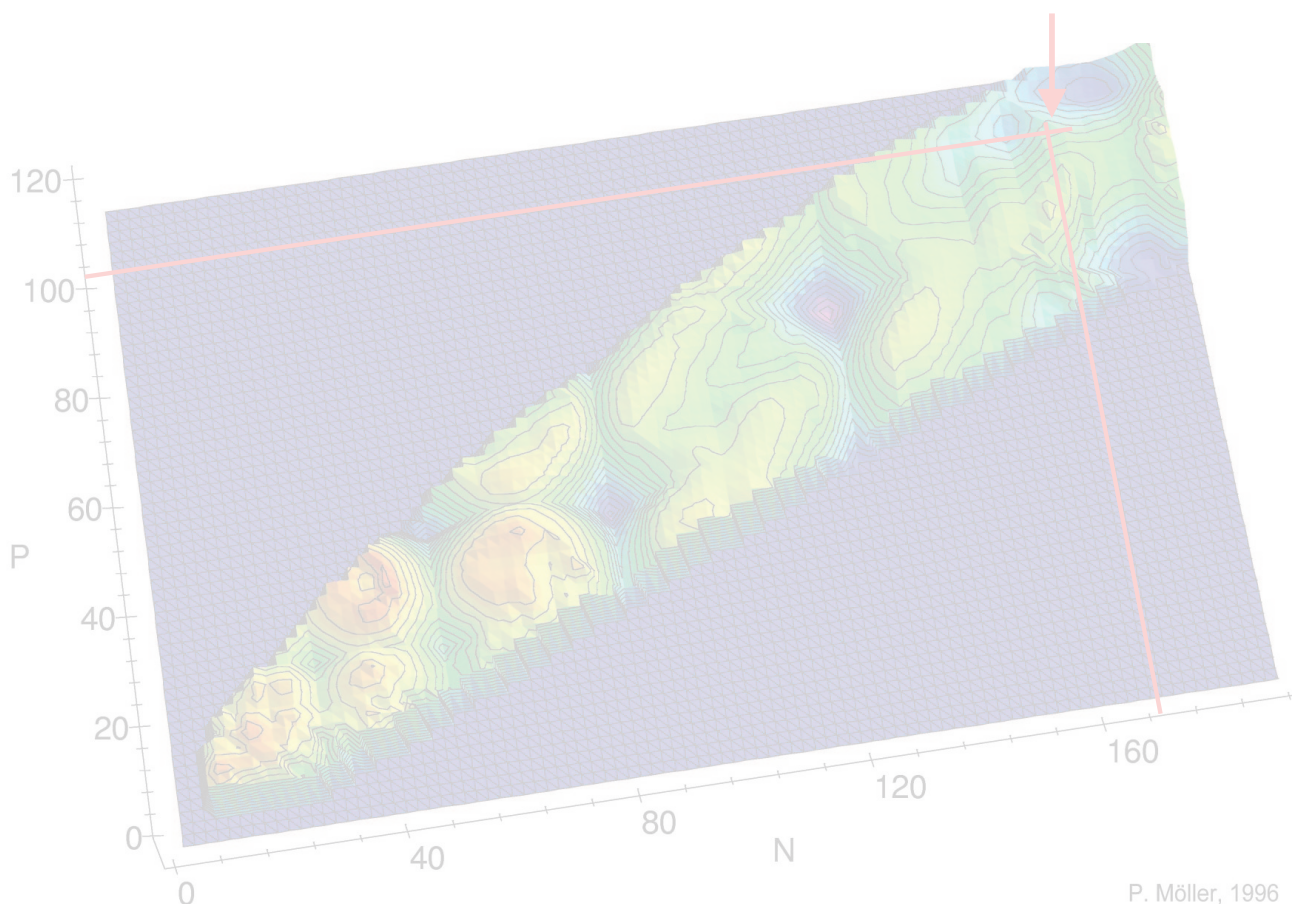




P. Möller, 1996

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

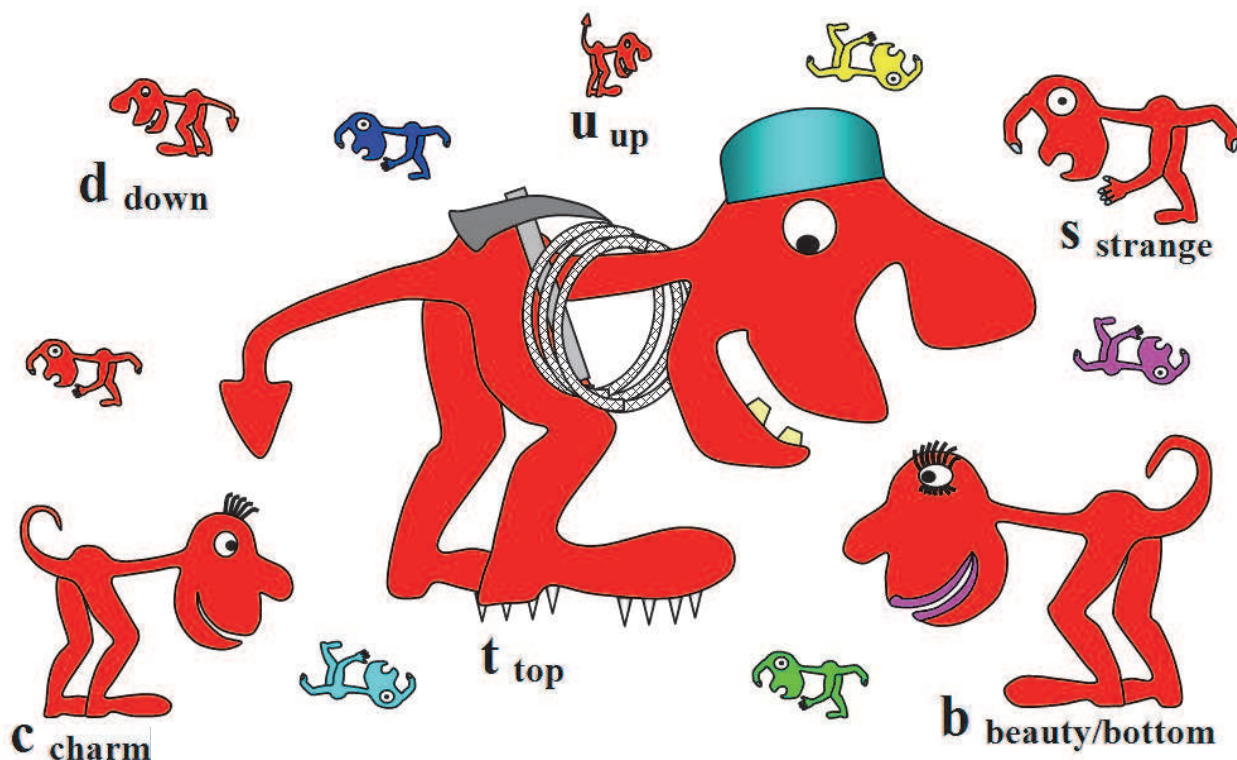
W par. 3.6 o rozpadach promieniotwórczych omówiliśmy najpierw rozpad beta minus (tzn. z emisją elektronu) a później rozpad alfa. Okazało się jednak, że rozpad alfa jest stosunkowo prosty do wyjaśnienia: „skotłowane” w jądrze protony i neutrony mają sporą szansę na utworzenie dość stabilnej struktury 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”, poczynając 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.

