

Rzadko poruszane cechy jąder atomowych - zachowanie, ruch i kształt.

Wioleta Rzęsa

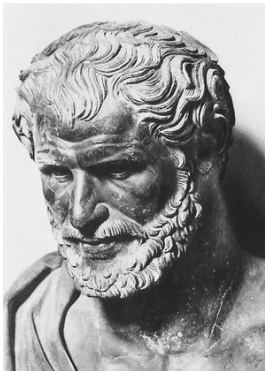
Warsaw University of Technology

January 3, 2019

- 1 Wstęp
- 2 Podstawowe własności jąder atomowych
- 3 Modele struktur jądra atomowego
- 4 Kształty i zachowanie jąder
- 5 Super i hiper deformacje jąder
- 6 Metody eksperymentalne
- 7 Wybrane układy detekcyjne

Arche - zasada świata.

Atom, zgodnie z obecnym stanem wiedzy, jest podstawowym składnikiem materii. Nie jest jednak fundamentalny, gdyż wbrew temu za co był uznawany przez Demokryta z Abdery – osobę, która jako pierwsza zainteresowała się tą tematyką, **jest podzielny**. Atom składa się z dodatnio naładowanego jądra atomowego oraz ujemnie naładowanej chmury elektronowej. Jako całość jest jednak elektrycznie obojętny.



Demokryt 460–370 p.n.e.

Źródło zdjęcia.

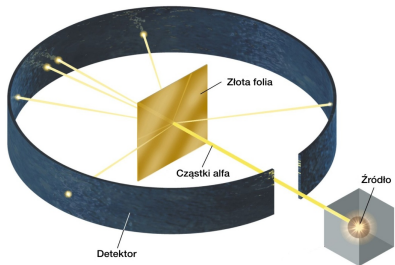
"Z czego zbudowany jest Wszechświat?"

"Co go utrzymuje w całości?"

Niepodzielny?

Jądro atomowe

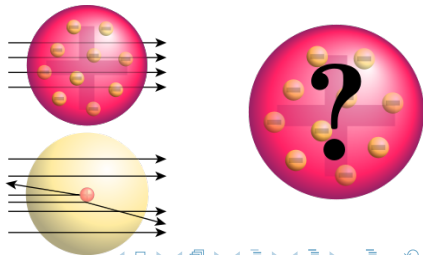
Pojęcie jądra atomowego pojawiło się na początku XX wieku jako wniosek eksperymentu Lorda Rutherforda (1911 rok). Lord Rutherford obserwował rozbłski luminescencyjne cząstek alfa skierowanych na cienką, złotą folię.

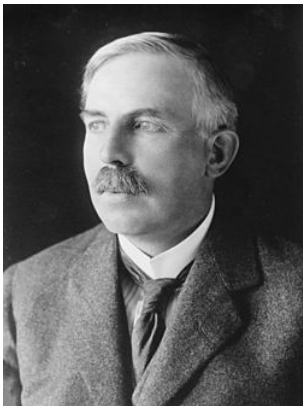


Idea eksperymentu Lorda Rutherforda.

Źródło zdjęcia

Zgodnie z ówczasie panującą ideą atomu J.J.Thomsona jako tzw. "ciasto z rodzynkami" cząstki alfa powinny przeniknąć przez atom bez zakłóceń. Tymczasem Lord Rutherford obserwował odchylenie niewielkiej liczby cząstek pod kątem tym radszym im większym. Zdecydowana większość cząstek przechodziła jednak przez tarczę w linii wiązki, bez większego odchylenia.

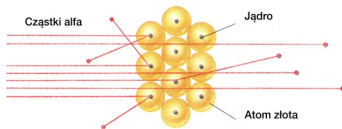




Lord Rutherford

Zdjęcie link

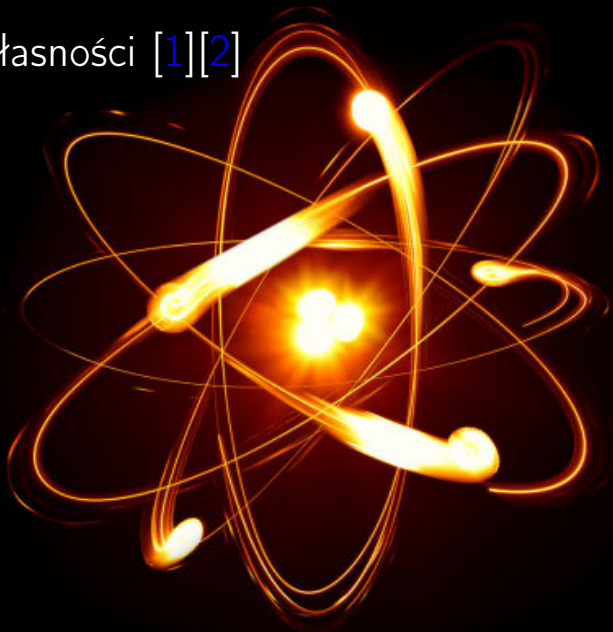
Dane uzyskane w eksperymencie pokazały, że model atomu Thomsona był nieprawidłowy. Fakt, że wiele cząstek było odchylonych lub wręcz odbitych oznaczał, że atom ma skoncentrowany środek z dodatnim ładunkiem i relatywnie dużą masą.



Zdjęcie link

Cząstki alfa albo musiały bezpośrednio zderzyć się z dodatnio naładowanym środkiem albo przelatując w niewielkiej odległości od niego ulegać oddziaływaniom z dodatnim ładunkiem. Ponieważ duża liczba cząstek przenikała przez folię praktycznie bez zakłóceń, dodatni środek musiał być odpowiednio mały w porównaniu do wymiarów atomu.

Podstawowe własności [1][2]



Jądro atomowe składa się z nukleonów: protonów i neutronów.

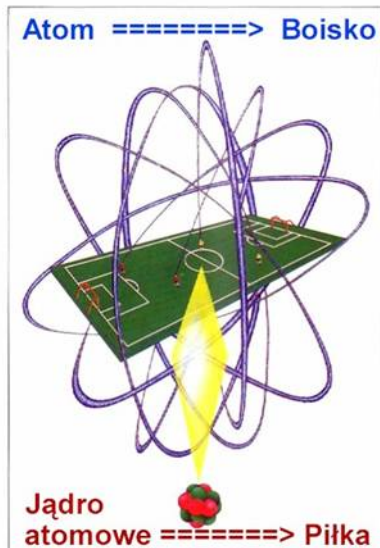
Jego wielkość jest rzędu $10^{-14} - 10^{-15} m$ co w odniesieniu do wielkości całego atomu, rzędu $10^{-10} m$ czyni go porównywalnym do piłki na boisku piłkarskim.

Powszechnie przyjmuje się, że jądro ma kształt kuli o promieniu i objętości:

$$r_j = r_0 \cdot A^{\frac{1}{3}},$$

$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot r_0^3 \cdot A,$$

gdzie A jest liczbą masową pierwiastka, a $r_0 = 1.2 \cdot 10^{-15} m$.



Źródło zdjęcia.

Jądro atomowe mimo, że stanowi około jedną stutysięczną całego atomu skupia w sobie **99.9%** jego masy.

Masa atomu nie jest równa sumie mas protonów, neutronów i elektronów wchodzących w jego skład.

