

Równanie Schrödingera niezależne od czasu

- Rozpatrzmy równanie Schrödingera:

$$i \frac{h}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \psi(x, y, z, t) = \left[U(x, y, z, t) - \frac{h^2}{8\pi^2 m} \nabla^2 \right] \psi(x, y, z, t)$$

Przypuśćmy, że funkcję ψ można zapisać jako:

$$\psi(x, y, z, t) = u(x, y, z) \eta(t)$$

Mamy wówczas

$$i \frac{h}{2\pi} u(x, y, z) \frac{\partial}{\partial t} \eta(t) = \eta(t) \left[U(x, y, z, t) - \frac{h^2}{8\pi^2 m} \nabla^2 \right] u(x, y, z)$$

Dzieląc obustronnie to równanie przez $u \psi$ otrzymujemy:

$$i \frac{h}{2\pi} \frac{1}{\eta(t)} \frac{\partial}{\partial t} \eta(t) = \frac{1}{u(x, y, z)} \left[U(x, y, z, t) - \frac{h^2}{8\pi^2 m} \nabla^2 \right] u(x, y, z)$$

Obie strony równania będą sobie równe dla każdego x, y, z, t tylko wtedy, gdy będą równe pewnej stałej E :

$$i \frac{h}{2\pi} \frac{1}{\eta(t)} \frac{\partial}{\partial t} \eta(t) = E$$

$$\frac{1}{u(x, y, z)} \left[U(x, y, z, t) - \frac{h^2}{8\pi^2 m} \nabla^2 \right] u(x, y, z) = E$$

Pierwsze z tych równań daje się łatwo rozwiązać:

$$\eta(t) = e^{-i2\pi \frac{E}{h}t}$$

zatem E jest energią (przypominam, że $E=h\nu$). Zakładając, że E jest stałą, zakładamy automatycznie, że zachowana jest energia.

Drugie z równań prowadzi do związku:

$$\left[U(x, y, z, t) - \frac{h^2}{8\pi^2 m} \nabla^2 \right] u(x, y, z) = Eu(x, y, z)$$

Jest to *równanie Schrödingera niezależne od czasu*. Dla takiego równania dopuszczalne są tylko rozwiązania o pewnych wartości energii E .

Budowa materii

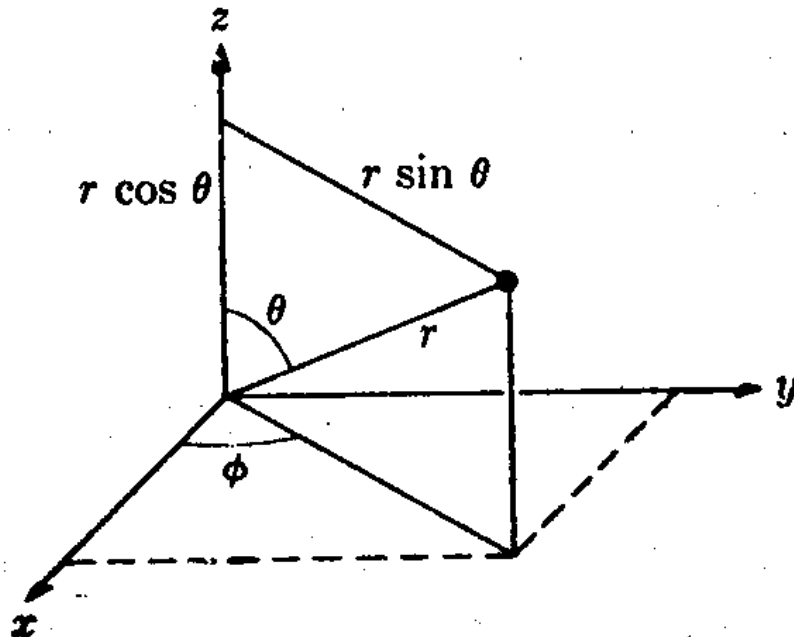
Budowa atomu

Atom wodoru w mechanice falowej

- Niezależne od czasu równanie Schrödingera dla elektronu w atomie wodoru, (zapisane dla wygody we współrzędnych sferycznych) ma postać:

$$\left[- \left(\frac{h}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{2m_e} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial}{\partial r} - \frac{Ze^2}{r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} - \frac{Ze^2}{4\pi \epsilon_0 r} \right] u = Eu$$

gdzie Ze jest ładunkiem jądra.



- Matematyczna analiza problemu jest trudna, jednakże równanie posiada rozwiązanie analityczne. W szczególności wynika z niego, że:

Energia elektronu może przyjmować wartości

$$E_n = - \frac{1}{2} \frac{Ze^2}{a_0} \frac{1}{n^2}$$

gdzie a_0 oznacza promień pierwszej orbity Bohra, zaś $n=1,2,3,\dots$

Kwadrat momentu pędu elektronu może przyjmować wartości

$$M^2 = \left(\frac{h}{2\pi} \right)^2 l(l+1), \quad l = 0,1,2,\dots,n-1$$

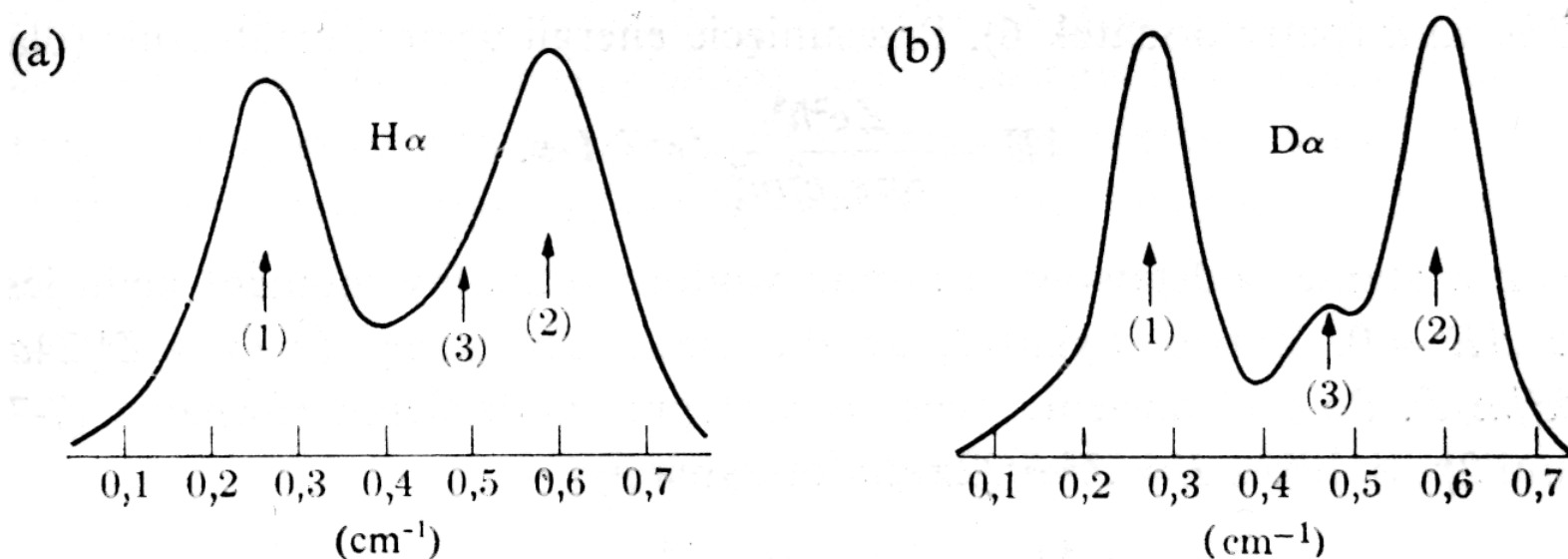
Rzut momentu pędu elektronu na dowolnie wybrany kierunek (umownie przyjmuje się, że na oś z) może przyjmować wartości

