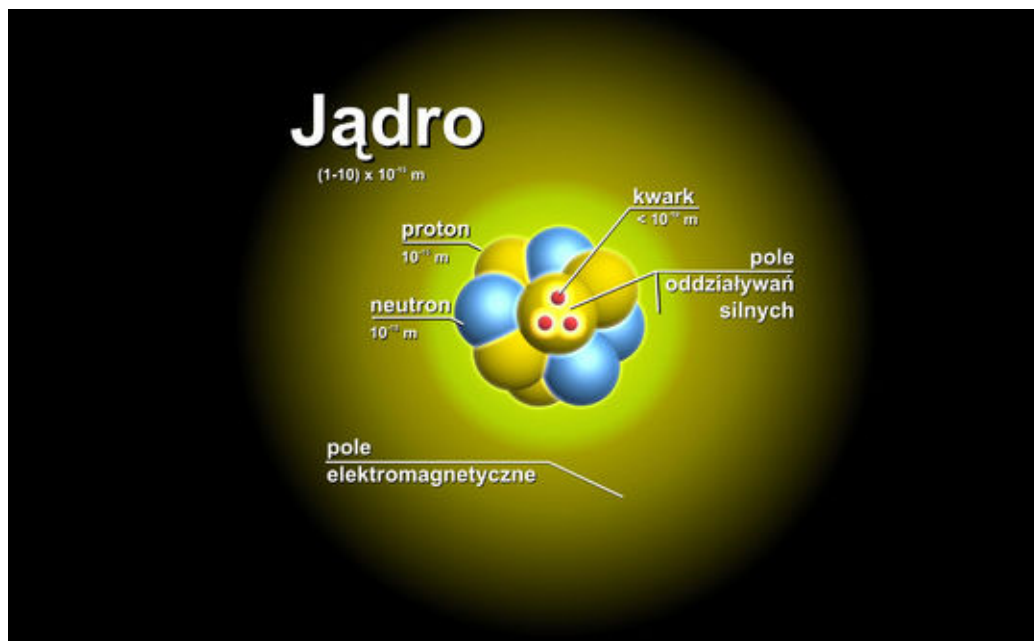


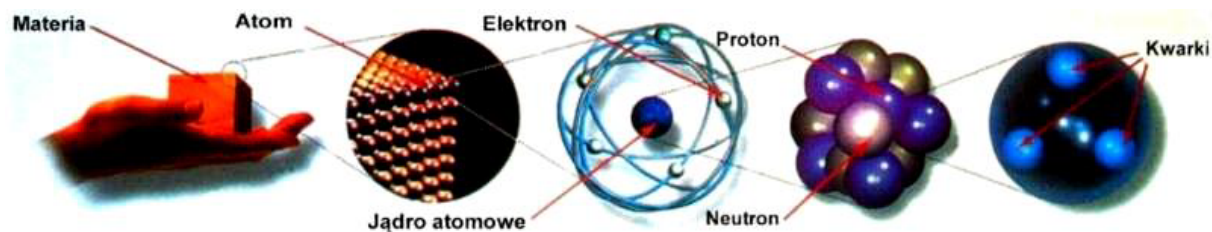
1. Jądro atomowe



Jądro atomowe w prezentacji Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie;
zob. <http://popul.ifj.edu.pl/badania/2/zobacz.html>

1.1. Jądro atomowe jako element struktury materii

Pozycja jądra atomowego jako elementu struktury materii zmieniała się wraz z rozwojem naszej wiedzy. Kiedy w końcu XIX wieku Maria Skłodowska-Curie odkryła wraz z mężem pierwsze izotopy promieniotwórcze, uważała intuicyjnie, że promieniowanie to wydobywa się „z wnętrza atomu”. Wprowadziła też do fizyki nowy termin „promieniotwórczość”. Nie mogła jednak powiedzieć „promieniowanie jądrowe”, bo pojęcie „jądro atomowe” jeszcze wtedy nie istniało. Pojawiło się jako rezultat słynnego doświadczenia Rutherforda z 1911 roku, kiedy wyjaśnienie rozpraszania cząstek alfa na cienkiej folii ze złota wymagało istnienia wewnątrz atomu obiektu bardzo małego ale skupiającego prawie całą masę i dodatni ładunek atomu. Ten obiekt, to właśnie **jądro atomowe**.



ręka	atom	jądro atomowe	proton, neutron	kwark
10^{-1}m	10^{-10}m	10^{-14}m	10^{-15}m	10^{-18}m

Rys.1.1.1. Skala wielkości obiektów: makroskopowych, atomowych, jądrowych i subjądrowych. Charakterystyczne rozmiary poszczególnych obiektów podane są pod rysunkiem.

W ciągu XX wieku nasze rozumienie budowy materii ewoluowało od struktury atomowej po strukturę kwarkową. Ilustruje to Rys.1.1.1. Zjawiska w skali makroskopowej, atomowej i jądrowej, to zupełnie „inne światy” i inne oddziaływania odgrywają w nich dominującą rolę. Grawitacja odgrywa zasadniczą rolę w skali kosmicznej, a jest zanedbywana w opisie zjawisk atomowych i jądrowych. Efekty kwantowe są nie do pominięcia w skali atomowej, a są zanedbywane w skali makroskopowej itd. Doświadczenia prowadzone przy coraz to większych energiach pokazują jednak, że do spójnego opisu obserwowanych zjawisk potrzebna jest teoria włączająca zarówno efekty kwantowe, jak i oddziaływania grawitacyjne.

Za elementarne składniki materii można uznać te, które zgodnie z naszym aktualnym stanem wiedzy, nie posiadają struktury wewnętrznej. Ich własności oraz oddziaływania stanowią klucz do zrozumienia mechanizmów tworzenia struktur bardziej złożonych, a w dalszej konsekwencji - do poznania praw przyrody.

Zestawienie cząstek uważanych aktualnie za elementarne zawiera Tabela 1.1.1.

