

Jądrowa menażeria

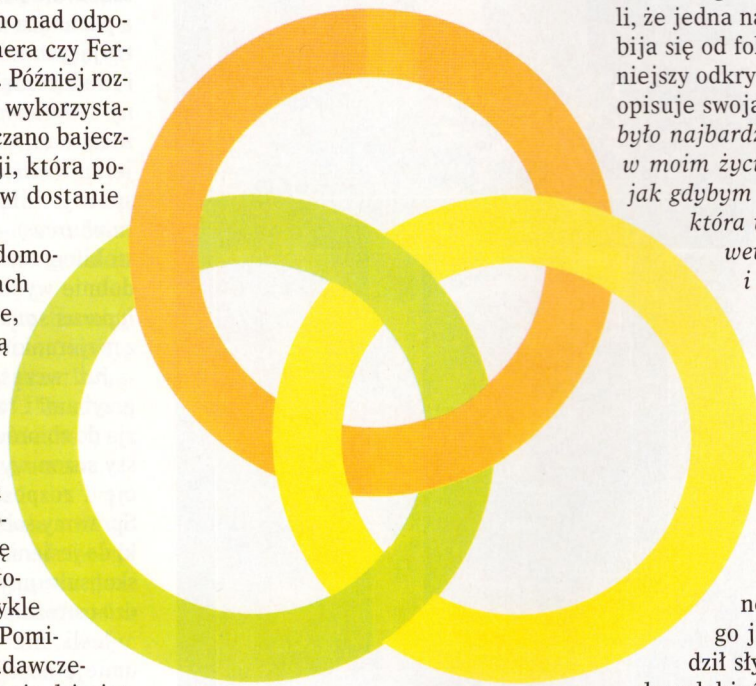
Ostatnie odkrycia sprawiły, że doniesienia o fizyce jądrowej wróciły na pierwsze strony gazet. Dzięki nowym technikom badawczym ujawniono wcześniej nieznane, zdumiewające własności jąder atomowych.

Przez wiele lat fizyka jądrowa była niemal synonimem nowoczesnej nauki, symbolem potęgi i dylematów związanych z jej uprawianiem. Początkowo, w latach poprzedzających ostatnią wojnę, jądra atomowe wyznaczały pierwszą linię badań struktury materii. Później, gdy tę rolę zaczęła przejmować rodząca się fizyka cząstek elementarnych, nastąpił czas budowy bomb jądrowych i termojądrowych. Fizycy odpowiedzialni za ich stworzenie znaleźli się w centrum zainteresowania; debatowano nad odpowiedzialnością Oppenheimera czy Fermiego za dramat Hiroshimy. Później rozpisywano się o pokojowym wykorzystaniu energii jądrowej; roztaczano bajeczne perspektywy cywilizacji, która poznawszy tajemnice atomów dostanie energię niemal za darmo.

Technologie jądrowe zadomowiły się w wielu dziedzinach życia, choćby w medycynie, natomiast nadzieje na tanią energię nie spełniły się. Niebezpieczeństwa związane z energetyką jądrową, często urojone, zdyskredytowały ją w oczach społeczeństw. Fizyka jądrowa straciła również pozycję awangardy nauki. Jądra atomowe przypominają niezwykle zróżnicowaną menażerię. Pomimo ogromnego wysiłku badawczego, skrupulatnego przebadania dziesiątków procesów nie udało się objąć całego bogactwa zjawisk jądrowych jedną fundamentalną teorią, tak jak równania Maxwella opisują elektromagnetyzm czy równania Einsteina grawitację. Trudności wynikają w dużej mierze z samej natury składników jąder, których badanie jest już jednak domeną fizyki cząstek elementarnych.

W ostatnich 20 latach nastąpił widoczny spadek zainteresowania fizyką jądrową. Od roku 1935 do 1967 przy-

znano aż 14 Nagród Nobla za badanie jąder atomowych. Później już tylko jedną – w roku 1975. Nie dziwi więc, że coraz mniej młodych, zdolnych fizyków chciało zajmować się tą dziedziną. Zaczęto zamykać niektóre laboratoria bądź zmieniać ich profil. Ostatnio trudno nie zauważyć ponownego wzrostu zainteresowania fizyką jądrową. Zastosowanie nowoczesnych technik doświadczalnych i rozwój teorii za-



Niektóre jądra atomowe przypominają swymi własnościami okręgi boromejskie: po rozerwaniu jednego, pozostałe dwa również rozpadają się

owocowały nowymi, ciekawymi rezultatami badawczymi.

Fizyka jądrowa, w odróżnieniu od wielu innych dziedzin nauki, pozbawiona jest prehistorii, takiej jak np. fizyka atomowa, której dzieje wyprowadza się od jońskich materialistów przez atomi-

styczną hipotezę Daltona. Odkrycie jądra atomowego w 1911 roku otworzyło zupełnie nowy rozdział wiedzy. (Czasem przyjmuje się za początek fizyki jądrowej rok 1896, tj. odkrycie promieniotwórczości – pierwszego poznanego zjawiska, w którym, jak później zrozumiano, jądro atomowe dało znać o sobie).