$$M_z = \frac{h}{2\pi} m, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$$

- Liczby n, l, m nazywa się odpowiednio **główną liczbą kwantową**, **orbitalną liczbą kwantową** i **magnetyczną liczbą kwantową**. Te trzy liczby wyznaczają jednoznacznie funkcję własną (stan elektronu) w atomie wodoru.

Wyniki doświadczeń

- Przewidywania teoretyczne nieźle zgadzały się z doświadczeniem, ale
- Używając spektroskopów o bardzo dużej rozdzielczości zaobserwowano, że linie emisyjne w rzeczywistości składają się z kilku bardzo blisko położonych linii (**struktura subtelna**)



Struktura subtelna linii H_α i D_α zarejestrowana przez R.C. Williamsa, *Phys. Rev.* **54**, 558 (1938)

- W silnym polu magnetycznym obserwuje się zjawisko polegające na rozszczepieniu linii widmowych promieniowania emitowanego przez atomy (**zjawisko Zeemana**). Analiza wyników doświadczalnych pokazała, że poziom podstawowy atomu wodoru ($n=1$, $l=0$, $m=0$) rozszczepia się na dwa poziomy (co nie powinno zachodzić).

Równanie Diraca

- W 1928 r. P.A.M. Dirac zaproponował modyfikację mechaniki falowej (nowe równanie), uwzględniające efekty relatywistyczne. W szczególności wynikało z niego, że
 - Elektron ma wewnętrzny moment pędu (spin)

$$s = \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$$

- Istnieje cząstka o ładunku dodatnim, będąca odpowiednikiem (antycząstką) elektronu

- Poziomy energetyczne w atomie wodoru mają wartości

$$E_{n,j} = E_n \left[1 + \frac{\alpha^2}{n} \left(\frac{1}{j + \frac{1}{2}} - \frac{3}{4n} \right) \right]$$

gdzie całkowity moment pędu może przyjmować wartości:

$$j + \frac{1}{2} = 0, 1, 2, \dots, n,$$

$$\alpha \equiv \frac{2\pi e^2}{ch} = \frac{1}{137}$$

zaś orbitalny moment pędu jest równy

$$l = j \pm \frac{1}{2}$$

Spin, statystyka, zakaz Pauliego i właściwości atomów

- Załóżmy, że obserwujemy dwie identyczne cząstki (np.. elektrony). Mechanika kwantowa pozwala określić prawdopodobieństwo znalezienia cząstki w danym punkcie, ale określenie, która to z tych dwóch cząstek jest nie możliwe. Musi mieć to odzwierciedlenie w funkcji falowej opisującej te cząstki.
- Niech x_1 i x_2 oznaczają liczby kwantowe (łącznie ze spinową liczbą kwantową) tych cząstek. Funkcja falowa musi spełniać warunek

$$|\psi(x_1, x_2)|^2 = |\psi(x_2, x_1)|^2$$

(bo cząstki są nierozróżnialne). Zachodzi zatem

$$\psi(x_1, x_2) = \pm \psi(x_2, x_1)$$

- Załóżmy, że funkcję stanu układu cząstek można zbudować z funkcji stanu pojedynczych cząstek należących do tego układu. Zbiór funkcji stanów dla poszczególnych cząstek

$$\psi_{\alpha}(x), \psi_{\beta}(x), \dots$$

jest identyczny dla wszystkich cząstek.

- Dla dwóch cząstek, takich, że

$$\psi(x_1, x_2) = -\psi(x_2, x_1)$$

funkcja stanu wyraża się wzorem

$$\psi(x_1, x_2) = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{2}} [\psi_{\alpha}(x_1)\psi_{\beta}(x_2) - \psi_{\beta}(x_1)\psi_{\alpha}(x_2)]$$

Dla układu n cząstek mielibyśmy

$$\psi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left(\frac{1}{n!} \right)^{\frac{1}{2}} \begin{vmatrix} \psi_{\alpha}(x_1) & \psi_{\beta}(x_1) & \dots & \psi_{\gamma}(x_1) \\ \psi_{\alpha}(x_2) & \psi_{\beta}(x_2) & \dots & \psi_{\gamma}(x_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \psi_{\alpha}(x_n) & \psi_{\beta}(x_n) & \dots & \psi_{\gamma}(x_n) \end{vmatrix}$$

Widać, że w takim przypadku w rozpatrywanym układzie nie mogą istnieć dwie identyczne cząstki (tzn. o takich samych stanach kwantowych). Z doświadczenia wynika, że taką właściwością charakteryzują się wszystkie cząstki o spinie połówkowym (np. elektrony). Takie cząstki nazywamy *fermionami*. Zasada głosząca, że dwa elektrony nie mogą przebywać w tym samym stanie znana jest jako *zasada wykluczania Pauliego*. Jej konsekwencją jest m.in., to, że na orbicie o głównej liczbie kwantowej n może znajdować się maksymalnie $2n^2$ elektronów.

- Dla dwóch cząstek, takich, że

$$\psi(x_1, x_2) = \psi(x_2, x_1)$$

funkcja stanu wyraża się wzorem

$$\psi(x_1, x_2) = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{2}} [\psi_{\alpha}(x_1)\psi_{\beta}(x_2) + \psi_{\beta}(x_1)\psi_{\alpha}(x_2)]$$

(w szczególności dla n cząstek mamy kombinację takich samych iloczynów jak dla fermionów, ale wszystkie one mają ten sam znak). Cząstki o takich właściwościach nazywamy *bozonami*. Charakteryzują się one spinem całkowitym. Do tej grupy należą np. fotony.

- Powyższe właściwości cząstek mają ogromne znaczenie w mechanice statystycznej. Rozpatrzmy to na przykładzie układu dwóch cząstek 1 i 2, które mogą znajdować się w dwóch stanach ψ_α i ψ_β .