Wszystkie te badania doprowadziły do wniosku, że proton i neutron muszą składać się z mniejszych cząstek, nazwanych²⁰ przez M. Gell-Manna „kwarkami”. Dane doświadczalne wskazywały, że są dwa rodzaje kwarków – nazwano je *up* i *down* (górny i dolny). Kwarki w protonie i neutronie są trzy, więc mają ułamkowe ładunki elektryczne: kwark *up* ma ładunek $+2/3e$ a kwark *down* $-1/3e$, gdzie e jest, jak zwykle, ładunkiem elektronu²¹.

Na ryc. 1.10b przedstawiliśmy trzy kwarki w protonie i anty-protonie za włoskim rysownikiem, który wyobraża je sobie jako kolorowe kuleczki. Ziemia z dalekiego kosmosu też wygląda jak mała kuleczka, a ma swoich mieszkańców i ich miasta. Może więc i kwarki mają jakąś postać? Na ryc. 3.12 przedstawiamy kwarkowe „zoo”, tak jak je sobie wyobraża dr. T. Wróblewski z Akademii Pedagogicznej w Słupsku.



Ryc. 3.12. Kwarkowe „zoo”, według dr T. Wróblewskiego; rozmiary kwarków są tak dobrane, że czwarta potęga ich rozmiarów liniowych jest proporcjonalna do ich masy; „morda” kwarka – prawo, lewo wskazuje na znak ładunku, kwarki występują w trzech kolorach. © TW i GK

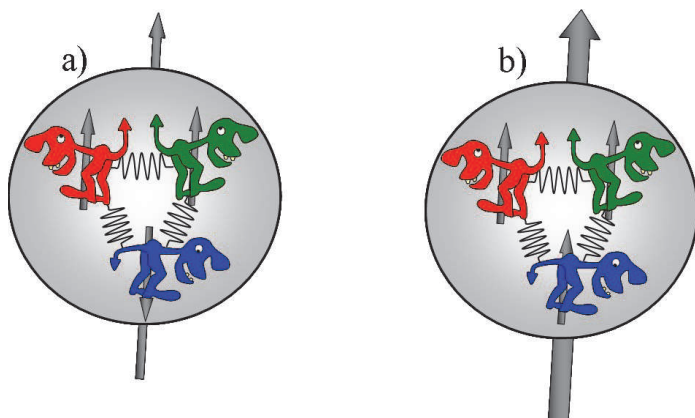
Kwarków jest sześć, pogrupowanych w trzy rodziny. Tylko dwa najbliższe z nich, kwark *up* i *down* wchodzą w skład „zwykłej” materii. Proton składa się z dwóch kwarków *up* i jednego cięższego, *down*. Neutron składa się z dwóch kwarków *down* i jednego *up*. Rozpad β^- (beta minus) polega na przemianie jednego kwarka *down* w neutronie w kwark *up*, rozpad β^+ na przemianie jednego kwarka *up* w protonie na kwark *down*. Reakcję rozpadu β^- (3.10) możemy więc zapisać jeszcze raz, tym razem jako rozpad kwarku *down*.



Łatwo zauważyć, że ładunek sumaryczny jest zachowany. Kwarki są fermionami, mają spin połówkowy, więc i sumaryczny spin w równaniu (3.16) jest zachowany. Jak się sumują spiny kwarków wewnątrz protonu i „cięższego protonu”, tzn. hiperonu delta Δ^+ , przedstawia rys. 3.13.

²⁰ Terminu „quark”, po niemiecku „twaróg” użył irlandzki pisarz James Joyce w „Trenie Finnegana”

²¹ Dokładniej, przez e oznaczyliśmy tu wartość bezwzględną ładunku elektronu.