Jest mniejsza. Defekt masy jest wynikiem wydzielania się energii przy łączeniu cząstek wchodzących w skład jądra i można go opisać wzorem:

$$Zm_p + (A - Z)m_n + Zm_e - M_{atomu} = \Delta M$$

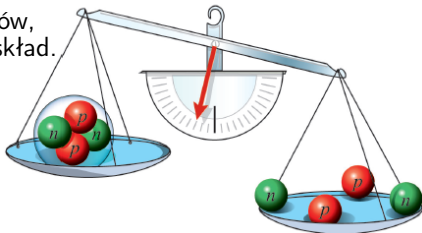
Masę atomową nuklidów wyrażamy w jednostkach masy atomowej, **u**.

$$1u = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_p = 1.007276470(11)u = 938.2796(27) \text{ MeV}/c^2$$

$$m_n = 1.008665012(37)u = 939.5731(27) \text{ MeV}/c^2$$

$$m_e = 5.4858026(21) \cdot 10^{-4}u = 0.5110034(14) \text{ MeV}/c^2$$

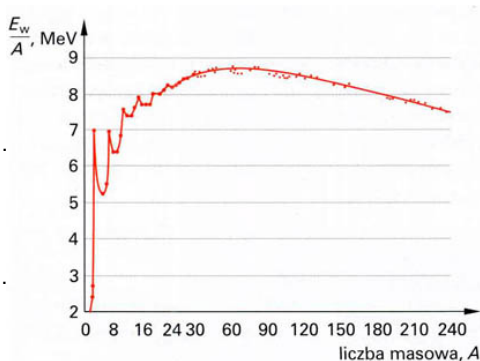


Energia wiązania

Energia wiązania, E_w jest równoważna energii jaka jest potrzebna aby związać nukleony w jądro atomowe. E_w , jest wynikiem wzoru $E = mc^2$ i odpowiada defektowi masy pomnożonemu przez kwadrat prędkości światła.

$$E_w = \Delta M \cdot c^2$$

Energia wiązania na jeden nukleon, E_w/A dla małych liczb masowych tendencyjnie rośnie (wyjątkiem są A odpowiadające "liczbowi magicznym"). Maksimum przypada na obszar jąder średnich o A równym ok. 60 i jest równa około 8.7 MeV. Dla relatywnie dużych liczb masowych zmniejsza się nieznacznie (ok. 1 MeV).



Źródło zdjęcia.

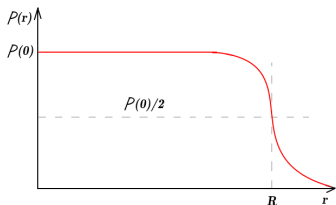
Rozkład gęstości

Zakładając, że jądro jest jednorodną kulą oraz znając rozmiary i masę jądra można oszacować jego gęstość:

$$\rho = \frac{m}{V} \approx \frac{Am_u}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{3Am_u}{4\pi Ar_0^3} = \frac{3m_u}{4\pi r_0^3} \approx \frac{3 \cdot 1,6605 \cdot 10^{-24} \text{g}}{4\pi \cdot (1,2 \cdot 10^{-15})^3} \approx 0,23 \cdot 10^{21} \text{g/m}^3$$

Oznacza to, że masa 1cm^3 materii jądrowej wynosi ok. 230 milionów ton.

W rzeczywistości jądra jako jednorodne kule są tylko przybliżeniem. Kształt wielu jąder odbiega od kulistego. Gęstość materii jądrowej zmniejsza się stopniowo w obszarze peryferycznym tj. w warstwie powierzchniowej jądra.



Rozkład gęstości w funkcji odległości od środka jądra, dla jąder sferycznie symetrycznych może być dość dobrze opisany empirycznym wzorem Fermiego :

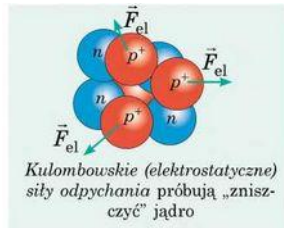
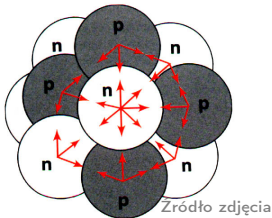
$$\rho(r) = \frac{\rho(0)}{1 + e^{(r-R)/a}},$$

gdzie R jest promieniem jądra, $\rho(0)$ jest gęstością w obszarze centralnym, a wyraża zmianę gęstości w obszarze peryferycznym.

Siły wiążące ze sobą protony i neutrony w jądrze atomowym.

Podstawowe własności:

- krótki zasięg, rzędu 10^{-15} m,
- przyciągający na ogół charakter (na małych odległościach, do ok. 0.4–0.5 fm, siły jądrowe są jednak odpychające),
- występują tylko między nukleonami
- ich siła jest ok. stokrotnie większa od sił elektrostatycznych,
- wysycenie – oddziałują tylko najbliżsi sąsiedzi.



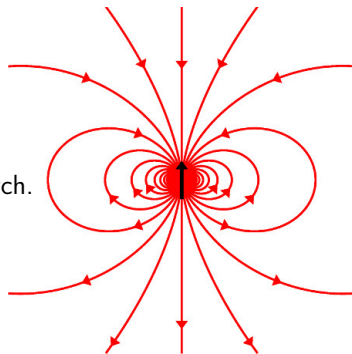
Zródło zdjęcia.

Spin

Spin jest własnym momentem pędu cząstki wynikającym z jej natury kwantowej. Nie jest on jednak związany z ruchem obrotowym cząstek w przestrzeni, lecz z wewnętrzną własnością cząstki, jak na przykład ładunek. Każdy rodzaj cząstek elementarnych ma właściwy sobie spin.

Spin nukleonów równy jest połowie stałej Plancka, $\hbar/2$. Jego istnienie wiąże się z posiadaniem przez nukleony dipolowych momentów magnetycznych.

Jądro atomowe posiada spin będący sumą wektorową spinów i momentów orbitalnych wchodzących w skład jego cząstek elementarnych.



Orbitalny moment pędu jest wektorem o skwantowanej wielkości:

$$|L| = [l(l+1)]^{1/2} \hbar,$$

gdzie l jest orbitalną liczbą kwantową.

Spinowy moment pędu przyjmuje dla nukleonów wartość:

$$|s| = \hbar[s(s+1)]^{1/2}$$

Całkowity moment pędu nukleonu $j = l + s$

SPIN JĄDRA = Całkowity moment mechaniczny jądra jest równy sumie momentów orbitalnych i spinowych nukleonów: $I = \sum j$

Dla jąder gdzie liczba protonów - liczba neutronów jest:

- parzysto - parzysta spin = 0,
- parzysto - nieparzysta spin = $(2n+1) \cdot \hbar/2$ (połówkowy),
- nieparzysto - nieparzysta spin = $n \cdot \hbar/2$ (całkowity).

Moment magnetyczny

Ruch nukleonów wewnątrz jądra wywołuje pole magnetyczne o momencie magnetycznym:

$$\mu = \frac{eM}{2m},$$

gdzie M odpowiada orbitalnemu momentowi pędu, a m masie nukleonu.

Neutron mimo, że nie posiada ładunku elektrycznego posiada moment magnetyczny. Jest to spowodowane faktem posiadania przez niego wewnętrznej struktury kwarkowej (ułamkowe ładunki kwarków, które go tworzą sumują się do zera).

Jądra parzysto - parzyste nie mają momentu magnetycznego, ponieważ $l=0$.

Modele struktur jądra atomowego [3]



Model kropłowy

Model opierający się na podobieństwie jądra atomowego do kropli cieczy, w której skupione są mniejsze cząsteczki (jak w jądrze nukleony), a która zachowuje trwałość dopóty nie zadziałają na nią czynniki zewnętrzne. Na energię wiązania nukleonów tak opisanego jądra składają się:

$$E_w = E_{\text{obj}} + E_{\text{pow}} + E_{\text{Coul}} + E_{\text{sym}} + E_{\text{par}}$$

E_{obj} jest czynnikiem objętościowym, który wyraża relację między energią wiązania a liczbą masową jądra.

$E_{\text{obj}} = a_0 \cdot A$, a_0 jest współczynnikiem proporcjonalności.

E_{pow} opisuje pomniejszenie energii wiązania przez nukleony, które są słabiej przyciągane przez mniejszą liczbę sąsiadów, a które znajdują się na powierzchni jądra.

$E_{\text{pow}} = -a_p \cdot A^{2/3}$, gdzie a_p jest wsp. prop.

E_{Coul} wyraża odpychanie kulombowskie pomiędzy protonami

$E_{\text{Coul}} = -a_c \cdot Z^2 \cdot A^{-1/3}$, a_c jest wsp. prop.

E_{par} związany z tendencją łączenia się nukleonów w pary.

$E_{\text{par}} = \delta \cdot A^{-3/4}$, $\delta = 0$ dla A nieparzystego i δ dodatnia/ujemna dla odpowiednio parzysto-parzystych/nieparzysto-nieparzystych.

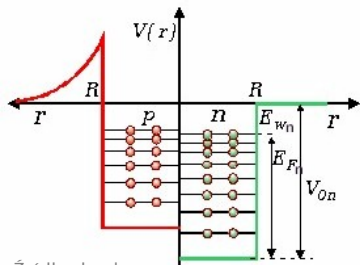
E_{sym} uwzględnia zmniejszenie energii wiązania dla jąder niesymetrycznych.