ODKRYCIE JĄDRA ATOMOWEGO

Gdy badano oddziaływanie cząstek alfa z materią, okazało się, że cząstki te, emitowane z substancji radioaktywnych, przechodzą przez cienkie folie metalowe niemal bez przeszkód. Wskazywało to na prawie zupełną przezroczystość materii. Z drugiej jednak strony Hans Geiger i Ernest Marsden wykazali, że jedna na kilka tysięcy cząstek odbija się od folii. Ernest Rutherford, późniejszy odkrywca jądra atomowego, tak opisuje swoją reakcję na ów wynik: *To było najbardziej niezwykle wydarzenie w moim życiu. Niemal tak niezwykle, jak gdybym wystrzelił kulę armatnią, która trafiając w papierową serwetkę odbiłaby się do tyłu i ugodziła we mnie.*

Chcąc pogodzić przezroczystość materii z jej zdolnością do zawracania rozpędzonych cząstek, Rutherford zaproponował planetarny model atomu, w którym lekkie ujemnie naładowane elektrony krążą niby planety wokół masywnego dodatnio naładowanego jądra. Następnie wyprowadził słynny wzór opisujący prawdopodobieństwo rozproszenia cząstki alfa pod danym kątem. Konfrontacja z danymi doświadczalnymi potwierdziła słuszność modelu. Ernest Rutherford przedstawił swoje rozważania w Manchesterским Towarzystwie Literatury i Filozofii 7 marca 1911 roku. Termin „jądro atomowe” pojawił się jednak dopiero w ukończonej w październiku 1912 roku książce Rutherforda poświęconej radioaktywności. Czytamy w niej, że *atom musi zawierać silnie naładowane jądro.*



Fot. Stanisław Mrówczyński

Piotr Kapica, pracujący przez wiele lat w Laboratorium Cavendisha w Cambridge kierowanym przez Ernesta Rutherforda, nazywał swego szefa krokodylem z racji tubalnego głosu. Rutherford sam nie zajmował się fizyką niskich temperatur, jednak gorąco popierał badania w tej dziedzinie prowadzone przez Kapicę. Gdy w 1933 roku powstał w Cambridge nowy budynek, który miał pomieścić pracownię Kapicy, ten kazał zewnętrzną ścianę udekorować płaskorzeźbą krokodyla

Rutherford poprawnie określił wielkość jąder – ich promień jest rzędu 10^{-13} cm. Stwierdził również, że zderzenie cząstki alfa z jądrem azotu może prowadzić do powstania jądra tlenu. Otworzył tym samym w 1919 roku badanie reakcji, w których możliwa jest sztuczna przemiana jednych atomów w drugie. Wcześniej stwierdzono zachodzenie takich przemian w rezultacie naturalnej radioaktywności – podczas emisji promieni alfa lub beta jądro uranu, polonu czy radu zamienia się w jądro innego pierwiastka.

SKŁADNIKI JĄDER

Ponieważ wodór jest najlżejszym atomem, przypuszczano, że jądra cięższych pierwiastków zbudowane są właśnie z wodoru. Cząstki alfa, które są jądrami atomu helu i mają ładunek dwukrotnie,

a masę czterokrotnie większą niż wodór, próbowano przedstawić jako cztery protony (jądra wodoru) i dwa elektrony związane wszystkie razem siłami elektrostatycznymi. Jednak siły te okazały się za słabe, aby wyjaśnić spistość jąder. Zasugerowano zatem istnienie specyficznych sił o bardzo krótkim zasięgu (dzisiaj nazywamy je silnymi) i wprowadzono model, w którym jądro tworzą protony oraz hipotetyczne cząstki elektrycznie neutralne – neutrony. Po dziesięcioletnich poszukiwaniach udało się je zaobserwować. W lutym 1932 James Chadwick stwierdził, bombardując jądra berylu helem, powstawanie węgla i emisję cząstek neutralnych, których masa okazała się bliska masie protonu.

Jeszcze przez pewien czas zastanawiano się, czy neutron nie jest ciasno związaną parą złożoną z protonu i elektronu, jednak kolejne doświadczenia wykazały,

że jest on równie elementarny jak proton. Tym dwóm składnikom jądra atomowego – neutronowi i protonowi – nadano wspólną nazwę nukleon.

Liczba protonów w jądrze, równa liczbie elektronów w atomie, określa typ pierwiastka i zwana jest liczbą porządkową lub atomową. Liczba neutronów nie jest natomiast dla danego pierwiastka ściśle określona. Może więc on występować w postaci kilku czy nawet kilkudziesięciu izotopów różniących się właśnie zawartością neutronów. I tak na przykład najbardziej rozpowszechnione izotopy uranu mają odpowiednio 142, 143 i 146 neutronów. Izotopy te zapisujemy jako ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , gdzie górny indeks oznacza liczbę masową, czyli sumę neutronów i protonów. Tych ostatnich jest w uranie 92.

JĄDRO JAKO KROPLA CIECZY

Pierwszą próbą opisanego budowy jądra atomowego było sformułowanie tzw. modelu kropkowego. Przyjmuje się w nim, że jądro jest układem ciasno upakowanych protonów i neutronów. Ich ruchy, tak jak pasażerów zatłoczonego autobusu, są bardzo ograniczone. Każdy oddziałuje tylko z najbliższymi sąsiadami, podobnie jak to się dzieje z cząstkami cieczy. Siły między dwoma nukleonami istotnie przypominają oddziaływania międzycząsteczkowe, które są odpychające dla małych odległości, przyciągające zaś dla nieco większych. Model kropkowy pozwala zrozumieć wiele cech jąder atomowych. Rozważmy trzy z nich.

- Przyciąganie między nukleonami w jądrze sprawia, że masa jądra jest mniejsza niż suma mas nukleonów. Energia wiązania pojedynczego nukleonu, tzn. różnica między masą nukleonu swobodnego i nukleonu znajdującego się w jądrze, jest niezależna od wielkości jądra. Dzieje się tak dzięki krótkiemu zasięgowi sił jądrowych. Gdyby siły te, tak jak elektromagnetyczne, były długozasięgowe, energia wiązania wrażałaby z wielkością jądra.

- Objętość jądra atomowego jest proporcjonalna do liczby nukleonów. Oznacza to, że gęstość nukleonów w jądrze jest mniej więcej taka sama dla wszystkich jąder. Podobnie jest z wodą, której gęstość nie zależy od rozmiarów kropeł.

- Jądra atomowe przybierają kulisty lub prawie kulisty kształt. Wszelki układ dąży do zajęcia stanu najkorzystniejszego energetycznie, czyli w przypadku jąder i kropli cieczy do stanu najlepiej związanego. Ponieważ cząsteczki znajdujące się na powierzchni kropli

mają mniej sąsiadów niż znajdujące się wewnątrz, dają one mniejszy wkład do wiązania kropli. Ta więc stara się zmniejszyć swoją powierzchnię, a bryła o danej objętości i minimalnej powierzchni to właśnie kula.

