

Gell-Mann navrhl existenci prvních čtyř kvarků, později byly do teorie doplněny další dva. Hovoříme o tzv. **třech generacích kvarků**. Z první generace (kvarky d a u) jsou tvořeny běžné částice kolem nás, například neutron a proton. Druhá generace (kvarky s a c) se vyskytuje zřídka, tyto kvarky najdeme jen ve vysoce energetických procesech, například při srážkách kosmického záření s částicemi horních vrstev atmosféry. Poslední generaci (kvarky b a t) umíme vytvořit jen uměle na velkých urychlovačích. Všechny tři generace kvarků se ale ve Vesmíru vyskytovaly krátce po jeho vzniku a spoluutvářely jeho budoucí vlastnosti.

kvark	název	náboj	hmotnost	rok objevu
d	down	-1/3	7 MeV	1969
u	up	+ 2/3	5 MeV	1969
s	strange	- 1/3	150 MeV	1969
c	charm	+ 2/3	1,4 GeV	1974
b	beauty	- 1/3	4,3 GeV	1976
t	truth	+ 2/3	176 GeV	1995

Názvy kvarků znamenají: d -- *down* (dolů), u -- *up* (nahoru), s -- *strange* (podivný), c -- *charm* (půvabný), b -- *beauty* (krásný) a t -- *truth* (pravdivý). Někdy se poslední dva kvarky nazývají *bottom* a *top* (dolní a horní). Všechny kvarky mají spin (vlastní točivost) rovný jedné polovině. Částice tvořené z kvarků se nazývají *hadrony* a dělí se do dvou velkých skupin: *mezonů*, ve kterých jsou kvarky složeny po dvojicích (kvark a antikvark) a *baryonů* složených ze tří kvarků různých barev.

Asi deset mikrosekund po vzniku Vesmíru se volné kvarky pospojovaly do dvojic a trojic a vytvořily tak mezony a baryony. Tomuto procesu říkáme **hadronizace** hmoty.

V připojených tabulkách jsou nejznámější mezony a baryony složené z první generace kvarků (d , u). U mezonů se spin kvarků může složit souhlasně na hodnotu 1 nebo nesouhlasně na hodnotu 0. U baryonů složených ze tří kvarků může být výsledný spin buď 1/2 (jeden kvark má opačný spin) nebo 3/2 (všechny kvarky mají souhlasný spin).

mezony 1. generace

částice	stavba	název	spin
π^-	dd'	pion	0
π^0	$dd'+uu'$	pion	0
π^+	ud'	pion	0

ρ^-	du'	róon	1
ρ^0	$dd'+uu'$	róon	1
ρ^+	ud'	róon	1

Baryony 1. generace

částice	stavba	název	spin
n	ddu	neutron	1/2
p	uud	proton	1/2
Δ^-	ddd	delta baryon	3/2
Δ^0	ddu	delta baryon	3/2
Δ^+	duu	delta baryon	3/2
Δ^{++}	uuu	delta baryon	3/2

Samozřejmě známe i částice obsahující jiné kvarky než kvarky první generace. Například mezony obsahující podivný kvark s nazýváme K částice (kaony) a ty sehrály důležitou roli při poznávání levopřavé symetrie.

Baryony obsahující podivný s kvark nazýváme hyperony $\Lambda = uds$, $\Omega^- = sss$, Ξ hyperony, Σ hyperony) a nacházíme je často v produktech srážek kosmického záření s atmosférou.

V počátečních fázích Vesmíru byly tyto částice velmi hojné. Uměle je možné vyrobit i různé exotické částice obsahující kvarky c , b a t , jmenujme alespoň *charmonium* neboli částici J/ψ (vázaný stav cc') a *psilonium* (vázaný stav bb'). Při hledání kvark-gluonového plazmatu sehrály významnou roli kaony, hyperon Ω^- a částice J/ψ .

Ještě nesmíme zapomenout na jednu důležitou vlastnost kvarků -- barvu. Kvarky mají poločíselný spin a proto by podle Pauliho vylučovacího principu neměly existovat dva ve stejném kvantovém stavu. Přesto se v některých částicích nacházejí dokonce tři stejné kvarky naráz (například Δ^{++} částice je tvořena třemi kvarky u).

