

Aké častice existujú a ako ich možno kategorizovať?

V 30-tych rokoch XX. storočia fyzika považovala za fundamentálne nasledovné tri častice: **protón, neutrón a elektrón**. V tom čase fyzika poznala aj štvrtú časticu **neutríno**, ktoré vznikalo pri rozpade neutrónu a iných β -premenách, ale predpokladalo sa, že táto častica prakticky nehrá nijakú úlohu v štruktúre látky.

Koncepcia, ktorá predpokladala, že protón a neutrón vytvárajú atómové jadro a elektrón obal atómu, bola prevratnou v chápaní štruktúry látky.

Dôsledky poznania štruktúry jadra.

Ak máme atómové jadro, ktoré obsahuje A nukleónov z toho Z protónov a porovnáme jeho hmotnosť $M(A, Z)$ s hmotnosťou systému voľných Z protónov a $A-Z$ neutónov, zistíme, že atómové jadro vykazuje oproti systému voľných neutónov určitý hmotnostný deficit:

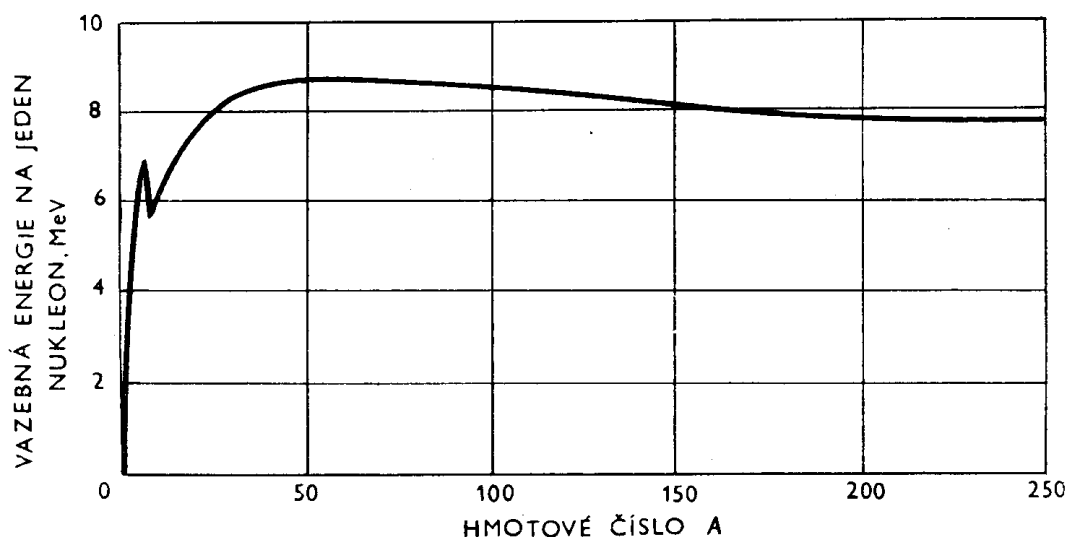
$$\Delta M = Zm_p + (A - Z)m_n - M(A, Z)$$

A prepočítame tento hmotnostný deficit na energiu podľa Einsteinoveho vzťahu dostaneme energiu:

$$W = \Delta M \cdot c^2$$

Táto energia sa nazýva väzbovou energiou jadra a predstavuje sebou tú energiu, ktorú je treba dodať atómovému jadru, aby sme ho rozložili na systém voľných nukleónov. Väzbovú energiu prepočítanú na jeden nukleón $w = W/A$ je možné považovať za mieru stability jadra – čím je hodnota parametra w pre jadro väčšia, tým je jadro stabilnejšie. Rôzne jadra sa vyznačujú rôznou hodnotou parametra w – najstabilnejším je jadro železa ^{56}Fe (vid'. Obr.1).

Dôsledkom toho, že väzbovú energiu na nukleón w je pre rôzne jadrá rôzna je to, že pri fúzii dvoch ľahkých jadier (s $A < 56$) na jadro ťažšie sa uvoľní energia a práve tak je exotermickým môže byť aj štiepenie ťažkých jadier.



Obr. 1: Väzbová energia na jeden nukleón ako funkcia hmotnostného čísla.

Táto skutočnosť mala nesmierny význam z hľadiska technologického aj z hľadiska gnozeologického – viedla:

- k vytvoreniu nukleárných zbraní vytvorených na princípe štiepenia (tzv. atómové bomby) aj na princípe fúzie (termonukleárne (vodíkové) bomby),
- k zvládnutiu riadenej štiepnej jadrovej reakcie, a teda k vytvoreniu jadrových reaktorov ako nových zdrojov energie,
- k pochopeniu toho aký je hlavný proces produkujúci energiu na Slnku a vo hviezdách, t.j., že tým procesom je fúzia vodíka na hélium porípade fúzia iných ľahkých jadier.