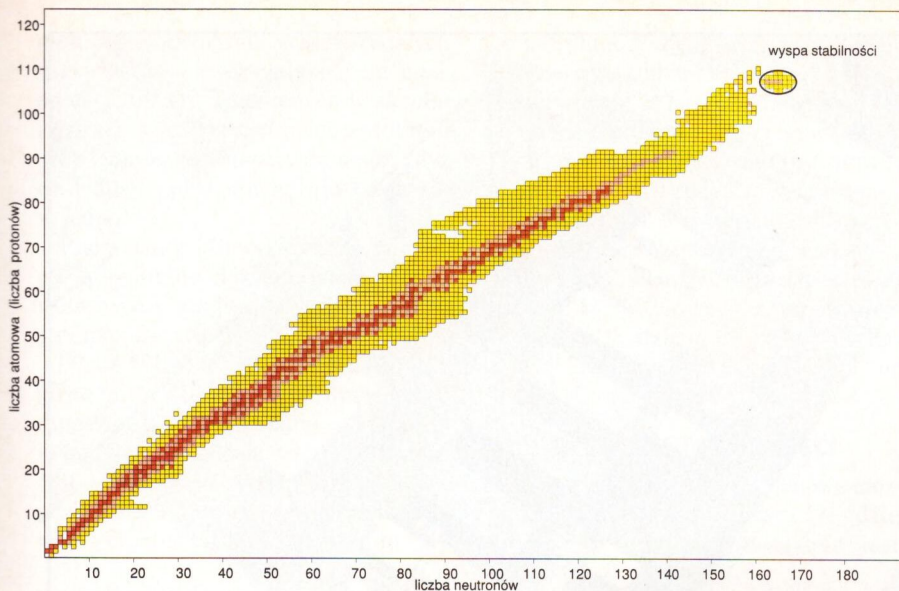
Model kropkowy nieźle wyjaśnia globalne własności jąder atomowych, jednak zupełnie nie tłumaczy dlaczego pewne określone jądra mają specyficzne cechy. Już w latach trzydziestych zauważono, że jądra, które nazwano magicznymi, o liczbach neutronów lub protonów 2, 8, 20, 28, 50, 82 są lepiej związane od jąder o bliskich liczbach nukleonów. Dopatrywano się w tym podobieństwa do powłok elektronowych w atomach, lecz aż do lat pięćdziesiątych jądra magiczne pozostawały zagadką. Rozwiązanie jej stało się możliwe, gdy zrozumiano, jak ważną rolę odgrywa zasada Pauliego w jądrach atomowych.

Rozważając atomy wieloelektronowe, Wolfgang Pauli sformułował w roku 1924 fundamentalne, jak się później okazało, prawo mikroświata: dwa elektrony nie mogą być w tym samym stanie, tzn. nie mogą mieć takich samych charakterystyk. Teraz wiemy, że zakaz ten odnosi się nie tylko do elektronów, lecz całej klasy cząstek zwanych fermionami, do której należą w szczególności składniki jąder – neutrony i protony.

Zasada Pauliego powoduje, że analogia między nukleonami w jądrze atomowym, a pasażerami zatłoczonego autobusu jest w istocie chybiona. Nukleony nie są w jądrze unieruchomione, gdyż byłyby wtedy wszystkie w tym samym stanie – w spoczynku. Poruszają się więc, zajmując kolejne najniższe stany energetyczne. Pomimo panującego w jądrze tłoku pojedynczy nukleon porusza się niczym cząstka swobodna – zderzenia z otaczającymi go nukleonami są niemożliwe, gdyż prowadziłyby do zmiany jego stanu, a wszystkie stany są przecież zajęte. Tak to dochodzimy do zdumiewającego obrazu jądra, w którym silnie oddziałujące, gęsto upakowane nukleony zachowują się jak zbiorowisko niezależnych, niemal swobodnych cząstek.

STRUKTURA POWŁOKOWA

Elektrony krążą w atomie wokół jądra, niby planety dookoła Słońca. Naładowane elektrycznie jądro jest źródłem potencjału przyciągającego elektrony. Nukleony w jądrze atomowym krążą wokół wspólnego środka masy i wszystkie razem wytwarzają przyciągający potencjał. Możemy więc powiedzieć, że tym czym dla planety jest Słońce, tym dla



Ryc. 1. Mapa jąder. Kolorem czerwonym zaznaczono jądra stabilne, pomarańczowym i żółtym – nietrwałe

pojedynczego nukleonu są wszystkie pozostałe nukleony jądra.

Poziomy energetyczne pojedynczych nukleonów w takim uśrednionym potencjale mają podobną naturę jak poziomy elektronów w polu jądra. Tworzą kolejne powłoki, na których może znajdować się, odpowiednio, 2, 6, 12, itd. nukleonów. Jądra magiczne zaś są ścisłym odpowiednikiem gazów szlachetnych, w atomach których elektrony całkowicie zapewniają powłoki. Dzięki temu są dobrze związane i niechętnie wchodzi w reakcje z innymi atomami.

Wzbudzenie atomu polega na przeniesieniu jednego lub kilku elektronów na wyższy poziom energetyczny. Zupełnie analogicznie wyobrażamy sobie wzbudzenie jądra atomowego. Ogromna liczba precyzyjnych pomiarów potwierdza przewidywania modelu powłokowego, który stał się podstawą współczesnej fizyki jądrowej. Za jego sformułowanie Hans J. D. Jensen i Maria Göppert-Mayer otrzymali Nagrodę Nobla w 1963 roku.