Kvarky se v těchto částicích od sebe musí nějak lišit a proto existují ve třech různých variantách. Tuto vlastnost fyzikové nazvali barvou. Představujeme si, že každý kvark existuje ve třech různých barevných provedeních. Kvarky vytvářejí bezbarvé částice: buď mezony (kvark a antikvark téže barvy, barva a antibarva se vyruší) nebo baryony (tři kvarky různých barev, které se složí na bílou). Tato "barva" však nemá se skutečnou barvou nic společného. Fyzikové barvu zavedli jen pro názornost (jak by bylo nehezké, kdybychom říkali: kvark v provedení 1, kvark v provedení 2, atd.).

Objevy kvarků

Gell-Mann na základě svého modelu předpověděl existenci částice Ω^- složené ze tří podivných kvarků. Tato částice byla nalezena ještě v roce 1964, kdy byl model předložen. V roce 1969 bylo v rozptylových experimentech na urychlovači SLAC ve Stanfordu potvrzeno, že neutron a proton se skládají ze tří kvarků. V tomto roce získal Murray Gell-Mann Nobelovu cenu za fyziku za příspěvek ke klasifikaci elementárních částic.

Silná interakce a barva

Co drží kvarky pohromadě tak, aby tvořily částici jako je neutron či proton? Je to silná interakce způsobovaná gluony. Slovo "glue" znamená v angličtině lepit nebo lepidlo. Gluony slepují kvarky k sobě dohromady a nedovolí jim uniknout. Je to ale velmi zvláštní lepidlo. Na velmi malých vzdálenostech lepí velmi slabě, kvarky se chovají skoro jako volné částice. Ale běda, vzdálí-li se na vzdálenost větší než 10^{-15} m. Tehdy začne gluonové lepidlo působit velmi intenzivně a nedovolí kvarkům vzdálit se z jejich vězení. Proto se po dlouhá léta nepodařilo získat volný kvark. Vždy jsou po dvojicích nebo po trojicích uvězněny v mezonu nebo v baryonu. Na volné kvarky je totiž třeba jít oklikou.

Dodáme-li látce velkou energii, stlačíme ji natolik, že průměrné vzdálenosti mezi kvarky budou menší než 10^{-15} m. Gluonové lepidlo přestane účinkovat a získáme tak kvark-gluonové plazma složené z volných kvarků a gluonů. Právě takové podmínky panovaly ve Vesmíru prvních 10 mikrosekund po Velkém třesku a v roce 2000 se je podařilo na malou chvíli napodobit v laboratoři CERN. Těmto experimentům se začalo symbolicky říkat *Malý třesk*.

Podivné vlastnosti gluonového lepidla jsou způsobeny tím, že samy gluony jsou barevné (přesně bychom měli říci, že mají stejný kvantový náboj jako kvarky, tzv. barevný náboj). Každý kvark má kolem sebe velký houf gluonů. *Gluonový kožich*, do kterého je kvark obléknut, je dokonce mnohem hmotnější než kvark sám. Čím blíže bychom pronikli ke kvarku, tím by jeho barva slábla. Říkáme, že gluony v okolí kvarku způsobují "*antistínění*" jeho náboje. Velikost barevného náboje ale určuje kvalitu interakce dvou kvarků a proto dva velmi blízké kvarky téměř neinteragují. Za všechno mohou gluonové kožichy!

U elektromagnetické interakce podobný jev neznáme. Pravda, každý elektron je obklopen houfem fotonů (elektrickým polem, chcete-li). Ale fotony nemají elektrický náboj a proto nezpůsobují žádné "*antistínění*". Elektrony jsou naopak "*stíněny*" virtuálními elektron-positronovými páry a to dokonce i ve vakuu. Ale elektromagnetická interakce, to je jiná kapitola a tak se raději vraťme ke kvarkům.

