

13. Fizyka jądrowa

Rzeszów University of Technology

14 czerwca 2024

- D. Halliday, R. Resnik, J. Walker. Podstawy fizyki, tom 5.
- Fizyka dla szkół wyższych, tom 2. Openstax Polska.
- L.D. Landau, J.M. Lifszyc. Mechanika kwantowa.

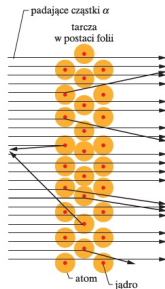
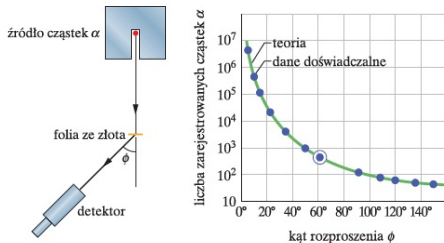
Doświadczenie Rutherforda

Hipoteza Rutherforda: dodatni ładunek w atomach jest skupiony w środku atomu w postaci jądra, które zawiera przeważającą część masy atomu

Źródło promieniowania: promieniotwórczy pierwiastek radon emituje cząstki α o energii około 5,5 MeV. (Dziś wiemy, że cząstki α to są jądra atomu helu)

Wynik eksperymentu: Bardzo mała część cząstek była rozpraszana pod dużymi kątami

⇒ **Promień jądra jest mniejszy od promienia atomu** ~ 10000 razy. Rozmiar jądra stanowi około $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$.



Właściwości jąder

Jądra często nazywamy **nuklidami**. Protony i neutrony w fizyce jądrowej - **nukleony**

Liczba neutronów N , liczba protonów Z - **liczba atomowa**, $A = Z + N$ - **liczba masowa**

Terminologia fizyki jądrowej: Nuklid jest oznaczony jak ${}^A X$ albo ${}^A_Z X$, gdzie A - liczba masowa, Z - liczba atomowa, X - symbol chemiczny pierwiastka

Przykład oznaczenia: ${}^{197}\text{Au}$, gdzie $A = 197$. Dla złota $Z = 79$. Liczba neutronów w jądrze: $N = 197 - 79 = 118$

Nuklidy o tym samym Z i różnych N nazywamy **izotopami**. Złoto ma izotopy od ${}^{173}\text{Au}$ do ${}^{204}\text{Au}$, ale tylko jeden ${}^{197}\text{Au}$ jest trwały

Nuklid	Z	N	A	Trwałość ^a	Masa ^b [u]	Spin ^c	Energia wiązania [MeV/nukleon]
${}^1\text{H}$	1	0	1	99,985%	1,007 825	1/2	—
${}^7\text{Li}$	3	4	7	92,5%	7,016 004	3/2	5,60
${}^{31}\text{P}$	15	16	31	100%	30,973 762	1/2	8,48
${}^{84}\text{Kr}$	36	48	84	57,0%	83,911 507	0	8,72
${}^{120}\text{Sn}$	50	70	120	32,4%	119,902 197	0	8,51
${}^{157}\text{Gd}$	64	93	157	15,7%	156,923 957	3/2	8,21
${}^{197}\text{Au}$	79	118	197	100%	196,966 552	3/2	7,91
${}^{227}\text{Ac}$	89	138	227	21,8 lat	227,027 747	3/2	7,65
${}^{239}\text{Pu}$	94	145	239	24 100 lat	239,052 157	1/2	7,56

^a W przypadku nuklidów trwałych podano względną częstość występowania, która mówi, jaki ułamek atomów typowej próbki pierwiastka stanowią atomy danego izotopu. Dla nuklidów promieniotwórczych podano czasy połowicznego zaniku.

Promień jądra: Efektywny promień jądra (z wyników rozpraszania elektronów)

$$r \simeq r_0 A^{1/3}, \quad r_0 = 1,2 \text{ fm}$$

gdzie $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ (femtometr),
 $1 \text{ fm} = 1 \text{ fermi}$

Masa jądra: Masy podajemy w jednostkach atomowych u , zdefiniowanych tak, że masa atomu ^{12}C wynosi $12 u$.

$$1 u \simeq 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Energia wiązania jądra