Statystyka klasyczna przewiduje cztery możliwe stany:

$$\psi_\alpha(1)\psi_\alpha(2)$$

$$\psi_\alpha(1)\psi_\beta(2)$$

$$\psi_\beta(1)\psi_\alpha(2)$$

$$\psi_\beta(1)\psi_\beta(2)$$

Statystyka Fermiego-Diraca przewiduje tylko jeden stan:

$$\psi_\alpha(1)\psi_\beta(2) - \psi_\beta(1)\psi_\alpha(2)$$

Statystyka Bosego-Einsteina przewiduje trzy możliwe stany:

$$\psi_{\alpha}(1)\psi_{\alpha}(2)$$

$$\psi_{\alpha}(1)\psi_{\beta}(2) + \psi_{\beta}(1)\psi_{\alpha}(2)$$

$$\psi_{\beta}(1)\psi_{\beta}(2)$$

Dwa fermiony nie mogą znajdować się w tym samym stanie. Prawdopodobieństwo znalezienia dwóch bozonów w tym samym stanie wynosi $\frac{2}{3}$. Statystyka klasyczna przewiduje prawdopodobieństwo takiego zdarzenia równe $\frac{1}{2}$.

- Właściwości statystyczne elektronów wpływają m.in. na właściwości chemiczne atomów. Z kolei właściwości statystyczne fotonów umożliwiają m.in. budowę laserów.

Budowa jądra atomu

Promieniotwórczość naturalna

- W 1896 r. A. H. Becquerel odkrył przypadkowo promieniotwórczość naturalną (promieniowanie wysyłane przez niektóre pierwiastki chemiczne). Wykryto wówczas promieniowanie α , β i γ .
- Promieniowanie α to strumień jąder helu.
- Promieniowanie β , to strumień elektronów.
- Promieniowanie γ jest promieniowaniem elektromagnetycznym o bardzo wysokiej energii.
- Skoro atomy mogą być nietrwałe, nie są więc najmniejszą cegiełką budującą materię.

Odkrycie protonu

- Mechanika kwantowa dostarczyła dużo informacji na temat miejsca elektronu w atomie, ale na temat jądra było wiadomo niewiele ponad to, że jest ciężkie, małe, ma ładunek dodatni i potrafi się samoistnie rozpadać (promieniotwórczość naturalna).
- W celu dokładniejszego poznania budowy jądra atomowego, Rutherford i James Chadwick w latach 1919-1924 przeprowadzili szereg eksperymentów polegających na bombardowaniu jąder wielu różnych pierwiastków cząstkami α .
- W pierwszych eksperymentach tarczę stanowiły atomy azotu. Cząstki α były kierowane na jeden z końców rury wypełnionej czystym gazowym azotem, a z drugiej rejestrowano cząstki rozpraszane.
- Rutherford stwierdził, że wśród rozpraszanych cząstek znajdowały się m.in. Jądra wodoru.

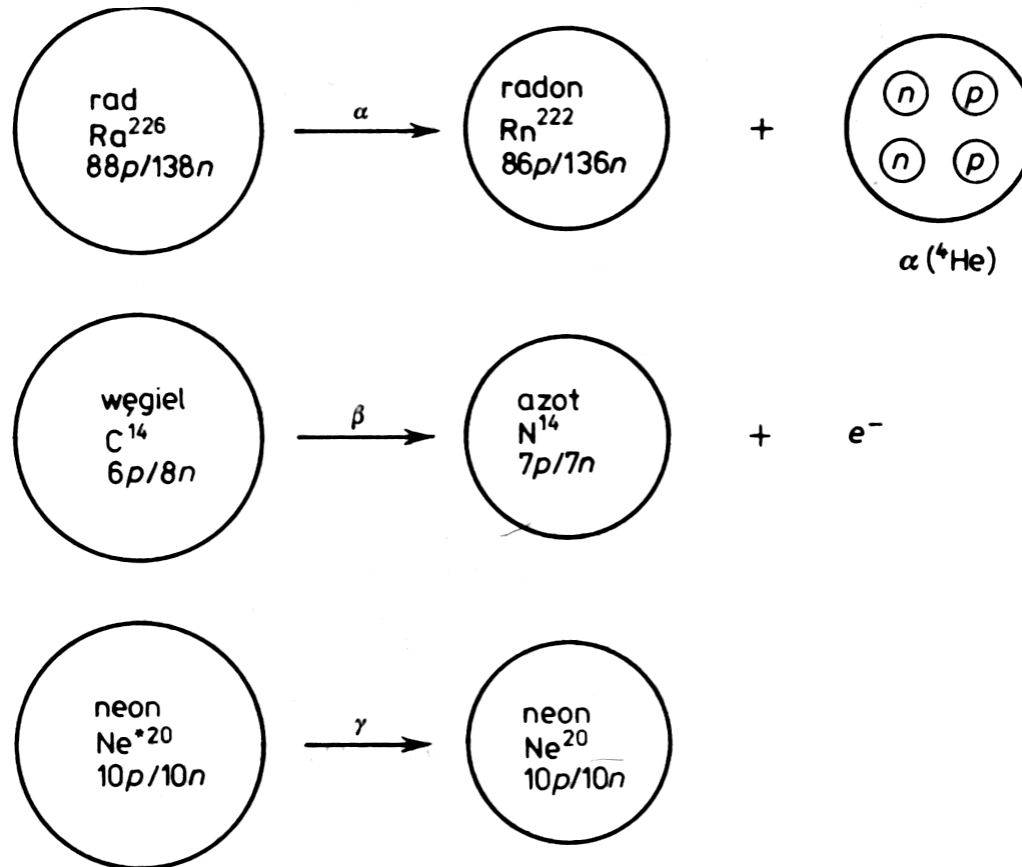
- W dalszych eksperymentach zastosowano także inne tarcze (pierwiastki) i za każdym razem wśród rozpraszanych cząstek znajdowano jądra wodoru.
- Dowodziło to, że jądro atomowe nie jest jednolitą, naładowaną dodatnio kulką, ale posiada jakąś nieznaną jeszcze strukturę wewnętrzną.
- Rutheford uznał, że jądro wodoru jest cząstką elementarną, budującą m.in. większe jądra atomowe i nazwał ją **protonem**. Uznał on, że protony niosą dodatni ładunek jądra atomowego.
- W jądrze wodoru powinien więc znajdować się 1 proton, w jądrze helu – 2 protony, w jądrze litu -3 itd. Pojawił się jednak problem: masa atomowa (skupiona w jądrze) jest zwykle dużo większa od masy protonów potrzebnych do jego budowy. Np. masa atomowa węgla wynosi 12, a masa 6-ciu protonów potrzebnych do budowy jądra atomu węgla to tylko 6.

- Rutherford zapostulował istnienie jeszcze jednej cząstki o masie podobnej do masy protonu, ale nie posiadającej ładunku elektrycznego – **neutronu**.
- Istniał jeszcze inny pomysł – w jądrze prócz protonów znajdują się elektrony. Np. w jądrze azotu powinno znajdować się 14 protonów i 7 elektronów. Wówczas ładunek jądra będzie równy 7 i masa atomowa będzie równa około 14 (elektron jest prawie 2000 razy lżejszy od protonu, więc masy elektronów będą niezauważalnie małe). Spin takiego jądra byłby nieparzystą wielokrotnością $\frac{1}{2}$, a doświadczalnie stwierdzono, że jądro azotu ma spin całkowity.