Tabela 1.1.1. Cząstki elementarne i ich własności

Leptony					Kwarki			
Nazwa	Sym-bol	Ładunek elektr.	Masa (MeV)	Czas życia (s)	Nazwa	Sym-bol	Ładunek elektr.	Masa(*) (MeV)
elektron	e	-1	0.511	trwały	up (górnny)	u	2/3	2.3
neutrino elektron.	ν_e	0	$<7.3 \cdot 10^{-6}$	trwałe	down (dolny)	d	-1/3	4.8
mion	μ	-1	105.66	$2.197 \cdot 10^{-6}$	strange (dziwny)	s	-1/3	95
neutrino mionowe	ν_μ	0	<0.25	trwałe	charm (powabny)	c	2/3	1275
tau	τ	-1	1776.8	$2.9 \cdot 10^{-13}$	bottom/beauty (piękny)	b	-1/3	4.18 GeV
neutrino taonowe	ν_τ	0	<70	trwałe	top/truth (prawdziwy)	t	2/3	173.5 GeV

(*) Kwarki nie występują w stanie swobodnym, więc ich masa nie jest określona precyzyjnie. Podana w tabeli masa, to tzw. masa prądowa (current mass). Określa się także masę konstytuentną, która dla kwarków **u** i **d** równa jest w przybliżeniu jednej trzeciej masy nukleonu.

Podstawowymi elementami struktury materii, stanowiącymi pierwszą generację cząstek elementarnych, są: kwark górny, kwark dolny, elektron oraz neutrino elektronowe. Dwa kwarki górne i jeden dolny tworzą proton, dwa kwarki dolne i jeden górny tworzą neutron. Kwarki i leptony, posiadające spin połówkowy, należą do klasy cząstek zwanych **fermionami**. Nośnikami oddziaływań w przyrodzie są cząstki o spinie całkowitym zwane **bozonami**. Ich własności wiążą się bezpośrednio z własnościami przenoszonych przez nie oddziaływań.

Występujące w przyrodzie oddziaływania i ich własności zawiera **Tabela 1.1.2**.

Tabela 1.1.2. Oddziaływania fundamentalne i ich własności

Oddziaływania fundamentalne						
Nośnik oddziaływania	Oddziaływanie	Zasięg	Względne natężenie	Masa*c ² (GeV)	Ładunek elektr.	
grawiton (hipotetyczny)	grawitacyjne	nieskończony	10 ⁻³⁸	0	0	
foton	elektromagnetyczne	nieskończony	10 ⁻²	0	0	
bozony pośredniczące	W ⁺	słabe	10 ⁻¹⁸ m	10 ⁻⁵	80.2	+1
	W ⁻				80.2	-1
	Z ⁰				91.2	0
8 gluonów	silne	10 ⁻¹⁵ m	1	0	0	

W przyrodzie występują **cztery rodzaje oddziaływań fundamentalnych: grawitacyjne, elektromagnetyczne, silne i słabe**, których zasięgi i natężenia różnią się o całe rzędy wielkości i których nośnikami są różne typy cząstek o masach i ładunkach odpowiadających danemu typowi oddziaływania.

Teorią, która opisuje własności cząstek elementarnych i ich oddziaływania jest **Model Standardowy**. Model ten opisuje trzy spośród czterech wymienionych w Tabeli 1.1.2 oddziaływań: elektromagnetyczne, słabe i silne; nie opisuje natomiast oddziaływań grawitacyjnych. Model ten włącza w swą strukturę wcześniejsze teorie: mechanikę kwantową, teorię oddziaływań elektroślabych, teorię oddziaływań silnych - chromodynamikę kwantową.

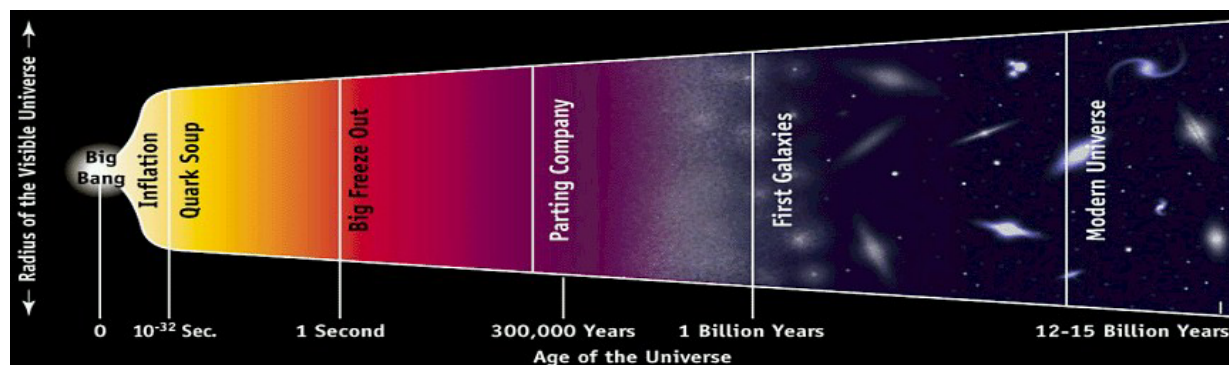
Masy cząstek są rezultatem oddziaływania z polem Higgsa, którego nośnikiem jest **bozon Higgsa**. Ta cząstka do niedawna stanowiła niepotwierdzone doświadczalnie ogniwo Modelu Standardowego. W lipcu 2012 roku w Laboratorium CERN dwa eksperymenty: ATLAS i CMS zarejestrowały sygnały wskazujące na istnienie cząstki o masie odpowiadającej masie bozonu Higgsa. Trwają prace, których celem jest zweryfikowanie, czy nowo odkryta cząstka posiada też inne, przewidziane teoretycznie, własności bozonu Higgsa. Wszystkie uzyskane dotychczas dane doświadczalne wskazują, że TAK (koniec roku 2013).

Model Standardowy dobrze opisuje wyniki prowadzonych aktualnie badań doświadczalnych. Nie stanowi jednak w pełni satysfakcjonującej teorii bowiem wiele parametrów tego modelu (np. masy cząstek) musi być wyznaczanych z pomocą doświadczenia. Model ten nie tłumaczy także szeregu faktów obserwowanych

doświadczalnie, jak: asymetria materii i antimaterii, ewolucja wczesnego wszechświata – zjawisko inflacji, brakująca masa we Wszechświecie – ciemna materia i ciemna energia, oddziaływania grawitacyjne, itd.

Trwają prace nad stworzeniem teorii, zwanej „**teorią wszystkiego**”, której pierwszym elementem byłaby **teoria wielkiej unifikacji**, „**GUT**”, łącząca w ramach spójnego opisu oddziaływania elektroslabe i silne. Włączenie oddziaływań grawitacyjnych wymagałoby połączenia w ramach jednolitego formalizmu mechaniki kwantowej z ogólną teorią względności. Kandydatem na rozwiązanie problemu jest **supersymetria**, gdzie każdemu fermionowi przypisany jest odpowiadający mu bozon. Bozony te nie zostały do tej pory odkryte, ale są poszukiwane w eksperymentach przy najwyższych energiach. Ich odkrycie mogłoby rzucić światło na wiele niewyjaśnionych dotychczas zjawisk, jak zniknięcie antimaterii, ciemna materia, czy wczesna ewolucja Wszechświata, tuż po Wielkim Wybuchu.

