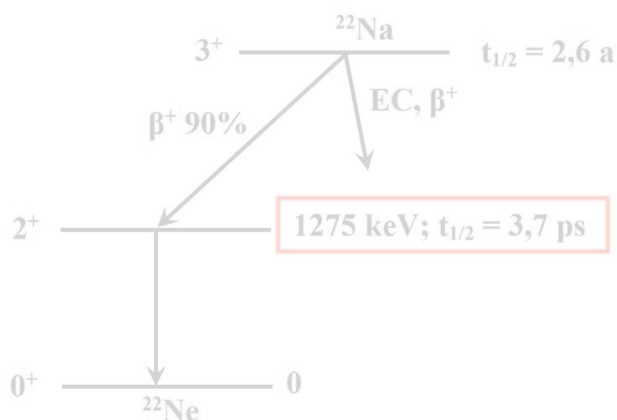


W odróżnieniu od cząstek alfa i elektronów, promieniowanie gamma jest bardzo przenikliwe. Dla zatrzymania cząstki alfa o energii 1 MeV wystarczy kartka papieru, elektronów o tej energii – blacha Al o grubości 1 mm. Osłabienie o połowę promieniowania gamma o tej energii wymaga ołowianej cegły o grubości 5 cm! Promieniowanie gamma jest jednocześnie bardzo energetyczne – to ono czyni główne spustoszenie w organizmie człowieka, powodując wiele przypadków nowotworów.



Fot. 3.8. Rozpad β^+ sztucznego izotopu sodu ^{22}Na o czasie połowicznego rozpadu 2,6 roku; powstaje jądro neonu ^{22}Ne , ale w stanie wzbudzone; przechodzi ono do stanu podstawowego po 3,7 ps emitując kwant gamma o energii 1,3 MeV.

Źródłem promieniowania gamma są wszelkie tzw. materiały radioaktywne. Uran jest dość rozpowszechniony w skorupie ziemskiej. Radioaktywne są więc np. popioły ze spalania węgla. Źródłem promieniowania gamma jest też „kosmos” – natężenie promieniowania gamma na wysokości 10 km jest 10-20 razy większe niż na poziomie morza. Zarówno promieniowanie gamma, promieniowanie Röntgena, promieniowanie nadfioletowe dla skóry jak i liczne czynniki chemiczne (benzen w benzynie bezołowiowej, dym nikotynowy itd.) mają działanie *rakotwórcze*. Istotna jest zazwyczaj suma tych czynników – należy więc unikać *zbędnych* zagrożeń.

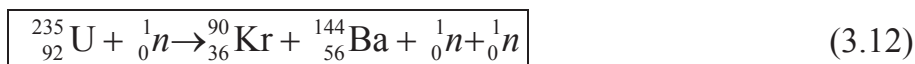
Fizycy, poczynawszy od prac córki Marii Skłodowskiej – Curie, Ewy i jej męża Fryderyka Joliot, nauczyli się wytwarzać wiele sztucznych izotopów bombardując inne za pomocą neutronów, protonów, cząstek alfa itd. Powstające sztucznie wytworzone izotopy w wielu przypadkach są nietrwałe, ale mają ważne zastosowania. Izotopy te rozpadają się na wiele sposobów – są możliwe również inne rozpadły radioaktywne, poza omówionymi α i β .

Możliwy jest na przykład wspomniany już rozpad β^+ - z emisją pozytonu, w izotopach ze względny nadmiarem protonów. Przykładem jest sód ^{22}Na rozpadający się¹⁷ z czasem połowicznego zaniku 2,6 roku na rzadki izotop neonu ^{22}Ne . Emitowane pozytony wykorzystywane są do wykrywania mikro-defektów, np. w materiałach półprzewodnikowych. Innym izotopem rozpadającym się w procesie β^+ jest fluor ^{18}F ($T_{1/2} = 110$ min) używany w tomografii anihilacji pozytonów (PET) do wykrywania nowotworów.

