

Elementy Fizyki Jądrowej cz.1

Dr Krystyna Wosińska

Wydział Fizyki PW

wosinska@if.pw.edu.pl

Literatura:

1. E.Skrzypczak, Z.Szeflinski, *Wstęp do fizyki jądra atomowego i cząstek elementarnych*, PWN
2. B. Nerlo-Pomorska, K. Pomorski: *Zarys teorii jądra atomowego*, PWN
3. D.H. Perkins, *Wstęp do fizyki wysokich energii*, PWN

Inne wykłady dostępne w sieci:

- Wstęp do fizyki jądrowej

Tomasz Pawlak, Wydział Fizyki PW

http://www.if.pw.edu.pl/~pawlak/wyklady/nukleus_08b.html

- Fizyka zderzeń ciężkich jonów

Katarzyna Grebieszko, Wydział Fizyki PW

<http://www.if.pw.edu.pl/~kperl/HIP/hip.html>

- Fizyka jądrowa

Bogdan Muryn, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, AGH

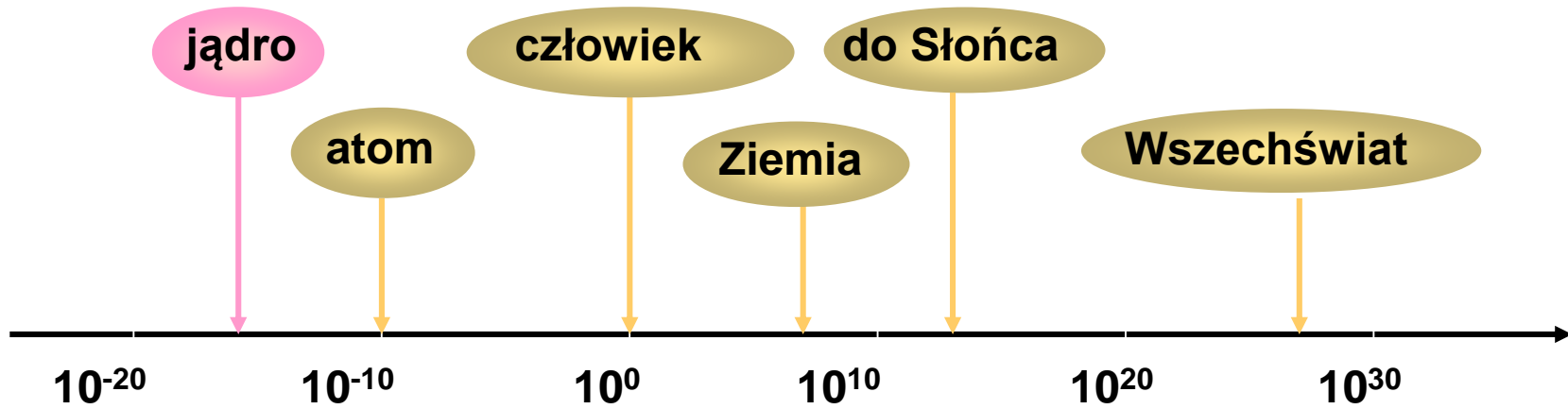
<http://newton.ftj.agh.edu.pl/~muryn/>

Treść wykładu

1. Struktura mikroskopowa materii.
2. Budowa i własności jąder.
3. Siły jądrowe.
4. Modele jądrowe.
5. Promieniotwórczość.
6. Reakcje jądrowe.
7. Rozszczepienie jąder i fizyka neutronów.
8. Synteza termojądrowa.

1. Struktura mikroskopowa materii

Skala przestrzenna



rozmiary (w metrach)
skala logarytmiczna!

**Typowa skala w fizyce jądrowej:
 $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ (fermi)**

Masy obiektów subatomowych

Masy wyrażamy w jednostkach energii: $E = mc^2$

Jednostka energii – elektronowolt:

$$1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Jednostka masy: MeV/c^2 lub MeV ($c = 1$)

Masy nuklidów wyrażamy w atomowych jednostkach masy u :

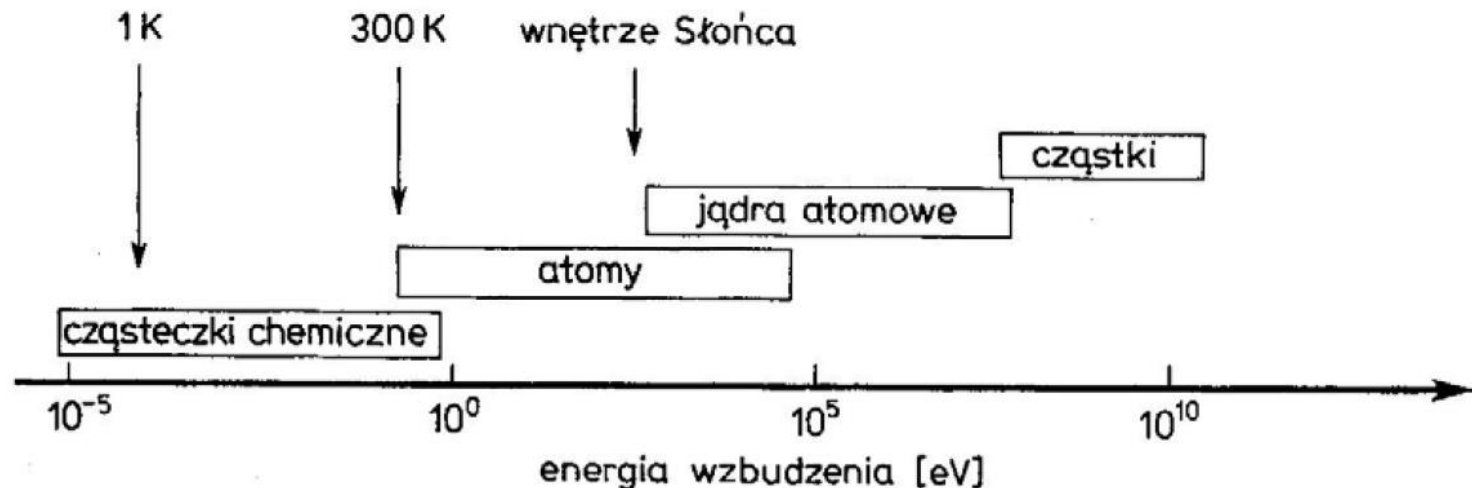
$$1 u = \frac{1}{12} \text{ masy obojętnego atomu węgla } {}_6^{12}\text{C}$$

$$1u = 1,66053 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,481 \text{ MeV}/c^2$$

Skala energii

Energia wiązania elektronu w atomie wodoru: **13,6 eV**.
~100 keV – energia wiązania elektronu na „głębokiej” powłoce w ciężkich atomach.

Typowe energie w fizyce jądrowej: **MeV** (energia potrzebna do rozdzielenia wszystkich nukleonów wchodzących w skład ciężkiego jądra ~GeV)



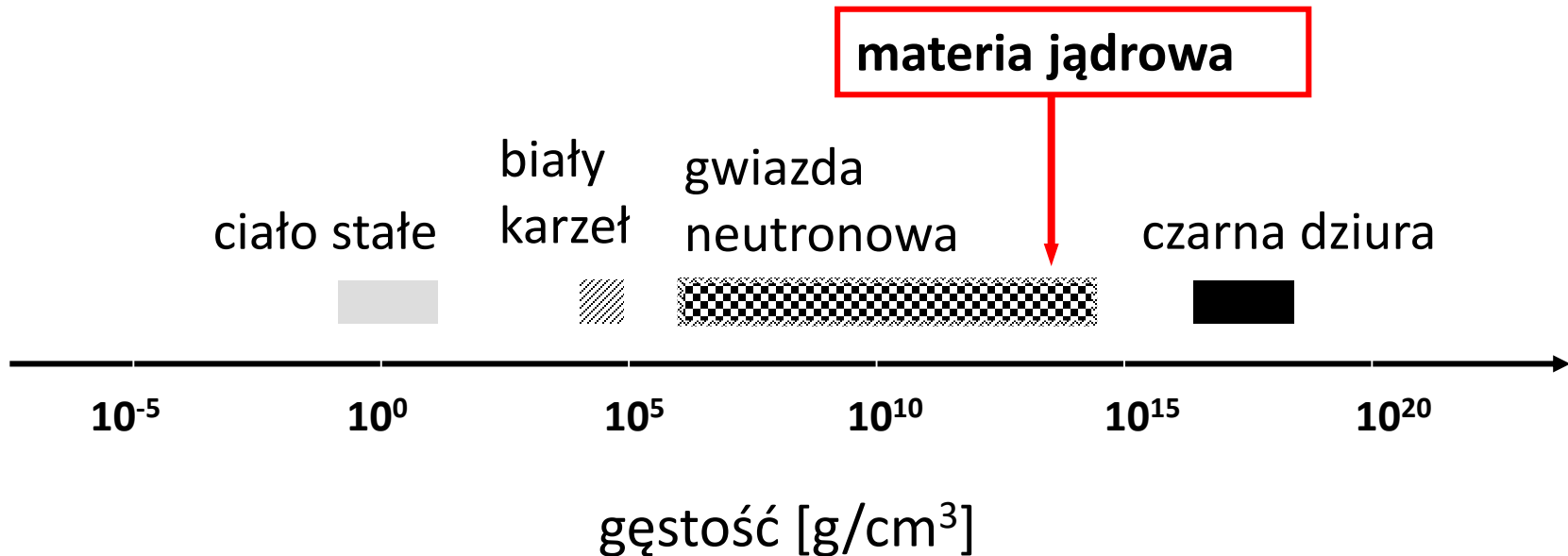
Świat jądrowy

ładunek: $q = Ze$ $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

energia jonizacji atomu wodoru – 13.6 eV

energia separacji nukleonu z jądra – 8.5 MeV

Skala gęstości w mikro- i makroświecie:



Kinematyka relatywistyczna

energia kinetyczna

$$E_k = mc^2 - m_0c^2$$

energia całkowita

energia spoczynkowa

$$E^2 = (m_0c^2)^2 + (pc)^2$$

energia całkowita

energia spoczynkowa

pęd

Falowe własności materii

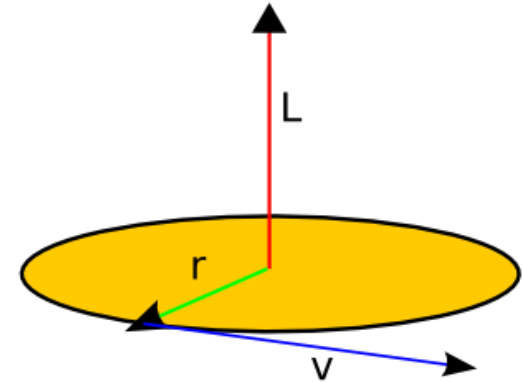
Długość fali de Broglie'a:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Zasada nieoznaczności: $\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar$

Spin

Moment pędu L (klasycznie)



Spin – wewnętrzny moment pędu cząstki

- własność kwantowa
- przybiera wartości równe wielokrotności $\frac{\hbar}{2}$
- wyrażamy w jednostkach \hbar

$$s = 1, \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}$$

Spin

Ustawienie wektora spinu nie jest dowolne
– kwantyzacja przestrzenna

Liczba stanów (możliwych ustawień) wektora spinu \vec{s} :

$$2s + 1$$

Np. dla $s = \frac{1}{2}$ liczba stanów = 2

dla $s = 1$ liczba stanów = 3

Bozony i fermiony

Bozony – cząstki o spinie całkowitym (0, 1, 2, 3,...)

np. fotony, bozony W i Z

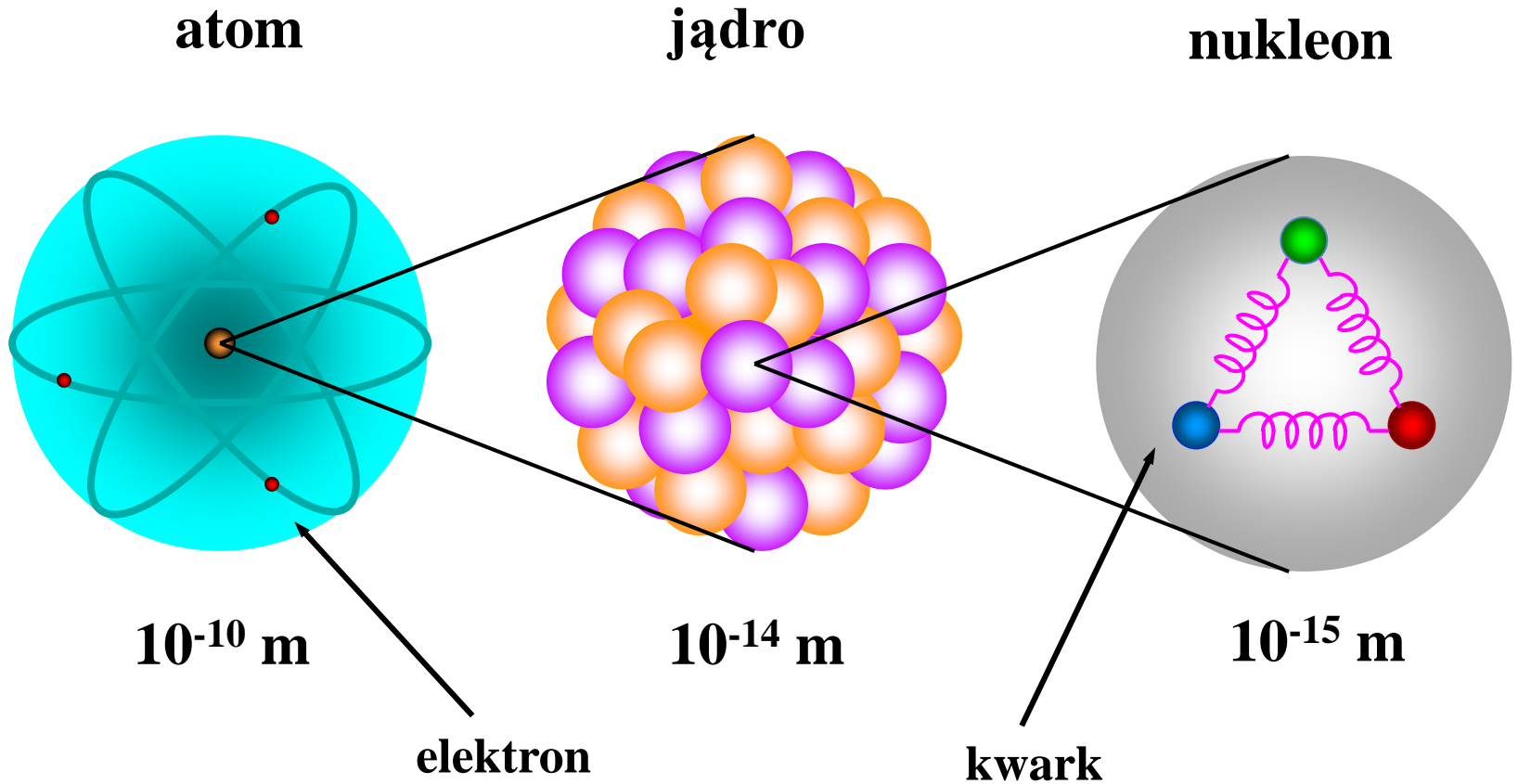
Fermiony – cząstki o spinie ułamkowym (1/2 , 3/2 , 5/2,...)

np. elektrony, protony, neutrony

Fermiony podlegają zakazowi Pauliego:

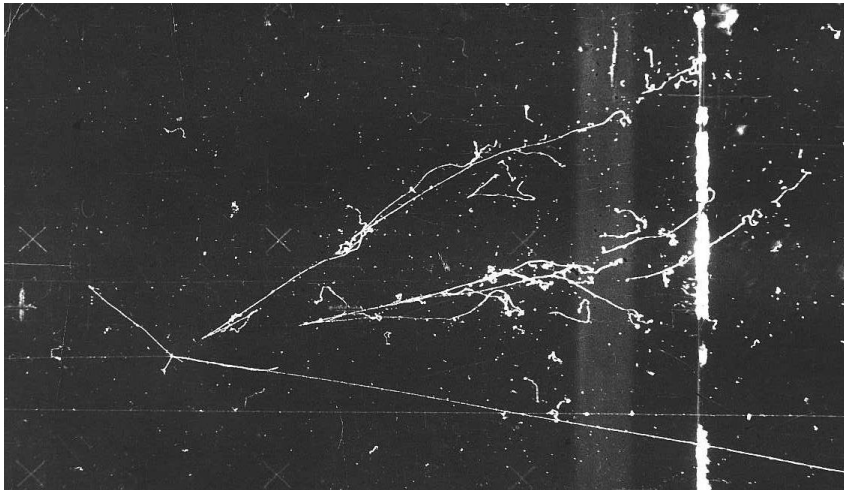
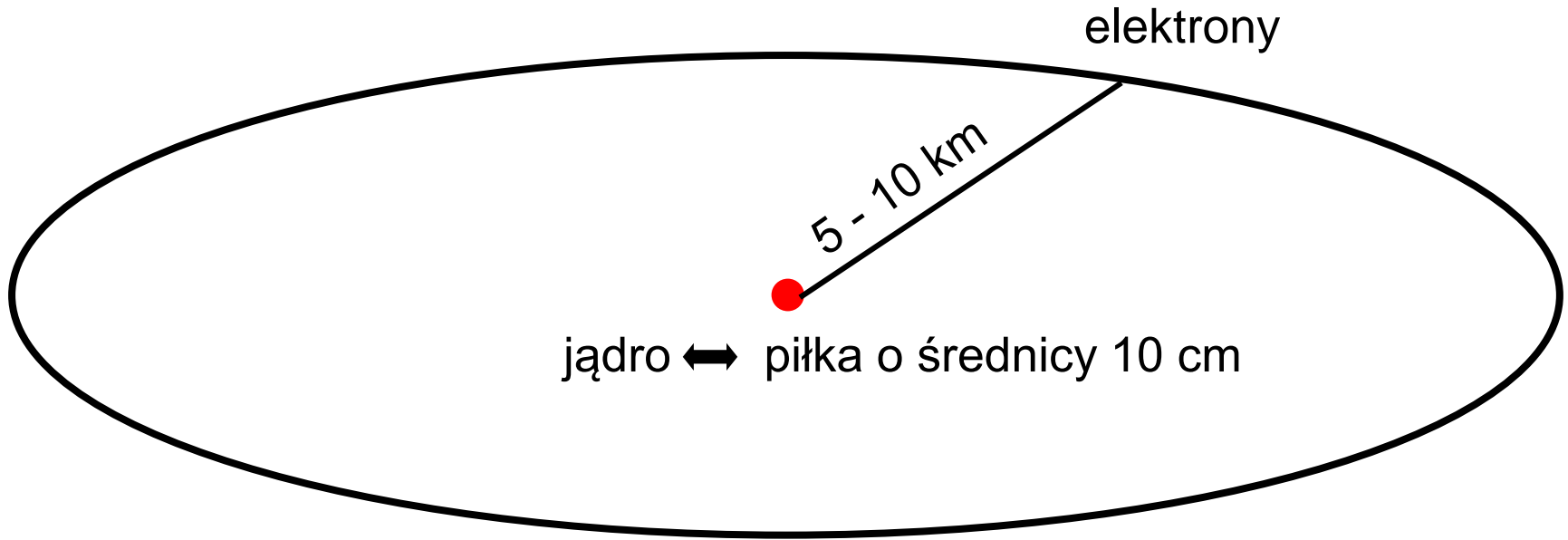
Dwa fermiony nie mogą znajdować się w tym samym stanie kwantowym

Zajrzyjmy w głąb...



brak struktury!

