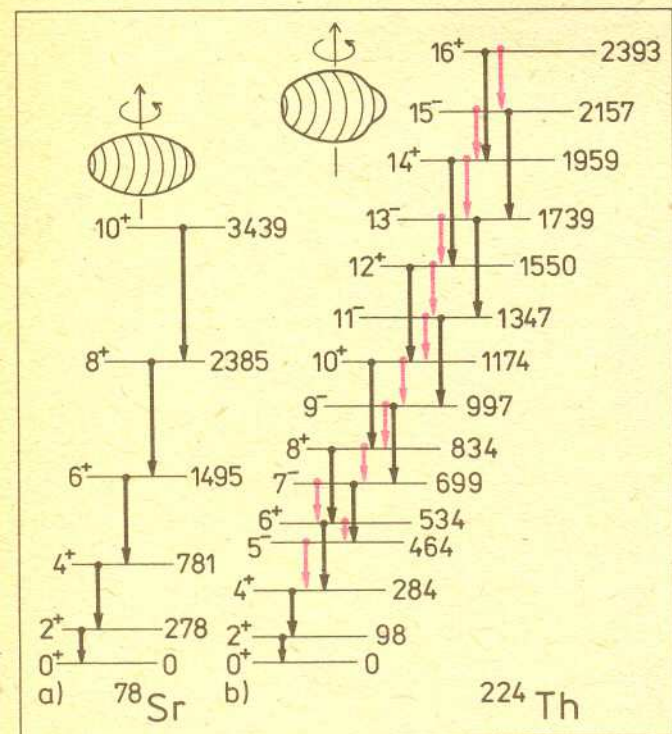


Dr Jacek DOBACZEWSKI
Dr hab. Witold NAZAREWICZ

W poprzednim artykule (*Delta* 2/1988) zajmowaliśmy się obrotami układów makroskopowych i molekularnych. Stwierdziliśmy, że wirujące ciała naładowane wysyłają promieniowanie elektromagnetyczne, co dla obiektów mikroskopowych odpowiada emisji pojedynczych fotonów unoszących energię i moment pędu ruchu obrotowego. Przekonaliśmy się też, że analizując emitowane promieniowanie można stwierdzić, jaką symetrię mają drobiny atomowe i jakie są ich rozmiary. Badając widma rotacyjne możemy zatem „podglądać” układy kwantowe tak małe, że nigdy nie byłibyśmy w stanie ich zbadać za pomocą najlepszych mikroskopów.

Takimi obiektami, około 100 tysięcy razy mniejszymi niż cząsteczki, są jądra atomowe. Fizycy dysponują obecnie urządzeniami pozwalającymi przyspieszać jądra atomowe (a właściwie wielokrotnie zjonizowane atomy) do bardzo wysokich prędkości. Kiedy taki szybki pocisk uderza w inne jądro atomowe, oba jądra mogą złączyć się w jedną całość tworząc jądro pierwiastka o liczbie atomowej równej sumie liczb atomowych jąder wchodzących do reakcji. Łatwo można sobie wyobrazić, jak bardzo „niespokojne” jest takie nowo powstałe jądro atomowe. Jego powierzchnia drga gwałtownie, nukleony w środku poruszają się dość chaotycznie, a całość obraca się z dużym momentem pędu. Czasem takie konwulsje kończą się rozpadem złożonego obiektu na dwa jądra zupełnie inne niż te, które dały mu początek. Czasem zaś wystarczy, by z powierzchni jądra „wyparowało” kilka nukleonów, a jądro złożone ochładza się i stabilizuje. Parujące nukleony nie są jednak w stanie wynieść z jądra zbyt dużego momentu pędu i w rezultacie jądro wyhamowuje swój szybki obrót wielokrotnie emitując kwanty promieniowania gamma. Mierząc energie emitowanych kwantów i ich multipolowość (moment pędu) można otrzymać, w sposób zupełnie analogiczny jak w fizyce atomowej, jądrowe pasma rotacyjne.