3.8. Reakcje jądrowe

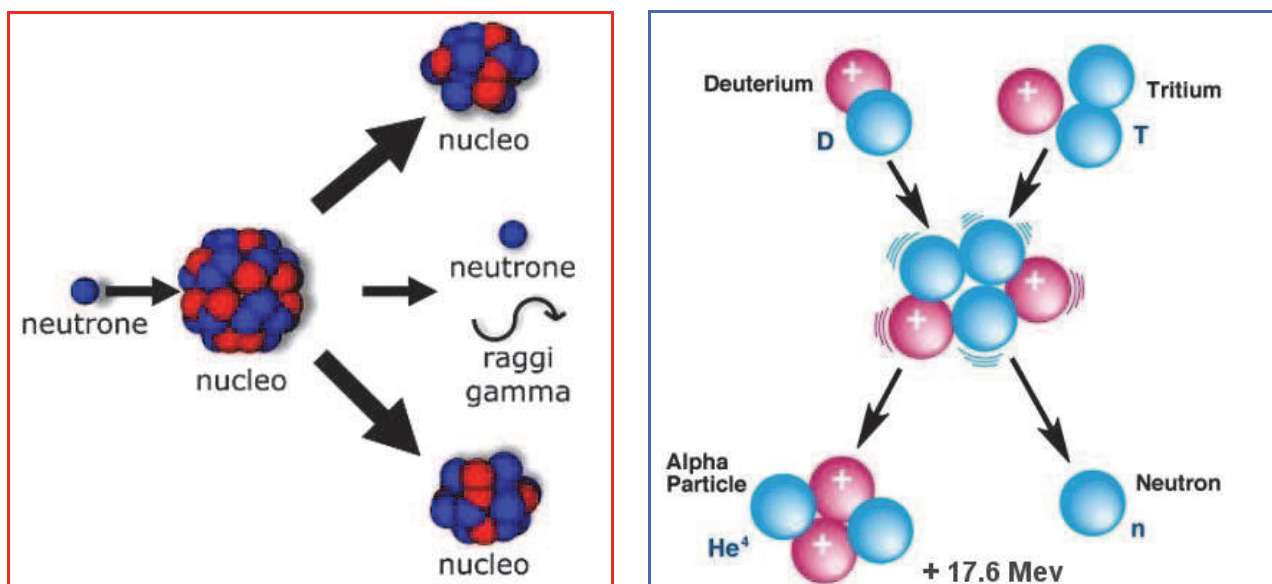
Krótko przed II wojną światową dwójka niemieckich uczonych, Lisa Meitner i Otto Hahn zauważyli, że rzadziej występujący izotop uranu ^{235}U po pochłonięciu neutronu nie podlega żadnej ze znanych wówczas przemian jądrowych, ale, żartobliwie mówiąc „rozpada się na dwie nierówne połowy”.

Reakcja, nazywana reakcją *rozszczenia*, może mieć przebieg, np.



¹⁷ Stabilny izotop sodu to ^{23}Na .

W reakcji tej ciężkie jądro, obfite w neutrony, po wchłonięciu dodatkowego neutronu staje się niestabilne i rozpada się na dwa lżejsze fragmenty. W lżejszych jądrach proporcje między protonami i neutronami są bliższe 1:1, w związku z tym po rozpadzie uranu pozostają dwa lub trzy „nadmiarowe” neutrony. One mogą spowodować rozpady kolejnych jąder: rozwija się reakcja łańcuchowa. W każdej reakcji wyzwala się energia kilkuset MeV - tak działa bomba „atomowa”, a właściwiej *jądrowa*; na tej zasadzie działają również elektrownie *jądrowe*.