Pustka materii



Rozmiar jądra: $\sim 10^{-15}$ m
Rozmiar atomu: $\sim 10^{-10}$ m

Ośrodek ciągły (tu ciekły ksenon) jest prawie pusty!

Model Standardowy

Do chwili obecnej odkryto kilkaset cząstek (z których większość nie jest cząstkami elementarnymi).

Model Standardowy – teoria opisująca wszystkie cząstki i oddziaływania między nimi za pomocą:

- 6 kwarków
- 6 leptonów
- cząstek przenoszących oddziaływania

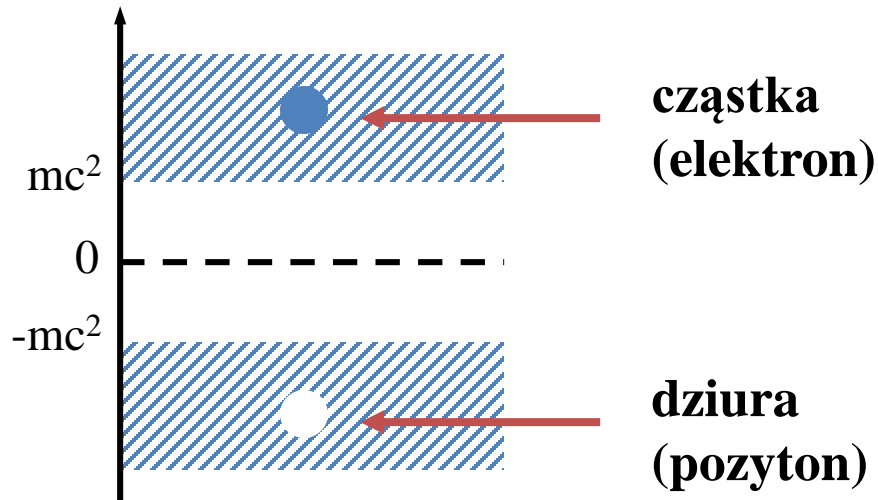
Każdej cząstce odpowiada antycząstka o tej samej masie i wszystkich liczbach kwantowych przeciwnych.

Kwarki	u górnym up	c powabnym charm	t prawdziwym top
	d dolnym down	s dziwnym strange	b pięknym bottom
Leptony	ν_e neutrino elektronowe	ν_μ neutrino mionowe	ν_τ neutrino tau
	e elektron	μ mion	τ tau
			I II III
			Rodziny materii

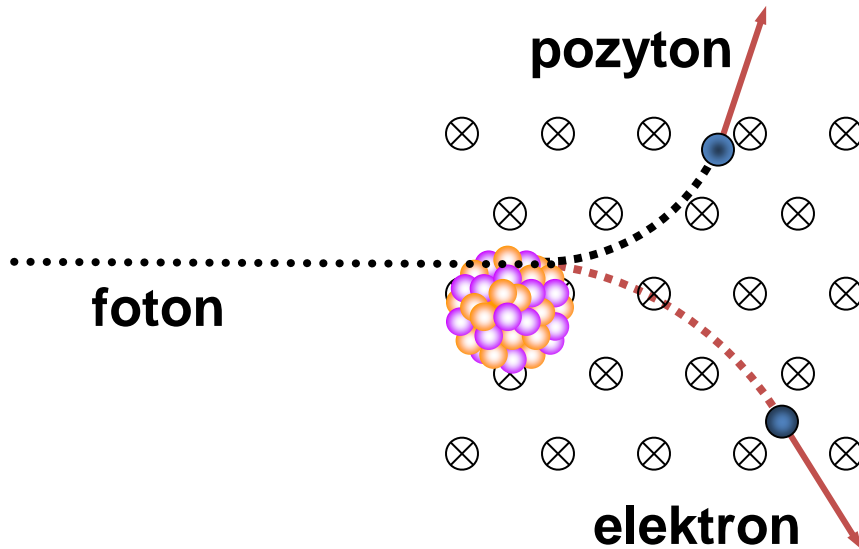
Antycząstki

P.A.M.Dirac (1928) – relatywistyczne równanie falowe

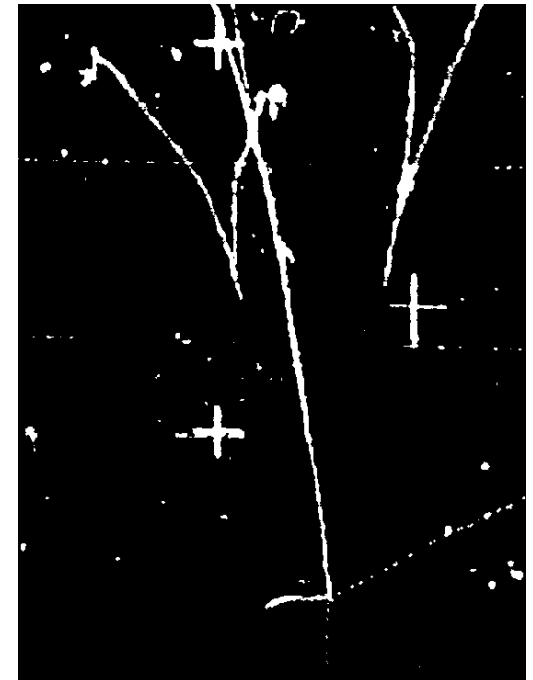
$$E = \pm \sqrt{m_e^2 c^4 + p^2 c^2}$$



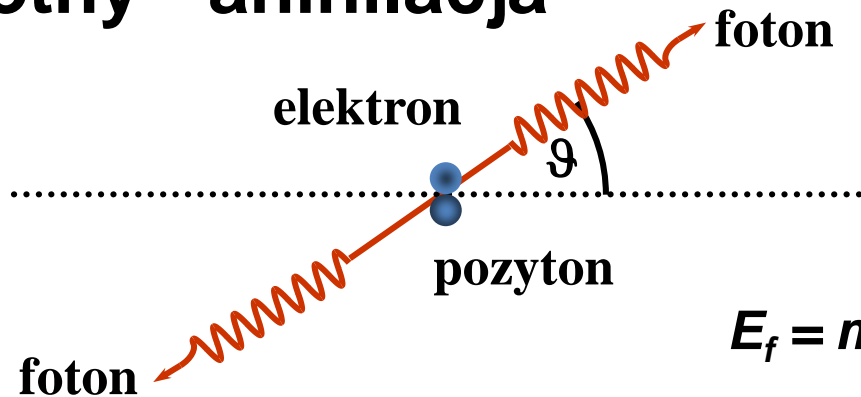
Kreacja pary elektron-pozyton



$$h\nu_{min} = 2m_e c^2 \approx 1.02 \text{ MeV}$$



Proces odwrotny - anihilacja



$$E_f = m_e c^2 \approx 0.51 \text{ MeV}$$

kwarki (spin = $\frac{1}{2}$) i leptony (spin = $\frac{1}{2}$)

aromat (<i>flavour</i>)	masa [MeV]	ładunek		lepton	masa [MeV]	ładunek
u – <i>up</i> górnny	1.5 ÷ 4.5	+2/3		e - elektron τ = ∞	0.511	-1
d – <i>down</i> dolny	5.0 ÷ 8.5	-1/3		ν - neutrino elektronowe	0 < $3.0 \cdot 10^{-6}$	0
c – <i>charm</i> powabny	1.0 ÷ $1.4 \cdot 10^3$	+2/3		μ - mion $\tau = 2.20 \cdot 10^{-6}$ s	105.7	-1
s – <i>strange</i> dziwny	80 ÷ 155	-1/3		ν_{μ} – neutrino mionowe	0 < 0.19	0
t – <i>top</i> wierzchni	174. $\cdot 10^3$	+2/3		τ - taon $\tau = 2.91 \cdot 10^{-13}$ s	1777.0	-1
b – <i>bottom</i> spodni	4.0 ÷ $4.5 \cdot 10^3$	-1/3		ν_{τ} – neutrino taonowe	0 < 18.2	0

Cząstki z różnych rodzin
różnią się zapachem.

Hadrony

Z kwarków zbudowane są hadrony:

- z trzech kwarków – bariony



- z kwarku i antykwarku - mezony



Bariony

Bariony qqq i antybariony $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Bariony są fermionowymi hadronami. Jest ich około 120 typów.					
Symbol	Nazwa	Skład kwarków	Ładunek elektr.	Masa GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0,938	1/2
\bar{p}	antyproton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0,938	1/2
n	neutron	udd	0	0,940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1,116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1,672	3/2

Większość masy hadronu to energia kinetyczna kwarków.

$$u + u + d = \text{proton}$$

$$\text{masa: } 0,003 + 0,003 + 0,006 \neq 0,938$$

Masa hadronu



**Kupujemy 1 kg jabłek...
(masa protonu ≈ 1 GeV)**

**... a w domu z torby
wysypujemy 3 maleńkie
jabłuszka – tylko 12 g!
(masa kwarków $\approx 0,012$ GeV)**



Mezony

Mezony $q\bar{q}$					
Mezony są hadronami bozonowymi. Jest ich około 140 typów.					
Symbol	Nazwa	Skład kwarków	Ładunek elektr.	Masa GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0,140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0,494	0
ρ^+	ro	$u\bar{d}$	+1	0,770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5,279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2,980	0

Leptony

Leptony = $(e, \nu_e), (\mu, \nu_\mu), (\tau, \nu_\tau)$ + antycząstki są fermionami oddziałującymi słabo,

Liczba leptonowa:

	L_e		L_μ		L_τ
e^-, ν_e	+1	μ^-, ν_μ	+1	τ^-, ν_τ	+1
$e^+, \bar{\nu}_e$	-1	$\mu^+, \bar{\nu}_\mu$	-1	$\tau^+, \bar{\nu}_\tau$	-1
inne	0	inne	0	inne	0

Cząstki należące do różnych rodzin różnią się zapachem.

Rozpady leptonów

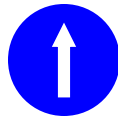
Elektron i 3 rodzaje neutrin – trwałe

Mion i taon - nietrwałe

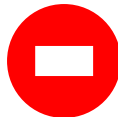
Liczby elektronowe, mionowe i taonowe są zawsze zachowane, gdy ciężki lepton rozpada się na mniejsze leptony.

Czy te rozpady są możliwe?

$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$$

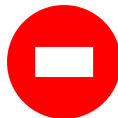


$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \nu_\tau$$



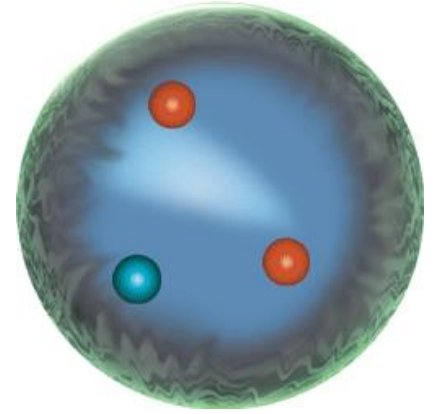
Liczba mionowa niezachowana

$$e^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$$



Energia niezachowana

Oddziaływania

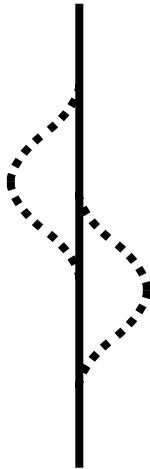


Wirtualne cząstki przenoszące oddziaływanie

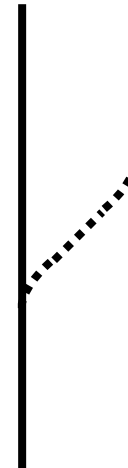
Zasada nieoznaczoności: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$

Próżnia wypełniona jest powstającymi i znikającymi cząstkami wirtualnymi.

↑ czas



1 cząstka wysyła i pochłania
cząstki wirtualne



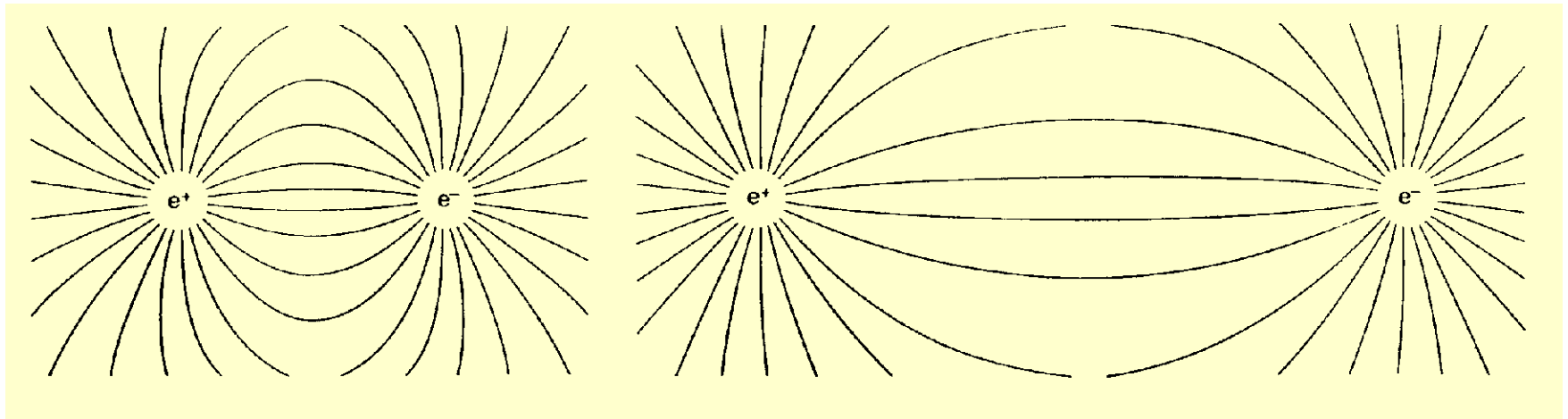
1 cząstka wysyła, a 2 cząstka
pochłania cząstki wirtualne