Wielki Wybuch stanowiący początek trwającej do dziś ewolucji Wszechświata miał miejsce ok. 13.7 miliarda lat temu. Kolejne etapy ewolucji Wszechświata ilustruje Rys. 1.1.2.



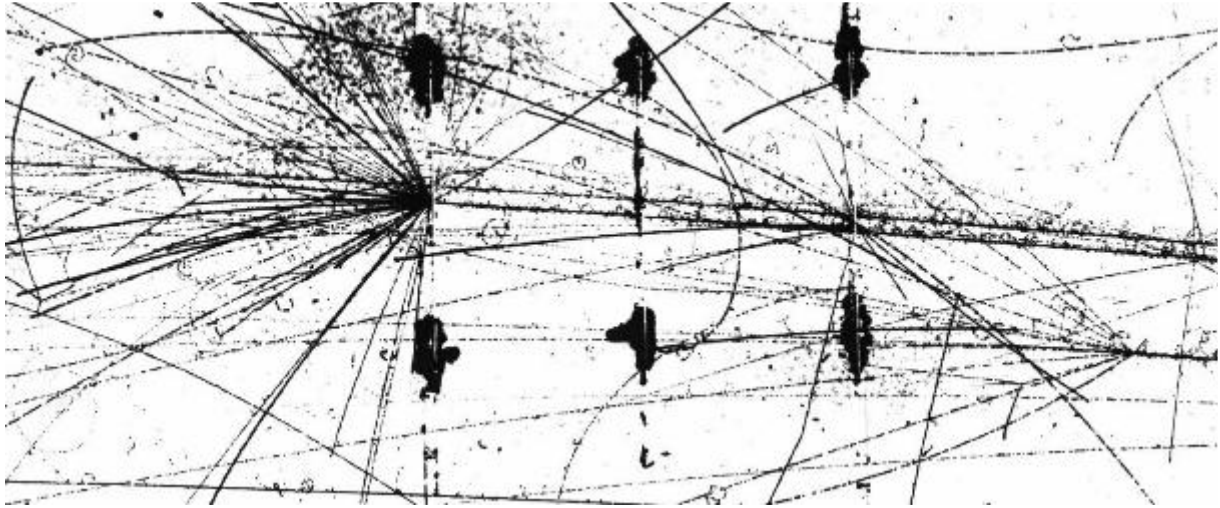
Rys. 1.1.2. Etapy ewolucji Wszechświata

Pierwotna materia miała inną postać niż ta, która tworzy Wszechświat obecnie. Kwarki i nośniki oddziaływań pomiędzy nimi – **gluony**, tworzyły stan materii zwany **plazmą kwarkowo-gluonową**, która w procesie hadronizacji doprowadziła do utworzenia hadronów np. protonów i neutronów. Kolejne etapy ewolucji Wszechświata doprowadziły najpierw w procesie **nukleosyntezy** do powstania atomów najlżejszych, potem w kolejnych etapach utworzone zostały atomy cięższe, aż do atomów żelaza. Atomy jeszcze cięższych pierwiastków powstały później, w procesie wybuchów gwiazd **supernowych** i proces ten trwa do chwili obecnej.

Z podanej na Rys.1.1.1. skali wielkości różnych obiektów widać, że stosunek liniowych rozmiarów atomu do rozmiaru jader atomowych to cztery do pięciu rzędów wielkości. (Proton jest najmniejszym jądrem atomowym.) Ilustracją konsekwencji tego faktu jest Rys.2 przedstawiający ślady cząstek naładowanych, rejestrowanych w komorze pęcherzykowej wypełnionej ciekłym propanem (C_3H_8) i naświetlonej jądrami węgla o pędzie 4.2 GeV/c na nukleon.

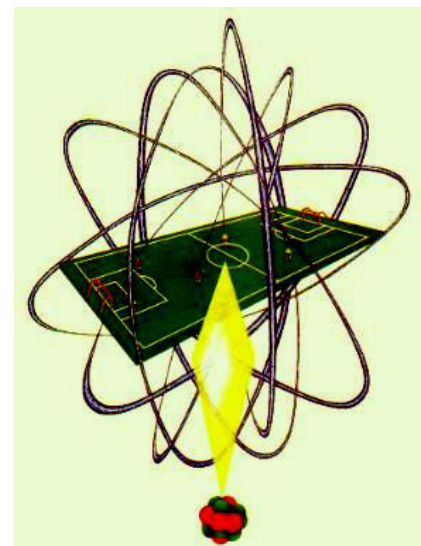
To, że obserwujemy ślady cząstek naładowanych w komorach pęcherzykowych zawdzięczamy zjawiskom zachodzącym w skali atomowej. Cząstka, taka jak proton czy jądro atomu węgla, przebiegając przez ośrodek materialny wywołuje zjawisko jonizacji, czyli odrywania elektronów z powłok atomowych. Zjonizowane atomy stanowią centra tworzenia się fazy gazowej w przegrzanej cieczy wypełniającej komorę i powstawania mikroskopijnych

pęcherzyków, które sfotografowane w odpowiednim momencie umożliwiają wizualizację śladów przebiegających przez komorę cząstek. Zjawisko to ma charakter kwazi-ciągły, dzięki czemu możemy obserwować ślad cząstki w postaci prawie ciągłej linii, co widać na fotografii. Widzimy tu wiele śladów o różnych grubościach i różnych kierunkach, a liczby punktów tworzących te ślady liczone są w wielu tysiącach. (Bliższe omówienie efektów fizycznych widocznych na tej ilustracji podane będzie później, przy omawianiu oddziaływania różnych typów cząstek z materią.)



Rys. 1.1.3. Ślady cząstek naładowanych w propanowej komorze pęcherzykowej Zjednoczonego Instytutu Badań Jądrowych w Dubnej. W komorze znajdowały się trzy płytki wykonane z tantalu.