Kvark gluonové plazma

Skupenství kapalné, pevné a plynné zná snad každý. Při zvyšování teploty může látka postupně projít těmito skupenstvími. Dalším zvyšováním můžeme narušit elektronové obaly a látka se stává plazmatem. Jsou v ní volné nosiče náboje, látka reaguje jako celek na vnější elektrická a magnetická pole a sama je schopna taková pole vytvářet. Jako celek je ale elektricky neutrální.

Přes 99 % látky je ve Vesmíru ve stavu plazmatu. Ať jde o hvězdy samotné, mlhoviny či výtrysky kvasarů. Na naší Zemi je plazma v menšině, nalezneme ho v ionosféře, v kanálech blesků a v polárních zářích. Další zahřívání látky si můžeme představit jako ostřelování stále energetičtějšími částicemi. Při velmi vysokých energiích může dojít k tomu, že průměrné vzdálenosti mezi kvarky budou menší než 10^{-15} m a kvarky s gluony se začnou chovat jako volné. Vytvoří se zcela výjimečný stav hmoty — kvark gluonové plazma.

Historie experimentů

Nalezení kvark gluonového plazmatu se stalo snem experimentátorů někdy na konci 70. let. První experimenty tohoto typu se začaly provádět v 80. letech v Berkeley v laboratoři *LBNL* (Lawrence Berkeley National Laboratory) v USA. V letech 1994 až 2000 se hledání kvark-gluonového plazmatu přesunulo do laboratoře CERN (European Center for Nuclear Research, Evropské středisko pro jaderný výzkum) do Evropy. Svazek vysoce urychlených částic (3,5 TeV) olova Pb 208 v urychlovači SPS (Super Proton Synchrotron) byl nastřelen na statický terčik, taktéž z olova. Uvolněná energie byla natolik obrovská, že stačila k "roztavení" protonů a neutronů na kvarky a gluony. V průběhu šestiletého výzkumu bylo uskutečněno 7 experimentů (NA44, NA45/CERES, NA49, NA50, NA52, NA57/WA97 a WA98), na kterých se podílelo přes 500 vědců z více jak dvaceti zemí světa. Experimenty byly také prováděny s atomy zlata nastřelenými na olověný terčik.

Objev nové formy hmoty, kvark-gluonového plazmatu, byl oznámen 10. února 2000 na slavnostním zasedání komplexu laboratoří CERN.

V roce 2000 se experimenty stěhují opět do USA, do Brookhavenu (Long Island, USA) na výkonnější zařízení RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider). Dosažitelné energie budou desetkrát vyšší než v laboratoři CERN a lze tak očekávat systematický průzkum tohoto exotického stavu hmoty. Experimenty jsou prováděny s izotopem zlata AU 197.

Do roku 2005 by měl být dostavěn urychlovač LHC (Large Hadron Collider) v laboratoři CERN a experimenty se poté opět vrátí k nám, do Evropy.

Detekce kvark gluonového plazmatu

V laboratorních experimentech vydrží kvark gluonové plazma po velmi krátkou dobu. Nalétávající urychlená jádra olova způsobí srážky protonů a neutronů s velkou energií. Na krátkou chvíli 10^{-22} sekundy se neutrony s protony "roztaví", vznikne kvark-gluonová koule, která se rychle rozpíná a ochlazuje. Kvarky se začnou seskupovat po dvojicích a trojicích do hadronů, vzniká opět normální hmota. V laboratoři na vznik kvark-gluonového plazmatu usuzujeme nepřímou z jeho projevů, které jsou dobře teoreticky propočítány. Přímé sledování je prakticky vyloučeno. Pozorují se ale velmi precizně produkty rozpadu kvark-gluonové koule.

Z teoretických předpovědí je známo, že oproti normálním srážkám hadronů dojde v kvark-gluonové fázi k potlačení produkce kvarku *c* a naopak posílení produkce kvarku *s*. V praxi to znamená snížení počtu pozorovaných částic J/ψ (vázaný stav cc') a zvýšení počtu pozorovaných kaonů (mezony obsahující kvark *s*).

