

Stanisław Mrówczyński

# Zdumiewający rozpad beta

**Trudno wskazać zjawisko fizyczne, którego badanie bardziej wpłynęło na naszą wiedzę o materialnym świecie niż niemal już stuletnie dociekania nad naturą rozpadu beta jądra atomowego.**

Odkrycie promieniotwórczości można uznać za narodziny współczesnej fizyki. Wtedy właśnie wkroczyły do niej tajemnicze promienie oznaczone grecką literą  $\beta$ . Był rok 1896 – niewiele wiadano wówczas o atomach. Elektrony i jądra atomowe czekały na swych odkrywców, a myśl o kwantach nie zaświtała jeszcze w żadnej głowie. Potem nastąpiły lata najburzliwszego bodaj rozwoju fizyki, czas zakwestionowania utrwalonych przez wieki praw, czas nieoczekiwanych odkryć. Wydarzeniom tym towarzyszyły, czy też je współtworzyły, próby zrozumienia zagadkowego zjawiska. Rozpad  $\beta$  do dziś jest obiektem wnikliwych badań, których rezultaty wciąż bywają zdumiewające.

Opiszę zatem pewne odkrycie ostatnich lat. Nie burzy ono naszych wyobrażeń o świecie, nie początkuje żadnej rewolucji. Jest natomiast potwierdzeniem potęgi współczesnej fizyki teoretycznej i ogromnych umiejętności

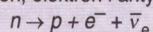
eksperymentatorów, kawałkiem pięknej fizyki. Nie sposób pisać jednak o rozpadzie  $\beta$ , nie wspomniawszy o jego fascynującej historii.

## Z PIERWSZYCH ODKRYĆ

Héni Becquerel dowiedział się z gazet o odkryciu przez Wilhelma Konrada Roentgena w Würzburgu dziwnych promieni X. Zachodziło podejrzenie, że materia samoistnie takie promienie wysyła. Becquerel rozpoczął więc eksperymenty z różnymi substancjami. Zawijał je w światłoczułe folie i sprawdzał, czy nie ulegają zaczernieniu bez dostępu światła z zewnątrz. Wynik był zawsze negatywny, aż do chwili, gdy obiektem jego zainteresowania stały się związki zawierające uran. Wtedy folie zaczerniły się. Dalsze doświadczenia pokazały jednak, że promienie Becquerela mają inne własności niż te, które odkrył Roentgen. Obecnie dobrze wiemy, że promienie X to fotony, czyli kwanty pola elektromagnetyczne-

## Kinematyka rozpadu beta

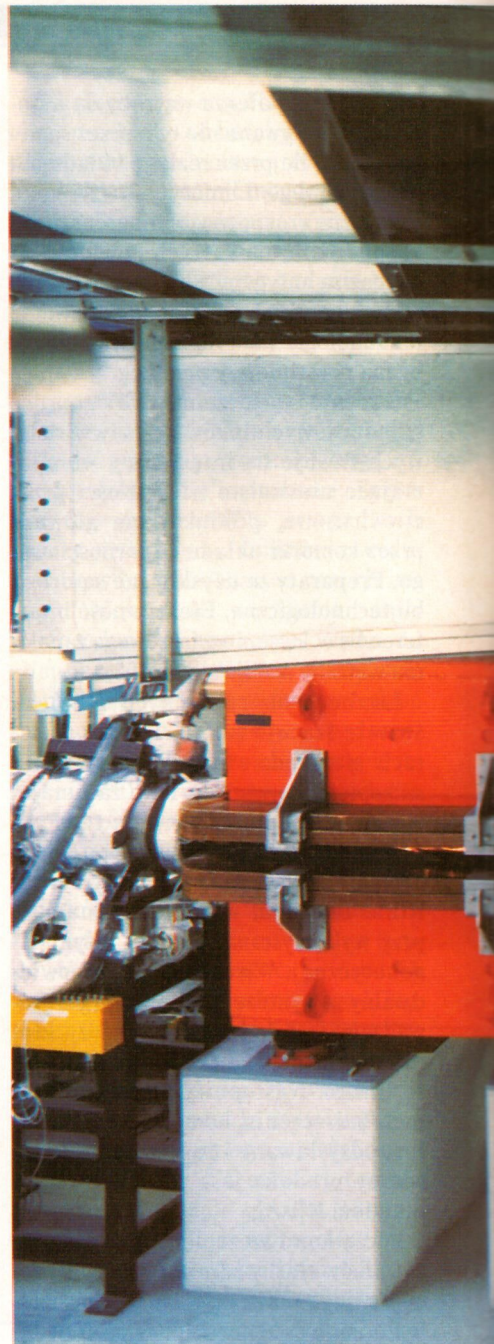
Rozpad  $\beta$  to reakcja, w której neutron zamienia się w proton, elektron i antyneutrino:



Masy cząstek uczestniczących w rozpadzie wyrażone w jednostkach energii są następujące:  $m_n = 939.6$  MeV,  $m_p = 938.3$  MeV,  $m_e = 0.5$  MeV,  $m_{\nu} = 0$ .