KOLEKTYWNY RUCH NUKLEONÓW

Odkrycie powłokowej struktury jąder atomowych nie pogrzebało zupełnie modelu kropłowego – podobieństwo materii jądrowej do cieczy okazało się głębsze niż można było przypuszczać. Model powłokowy kładzie nacisk na niezależny ruch poszczególnych nukleonów, podczas gdy często obserwuje się również zjawiska kolektywne, szczególnie wtedy, gdy jądro znajduje się nie w stanie podstawowym (o najniższej energii), lecz we wzbudzionym.

Otrzymałszy porcję energii, jądro może zachowywać się niby wirujący bąk; może nastąpić silna deformacja jego kulistego kształtu; stwierdza się również falowanie powierzchni jąder i wahadłowy ruch protonów względem neutronów. We wszystkich tych przypadkach nukleony poruszają się całą grupą, przejawiają zatem zachowanie kolektywne, takie właśnie jak cząsteczki cieczy – płyną całą gromadą.

Powstanie tzw. modelu uogólnionego uwzględniającego zarówno kropłowe – hydrodynamiczne, jak i powłokowe aspekty jąder było zwieńczeniem badań nad strukturą jądra atomowego. Za jego opracowanie przyznano ostatnią, jak dotąd, w tej dziedzinie Nagrodę Nobla. Otrzymali ją w 1975 roku Aage Bohr (syn Nielsa Bohra), Ben Mottelson oraz James Rainwater.

DŻUNGLA FAKTÓW I REGUŁ

Fizyka rozwija się w dwóch, jakby przeciwnych, kierunkach – pierwszy wiąże się z odkrywaniem nowych zjawisk, drugi zaś polega na poszukiwaniu związków między nimi, ich wspólnych cech i przyczyn. Pierwszy zatem uwiadczenia bogactwo i różnorodność przyrody, drugi – jej wewnętrzną jedność i harmonię. Doskonałym przykładem jest elektromagnetyzm. Wielość zjawisk rządzonych siłami elektromagnetycznymi jest przeogromna, a jednak jesteśmy głęboko przekonani, że u podłoża ich wszystkich leży jedna fundamentalna teoria – elektrodynamika kwantowa. Dzieje się tak, choć nie każde zjawisko potrafimy zadowalająco objaśnić.

Jądra atomowe są niezwykle zróżnicowane. W przeciwieństwie do elektrodynamiki nie udało się jednak sformułować jednej teorii ogarniającej całą problematykę. Trudności mają dwojaką naturę. Po pierwsze nie znamy podstawowej zasady, takiej jak prawo Coulomba w elektrodynamice, która opisałaby oddziaływanie dwóch nukleonów. Pomimo zebrania ogromnego materiału doświadczalnego nie ujęto takiego oddziaływania jedną prostą i uniwersalną formułą. Mamy natomiast wiele różnych i niezwykle skomplikowanych reguł, które stosujemy zależnie od sytuacji.

Sprawa układu wielu nukleonów wygląda jeszcze gorzej. W elektrodynamice pary ładunków oddziałują zgodnie z prawem Coulomba, a charakter oddziaływania układu wielu ładunków określa oddziaływanie wszystkich par. W przypadku nukleonów nie wiemy nawet, czy znajomość prawa rządzącego oddziaływaniem pary wystarczyłaby do opisu układu wielu nukleonów. Przypuszcza się, że w jądrach istnieją specyficzne siły, działające między trzema i więcej nukleonami.

Druga przeszkoda na drodze do jednolitej teorii jądra atomowego ma matematyczny charakter. Niemal żadnego problemu fizycznego nie udaje się rozwiązać ściśle. Jednak wypracowano metodę, która w wielu wypadkach pozwala podać rozwiązania przybliżone i to z dowolnie dużą dokładnością. Na przykład umiemy wyliczyć parametry układu wielu elektronów. Metoda, o której mowa, zwana rachunkiem zaburzeń, pozwala wynik poprawiać, czyli zbliżać do wyniku ścisłego, w kolejnych krokach. Jest to możliwe ze względu na słabość oddziaływania elektromagnetycznego, które traktujemy jedynie jako niewielkie zaburzenie ruchu swobodnego.

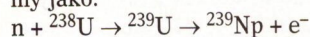
Oddziaływanie między nukleonami jest, jak sama nazwa wskazuje, silne, toteż rachunek zaburzeń nie ma tu zastosowania. Innej, równie uniwersalnej metody nie znaleziono. Skazani więc jesteśmy w fizyce jądrowej na najróżniejsze metody przybliżone, których obszar stosowalności jest zwykle wąski i do tego słabo zakreślony. Wybór zatem tego czy innego teoretycznego narzędzia jest najczęściej dyktowany używaną *a posteriori* zgodnością z doświadczeniem, a niemal każdy problem wymaga specyficznego traktowania. Na osobach nie obeznanach z tą dziedziną współczesna fizyka jądrowa sprawia wrażenie dżungli doświadczalnych faktów i teoretycznych reguł.

Wieki bezskutecznych działań alchemików marzących o przemianie jednego pierwiastka w drugi sprawiły zapewne, że alchemiczne osiągnięcie fizyki jądrowej otaczane są szczególnym zainteresowaniem. Wytworzenie zaś w laboratorium pierwiastka, który nie występuje w przyrodzie, łatwo przemawia do wyobraźni.

NOWE PIERWIASTKI

Pierwsza udana synteza nowego pierwiastka przeprowadzona została w 1940 roku. Uran 238 bombardowano neutronami (n), co prowadziło do powstania uranu 239. Następnie podlegał on przemianie beta, w której neutron emituje elektron (e⁻) i zamienia się w proton.