Odziaływanie elektromagnetyczne

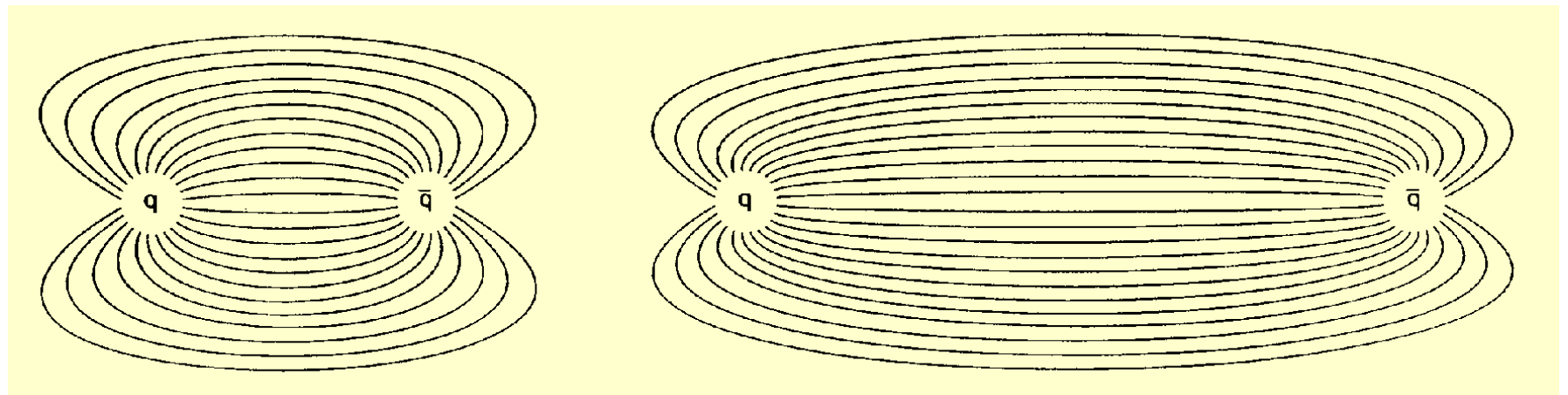
- Działa na ładunki elektryczne
- Odpowiedzialne za wiązania chemiczne
- Nośnik – foton (γ)
- Zasięg – nieskończony

Odziaływanie silne

- Działa na kwarki
- Odpowiedzialne za wiązanie kwarków w barionach
- Nośniki – gluony
- Zasięg – 10^{-15} m (odległość typowa dla kwarków w nukleonie)



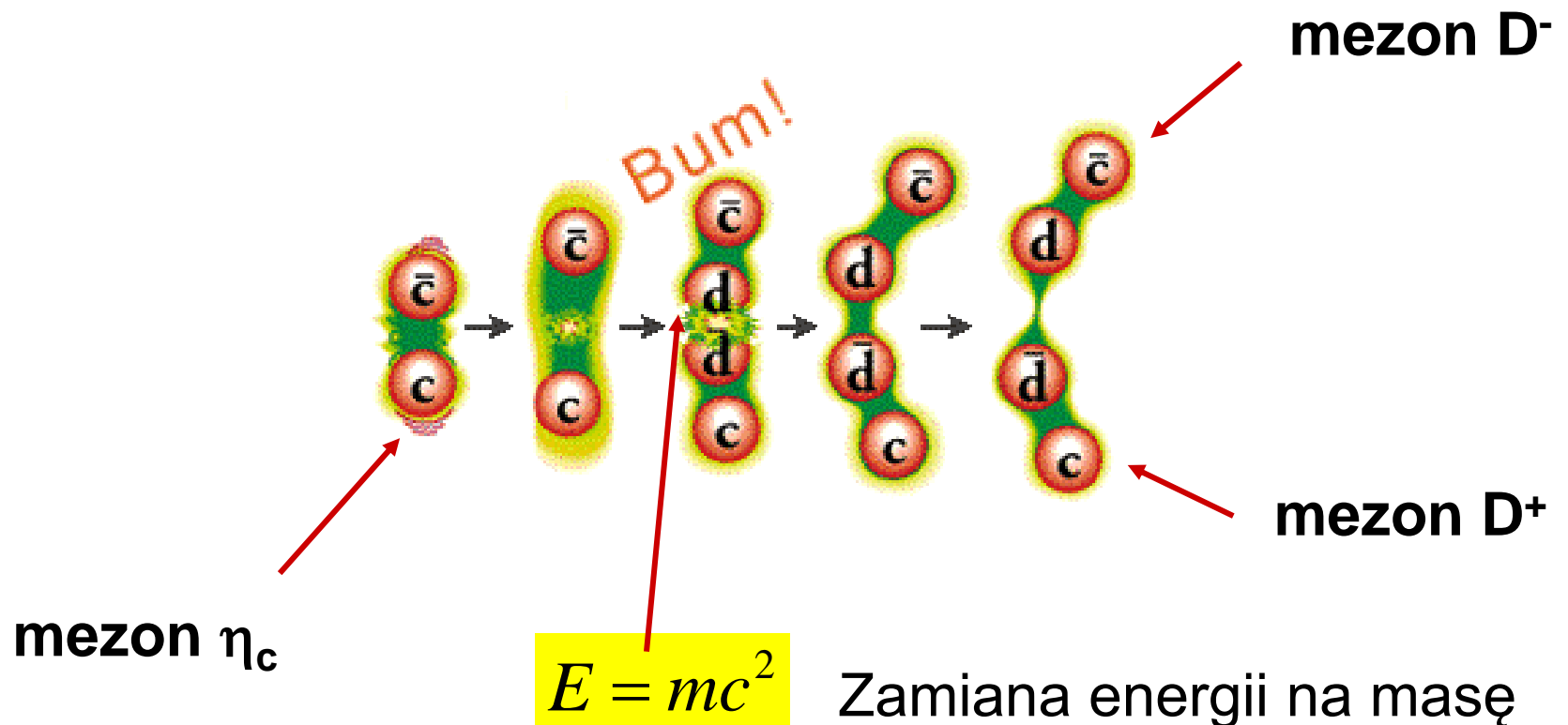
Oddziaływanie między elektronami maleje wraz z odległością



Oddziaływanie między kwarkami rośnie wraz z odległością

Uwięzienie kwarków

- Oddziaływanie między kwarkami rośnie wraz z odległością.
- Próba rozdzielenia kwarków prowadzi do wytworzenia nowej pary kwark-antykwar (jest to proces korzystniejszy energetycznie).



Oddziaływanie słabe

- Odpowiedzialne za rozpad ciężkich kwarków i leptonów na lżejsze kwarki i leptony (zmiana zapachu).
- Cząstki przenoszące oddziaływanie słabe to bozony: W^+ , W^- i Z^0 .

Masy W^+ , W^- i Z^0 duże (~ 80 GeV) \Leftrightarrow Zasięg mały

Oddziaływanie słabe i elektromagnetyczne opisuje jednolita teoria oddziaływań elektroślabych.

Oddziaływania elektroślabe

Małe odległości (10^{-18} m) \Leftrightarrow wielkie energie



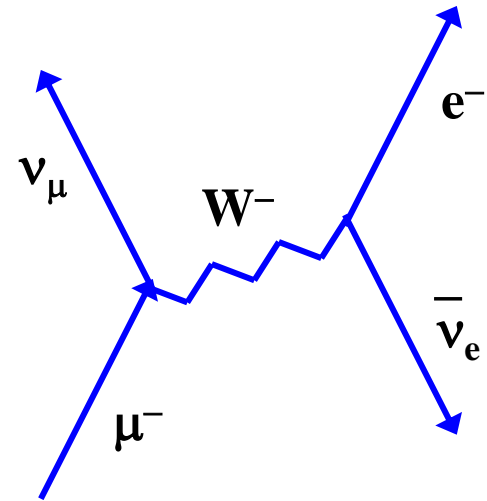
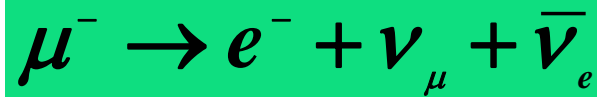
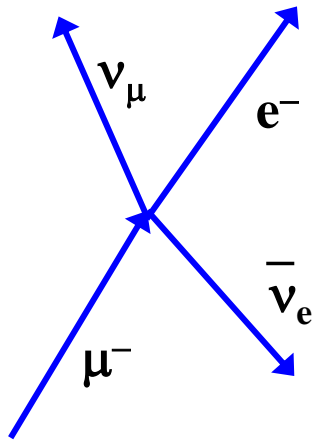
Oddziaływania słabe i elektromagnetyczne
porównywalne.

Większe odległości ($3 \cdot 10^{-17}$ m)



Oddziaływanie słabe jest 10^4 razy mniejsze niż
elektromagnetyczne

Słaby rozpad - przykład



W rozpadzie pośredniczy
bozon W^-

Oddziaływanie grawitacyjne

- Działa na każde ciało
- Odpowiedzialne za istnienie planet, gwiazd, galaktyk...
- Nośnik (hipotetyczny) – grawiton?
- Zasięg – nieskończony

Brak teorii, która wiąże oddziaływanie grawitacyjne z innymi rodzajami oddziaływań – jeden z głównych nierozwiązanych problemów kosmologii.

Względna siła czterech oddziaływań

(rzędy wielkości sił działających między dwoma protonami w bezpośrednim kontakcie):

1 : silne

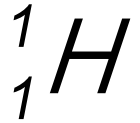
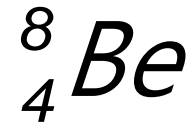
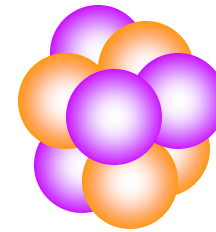
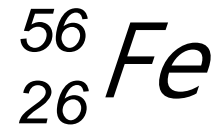
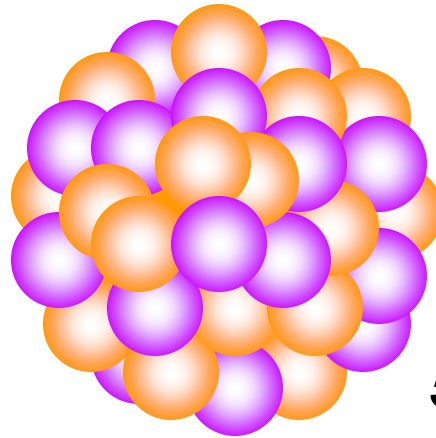
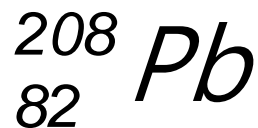
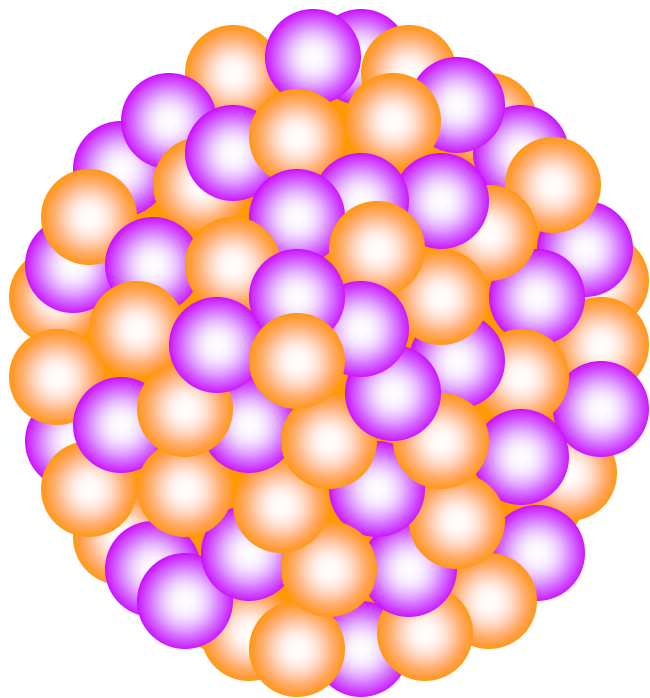
10^{-2} : elektromagnetyczne

10^{-7} : słabe

10^{-39} : grawitacyjne

2. Budowa i własności jąder atomowych

Nuklidy



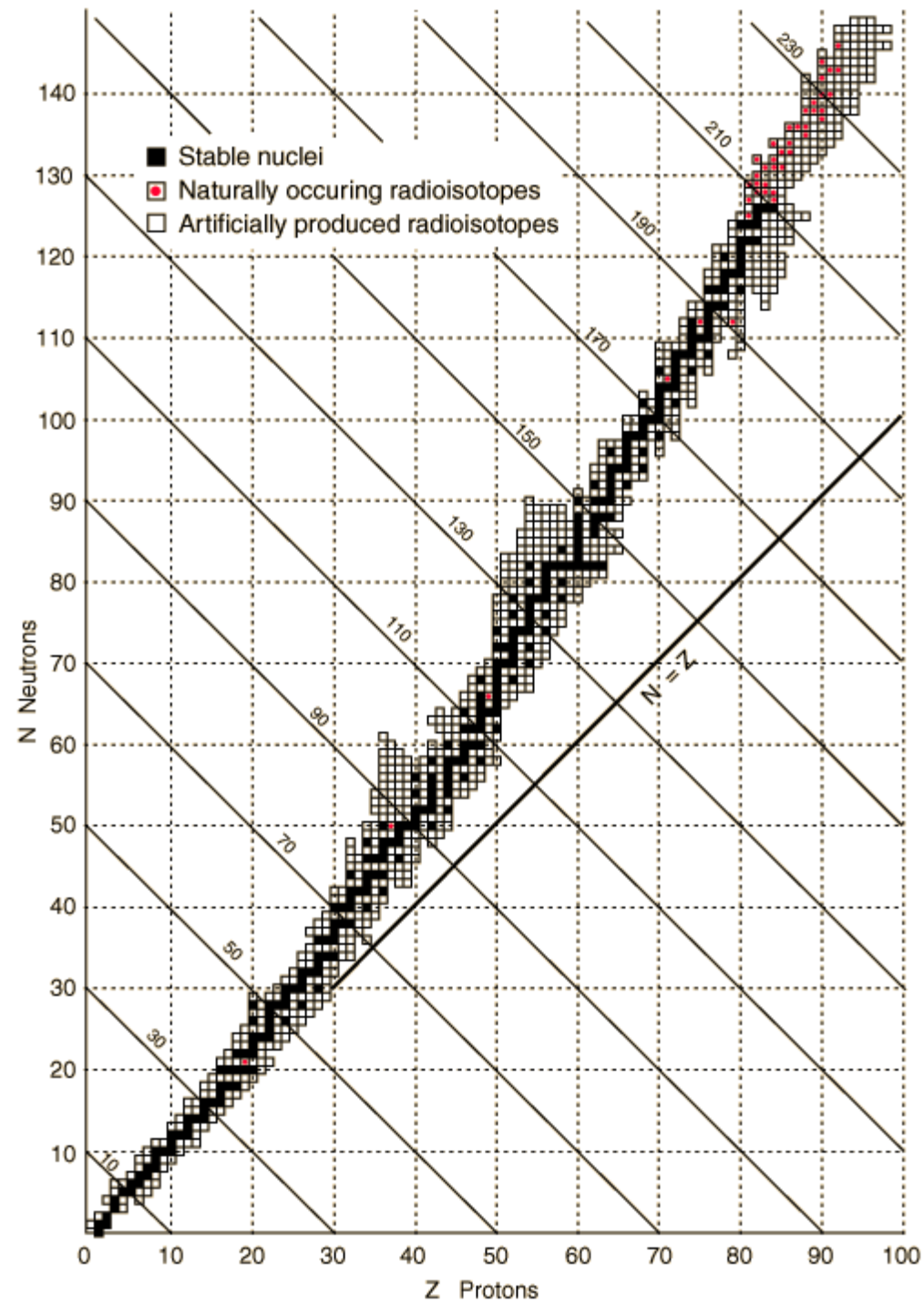
X - symbol pierwiastka

A - liczba masowa

Z - liczba atomowa

N - liczba neutronowa

ścieżka stabilności



+ gwiazdy neutronowe

The Periodic table of the elements

Main groups		Other groups								Main groups							
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra		104 Ku	105 Ha	106 Sg	107 Ns	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uuu	112 Uub		114 Uuq				

Lanthanoids

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

Actionoids

89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
-----------------	-----------------	-----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------	------------------	------------------	------------------