Łączna masa produktów jest o 0.8 MeV mniejsza od masy neutronu. Ta niewielka nadwyżka unoszona jest w postaci energii kinetycznej produktów rozpadu. Może być ona dowolnie rozdzielona pomiędzy proton, elektron i antyneutrino, pod warunkiem, że spełniona jest zasada zachowania pędu.

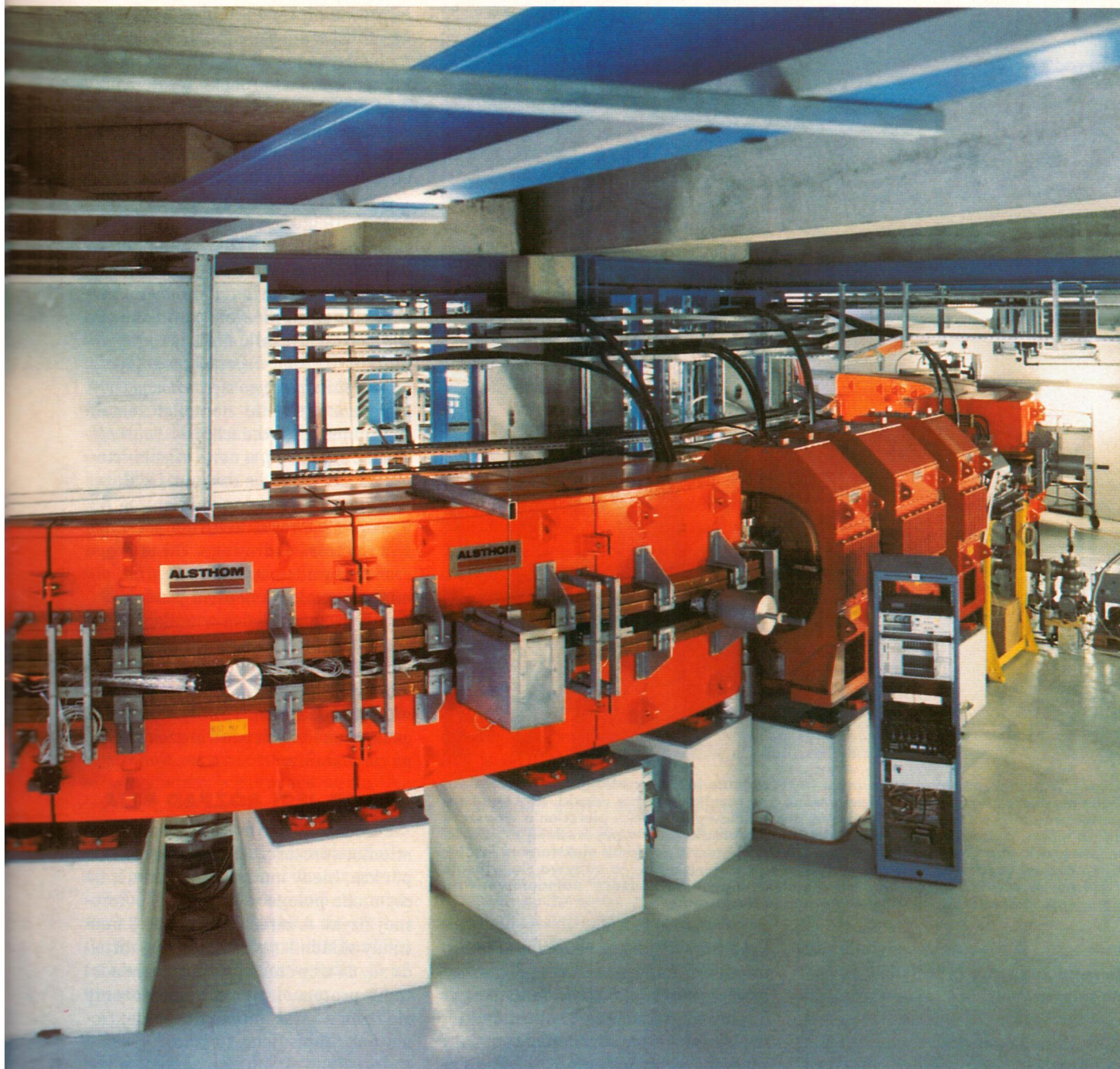
W układzie odniesienia, w którym neutron spoczywa, czyli ma zerowy pęd, całkowity pęd produktów jest również zerowy. Elektron ma minimalną, zerową energię kinetyczną, gdy spoczywa w tym układzie, natomiast proton i antyneutrino lecą w przeciwnych kierunkach, zapewniając zachowanie pędu. Energia elektronu jest największa, gdy proton z antyneutrinem poruszają się w jedną stronę, elektron zaś w przeciwną. Pomiędzy zerową a ową maksymalną energią rozciąga się obszar możliwych energii elektronu. A zatem, elektrony pochodzące z rozpadu  $\beta$  mają ciągłe widmo energetyczne.



go, coś jakby niewidzialne światło. Promieniotwórczość natomiast to zjawisko znacznie bardziej złożone.