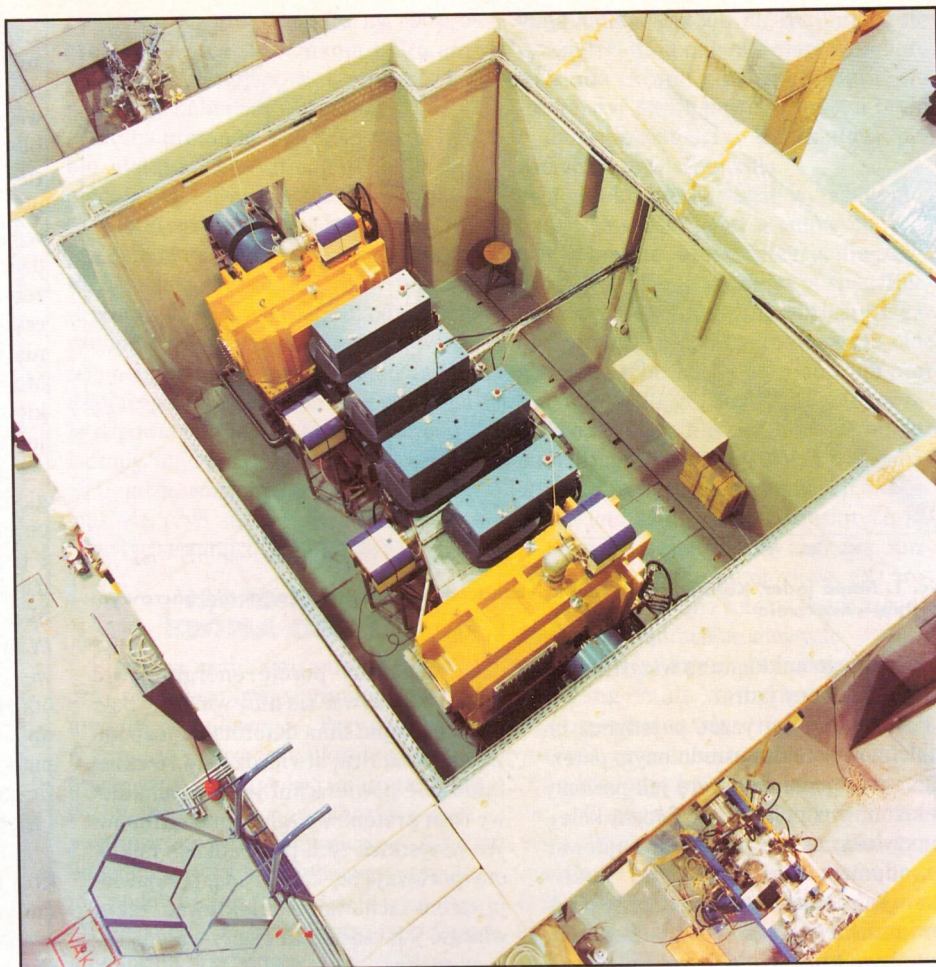
W ten sposób powstało wcześniej nieznanne jądro atomowe o 93 protonach, które nazwano neptunem, tak jak planetę za Uranem. Wspomniany ciąg reakcji zapisujemy jako:



Neptun jest nietrwały i podlega dalszym przemianom. Wśród produktów tych przemian odkryto 94 pierwiastek, który, odwoławszy się ponownie do analogii z planetami, nazwano plutonem.

Pierwiastek 95 to ameryk, który wytworzono po raz pierwszy w 1944 roku bombardując uran cząstkami alfa. Wkrótce odkryto kolejne pierwiastki; 96 nazwano kiurem na cześć małżeństwa Curie. Nieoczekiwanie zaobserwowano pierwiastki 99 i 100 – einstein i ferm. Stwierdzono ich obecność w materiale pozostałym po wybuchu ładunku termojądrowego „Mike”, który zdetonowano w 1952 roku. Podczas takiego wybuchu jądro uranu może wychwycić nawet kilkanaście neutronów.

Wspomniane sztucznie wytworzone pierwiastki określone są jako transuranowce. Wszystkie one, aż do 101 zaobserwowano po raz pierwszy w Berkeley w Kalifornii. Pierwiastki te są nietrwałe, jednak ich czasy życia są stosunkowo długie. Tzw. czas połowicznego zaniku, w którym rozpadowi ulega połowa jąder z danej próbki, wynosi dla najtrwalszego izotopu fermu około 100 dni. Jest on na tyle długi, aby można było zgromadzić dostatecznie wiele atomów, a następnie przebadać ich własności chemiczne. To one właśnie stanowiły podstawę identyfikacji nowych pierwiastków.



Fot. GSI-Foto

Z tarczy, bombardowanej wiązką jąder z akceleratora, wylatują produkty najróżniejszych reakcji oraz jądra wiązki, które nie oddziaływały. Ogromnym problemem jest wydzielenie pożądanych produktów syntezy z całej reszty. Służy temu pokazany na zdjęciu separator SHIP (Separator for Heavy Ion reaction Products), który za pomocą kombinacji pól elektrycznych i magnetycznych wybiera jądra o określonej prędkości. Z tego powodu SHIP jest nazywany filtrem prędkości. W lewym górnym rogu widoczna jest tarcza, a w prawym dolnym detektor. Oba urządzenia znajdują się poza osłoną filtra

Od początku lat sześćdziesiątych do alchemicznych poszukiwań włączyły się laboratoria z ZSRR, Anglii, Szwecji i Niemiec. Jednak odkrycia pierwiastków mających ponad 100 protonów nie następowały już tak szybko. Bardzo trudno było je wytworzyć, a czasy życia stawały się coraz krótsze. I tak, czas połowicznego zaniku najtrwalszego izotopu pierwiastka 103 wynosi 3 minuty, a 104 zaledwie dziesiąte części sekundy. Nowe jądra identyfikowano już nie metodami chemicznymi, lecz rekonstruując ciąg przemian, którym podlegało wytworzone jądro. Fizycy z różnych laboratoriów często nie mogli się zgodzić nie tylko co do nazw nowych pierwiastków, lecz i kryteriów ich identyfikacji. Rodziło to również spory o podział zasług i sławy.