Background color = Metal

Background color = Metalloid

Background color = Nonmetal

Font color = Solid states

Font color = Liquids

Font color = Gases

Stabilne nuklidy

274 stabilnych nuklidów $Z < 84$

od wodoru $Z = 1$ do bizmutu $Z = 83$

następny *polon* $Z = 84$ jest już nietrwały

niestabilne wyjątki: *technet* $Z = 43$ oraz
promet $Z = 61$

	N niep.	N parz.	
Z niep.	4	50	54
Z parz.	55	165	220
	59	215	274



Nuklidy

nuklidy ${}^A_Z X$ ${}^{197}_{79} Au$

izotopy ${}^A_Z X, {}^{A'}_Z X$ ${}^1_1 H, {}^2_1 H, {}^3_1 H$

izobary ${}^A_Z X, {}^A_{Z'} X$ ${}^{14}_6 C, {}^{14}_7 N, {}^{14}_8 O$

izotony ${}^A_Z X, {}^{A+m}_{Z+m} X$ ${}^6_2 He, {}^7_3 Li, {}^8_4 Be, {}^9_5 B$

izomery ${}^A_Z X, {}^A_Z X^*$ **wzbudzenie**

Masy nuklidów

Spektrometr masowy

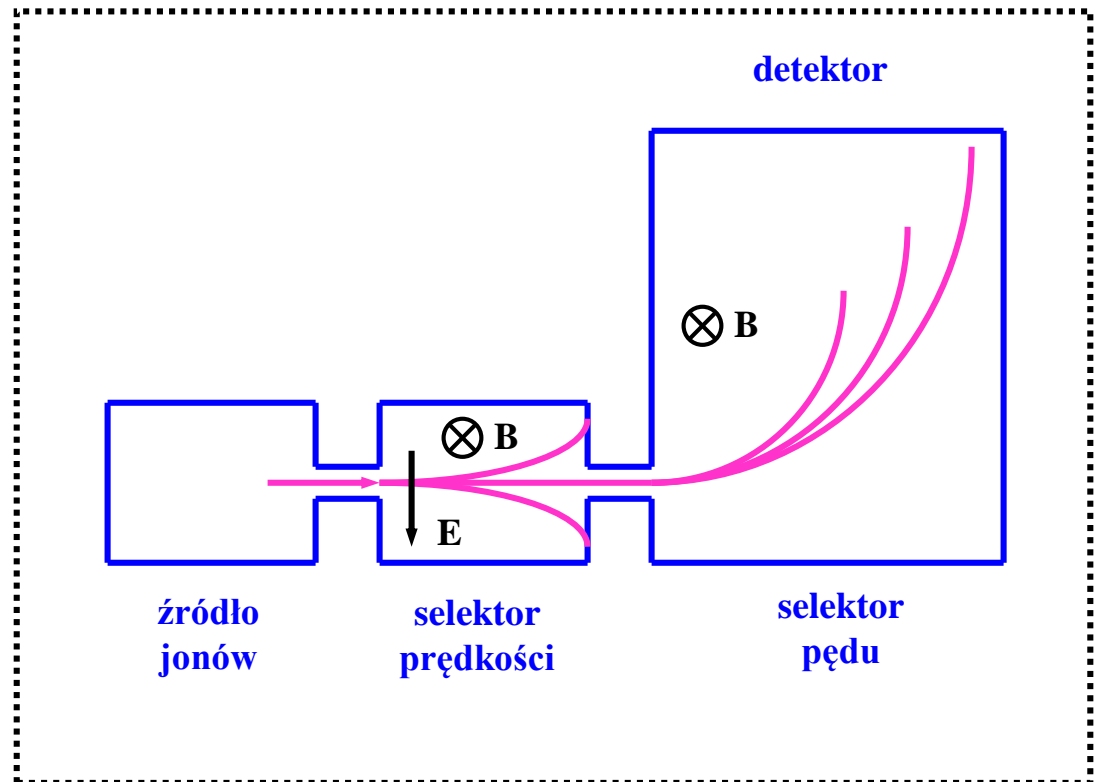
$$qE = qvB$$

$$v = E / B$$

$$mv^2 / r = qvB$$

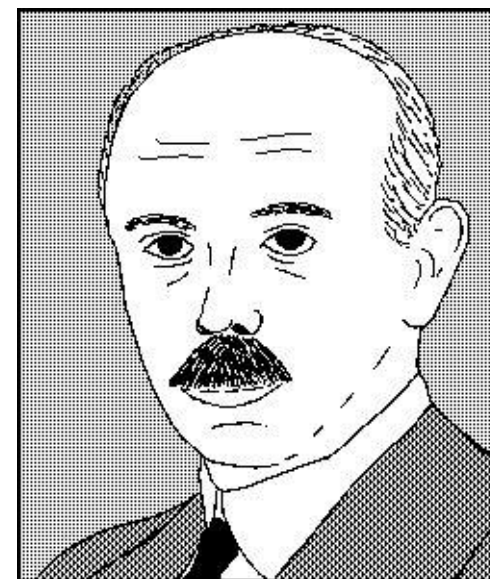
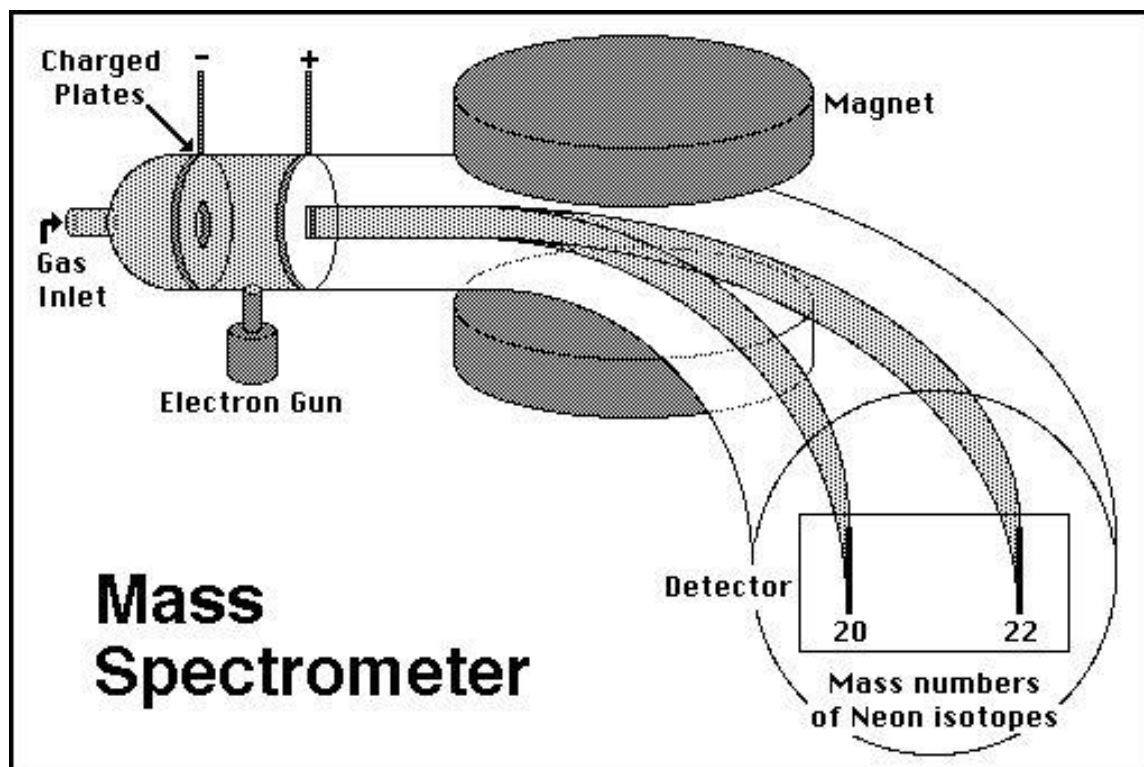
$$r = mv / qB$$

$$m = qrB^2 / E$$



separacja izotopów...

Aston 1919



Francis Aston
1877 - 1945



1922

od 1919 zidentyfikował i zmierzył masy 212 izotopów...

Defekt masy

m – masa jądra

m_p – masa protonu (938.3 MeV)

m_n – masa neutronu (939.6 MeV)

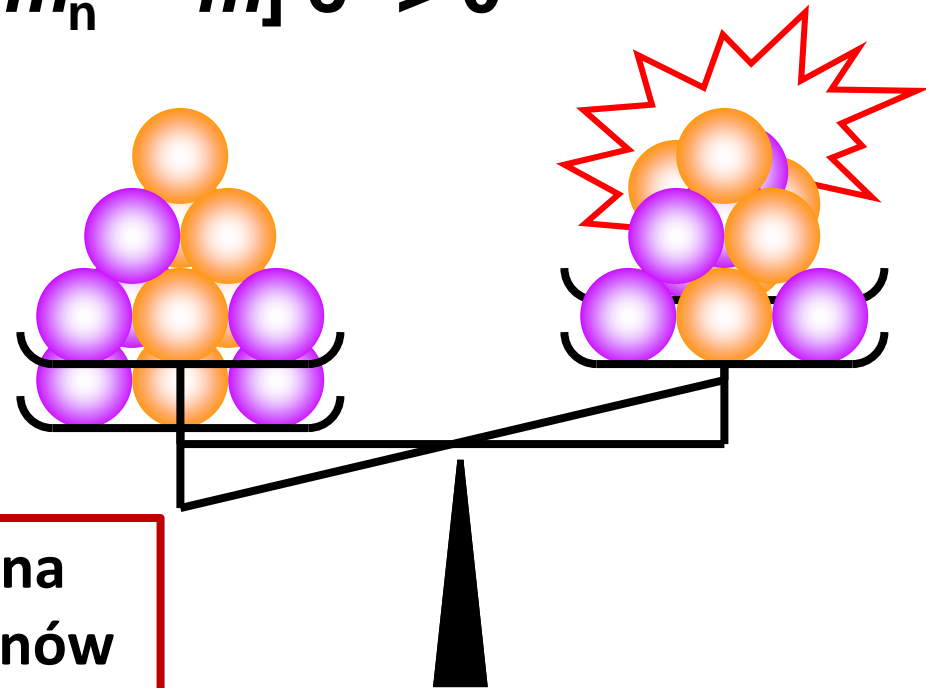
defekt masy:

$$\Delta m c^2 = [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m] c^2 > 0$$

energia wiązania:

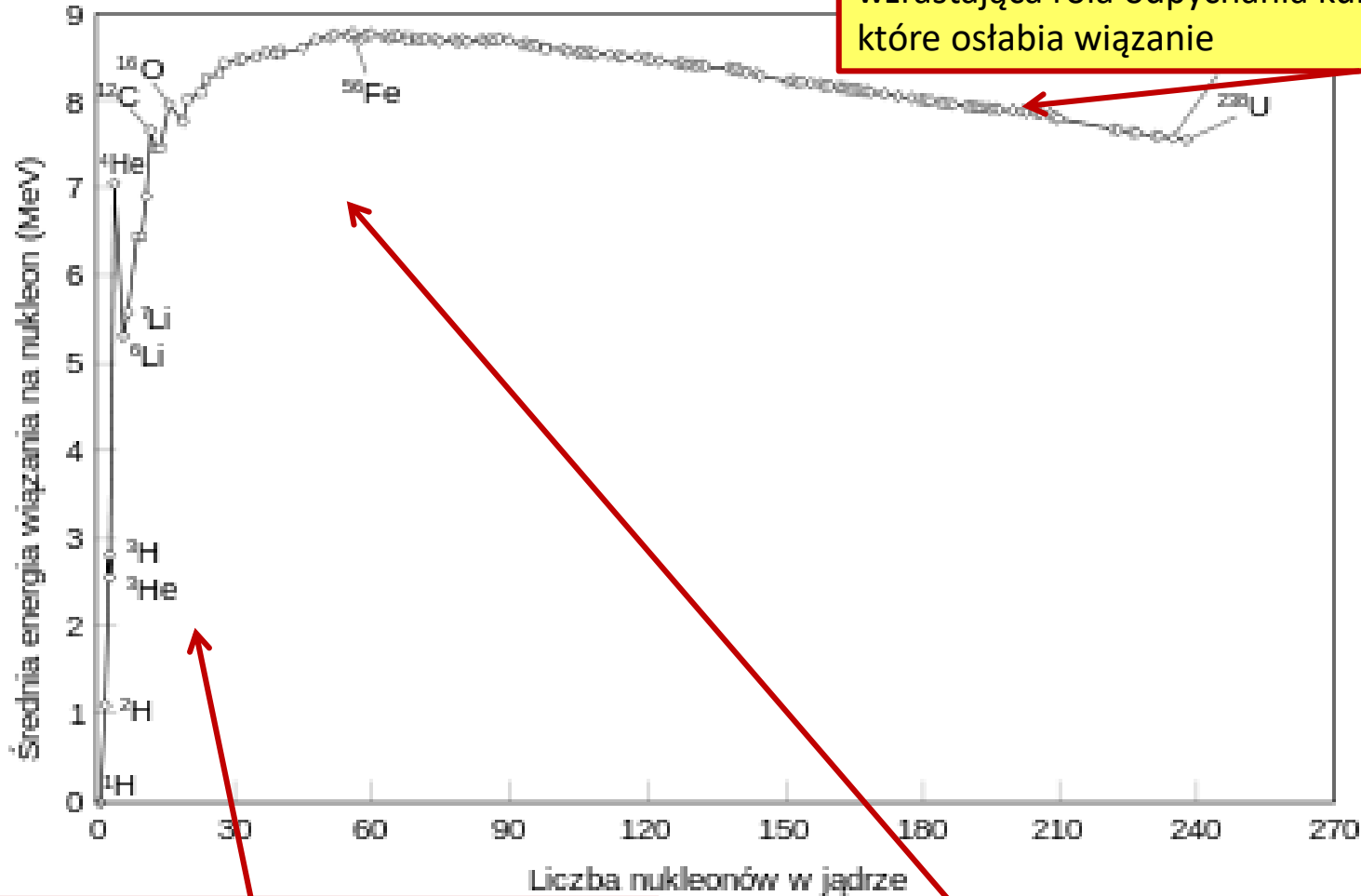
$$E_B = \Delta m c^2$$

$$E_B / A \cong 8.5 \text{ MeV}$$



Energia wiązania: energia potrzebna do rozdzielenia wszystkich nukleonów

Energia wiązania

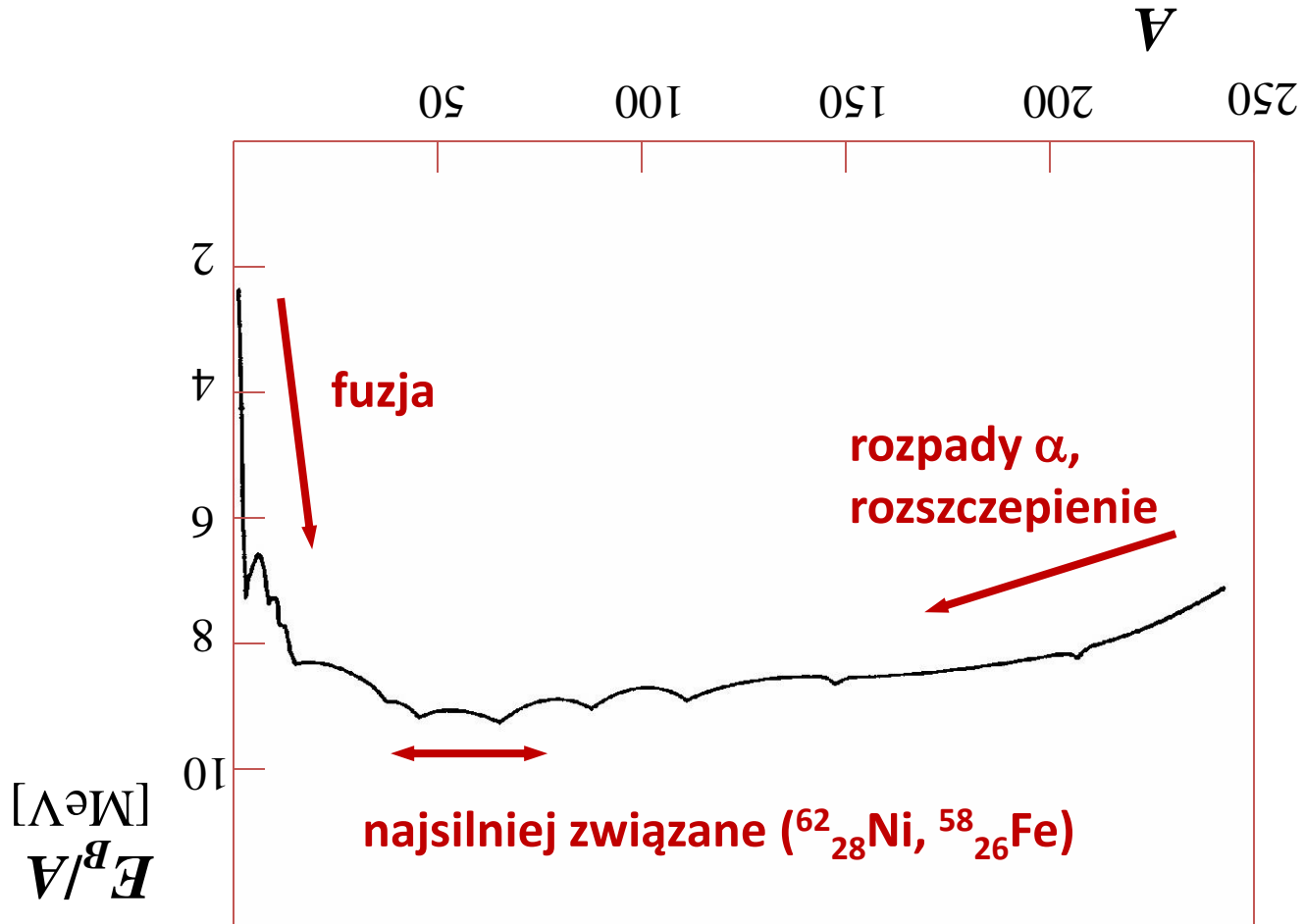


Dla ciężkich jąder energia wiązania maleje -
wzrastająca rola odpychania kulombowskiego,
które osłabia wiązanie