Późniejszy odkrywca jądra atomowego, wielki Nowozelandczyk Ernest Rutherford stwierdził, że promienie Becquerela można rozdzielić na mniej i bardziej przenikliwe. Pierwsze oznaczył literą  $\alpha$ , drugie zaś  $\beta$ . To te ostatnie zaczerniły światłoczułe folie. Po kilkunastu latach wprowadzono jeszcze trzeci typ promieni –  $\gamma$ , które mają tę samą naturę co promienie Roentgena. Wyjaśniło się również, głównie dzięki badaniom Becquerela i małżonków Marii i Piotra Curie, że promieniotwór-





Fot. GSI

**Pierścień akumulacyjny w laboratorium w Darmstademie, gdzie odkryto rozpad beta do stanu związanego. Jądra dysprozu krążyły w pierścieniu rozpadając się na neutrino oraz jądra holmu z uwięzionym jednym elektronem**

czegoś jest cechą nie tylko uranu, lecz także wielu innych pierwiastków – polonu, radu, toru.

W ostatnich latach XIX wieku odkryto elektron, a zaraz potem okazało się, że tajemnicze promienie  $\beta$  to strumienie elektronów. I znów państwo Curie wykonali pionierskie doświadczenie w tej dziedzinie. Trzeba jednak podkreślić, że eksperyment jednoznacznie identyfikujący promienie  $\beta$  jako elektrony wykonano dopiero po blisko pięćdziesięciu latach. Powoli kształtował się obraz atomu, w którym elektrony

krążą wokół jądra atomowego jak planety naokoło Słońca.

Zupełną zagadką pozostawało pochodzenie energii koniecznej do podtrzymywania procesów promieniotwórczych. Wieloletnią dyskusję nad tym problemem nazywa się nieraz pierwszym kryzysem energetycznym. Zasada zachowania energii stwierdza, że energia może zmieniać swoją formę, na przykład przekształcać się, jak pamiętamy ze szkoły, z kinetycznej w potencjalną. Nie może jednak ani zniknąć, ani rodzić się z niczego. Już w ro-

ku 1775 paryska Akademia Nauk, wówczas jeszcze Akademia Królewska, przyjęła postanowienie, że nie będzie rozważać nadsyłanych rozwiązań problemów: podwojenia sześciangu, trysekcji kąta, kwadratury koła i, co dla nas ciekawe, *perpetuum mobile*, którego istnienie wyklucza właśnie zasada zachowania energii.

Rozwiązanie zagadki energii promieniotwórczej wyjaśniła rodząca się fizyka jądrowa. Emitując w rozpadzie  $\beta$  elektron, a w rozpadzie  $\alpha$ , jądro atomu helu, zwane również cząstką  $\alpha$ , promie-





Fot. GSI

Krążąc w pierścieniu akumulacyjnym poszczególne jądra uzyskują stopniowo nieco różne prędkości. Powoduje to rozmywanie, a w rezultacie utratę wiązki. Aby temu zapobiec prowadzi się tzw. chłodzenie: na prostoliniowym odcinku pierścienia wpuszcza się do niego, a dalej wyprowadza elektrony o prędkości równej średniej prędkości wiązki jąder. Charakter oddziaływania (ciężkich) jąder z (lekkimi) elektronami jest taki, że rozrzut prędkości tych pierwszych ulega zmniejszeniu, co nazywa się właśnie chłodzeniem wiązki. Zdjęcie przedstawia elektronowy „ochładzacz” zamontowany na pierścieniu akumulacyjnym w laboratorium w Darmstadzie

niotwórcze jądro uranu, polonu czy radu zamienia się w inne jądro. Łączna masa produktów rozpadu jest przy tym nieco mniejsza niż rozpadającego się jądra. Najsłynniejsza zaś bodaj fizyczna formuła  $E = mc^2$ , zapisana już w roku 1905, orzeka równoważność masy i energii. Tak więc procesy promieniotwórcze odbywają się kosztem masy, której bardzo powoli ubywa.

Po pierwszym nastąpił drugi kryzys energetyczny. Pomiary prowadzone od roku 1914 pokazały, że, w odróżnieniu od cząstek  $\alpha$ , elektrony emitowane w rozpadzie  $\beta$  nie niosą zawsze tej samej energii, lecz mają ciągłe widmo energetyczne. Masa jąder przed rozpadem i po nim była dobrze znana, co pozwoliło stwierdzić, że elektron unosił tylko część, raz większą, raz mniejszą, brakującej energii. A co z resztą?

W roku 1929 Duńczyk Niels Bohr sformułował hipotezę, że mechanika

kwantowa rządząca światem atomów, której był jednym z twórców, dopuszcza łamanie zasady zachowania energii. Czyżby więc francuscy akademicy, którzy kiedyś wykluczali istnienie kamieni spadających z nieba, czyli dobrze nam znanych meteorytów, i w tym przypadku nie mieli racji? Choć Bohr obstawał przy swym zdaniu przez kilka lat, w końcu się zeń całkowicie wycofał.