Oba dva jevy byly v experimentech v laboratoři CERN pozorovány a jde o hlavní argumenty ve prospěch existence kvark-gluonové fáze. Samozřejmě je mnoho dalších nepřímých indicií: pozorované zvýšení elektromagnetického vyzařování, zpětný dopočet teplot a hustot energie kvark-gluonové koule z hybností vede na hodnoty převyšující kritickou mez pro vznik kvark-gluonového plazmatu, sledování skladby produktů rozpadu odpovídá vytvoření kvark-gluonové fáze i další.

Pro existenci kvark-gluonového plazmatu (QGP) hovoří celkem 7 argumentů:

1. **Sledování částic J/ψ :** Při vysokých energiích se objevují při srážce hadronů částice J/ψ . Po vytvoření kvark gluonové fáze by měl teoreticky jejich počet razantně klesat, právě tento jev byl velmi dobře pozorovatelný.
2. **Sledování podivných kvarků:** Při srážkách hadronů vzniká 20 % podivných (s) kvarků. V kvark-gluonovém plazmatu by mělo vznikat 40 % s kvarků. V experimentu se pozorovaly kaony (mezony s podivným kvarkem) a baryon Ω^- (sss). Bylo zjištěno patnáctinásobné zvýšení počtu částic Ω^- .
3. **Sledování fotonů z QGP:** Při vyšších energiích bylo pozorováno zvětšení počtu fotonů. V experimentu je však značný šum z jiných zářivých procesů, sledování fotonů není příliš průkazné.
4. **Sledování vektorových mezonů (ρ, ω):** Prošla-li látka kvark-gluonovou fází, probíhá rozpad na leptonové páry jiným způsobem než obvykle.
5. **Sledování rozložení hybnosti produktů:** Zpětným propočtem lze zjistit, jak horká byla oblast ze které částice vylétly. Vychází 100 MeV. Hybnosti částic "zamrzly" v okamžiku po hadronizaci a nesou informaci o této fázi.
6. **Sledování skladby různých typů produktů:** Podle množství různých produktů experimentu lze odhadnout teplotu při hadronizaci. Vychází 180 MeV, což je v souladu s kritickou teplotou nutnou pro dosažení kvark-gluonové fáze.
7. **Bose-Einsteinova interferometrie (Brown, Twiss):** Z vyhledávání párů částic je touto metodou možné odhadnout rozměry oblasti, ve které částice vznikly. Ze známé teploty lze dopočítat hustotu energie, která vychází dvakrát až čtyřikrát vyšší než kritická hustota nutná pro vznik kvark-gluonové fáze.

Můžeme jen doufat, že experimenty připravované v Brookhavenu i pozdější experimenty na urychlovači LHC v laboratoři CERN po roce 2005 nám umožní dobře poznat tento nový stav hmoty a lépe tak pochopit procesy, které probíhaly při samých počátcích Vesmíru.

Kvarky, a co dál?

Kvarky mají podle současných znalostí bodovou strukturu až do rozměrů 10^{-18} m (tisícina velikosti protonu).

Atomové jádro. Objasněte pojem atomové jádro. Z kterého experimentu vyplývá existence atomového jádra? Stručně popište tento experiment a jeho výsledky. Uveďte základní vlastnosti atomového jádra. Definujte vazebnou energii jádra, napište vztah pro výpočet vazebné energie na základě znalosti hmotnosti jádra. Vysvětlete, proč je možné udávat v jaderné fyzice místo klidové hmotnosti jader jejich klidovou energii v MeV, definujte MeV, uveďte Einsteinův vztah ekvivalence hmotnosti a energie. Srovnajte řádovou hodnotu vazebné energie jader s řádovými hodnotami ionizační energie atomu nebo disociační energie molekuly.

2. Objev protonu. Stručně popište experiment, při kterém byl objeven proton. Kdo ho objevil? Proveďte rozbor experimentu, stručně popište princip mlžné komory a vysvětlete proč detekuje pouze nabitě částice. Napište schéma příslušné přeměny a proveďte bilanci elektrického náboje během přeměny. Uveďte základní charakteristiky protonu a srovnajte je s charakteristikami elektronu a neutronu. Zařaďte proton do systému elementárních částic. V čem spočívá význam objevu protonu pro rozvoj představ o struktuře jádra?