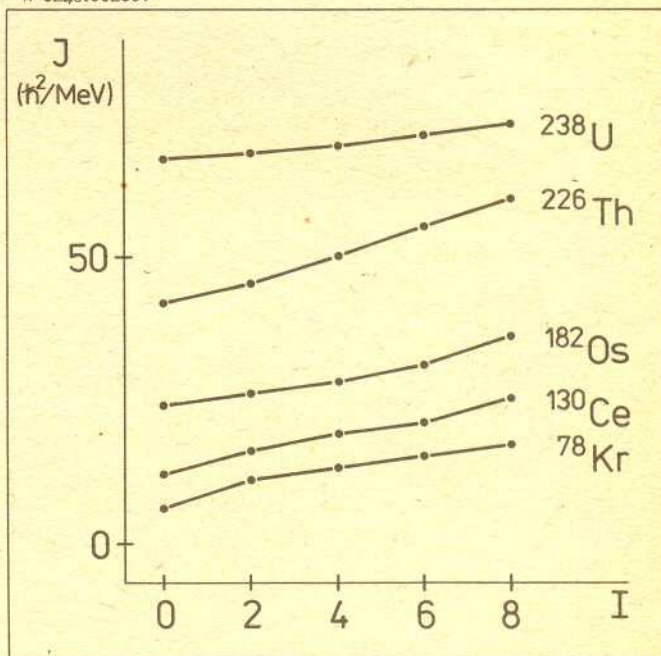
Na rysunkach 1a i 1b przedstawione są widma rotacyjne jąder ^{78}Sr oraz ^{224}Th .



Rys. 1. Pasma rotacyjne jądra (a) ^{78}Sr oraz (b) ^{224}Th . Energie stanów podane są w kiloelektronowoltach ($1 \text{ keV} \approx 1,6 \cdot 10^{-16} \text{ J}$) po prawej stronie kreskek reprezentujących poziomy energetyczne. Po lewej stronie podana jest liczba kwantowa momentu pędu (a „+” lub „-” oznacza dodatnią lub ujemną parzystość). Kolorowe i czarne strzałki w pasmie ^{224}Th oznaczają odpowiednio dipolowe i kwadrupolowe przejścia elektromagnetyczne.

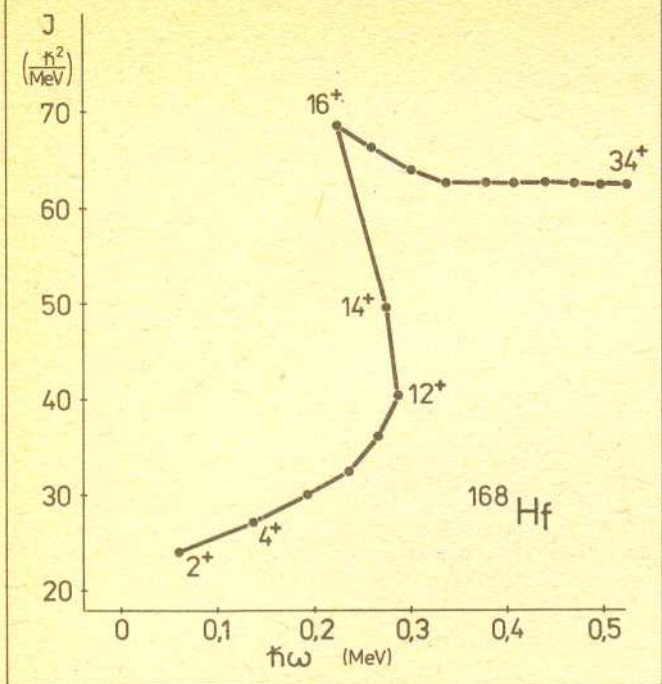
Czego możemy dowiedzieć się o budowie tych jąder analizując ich pasma rotacyjne? Popatrzmy najpierw na pasmo jądra ^{78}Sr . Momenty pędu zmieniają się w tym pasmie co 2 jednostki \hbar , a więc jądro nie ma momentu dipolowego. Jest tylko jedno pasmo rotacyjne, a więc jądro ma oś symetrii obrotowej — tak jak omawiane w poprzednim artykule cząsteczki liniowe. Wystąpienie takiego pasma rotacyjnego sugeruje więc, że jądro ^{78}Sr ma kształt elipsoidy obrotowej. W pasmie rotacyjnym jądra ^{224}Th momenty pędu zmieniają się zarówno o jedną, jak i o dwie jednostki \hbar , a więc ma ono moment dipolowy i kwadrupolowy. Najbardziej prawdopodobnym wytłumaczeniem tego faktu jest hipoteza o „gruszkowatym” kształcie tego jądra. Dla takiego kształtu jądra protony nie muszą mieć środka masy w tym samym punkcie przestrzeni co neutrony i pojawia się różny od zera moment dipolowy układu. W przeciwieństwie do cząsteczek atomowych jądra mające moment dipolowy są białymi krukami wśród wszystkich jąder atomowych.