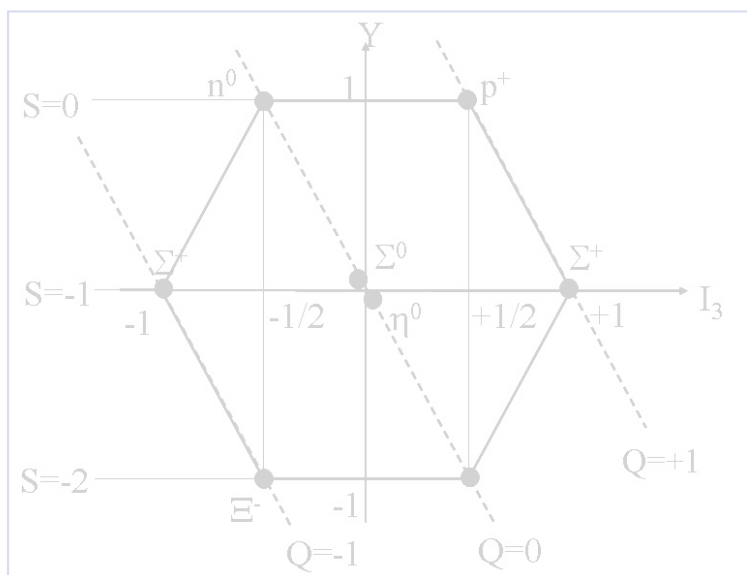
Ryc. 3.13. Proton (a) i cząstka Δ^+ są zbudowane tak samo – z dwóch kwarków *up* i jednego kwarku *down*; różnią się jedynie spinem, co powoduje, że cząstka Δ^+ jest aż o 30% cięższa niż proton (rys. dr T. Wróblewski © TW i GK)

Pozostaje jeszcze kwestia masy kwarków – i to jest problem „delikatny”. Mimo, że w każdym z nas są miliardy miliardów miliardów ($>10^{27}$) kwarków, ich masy znamy z bardzo kiepską dokładnością. Według najlepszych oczarowań, tak doświadczalnych jak teoretycznych, masa kwarku *up* zawiera się między $1,5 < m_{up} < 5$ a masa kwarku *down* między $5 < m_{down} < 9$, gdzie użytą jednostką jest stosowany już przez nas MeV/c^2 .

Zadziwiające jest, że tak lekkie (trzy) kwarki, nieco cięższe jedynie od elektronu $m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2$, składają się na tak ciężkie *nukleony* (przypominamy, o masach około $938 \text{ MeV}/c^2$). Jest to oczywiście, efekt relatywistyczny – kwarki w nukleonach są tak „rozpędzone”, że ich gigantyczną energię kinetyczną obserwujemy jako wzrost masy. Kto to wyjaśni dokładnie, uzyska bez wątpienia Nagrodę Nobla!

3.10. Cząstki elementarne

Hipoteza kwarków okazała się niezwykle cenna dla badań teoretycznych (również doświadczalnych) nad cząstkami elementarnymi. Podobnie jak Sommerfeld w 1916 roku, tak fizycy jądrowi w latach 60-tych XX wieku wyszukiwali nowe liczby kwantowe, zachowane w przemianach cząstek „elementarnych”. Tworzyli również schematy, przypominające tablicę Mendelejewa. Przypominamy jedną z takich klasyfikacji, dla cząstek „ciężkich”, tzw. barionów.



Ryc. 3.14. Próba klasyfikacji „ciężkich” cząstek elementarnych, tzw. barionów: oktet barionowy; obserwowane cząstki zostały uporządkowane według spinu S i ładunku elektrycznego Q ; neutron znajdujemy w lewym górnym rogu a proton w prawym (rys. TW)

Wprowadzenie pojęcia kwarku bardzo uprościło klasyfikację cząstek. Według naszej obecnej wiedzy, kwarki mogą łączyć się jedynie w grupy po dwa (kwark + anty-kwark) lub w grupy po trzy, jak $uud = \text{proton}$, $udd = \text{neutron}$.

Zestawy kwark + anty-kwark nazywamy *mezonami*, czyli cząstkami „pośrednimi”. Rzeczywiście, pierwszy (w 1949 r.) odkryty mezon, π^+ , ma masę $139 \text{ MeV}/c^2$. Składa się on z