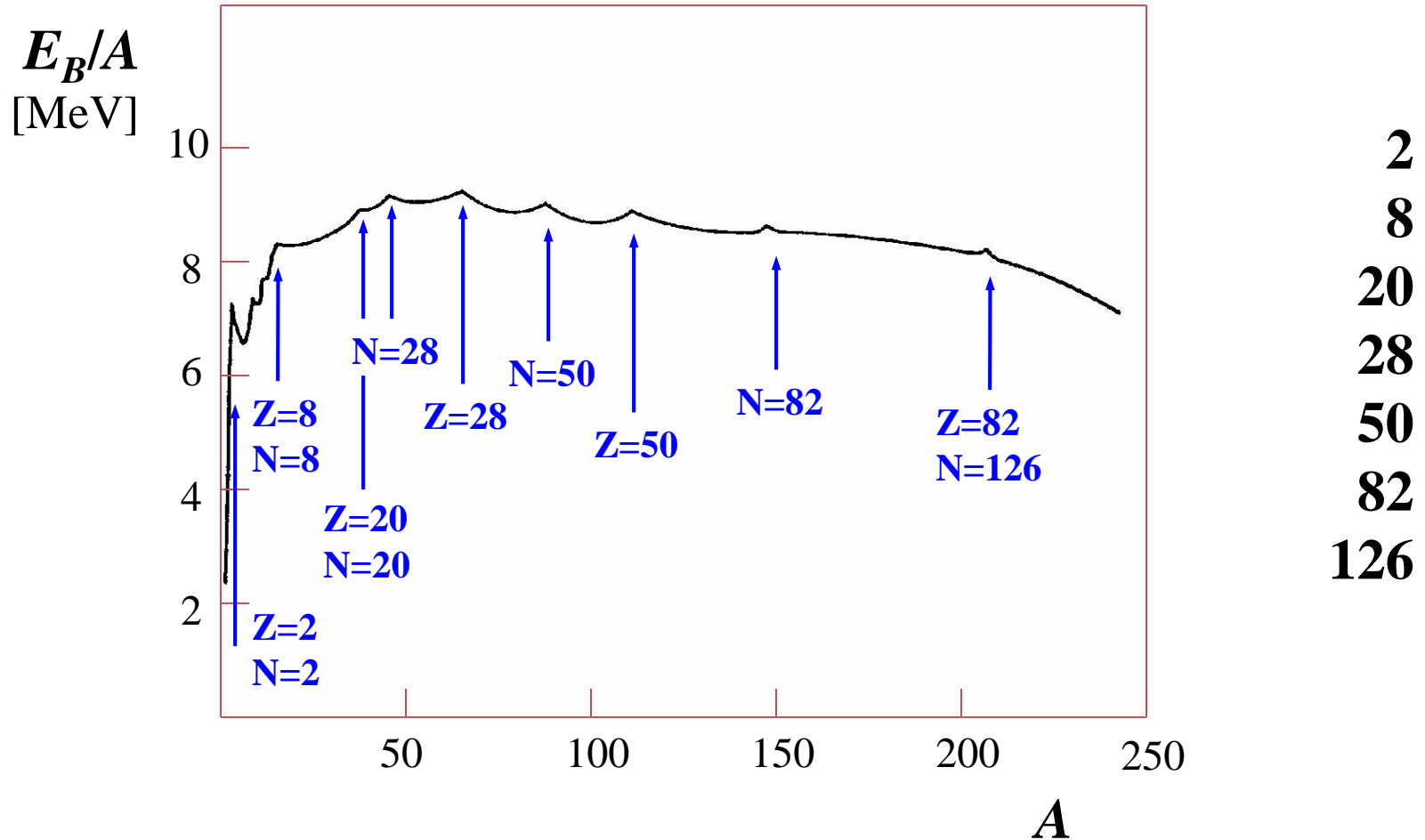
Dla małych A energia wiązania rośnie -
dodanie każdego kolejnego nukleonu
wzmacnia wiązanie układu

Dla średnich liczb masowych $A \sim 60$ energia
wiązania się nasycza => **wysycenie sił jądrowych**
=> **krótki zasięg oddziaływania jądrowego**

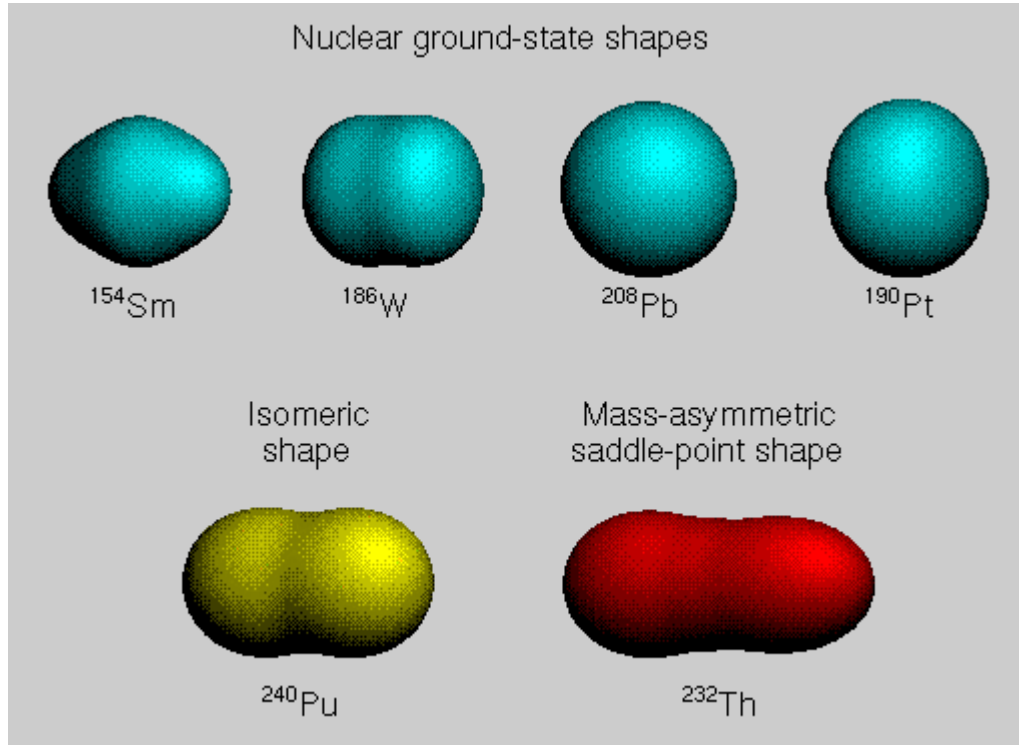
stabilność



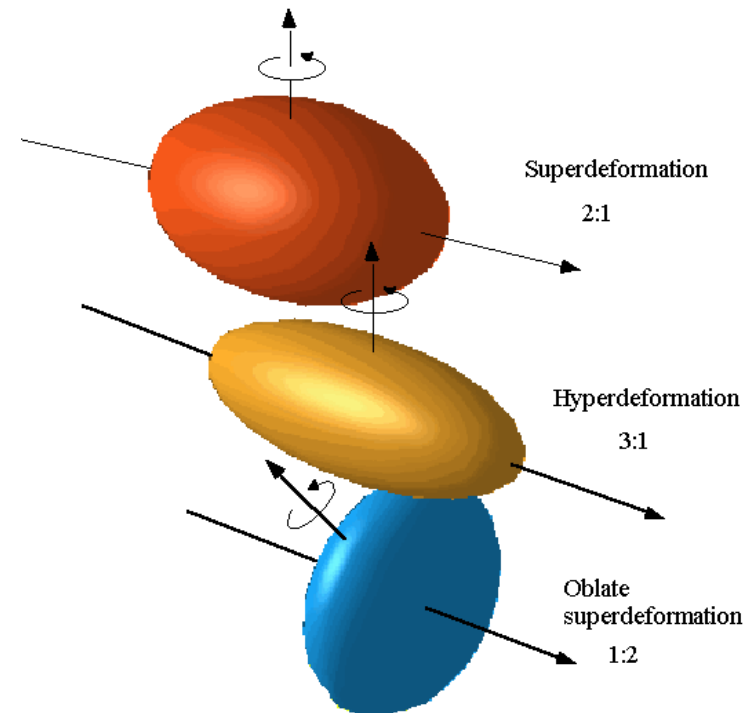
liczby magiczne



Kształty jąder



Z uwagi na złożony charakter oddziaływania jądrowego, kształty niesferyczne są często są korzystniejsze energetycznie!



Gęstość jądrowa

$$R = r_0 A^{1/3}$$

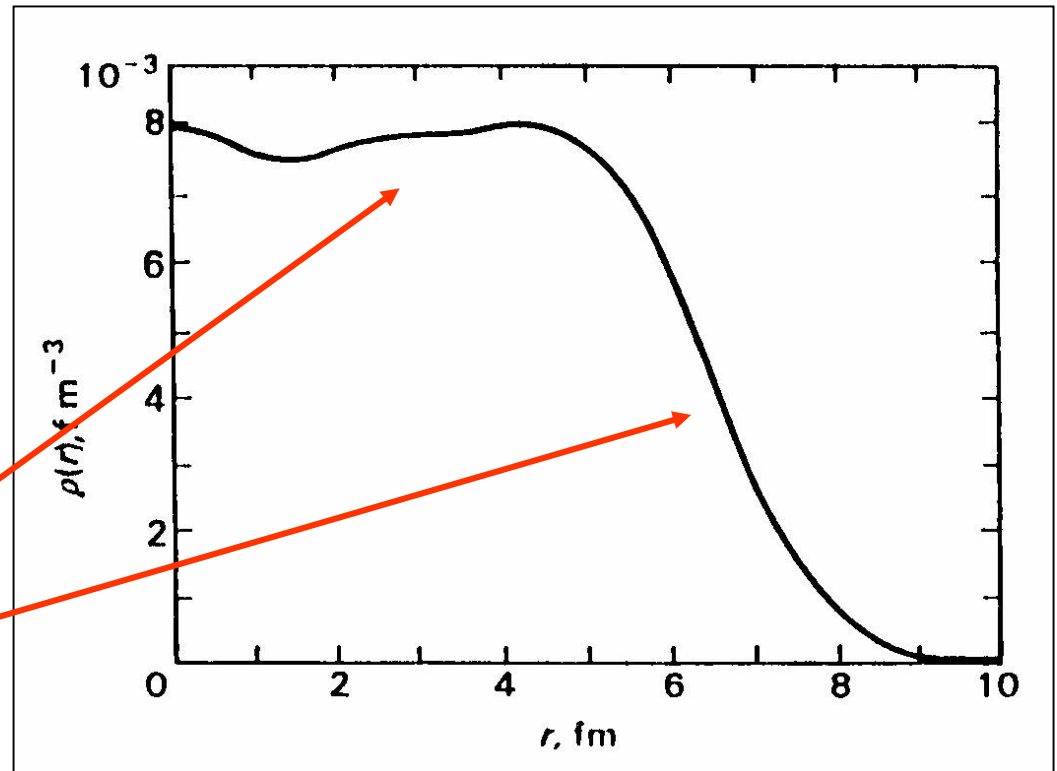
$$r_0 \cong 1.2 \text{ fm}$$

$$R_{\text{Pb}} \cong 7.1 \text{ fm}$$

^{208}Pb (eksperyment)

prawie stała gęstość

dyfuzyjna granica



Jądra mają jednakową gęstość

rozkład Fermiego

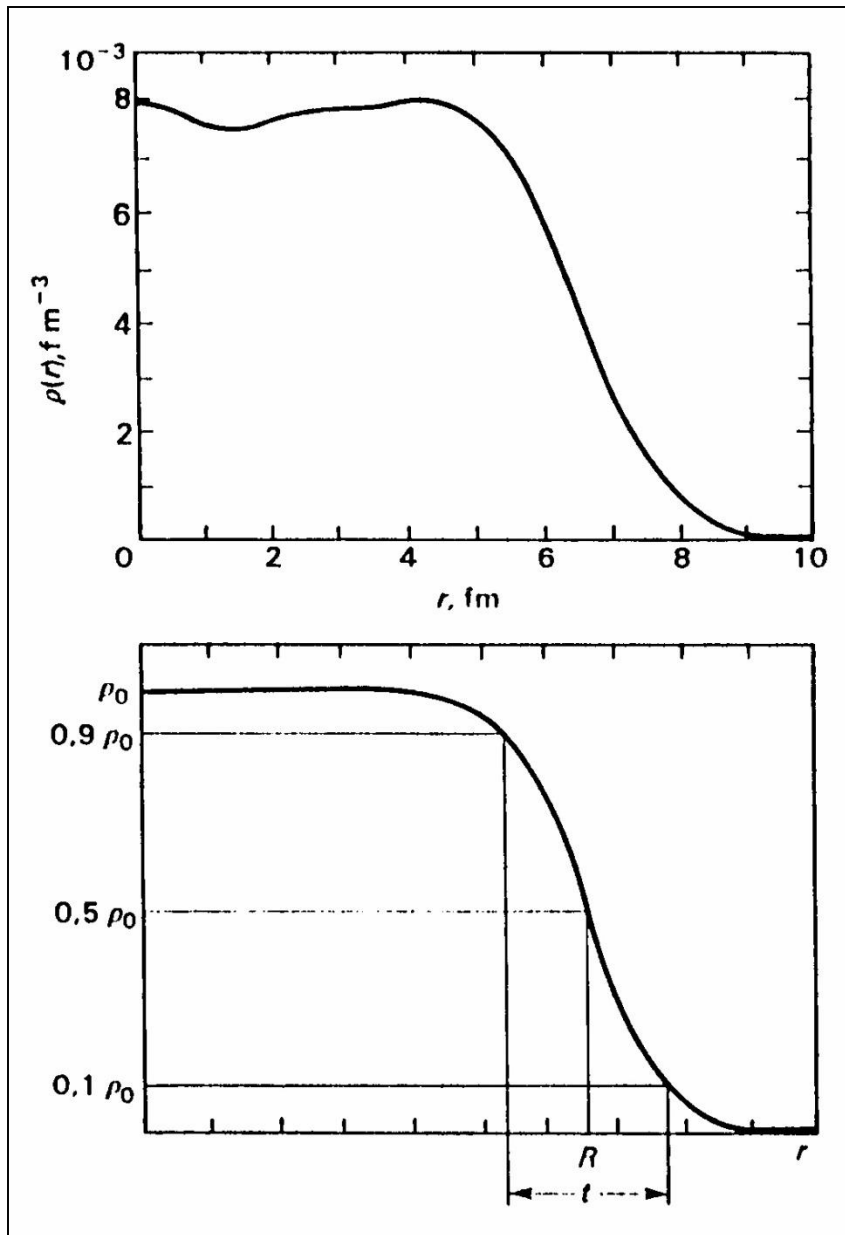
$$A > 40$$

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp \frac{r - R}{a}}$$

R – promień połówkowy
 a – parametr rozmycia
 $t = (4 \ln 3) a$ – grubość warstwy powierzchniowej

$$t \cong 2.4 \text{ fm}$$

$$\int \rho(r) dv = A$$



Spin jądra

Spin jądra jest sumą wektorową spinów poszczególnych nukleonów oraz ich momentów orbitalnych.

- Spiny jąder zawierających parzystą liczbę nukleonów są całkowite (równe są całkowitej wielokrotności stałej Plancka)**
- Spiny jąder, w których liczba protonów jak i liczba neutronów jest podzielna przez dwa, tzn. obie liczby są parzyste - są równe zero.**
- Spiny jąder o nieparzystej liczbie nukleonów są połówkowe (równe są nieparzystej wielokrotności połowy stałej Plancka)**

Całkowity moment pędu

Całkowity moment pędu zachowany w każdym procesie jest równy sumie (wektorowej) spinów i orbitalnych momentów pędów.

np. dla 2 cząstek: $\vec{J} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2 + \vec{l}_{12}$

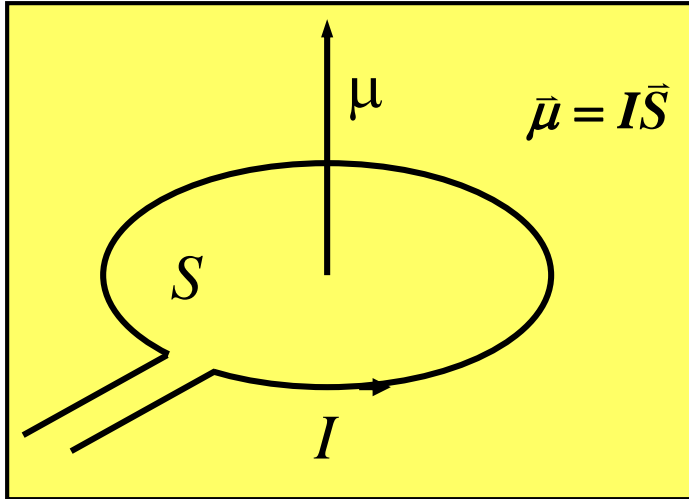
...więc ten spin musi być połówkowy



Ta sama wartość A - oba spiny połówkowe lub oba całkowite.

spin = $\frac{1}{2}$

Moment magnetyczny



masa	m
ładunek	q
częstość	ω
promień	R

moment magnetyczny:

$$\mu = \pi R^2 \frac{q \omega}{2\pi} = \frac{\omega R^2 q}{2}$$

moment pędu:

$$J = m \omega R^2$$

stosunek
giroskopowy

A red arrow points downwards from the text "stosunek giroskopowy" to the fraction $\frac{e}{2m}$ in the following equation, which is also circled in red.

$$\mu = \frac{e}{2m} \cdot J$$

Momenty magnetyczne jąder

$$\mu_e = \frac{e\hbar}{2m_e}$$

magneton Bohra - jednostka magnetycznego momentu dipolowego elektronu (wartość momentu magnetycznego elektronu znajdującego się na orbicie Bohra)

$$\begin{aligned}\mu_p &= 2.8 \mu_0 \\ \mu_n &= -1.9 \mu_0\end{aligned}$$

$$\mu_0 = \frac{e\hbar}{2m_p}$$

magneton jądrowy - jednostka magnetycznego momentu dipolowego ciężkich cząstek (nukleony i jądra atomowe)

momenty jąder:

$$\begin{array}{ll} J = 0 & \mu = 0 \\ J = 1, 2, \dots & \mu > 0 \\ J = 1/2, 3/2, \dots & \text{różnie} \end{array}$$