$E_{\text{sym}} = -a_s \cdot (A - 2 \cdot Z)^2 / A$, a_s jest wsp. prop.



Model gazu Fermiego

Model traktujący nukleony jako cząstki swobodne, ograniczone jedynie przez barierę studni przyciągającego potencjału jądra. Promień studni R odpowiada promieniowi jądra, a wysokość jest różna dla protonów i neutronów. Różnica w wysokości jest spowodowana istnieniem dla protonów odpychania kulombowskiego. Model przestrzega zakazu Pauliego, który zabrania przebywania dwóm nukleonom w tym samym stanie kwantowym. Nukleony swoim ustawieniem na powłokach dążą do minimalizacji całkowitej energii i wypełniają je do pewnej energii (energia Fermiego).



Źródło obrazka.

Model wyjaśnia czemu w jądrach stabilnych jest więcej neutronów i w przeciwieństwie do modelu kropłowego dobrze opisuje efekty kwantowe. Model nie opisuje jednak własności jąder magicznych.

Model powłokowy

W modelu tym nukleony poruszają się w polu potencjału o symetrii kulistej, pochodzącego od pozostałych nukleonów jądra. W przybliżeniu model można porównać do planetarnego modelu atomu z tą różnicą, że źródłem centralnego pola jest uśrednione pole sił pozostałych nukleonów jądra. Nukleony zajmują różne orbity osobne dla protonów i neutronów przestrzegając przy tym zakazu Pauliego. W modelu orbity tworzą powłoki oddzielone przerwami energetycznymi. Jądra o wypełnionych powłokach protonowych albo neutronowych wykazują dużą stabilność.

Model powłokowy dobrze uzasadnia zachowanie jąder, dla których liczba protonów/neutronów jest **liczbą magiczną** tj: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, Dla liczby neutronów i protonów w jądrze równym liczbom magicznym obserwuje się odmienne własności jąder niż by to wynikało z własności innych jąder o bliskich liczbach neutronów i protonów. Jądra o takich liczbach są szczególnie silnie związane, Energia separacji nukleonu osiąga w niej swoje maksimum.



Źródło obrazka.

Model kolektywny

Model wykorzystujący założenie o kolektywnych ruchach zespołów nukleonów z zamkniętych powłok jądrowych. Jądro nie musi być symetryczne. Dopuszcza się możliwość deformacji, która jest wynikiem polaryzacji rdzenia przez nukleony spoza zamkniętych powłok. Rozpatruje indywidualny ruch nukleonów z niewypełnionych powłok i kolektywny ruch zamkniętych powłok rdzenia. Model zakłada istnienie poziomów jądrowych, na których występują jednocząstkowe ruchy nukleonów spoza powłok zamkniętych, a także poziomy gdzie rozważa się ruch rotacyjny i oscylacyjny rdzenia.

Model kolektywny w tej pracy jest bardzo ważny, gdyż rozważa pewne szczególne zachowania (deformacjom, ruch rotacyjny itp.).

Kształty i zachowanie jąder



Zmienny kształt jądra atomowego

Jądro atomu nie zawsze musi przypominać kształtem kule, chociaż taka forma jest znana przez większość ludzi. Przyjęło się bowiem, że opisujemy jądro jako upakowaną bryłę protonów i neutronów nie chcąc utrudniać i tak nieco abstrakcyjnego opisu czegoś czego nie widać gołym okiem. Rzeczą neutralną i w wielu przypadkach słuszną, jest więc, że jądro atomowe jawi się nam bardziej jako kula a nie np. sześcian.

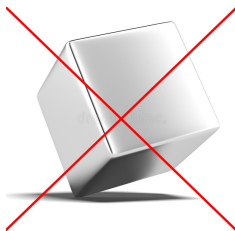
1) Uwaga wstępna

Obowiązuje zasada Heisenberga:

$$\Delta p \cdot \Delta h > \text{const}(\hbar).$$

Jeśli zmierzmy prędkość nukleonów

w jądrze, ich pozycja będzie nieznana: nieostry brzeg jądra.



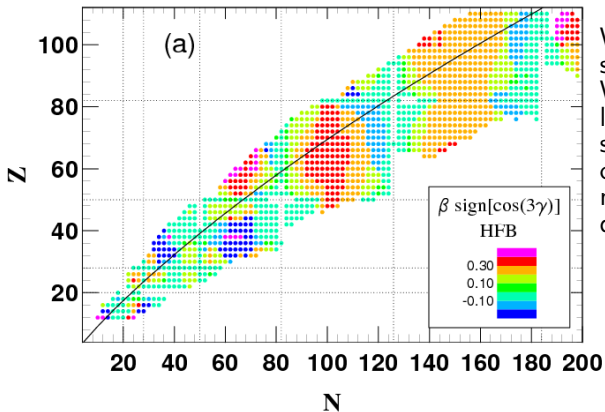
Zmienny kształt jądra atomowego

Aby uzyskać informację o strukturze potencjału jądrowego oraz o podstawowych symetriach charakteryzujących układ dynamiczny, stabilizuje się jądra o egzotycznych kształtach przy dużym momencie pędu. Asymetria rozkładu ładunku w jądrze może powodować łamanie symetrii obrotowej. Jądra najczęściej są wydłużone, osiowo-symetryczne. Struktury osiowo-symetryczne o stosunku w przybliżeniu 2:1 i 3:1 nazywane są super- (SD) i hiper- (HD) deformacjami.

Wspomniane informacje o właściwościach i zachowaniu jąder zawierają się w kaskadzie promieni gamma emitowanych podczas powrotu tak wzbudzonego jądra do stanu podstawowego. Jądra podczas obracania mogą również rozwijać kształty, w których łamana jest symetria osiowa. Przy wysokim spinie, z powodu działania sił Coriolisa i sił odśrodkowych, oczekuje się znacznego odchylenia od kształtów osiowo-symetrycznych [4].

Stany wzbudzone w jądrach atomowych

Wyróżnia się: **stany jednocząstkowe** oraz **stany kolektywne**. Pierwsze z nich są związane z ruchem jednego nukleonu, powszechne w obszarach, gdzie liczba neutronów i protonów są bliskie liczbom magicznym. Drugie zaś są związane z ruchem całego jądra i występują bardzo często gdy liczba protonów i/lub neutronów jest daleka od liczb magicznych.



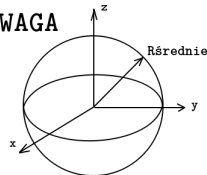
Wykres pokazujący deformacje stanu podstawowego nuklidów. Widać, że kształty w pobliżu liczb magicznych cechują się małym lub zanikającym odkształceniem. Duża deformacja obserwowana jest dla lantanowców i aktynowców.

Źródło zdjęcia.

Stany wibracyjne jądra (1/3)

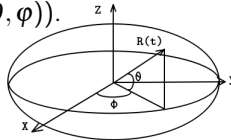
Wibracje jądra są przedstawiane przez drgania o wysokich częstościach kropli cieczy wokół sferycznego kształtu będącego kształtem równowagi. Kształt jądra można sparametryzować za pomocą zmiany w czasie jego promienia $R(t)$, mierzonego w danym kierunku [5][6][7].

RÓWNOWAGA



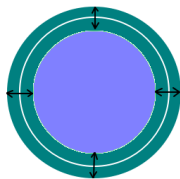
Kształt jądra można opisać jako harmoniki sferyczne $Y_{\lambda,\mu}(\theta, \varphi)$:

$$R(t) = R_{\text{rednie}}(1 + \sum_{\lambda=1}^{\infty} \sum_{\mu=-\lambda}^{+\lambda} \alpha_{\lambda,\mu} Y_{\lambda,\mu}(\theta, \varphi)).$$

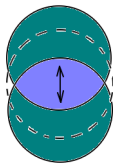


CHWILA t

Drgania o $\lambda=0$ i $\lambda=1$ odpowiadają tzw. gigantycznym rezonansom monopolowym i dipolowym.