Odległości między atomami w cząsteczce są sztywno określone przez siły elektromagnetyczne. Obrót cząsteczki nie może na nie wpłynąć w zasadniczy sposób, a więc moment bezwładności cząsteczki prawie wcale nie zależy od prędkości kątowej obrotu. Nieco inaczej jest w przypadku jąder atomowych. Na rysunku 2 pokazana jest zależność momentów bezwładności, wyznaczonych ze wzoru $J = \hbar I / \omega$, od liczby kwantowej momentu pędu. Widzimy, że obrót powoduje stopniowy wzrost momentów bezwładności tych jąder. Wzrost ten tłumaczyć możemy istnieniem siły odśrodkowej powodującej zwiększanie się deformacji jądra oraz słabymi zmianami jego struktury wewnętrznej. Widzimy też, że momenty bezwładności jąder są rzędu $10^{-54} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, a prędkości kątowe aż około 10^{19} obrotów na sekundę, czyli miliard razy większe niż częstości obrotu cząsteczek. Wynika stąd, że powierzchnia jądra porusza się z liniową prędkością rzędu 100 km/s , a więc około 10 000 razy szybciej niż skrajne atomy w cząsteczce!



Rys. 2. Zależność momentów bezwładności wybranych jąder atomowych od momentu pędu. Momenty bezwładności podane są w jednostkach \hbar^2/MeV używanych zwyczajowo w fizyce jądrowej. Megaelektronowolt (MeV) jest jednostką energii równą około $1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$, a więc znając stałą Plancka $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ możemy obliczyć, że $1 \hbar^2/\text{MeV} = 6 \cdot 10^{-56} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

Jest wiele jąder, które wykazują przedziwne zachowanie przy zwiększającej się prędkości kątowej obrotu. Rysunek 3 przedstawia moment bezwładności w pasmie rotacyjnym jądra ^{168}Hf . Jak widać, moment ten rośnie aż do momentu pędu 12 \hbar , po czym następuje coś bardzo dziwnego: częstość obrotu maleje, a moment

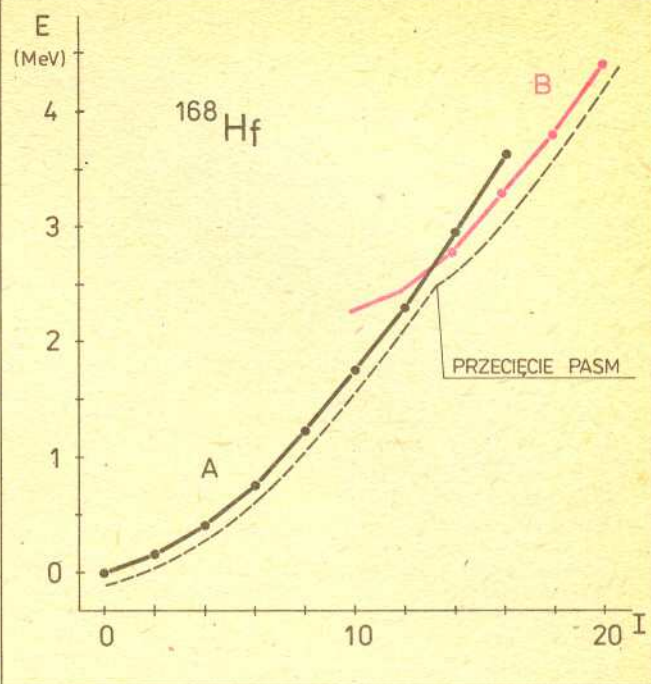


Rys. 3. Zależność momentu bezwładności jądra ^{168}Hf od prędkości kątowej obrotu ($J = \hbar I/\omega$). Prędkości kątowej obiektu mikroskopowego nie możemy, oczywiście, zmierzyć w sposób bezpośredni. Możemy ją natomiast pośrednio wyznaczyć znając zależność energii od liczby kwantowej momentu pędu $E(I)$: $\hbar\omega \approx dE/dI \approx (E(I) - E(I-2))/2$ i tego wzoru użyto, by wykreślić ten rysunek. Punkty na krzywej oznaczają dyskretne wartości liczby kwantowej I .