3. Vývoj modelů struktury jader. Charakterizujte model jádra založený na protonech a model jádra založený na elektronech. Uveďte experimentální východiska každého modelu. Stručně popište představy modelů. Uveďte experimentální skutečnosti, které tyto modely nedokázaly objasnit. Srovnajte tyto představy se stavem současných poznatků, objasněte původ hmotnostního úbytku jádra, objasněte původ a vlastnosti sil, které drží jádro pohromadě, objasněte anomální hodnotu gyromagnetického poměru jádra, objasněte původ elektronů emitovaných některými jádry.

4. Objev neutronu. Stručně popište experiment, při kterém byl objeven neutron. Kdo ho objevil? Proveďte rozbor experimentu, napište schéma příslušné přeměny a proveďte bilanci elektrického náboje během přeměny. Uveďte základní charakteristiky neutronu a srovnajte je s charakteristikami elektronu a protonu. Zařaďte neutron do systému elementárních částic. V čem spočívá význam objevu neutronu pro rozvoj představ o struktuře jádra?

5. Heisenbergův-Ivaněnkův model jádra. Uveďte základní představy tohoto modelu. Jak tento model objasňuje stabilitu jádra obsahujícího protony? Uveďte základní vlastnosti jaderných sil. Napište vztah pro určení náboje jádra na základě znalosti počtu protonů v jádře. Napište vztah pro výpočet hmotnosti jádra na základě znalosti počtu protonů a neutronů v jádře a jeho hmotnostního úbytku. Objasněte původ hmotnostního defektu, proč není hmotnost jádra rovna součtu hmotností částic, z nichž se jádro skládá? Definujte pojem symetrické jádro.

6. Nukleon. Uveďte dva významy pojmu nukleon. Zařaďte nukleony do systému elementárních částic, uveďte jejich základní charakteristiky. Pozorujeme u nukleonů další vnitřní strukturu nebo je lze považovat za bodové částice? Srovnajte vlastnosti jednotlivých nukleonů. Objasněte pojem izospin.

7. Nuklidy. Objasněte pojem nuklid. Definujte protonové, neutronové a nukleonové číslo. Uveďte a vysvětlete symboliku značení nuklidu. Objasněte pojmy prvek, izotop, izoton, izobar, izomer a radionuklid. Srovnajte pojem izomer v jaderné fyzice s pojmem izomer v chemii.

8. Základní charakteristiky atomového jádra. Uveďte základní charakteristiky atomového jádra. Definujte jednotlivé charakteristiky, jejich vzájemné vztahy, popřípadě uveďte, jakých hodnot mohou nabývat. Uveďte, v jakých jednotkách se jednotlivé charakteristiky udávají.

9. Jaderné síly. Objasněte podstatu jaderných sil. Uveďte základní vlastnosti jaderných sil. Vysvětlete předpoklady Yukawovy teorie jaderných sil. Proveďte odhad hmotnosti mezonů na základě dosahu jaderných sil.

2 Radioaktivita

10. Radioaktivita. Objasněte jev radioaktivity. Vysvětlete pojem radioaktivní přeměna a srovnajte s pojmem jaderná přeměna. Uveďte známé typy radioaktivního záření. Objasněte podstatu jednotlivých typů radioaktivního záření. Vysvětlete rozdíl mezi umělou a přirozenou radioaktivitou. Napište diferenciální tvar zákona radioaktivní přeměny a popište jednotlivé veličiny, které v něm vystupují. Objasněte statistickou podstatu tohoto zákona. Definujte aktivitu a její jednotku. Na základě diferenciálního tvaru zákona určete využitím metody separace proměnných exponenciální tvar tohoto zákona. Slovně definujte poločas přeměny T . S využitím exponenciálního tvaru zákona určete jeho vztah s rozpadovou konstantou. Nakreslete graf závislosti počtu nepřeměněných jader v závislosti na čase. Na grafu demonstруйте význam poločasu přeměny. Za jakou dobu se přemění všechna jádra radioaktivní látky? Jakých hodnot může poločas přeměny nabývat, uveďte příklady.