W 1985 roku Międzynarodowa Unia Fizyki Czystej i Stosowanej oraz analogiczna organizacja chemików powołały

Grupę Roboczą Pierwiastków Transuranowych, która miała wypracować kryteria, jakie powinny spełniać obserwacje pierwiastków oraz ustalić listę ich odkrywców. W skład grupy weszło dziewięciu wybitnych naukowców spoza krajów bezpośrednio zaangażowanych w spory, wśród nich polski fizyk Andrzej Hrynkiewicz. Jej prace, zakończone w 1991 roku, uporządkowały sytuację. Uznano za w pełni przekonujące istnienie 109 elementów tablicy Mendelejewa.

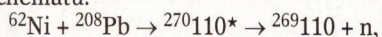
110, 111, 112...

W listopadzie 1994 roku, po dziesięcioletniej przerwie w odkrywaniu nowych pierwiastków, doniesiono z Instytutu Ciężkich Jonów (Gesellschaft für Schwerionenforschung) w Darmstadt o obserwacji pierwiastka 110, a w lutym 1996 roku 112.

Pierwsze transuranowce otrzymano, naświetlając neutronami bądź cząstkami

mi alfa izotopy uranu. Synteza dalszych pierwiastków wymagała użycia cięższych jąder przyspieszonych w akceleratorach. Niestety, prawdopodobieństwo syntezy jest niezwykle małe, gdyż dwa duże jądra niechętnie łączą się w jedno.

Pierwiastek 110 wytworzono, zderzając jądra niklu z ołowiem. Jedną z obserwowanych reakcji przebiegała według schematu:



gdzie gwiazdka oznacza wzbudzone jądro, które niemal natychmiast emitowało pojedynczy neutron. Otrzymane jądro ${}^{269}\text{110}$ trafiło w detektor krzemowy, gdzie po 241 mikrosekundach wyemitowało cząstkę alfa i zamieniło się

no w Zjednoczonym Instytucie Badań Jądrowych w Dubnej w Rosji).

Pierwiastki 111 i 112 odkryto w sposób bardzo podobny, z tym że w pierwszym przypadku użyto zamiast ołowiu bismut mający o jeden proton więcej. Pierwiastek 112 wytworzono zaś w reakcji ${}^{70}\text{Zn}$ z ${}^{208}\text{Pb}$. W rezultacie wielotygodniowych pomiarów udało się zarejestrować 13 jąder dwóch izotopów pierwiastka 110, trzy jądra ${}^{272}\text{111}$ i tylko dwa ${}^{277}\text{112}$ (patrz: „Sygnały”, „WiŻ” nr 4/1996).

WYSPY STABILNOŚCI

Wszystkie znane jądra atomowe można umieścić na mapie (ryc. 1), gdzie długość geograficzna mierzona jest

wspomniane pasmo jąder trwałych odchyła się mocno na południe.

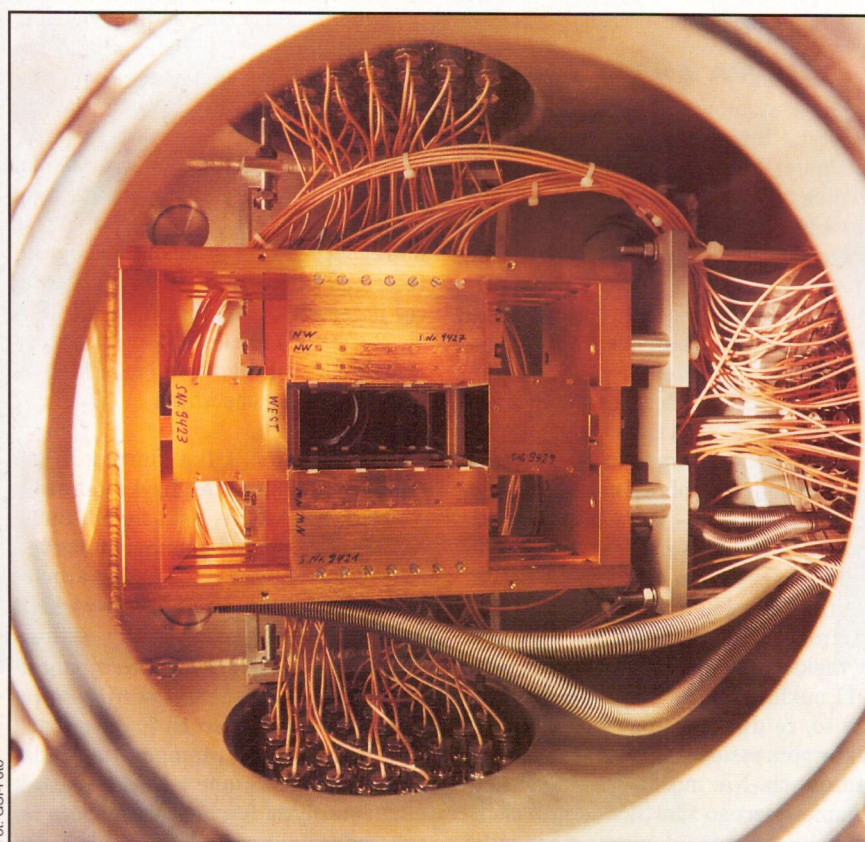
W pobliżu jąder całkowicie stabilnych układają się jądra o długich czasach życia. Im dalej od jąder trwałych, tym krótsza żywotność. W obszarze wytworzonych sztucznie transuranowców nie ma już stabilnych izotopów, a jądra mają bardzo krótkie czasy życia. Zaobserwowany ostatnio izotop pierwiastka 112 żył zaledwie 240 mikrosekund.

W jądrze atomowym siły elektrostatycznego odpychania między protonami kompensowane są przez przyciągające siły jądrowe. Już w 1939 roku Niels Bohr argumentował, że liczba protonów w jądrze nie może istotnie przekraczać 100, gdyż odpychanie przeważa nad przyciąganiem. Bardzo krótkie czasy życia najcięższych jąder zgodne są z tą argumentacją. Jednak trzydzieści lat później zasugerowano, że mogą występować jądra superciężkie w pobliżu hipotetycznego jądra magicznego ${}^{298}\text{114}$. Innymi słowy, sformułowano hipotezę, że istnieje wyspa stabilności. Pomimo ogromnego wysiłku eksperymentatorom nie udało się do niej dopłynąć.