ędu i moment bezwładności rosną. To niezwykle zachowanie się momentu bezwładności nosi nazwę przecięcia wstecznego (ang. *backbending*), którą to nazwę wymyślono, by ująć w słowa zachowanie się momentu bezwładności w zależności od częstości obrotu. Wyjaśnienie tego efektu zawarte jest na rysunku 4, gdzie przedstawiliśmy zależność energii dwóch pasm rotacyjnych od liczby kwantowej momentu pędu. Poniżej $I = 12$ energie pasma A są niższe niż pasma B , a powyżej tej wartości liczby kwantowej momentu pędu sytuacja się odwraca. Mówimy, że pasma te „przecinają się” dla $I \approx 12$. Energie w obu pasmach nieźle zgadzają się ze wzorem rotacyjnym $E = \hbar^2 I(I+1)/2J$ (patrz poprzedni artykuł), a momenty bezwładności rosną słabo ze zwiększającym się momentem pędu i są mniejsze w paśmie A niż w paśmie B . Zauważmy, że jeśli jądro wysyłając kolejne kwanty promieniowania gamma spowalnia swój obrót, to w wyniku otrzymamy pasmo zaznaczone na rysunku 4 linią przerywaną. Oczywiście jest więc, że w obszarze przecięcia pasm musi nastąpić gwałtowna zmiana częstości obrotu, gdyż jądro przechodzi wtedy z jednego pasma rotacyjnego na drugie. Wyjaśnia to zagadkę przecięcia wstecznego, ale rodzi nową: skąd bierze się pasmo rotacyjne B o własnościach tak różnych od własności pasma A ?

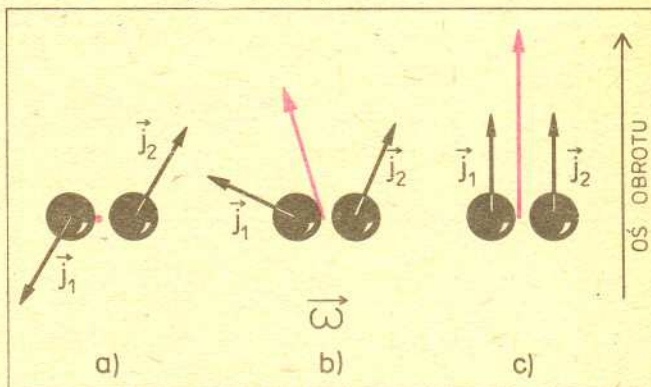
Aby wyjaśnić naturę pasma B , musimy wniknąć nieco głębiej w wewnętrzną strukturę jądra atomowego. Ponieważ siły jądrowe mają bardzo krótki zasięg, więc nukleony w jądrze zachowują się nieco podobnie do molekuł cieczy, czyli poruszają się prawie swobodnie w środku jądra, a na jego powierzchni odczuwają siłę podobną do napięcia powierzchniowego, która nie pozwala im jądra opuścić. Ruch ich przypomina ruch elektronów (w atomie) w polu elektrostatycznym jądra. Pojawiają się więc powłoki jądrowe zupełnie podobne do powłok elektronowych. Nukleony tworzące jądro atomowe obsadzają kolejne powłoki tak, jak elektrony obsadzają swoje powłoki w atomie. Jest jednak między tymi układami pewna zasadnicza różnica. O ile siły kulombowskie działające między elektronami są odpychające, to siły jądrowe powodują przyciąganie i łączenie się nukleonów w pary. Okazuje się, że takie pary usiłują dobrać się w ten sposób, by wypadkowy moment pędu każdej pary był równy zeru. Jeden nukleon w parze wiruje więc w jedną stronę, a drugi w stronę przeciwną.