$\lambda=0$

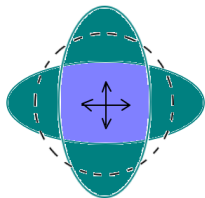


$\lambda=1$

Drgania gdzie $\lambda=0$ lub $\lambda=1$ wzbudzone są w stosunkowo wysokich energiach dla krótkich czasów rozpadu.

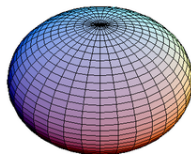
Stany wibracyjne jądra (2/3)

Do najczęściej spotykanych **stanów wibracyjnych** zalicza się drgania kwadrupolowe i oktopolowe. Drgania kwadrupolowe można zaobserwować dla jąder parzysto-parzystych (dla których $\lambda = 2$.)



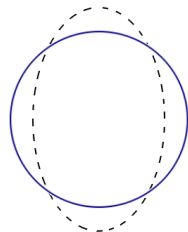
$$\lambda = 2$$

Kształt deformacji kwadrupolowej:



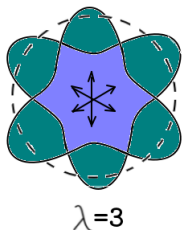
Drgania kwadrupolowe zmieniają kształt jąder sferycznych lub prawie sferycznych na kształt (najczęściej) elipsoidy obrotowej.

Wyróżnia się drgania wzdłuż osi symetrii (β) i prostopadłe do niej (γ).

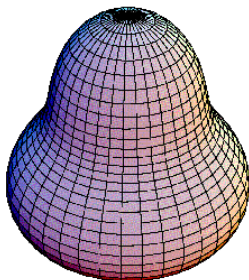


Stany wibracyjne jądra (3/3)

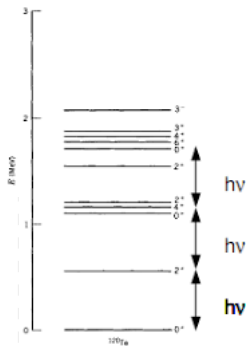
Drgania oktopolowe występują rzadziej niż drgania kwadrupolowe, przy czym pojawiają się zwykle w pobliżu trójfononowych przypadków drgań kwadrupolowych.



Np. Po prawej jądro ^{120}Te :



Kształt deformacji oktopolowej:

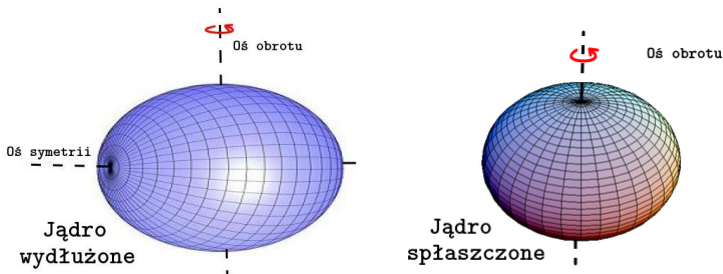


Rotacja (1/3)

W zależności od budowy jąder i ich sposobu wzbudzenia, stany wzbudzone mogą mieć różną naturę. Jądro może w różny sposób wibrować jako całość, ale może także zostać pobudzone do rotacji.

Kiedy jądro może rotować?

Jądra wykonują ruchy kolektywnie rotacyjne gdy są zdeformowane, a deformacja posiada symetrię osiową (elipsoida obrotowa) [7][8].



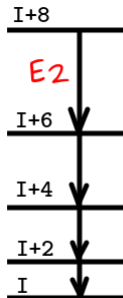
Rotacja (2/3)

Przy założeniu, że jądro można traktować jako bryłę sztywną, energię ruchu rotacyjnego można określić wzorem $E_{rot} = \frac{L^2}{2J}$, gdzie L jest momentem pędu, a J momentem bezwładności jądra.

W zapisie kwantowym : $E_{rot}(L) = \frac{\hbar^2}{2J}L(L+1)$, bo $L \rightarrow \hbar^2L(L+1)$

Dla jąder zdeformowanych:

Energia rotacji dla stanu o spinie I : $E_{rot}(I) = \frac{\hbar^2}{2J}I(I+1)$

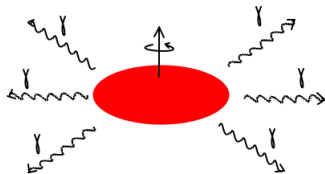


Energia poziomów rotacyjnych:

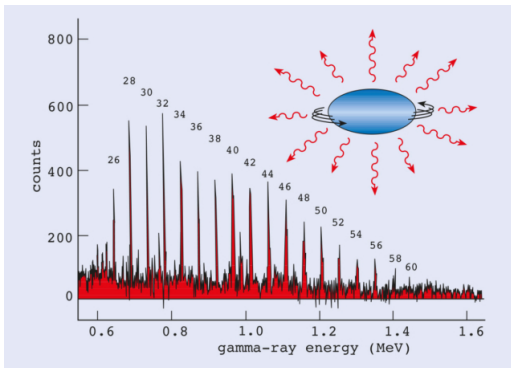
$$E(I+2) - E_{\gamma}(I) = \frac{\hbar^2(4I+6)}{2J}$$

$$\Delta E_{\gamma} = E_{\gamma}(I+2) - E_{\gamma}(I) = \frac{4\hbar^2}{J}$$

Szerokość rozkładu energii przejścia E2 ze stanu o spinie I do stanu o spinie $I-2$ zawiera wpływ rotacji, jak i gęstości stanów:



Widmo kwantów γ



Obrazek link.

Zdeformowane jądro emituje elektryczne promieniowanie kwadrupolowe w postaci fotonów.

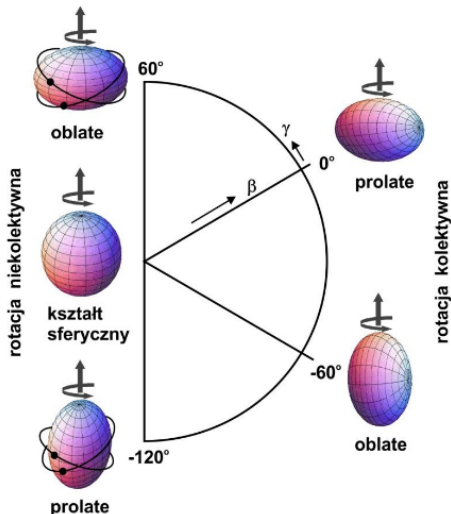
Przykład: Metalowa piłka do rugby, która jest naładowana, obracając się na swojej krótkiej osi. Kiedy dowolny koniec piłki jest skierowany w stronę obserwatora, pole elektromagnetyczne jest silniejsze niż gdy bok piłki skierowany jest w stronę obserwatora. Dlatego pole oscyluje dwukrotnie z każdym obrotem piłki do rugby.



Wibracje a rotacje

Dla deformacji kwadropulowej, wyróżnia się kształty wydłużone oraz spłaszczone (prolate i oblate).

W zależności od ułożenia osi rotacji w stosunku do osi symetrii jądra wyróżnia się rotację kolektywną i niekolektywną. Rotacja kolektywna opisywana jest przez ruch całego jądra.



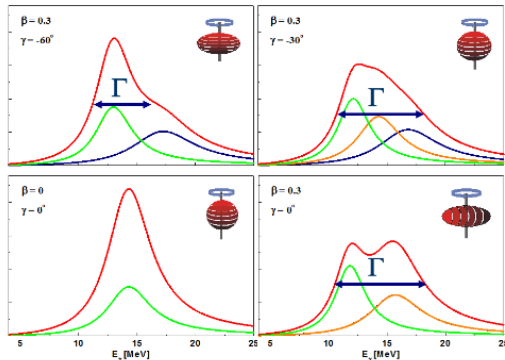
Obrazek link.

Gigantyczny rezonans dipolowy

Wzbudzenie związane z drganiem kolektywnych nukleonów w jądrach atomowych, w których uczestniczy większość lub wszystkie nukleony. Gigantyczny rezonans dipolowy może być powiązany ze zmianą rozkładu ładunku, kształtu lub gęstości jądra wokół stanu równowagi. GDR (Giant Dipole Resonance) przedstawia się jako drgania neutronów względem protonów. Gigantyczny rezonans dipolowy zawiera informację o własnościach jądra, w którym był wzbudzony. Szerokość GDR, która zależy od krętu jądra oraz energii wzbudzenia dostarcza informacje o jego deformacji. W przypadku jąder zdeformowanych funkcja nasilenia tego rezonansu posiada większą szerokość niż w przypadku jąder sferycznych. Jest to wynik rozszczepienia składowych, które zależą od wielkości deformacji.