Odkrycie neutronu (1932 r.)

- Małżonkowie Irena Joliot-Curie i Fryderyk Joliot prowadzili eksperymenty polegające na bombardowaniu tarcz berylowych cząstkami α . Stwierdzili oni, że w eksperymencie tym powstaje obojętne elektrycznie promieniowanie, które błędnie zinterpretowali jako promieniowanie rentgenowskie.
- Podobne eksperymenty prowadził także Chadwick, ale w pewnej odległości od tarczy umieścił on także воск parafinowy. To obojętne elektrycznie promieniowanie, o którym wiedzieli małżonkowie Joliot-Curie wybijało z wosku protony, a więc nie mogło być promieniowaniem X (posiada ono za małą energię do wybicia protonu z jądra). Chadwick stwierdził, że tym promieniowaniem jest strumień neutronów.

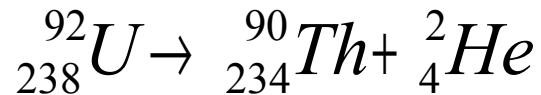
Jądrowy rozpad promieniotwórczy i reakcje jądrowe



Przykłady rozpadów promieniotwórczych

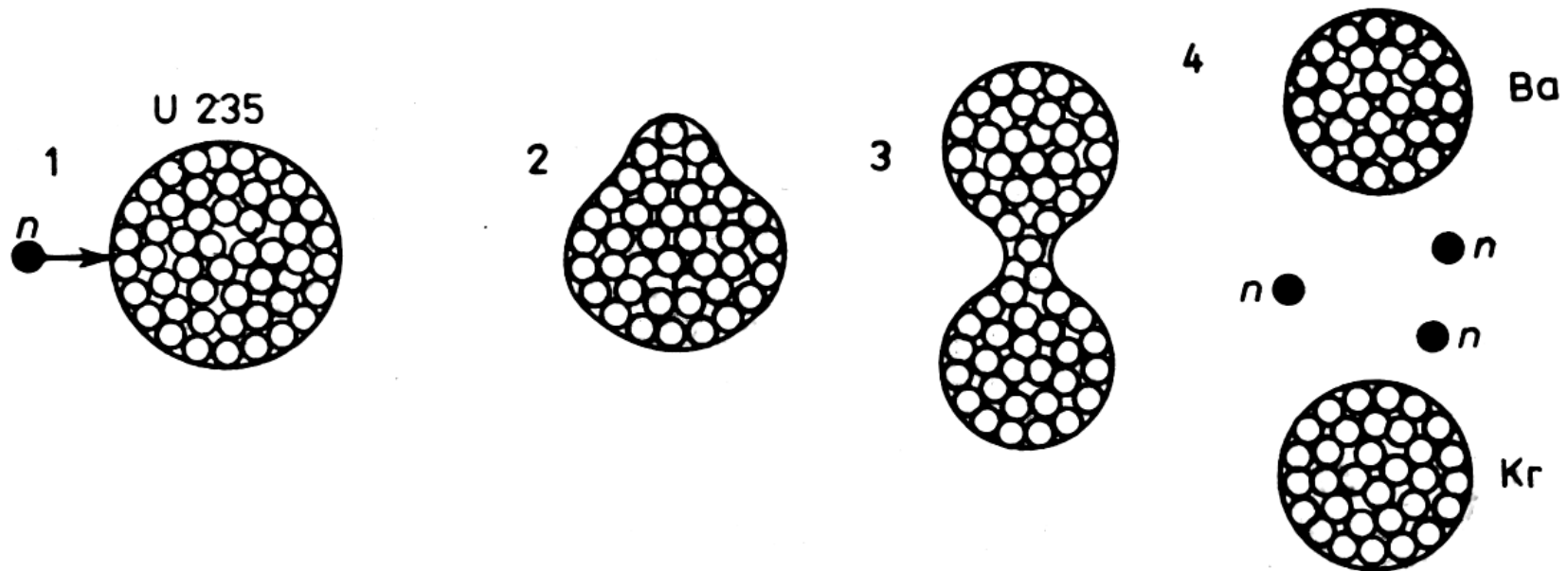
- W reakcjach jądrowych muszą być zachowane:
 - Liczba nukleonów
 - Ładunek elektryczny

Przykład:

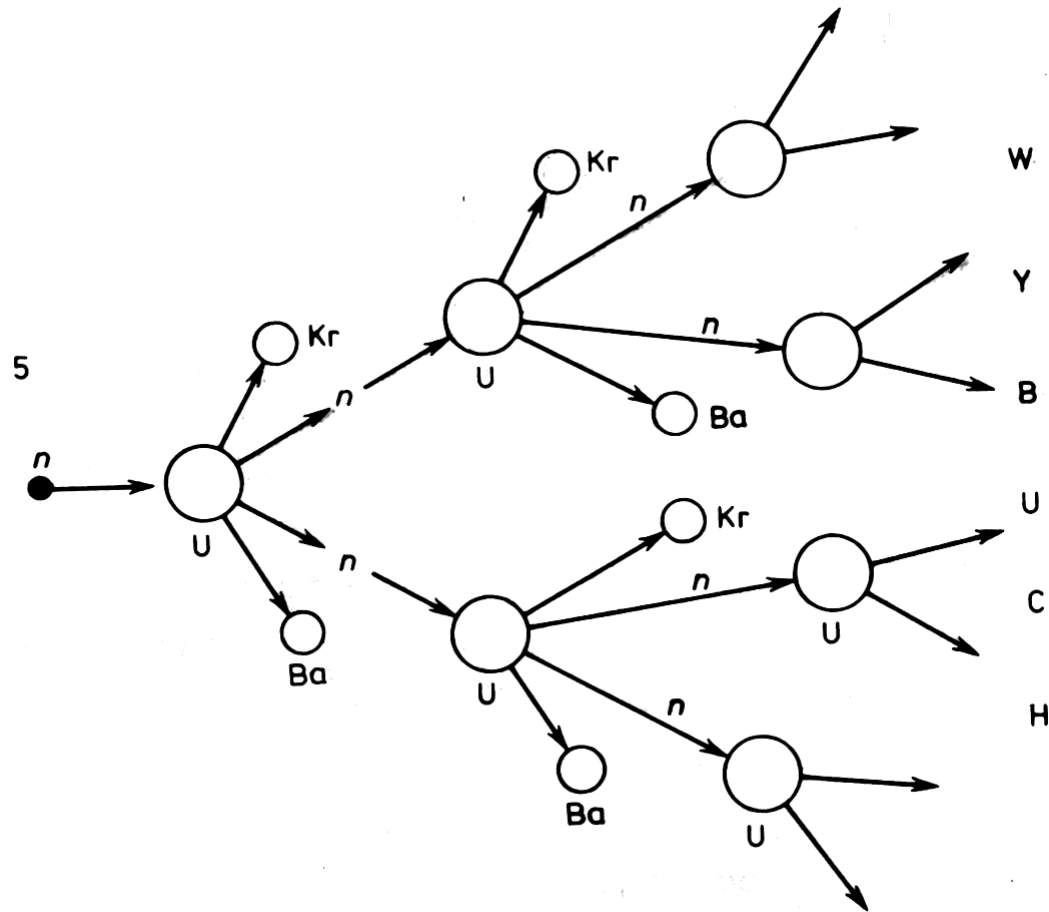


- A co się stanie, jeżeli „ostrzelamy” jądra atomowe jakimiś cząstkami? Takie doświadczenia prowadził Enrico Fermi. Chciał on zsyntezować nowe, nieistniejące izotopy istniejących na Ziemi pierwiastków chemicznych, a jeszcze lepiej – nowe pierwiastki. Ostrzeliwał on różne tarcze neutronami, a żeby zapobiec rozbiciu jąder wstępnie spowalniał neutrony przepuszczając je przez parafinę. Wyprodukował wiele różnych izotopów, ale najciekawsze było doświadczeniem polegające na „ostrzelaniu” jąder uranu. Zaobserwował przy tym zagadkowe zjawiska, ale błędnie założył, że stanowią one dowód powstania nowego izotopu uranu lub nowego pierwiastka „transuranowego”

- Doświadczenie Fermiego powtórzyli w Niemczech Otto Hahn i Lisa Meitner. W produktach reakcji wykryli jądra baru zawierające tylko 56 protonów. Jak to możliwe, że wolny neutron rozbił duże jądro?



Reakcja łańcuchowa



- Jeżeli więcej niż jeden z wyprodukowanych neutronów rozszczepi kolejne jądro, to dochodzi do wybuchu.

Co utrzymuje nukleony w jądrze?

- Nie mogą być to siły pola elektrycznego. Protony mają ładunek dodatni, więc powinny się odpychać. Neutrony nie mają ładunku elektrycznego, więc nie działają na nie siły pola elektrycznego.
- Siły grawitacyjne są opisane podobnymi prawami, jak siły elektrostatyczne:

$$F_{\text{grawitacyjne}} = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$F_{\text{elektrostatyczne}} = k \frac{e_1 e_2}{r^2}$$

ale są one dużo słabsze od sił grawitacyjnych (G jest bardzo małą stałą)

- Dlaczego więc jądra atomowe z reguły są trwałe?

Oddziaływania w języku kwantowej teorii pola

- Mechanika kwantowa próbowała opisać zachowanie cząstki w polu pewnych sił. Cóż to jednak jest to pole? Czy nie powinno mieć ono właściwości kwantowych?
- Rozpatrzmy pole elektromagnetyczne. Zauważmy, że aby wyjaśnić charakter promieniowania ciała doskonale czarnego, Planck musiał przyjąć, że fale elektromagnetyczne o częstotliwości ν znajdujące się we wnętrzu mogą mieć tylko pewne wartości energii równe.

$$E = h\nu$$

Fale we wnętrzu są falami stojącymi, a więc właściwie oscylatorami harmonicznymi. Mechanika kwantowa dopuszcza energię oscylatora harmonicznego równą:

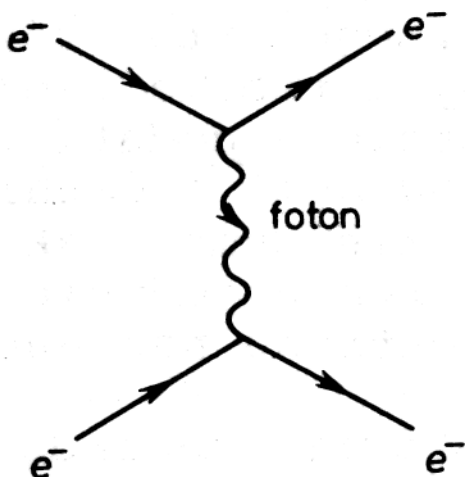
$$E = \left(n + \frac{1}{2} \right) h\nu$$

Założenie Plancka jest więc prawie słuszne (niewielki błąd nie ma wpływu na wynik). Fale elektromagnetyczne we wnętrzu mają skwantowane energie.

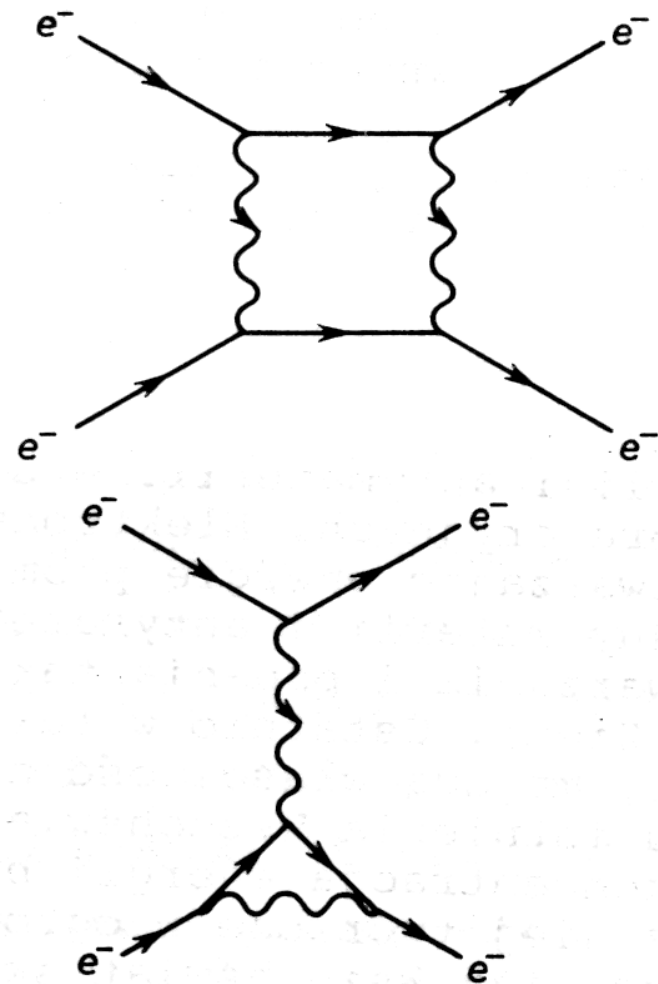
Powróćmy do pola elektromagnetycznego. Każde zmienne pole elektromagnetyczne jest falą elektromagnetyczną. Każdą falę elektromagnetyczną można przedstawić jako superpozycję fal o konkretnych częstotliwościach (transformata Fouriera). Każde zmienne pole elektromagnetyczne jest więc strumieniem fotonów o pewnych częstotliwościach ν .