Przyspieszone w akceleratorze jądra węgla wpadały do komory tak, że na Rys.1.1.3. kierunek ich przemieszczania się jest od strony prawej ku lewej. W dwóch miejscach można zauważyć raptowne zwielokrotnienie śladów. (Znajdź te punkty na rysunku). W miejscach tych nastąpiły oddziaływania: z jądrem węgla bliżej strony prawej i jądrem tantalu z lewej strony. Zauważmy, są to dwa oddziaływania jądrowe na wiele tysięcy aktów jonizacji atomów. Jest to żywą ilustracją relacji pomiędzy rozmiarami atomów i jąder atomowych, a w konsekwencji, prawdopodobieństwem zachodzenia w materii zjawisk w skali atomowej i jądrowej podczas przemieszczania się cząstek w ośrodku materialnym. Mając na uwadze, że ponad 99.9% masy atomu skupione jest w jądrze atomowym należy skonstatować, że dla cząstek subatomowych materia stanowi pustą przestrzeń, w której w odległych od siebie miejscach znajdują się masywne obiekty zwane jądrami atomowymi. Ilustruje to dobrze Rys 3. pokazujący analogię pomiędzy relacją rozmiarów atomu i jądra atomowego z rozmiarami boiska do piłki nożnej i samej piłki. Warto zauważyć, że należałoby tu umieścić raczej piłeczkę do ping-ponga niż piłkę nożną.

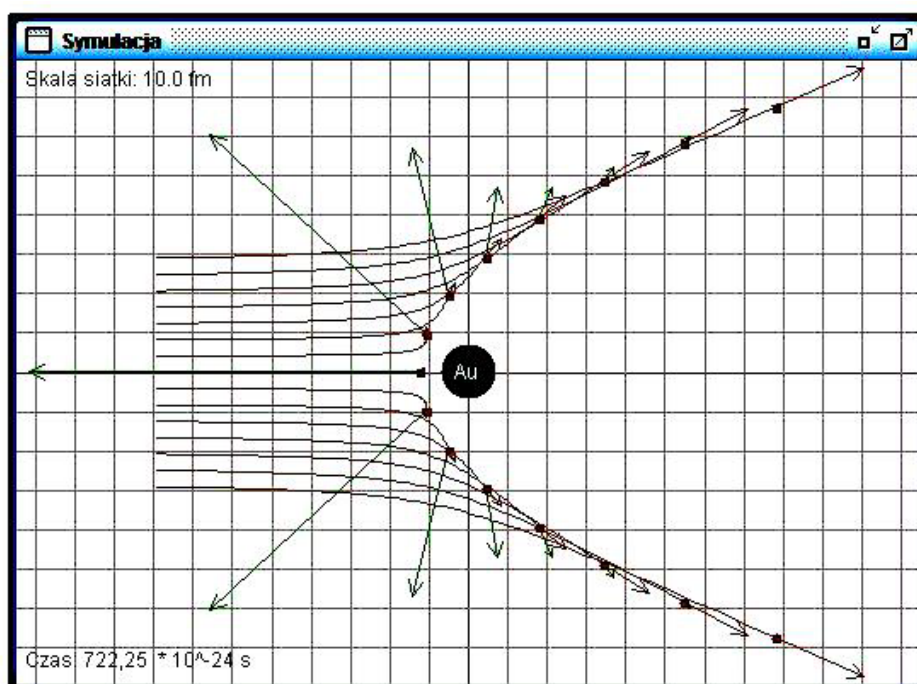


Rys. 1.1.4. Porównanie rozmiarów atomu i rozmiarów jądra atomowego z rozmiarami boiska do piłki nożnej i samej piłki.

1.2. Własności jąder atomowych

Rutherford w swym słynnym doświadczeniu, w którym bardzo cienką folię złota bombardował cząstkami alfa, odkrył istnienie jądra atomowego, którego ładunek równy jest ładunkowi elektronów w atomie, a rozmiary okazały się być prawie punktowe w porównaniu z rozmiarami atomu. Traktując jądro atomowe jako obiekt punktowy można własności atomów opisywać z niezłym przybliżeniem.

Teraz sięgnijmy głębiej. Uczyńmy to w sensie dosłownym zwiększając energie cząstek alfa. Im większa jest ich energia kinetyczna, tym bardziej zbliżają się do jądra. Jest to zilustrowane na Rys. 1.2.1. stanowiącym zrzut ekranu z animacji doświadczenia Rutherforda, wykonanej przez studentów Wydziału Fizyki PW.



Rys.1.2.1. Ilustracja doświadczenia Rutherforda w animacji studentów Wydziału Fizyki PW; strzałki pokazują wektory sił działających na cząstki alfa będące w różnych położeniach względem jądra atomowego

Do pewnej wartości energii cały proces daje się opisać zakładając, że jądro atomowe jest punktowym obiektem o zadanym ładunku elektrycznym. Przy dalszym zwiększaniu energii czyli zmniejszaniu minimalnej odległości, na jaką cząstka może zbliżyć się do jądra, wyniki pomiarów przestają zgadzać się z opisem bazującym na oddziaływaniu kulombowskim.

Nietrudno powiązać energię od której zaczynają się odstępstwa, z rozmiarami jądra atomowego. Odległość r , na jaką może zbliżyć się cząstka alfa o dodatnim ładunku równym $q_\alpha = 2 \cdot e$ do dodatnio naładowanego jądra o ładunku $Q_N = Z \cdot e$ określona jest przez równość jej energii kinetycznej i pracy wykonanej przeciwko siłom odpychania elektrostatycznego. Praca ta określona jest znanym z elektrostatyki wzorem. Mamy więc równość

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_\alpha \cdot Q_N}{r} = \frac{Z \cdot e^2}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r} \quad (1.2.1)$$

Otrzymaliśmy spodziewaną zależność. Im większa jest energia kinetyczna cząstki, tym mniejsza jest odległość na jaką może zbliżyć się do jądra. Minimalna odległość R , którą możemy uznać za miarę promienia jądra, związana jest z energią kinetyczną cząstki α wyrażeniem wynikającym ze wzoru (0.1)

$$R = \frac{Z \cdot e^2}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot E_k} \quad (1.2.2)$$

Przykładowe wartości energii kinetycznych i wynikających stąd promieni jąder wynoszą: dla jądra węgla: $E_k=5.1\text{MeV}$, $R=3.4 \cdot 10^{-15}\text{m}$, dla jądra aluminium $E_k=9.0\text{MeV}$, $R=4.1 \cdot 10^{-15}\text{m}$. Mając na uwadze, że rozmiary atomów są rzędu 10^{-10}m widzimy, że rozmiary jąder atomowych są ponad cztery rzędy wielkości mniejsze. Są jednak mierzalne i są różne dla różnych jąder.