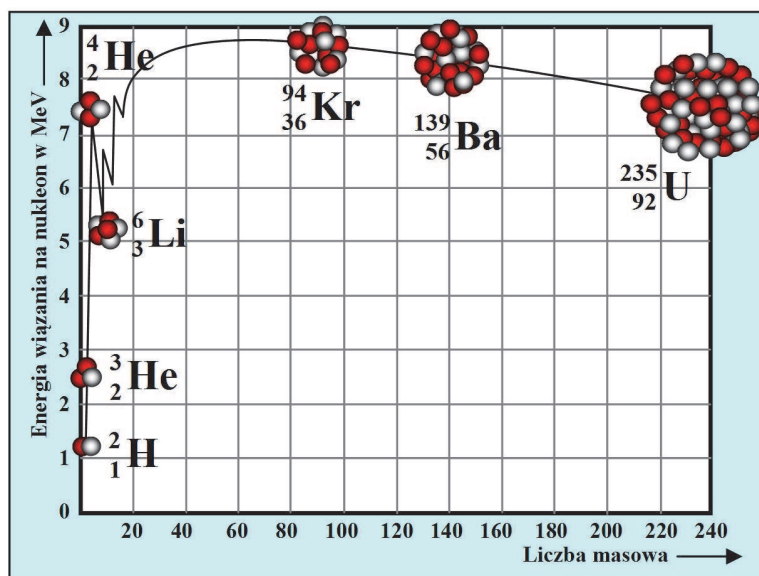
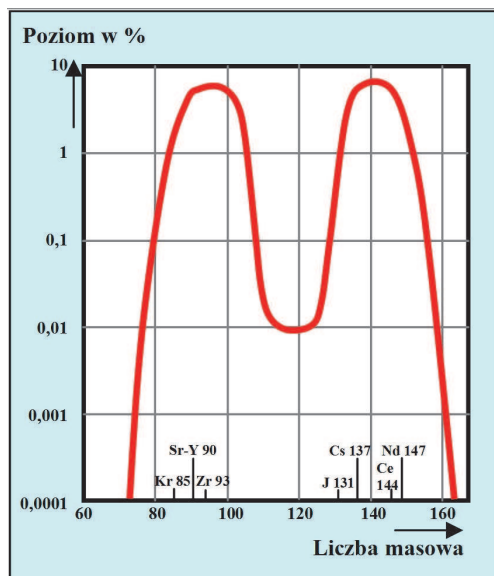
Ryc. 3.9. Dwie reakcje jądrowe dostarczające ogromnych ilości energii: **a)** rozszczepienie jądra, np. uranu ^{235}U po pochłonięciu neutronu; **b)** synteza (fuzja) dwóch jąder wodoru – deuteru ^2H i trytu ^3H w jądro helu ^4He ; z fuzji pozostaje jeden neutron – część z 17,6 MeV energii jest unoszona przez ^4He część przez neutron (Źródło: DeAgostini, i Every Day Science Blog)

Produkty reakcji rozszczepienia jądra uranu ^{235}U mogą być różne a zachowana jest jedynie sumaryczna liczba protonów (czyli liczba atomowa), zob. rys. 3.10. Jądro uranu to, modelowo, duża kropla, która rozpada się na dwie mniejsze, o rozmiarach trudnych do przewidzenia. To oznacza, że w wypalonym paliwie jądrowym znajdują się najróżniejsze pierwiastki chemiczne i izotopy o różnych czasach połowicznego zaniku – od pojedynczych dni do milionów lat.

Różnorodność powstających pierwiastków chemicznych stwarza poważne problemy bezpieczeństwa w przechowywaniu i/lub re-cyklingu produktów rozszczepienia uranu (także plutonu i innych pierwiastków). W produktach rozszczepienia znajdujemy też izotopy, które mogą zostać zaabsorbowane przez organizm człowieka, jak cez ^{137}Cs ($T_{1/2}=30$ lat), stront ^{90}Sr ($T_{1/2}=30$ lat), jod ^{131}I ($T_{1/2}=8$ dni), przez co technologie jądrowe wymagają szczególnych środków ostrożności.

W reakcji (3.12) rozszczepienia jąder uranu uzyskuje się duże (jak na potrzeby człowieka) ilości energii. Powodem tego jest specyficzna zależność energii wiązania jąder. Wspomnieliśmy już, że protony się odpychają, w związku z tym konieczna jest w jądrach obecność neutronów. Okazuje się, że po przekroczeniu pewnej sumarycznej liczby protonów i neutronów, energia wiążąca jądro w całość nie rośnie, ale maleje. Energię tę odnosimy do jednego nukleonu (czyli protonu lub neutronu). Energia wiązania cząstek alfa ^4_2He wynosiła około 28 MeV, w przeliczeniu na jeden nukleon 7 MeV, znacznie więcej niż np. dla lżejszego izotopu helu ^3_2He lub litu ^6_3Li , zob. ryc. 3.10b. Z tego powodu cząstka alfa jest tak stabilna.

Z wykresu 3.10b wynika również inna, bardzo ważna konsekwencja praktyczna. Energię możemy uzyskiwać w reakcjach jądrowych *rozszerzenia* ciężkich jąder, ale także *syntezy*, czyli „sklejania” większych jąder z mniejszych fragmentów.



Ryc. 3.10. a) Produkty rozszczepienia uranu ^{235}U (na dwa fragmenty) obejmują szeroki rozkład izotopów od $A = 70$ do $A = 170$; zwróć uwagę, że skala pionowa jest względna (0,1, 1, 10); **b)** energia wiązania na jeden nukleon w zależności od liczby masowej A ; cząstka alfa, czyli ^4He ma dużą energię wiązania; maksimum krzywa osiąga około żelaza ^{56}Fe ; dla jąder poniżej masy żelaza korzystna energetycznie jest synteza, powyżej żelaza – rozszczepienie (Źródło: European Nuclear Society)

Przykład 3.5.