Niedawno natomiast – w 1993 roku – zauważono brzegi innej, bliższej wyspy. Jądra zdeformowane, a więc odbiegające swym kształtem od kuli, są zwykle słabiej związane niż jądra kuliste. Obliczenia teoretyczne wykonane przez Adama Sobiczewskiego wraz ze współpracownikami pokazały jednak, że w przypadku najcięższych jąder obiekty silnie zdeformowane i zawierające dużą nadwyżkę neutronów nad protonami mogą być dostatecznie trwałe, by je zaobserwować. Zasugerowano istnienie obszaru stabilności wokół jądra o $Z = 108$ i $N = 162$.

Hipoteza istnienia tej wyspy, zaznaczonej na ryc. 1, zdaje się obecnie potwierdzać doświadczalnie. Grupa amerykańsko-rosyjska pracująca w Dubnej pod Moskwą wytworzyła jądro ${}^{266}\text{106}$. Okazało się, że jego czas życia, zgodnie z obliczeniami Sobiczewskiego, wynosi dziesiątki sekund i jest około 10 000 razy dłuższy od czasu życia wcześniej poznanego izotopu tego samego pierwiastka ${}^{260}\text{106}$. Stwierdzono również wydłużanie się czasu życia przez zwiększenie liczby neutronów dla pierwiastków 104 i 108. Obecnie trwają prace nad wytworzeniem innych jąder z tego obszaru.

Odkrycie wyspy stabilności obiegło prasę całego świata. Adam Sobiczewski otrzymał w 1995 roku „polskiego Nobla” – nagrodę Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej.



Fot. GSI/Foto

Komora, w której umieszczony był detektor krzemowy, służący do rejestracji rozpadów alfa jąder grzęzających w detektorze. Z pomocą tego urządzenia zaobserwowano pierwiastki 110, 111 i 112

w ${}^{265}\text{108}$. Po upływie dalszych 2324 mikrosekund nastąpiła kolejna przemiana ${}^{265}\text{108}$ w ${}^{261}\text{106}$ z emisją drugiej cząstki alfa. Łącznie zaobserwowano 5 rozpadów alfa, przy czym wszystkie kolejne jądra w tym łańcuchu, z wyjątkiem pierwszego, były wcześniej już znane. Rekonstrukcja całego ciągu przemian pozwoliła zatem stwierdzić, co było na początku. (Najcięższy izotop pierwiastka 110 (${}^{273}\text{110}$) zaobserwowano niedaw-

liczbą neutronów (N), zaś szerokość liczbą protonów (Z). Jądra całkowicie trwałe, czyli o nieskończenie długim czasie życia, zaznaczone kolorem czerwonym, mają bliskie liczby protonów i neutronów, więc na naszej mapie układają się w wąski pasek wzdłuż linii $Z = N$. Ze względu na odpychanie elektrostatyczne między protonami, ciężkie jądra stabilne mają w istocie wyraźnie więcej neutronów niż protonów, więc

Jak już pisałem, jądra atomowe przejawiają strukturę powłokową, co wyraża się najpełniej istnieniem jąder magicznych. Szczególnym zainteresowaniem cieszą się jądra podwójnie magiczne, których zarówno liczba protonów, jak i neutronów jest magiczna. Jądra takie, dla których dodatkowo $Z = N$, są całkiem wyjątkowe. Znane są tylko cztery podobne obiekty: ${}^4\text{He}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{40}\text{Ca}$ i ${}^{56}\text{Ni}$. Z wyjątkiem ostatniego, wszystkie one są trwałe. Następną w szeregu byłaby cyna 100 tj. ${}^{100}\text{Sn}$, której przez wiele lat nie udawało się jednak zarejestrować.

CYNA 100

Metal ten, jak żaden inny pierwiastek, ma aż 10 trwałych izotopów o liczbach masowych od 112 do 124 z wyłączeniem 113, 121 i 123 (te trzy są nietrwałe). Zauważmy, że ${}^{100}\text{Sn}$ ma 12 neutronów mniej niż najbliższy izotop trwały. Zwykle jądra o tak dużym deficycie neutronów w ogóle nie mogą istnieć, gdyż przyciąganie jądrowe nie równoważy odpychania elektrostatycznego. Jednak jądro ${}^{100}\text{Sn}$ byłoby podwójnie magiczne! Istnienie tego choćby krótkożyłowego izotopu rozwiązuje zaś ważny problem astrofizyczny.

Ciężkie pierwiastki produkowane są głównie podczas wybuchów supernowych. Lżejsze jądra pochłaniają neutrony, które zamieniają się następnie w protony dzięki rozpadowi beta. Zachodzenie tych procesów wyjaśnia rozpowszechnienie w przyrodzie większości pierwiastków i ich izotopów. Mamy jednak grupę jąder, na przykład izotopy molibdenu, które powstały zapewne nie przez wychwyty neutronów, lecz protonów. Aby proces ten był efektywny, jądra zawierające dużo protonów jak właśnie ${}^{100}\text{Sn}$, które występują na pośrednich stopniach całego ciągu reakcji, muszą być choćby marginalnie trwałe. Tak zatem obecność w przyrodzie molibdenu 92 wskazuje na istnienie ${}^{100}\text{Sn}$.

Cynę 100 próbowano syntetyzować, zderzając jądra, których łączne liczby zarówno protonów jak i neutronów lekko przekraczały 50. Tą drogą otrzymano nawet cynę 101, lecz ${}^{100}\text{Sn}$ nie udawało się zarejestrować. W końcu odniesiono sukces, poszukując tego izotopu w produktach procesu fragmentacji, w którym mocno rozpedzone jądro rozbijane jest na kawałki w zderzeniu z innym jądrem. Dokonały tego niemal jednocześnie latem 1994 roku dwie grupy: niemiecka, pracująca we wspomnianym już Darmstadt, oraz międzynarodowa, w której dużą rolę odegrali fizycy z Warszawy, prowadząca pomiary we francu-

skim ośrodku GANIL w Caen (patrz: „Wydarzenia roku 1994”, „WiZ” nr 1/1995).