Masa M jądra jest mniejsza niż suma mas tworzących je protonów i neutronów

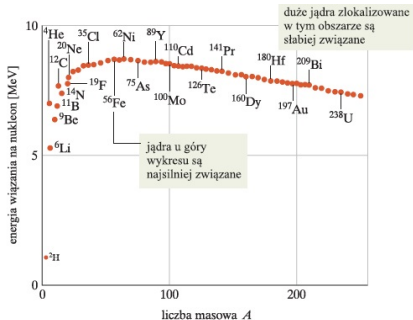
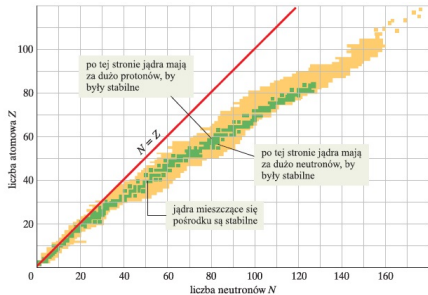
$$\Delta E_w = \sum (mc^2) - Mc^2$$

gdzie E_w - energia wiązania jądra, m - masa protonu i neutronu

Energia wiązania przypadająca na nukleon

$$\Delta E_{wn} = \Delta E_w / A$$

jest miarą trwałości jądra



Poziomy energetyczne jądra

Energia jąder jest skwantowana

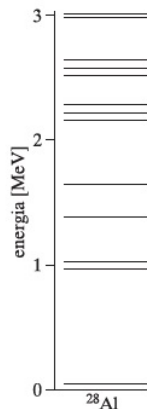
Spin jądra i magnetyzm

Nuklidy charakteryzują się własnym momentem pędu jądra (spinem) i związanym z nim momentem magnetycznym jądra

Siły jądrowe

Siły jądrowe mają niewielki zasięg

Siły jądrowe scalające neutrony i protony w jądro - konsekwencja oddziaływania silnego, które wiąże kwarki w protony i neutrony



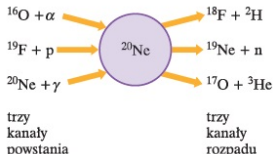
Model kroplowy (Niels Bohr)

Nukleony poruszające się chaotycznie wewnątrz jądra, podobnie jak cząsteczki w kropli cieczy, silnie oddziałują między sobą

Średnia droga swobodna jest dużo mniejsza niż promień jądra

Model kroplowy pozwala powiązać ze sobą wiele faktów dotyczących masy jąder oraz energii wiązania

Z tym modelem jest związane pojęcie **jądra złożonego**, które tworzy się w wyniku reakcji jądrowej



Model powłokowy

Założenie (przeciwnie do modelu kropłowego), że każdy nukleon znajduje się we wnętrze jądra w dobrze określonym stanie kwantowym i prawie wcale nie uczestniczy w zderzeniach.

Każdy nukleon porusza się w studni potencjału pochodzącej od "rozmytego" (uśrednionego w czasie) potencjału od wszystkich pozostałych poruszających się nukleonów

Nukleony podlegają zakazu Pauliego, ale neutrony i protony trzeba rozważać osobno – każdy z nich ma swój własny zbiór stanów kwantowych

⇒ **Liczby magiczne nukleonów** 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, ...

Dla tych liczb występują zamknięte powłoki

Dowolny nuklid, którego liczba protonów Z lub liczba neutronów N przyjmuje jedną z wymienionych wartości, charakteryzuje szczególna stabilność

Przykłady jąder magicznych: ^{18}O ($Z = 8$), ^{40}Ca ($Z = 20$, $N = 20$), ^{92}Mo ($N = 50$), ^{208}Pb ($Z = 82$, $N = 126$)

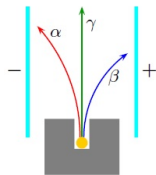
^{40}Ca i ^{208}Pb – podwójnie magiczne

Produkty promieniowania nazwano promieniowaniem α , β i γ , kiedy odkryto, że rozdzielają się na trzy grupy w polu elektrycznym lub magnetycznym (Rutherford)

α – jądra atomu helu ${}^4\text{He}$ ($A = 4$, $Z = 2$, $N = 2$)

β – elektrony e^-

γ – fotony o dużej energii

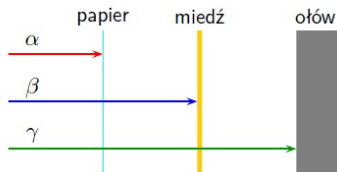


Promienie α , β i γ
w polu elektrycznym

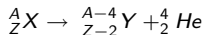
Ciężkie naładowane cząstki α najsilniej oddziałują z materią \Rightarrow najmniejsza przenikliwość

Lekkie naładowane cząstki β silnie oddziałują z materią i mają stosunkowo mały zasięg

Elektromagnetyczne promienie γ są najbardziej przenikliwe

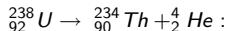


Rozpad dwuciałowy (silne oddziaływanie jądrowe):