Przypuśćmy teraz, że naszą parę nukleonów umieszczamy w obracającym się jądrze atomowym. Na każdy z nukleonów tej pary będzie wtedy działać siła Coriolisa — ta sama siła, która powoduje podmywanie wschodnich brzegów wielkich rzek syberyjskich i która pozwala namacalnie stwierdzić ruch obrotowy Ziemi w doświadczeniu z wahadłem Foucaulta. Siła ta będzie



Rys. 4. Zależność energii od liczby kwantowej momentu pędu dla dwu pasm rotacyjnych w jądrze ^{168}Hf . Pasma A (czarna krzywa) i pasmo B (krzywa kolorowa) przecinają się w pobliżu $I = 12$. Wysyłając kolejne kwanty promieniowania pasma jądro będzie obniżało swoją energię wzdłuż drogi zaznaczonej na rysunku linią przerywaną.

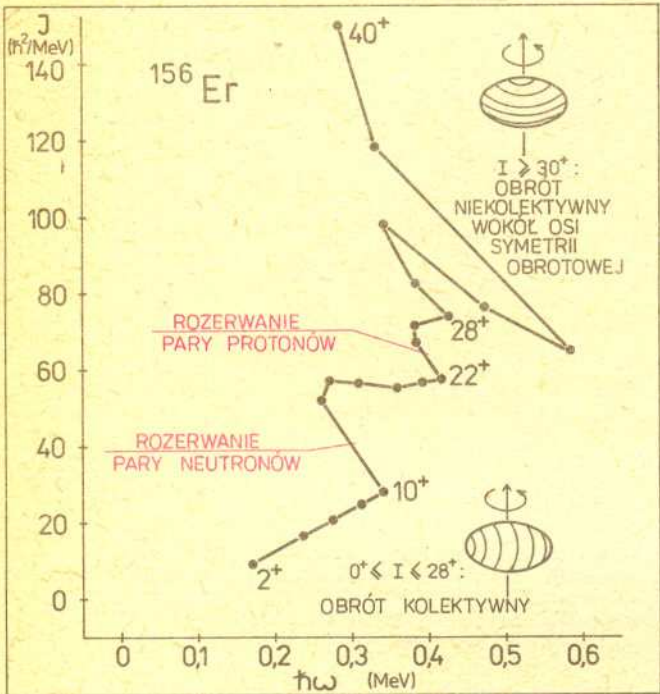
usiłowała ustawić oba momenty pędu nukleonów naszej pary równoległe do momentu pędu jądra, czyli rozerwać parę tworząc z niej dwa niezależne nukleony o wypadkowym momencie pędu różnym od zera (patrz rys. 5). Pasma rotacyjne B — to, które było przyczyną występowania zjawiska przecięcia wstecznego — jest właśnie pasmem rotacyjnym jądra z jedną parą rozerwaną. Aby pasmo takie miało stosunkowo niskie energie i mogło przeciąć się z pasmem A , w którym nie ma par rozerwanych, całkowity moment pędu takiej pary po rozerwaniu musi być duży. W jednych jądrach taka para istnieje, a w innych nie, co zależy od struktury powłokowej jąder i jest przyczyną tak różnych zachowań jąder przy szybkim obrocie.