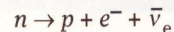
Wielki sceptyk Wolfgang Pauli, o którym mówiono, że krytycyzm wobec wszelkich, również własnych pomysłów uniemożliwił mu zajęcie wśród uczonych miejsca porównywalnego z tym, które przypadło Einsteinowi, zaproponował inne rozwiązanie energetyczne problemu. Nie chcąc publikować podejrzanego pomysłu, sformułował go jedynie w liście do fizyków zebranych w Tybindze. List ów z 4 grudnia 1930 roku zaczyna słowami: „Drozdzy radioaktywni panie i panowie”. Da-

lej stawia hipotezę, że brakującą energię unosi w rozpadzie  $\beta$  niewidzialna, bo bardzo słabo oddziałująca, cząstka, którą nazywa neutronem. A zatem przy rozpadzie następuje emisja nie tylko rejestrowanego elektronu, lecz jeszcze jednej cząstki o bardzo małej, jak się po latach okazało, zerowej masie.

Nazwę „neutron” nadano odkrytemu w roku 1932 drugiemu obok protonu składnikowi jądra atomowego. Cząstka, o której myślał Pauli, nazwana została ostatecznie neutrinem, co jest włoskim zdrobnieniem neutronu. Po wielu latach pisał o niej, jako o „głupiotkim dziecku kryzysu swego życia, które i później głupio się zachowywało”. Hipoteza istnienia neutrino została sformułowana w dniach, gdy Pauli rozchodził się z żoną, a nowe cząstki istotnie zachowywały się dziwnie. Udało się je po raz pierwszy zarejestrować dopiero w 1956 roku. Neutrino pochodziły z reaktora jądrowego. Od tamtego czasu prowadzi się systematyczne pomiary strumienia neutrino produkowanych wewnątrz Słońca w reakcjach jądrowych, które dostarczają mu energii, a nam życiodajnego ciepła. Liczba rejestrowanych cząstek jest wciąż znacznie mniejsza od przewidywanej. Zagadka słonecznych neutrino czeka od lat na rozwiązanie.

## CO TO JEST ROZPAD BETA

Przedstawiając historię badań promieniotwórczości  $\beta$  dotarliśmy do punktu, kiedy można już wyjaśnić, na czym ona polega w pojęciu współczesnej fizyki. A zatem, w procesie  $\beta$  neutralny składnik jądra neutron  $n$  rozpada się na trzy cząstki: dodatnio naładowany proton  $p$ , ujemnie naładowany elektron  $e^-$  oraz antyneutrino elektronowe  $\bar{\nu}_e$ . Zapisujemy to jako



Choć słowo „rozpad” może to sugerować, produkty powyższej reakcji nie są składnikami neutronu. Proton i neutron znajdują się na tym samym poziomie w hierarchii obiektów tworzących materię. Co więcej, z punktu widzenia sił jądrowych, o których wspominam dalej, są cząstkami identycznymi.

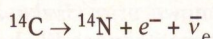
Mechanika kwantowa dopuszcza wszelkie przemiany – w szczególności rozpad  $\beta$  – które nie są zabronione przez prawa zachowania energii, pędu, ładunku itd. Mówiąc najprościej, zachodzi wszystko, co nie jest zabronione. Prawdopodobieństwo reakcji może



natomiast być tak małe, że proces praktycznie nie występuje. Rozpad  $\beta$  zachodzi dzięki temu, że neutron jest nieco cięższy od protonu. Masa neutrina jest zerowa, a elektronu znikomo mała. Ładunek elektryczny oraz pewne inne ładunki neutronu są zaś równe sumie odpowiednich ładunków produktów rozpadu.

W odróżnieniu od protonu będącego jądrem najbliższego atomu, tzn. atomu wodoru, neutron nie może istnieć w przyrodzie w stanie wolnym właśnie z powodu rozpadu  $\beta$ . Podczas gdy średni czas życia swobodnego neutronu wynosi około 15 min, w jądrach atomowych neutrony mogą być całkowicie trwałe. Dzieje się tak dlatego, że siły odpowiedzialne za wiązanie neutronów i protonów w jądro atomowe zmniejszają jakby ich masy, co może uniemożliwić rozpad neutronu. Z tego powodu jądra atomowe dzielimy na stabilne ze względu na rozpad  $\beta$  i niestabilne, czyli takie, które rozpadowi podlegają.

Własności chemiczne atomu określa liczba protonów w jądrze, bo jest ona równa liczbie elektronów krążących wokół jądra. (Jak pamiętamy, atom jako całość jest elektrycznie obojętny.) Tak na przykład jądro atomu węgla oznaczane symbolem C ma 6 protonów, neutronów zaś może mieć 5, 6, 7 czy 8. Mówimy wtedy o izotopach węgla  $^{11}\text{C}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  i  $^{14}\text{C}$ , gdzie liczba określa łączną liczbę protonów i neutronów. Podczas, gdy najbardziej rozpowszechniony w przyrodzie izotop  $^{12}\text{C}$  jest trwały, izotop  $^{14}\text{C}$  ulega rozpadowi  $\beta$ . W rezultacie tego rozpadu zwiększa się o jeden liczba protonów w jądrze lub bardziej fachowo: liczba ładunkowa jądra. Dzięki temu następuje przemiana



gdzie  $^{14}\text{N}$  oznacza odpowiedni izotop azotu.