Spiny jąder

- spin:
 - parzyste
 - parz.parz. $J = 0$
 - niep.niep. $J = 1, 2, \dots 7$
 - nieparzyste $J = 1/2, 3/2, \dots 9/2$

$J = 7$



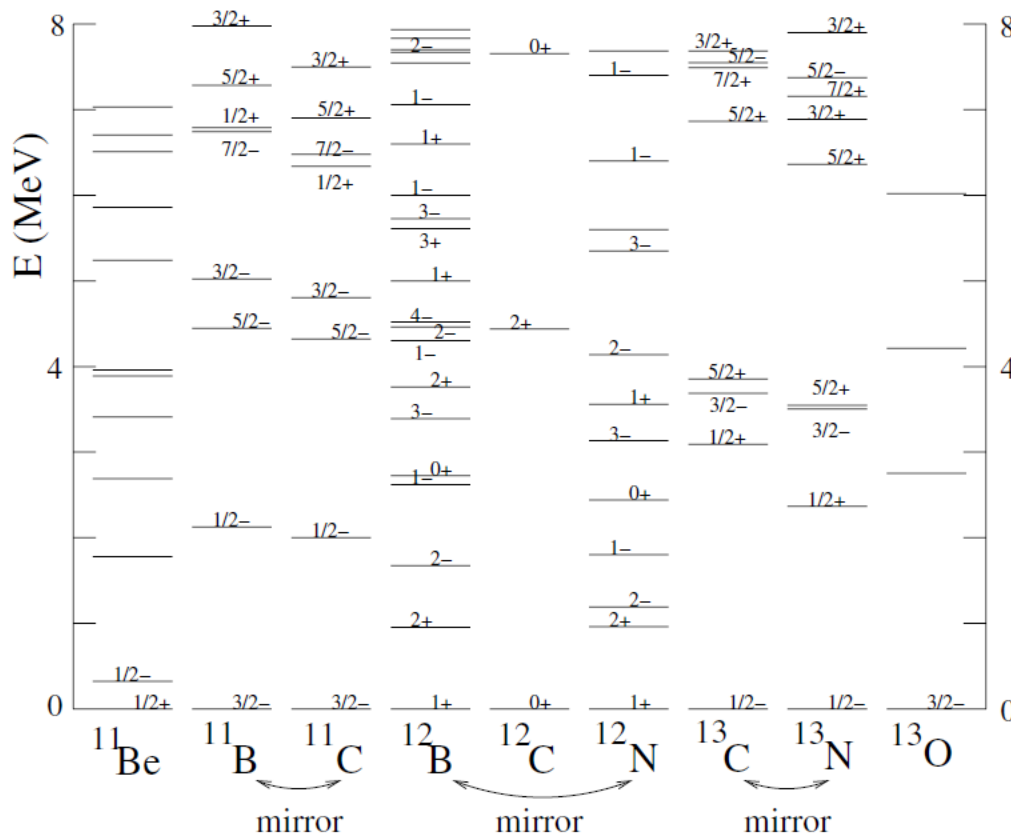
Kompensowanie
(dwójkowanie) spinów

Stany wzbudzone

Stan o najniższej energii => **stan podstawowy**

Energie stanów wzbudzonych ~MeV

Jądro samoczynnie dąży do osiągnięcia stanu o najniższej energii



Przejściami pomiędzy stanami towarzyszy emisja energii (najczęściej kwanty gamma)

Podobieństwo stanów wzbudzonych dla jąder zwierciadlanych



Parzystość

Parzystość – opisuje zachowanie się *funkcji falowej* pod wpływem operacji odbicia lustrzanego $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$.
Brak odpowiednika klasycznego.

Oznaczenie stanu jądra J^P

Spin (całkowity moment pędu) \rightarrow J

\leftarrow Parzystość P

Stan podstawowy jąder parzysto-parzystych

$$J^P = 0^+$$

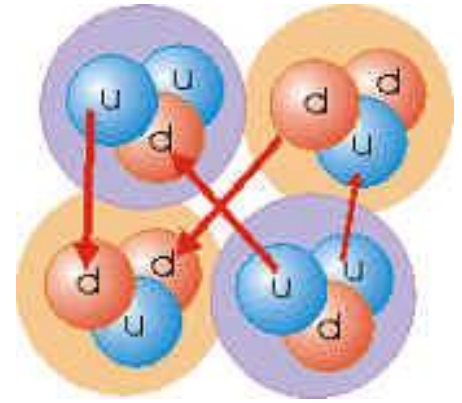
Dla jąder parzysto – nieparzystych spin i parzystość wyznaczony jest przez nukleon nie posiadający pary

$$J = l \pm 1/2 \quad P = -1^l$$

3. Siły jądrowe

Oddziaływanie jądrowe

- Oddziaływanie nukleon-nukleon nie jest oddziaływaniem fundamentalnym!
- Oddziaływanie fundamentalne => oddziaływanie kwark-kwark
- Oddziaływanie jądrowe => efektywne oddziaływanie
- Brak dokładnego opisu matematycznego tego oddziaływania...
- Forma oddziaływanie efektywnego nie jest jednoznaczna => duża liczba dostępnych oddziaływań jądrowych
- Równania QCD (chromodynamiki kwantowej) zbyt skomplikowane nawet dla największych komputerów, aby wychodząc z oddziaływań fundamentalnych, otrzymać oddziaływanie jądrowe.

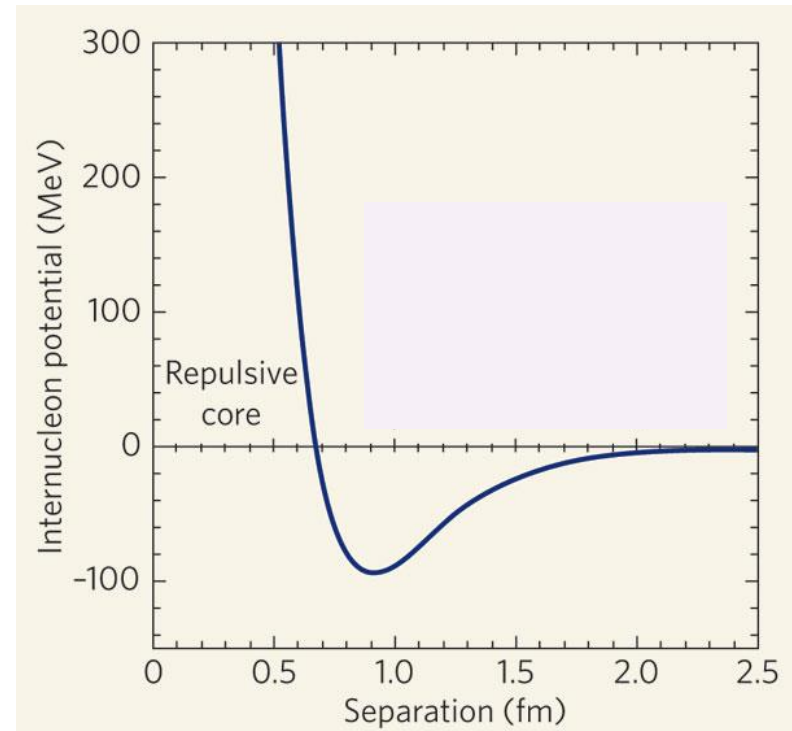


Własności oddziaływań jądrowych

- **Przyciągające** $\rightarrow \varepsilon = \frac{E_B}{A} > 0$
(wiążą nukleony)

- **Odpychające na małych odległościach**

(jądra nie zapadają się, mają skończone rozmiary)



Własności oddziaływań jądrowych

- **Silne**

He: energia wiązania na nukleon: $\varepsilon \approx 7 \text{ MeV}$

energia oddz. elektrom. na nukleon: $\frac{e^2}{r} \approx 0.7 \text{ MeV}$

- **Wysyczone**

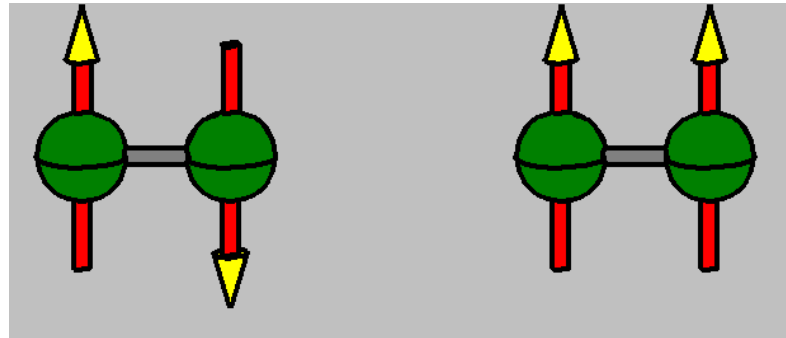
$$E_B \propto A \quad \text{a nie:} \quad E_B \propto A^2$$

każdy nukleon oddziałuje tylko z najbliższymi sąsiadami

Własności oddziaływań jądrowych

- **Krótkozasięgowe** → do ~ 2 fm
- **Zależne od spinu**

Jądro ${}^2\text{H}$ - największa wartość sił jądrowych, gdy spiny nukleonów równoległe do osi deuteronu.



- **Siły jądrowe nie są siłami centralnymi.**

Własności oddziaływań jądrowych

- **Niezależne ładunkowo**

Energie wiązania jąder zwierciadlanych są równe z dokładnością do poprawki na energie oddziaływania kulombowskiego.

$$E_B({}^3H) - E_B({}^3He) = 0.7 \text{ MeV}$$

Oddziaływanie jądrowe każdej pary nukleonów jest jednakowe

$$n - n \equiv p - p \equiv n - p$$

4. Modele jądrowe

Model => przybliżenie rzeczywistości

Od modelu jądrowego wymagamy aby:

- Wyjaśniał zależność energii wiązania od liczby masowej
- Dostarczał warunków trwałości jąder
- Wyjaśniał pochodzenie i rolę energii wiązania
- Dostarczał „praktycznej” metody wyznaczania właściwości jąder, obliczania bilansu energetycznego reakcji....

model cząstki niezależnej

*- nukleon porusza się w
uśrednionym polu pozostałych
nukleonów*

model gazu
Fermiego

model
powłokowy

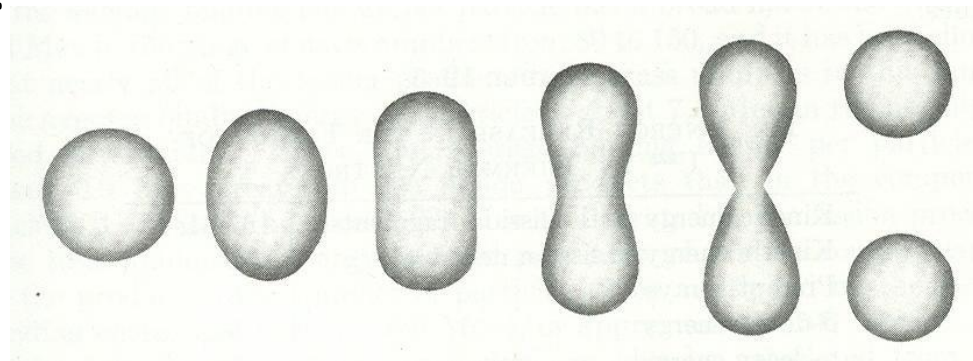
model kolektywny

*- oddziaływania między
nukleonami tak silne, że ich
ruchy są całkowicie
skorelowane*

model
kroplowy

Model kroplowy

- Model fenomenologiczny
- Ciasno upakowane nukleony w jądrze traktujemy jako ciecz
- Energię takiego układu tworzymy przez analogię do energii kropli cieczy
- Model ten może uwzględniać deformacje jąder (kropla może przyjmować różne kształty), rozpady...
- Bardzo prosta fizyka...



energia wiązania $\sim A$
nieściśliwość



kropla

Energia wiązania

$$E_V = a_V \cdot A \quad a_V = \text{const}$$

$$E_S = -a_S \cdot A^{\frac{2}{3}} \quad a_S = \text{const}$$

$$E_C = -a_C \cdot Z^2 \cdot A^{-\frac{1}{3}} \quad a_C = \text{const}$$

Energia wiązania

- energia asymetrii:

$$E_S = -\frac{a_A \cdot (A - 2Z)}{A} \quad a_A = \text{const}$$

znika dla $N = Z$

- energia dwójkowania (pairing):

$$E_p = \begin{cases} +\delta \cdot A^{-\frac{1}{2}} & \text{dla jąder parzysto- parzystych} \\ 0 & \text{dla } A \text{ nieparzystych} \\ -\delta \cdot A^{-\frac{1}{2}} & \text{dla jąder nieparzysto- nieparzystych} \end{cases}$$

$\delta = \text{const}$

C. F. von Weizsäcker i N. Bohr:

półempiryczny wzór na energię wiązania:

$$E_B = E_V + E_S + E_C + E_A + E_P + E_M$$

po dopasowaniu do
ponad 1200 nuklidów:

$$a_V = 15.85 \text{ MeV}$$

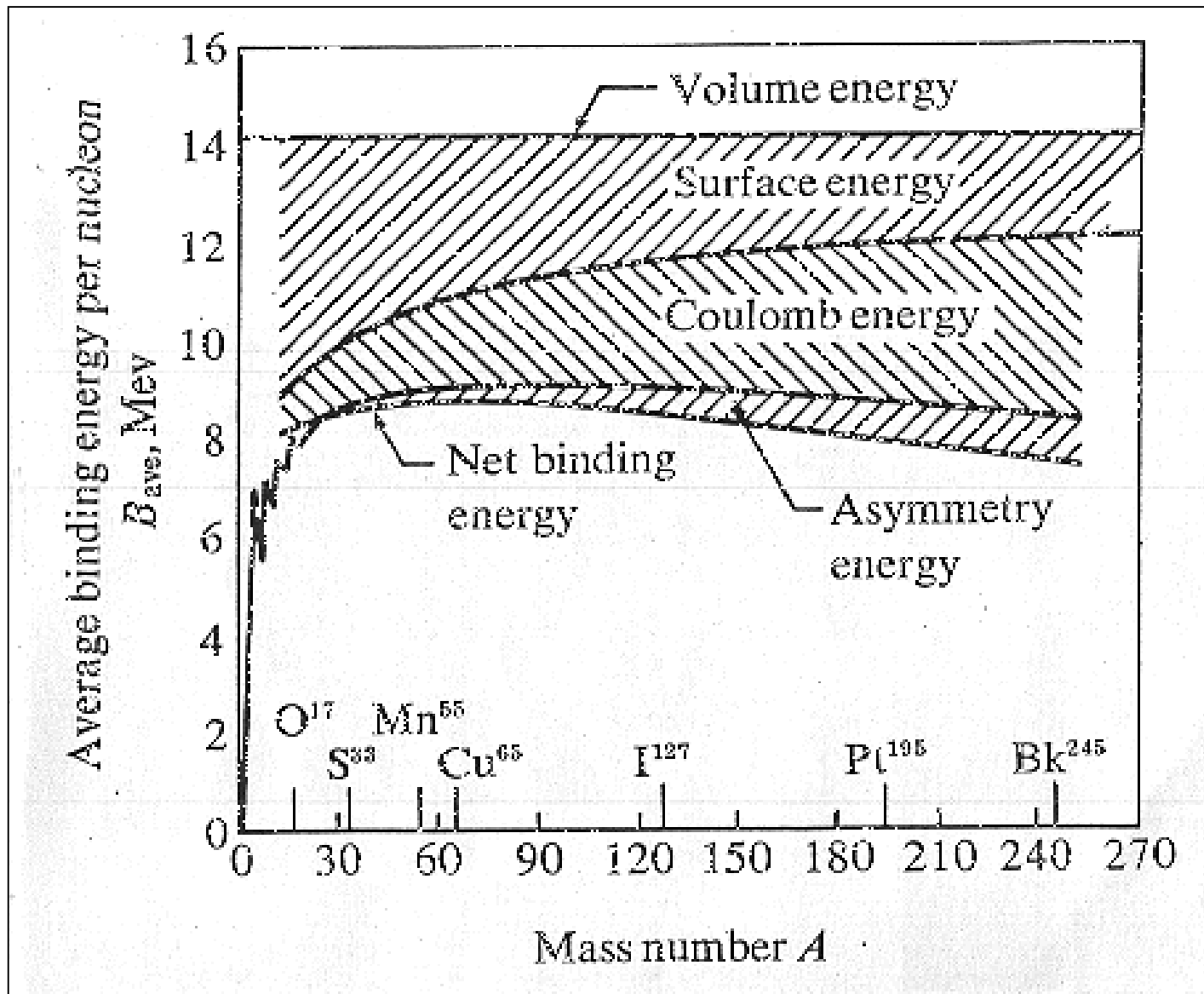
$$a_S = 18.34 \text{ MeV}$$

$$a_C = 0.71 \text{ MeV}$$

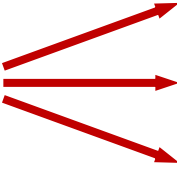
$$a_A = 23.22 \text{ MeV}$$

$$\delta = 11.46 \text{ MeV}$$

czy to działa?



