{at} = \frac{m_1 p_1 + m_2 p_2 + \dots}{p_1 + p_2 + \dots},$$

gdzie:  $m_1, m_2, \dots$  - masy atomowe kolejnych izotopów,  $p_1, p_2, \dots$  - zawartości procentowe atomów poszczególnych izotopów.

Przykład: srebro zawiera dwa trwałe izotopy:

$^{107}\text{Ag}$ :  $m_1 = 106,90509 \text{ u}$ ,  $p_1 = 51,84 \%$ ,  $^{109}\text{Ag}$ :  $m_2 = 108,90475 \text{ u}$ ,  $p_2 = 48,16 \%$

$$m_{at}(\text{Ag}) = \frac{106,90509 \text{ u} \cdot 51,84\% + 108,90475 \text{ u} \cdot 48,16\%}{100\%} = 107,8681 \text{ u}$$

(dane za: [https://en.wikipedia.org/wiki/Isotopes\\_of\\_silver](https://en.wikipedia.org/wiki/Isotopes_of_silver))

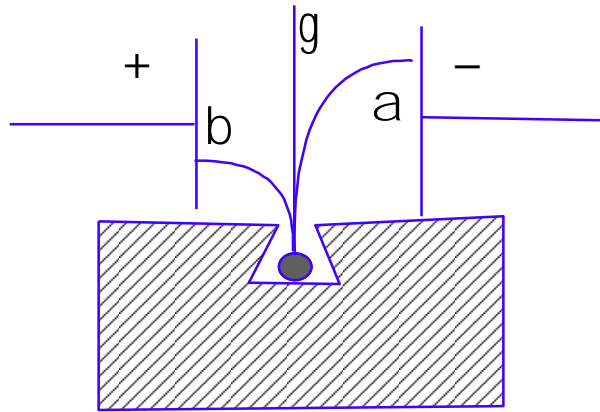
### **Trwałość jąder atomowych. Zjawisko promieniotwórczości.**

Protony, posiadając dodatni ładunek elektryczny, odpychają się siłą, której zasięg jest, teoretycznie, nieskończony. W jądrze atomowym utrzymują je tzw. oddziaływania jądrowe z innymi protonami i neutronami, mocniejsze niż siły elektrostatyczne, ale mające bardzo krótki zasięg. Powoduje to, że najcięższe jądra atomowe są z reguły nietrwałe. To samo dotyczy jąder lżejszych, w których stosunek liczby neutronów do liczby protonów wykracza poza tzw. zakres trwałości. Okazuje się, na przykład, że trwałe są tylko nieliczne jądra „nieparzysto-nieparzyste”, to jest takie, w których liczba zarówno protonów, jak i neutronów jest nieparzysta.

Nietrwałe jądra atomowe rozpadają się na różne sposoby, wysyłając różnego rodzaju promieniowanie. Zjawisko promieniotwórczości odkrył, przypadkowo, H. Becquerel (1896), a nazwę „promieniotwórczość” wprowadziła jego ówczesna doktorantka, Maria Skłodowska-Curie.

Dalsze badania wykazały, że najczęściej występują trzy rodzaje promieniowania:

- promienie  $\alpha$  (alfa), które są tożsame z jądrami helu-4, czyli  ${}^4_2\text{He}^{2+}$ , złożonymi z 2 protonów i 2 neutronów;
- promienie  $\beta$  (beta), a ściślej  $\beta^-$  (beta minus), które są rozpędzonymi do wielkiej prędkości elektronami,  $e^-$ ;
- promienie  $\gamma$  (gamma), które są falami elektromagnetycznymi o wielkiej częstotliwości.



W późniejszym czasie odkryto promienie  $\beta^+$  (beta plus), które są strumieniem pozytonów, antycząstek elektronu.

Rozpad alfa, beta minus, czy beta plus, to przemiany jądra atomowego, w których wysyłany jest dany rodzaj promieniowania (cząstek). Promienie gamma towarzyszą zwykle różnym rozpadom jądrowym, są bowiem rezultatem wydzielania nadmiaru energii nukleonów zawartej w powstającym jądrze atomowym.