### JESZCZE TROCHĘ HISTORII

Światem, jaki widzimy gołym okiem, lub makroświatem rządzą znane od wieków siły grawitacyjne oraz elektromagnetyczne. Na początku lat trzydziestych stało się jasne, że zachowanie jąder atomowych określają jakieś inne oddziaływania. Werner Heisenberg wprowadził w roku 1932 pojęcie sił jądrowych, lub oddziaływanie silne, odpowiedzialnych za wiązanie neutronów i protonów w jądra atomowe. Wkrótce potem Emerico Fermi, który wymyślił nazwę „neutrino”, postuluje istnienie jeszcze innego rodzaju sił – tzw. słabych, powodujących rozpad  $\beta$ . Zgodnie ze swymi nazwami oddziaływania silne i słabe charakteryzują się dużą lub, odpowiednio, małą intensywnością. Natomiast zasięg jednych i drugich ograniczony jest do wielkości jąder atomowych, więc nie ujawniają się w makroświecie. Pomimo ponad 60 lat bardzo intensywnych badań, nagromadzenia ogromnej ilości danych doświadczalnych, struktura oddziaływań silnych nie została do dziś dobrze zrozumiana. Natomiast poznawanie natury oddziaływań słabych zaowocowało wspaniałymi sukcesami.

Analizując produkty zderzeń rozpadzionych jąder atomowych odkryto wiele nowych cząstek elementarnych innych niż elektron czy składniki jądra atomowego. Okazało się, że wiele z nich, podobnie jak neutron, podlega rozpadowi  $\beta$ , dokładniej: rozpadowi słabym. Badanie tych rozpadów doprowadziło do zakwestionowania zasady, wydawało się niemal tak fundamentalnej, jak wspomniana już zasada zachowania energii.

Chodzi o zasadę zachowania parzystości, którą można sformułować następująco: Jeśli istnieją dwa układy fizyczne, z których jeden jest lustrzaną kopią drugiego, to przebieg wszelkich procesów w tych układach jest identyczny z dokładnością do lustrzanego odbicia. Na przykład wyobraźmy sobie dwa lustrzanie symetryczne zegary. Jeden chodzi w lewo, drugi w prawo<sup>1</sup>. Jeśli ich mechanizmy są identyczne, to zgodnie z zasadą zachowania parzystości, zawsze będą wskazywać ten sam czas.

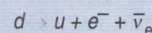
W roku 1956 dwaj Chińczycy pracujący w USA, T. D. Lee i C. N. Yang, zasugerowali, że siły słabe łamią zasadę zachowania parzystości. Wkrótce wykonany eksperyment – również przez Chinę, panią Wu – potwierdził tę hipotezę. A zatem, jeśli mechanizm zegarowy naszych lustrzanie symetrycznych zegarów wykorzystuje oddziaływania słabe, to jeden z zegarów będzie się późnić w stosunku do drugiego. Fizycy cząstek elementarnych obserwują niemal bezpośrednio takie zjawiska. Dwie cząstki rozpadające się słabo, z których jedna jest lustrzaną kopią drugiej, miewają różne czasy życia. (Problem łamania parzystości omawia szerzej J. P. Nassalski w artykule „Czy może istnieć świat widziany w lustrze”, „WiZ” nr 5/1994.)

Przez wiele lat teoria oddziaływań słabych, w szczególności rozpadu  $\beta$ , była z matematycznego punktu widzenia

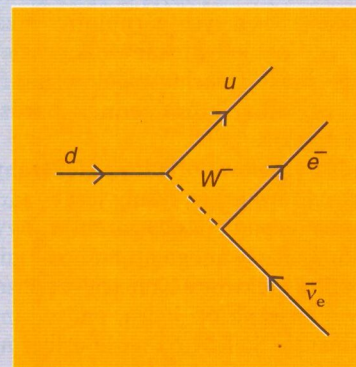
### Kwarkowy rozpad beta

Jak obecnie wiemy, cząstki oddziałujące silnie, w szczególności składniki jądra atomowego, zbudowane są z kwarków. Neutron to dwa kwarki  $d$  i jeden  $u$ , proton zaś – dwa kwarki  $u$  i jeden  $d$ . Ładunki elektryczne kwarków  $u$  i  $d$ , których nazwy pochodzą od angielskich słów *up* (górnny) i *down* (dolny), wynoszą, odpowiednio,  $2/3$  i  $-1/3$  ładunku elektronu. Proste sumowanie tych ładunków pokazuje, że ładunek neutronu jest istotnie zerowy, protonu zaś  $+1$ .

Na poziomie kwarkowym rozpad  $\beta$  to przemiana



Zgodnie ze zunifikowaną teorią sił elektroslabych, oddziaływania elektromagnetyczne zachodzą dzięki wymianie fotonów, inaczej kwantów  $\gamma$ , słabe zaś dzięki tzw. bozonom pośredniczącym oznaczonym literami  $W$  i  $Z$ . Bozon  $W$  może mieć jednostkowy ładunek ujemny bądź dodatni, natomiast bozon  $Z$ , podobnie jak foton, jest elektrycznie neutralny. Kwarkowy rozpad  $\beta$  można zilustrować jako



Proces ten i podobne przemiany kwarkowe prowadzą do słabego rozpadu neutronu i wielu innych cząstek elementarnych zbudowanych z kwarków. (Obszerniej o kwarkach pisałem w artykule „Szósty kwark”, „WiZ” nr 7/1994.)