Doświadczenie Rutherforda pozwala nie tylko stwierdzić istnienie jądra atomowego jako elementu struktury atomu, ale także wyznaczyć jego ładunek i przybliżone rozmiary. To jednak nie wszystko. Dla wyznaczenia masy jądra można wykorzystać fakt, że promień okręgu po którym porusza się cząstka naładowana w polu magnetycznym proporcjonalny jest do masy cząstki, a odwrotnie proporcjonalny do jej ładunku. Na tej zależności oparte jest funkcjonowanie tzw. spektrometrów masowych. W urządzeniach tych wiązka jonów przyspieszana jest najpierw w polu elektrycznym określonym przez różnicę potencjałów U , a następnie zakrzywiana w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji B , prostopadłym do kierunku ruchu jonów. Opisują to znane nam już wzory umożliwiające wyznaczenie masy jonu M .

$$E_k = \frac{M \cdot v^2}{2} = q \cdot U, \quad r = \frac{M \cdot v}{q \cdot B} \quad (1.2.3)$$

Z wzorów tych łatwo wyznaczamy masę jonu

$$M = \frac{q \cdot r^2 \cdot B^2}{2 \cdot U} \quad (1.2.4)$$

mierząc w polu magnetycznym o indukcji B , promień krzywizny r , jonu o ładunku q przyspieszonego w polu elektrycznym o różnicy potencjałów U .

Umiemy już wyznaczyć rozmiary, ładunek i masę jądra. Z porównania tych wielkości dla różnych jąder łatwo jest zauważyć, że ładunek jąder jest wielokrotnością ładunku elementarnego (ze znakiem plus). Ładunek ten przypisujemy dodatnim cząstkom naładowanym zwanym protonami. Najlżejszym jądrem jest jądro atomu wodoru, które zawiera jeden proton. Z porównania masy i ładunku cięższych jąder wynika, że masa ich jest około dwukrotnie większa niż wynikałoby to z liczby protonów w jądrze. Już Rutherford założył więc, że składnikami jądra są nie tylko protony, ale także inne cząstki o masach

zbliżonych do masy protonu, ale nie posiadające ładunku elektrycznego. Cząstki te nazwano neutronami. Istnienie tych cząstek potwierdził doświadczalnie J. Chadwick w 1932 roku. Wartości mas protonu i neutronu podane są w załączonych tablicach stałych fizycznych. Zwróćmy uwagę, że masa neutronu jest nieco większa niż masa protonu, zaś masy te są ponad 1800 razy większe od masy elektronu. Dlatego właśnie mówimy, że prawie cała masa atomu skupiona jest w jądrze atomowym.

Jądro atomowe składa się więc z Z protonów i $N=A-Z$ neutronów. Neutrony i protony obejmujemy wspólną nazwą, nukleony. Jądro atomowe składa się więc z A nukleonów. Liczby Z i A nazywamy odpowiednio: liczbę **Z - liczbą atomową**, liczbę **A - liczbą masową**.

Jądra atomowe oznacza się symbolicznie z postaci A_ZX , gdzie przez X oznaczamy symbol chemiczny danego pierwiastka. Ogólnie, układy nukleonów o różnych liczbach A i Z noszą nazwę nuklidów.

- Nuklidy o tej samej liczbie Z tj. liczbie protonów - to izotopy,
- Nuklidy o tej samej liczbie N tj. liczbie neutronów - to izotony,

Nuklidy o tej samej liczbie A tj. liczbie nukleonów - to izobary

Wykonując pomiary rozmiarów jąder dla różnych liczb masowych stwierdzono, że w przybliżeniu rozmiary jądra o liczbie masowej A można wyrazić prostą zależnością

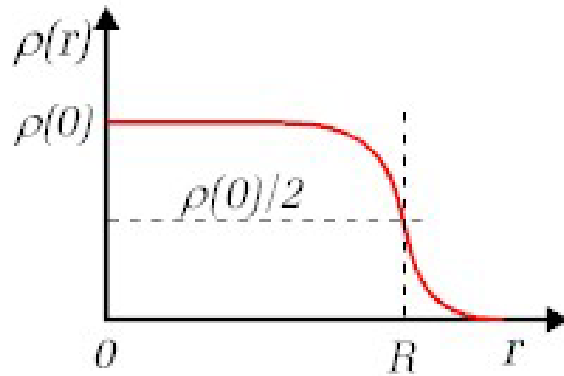
$$R = R_0 \cdot \sqrt[3]{A} \quad \text{gdzie} \quad R_0 \approx 1.3 \cdot 10^{-15} \text{ m} = 1.3 \text{ fm} \quad (1.2.5)$$

co oznacza, że gęstość jąder atomowych jest w przybliżeniu stała, bowiem objętość jądra musi być proporcjonalna do liczby nukleonów w jądrze aby jej promień mógł być proporcjonalny do $\sqrt[3]{A}$. (Pamiętamy wzór na objętość kuli: $V = (4/3) \cdot \pi \cdot r^3$.) Znając rozmiary i masę jądra i zakładając, że jądro jest jednorodną kulą można oszacować jego gęstość dzieląc masę przez objętość. Jest to niewyobrażalna wręcz wartość (masa 1 cm³ materii jądrowej wynosi ok. 230 milionów ton).

Jądro w postaci jednorodnej kuli należy traktować jednak jako przybliżenie. Kształt wielu jąder odbiega od kulistego, a gęstość materii jądrowej zmniejsza się stopniowo w obszarze peryferycznym tj. w warstwie powierzchniowej jądra. Rozkład gęstości w funkcji odległości od środka jądra może być dość dobrze opisany dla jąder sferyczne symetrycznych empirycznym wzorem Fermiego

$$\rho(r) = \frac{\rho(0)}{1 + e^{(r-R)/a}} \quad (1.2.6)$$

gdzie R jest promieniem jądra, $\rho(0)$ jest gęstością w obszarze centralnym, a a wyraża zmianę gęstości w obszarze peryferycznym. Wartość a wynosi około 0.5 fm i jest różna dla różnych jąder. Zależność względnej gęstości materii jądrowej w funkcji odległości od środka jądra pokazana jest na **Rys.1.2.2**.