Treba si uvedomiť, že dovtedy ľudia nechápali, čo je hlavným zdrojom energie nášho Slnka či hviezd. Napr. I. Newton sa domnieval, že zdrojom energie Slnka je „klasické“ palivo, čo ho viedlo k vysloveniu názoru, že svet nemôže byť starší ako 6 000 rokov!

Podstata jadrových síl. Keď ľudia pochopili, že atómové jaro pozostáva z protónov a neutrónov problémom bolo už „iba“ vysvetliť povahu síl, ktoré držali atómové jadro (teda protóny a neutróny) pohromade. Tieto sily boli zjavne silnejšie ako odpudivé elektromagnetické sily. Japonský fyzik Yukawa prišiel s koncepciou, že jadrové sily sú spôsobené tým, že si nukleóny jadra vymieňajú istú výmennú časticu (Yukawovu časticu), ktorá spôsobuje, že sila medzi nukleónmi je:

$$F_N = g_N \frac{e^{-r/L_N}}{r^2} = g_N \frac{e^{-(m_Y c/\hbar)r}}{r^2},$$

kde faktor e^{-r/L_N} spôsobuje krátkosť dosahu jadrových síl – tieto sily efektívne pôsobia na vzdialenosť $L_N = \hbar / (m_Y c) \approx 10^{-15} \text{ m}$, kde $m_Y (\approx 140 \text{ MeV}/c^2)$ je hmotnosť výmennej Yukawovej častice. To, že častica má nenulovú hmotnosť je významné, lebo práve to spôsobuje konečnosť dosahu jadrových síl. Ak by $m_Y=0$ (ako je napr. v prípade fotónu) potom by jadrové sily mali (podobne ako elektrické sily) nekonečný dosah.

Yukawova častica bola nájdená v r. 1946 a dnes je známa ako π -mezón. Po objave π -mezónu bol objavený celý rad ďalších „elementárnych“ častíc a vznikla prirodzená otázka či tieto častice sú skutočne elementárne alebo či majú nejakú štruktúru.

Veľký progres v tejto oblasti nastal v r. 1964 kedy bola vytvorená tzv. **kvarková hypotéza** (Zweig, Gell-Mann). Podľa tejto hypotézy pozorované častice - hadróny nie sú elementárne ale pozostávajú z kvarkov. Vtedajší súbor pozorovaných častíc sa im podarilo vysvetliť pomocou 3 kvarkov: **u**, **d**, a **s** (z anglického „up“, „down“ a „strange“ a ich antičastíc $\bar{u}$, $\bar{d}$ a $\bar{s}$). V 70-tych rokoch boli objavené ďalšie kvarky: **c** a **b** (z anglického „charm“ a „bottom“). Tieto kvarky sú obsiahnuté v **D**-mezónoch a **D**-baryónoch (**d**-kvark) a v **B**-mezónoch a **B**-baryónoch (**b**-kvark). V polovici 90-tych rokov bol objavený aj t-kvark („top“-kvark), ten je však veľmi nestabilný a z neho formované častice zatiaľ neboli pozorované.

Okrem kvarkov boli objavené aj

- ďalšie fundamentálne leptóny (mión, τ -leptón a ich neutrína) a vektorové bozóny,
- vektorové bozóny: $W^\pm$, Z (r. 1983) – sú to výmenné častice slabých interakcií.

Z častíc, ktoré predpokladá Štandardný model boli objavené všetky až na Higgsov bozón. Hľadanie Higgsovho bozónu a skúmanie fyziky s ním spojenej bude hlavnou náplňou nových experimentov, ktoré sa pripravujú (experimenty na urýchľovači LHC)

O kvarkoch.

Kvarky interagujú medzi sebou silnou interakciou, ktorá je sprostredkovaná gluónmi. Gluóny sú vyžarované „silným“ nábojom kvarkov analogicky ako sú fotóny

vyžarované elektrickým nábojom. Avšak v prípade silných interakcií existujú tri druhy náboja (zatiaľčo v elektromagnetických interakciách len jeden druh). Zaujímavé je to, že pre skladanie „silných“ nábojov pri interakciách kvarkov, platia tie isté pravidlá ako pre miešenie farieb, preto sa náboj silných interakcií nazýva farebným nábojom alebo farbou.