Zwróćmy uwagę na ewolucję naszej wiedzy o rozpadowie  $\beta$ . Początkowo stwierdzono jedynie, że to przemiana jądra atomowego w jądro o tej samej liczbie masowej, lecz większej liczbie ładunkowej. Po odkryciu neutronu wyjaśniło się, że to właśnie ten składnik jądra atomowego jest odpowiedzialny za rozpad. Teraz, gdy znana nam jest kwarkowa struktura materii, wiemy, że proces  $\beta$  to przemiana kwarka  $d$  w  $u$  z emisją elektronu i antyneutrino. Zauważmy charakterystyczną cechę rozwoju fizyki – poglądy poprzedników są nie tyle negowane, co ograniczany jest obszar słuszności tych poglądów.



niemal nonsensowna. W latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych udało się jej nadać wspaniałą formę, a co ważniejsze, przebogata fizyczną treść. Wyjaśniono mianowicie, że oddziaływania słabe i dobrze znane elektromagnetyczne są jedynie różnymi przejawami jednej bardziej podstawowej siły elektroslabej. Teoria przewidywała istnienie specyficznych cząstek będących nośnikami tej siły, które w roku 1983 istotnie zaobserwowano doświadczalnie. Sukces teorii oddziaływań elektroslabych wyznaczył jeden z najważniejszych kierunków fizycznych poszukiwań – znalezienie teorii, która wskaże jedno źródło wszystkich oddziaływań, również silnych i grawitacyjnych, a nie tylko elektroslabych. Sformułowanie takiej ogólnej teorii wszystkiego wydaje się całkiem prawdopodobne. Byłby to w jakimś sensie koniec fizyki, na pewno tej poszukującej fundamentalnych praw.

### NIEWIDZIALNY ROZPAD BETA

Odkrycie, które zamierzam opisać, dalekie jest od tych górnołotnych zamierzeń. Jest jedynie niewielką cegiełką potężnego gmachu współczesnej fizyki, cegiełką, która jednak bardzo mnie urzekła.

Jądro atomowe otaczają elektrony. Elektron również wysyłany jest z jądra podczas rozpadu  $\beta$ . Czy zatem w przypadku zjonizowanego atomu, tzn. gdy wszystkie elektrony bądź ich część zostały oderwane od jądra, emitowany w rozpadzie  $\beta$  elektron może usiąść na wolnej orbicie i zająć miejsce oderwanych elektronów? Może! Na taką ewentualność wskazano już w 1947 roku. Natomiast dopiero w roku 1992 udało się ją potwierdzić doświadczalnie. Jeśli wysyłany w rozpadzie  $\beta$  elektron obsadza atomową powłokę, nasz układ

VOLUME 69, NUMBER 15      PHYSICAL REVIEW LETTERS      12 OCTOBER 1992

**First Observation of Bound-State  $\beta^-$  Decay**

M. Jung, F. Bosch, K. Beckert, H. Eickhoff, H. Folger, B. Franke, A. Gruber, P. Kienle, O. Klepper, W. Koenig, C. Kozhuharov, R. Mann, R. Moshhammer, F. Nolden, U. Schaaf, G. Soff, P. Spätke, M. Steck, Th. Stöhlker, and K. Sümmerner  
*Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), D-6100 Darmstadt, Germany*  
 (Received 20 July 1992)

Bound-state  $\beta^-$  decay was observed for the first time by storing bare  $^{163}\text{Dy}^{66+}$  ions in a heavy-ion storage ring. From the number of  $^{163}\text{Ho}^{66+}$  daughter ions, measured as a function of the storage time, a half-life of  $47 \pm 4$  d was derived. By comparing this result with reported half-lives for electron capture (EC) from the  $M_1$  and  $M_2$  shells of neutral  $^{163}\text{Ho}$ , bounds for both the  $Q_{EC}$  value of neutral  $^{163}\text{Ho}$  and for the electron-neutrino mass were set.

PACS numbers: 23.40.-s, 14.60.Gh, 27.70.+q

Beta decay into bound electron states of the daughter atom ( $\beta_b$ ), accompanied by the emission of a monochromatic antineutrino, was first predicted by Daudel, Jean, and Lecoq [1] in 1947 and, 14 years later, discussed in detail by Bahcall [2]. Up to now  $\beta_b$  decay has not been observed, although some hint of its existence was derived from the difference of the tritium lifetime in the ionic ( $^3\text{H}^-$ ) and molecular ( $^3\text{H}_2$ ) states [3]. For neutral atoms  $\beta_b$  decay is only of minor importance. It might become a strong, if not the only, decay channel for highly ionized atoms which exist, e.g., in the interior of stars. Here we report the first observation of  $\beta_b$  decay of  $^{163}\text{Ho}^{66+}$  ions, were continuously created. Having almost the same mass-over-charge ratio ( $A/q$ ) as the primary ions they were stored and cooled on the same orbit. The experimental procedure adapted by us to measure the number of  $\beta_b$ -decay daughters,  $^{163}\text{Ho}^{66+}$ , was as follows (see Fig. 1): First,  $^{163}\text{Dy}^{66+}$  ions were accumulated in the ring for a typical time of 30 min. [Fig. 1(a), "accumulation"]. Then an internal argon gas jet [thickness  $\approx 10^{-12}$  atoms/cm, diameter = 3 mm (FWHM)], was turned on for highly ionized atoms which exist, e.g., in the interior of stars.