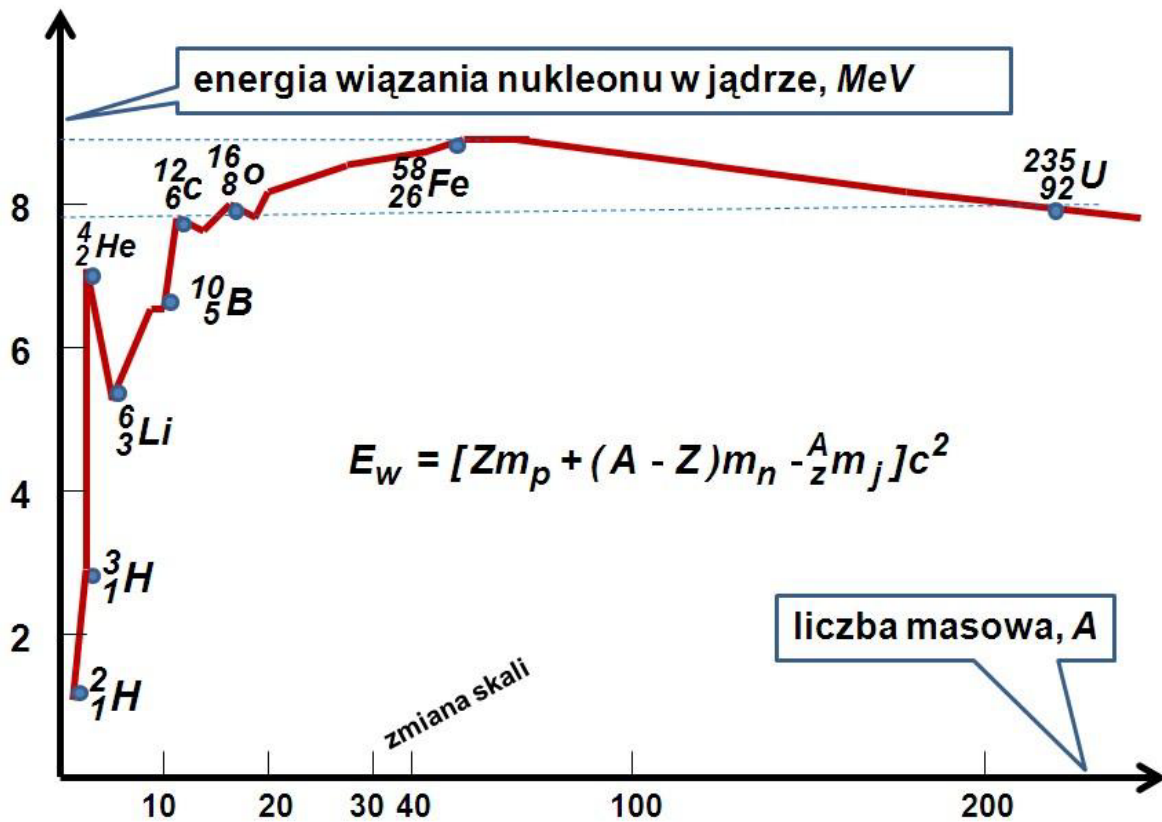


Rys.1.2.2. Rozkład gęstości materii jądrowej w funkcji odległości od środka jądra

Pomiary mas jąder atomowych pokazują, że masa jądra jest mniejsza od sumy mas protonów i neutronów wchodzących w jego skład. Nie jest to dziwne, pamiętając o równoważności masy i energii omawianej wcześniej. Energia E_w , wiążąca nukleony w trwały układ, czyli jądro atomowe, odpowiada właśnie różnicy mas protonów i neutronów składających się na jądro atomowe i masy jądra pomnożonej przez kwadrat prędkości światła w próżni.

$$E_w = \Delta M \cdot c^2 = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_j) \cdot c^2 \quad (0.1.7)$$

Wielkość ΔM nosi nazwę defektu masy, a energię E_w nazywa się energią wiązania.



Rys.1.2.3. Średnia energia wiązania nukleonu w funkcji liczby masowej, A.

Wielkością umożliwiającą łatwe porównanie energii wiązania różnych jąder jest średnia energia wiązania przypadająca na jeden nukleon czyli E_w/A . Zależność tej wielkości od liczby masowej A ilustruje Rys.1.2.3. Warto zapamiętać kształt tej krzywej, bowiem zawiera się w nim zarówno podstawa energetyki i broni jądrowej jak i reakcji termojądrowych zachodzących np. na słońcu.

Wymieńmy krótko charakterystyczne cechy tej zależności.

- Dla małych liczb masowych obserwuje się ogólną tendencję do wzrostu średniej energii wiązania nukleonu ze wzrostem liczby masowej jądra. Nie jest to jednak wzrost monotoniczny. Obserwuje się szereg lokalnych maksimumów.
- W obszarze jąder o średnich wartościach liczb masowych (wartości A około 60) energie wiązania przypadające na jeden nukleon są największe i wynoszą około 8.7 MeV.
- Dla zwiększających się dalej liczb masowych energia wiązania nukleonu w jądrze zmniejsza się nieznacznie. Różnica energii wiązania nukleonów w najcięższych jądrach jest mniejsza o około 1MeV od maksymalnych energii wiązania nukleonów.
- fakt, że dla średnich i dużych wartości liczb masowych energia wiązania jednego nukleonu niewiele się zmienia oznacza, że energia wiązania jądra jako całości jest w przybliżeniu proporcjonalna do liczby masowej jądra.

Konsekwencje tych zależności omówimy w dalszej części.

Spin nukleonów tj. protonów i neutronów równy jest połowie stałej Plancka, $\frac{\hbar}{2}$.

- Spin jądra zawierającego wiele nukleonów jest sumą wektorową spinów poszczególnych nukleonów oraz ich momentów orbitalnych.
- Spiny jąder zawierających parzystą liczbę nukleonów są zwykle całkowite tj. równe są całkowitej wielokrotności stałej Plancka, \hbar
- Spiny jąder w których zarówno 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 półowkowe tzn. równe są nieparzystej wielokrotności połowy stałej Plancka .
- Spiny jąder są na ogół o wiele mniejsze niż wynikałoby to z liczby nukleonów. Oznacza to, że spiny par nukleonów ustawiają się antyrównoległe (czyli wzdłuż tego samego kierunku, ale o przeciwnych zwrotach) w rezultacie czego wzajemnie się kompensują.

Istnienie spinu nukleonów wiąże się z posiadaniem przez nie dipolowych momentów magnetycznych. Zdziwienie może wywoływać istnienie momentu magnetycznego neutronu, który jest cząstką nie posiadającą ładunku elektrycznego. Neutron, podobnie jak i proton, posiada jednak wewnętrzną strukturę, a jego zerowy ładunek jest rezultatem kompensowania się ułamkowych ładunków tworzącej go trojki kwarków.