Czy każde pole elektromagnetyczne jest strumieniem fotonów? A co z polami niezmiennymi w czasie? Odpowiedź jest zaskakująca. Niezmienne w czasie pole elektromagnetyczne musi być polem elektrostatycznym i właściwie nie istnieje. Mogłoby ono być wytwarzane tylko przez ładunki spoczywające względem jakiegoś układu inercjalnego, a więc takie, które nie mogą oddziaływać z innymi ładunkami...

W momencie, w którym mówimy o oddziaływaniu ładunków, mówimy o oddziaływaniu ich ze zmiennym polem elektromagnetycznym wytwarzanym przez te ładunki, a więc o wymianie fotonów między nimi. Do ilustracji takich procesów służą diagramy Feynmana. Kilka przykładów:



W wyniku wymiany jednego fotonu elektron rozprasza się na innym elektronie.



Po pierwotnym rozproszeniu może nastąpić następne, jako rezultat wymiany drugiego fotonu.

W tym przykładzie pierwszy foton jest przekazywany do innego elektronu, powodując rozproszenie. Drugi foton jest następnie pochłonięty przez ten sam elektron, który go pierwotnie wyemitował. Taki proces daje wkład do „czynnika g ”, czyli momentu magnetycznego elektronu.

Wymiana fotonów oznacza wymianę energii między cząstkami, a więc i przekazywanie pędu, czyli działanie siły.

$$p_f = \frac{E_f}{c}, \quad F = \frac{dp}{dt}$$

Formalizm matematyczny związany z grafami Feynmana pozwala policzyć prawdopodobieństwo przejścia cząstki z jednego stanu kwantowego do drugiego w wyniku oddziaływań z polem elektromagnetycznym.

Oczywiście przy oddziaływaniu 2 cząstek możliwa jest wymiana bardzo dużej liczby fotonów, ale z każdym wierzchołkiem grafu związany jest czynnik α zmniejszający amplitudę prawdopodobieństwa takiego procesu ($1/137$) razy (prawdopodobieństwo procesu maleje $(1/137)^2$ razy). W praktyce stosuje się więc rachunek przybliżony, biorąc pod uwagę grafy o ilości wierzchołków nie przekraczającej pewnej wartości.

Tak w zarysie wygląda elektrodynamika kwantowa (QED). Wyniki teoretyczne uzyskiwane w ramach QED są zgodne z doświadczeniem z dokładnością nawet do 6-ciu cyfr znaczących!

- Na każde oddziaływanie obecnie próbujemy patrzeć jak na proces wymiany pewnych cząstek. W przypadku oddziaływań elektromagnetycznych są to bezmasowe fotony. W przypadku innych oddziaływań, wymieniane cząstki mogą mieć masę.
- Jaki jest wpływ masy wymienianych cząstek na właściwości pola sił? Zauważmy, że zgodnie z zasadą nieoznaczoności

$$\Delta E \Delta t = \frac{h}{2\pi}$$

Oznacza to, że możliwe jest krótkotrwałe złamanie zasady zachowania energii. Ściślej mówiąc: możliwe jest złamanie zasady zachowania energii i może ono trwać tym dłużej, im jest mniejsze.

Bezmasowy foton może mieć dowolnie małą energię, więc cząstka wytwarzająca pole elektromagnetyczne może wyemitować wirtualny foton o energii dążącej do zera, który będzie mógł istnieć przez czas dążący do nieskończoności i zdąży w tym czasie przebyć drogę równą

$$s = c \Delta t$$

dążącą do nieskończoności. Wynika z tego, że siły elektromagnetyczne mają nieskończony zasięg, ale będą malały wraz z odległością oddziałujących cząstek (malejąca energia fotonu),

Jeżeli wymieniana cząstka będzie miała masę spoczynkową m_0 , to jej minimalna energia będzie równa

$$E_{\min} = m_0 c^2$$

Maksymalny czas jej życia będzie więc równy

$$t_{\max} = \frac{h}{2\pi E_{\min}} = \frac{h}{2\pi m_0 c^2}$$

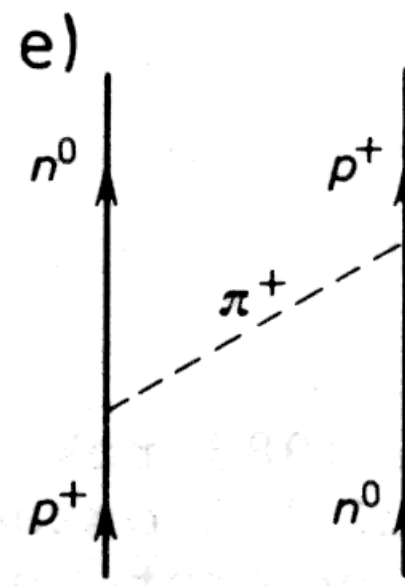
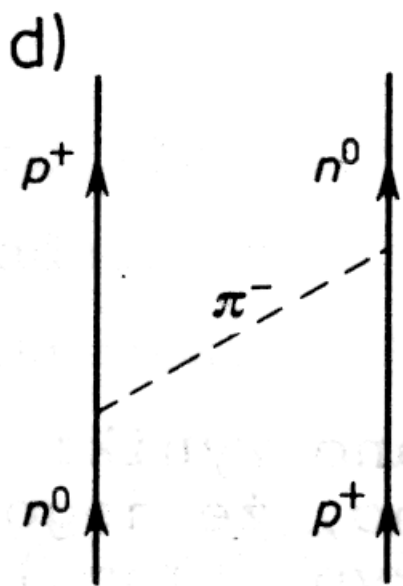
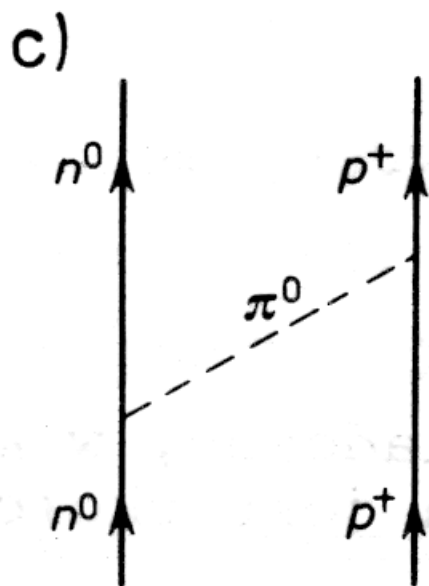
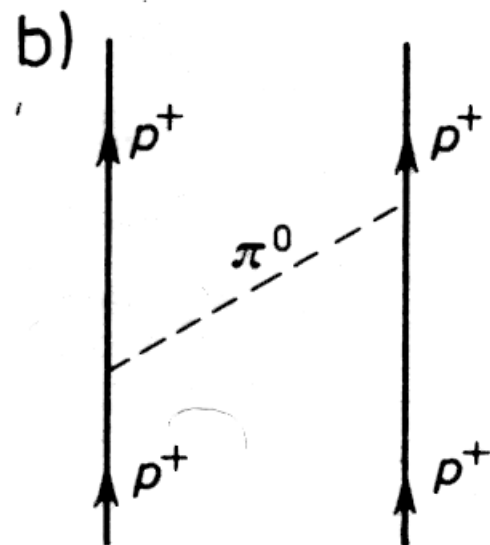
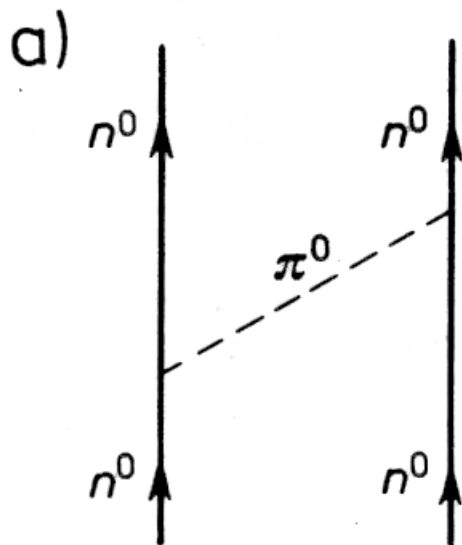
Droga, jaką zdąży przebyć w tym czasie ta cząstka jest nie większa od $s = c \cdot t_{\max}$, a więc zasięg oddziaływań będzie maksymalnie równy