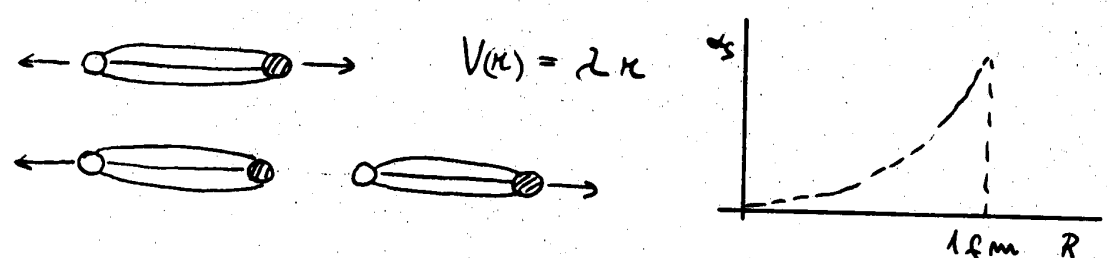
Kvark sa môže nachádzať v 3 nábojových stavoch (farbách): R , G a B (Red, Green, Blue). Nábojové stavy antikvarkov sú $\bar{R}$, $\bar{G}$ a $\bar{B}$ (anti-Red, anti-Green, anti-Blue). (R a $\bar{R}$ dáva bielu, analogicky G a $\bar{G}$ a tiež B a $\bar{B}$).

V prírode pozorujeme len „biele“ kombinácie kvarkov, v dôsledku toho (v súlade s pravidlami miešania farieb) kvarky vytvárajú:

- Dvoj-kvarkové kombinácie $q\bar{q}$ zložené z kvarku a antikvarku, ktoré sa nazývajú **mezóny**,
- Troj-kvarkové kombinácie qqq (resp. $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$), ktoré sa nazývajú **baryóny**.

Kde q reprezentuje jeden z kvarkov : u , d , s , c alebo b a $\bar{q}$ reprezentuje jeden z antikvarkov: $\bar{u}$, $\bar{d}$, $\bar{s}$, $\bar{c}$ alebo $\bar{b}$.

Uväznenie (confinement) kvarkov . V prírode sa voľné kvarky nevyskytujú $\rightarrow$ vyskytujú sa len ich viazané stavy (mezóny a baryóny). Je to dôsledok vlastností silných interakcií (viď. Obr.2).



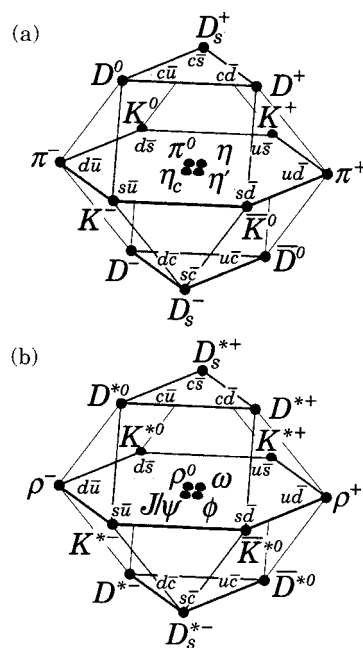
Obr. 2: Silové pôsobenie medzi kvarkom a antikvarkom -závislosť potenciálnej energie silnej interakcie medzi kvarkami od ich vzdialenosti.

Ak by sme vzdialovali kvark a antikvark tak pri vzdialenosti približne 1 fm (10^{-15} m) by energia silového pôsobenia medzi nimi bola postačujúca na vytvorenie nového páru $q\bar{q}$ a namiesto 1 páru $q\bar{q}$ by sme mali 2 páry.

Základné mezóny vytvorené z kvarkov u , d , s a c sú na Obr.3.

Obr. 3: Základné mezóny:

a) skalárne (spin 0) b) vektorové (spin 1),
základnú (prostrednú) vrstvu tvoria v prípade
skalárnych mezónov tvoria π , K , η a η' , ktoré
sú zložené z u , d a s kvarkov. V tejto skupine
je aj η_c , ktorý je $c\bar{c}$ systémom. Na hladinách
nad a pod základnou úrovníou sú D -mezóny
obsahujúce c kvark (nad) a $\text{anti-}D$ -mezóny
obsahujúce $\text{anti-}c$ kvark ($\bar{c}$). Analogickú
štruktúru majú aj vektorové mezóny, kde
základnú hladinu predstavujú K^* , ρ , ϕ a ω , J/ψ
má nejavný šarm ($c\bar{c}$). D^* -mezóny majú
javný “šarm” (obsahujú c alebo $\bar{c}$ kvark)