Po prawej funkcja nasilenia GDR wzbudzonego w jądrach o różnych deformacjach [6][5]. Jak widać na wykresach od kształtu jądra zależy kształt funkcji.

(Na osi y przekrój czynny na absorpcję fotonów, oś x – energia fotonów.)

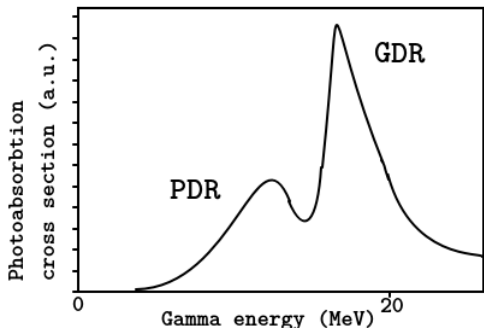


Wykresy link.

Pigmejski rezonans dipolowy - PDR

Częściowo kolektywne wzbudzenie pojawiające się w obszarze niskich energii GDR, blisko energii separacji neutronu. Pik rezonansowy w widmie energetycznym obserwowany jest zarówno w jądrach stabilnych, jak i niestabilnych, bogatych w neutrony. Jego natura nie jest dobrze znana. Wzbudzenie PRD przedstawiane jest przez oscylację neutronów skórki względem neutronów i protonów rdzenia. PRD występują w wielu jądrach, a ich nasilenie wzrasta ze wzrostem liczby neutronów w stosunku do protonów (N/Z) [6][5].

Po prawej rysunek poglądowy obrazujący PDR względem GDR.

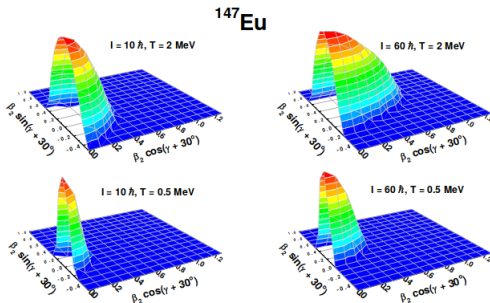


Termiczne fluktuacje kształtu

Wraz ze wzrostem temperatury jądra zanika uporządkowana struktura stanów wzbudzonych. Kształt jądra nie jest już dobrze zdefiniowany, lecz jest opisywany przez zespół kształtów. Jądro może przyjąć kształt opisany dowolnymi wartościami parametrów β i γ z prawdopodobieństwem opisanym wzorem:

$$P(\beta, \gamma, I) = \exp\left[\frac{-F(\beta, \gamma, I)}{kT(\beta, \gamma, I)}\right],$$

gdzie $F(\beta, \gamma, I)$ to energia swobodna jądra, $T(\beta, \gamma, I)$ określa temperaturę jądra, a k to czynnik Boltzmanna.



Wykresy link.

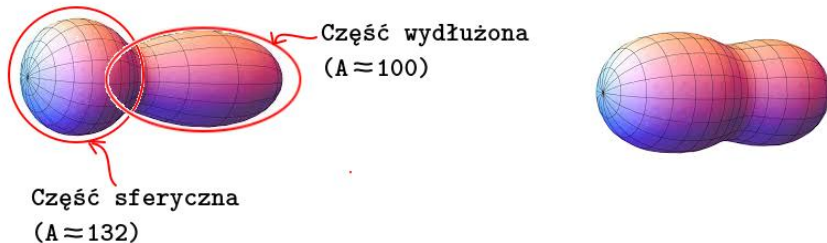
Rozkład prawdopodobieństwa uzyskania przez jądra danej deformacji zależy od temperatury i krętu jądra. Jego maksimum odpowiada deformacji równowagowej i może zmieniać się wraz ze wzrostem krętu jądra. Szerokość rozkładu $\Delta\beta$ wzrasta wraz z temperaturą [6].



Super i hiper deformacje jąder

Ciężkie jądra

Za jądra ciężkie przyjmuje się jądra atomowe, które posiadają więcej neutronów niż protonów. Kształt takich jąder to zazwyczaj: "**gruszka**" (deformacja oktupolowa) np. Uran-232 zawierający 92 protony i 140 neutronów. Jądra ciężkie łatwo ulegają rozszczepieniu.

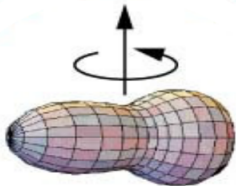


Po lewej: (Uran) odbicie asymetryczne, po prawej: odbicie symetryczne deformacji oktupolowej.

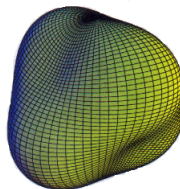
Co jest rzadko spotykane i jakich kształtów się szuka

Cechą jąder charakteryzujących się dużym pędem jest występowanie minimum energii dla deformacji kwadrupolowej. Stosunek długości długiej osi symetrii jądra do krótkiej dla takich jąder wynosi około 1.5-2. Pasma dyskretnych stanów superzdeformowanych istnieją w jądrach zarówno z obszaru $A=150-200$, jak i lżejszych (np. deformacja jądra wapnia). Superdeformacja wiąże się z dużym momentem kwadrupolowym oraz dużym dynamicznym momentem bezwładności jądra.

Czego się szuka?



Jądro hiperzdeformowane

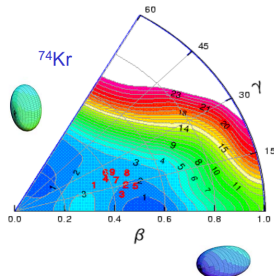
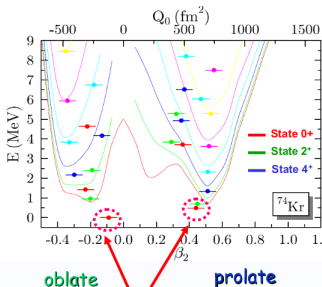
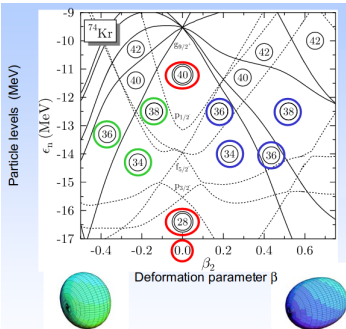


Jądro tetraedryczne

Koegzystencja stanów

Dla niektórych jąder możliwa jest koegzystencja stanów. Oznacza to, że danej liczbie atomowej nie jest przypisany określony kształt.

Wykres po lewej przedstawia region jąder o $A=70-80$ blisko linii $N=Z$. Po środku i po prawej widać przykład koegzystencji dla ^{74}Kr .

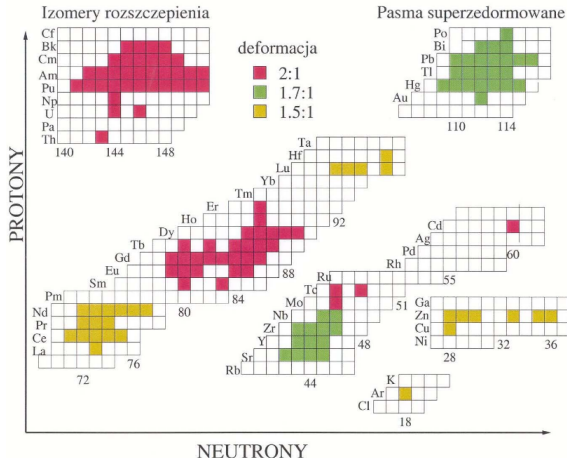


Jądro wybiera konfigurację, która minimalizuje jego energię i przedstawia maksymalną szczelinę z następnym orbitalem.

Kolorem **niebieskim** na wykresie po lewej zaznaczono deformacje prolate, **zielonym** oblate.

Jądra superzdeformowane

Po raz pierwszy zaobserwowane w ^{152}Dy w 1986r., $R_1 : R_2 = 2 : 1$



Po lewej, obrazek przedstawiający deformacje w jądrach w zależności od liczby protonów i neutronów. Im większa deformacja tym większy stosunek promieni.