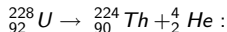


Energia rozpadu Q : różnica energii spoczynkowych

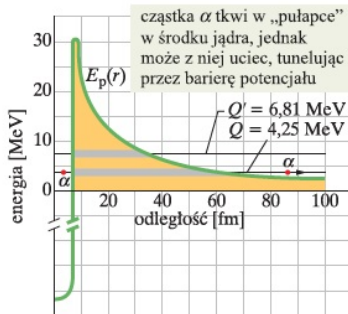
Cząstka α ma ściśle określoną energię



$Q = 4,25 \text{ MeV}$, $T_{1/2} = 4,5 \text{ mld lat}$



$Q = 6,81 \text{ MeV}$, $T_{1/2} = 9,1 \text{ min}$



Tunelowanie cząstki α w izotopach uranu U

Rozpad promieniotwórczy jest procesem statystycznym

Liczba dN rozpadów danego nuklidu w czasie dt jest proporcjonalna do liczby jąder $N(t)$ w chwili t

$$dN = -\lambda N dt$$

gdzie λ jest charakterystyczną stałą rozpadu

Przyjmując, że w chwili $t_0 = 0$ było N_0 jąder, otrzymujemy **prawo rozpadu**

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Czas, po którym zostanie połowa jąder ($N = N_0/2$) nazywamy **czasem połówkowego zaniku** $T_{1/2}$

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

Tylko rozpad α zmienia liczbę nukleonów w jądrze

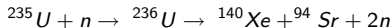
Jest to zmiana o cztery nukleony (${}^4\text{He}$) \Rightarrow istnieją cztery łańcuchy (rodziny) promieniotwórcze

Nazwa łańcucha	A	$T_{1/2}$ [lat]	Pierwsze jądro	Ostatnie jądro
Torowy	$4k$	$14 \cdot 10^9$	${}_{90}^{232}\text{Th}$	${}_{82}^{208}\text{Pb}$
Neptunowy	$4k + 1$	$2.2 \cdot 10^6$	${}_{93}^{237}\text{Np}$	${}_{83}^{209}\text{Bi}$
Uranowo-radowy	$4k + 2$	$4.5 \cdot 10^9$	${}_{92}^{238}\text{U}$	${}_{82}^{206}\text{Pb}$
Uranowo-aktynowy	$4k + 3$	$7.2 \cdot 10^8$	${}_{92}^{235}\text{U}$	${}_{82}^{207}\text{Pb}$

* k — liczba naturalna

Model rozszczepienia jądra

- Jądro ^{235}U absorbuje neutron termiczny ($E_k \simeq 0.04 \text{ eV}$):



- Rozszczepienie uwalnia kilka neutronów o $E_k \sim 1 \text{ MeV}$
- Neutrony termiczne rozszczepiają jądra ^{235}U i ^{239}Pu
- Neutrony szybkie (1 MeV) rozszczepiają jądra ^{238}U

jądro ^{235}U pochłania powolny neutron (z niewielką energią kinetyczną) i staje się jądrem ^{236}U



a)

energia spoczynkowa neutronu ulega przemianę na energię drgań spowodowanych przez absorpcję



b)

obie kule zawierają protony, są więc dodatnio naładowane i odpychają się



c)

jednak protony oraz neutrony również się przyciągają wskutek oddziaływań silnych, które scalają jądro



d)

zasięg oddziaływań silnych maleje jednak z odległością między kulami



e)

tak więc jeżeli kule wystarczająco się od siebie oddalą, odpychanie elektryczne rozewie jądro



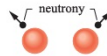
f)

ten akt rozszczepienia zmniejsza energię spoczynkową, co sprawia, że wydziela się energia



g)

oba fragmenty emitują neutrony, zmniejszając dalej energię spoczynkową



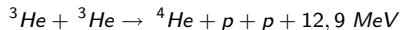
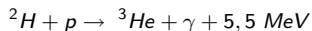
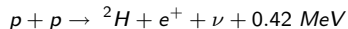
h)

Reakcje syntezy (fuzji) to procesy łączenia lekkich jąder w cięższe

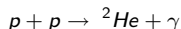
Synteza jąder wymaga dużych energii zderzeń w celu pokonania odpychania elektrostatycznego jąder

Duże energii zderzeń, wynikające z ruchu termicznego jąder, są typowe dla wnętrza gwiazd

W gwiazdach o temperaturach $T \sim 15$ mln K dominuje wydzielanie energii w cyklu protonowo-protonowym



gdzie ${}^2\text{H}$ - deuter (izotop wodoru, który mieści 1 proton i 1 neutron). Pierwsza reakcja syntezy zachodzi dzięki słabemu oddziaływaniu jądrowemu, ponieważ nie konkuruje z nim proces silnego oddziaływania



wzbroniony wskutek niestabilności jądra ${}^2\text{He}$

Dlatego proces łączenia się protonów w deuter ${}^2\text{H}$ jest niezwykle powolny

⇒ **Słońce nie eksploduje, lecz świeci przez miliardy lat**