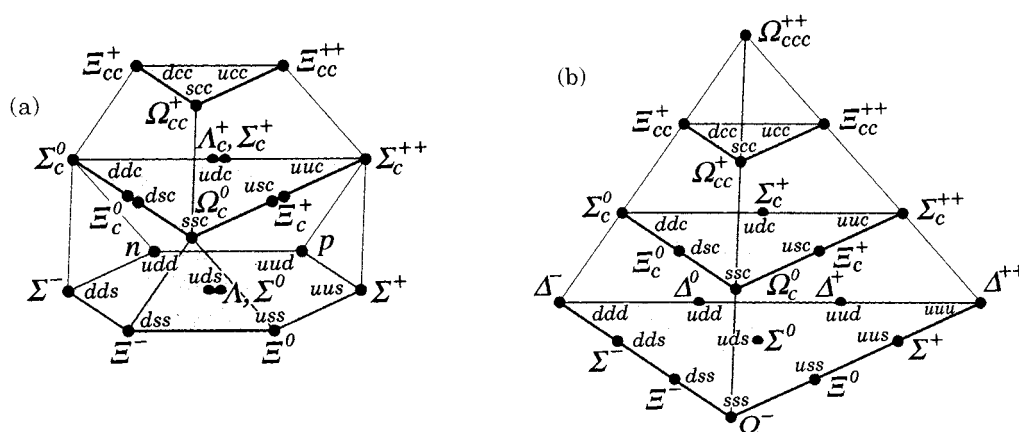
Vektorové a skalárne mezóny majú rovnakú kvarkovú štruktúru (napr. kvarková štruktúra ρ -mezónov je taká ako u π -mezónov), no sa líšia tým, že spiny kvarkov, z ktorých pozostávajú, sú paralelné (vektorové mezóny) resp. sú anti-paralelné (skalárne mezóny). Spinom sa rozumie vnútorný moment hybnosti častic.

Mezóny obsahujúce b -kvark sa nazývajú **B-mezóny**. Patria sem mezóny obsahujúce b -kvark. Z hľadiska fyziky sú veľmi dôležité, lebo umožňujú testovať súčasné fyzikálne teórie v mnohých bodoch.

Stabilné b -mezóny						
mezón	B^+	B^0	$\bar{B}^0$	B^-	B_s^0	$\bar{B}_s^0$
štruktúra	$u\bar{b}$	$d\bar{b}$	$\bar{d}b$	$\bar{u}b$	$s\bar{b}$	$\bar{s}b$
$c\tau[\mu\text{m}]^*$	496 ± 8.4	464 ± 9.6		496 ± 8.4	448 ± 18.6	
$m[\text{MeV}]$	5279.0 ± 0.5	5279.4 ± 0.5		5279.0 ± 0.5	5369.6 ± 2.4	

* $c\tau$ je dolet v $[\mu\text{m}]$

Základné baryóny vytvorené z kvarkov u , d , s a c sú na Obr.4



Obr. 4 : Základné baryóny (spin $\frac{1}{2}$) a Δ -rezonancie (spin $\frac{3}{2}$),.

Základnú hladinu tvorí oktet baryónov resp. deкупlet rezonancií zložený z u , d a s kvarkov. Prvú hladinu tvoria baryóny (resp. rezonancie) obsahujúce jeden c -kvark, druhú hladiny - baryóny (resp. rezonancie) obsahujúce dva c -kvarky. V prípade Δ -rezonancií existuje aj tretia hladina tvorená rezonanciou s 3 c -kvarkami

Ako si môžeme všimnúť medzi časticami základného baryónového oktetu sú aj proton (p) a neutrón (n).

Existujú aj baryóny obsahujúce b -kvarky tu patria:

$$\Lambda_b^0 \equiv (udb), \quad \Xi_b^0 \equiv (usb), \quad \Xi_b^- \equiv (dsb)$$

Experimentálne je zaznamenaná aj prítomnosť iných b -baryónov, no nie sú známe ich individuálne charakteristiky len charakteristiky ich zmesí.

Δ -rezonancie podobne ako vektorové mezóny sa vyznačujú tým, že majú veľmi krátku dobu života $\sim 10^{-23}$ s, zatiaľčo skalárne mezóny a základné baryóny žijú omnoho dlhšie $> 10^{-16}$ s. Medzi nimi neutrón žije 939.57 s a protón je stabilný.

V prípade baryónov sme hovorili iba o baryónoch zložených z kvarkov. Analogické štruktúry ako sú na obr. 3 a 4 je možné vytvoriť z antikvarkov - dostaneme tak anti-častice.