$$s_{\max} = \frac{h}{2\pi m_0 c}$$

Siły jądrowe

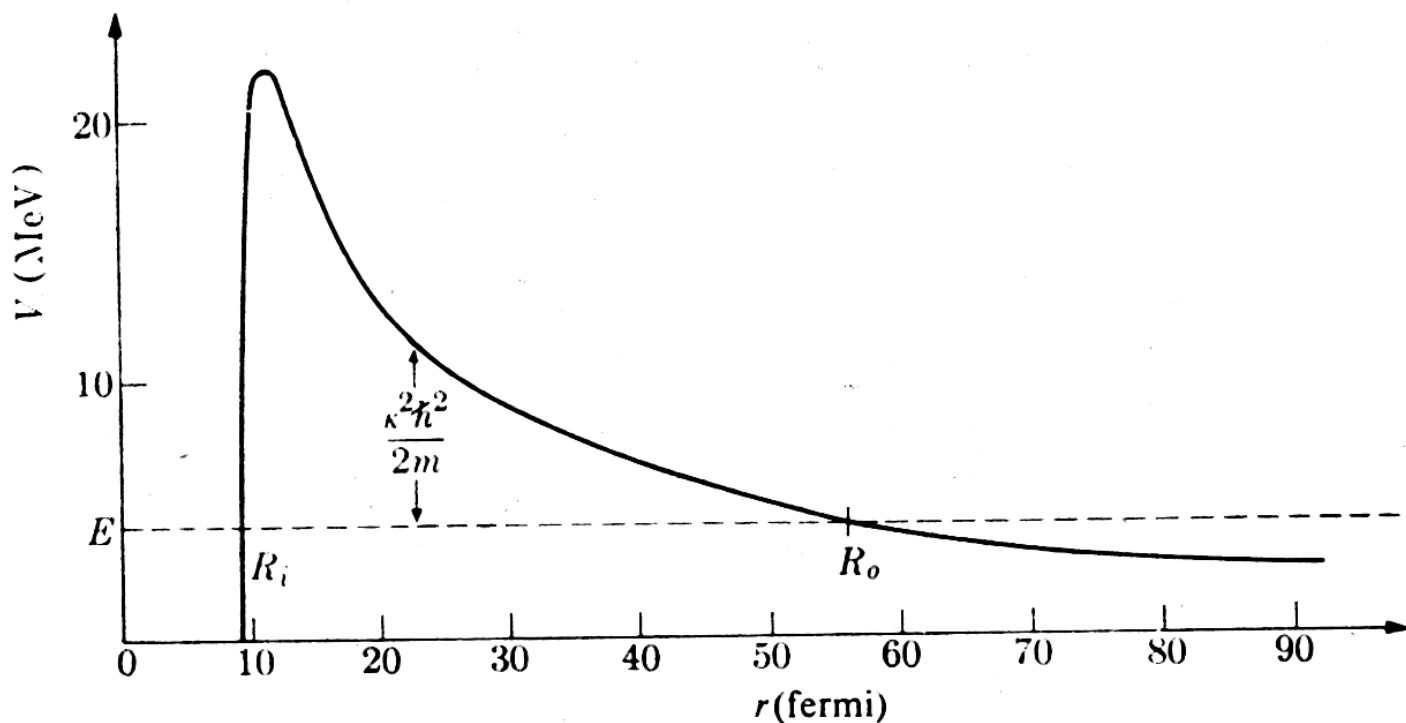
- Siły utrzymujące nukleony w jądrze muszą być silniejsze od sił elektrostatycznego odpychania między protonami. Jednocześnie z doświadczenia wiadomo, że nie oddziałują one na elektrony. Stąd wzięło się przypuszczenie, że protony i neutrony mają jakiś „silny ładunek”, który nie występuje w elektronach i powinna istnieć cząstka przenosząca te oddziaływania.
- W 1935 r. Yukawa zapostulował istnienie cząstek π (pionów), które miały być nośnikami oddziaływań silnych. Ponieważ zasięg tych oddziaływań powinien być rzędu rozmiarów jądra atomowego, na podstawie jego rozmiarów (10^{-12}cm) oszacował on, że cząstki te powinny mieć masę rzędu $140 \text{ MeV}/c^2$.

Postulowane przez Yukawę piony zostały odkryte dopiero w 1947 r. (π^+ i π^-) i 1950 r. (π^0).



Oddziaływanie pionów z nukleonami

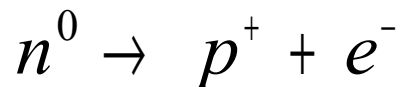
- O ile można zrozumieć promieniowanie γ (jako emisję promieniowania elektromagnetycznego przez wzbudzone jądro atomowe) oraz promieniowanie α (jako ucieczkę cząstki α z jądra na skutek przenikania przez barierę potencjału (rysunek), to pojawia się pytanie: co powoduje rozpad β ?



Bariera potencjału między jądrem ${}^{230}_{90}\text{Th}$ a cząstką alfa. Całkowita energia rozpadu wynosi 4,76 MeV

Rozpady β zachodzą stosunkowo rzadko, dlatego uważano, że siły, które je wywołują są stosunkowo słabe (w porównaniu z oddziaływaniami silnymi). Wiadomo też, że nie mogą być to te same siły, które wiążą nukleony w jądrze (te siły nie oddziałują na elektrony, a jako produkt rozpadu β pojawia się elektron).