Źródło zdjęcia.

Dla liczb magicznych jądra są w ogólności sferyczne. Pomędzy liczbami magicznymi jądra są zdeformowane [7].

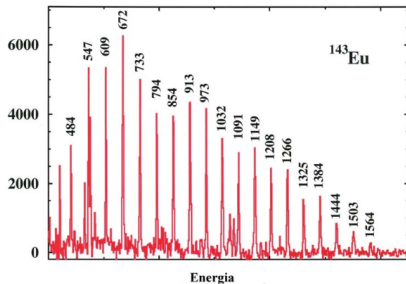
Jądra superzdeformowane – kilka faktów

Jądra superzdeformowane cechują się występowaniem wielu stanów wibracyjnych. Wiąże się to z obserwacją szeregu przejść elektromagnetycznych łączących stany rotacyjne. Równoległe linie w widmie kwantów γ emitowane są podczas przejść o charakterze kwadru polowym E2.

Stosunek $R_1 : R_2$ oraz deformację jądra można wyznaczyć na podstawie momentu bezwładności, który łączy się bezpośrednio z wartością różnicy energii ΔE_γ wzorem:

$$J = \frac{4\hbar}{\Delta E_\gamma}$$

Dla jąder zdeformowanych obserwuje się znacznie większe niż dla jąder sferycznych momenty kwadru polowe wyznaczone na podstawie czasów życia tych jąder. Czas życia jądra zdeformowanego można wyznaczyć mierząc energię emitowanych fotonów.



Źródło zdjęcia.

Metody pomiarów czasów życia poziomów jądrowych

Istnieje kilka metod doświadczalnych :

- 1). Bezpośredni pomiar czasu życia. Dla stanów długożyciowych czas połowicznego zaniku aktywności można mierzyć bezpośrednio. Dla stanów krótkożyciowych można posłużyć się elektroniczną techniką pomiarów sygnału startowego (np. reakcja jądrowa prowadząca do populacji stanów wzbudzonych lub rozpad promieniotwórczy) i następnie sygnałów z czasowego rozkład rozpadów . Metodę tę można stosować aż do czasów rozpadu rzędu 10^{-11} s.
- 2). Pomiar szerokości naturalnych linii. Szerokość naturalną linii można w wielu wypadkach zmierzyć wykorzystując zjawisko Mössbauera [9]. Z wielkości tej wynika bezpośrednio średni czas życia.
- 3). Metody wykorzystujące wzbudzenie kulombowskie. O wzbudzeniu kulombowskim mówimy wówczas, gdy jądro jest wzbudzone elektromagnetycznie przez przelatującą w jego pobliżu jon. Z natężenia linii można wówczas bezpośrednio określić wartość elementu macierzowego (w rachunku z elektrodynamiki kwantowej). Czasy życia leżą w zakresie $10^{-8} > \tau > 10^{-14}$ s.
- 4). Metody dopplerowskie. Do pomiarów czasów życia poziomów jądrowych poprzez efekt Dopplera służą dwie metody: Recoil Distance Method (RDM) – metoda odległości przelotu jąder odrzutu i Doppler Shift Attenuation Method (DSAM) – metoda osłabienia przesunięcia Dopplera w trakcie hamowania jądra emitującego kwant γ . Obie metody opierają się na obserwacji zjawiska przesunięcia dopplerowskiego energii kwantu gamma emitowanego przez źródło w ruchu (względem układu laboratorium).

Stany superzdeformowane - zagadki

Identyczne pasma rotacyjne w różnych jądrach

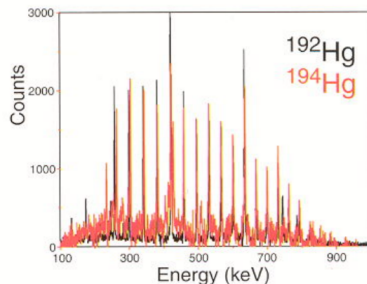
TEORIA:

$$J \sim A^{5/3}$$

Np. dla $A=150$ zmiana $A \rightarrow A+1$ zmiana J o 1% więc dla $E_{rot} = 1\text{MeV}$ powinniśmy zaobserwować zmianę E_{rot} o 10keV.

EKSPERYMENT:

Zmiana $A \rightarrow A+1$ powoduje zmianę E_{rot} o 1-3keV.

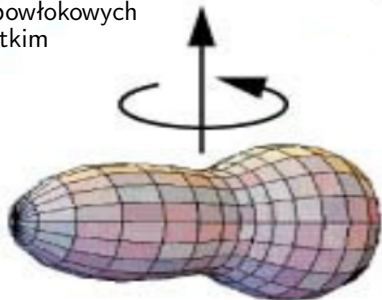


Ciężko zaobserwować rozpad stanów superzdeformowanych do stanów o niższej deformacji.

Jądra hiperzdeformowane

Jądrem hiperzdeformowanym nazywamy jądro, dla którego stosunek $R_1 : R_2$ wynosi około 3:1. Jest to jądro, dla którego przewiduje się istnienie trzeciego minimum w energii potencjalnej.

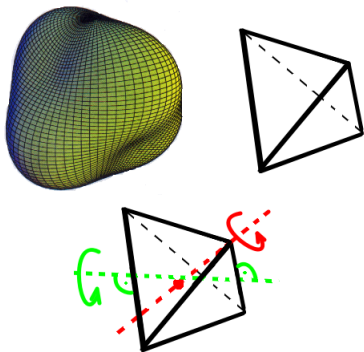
Hiperdeformacja może być wynikiem efektów powłokowych i oddziaływań kulombowskich. Cechuje się krótkim czasem życia na spontaniczne rozszczepienie.



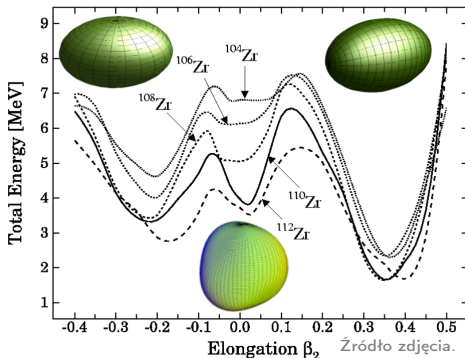
Obecnie pod kątem hiperdeformacji bada się jądro ^{126}Xe .

Jądra tetraedryczne

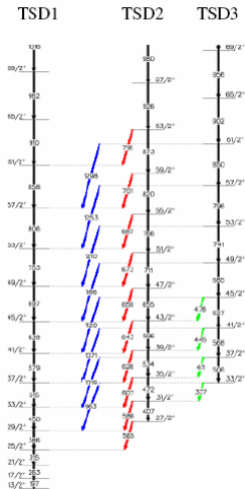
Istnienie jąder tetraedrycznych przypisuje się bardzo silnym efektom powłokowym. Dla jąder tetraedrycznych przewidywane są małe deformacje przez co konkurencyjnym dlań może okazać się stan o normalnych deformacjach [7].



Przewidywania teoretyczne

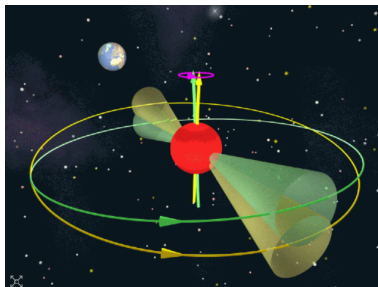


Jądra trójosiowe - efekt kolebania



D.R. Jensen et al.,
Phys. Rev. Lett. 89, 142503 (2002)

Dla trójosiowego jądra o różnych momentach bezwładności względem 3 osi głównych obserwowana jest rotacja kolektywna względem każdej osi. Możliwy jest przekaz momentu pędu z ruchu rotacyjnego względem osi o największym momencie bezwładności do dwóch pozostałych. Ten przekazywany moment pędu jest skwantowany. Istnieją dowody na występowanie efektu kolebania w jądrach ^{163}Lu . W tym jądrze odkryto rodzinę pasm, dla których występują bardzo podobne właściwości rotacyjne [7].