### Fragment strony tytułowej doniesienia o zaobserwowaniu niewidzialnego rozpadu beta. Pierwsze dwa zdania streszczenia przystępnie wyrażają istotę odkrycia

opuszcza tylko praktycznie nie oddziałujące neutrino. A zatem, taki rozpad jest właściwie niewidzialny. Ponieważ emitowany elektron zostaje związany z jądrem atomowym, opisany rozpad nazywany jest fachowo rozpadem do stanu związanego.

Brak elektronu to nie jedyna, niestety, trudność w rejestracji procesu. Mówiąc mało precyzyjnie, elektron mając wolnej orbity, niemal zawsze wybierze ucieczkę. Czyli niewidzialny rozpad jest zwykle bardzo mało prawdopodobny. Jak się okazuje, można temu zaradzić.

Elektron w atomie jest związany, tzn. trzeba mu dostarczyć energii, aby go oderwać od jądra. Inaczej, energia elektronu w atomie jest mniejsza niż elektronu swobodnego, nawet takiego, który spoczywa. Prawdopodobieństwo obsadzenia atomowej powłoki przez elektron powstały w rozpadzie  $\beta$  wzra-

sta, gdy maleje energia tego elektronu. Najlepiej więc byłoby znaleźć takie jądro, które rozpadając się produkuje elektrony o tak niewielkiej energii, że nie mogą uciec, lecz jedynie sadowią się na atomowych powłokach. Zauważmy, że byłaby to zaskakująca sytuacja. Jądro otoczone elektronami byłoby stabilne ze względu na rozpad  $\beta$ , gdyż emitowane w takim rozpadzie elektrony nie miałyby dość energii, aby uciec z układu. Po oderwaniu elektronów od jądra, a więc opróżnieniu powłok, stałyby się ono  $\beta$ -niestabilne, gdyż elektron wyleciałszy z jądra obsadziłby wolną powłokę.

Fizykę dzielimy na działy ze względu na obiekt zainteresowań. W szczególności mamy fizykę jądrową badającą jądra atomowe oraz fizykę atomową zajmującą się atomami. W obu dziedzinach możemy mówić o charakterystycznej wielkości energii. W fizyce atomowej jest to energia wiązania elektronu w atomie, czyli energia potrzebna do wyrwania go z atomu. Dla najcięższych atomów jest ona rzędu 1000 eV. (1 eV to energia, jaką uzyskuje elektron przyspieszany w polu o różnicy potencjałów 1 V. W jednostkach układu SI: 1 eV =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J.) Charakterystyczna energia w fizyce jądrowej to, analogicznie, energia wiązania neutronu czy protonu w jądrze, która jest rzędu 1 MeV. Dzięki temu, że charakterystyczna energia procesów atomowych jest tyśiąc razy mniejsza niż jądrowych, można, badając zjawiska zachodzące w jądrze atomowym, pomijać zwykle

### Dysproz i holm

Pierwiastki, które pojawiły się w opisie nowo odkrytego rozpadu  $\beta$  – dysproz i holm, należą do grupy ziem rzadkich, dokładniej lantanowców. Są metalami, występują w postaci tlenków, wodorotlenków w mineralach gadolinicie jako domieszki. Zostały odkryte dosyć późno – holm w 1879, dysproz zaś w 1886 roku. Nazwa pierwszego z nich, nadana przez odkrywcę, szwedzkiego chemika Per Teodora Cleve'a, pochodzi od łacińskiej, dawnej nazwy Sztokholmu – Holmia. Natomiast nazwa dysproz, od greckiego słowa znaczącego trudno dostępny, wyraża trudności w uży-

skaniu tego pierwiastka. Rzeczywiście, upłynęło 20 lat od odkrycia, zanim udało się go otrzymać w metalicznej czystej postaci. Zarówno dysproz, jak i holm, a także ich związki nie znalazły praktycznych zastosowań. W odróżnieniu od holmu, którego tylko izotop o liczbie masowej 165 jest stabilny i występuje w przyrodzie, aż siedem izotopów dysproz:  $^{156}\text{Dy}$ ,  $^{158}\text{Dy}$ ,  $^{160}\text{Dy}$ ,  $^{161}\text{Dy}$ ,  $^{162}\text{Dy}$ ,  $^{163}\text{Dy}$  oraz  $^{164}\text{Dy}$  ma tę własność. Odkrycie rozpadu  $\beta$  do stanu związanego jądra  $^{163}\text{Dy}$  pokazuje, że jest ono stabilne tylko w atomie, gdy jądro otoczone jest elektronami.



wpływ elektronów atomowych na jądro. Podobnie postępują fizycy atomowi, którzy najczęściej nie przejmują się, co dzieje się z jądrem. Często nie interesują się nawet, z jakim izotopem pierwiastka mają do czynienia. Opisany rozpad  $\beta$  do stanu związanego to zjawisko z pogranicza fizyki jądrowej i atomowej. Aby znaleźć jądro nadające się do wykrycia tego rozpadu, należało wykonać jądrowe obliczenia z dokładnością typową dla fizyki atomowej, czyli tysiąc razy większą niż wymaga tego (typowy) problem jądrowy.