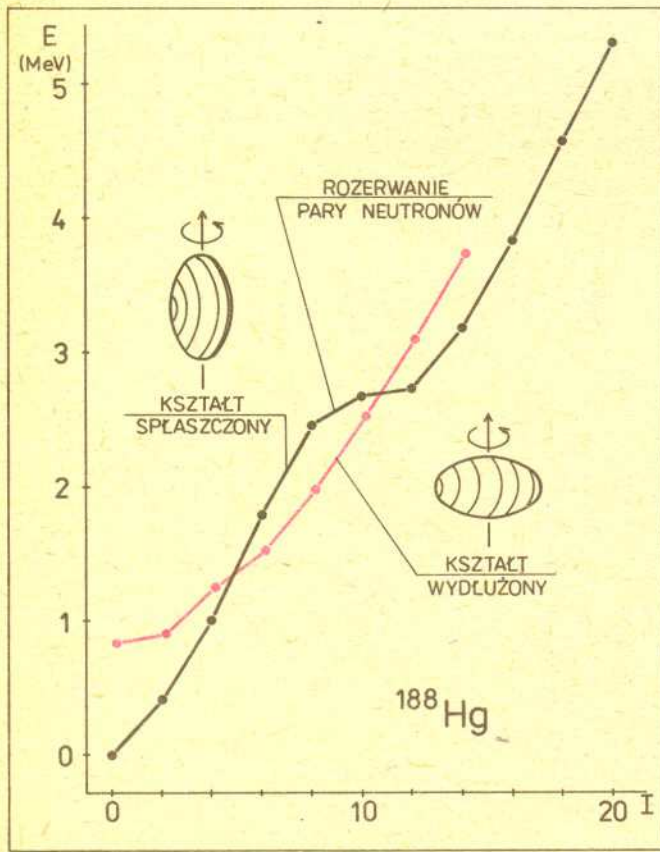
Rys. 5. Schematyczne przedstawienie wpływu obrotu jądra na momenty pędu nukleonów. Gdy jądro nie obraca się (a), to nukleony łączą się w pary o przeciwnych momentach pędu. Siła Coriolisa działająca na nukleony w obracającym się jądrze (b) powoduje, że momenty pędu nukleonów (strzałki czarne) usiłują ustawić się wzdłuż momentu pędu jądra (strzałka kolorowa). Przy szybkim obrocie jądra (c) jedna z par może ulec całkowitemu rozerwaniu, a momenty pędu jej nukleonów ustawią się wtedy równoległe do całkowitego momentu pędu.

Nie wyczerpuje to jeszcze bogactwa możliwych struktur pasm rotacyjnych. Na rysunku 6 widzimy wyniki doświadczeń otrzymane dla jądra ^{156}Er . Poniżej momentu pędu $30\hbar$ jądro to zachowuje się w sposób, który już nie jest dla nas niczym zaskakującym: widzimy dwa przecięcia pasm dla $I = 10$ i $I = 22$ odpowiadające rozerwaniu jednej pary neutronów i jednej pary protonów. Dla wyższych momentów pędu zaczyna się dziać coś dziwnego. Czym można wytłumaczyć tak nieregularne zmiany momentu bezwładności przy rosnącej częstości obrotu? Okazuje

się, że dla $I < 30$ jądro ^{156}Er ma kształt cygara obracającego się wokół osi prostopadłej do osi symetrii obrotowej. Natomiast dla $I > 30$ przyjmuje ono kształt dysku i wtedy moment pędu jest całkowicie złożony z momentów pędu wielu porozrywanych par nukleonów. Stąd też pochodzą nieregularności pasma rotacyjnego związane z takim „niekolektywnym” obrotem.



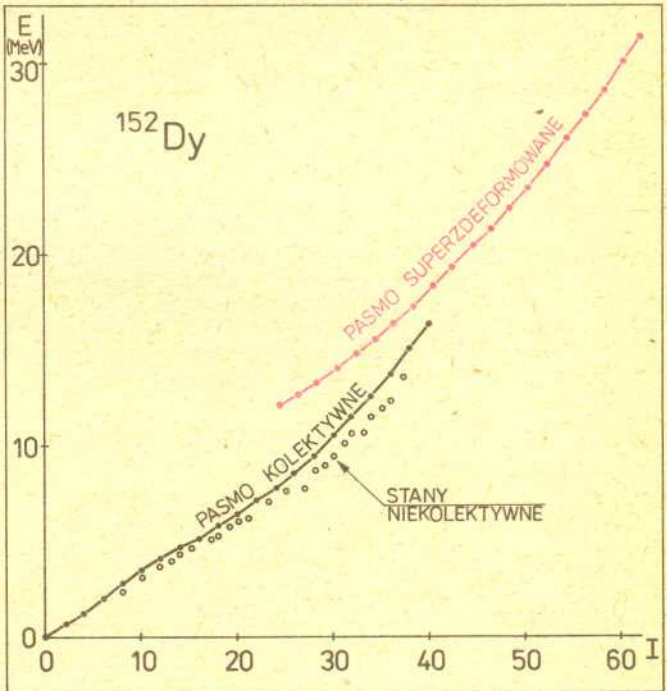
Rys. 6. Zależność momentu bezwładności jądra ^{156}Er od prędkości kątowej obrotu. Dla liczby kwantowej momentu pędu $I < 30$ jądro to ma kształt cygara obracającego się wokół osi prostopadłej do osi symetrii obrotowej, w którym rozerwaniu ulega para neutronów ($I = 12$) i protonów ($I = 22$). Powyżej $I = 30$ jądro to przybiera kształt dysku, a jego moment pędu utworzony jest z momentów pędu wielu porozrywanych par nukleonów.