Przemiana alfa powoduje, że jądro, tracąc dwa protony i dwa neutrony, zawarte w cząstce alfa, zmienia się w jądro o liczbie atomowej o 2 mniejszej i liczbie masowej o 4 mniejszej (prawo przesunięć Soddy'ego – Fajansa, 1913):

$$\begin{aligned} {}_{Z_1}^{A_1}E_1 &\rightarrow {}_{Z_2}^{A_2}E_2 + {}_2^4\alpha \\ \begin{cases} Z_2 = Z_1 - 2 \\ A_2 = A_1 - 4 \end{cases} \end{aligned}$$

Przemiana beta minus polega na tym, że w jądrze, w którym jest nadmiar neutronów, jeden z nich rozpada się na proton, elektron i niezwykle trudną do wykrycia cząstkę o nazwie antyneutrino elektronowe:

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

W rezultacie, całkowita liczba nukleonów, a więc i liczba masowa jądra nie ulega zmianie, natomiast liczba protonów, czyli liczba atomowa, zwiększa się o jeden:

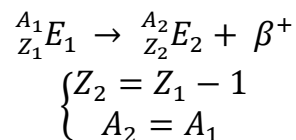
$$\begin{aligned} {}_{Z_1}^{A_1}E_1 &\rightarrow {}_{Z_2}^{A_2}E_2 + \beta^- \\ \begin{cases} Z_2 = Z_1 + 1 \\ A_2 = A_1 \end{cases} \end{aligned}$$

W rozpadzie beta plus, nadmiarowy proton ulega rozpadowi na neutron, pozyton oraz neutrino elektronowe:

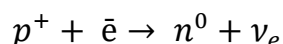
$$p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu_e$$

Zadziwiające jest to, że – jak się okazuje, pozornie – proton, który ma mniejszą masę zmienia się w neutron o masie większej. Otóż ta zależność mas jest prawdziwa dla protonu i neutronu „w stanie wolnym”. W jądrze atomowym energia cząstek jest tak duża, że wpływa na ich rzeczywistą masę, co pozwala na tak niezwykle zjawisko.

W efekcie rozpadu beta plus liczba protonów maleje o jeden, przy niezmiętej łącznej liczbie nukleonów, zatem:



Okazuje się, że dokładnie taki sam efekt daje jeszcze dziwniejsze zjawisko, zwane wychwytem K. W tym przypadku proton również zmienia się w neutron, ale poprzez pochłonięcie jednego elektronu z najbliższej jądra powłoki K. Wydziela się przy tym również neutrino elektronowe (oprócz zasady zachowania ładunku elektrycznego, w przemianach tego typu zachowana jest liczba leptonów, lekkich cząstek elementarnych z tej samej „rodziny”, w tym wypadku są to elektron i neutrino elektronowe; jeżeli elektron pojawia się po rozpadzie to musi mu towarzyszyć antyneutrino, pozytonowi, czyli „antyelektronowi”, towarzyszy antyneutrino; tak to jest rozumiane „na dziś”, bo nikt nie jest pewien, czy antyneutrino nie jest identyczne z neutrinem, jak przewiduje jedna z teorii):



Istnieje nawet, i to bardzo rozpowszechniony, nuklid, który może rozpadać się na każdy sposób, spośród trzech ostatnich, tj. beta<sup>-</sup>, beta<sup>+</sup> i wychwyt K. Jest to potas-40,  ${}_{19}^{40}K$ , którego produktami rozpadu są, odpowiednio, wapń-40 (ok. 89%) i argon-40 (ok. 11% - wychwyt K, śladowo - rozpad beta<sup>+</sup>; <https://en.wikipedia.org/wiki/Potassium-40>). Potas-40 stanowi ok. 0,012% potasu.