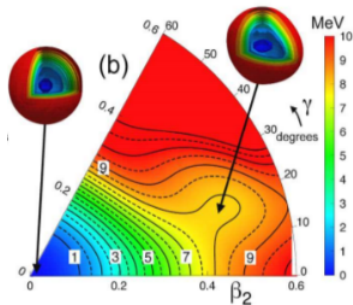
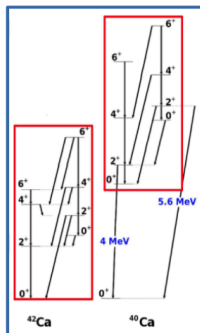


Analogia do gwiazd neutronowych i pulsarów.

Przykład szczególnej deformacji – Wapń

Złożone deformacje nie występują tylko w jądrach ciężkich. W lekkich jądrach przewidywane są również bardzo wydłużone kształty. Na szczególną uwagę spośród jąder lekkich zasługują wzbudzone jądra blisko podwójnie magicznego jądra wapnia ^{40}Ca , który cechuje się wysoką strukturą kolektywną. E2 dla ^{42}Ca sugeruje mniejszą deformację pasma 0^+ niż w przypadku ^{40}Ca . Wzbudzone jądra wapnia ^{42}Ca są superzdeformowane i jednocześnie trójosiowe [10].

Obserwuje się superzdeformowane pasma w regionie $A \sim 40$, np. dla: ^{36}Ar , ^{38}Ar , ^{40}Ar , ^{44}Ti



Źródło zdjęć.



Metody eksperymentalne

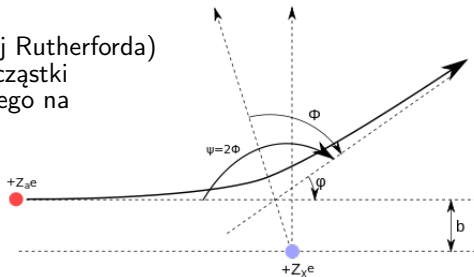
Reakcje jądrowe

Aby badać własności jąder należy najpierw wytworzyć odpowiednie warunki, które mogą wprowadzić jądro w pożądany przez nas stan wzbudzony .

Reakcje jądrowe

Reakcje jądrowe w zależności od sposobu ich użycia mogą wprowadzić jądro w stan wzbudzony [5]. Główne reakcje używane do tego celu: rozproszenie elastyczne i nieelastyczne, reakcje głęboko nieelastyczne i rozproszenia, reakcje zachodzące z utworzeniem jądra złożonego, fragmentacja.

Rozproszeniem elastycznym (inaczej Rutherforda) nazywamy rozproszenie elastyczne cząstki w polu kulomboskim jądra atomowego na potencjale elektrycznym.



Zderzenia nieelastyczne

Do zderzeń nieelastycznych można zaliczyć m.in. wzbudzenia kulombowskie, przejście nukleonów w procesie nieelastycznego rozproszenia, wymiana wielu nukleonów w zderzeniach głęboko nieelastycznych. Do zderzeń nieelastycznych można doprowadzić w reakcjach zderzeń jonów z tarczą, której jądra oddziałują z jądrami wiązki. Ma miejsce odpychanie kulombowskie (protony) oraz przyciąganie poprzez oddziaływanie silne.

Wzbudzenie kulombowskie ma miejsce gdy wpływ oddziaływania jądrowego jest pomijalny i skupiamy się tylko na oddziaływaniu elektrostatycznym. Efektem tego oddziaływania są wzbudzone jądra tarczy i pocisku, które wracając do stanu równowagi emitują kwanty gamma.

Do **wymiany nukleonów lub rozproszenia nieelastycznego**, bez przekazu cząstek dochodzi gdy nie można zaniedbać wpływu oddziaływania silnego (mniejszy parametr zderzenia) może dojść do wymiany nukleonów. W takich reakcja następuje wymiana kilku nukleonów co w efekcie skutkuje powstaniem jąder o zbliżonych liczbach nukleonów do tych biorących udział w reakcji.

Procesy **zderzeń głębokonieelastycznych** związane są z wymianą dużej liczby nukleonów w procesie oddziaływania jąder wiązki z jądrami tarczy. Efektem zderzeń głęboko nieelastycznych są jądra o relatywnie dużej energii zderzenia. Powstałe jądra mogą znacznie różnić się od jąder pocisku i tarczy przed zderzeniem.

Reakcje fuzji-ewaporacji, fragmentacji i rozszczepienia

Reakcje **fuzji-ewaporacji** polegają na złączeniu się dwóch lżejszych jąder w jedno cięższe. Służą do badania jąder stabilnych lub jąder o nadmiarze protonów. W takich reakcjach produkowane są jądra o wysokim wzbudzeniu i kręcie.

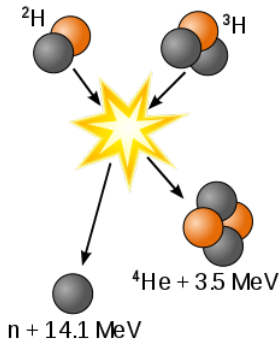
Aby wytworzyć jądra egzotyczne sięga się po reakcje **fragmentacji**. Fragmentacja prowadzi do utworzenia jąder z nadmiarem protonów/neutronów również o wysokiej energii wzbudzenia, lecz już o niższych krętach niż w reakcjach fuzji-ewaporacji. Do reakcji fragmentacji dochodzi w zderzeniach ciężkich jonów przy energiach znacznie przewyższających barierę kulombowską. Reakcję można podzielić na dwie części. W pierwszej części w wyniku oddziaływania tarcza-wiązka następuje oderwanie części nukleonów, które łączą się w kolejnym etapie. W drugim etapie następuje termalizacja i deekscytacja. Można zaobserwować emisję kwantów gamma, nukleonów, lekkich jąder a nawet rozszczepienie [11].

Reakcja rozszczepienia prowadzi do powstania jąder wzbudzonych o relatywnie średnich masach w szczególności neutrono-nadmiarowych.

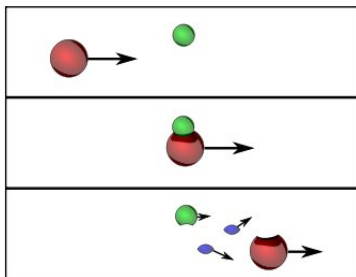
Reakcje fragmentacji oraz rozszczepienia ciężkich jonów są najczęściej wykorzystywane do badania własności niepoznanych jąder egzotycznych jak i ich stanów izomerycznych.

Reakcje fuzji-ewaporacji, fragmentacji i rozszczepienia

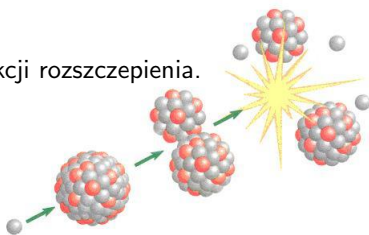
Przykładowa reakcja fuzji.



Schemat reakcji fragmentacji.



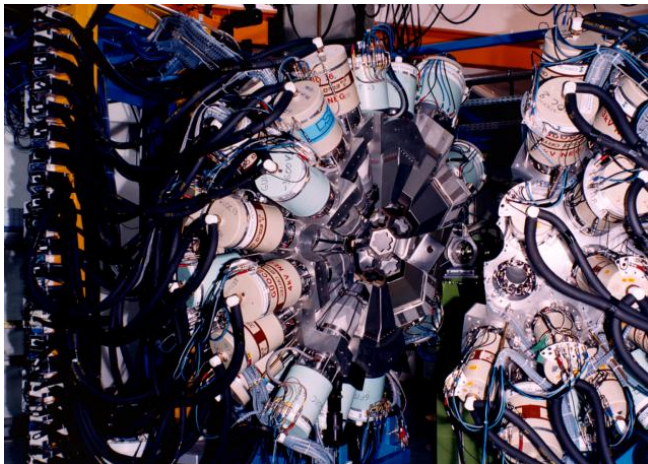
Schemat reakcji rozszczepienia.