11. Radioaktivní přeměna. Objasněte pojem radioaktivní přeměny. Uveďte známé typy radioaktivních přeměn. U každé přeměny uveďte schéma přeměny a objasněte jaký prvek po přeměně vzniká, případně pod vlivem které ze základních interakcí přeměna probíhá. Definujte separační energii pro jednotlivé typy radioaktivních přeměn. Jaké znaménko musí mít hodnota těchto separačních energií? Objasněte pojem radioaktivní přeměnová řada (rozpadová řada). Kolik je známo typů přeměnových řad a proč existuje pouze tento počet řad? Jmenujte jednotlivé typy řad (uveďte alespoň jeden významný člen a konečný člen každé řady).

12. Stabilita jader. Objasněte graf stability atomových jader. Definujte protonové a neutronové číslo. Nakreslete náčrtek grafu stability a objasněte na něm pojem linie stability. Objasněte, proč pro lehká jádra leží linie stability na přímce $Z = N$, zatímco pro těžší jádra je N mírně větší než Z . Definujte vazebnou energii na jeden nukleon – eV. Proč je eV vhodnější charakteristikou k posouzení stability jádra než vazebná energie jádra? Nakreslete graf závislosti eV na nukleonovém čísle. Která jádra jsou nejstabilnější a proč? Ukažte na tomto grafu, které typy reakcí jsou exoenergetické. Objasněte pojmy: mapa nuklidů, údolí nuklidů, pevnina nuklidů a ostrov stability.

3 Jaderné reakce

13. Jaderné reakce. Objasněte pojem jaderná reakce. Napište obecné schéma zápisu jaderné reakce. Uveďte zákony zachování, které musí být splněny u jaderných reakcí. Uveďte znění každého zákona a запиšte jej pomocí rovnice. U každého zákona zachování uveďte definici zachovávaný se veličiny a její jednotku. Dále uveďte podmínky platnosti jednotlivých zákonů.

14. Typy jaderných reakcí. Definujte energii reakce. Uveďte dělení reakcí z hlediska hodnoty energie reakce. Vysvětlete pojem aktivační, resp. prahová energie reakce. Vysvětlete pojem binární reakce a uveďte alternativní schéma zápisu binární reakce. Uveďte dělení reakcí z hlediska hmotnosti reaktantů a produktů jaderné reakce.

15. Reakce štěpná a slučovací. Definujte pojmy štěpná jaderná reakce a slučovací jaderná reakce. Uveďte alternativní pojmenování slučovací reakce. Načrtněte graf závislosti vazebné energie na nukleon v závislosti na nukleonovém čísle a objasněte na něm, v jakých případech budou tyto typy reakcí exoenergetické. Uveďte podmínky, za kterých mohou uvedené typy reakcí probíhat a proveďte jejich srovnání. Popište princip řetězové štěpné reakce na příkladu štěpení uranu. Za jakých podmínek reakce probíhá lavinovitě? Objasněte pojem řízená řetězová reakce. K čemu se používá moderátor? Uveďte příklady moderátorů a látek, které pohlcují neutrony. Uveďte alespoň řádovou hodnotu energie reakce. Stručně popište princip jaderného reaktoru a jaderné elektrárny. Popište princip slučovací reakce na příkladu slučování deuteria. Je v současnosti slučovací reakce zvládnuta po technické stránce tak, aby mohla být využita např. v energetice? Uveďte, kde v přírodě probíhají slučovací jaderné reakce a jaký to má pro nás význam.

16. Modely atomového jádra. Stručně popište kapkový model jádra a jeho použití. Napište Weizsäckerovu formuli pro výpočet vazebné energie jádra a objasněte původ jednotlivých členů v této formuli. Popište slupkový model atomového jádra. Uveďte experimentální východiska slupkového modelu a jeho základní předpoklady. Na základě slupkového modelu objasněte, proč pro lehká jádra leží linie stability v blízkosti přímky $N = Z$ a proč pro stabilní těžší jádra začíná převažovat počet neutronů. Uveďte některé další modely atomového jádra.