W eksperymencie niemieckim przyspieszano izotop ${}^{124}\text{Xe}$ do energii przekraczającej jego masę spoczynkową, a następnie zderzano go z berylem. Wśród „kawałków” jądra ${}^{124}\text{Xe}$ zaobserwowano 7 jąder ${}^{100}\text{Sn}$ w ciągu 277 godzin nieprzerwanych pomiarów. W GANIL natomiast badano fragmentację jądra ${}^{112}\text{Sn}$ rozpedzonego do znacznie mniejszej energii niż w eksperymencie niemieckim. Wydajność produkcji cyny 100 była w tym wypadku jednak wyższa – zaobserwowano 24 jony cyny 100 w czasie 44 godzin. Teraz, kiedy już opanowano „technologię” wytwarzania ${}^{100}\text{Sn}$, prowadzi się badania nad własnościami tego podwójnie magicznego izotopu.

JĄDRA Z AUREOLĄ

Jądra atomowe są tworami bardzo zwartymi. Średnie odległości między nukleonami są niewiele większe od ich średnicy. Nukleony trzymają się na odległościach odpowiadających silnemu przyciąganiu krótkozasięgowych sił jądrowych. Grubość zewnętrznej warstwy jądra – obszaru, w którym gęstość nukleonów spada do zera – jest niewielka, a brzeg jądra wyraźnie zaznaczony.

Fizycy przyjęli z dużym zaskoczeniem wiadomość, że mogą istnieć jądra atomowe, których struktura kłóci się z tym dobrze rozumianym obrazem. Okazało się, że izotop litu ${}^{11}\text{Li}$ – jądro o 3 protonach i aż 8 neutronach – zbudowany jest z ${}^9\text{Li}$ będącego rdzeniem oraz aureoli zwanej neutronowym halo, którą tworzą dwa neutrony. Promień aureoli jest aż dwa razy większy od promienia typowego jądra o 11 nukleonach, na przykład ${}^{11}\text{B}$. Oznacza to, że dwa neutrony poruszają się jakby poza zasięgiem przyciągających sił jądrowych. Nie można zrozumieć tego zdumiewającego zjawiska na gruncie fizyki klasycznej, dopiero mechanika kwantowa może je objaśniać.

Zgodnie z fizyką newtonowską Ziemia krąży wokół Słońca po ściśle określonej orbicie. W mechanice kwantowej trajektoria ulega rozmyciu, przy czym jego wielkość jest odwrotnie proporcjonalna do energii wiążącej. Dwa neutrony litu 11 są bardzo słabiułko związane z całą resztą – dziesięciokrotnie słabiej niż nukleon w typowym jądrze. Z tego powodu ich ruch rozmasany jest w bardzo dużym obszarze.

Kolejną zagadką ${}^{11}\text{Li}$ jest niewystępowanie jego najbliższego sąsiada ${}^{10}\text{Li}$. Oderwanie jednego neutronu powoduje

odpadnięcie i drugiego. Z tego powodu lit 11 bywa nazywany jądrem boromejskim. Herbem włoskich książąt Boromeuszów są trzy pierścienie spięte w ten sposób (ryc. na s. 22), że usunięcie jednego powoduje rozdzielenie się i dwóch pozostałych. Boromejskie jądra w najbardziej widoczny sposób ujawniają fundamentalną cechę sił jądrowych, tzw. dwójkowanie czy parowanie (od ang. pairing), polegające na skłonności nukleonów do wiązania się w pary.

W ostatnich latach dokonano ogromnego postępu w badaniach jąder z neutronowym halo. Wykazano, że nie tylko ${}^{11}\text{Li}$ ma taką strukturę, ale również ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{14}\text{Be}$, ${}^{19}\text{C}$, czy ${}^{22}\text{C}$. Przypuszcza się także, że aureolę ma ${}^8\text{B}$, tyle że tworzoną nie przez neutrony, lecz pojedynczy proton.

Podobnie jak w przypadku cyny 100, badania nietrwałych jąder z halo ma istotne znaczenie dla rozumienia zjawisk astrofizycznych. Wspomniany ${}^8\text{B}$, produkowany we wnętrzach gwiazd, w tym na Słońcu, podlega przemianom beta i jest ważnym źródłem neutrin rejestrowanych na Ziemi. Ich liczba jest mniejsza niż wynika to z przewidywań teoretycznych, co jest przyczyną trwającej już cztery dziesięciolecia kontrowersji. Być może lepsze poznanie struktury jąder takich jak ${}^8\text{B}$ pozwoli rozwikłać zagadkę neutrin słonecznych.

*

Przedstawiłem kilka kierunków poszukiwań współczesnej fizyki jądrowej. Na nich, oczywiście, lista się nie zamyka. W szczególności pominąłem ogromny dział badań zderzeń jąder atomowych przy tzw. pośrednich i wysokich energiach. W tym wypadku jednak struktura jąder odgrywa raczej marginalną rolę, a w centrum zainteresowania są własności materii w warunkach wysokich gęstości i temperatur. Badania te, spokrewnione z fizyką cząstek elementarnych, wychodzą tedy poza ramy tradycyjnie rozumianej fizyki jądra atomowego. Ta jednak okazała się bogatsza niż można było przypuszczać. Rozwój nowych technik eksperymentalnych, które pozwalają badać zjawiska nawet niezwykle rzadkie, otworzył nowe perspektywy. Trudno więc dzisiaj przewidzieć, czego się jeszcze o jądram atomowych dowiemy.

STANISŁAW MRÓWCZYŃSKI

Dr hab. STANISŁAW MRÓWCZYŃSKI pracuje w Instytucie Problemów Jądrowych w Warszawie i Wyższej Szkole Pedagogicznej w Kielcach.