Rys. 7. Zależność energii od liczby kwantowej momentu pędu w pasmach jądra ^{188}Hg .

Inny charakter ma pasmo rotacyjne jądra ^{188}Hg (rys. 7). Jądro to ma w stanie podstawowym kształt lekko spłaszczonej kuli, co prowadzi do pasma rotacyjnego odpowiadającego obrotowi wokół osi o najmniejszym momencie bezwładności. Niezależnie od tego obserwujemy pasmo o znacznie większym momencie bezwładności przecinające się z pierwszym już dla $I \approx 4$. Okazuje się, że drugie pasmo odpowiada obrotowi jądra o kształcie cygara wokół osi prostopadłej do jego osi symetrii obrotowej. Jądro ^{188}Hg może więc istnieć równocześnie w stanach o różnym kształcie. Niezależnie od takiego współistnienia kształtów widzimy „normalne” przegięcie wsteczne w paśmie odpowiadającym kształtowi spłaszczonemu dla $I \approx 10$.

Całkiem niedawno odkryto jeszcze jeden typ struktury pasma rotacyjnego. Jądro ^{152}Dy (rys. 8) aż do $I = 40$ ma nieregularne niekolektywne pasmo rotacyjne odpowiadające kształtowi spłaszczonemu. Jednocześnie występuje niezwykle regularne pasmo boczne o ogromnym momencie bezwładności. Tak duży moment bezwładności sugeruje olbrzymią deformację tego jądra — wydaje się, że ma ono w paśmie tym kształt cygara o długości dwa razy większej niż jego grubość! Zachowanie się tego jądra przy szybkim obrocie przypomina... zachowanie się gwiazdy. Astronomowie od dawna wiedzieli o tak zwanej niestabilności Jacobiego. Polega ona na tym, że gwiazda kurcząc się obraca coraz szybciej i będąc najpierw kulą przyjmuje następnie kształt coraz bardziej spłaszczonego dysku wirującego wokół osi symetrii obrotowej, by nagle zmienić się w cygaro wirujące wokół osi prostopadłej do jego osi symetrii obrotowej, a w końcu rozerwać się tworząc układ dwu gwiazd wirujących wokół wspólnego środka masy. Podobnie jest z jądrem ^{152}Dy — przewiduje się, że dla momentów pędu około $80\hbar$ powinno ono rozszczepiać się na dwa niezależne fragmenty. Fizycy poznali więc już prawie cały zakres momentów pędu dostępnych temu jądro...



Rys. 8. Zależność energii od liczby kwantowej momentu pędu w pasmach jądra ^{152}Dy . Oprócz pasma odpowiadającego obrotom niekolektywnym przy kształcie spłaszczonym (czarne kółka) oraz „normalnego” pasma obrotu kolektywnego dla kształtu wydłużonego (linia czarna) obserwujemy pasmo odpowiadające obrotowi jądra o gigantycznej deformacji, kiedy ma ono kształt cygara o osi długiej, dwukrotnie większej niż oś krótka.

Badanie szybko obracających się jąder atomowych jest potężnym narzędziem poznawania ich budowy i struktury. Za jego pomocą udało się uzyskać potwierdzenia naszych wyobrażeń o tym, w jaki sposób nukleony układają się w przestrzeni tworząc najbardziej gęstą „grudkę” materii, z której złożony jest nasz świat i my sami. Czy narzędzie to zostało już zużyte do końca? Należy w to wątpić. Dostarczy jeszcze ono fizykom wielu informacji i wielu niespodzianek...