Oblicz energię wiązania cząstek alfa ^4He . Masa jądra helu wynosi $3727,38 \text{ MeV}/c^2$, masa neutronu $939,57 \text{ MeV}/c^2$ a masa protonu $938,28 \text{ MeV}/c^2$.

Dane: $m_{\text{He}} = 3727,38 \text{ MeV}/c^2$, $m_n = 939,57 \text{ MeV}/c^2$, $m_p = 938,28 \text{ MeV}/c^2$

Jednostki: podane masy są w jednostkach bardzo wygodnych dla fizyków jądrowych. Są to masy już przeliczone na energie, według wzoru Einsteina (3.1) $E = mc^2$, i w dodatku podane nie w dżulach, ale bezpośrednio w elektronowoltach.

Suma mas wynosi $(2 \cdot 939,57 + 2 \cdot 938,28) = 3755,70 \text{ MeV}/c^2$.

Defekt masy wynosi więc $3755,70 - 3727,38 = 28,32 \text{ MeV}/c^2$.

Uzyskany wynik jest zgodny z podaną wcześniej wartością energii wiązania (stąd ją doświadczalnie znamy). Defekt masy jest całkiem duży: 0,8% masy jądra helu. To wyjaśnia, dlaczego energie uzyskiwane z przemian jądrowych są tak duże.

Zadanie (na sprawdzian): znajdź w internecie wartości masy protonu i neutronu wyrażone w kg i powtórz to obliczenie korzystając z równania Einsteina. Wynik wyraż z dżulach.

Z powyższego przykładu wynika jasno, że w reakcji



uzyskać można aż 28 MeV energii. Taki typ syntezy, z udziałem aż czterech cząstek nie jest możliwy do realizacji w warunkach ziemskich (jest on zapewne możliwy wewnątrz bardzo ciężkich gwiazd *neutronowych*). Tak w gwiazdach „zwykłych” w rodzaju Słońca jak do zastosowań energetycznych na Ziemi wykorzystywaną reakcją *syntezy termojądrowej* jest synteza helu z dwóch ciężkich izotopów wodoru – deuteru ^2H i trytu ^3T według wzoru



W reakcji tej wydzielą się 17,6 MeV. Wydaje się to mniej niż w reakcji rozszczepienia uranu, ale w odniesieniu do masy paliwa w reakcji **termojądrowej** wydzielą się około 4 razy więcej energii niż w reakcji „jądrowej”. Eksplozja bomby termojądrowej o „sile” równoważnej 15

mln ton trotylu na atolu Bikini na Pacyfiku w 1954 roku była jednym z elementów narastającej po II Wojnie Światowej wrogości między USA i Związkiem Radzieckim.

Reakcja (3.13) jest „motorem napędowym” gwiazd. W warunkach ziemskich synteza termojądrowa byłaby źródłem ogromnych ilości stosunkowo „czystej” energii. Trudnością w jej praktycznym zastosowaniu jest konieczność stosowania ogromnych temperatur dla zainicjowania reakcji (3.13). Temperatury te są niezbędne, aby zbliżyć odpychające się elektrostatycznie jądra na odległości, w których zaczynają działać przyciągające siły jądrowe. We wnętrzu gwiazd panuje temperatura 15 mln K i ogromne ciśnienia wynikające z siły ciężenia; w warunkach laboratoryjnych niezbędne jest uzyskanie temperatury 150 mln K. Warunki takie udało się już uzyskać w próbnej instalacji termojądrowej w Anglii.

Znamy dwa sposoby uzyskania znacznych ilości energii z przemian jądrowych:

- w reakcji rozszczepiania, np. rzadkiego izotopu uranu ^{235}U na dwa fragmenty; reakcja jest powodowana pochłonięciem neutronu; jest to mechanizm działania elektrowni jądrowych

- w reakcji syntezy (termojądrowej), gdy z lżejszych jąder powstają cięższe, aż do żelaza; to jest mechanizm wytwarzający energię w gwiazdach.