Model kroplowy

Model kroplowy jest:  fenomenologiczny
klasyczny
kolektywny

Można wyznaczać masy jąder:

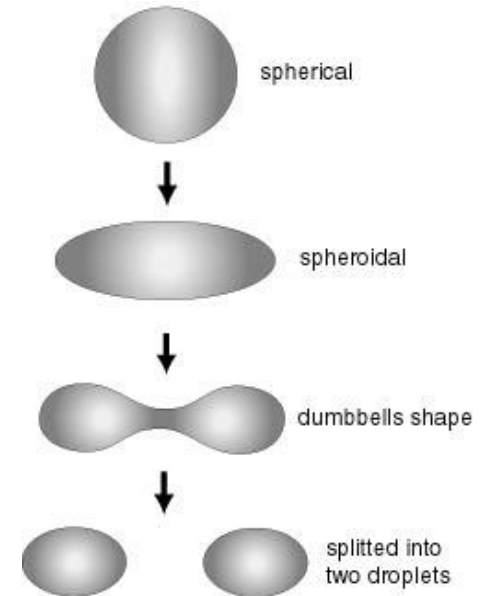
$$m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - E_B(A, Z)$$

a także energie separacji, rozszczepienia, rozpadu α itd...

Przykład - makroskopowy parametr opisujący „podatność” na **spontaniczne rozszczepienie**

$$x = \frac{a_{Coul} \cdot Z^2}{2a_{surf} A} \approx \frac{Z^2}{48A}$$

Im większe x tym większa podatność na spontaniczne rozszczepienie

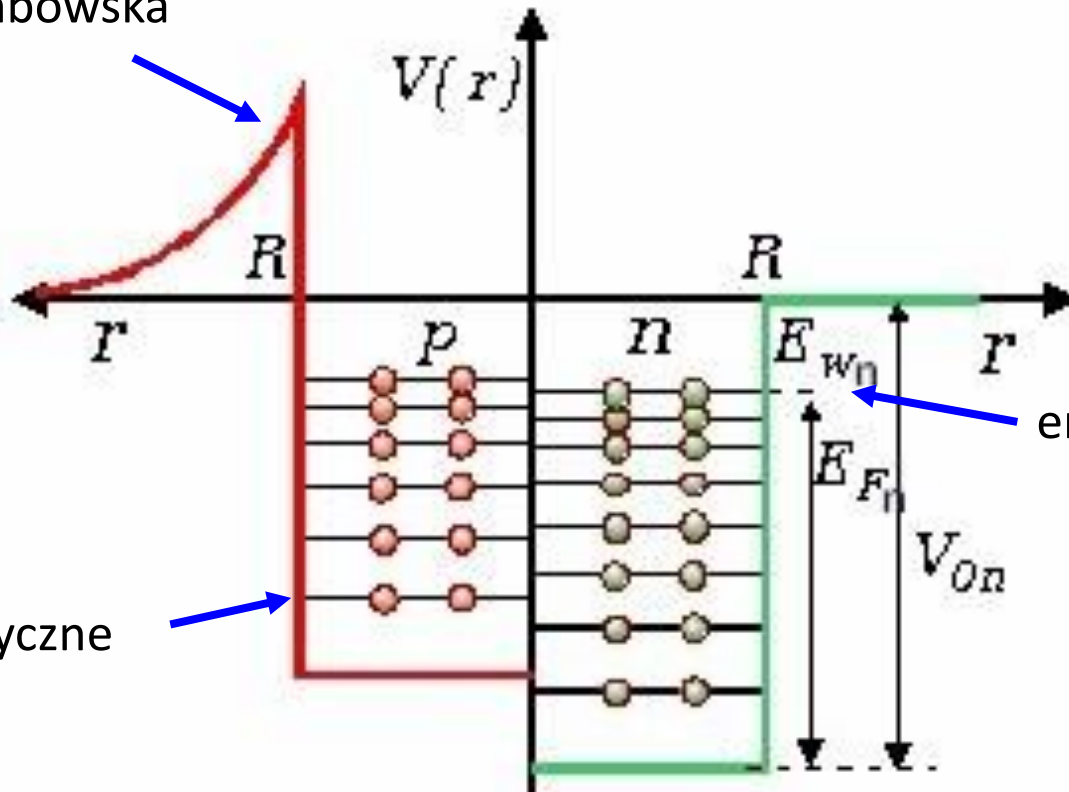


Model gazu Fermiego

Nukleony tworzące jądro traktujemy jako gaz nieoddziałujących fermionów, zamkniętych w pewnej objętości.

Nukleony zajmują najniższe dostępne stany w studni potencjału. Na każdym poziomie tylko 2 identyczne cząstki – zakaz Pauliego.

Bariera kulombowska



Poziomy energetyczne

energia Fermiego

Model gazu Fermiego

W stanie podstawowym wszystkie dostępne stany kwantowe zajęte.



zakaz Pauliego

Nukleony nie mogą zmienić stanu swego ruchu bez doprowadzenia energii z zewnątrz – nie zderzają się.

Średni pęd nukleonów – pęd Fermiego:

$$\langle p \rangle \approx 240 \text{ MeV}/c$$

Model gazu Fermiego

Przykład:



$$m_{\pi} = 140. \text{ MeV}$$

$$\text{energia progowa } E_{\text{LAB}} = 290. \text{ MeV}$$

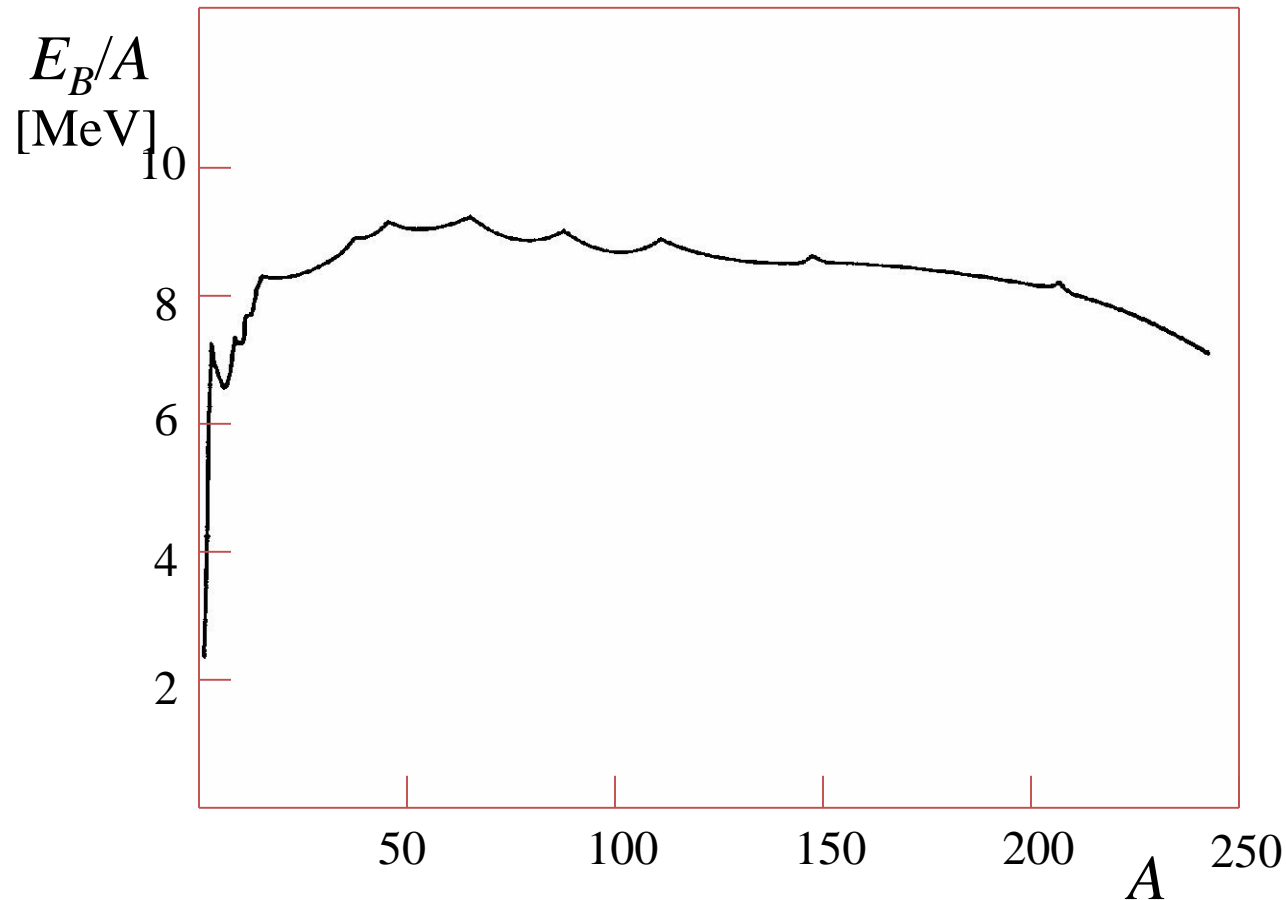
W zderzeniach protonu z jądrem
trzeba uwzględnić pęd Fermiego



energia progowa
niższa

Czego nie wyjaśnia model kroplowy i model gazu Fermiego?

- Występowania „liczb magicznych”,
- Dyskretnego widma kwantów gamma emitowanych z jąder
- ...



Model powłokowy

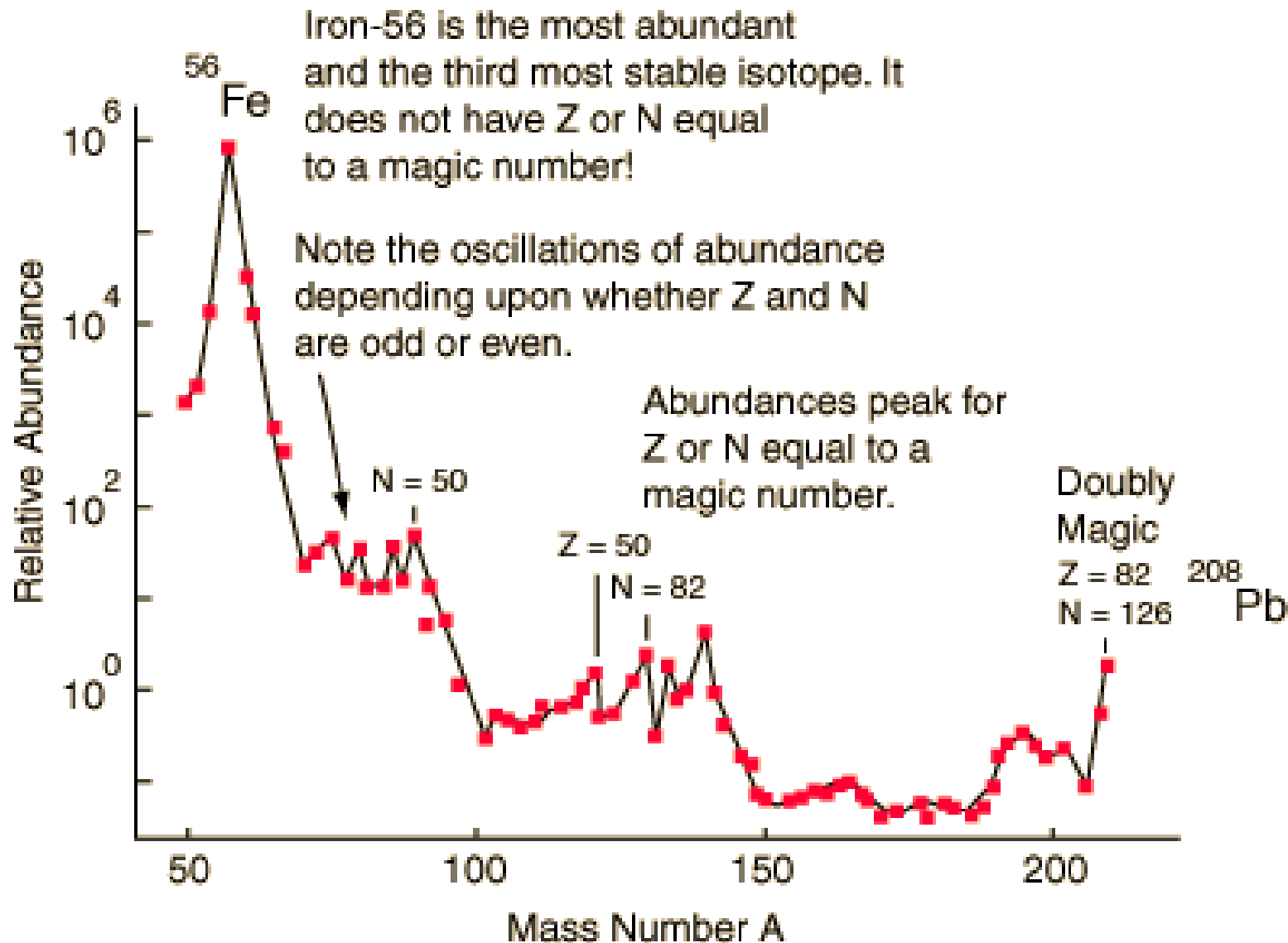
Jądra magiczne = silnie związane

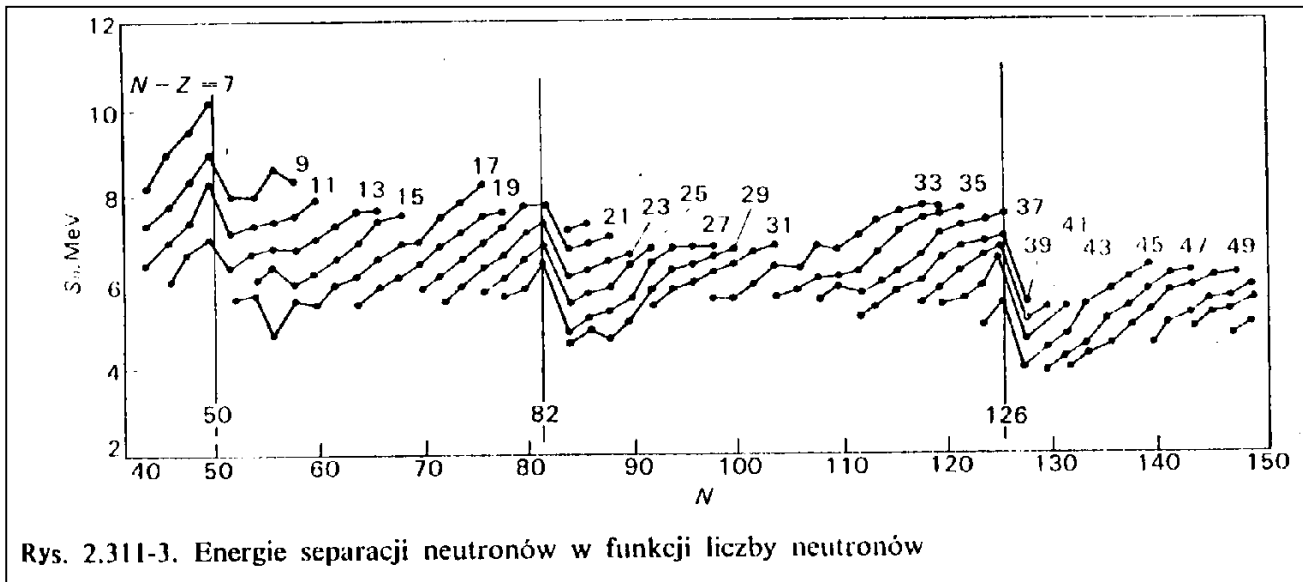
	2	8	20	28	50	82	126
mag Z	${}^4_2\text{He}$	${}^{16}_8\text{O}$	${}^{40}_{20}\text{Ca}$	${}^{xx}_{28}\text{Ni}$	${}^{xx}_{50}\text{Sn}$	${}^{xx}_{82}\text{Pb}$	${}^{208}_{82}\text{Pb}$
mag N				${}^{51}_{23}\text{V}$	${}^{90}_{40}\text{Zr}$	${}^{136}_{54}\text{Xe}$	