Wybrane układy detekcyjne

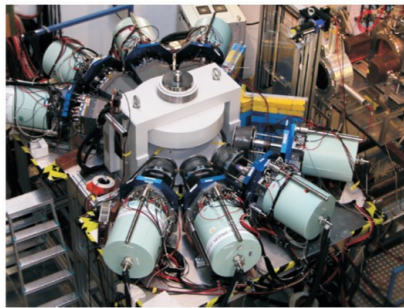
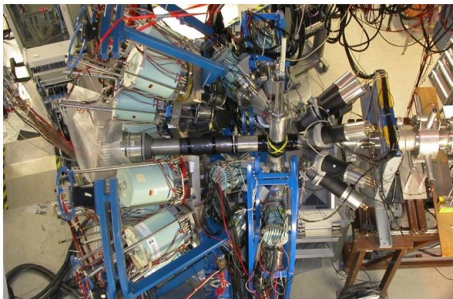
Nie istniejący już układ służący do pomiarów dyskretnych przejść gamma, złożony w sumie z 239 detektorów germanowych. Wszystkie detektory zawierały osłonę antykomptonowską. Wydajność takiego układu wynosiła 10% dla 1.3MeV [12].



Źródło zdjęcia.

RISING

Układ powstał po rozmontowaniu i wykorzystaniu 15 detektorów z układu EUROBALL. RISING służył do pomiaru przejść gamma w eksperymentach z fragmentacją i rozszczepieniem relatywistycznych wiązek ciężkich jonów. Projekt produkował również radioaktywne izotopy. Dzięki zrezygnowaniu z osłon antykomptonowskich zwiększono wydajność do 15% przy energii 661keV [13].



Źródło zdjęć.

AGATA

Projekt AGATA opiera się na zasadzie śledzenia promieni gamma, co jest możliwe dzięki pojawieniu się segmentowanych kryształów germanu o wysokiej czystości, zaawansowanej elektronice cyfrowej i analizie kształtu impulsu. Dzięki zastosowaniu tych technologii zostaje określona dokładna energia i położenie 3D każdego z punktów oddziaływania rozproszonych promieni gamma (Compton). Do rekonstrukcji pełnej energii i pierwszego punktu interakcji promieni gamma, które uderzają w spektrometr wykorzystuje się wyrafinowane algorytmy śledzenia promieniowania gamma [14].



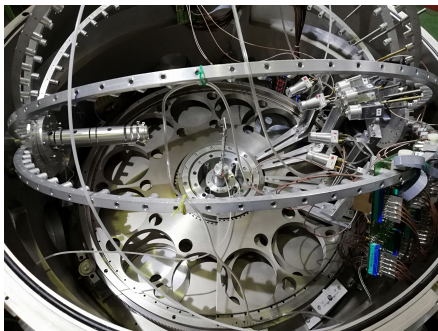
Źródło zdjęcia.

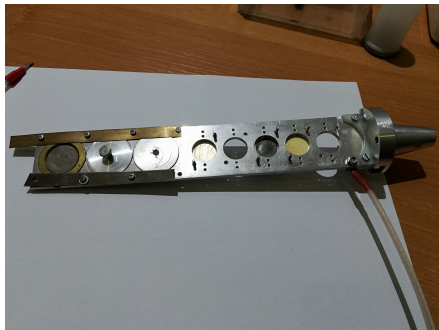
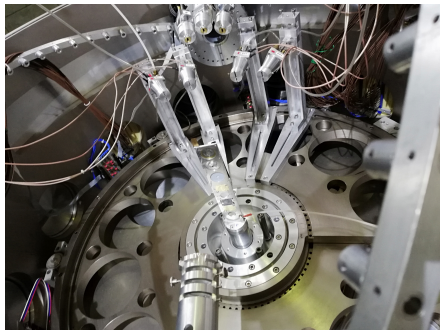


Układ GARFIELD służy do pomiarów cząstek naładowanych i lekkich fragmentów produkowanych w reakcji fuzji ciężkich jonów. Układ ma budowę cylindryczną. Komory dryfowe wypełnione gazem znajdują się z przodu i z tyłu tarczy w stosunku do kierunku wiązki. GARFIELD znajduje się w Legnaro National Laboratory (LNL)[15][1

Źródło zdjęcia.

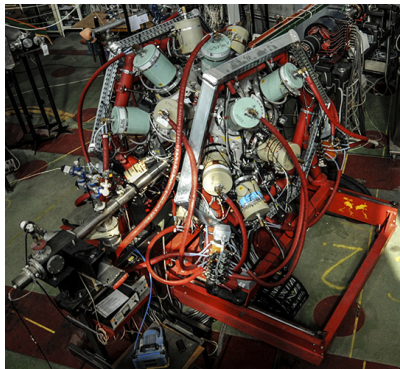
ICARE jest układem mierzącym lekkie cząstki naładowane. Układ wykorzystuje trzy rodzaje detektorów umieszczonych wewnątrz komory o średnicy 1m, w której może panować ciśnienie do 10^{-6} mbar. Używane detektory: gazowo-krzemowe, krzemowo-germanowe, krzemowo-krzemowo-germanowe. Detektory mogą być montowane w dowolnej konfiguracji. Samonośny uchwyt pozwala na użycie do 6 różnych celów. Można go zdalnie obsługiwać bez konieczności otwierania komory reakcyjnej [17].





Na powyższym, lewym zdjęciu widać sposób ustawienia monitorów oraz detektorów gazowo-krzemowych w układzie tarcza - wiązka wewnątrz komory. Na prawym zdjęciu - folder z tarczami.

Spektrometr EAGLE to układ pomiarowy przeznaczony do pracy z dużą liczbą wydajnych detektorów germanowych rejestrujących promieniowanie gamma. Konstrukcja mechaniczna przyrządu ma formę dwudziestościanu ściętego i umożliwia instalowanie do 30 detektorów promieniowania gamma różnych typów. Obecnie w skład układu wchodzi 20 detektorów germanowych.



W skład aparatury EAGLE wchodzi także spektrometr konwersji wewnętrznej i komora rozproszeń dla eksperymentów z wykorzystaniem wzbudzeń kulombowskich.

Źródło zdjęcia.












Zdjęcia z warsztatów w SLCJ.







Bibliografia

Bibliografia I

-  <https://ilf.fizyka.pw.edu.pl/podrecznik/1/3/2>.
-  <http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w1/segment3/main.htm>.
-  http://fizyka.net.pl/struktura/struktura_j1.html.
-  <https://www.slideshare.net/MirekZ/egzotyczne-ksztalty-jader-atomowych>.
-  <https://www.ifj.edu.pl/publ/hab/Kmiecik.pdf?lang=pl>.
-  <https://www.ifj.edu.pl/publ/hab/Bednarczyk.pdf?lang=pl>.
-  https://www.fuw.edu.pl/~marta/6_Jadra_o_duzych_deformacjach.pdf.
-  <http://www.old.slcj.uw.edu.pl/en/events/Warsztaty/warsztaty2009/w09-spektroskopia-gamma-na-wiazce.pdf>.
-  https://pl.wikipedia.org/wiki/Efekt_M%C3%B6ssbauera.

-  <https://indico.in2p3.fr/event/12970/contributions/12284/attachments/10445/12957/Hadynska.pdf>.
-  <https://www.ifj.edu.pl/dept/no2/nz22/articles.php?lng=pl&pg=129>.
-  <http://euroball.lnl.infn.it/>.
-  <https://www.ifj.edu.pl/dept/no2/nz22/articles.php?lng=en&pg=111>.
-  https://www.agata.org/experiments/campaign/ganil_2015-2018.
-  <http://www.lnl.infn.it/~garfweb/garf/>.
-  http://www.lnl.infn.it/~divulgaz/fisica_nucleare/fotografie_nucl.htm.
-  <http://slcj.uw.edu.pl/pl/icare/>.
-  http://www.old.slcj.uw.edu.pl/en/events/Warsztaty/warsztaty2016/warsztaty2016_napiorkowski.pdf.

-  [https://press.ifj.edu.pl/news/2016/10/19/.](https://press.ifj.edu.pl/news/2016/10/19/)
-  [https://www.fuw.edu.pl/~marta/6_Jadra_o_duzych_deformacjach.pdf.](https://www.fuw.edu.pl/~marta/6_Jadra_o_duzych_deformacjach.pdf)
-  [https://www.ifj.edu.pl/_nowa/instytut/rada-naukowa/stopien-doktora-hab/habilitacje/mazurek/monografia.pdf.](https://www.ifj.edu.pl/_nowa/instytut/rada-naukowa/stopien-doktora-hab/habilitacje/mazurek/monografia.pdf)