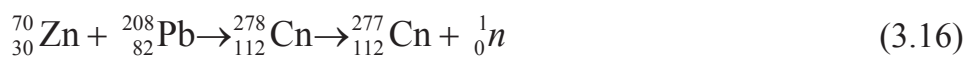
Podane reakcje (3.12) rozszczepienia jąder uranu ^{235}U i termojądrowej syntezy helu z deuteru i trytu (3.14) to dwie tylko z bardzo wielu możliwych *reakcji jądrowych*. Służą one np. do otrzymywania sztucznych, zazwyczaj nietrwałych izotopów, np. do zastosowań w medycynie (jak izotop ^{18}F stosowany w tomografii PET). Pierwsza sztuczna reakcja jądrowa została odkryta przez E. Rutherforda w 1919 roku – w wyniku bombardowania jąder azotu za pomocą cząstek alfa powstaje niestabilny izotop tlenu i emitowany jest proton, według wzoru



Reakcje jądrowe zachodzące w atmosferze, pod wpływem wysokoenergetycznego promieniowania kosmicznego¹⁸ są źródłem izotopów wykorzystywanych np. do datowania osadów organicznych. Izotopem takim, niezwykle przydatnym do datowania np. drewnianych prehistorycznych palisad, jest izotop węgla ^{14}C , o czasie połowicznego zaniku $T_{1/2} = 5370$ lat



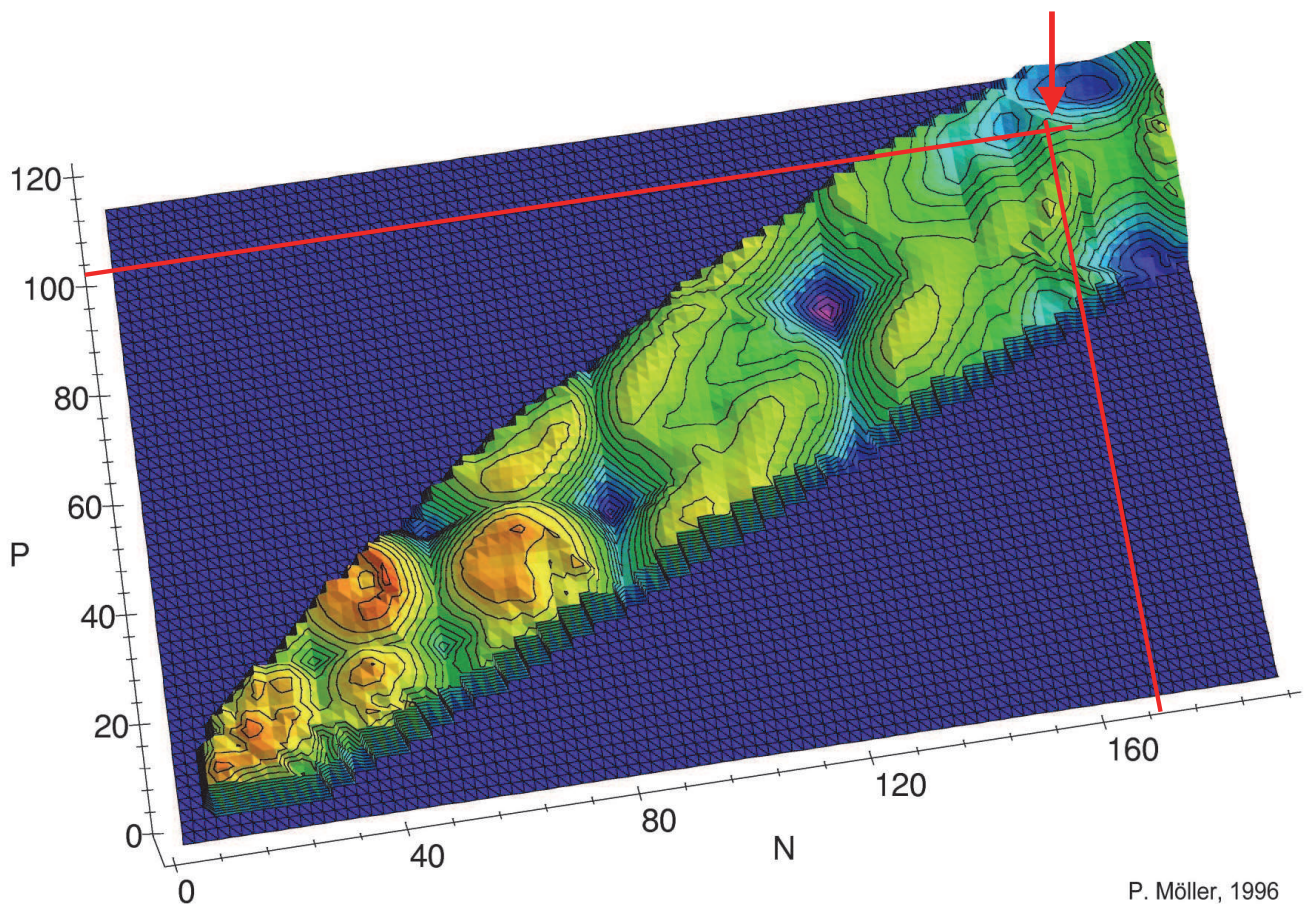
Metodą „sklejania” jąder atomowych rozpędzonych do wielkich energii fizycy potrafią również wytwarzać pierwiastki chemiczne nigdzie nie spotykane w naturze. Wspomniany już Copernicium $^{277}_{112}\text{Cn}$ powstał w wyniku zderzenia jąder cynku $^{70}_{30}\text{Zn}$ i ołowiu $^{208}_{82}\text{Pb}$ a nadmiarowy neutron „odparował” po zderzeniu.