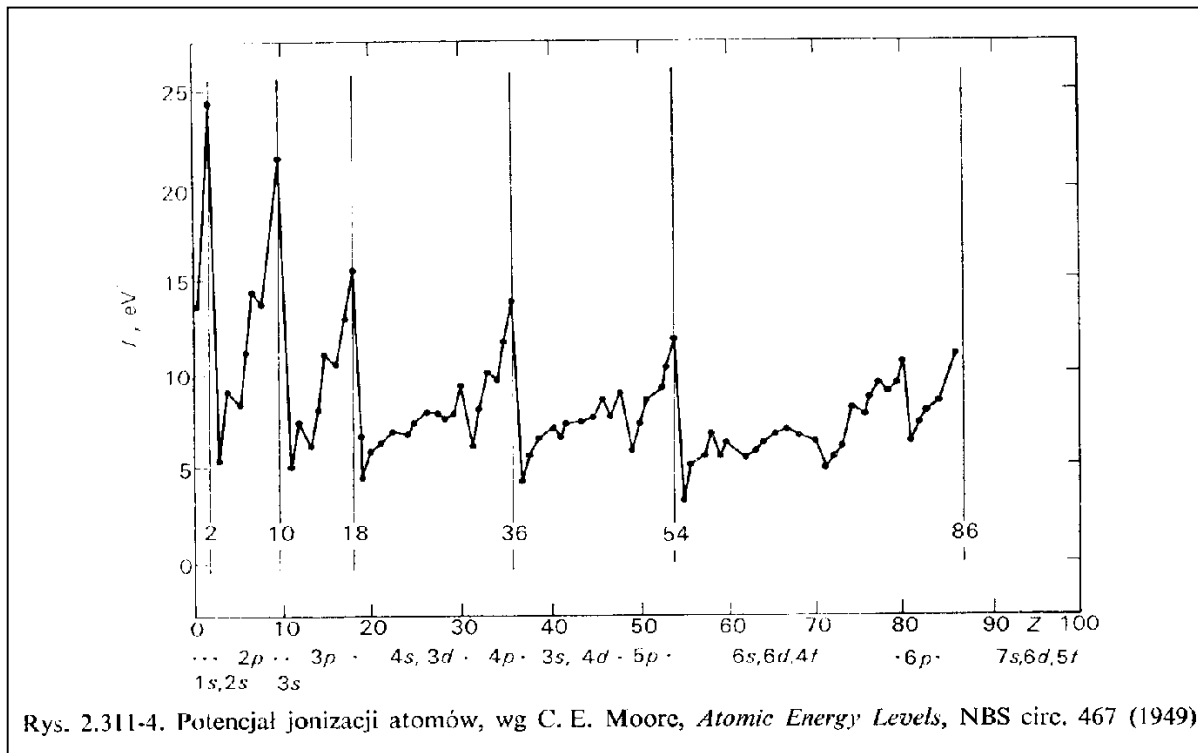
Jądra podwójnie magiczne

Częstości występowania nuklidów



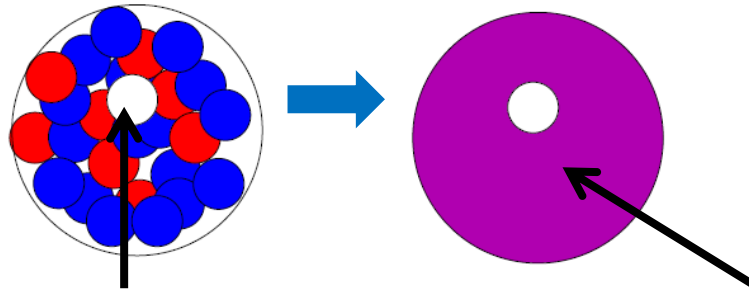


Rys. 2.311-3. Energie separacji neutronów w funkcji liczby neutronów



Rys. 2.311-4. Potencjał jonizacji atomów, wg C. E. Moore, *Atomic Energy Levels*, NBS circ. 467 (1949)

Potencjał w modelu powłokowym



Rozważamy **nukleon**, znajdujący się w **polu potencjału** pochodzącego od pozostałych nukleonów.

$$V(r) = \frac{-V_0}{1 + \exp\left(\frac{r-R}{a}\right)}$$

potencjał Woodsa - Saxona

$$V_0 = 57 \text{ MeV}$$

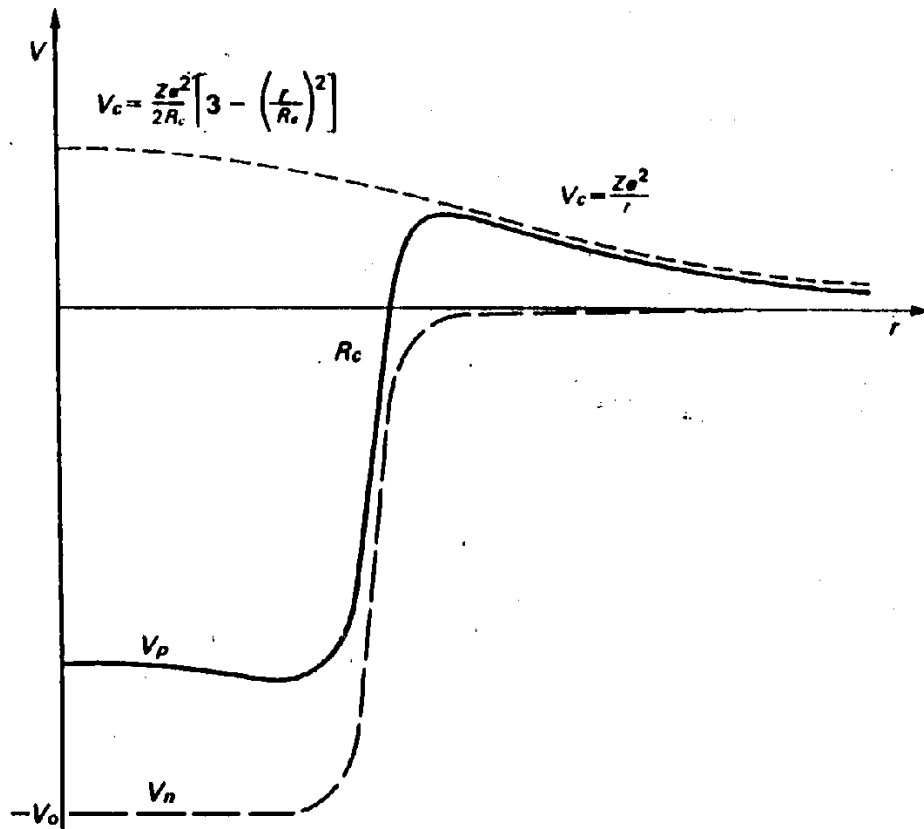
$$R = 1.25 \text{ fm} \cdot A^{\frac{1}{3}}$$

$$a = 0.65 \text{ fm}$$

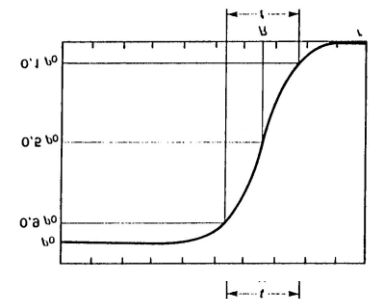
Dodatkowo dla protonów - potencjał kulombowski

$$V_C(r) = \begin{cases} \frac{Ze^2}{r} & r > R \\ \frac{Ze^2}{2R} \left[3 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] & r < R \end{cases}$$

Kształt studni potencjału



Rys. 2.312-1. Kształt centralnej części potencjału modelu powłokowego dla neutronów i protonów



Liczby kwantowe w modelu powłokowym

orbitalna liczba kwantowa l - określa orbitalny moment pędu nukleonu: $l \cdot \hbar$

l przybiera wartości całkowite, a liczba możliwych ustawień dla danego l wynosi $2l + 1$

spin s - określa własny moment pędu nukleonu

liczba możliwych ustawień spinu ($s = \frac{1}{2}$): $2s + 1 = 2$

dla danego l : $2(2l + 1)$ możliwych stanów

Poziomy energetyczne

$$l = 0$$

stan s

główna liczba kwantowa

$\swarrow \downarrow$
 $1s, 2s, \dots$

$$l = 1$$

stan p

$1p, 2p, \dots$

$$l = 2$$

stan d

$$l = 3$$

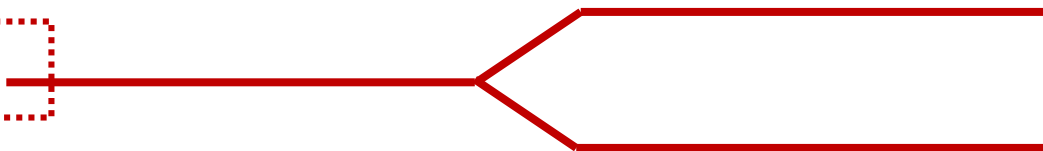
stan f

dla $l \neq 0$ poziomy energetyczne rozszczepiają się (sprzężenie spin-orbita)

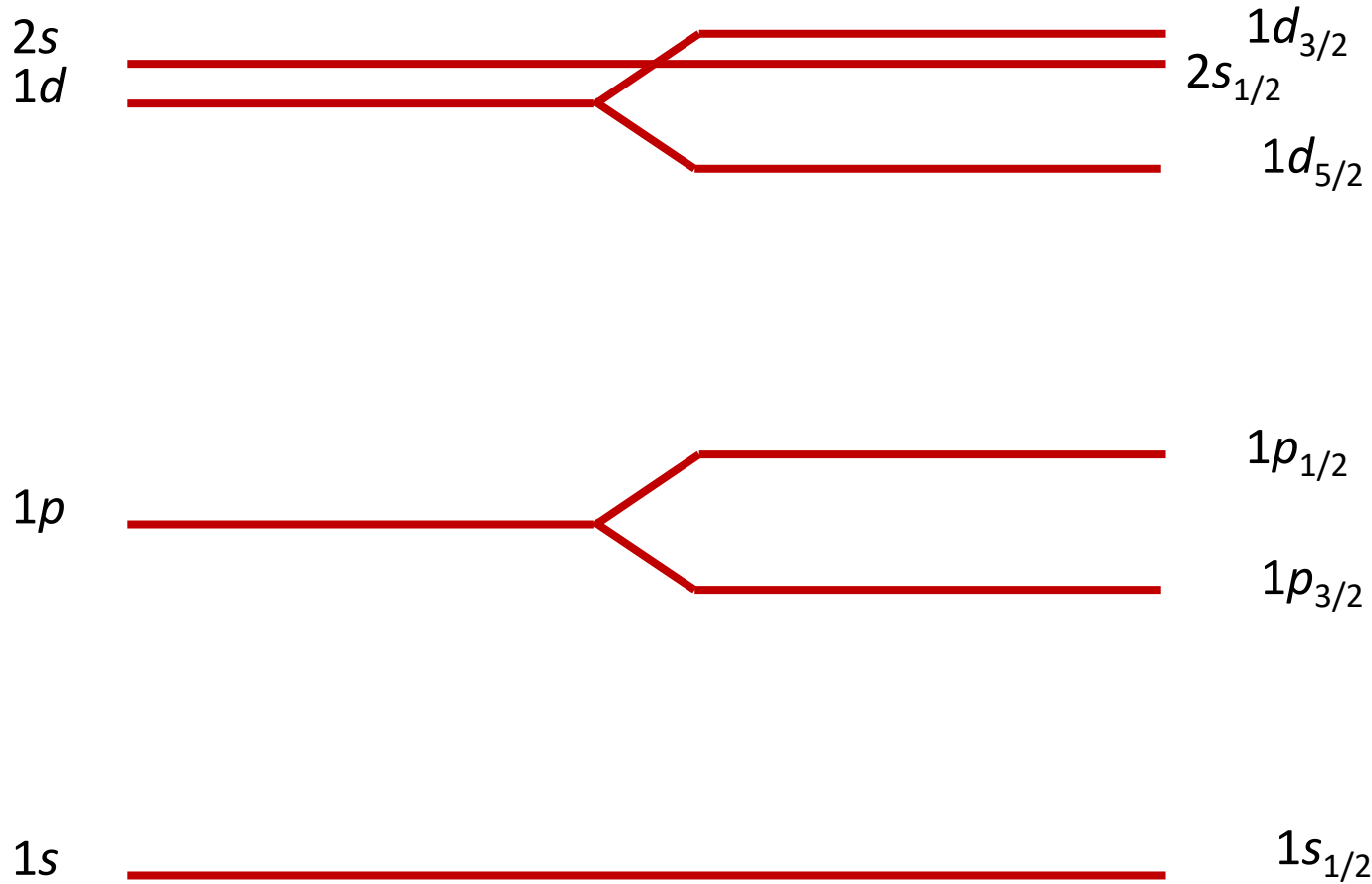
$$(l)$$

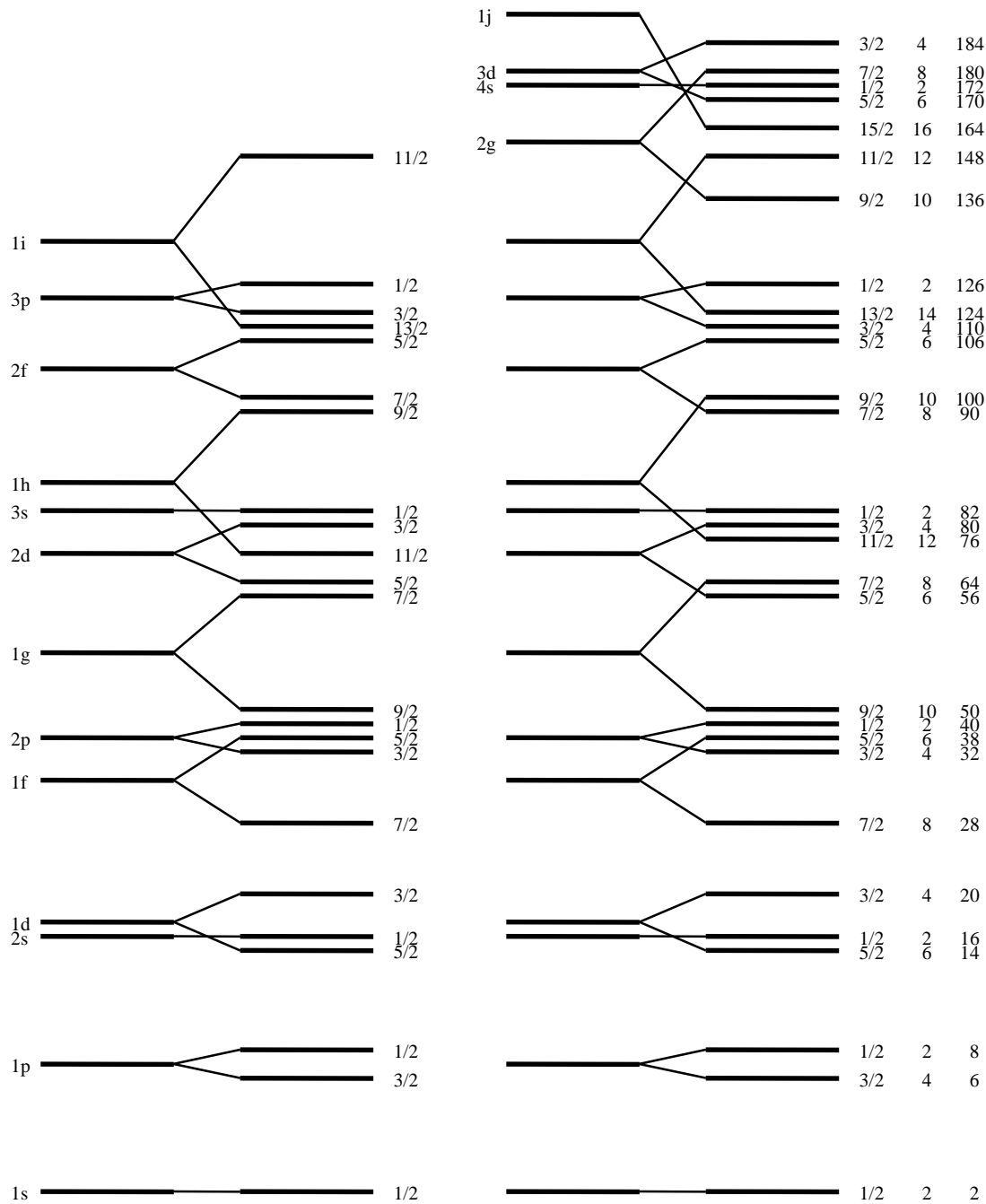
$$(l - \frac{1}{2})$$

$$(l + \frac{1}{2})$$



Najniższe poziomy energetyczne





126

82

50

28

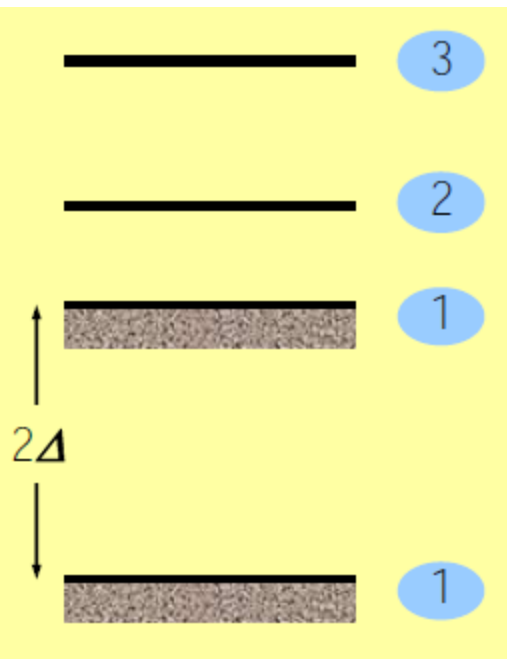
20

8

2

Łączenie w pary – *pairing*

- Całkowity moment pędu jądra parzysto-parzystego wynosi 0
- Jądra niemagiczne powinny być zdeformowane - jednak jądra o liczbie nukleonów zbliżonych do magicznej mają symetrię sferyczną
- Jądra parzyste mają przerwę energetyczną pomiędzy stanem podstawowym a pierwszym stanem wzbudzonym



- Nukleony w jądrze tworzą tzw. pary Coopera
=> parę tworzą nukleony o tym samym momencie pędu
ale przeciwnych spinach
=> energia wiązania pary to 2Δ
=> duża stabilność jąder parzysto-parzystych
=> łączenie w pary jest odpowiedzialne za zjawisko
nadprzewodnictwa/nadciekłości
=> materia w jądrze jest **nadprzewodząca/nadciekła**