Istnienie **magnetycznych momentów jąder** jest przyczyną rozszczepienia atomowych linii widmowych. Rozszczepienia te zwane nadsubtelną strukturą widm spowodowane są oddziaływaniem momentu magnetycznego jądra z polem magnetycznym będącym rezultatem orbitalnego ruchu u elektronu. Rozszczepienia te są jednak znacznie (ok. 1000 razy) mniejsze od rozszczepienia znanego nam jako subtelna struktura widm atomowych.

Jak zrozumieć fakt, że jądra atomowe są stabilnymi tworami pomimo, że w skład ich wchodzi wielka liczba protonów, które powinny się z ogromną siłą odpychać? Trudno to zrozumieć pamiętając zwłaszcza, że siła odpychania elektrostatycznego jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości pomiędzy ładunkami, a odległości pomiędzy protonami są dziesiątki tysięcy razy mniejsze niż odległości pomiędzy elektronami w atomach. Niewątpliwie musi istnieć jakaś inna, nieznaną nam dotychczas siła przyciągająca, która jest jeszcze silniejsza od elektrostatycznego odpychania protonów, nawet pomimo bardzo małych odległości między nimi. /span>

Tak, istnieją inne siły działające pomiędzy nukleonami i to właśnie wtedy, kiedy te znajdują się blisko siebie. Siły te nazwiemy siłami jądrowymi w odróżnieniu od sił grawitacyjnych odpowiedzialnych za struktury planetarne i elektromagnetycznych, odpowiedzialnych za strukturę atomu. Siły te mają zupełnie inną naturę niż wymienione siły elektromagnetyczne bądź grawitacyjne. Wymieńmy ich charakterystyczne cechy:

- Siły jądrowe są niezależne od ładunku elektrycznego. Rzeczywiście, muszą działać także pomiędzy dwoma neutronami oraz pomiędzy neutronami i protonami, bo składnikami jądra są protony i neutrony.
- Siły jądrowe są krótkozasięgowe. Zasięg ich jest rzędu 10^{-15} metra. Rzeczywiście, w doświadczeniu Rutherforda siły jądrowe nie zakłócały opisu rozpraszania cząstek alfa, kiedy te nie zbliżały się na odległości porównywalne z rozmiarami jądra.
- Siły jądrowe charakteryzuje własność wysycania. Oznacza to, że każdy nukleon oddziałuje tylko z najbliższymi sąsiadami. Rzeczywiście, gdyby tak nie było, to energia wiązania nie byłaby wprost proporcjonalna do liczby atomowej, ale do liczby wszystkich możliwych kombinacji dwucząstkowych, których liczba proporcjonalna jest w przybliżeniu do drugiej potęgi liczby nukleonów w jądrze. (Sprawdź, że liczba takich kombinacji równa jest $A(A-1)/2$.)
- Siły jądrowe zależne są od wzajemnej orientacji spinów nukleonów, a nie tylko od odległości między nimi, jak to ma miejsce w przypadku ładunków elektrycznych. Ta właściwość sił jądrowych oznacza, że siły te nie są siłami centralnymi, tj. nie są skierowane wzdłuż prostej łączącej środki nukleonów.

1.3. Modele jądra atomowego

Z wymienionych tu własności sił jądrowych widać, że mają one zasadniczo inną naturę niż siły elektromagnetyczne, czy grawitacyjne. Ze względu na złożoność tych sił dotychczas nie stworzono jednolitej teorii oddziaływań silnych, która mogłaby opisać wszystkie własności sił jądrowych w ramach spójnego, jednolitego formalizmu. Przedstawimy więc kilka podstawowych modeli jądra atomowego. Model różni się od teorii tym, że opisuje tylko ograniczony zakres własności obiektu, który jest przedmiotem opisu. Tak jest i w przypadku modeli jądra atomowego. Założenia tych modeli różnią się zasadniczo chociaż każdy z nich dobrze opisuje określone własności jąder atomowych. Nasze rozważania rozpoczniemy od modelu kropłowego.

Model kroplowy

Model ten stanowi jądrową analogię kropli cieczy, która skupia zbiór cząsteczek i jeśli nie jest poddana działaniu czynników zewnętrznych, zachowuje trwałość i kształt zbliżony do kulistego. W przypadku jądra rozpatruje się następujące czynniki określające energię wiązania nukleonów w "kropki" materii jądrowej.

$$E_w = E_{obj} + E_{pow} + E_{Coul} + E_{sym} + E_{par} \quad (1.3.1)$$

E_{obj} - jest członem objętościowym, który opisuje wspomnianą już przez nas proporcjonalności energii wiązania do liczby masowej jądra (patrz Rys.5.1.2) Człon ten można więc zapisać jako:

$$E_{obj} = a_0 \cdot A \quad (1.3.2)$$

gdzie a_0 jest współczynnikiem proporcjonalności.

E_{pow} - odzwierciedla fakt, że nukleony znajdujące się w zewnętrznej warstwie jądra mają mniej partnerów i są słabiej przyciągane, co zmniejsza energię wiązania. Człon ten ma więc wartość ujemną i jest proporcjonalny do powierzchni jądra, a więc do drugiej potęgi promienia. Mając na uwadze, że promień proporcjonalny jest do pierwiastka trzeciego stopnia z liczby masowej A , możemy człon ten zapisać w postaci

$$E_{pow} = -a_p \cdot A^{2/3} \quad (1.3.3)$$

E_{Coul} - jest energią odpychania elektrostatycznego (kulombowskiego) pomiędzy protonami. Energia ta jest oczywiście ujemna i proporcjonalna jest do kwadratu ładunku jądra oraz odwrotnie proporcjonalna do promienia czyli liczby masowej w potęgę $-1/3$:

$$E_{Coul} = -a_C \cdot Z^2 \cdot A^{-1/3} \quad (1.3.4)$$

E_{sym} - uwzględnia fakt, że najbardziej stabilne są jądra, w których liczba protonów równa jest liczbie neutronów. Człon ten określa zmniejszenie się energii wiązania kiedy warunek ten nie jest spełniony; ma więc wartość ujemną i znika kiedy liczba protonów równa jest liczbie neutronów. Człon ten ma postać

$$E_{sym} = -a_s \cdot (A - 2 \cdot Z)^2 / A \quad (1.3.5)$$

a więc znika kiedy $N=Z$, czyli $N+Z=2Z=A$.