W wyniku usilnych prac wybrano do doświadczalnej obserwacji jądro dysprozu  $^{163}\text{Dy}$ . Obliczenia pokazały, że w przypadku wypełnionych powłok elektronowych jądro jest stabilne, natomiast przy pełnej jonizacji następuje niewidzialny rozpad  $\beta$ .

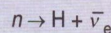
### DOŚWIADCZENIE

Eksperyment przeprowadzono w Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), czyli Towarzystwie Badań Ciężkich Jonów w Darmstadtzie w Niemczech. Jony, w tym przypadku dodatnie, to częściowo lub całkowicie zjonizowane atomy. Atomy dysprozu całkowicie zjonizowano odrywając 66 elektronów. Już to było poważnym problemem technicznym. Następnie około  $10^8$  jonów zebrano w pierścieniu akumulacyjnym – niemal doskonale opróżnionej rurze w kształcie samochodowej dętki, w której kierowane polem magnetycznym krążyły około godziny. Dłużej jonów utrzymać się nie udawało.

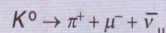
Następowały rozpady  $\beta$ , w wyniku których jądra dysprozu zamieniały się w jądra holmu  $^{163}\text{Ho}$  z jednym elektronem. Teraz należało wyłuskać te jądra, aby stwierdzić, jak często następuje niewidzialny rozpad. Należy podkreślić, że w wyniku rozpadu ładunek jonu nie ulegał zmianie – ładunek jądra co prawda wzrastał, lecz kompensował go ładunek elektronu. Masa jonu również nie zmieniała się (z dokładnością do maleńkiej porcji energii zabieranej przez neutrino). Tak więc całkowicie zjonizowane jądra dysprozu zachowywały się identycznie jak jądra holmu z jednym elektronem. Aby je odróżnić, przepuszczano co pewien czas przez pierścień akumulacyjny strumień gazu, dokładniej argonu. Jony holmu oddziałując z nim traciły ów jeden elektron i wtedy ich ładunek wzrastał o jeden. Teraz jądra holmu można było wydzielić z wiązki dysprozu, a następnie je policzyć. Średni czas życia jąder dys-

### Inne rozpady do stanu związanego

Zauważmy, że nawet rozpad  $\beta$  neutronu może nastąpić do stanu związanego. Proton i elektron pochodzące z rozpadu nie są wtedy swobodne, lecz tworzą atom wodoru zbudowany, jak pamiętamy, z protonu, będącego jądrem atomowym, i elektronu. Rozpad taki, którego niestety nie udało się dotychczas zarejestrować, zapisujemy następująco:

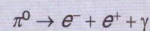


gdzie H oznacza atom wodoru. Zaobserwowany został natomiast fantastycznie rzadki rozpad elektrycznie neutralnej cząstki elementarnej oznaczanej jako  $K^0$ . Okazuje się, że średnio raz na 10 milionów rozpadów



następuje rozpad, w którym elektrycznie naładowane cząstki elementarne  $\pi^+$  i  $\mu^-$  tworzą wodoropodobny atom.

Udało się zarejestrować jeszcze inny rozpad do stanu związanego. Tym razem proces kontrolowany jest przez oddziaływanie elektromagnetyczne nie zaś słabe, jak w dotychczas opisanych przypadkach. Cząstka  $\pi^0$  często się rozpada na elektron, antycząstkę elektronu, czyli pozyton, oraz kwant  $\gamma$ :



Zdarza się, że elektron i pozyton występują jako wodoropodobny stan związany zwany pozytonium.

prozu oceniono na około 50 dni, co doskonale zgadza się z przewidywaniami teoretycznymi. Warto go porównać z czasem, w którym prowadzono pomiary, wynoszącym zaledwie 1 godz. Oznacza to, że tylko maleńki procent jąder dysprozu uległ rozpadowi, a zatem powstało bardzo niewiele jąder holmu możliwych do zarejestrowania.

Odkrycie niewidzialnego rozpadu  $\beta$  nie rozpoczyna rewolucji zmieniającej nasze wyobrażenia o świecie. Przeciwnie – pokazuje, jak dobrze pasują one do rzeczywistości. Demonstruje niezwykłą dokładność przewidywań teoretycznych i wspaniałą precyzję eksperymentu, potęgę współczesnej fizyki.

STANISŁAW MRÓWCZYŃSKI

<sup>1</sup> Widziałem niedawno taki chodzący w lewo zegarek. Dwunasta i szósta były na swoich miejscach, natomiast trzecią i dziewiątą zamieniono miejscami. Długo musiałem się wpatrywać, by odczytać godzinę.

Dr hab. STANISŁAW MRÓWCZYŃSKI pracuje w Instytucie Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana w Warszawie.