### Prawo rozpadu promieniotwórczego:

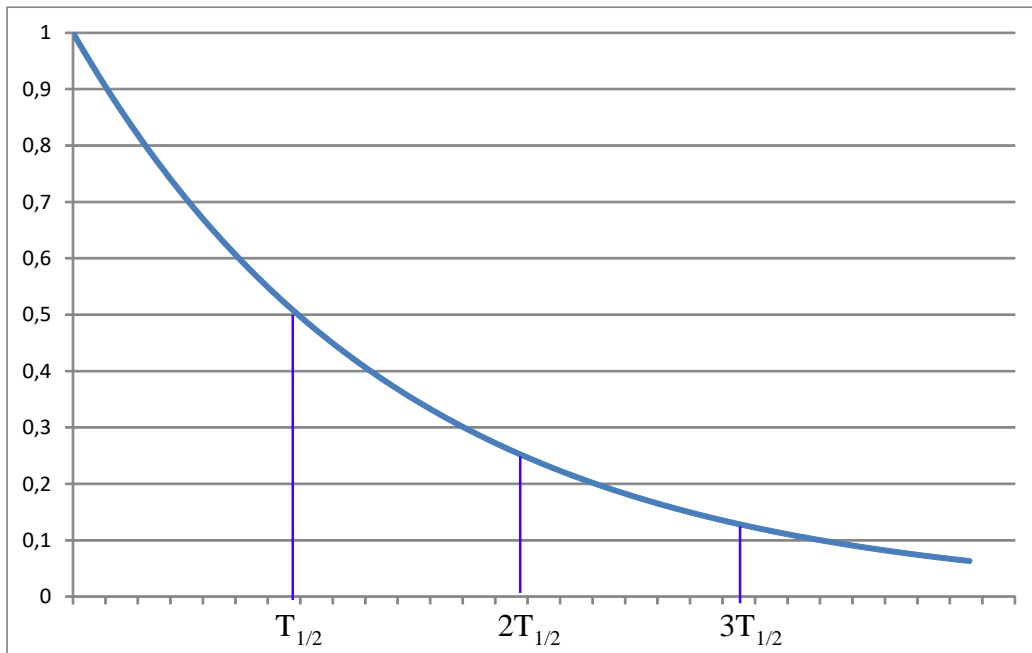
Liczba atomów promieniotwórczych maleje z czasem. Przebieg tego procesu jest taki, że przedział czasu, w którym liczba atomów maleje o połowę, jest stały. Przedział taki nazywa się okresem połowicznego rozpadu, albo okresem półtrwania,  $T_{1/2}$ . Jeżeli początkowa liczba atomów jest równa  $N_0$ , to po czasie  $t$  pozostaje (w przybliżeniu)  $N(t) = N_0 \cdot 2^{\frac{-t}{T_{1/2}}}$  atomów (o ile nie zostaje tych atomów za mało, żeby wzór miał sens; proces jest z natury losowy). Na przykład, jeżeli  $T_{1/2}$  izotopu  ${}^{14}C$  wynosi 5715 lat, a początkowa liczba atomów wynosi 1000000, to liczbę atomów można wyrazić w tabeli:

t (lat)	t = n · T <sub>1/2</sub>	N(t)
0	0	1000000
5715	T <sub>1/2</sub>	500000
11430	2T <sub>1/2</sub>	250000
17145	3T <sub>1/2</sub>	125000
22860	4T <sub>1/2</sub>	62500
28575	5T <sub>1/2</sub>	31250
34290	6T <sub>1/2</sub>	15625

Łatwo sprawdzić, że podstawiając do wzoru, np.,  $t = 5T_{1/2}$ , otrzymuje się:

$$N(t) = 2^{-5}N_0 = \frac{1}{2^5}N_0 = \frac{1}{32}N_0. \text{ A rozpadowi uległo już } \frac{31}{32} \text{ początkowej ilości pierwiastka.}$$

Dokładnie w taki sam sposób zmienia się w czasie masa pierwiastka promieniotwórczego, a także liczba rozpadów w jednostce czasu. Przebieg procesu można przedstawić na wykresie:



(na osi pionowej przedstawiono wielokrotność początkowej ilości substancji)