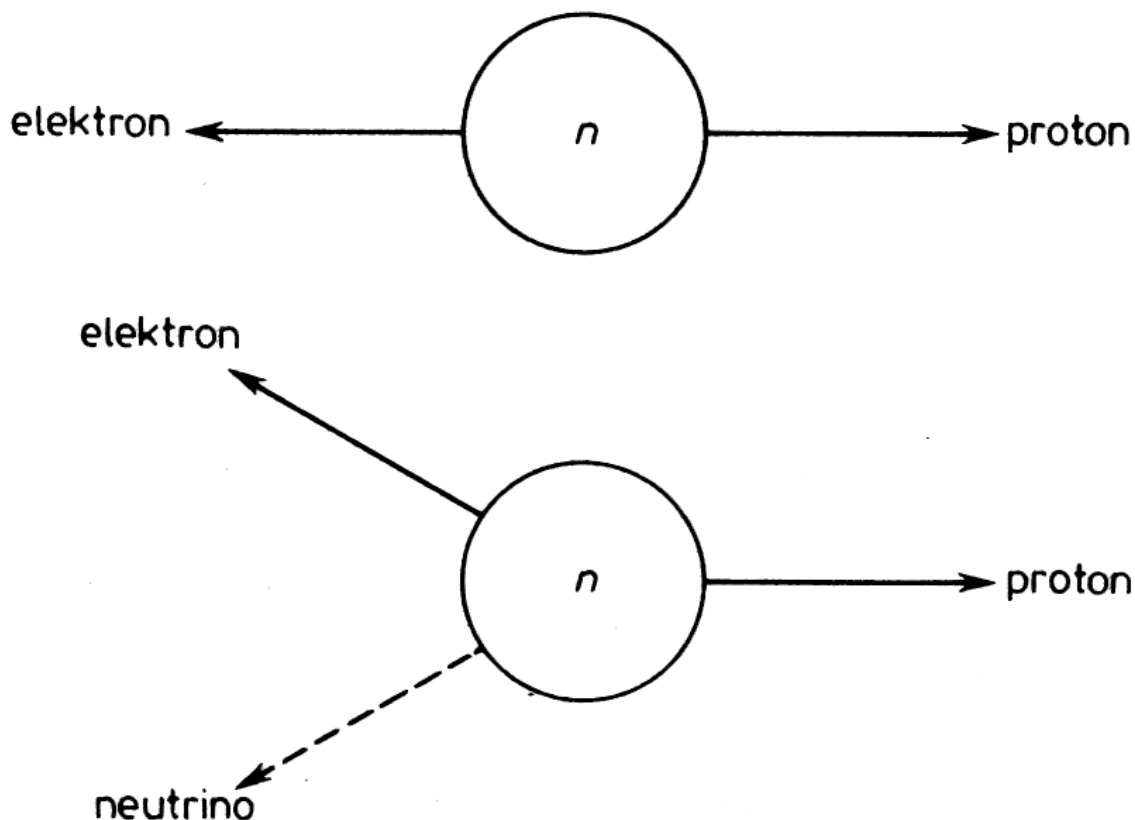
Przyczyną rozpadu β jest spontaniczna przemiana neutronu w proton:



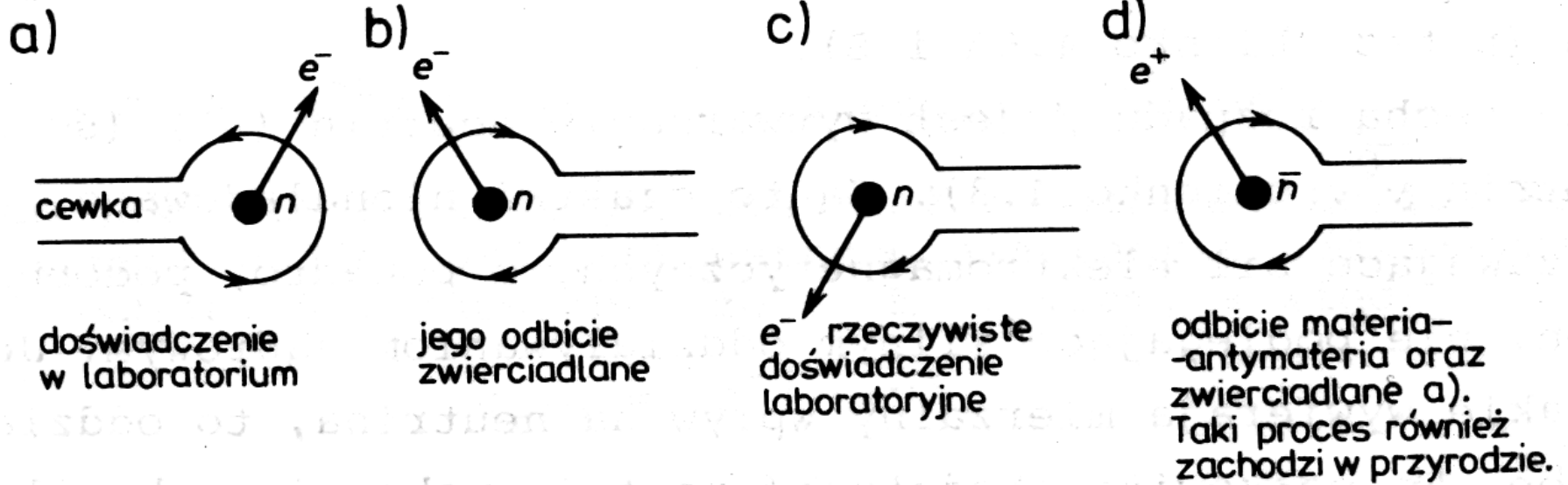
Zastanawiającą cechą tego rozpadu był fakt, że energia cząstek wyzwolanych w rozpadzie była za mała:

$$m_{\text{neutronu}} c^2 - \left(m_{\text{protonu}} c^2 - m_{\text{elektronu}} c^2 \right) = 0,8 \text{ MeV}$$

Dodatkowo, jeżeli jedynymi produktami rozpadu miały być proton i elektron, to ich torY powinny leżeć na jednej prostej, a tak nie było. Stąd wniosek, że musiała powstawać jeszcze jakaś obojętna cząstka, której bezpośrednio nie obserwowano. Tą cząstką okazało się neutrino (ściślej: antyneutrino elektronowe) odkryte dopiero w 1956 r..



Szczególną cechą oddziaływań słabych jest także to, że łamią one parzystość. Obserwując świat, w zasadzie nie da się stwierdzić, czy patrzymy bezpośrednio na świat, czy na jego lustrzane odbicie. W 1956 r. okazało się, że nie dotyczy to oddziaływań słabych. Historycznie doświadczenie dotyczyło rozpadu β jąder kobaltu, ale można je zilustrować na przykładzie rozpadu β pojedynczego neutronu. Umieszczając neutron w polu magnetycznym wytworzoną przez cewkę z płynącym prądem powodujemy ustawienie spinu neutronu wzdłuż kierunku wektora pola (na skutek oddziaływania pola z momentem magnetycznym neutronu). Dzieje się tak na skutek oddziaływania pola magnetycznego z naładowanymi cząstkami, z których zbudowane są neutrony (kwarkami)



Elektrony powstające w rozpadzie β są chętniej wysyłane w jednym kierunku, niż w przeciwnym (rysunek)