Nazwa copernicium została nadana w dzień urodzin Kopernika, 19.02.2010 roku. Jest to pierwiastek przypominający chemicznie (zapewne) rtęć, i przypuszczalnie pierwszy z pierwiastków na hipotetycznej „wyspie stabilności”¹⁹.

¹⁸ W promieniowaniu kosmicznym znajdujemy protony, neutrony, alfa, miony, mezony π , kwanty gamma itd.

¹⁹ Stabilność jąder zależy zarówno od ilości protonów jak neutronów. Stwierdzono, że jądra o niektórych ilościach neutronów i protonów są silniej związane (stabilniejsze) niż inne. Tzw. „liczby magiczne” dla protonów to 2 (stąd, ^4_2He), 8 ($^{16}_8\text{O}$), 20 ($^{40}_{20}\text{Ca}$), 28 ($^{56}_{26}\text{Fe}$, choć niedokładnie), 50 ($^{120}_{50}\text{Sn}$), 82 i 114 (a 126 dla neutronów, stąd stabilny izotop $^{208}_{82}\text{Pb}$). Rozpowszechnienie pierwiastków chemicznych na Ziemi (i w kosmosie) wynika m.in. z tych liczb magicznych.



P. Möller, 1996

Ryc. 3.11. Półwysep znanych izotopów (oś X – liczba neutronów, oś Y – liczb protonów) jest szeroki, ale tylko niektóre z jąder, w jego centralnej części są stabilne; widoczne „doliny” większej energii wiązania dla protonowych i neutronowych liczb magicznych; duży niebieski „basen” to ołów; copernicium $_{112}\text{Cn}$ zaznaczone strzałką (Źródło: prof. S. Hoffmann, wykład na UMK 26.03.2011)

3.9. Proton i neutron: kwarki

W par. 3.6 o rozpadach promieniotwórczych omówiliśmy najpierw rozpad beta minus (tzn. z emisją elektronu) a później rozpad alfa. Okazało się jednak, że rozpad alfa jest stosunkowo prosty do wyjaśnienia: „skotłowane” w jądrze protony i neutrony mają sporą szansę na utworzenie dość stabilnej struktury w postaci cząstki alfa ^4_2He a ta, poprzez efekt tunelowy, może z jądra uciec. Rozpad beta, czyli przeistoczenie się neutronu w proton wydawało się reakcją prostą, a w rzeczywistości wymaga istnienia „egzotycznej” cząstki – neutrino, praktycznie nieoddziałującego z materią.

Dodatkowo, stwierdzono, że w niektóre jądra (jak ^{22}Na , ^{19}F) rozpadają się w tzw. procesach „beta plus”, czyli z emisją dodatniego elektronu, czyli pozytonu (anty-elektronu). Zachodziłaby więc reakcja rozpadu protonu na neutron, pozyton i neutrino. Z kolei masa protonu jest mniejsza niż masa neutronu. Trudności w zrozumieniu rozpadów beta jest wiele. Widocznie i proton i neutron nie są wcale cząstkami elementarnymi, ale się jeszcze z czegoś składają.

Kolejnym argumentem za złożoną strukturą protonu i neutronu były odkrycia innych „cząstek elementarnych”, począwszy od lat 40-tych ubiegłego wieku, zob. par. 3.10. Jeżeli proton i neutron są w jądrze związane silnymi a krótko-zasięgowymi oddziaływaniami, to musi istnieć cząstka je wiążąca. Postępy w badaniu *promieniowania kosmicznego* oraz budowa przyspieszaczy cząstek, czyli *akceleratorów* otworzyły prawdziwy „róg obfitości” dla badaczy cząstek elementarnych.