E_{par} - odzwierciedla tendencję do łączenia się nukleonów w pary. Człon ten zapisuje się w postaci

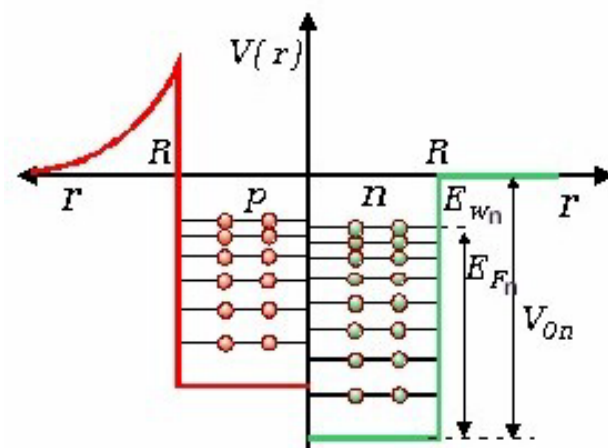
$$E_{par} = \delta \cdot A^{-3/4} \quad (1.3.6)$$

gdzie δ równe jest zero dla jąder o A nieparzystym, jest dodatnie dla jąder parzysto-parzystych i ujemne dla jąder nieparzysto-nieparzystych.

Z punktu widzenia dydaktycznego, model kropłowy prezentuje bardzo dobrze czynniki specyficzne i ważne dla zrozumienia kształtu zależności energii wiązania od liczby masowej jądra. Model ten oddaje duże usługi przy analizie stabilności jąder ze względu na różne procesy spontanicznych przemian jądrowych oraz reakcji rozszczepienia. Jest to jednak model całkowicie klasyczny i nie pretenduje do opisu efektów kwantowych w strukturze jądra.

Model gazu Fermiego

Modelem opartym na zupełnie innych założeniach niż model kropłowy jest model gazu Fermiego, w którym nukleony traktowane są nie jako związane, ale ...swobodne. Swoboda ta



jest jednak ograniczona przez barierę studni przyciągającego potencjału jądra, Rys.1.3.1. Promień studni R równy jest promieniowi jądra (wzór 0.1.5), a wysokość jest różna dla protonów i neutronów. Wynika to z istnienia dla protonów dodatkowego, ale odpychającego, potencjału sił elektrostatycznych działających także poza obszarem studni.

Rys.1.3.1. Protony i neutrony w studni potencjału w modelu gazu Fermiego

Obowiązuje też zakaz Pauliego zabraniający dowolnym dwóm nukleonom pozostawać w tym samym stanie kwantowym. Nukleony wypełniają więc dozwolone poziomy energetyczne w taki sposób, by całkowita energia miała wartość minimalną, a na jednym poziomie energetycznym znajdowały się tylko dwa nukleony i to o przeciwnie ustawionych spinach. Poza tymi ograniczeniami, nukleony są zupełnie swobodne.

Nukleony mogą więc poruszać się w studni, a ich droga swobodna jest bardzo długa, bo wszystkie poziomy energetyczna są obsadzone i możliwe są jedynie zderzenia, w których następuje zamiana nukleonów miejscami dopuszczona przez nierozróżnialność cząstek. Nukleony wypełniają najniższe poziomy energetyczne aż do energii zwanej energią Fermiego. Wtedy jeszcze związane są w studni energią wiązania równą, jak wiemy, około 8 MeV dla większości jąder. Relacje pomiędzy głębokością studni potencjału dla neutronów

V_{0n} , energią Fermiego E_{F_n} i energią wiązania E_{w_n} pokazane są na rysunku 5.2.1. Dla protonów wielkości te są przesunięte w górę, co jest rezultatem istnienia dla nich dodatkowego potencjału kulombowskiego.

Zgodnie z modelem gazu Fermiego, nukleony w jądrach posiadają pewien pęd zwany **pędem Fermiego**. Istnienie pędu Fermiego zostało potwierdzone w analizie kinematycznej reakcji cząstek z jądrami, w szczególności przy badaniach tzw. podprogowej produkcji cząstek. Model gazu Fermiego uzasadnia także większą liczbę neutronów w stabilnych, ciężkich jądrami. Model ten jednak nie opisuje własności niektórych jąder zwanych "**jądrami magicznymi**".

Model powłokowy

Liczby magiczne, to takie liczby neutronów i protonów w jądrze, dla których własności jąder różnią się istotnie od własności innych jąder o bliskich liczbach neutronów i protonów.

$$\text{Liczby magiczne: } 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, \dots \quad (1.3.7)$$

Energie wiązania jąder magicznych tj. takich, dla których liczba Z lub N jest liczbą magiczną są większe niż wynika to z oszacowań modelu kropłowego. Jądra te posiadają dużą liczbę izotopów trwałych tj. nie rozpadających się samorzutnie. Dotyczy to szczególnie jąder podwójnie magicznych, czyli takich w których zarówno liczba Z jak i N jest liczbą magiczną. Jądrami tymi są:



Dla przykładu, jądro helu czyli cząstka α , emitowane jest jako całość w samorzutnych przemianach jądrowych ciężkich jąder. Energia wiązania jądra helu jest o wiele większa niż energie wiązania jąder sąsiednich.

Te własności jąder magicznych są analogiczne do własności atomów gazów szlachetnych o zamkniętych powłokach elektronowych i dużych energiach jonizacji. Istnienie struktury powłokowej nukleonów i przyporządkowanie nukleonom liczb kwantowych, podobnie jak elektronom w atomach jest podstawą modelu powłokowego jądra. Liczby magiczne odpowiadają zamkniętym powłokom protonów i neutronów w jądrze. Poziomy energetyczne nukleonów określone są przez wartości głównej i orbitalnej liczby kwantowej. Bierze się również pod uwagę oddziaływanie spinowego i orbitalnego momentu pędu, co powoduje rozszczepienie poziomów energetycznych nukleonów. Sumaryczne momenty pędu i momenty magnetyczne jąder o zamkniętych powłokach są równe zeru.

Trzeba tu dodać, że własności oddziaływań silnych są znacznie mniej poznane niż własności oddziaływań elektromagnetycznych, co stwarza określone trudności w konstrukcji modelu powłokowego. Uproszczonym wariantem tego modelu jest tzw. model jednocząstkowy, w którym rozważa się stan pojedynczego nukleonu znajdującego się w polu potencjału pochodzącego od pozostałych nukleonów. W ramach tego podejścia stany wzbudzone tego nukleonu nie zaburzają stanu powłok zamkniętych, co stanowi istotne uproszczenie. Pomimo upraszczających założeń model powłokowy odgrywa ważną rolę w zrozumieniu systematyki poziomów energetycznych jąder atomowych.