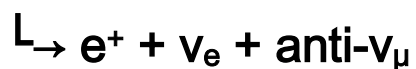
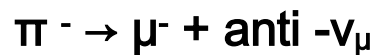


a. **Srážky částic a jader kosmického záření s jádry atmosféry**

→

spousta hadronů → mezi nimi spousta mezonů π:



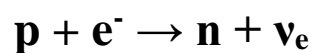
ν_μ

Intenzivní zdroj neutrin a antineutrin ν_μ a ν_e

poměr mezi počtem ν_μ a ν_e je $R(\nu_\mu/\nu_e) = 2$

zároveň intenzivní zdroj mionů **Neutrina při výbuchu supernovy:**

a. **Neutrina vznikají při záchytu elektronů protony:**



.....



kde $i = e, \mu, \tau$

.....
<http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika5.htm> (V.Ullmann)

Vlastnosti a interakce nejdůležitějších elementárních částic

V tomto odstavci si stručně přiblížíme jednotlivé nejvýznačnější částice mikrosvěta, jejich původ a vznik při interakcích částic, jejich vlastnosti a hlavní způsoby, jak interagují s dalšími částicemi. Při tomto stručném popisu vlastností elementárních částic se nebudeme držet výše nastíněné systematiky, ale budeme postupovat od známých, rozšířených a využívaných částic k "exotičtějším" méně známým a skrytějším částicím, jejichž význam pro stavbu a vlastnosti hmoty někdy ani není znám.

Elektrony a pozitrony

Elektrony e^- jsou základními, skutečně elementárními, stabilními částicemi hmoty, které tvoří elektronový obal atomů. Elektron je nositelem záporného elementárního náboje $e = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{C}$, jeho klidová hmotnost je $m_e = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{kg}$ ($=511 \text{keV}$), řadí se mezi leptony, je fermionem se spinem $(1/2)h$. Magnetický moment elektronu je $e \cdot h / 4\pi m_e$ - tzv. *Bohrův magneton*. Podle představ současné kosmologie elektrony vznikly v nejranějších fázích vývoje vesmíru po velkém třesku, při oddělování elektromagnetické a slabé interakce. Kromě toho elektrony vznikají při řadě procesů a interakcí jiných elementárních částic, např. při β^- -radioaktivitě $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu_e^-$ a při mnoha dalších procesech, jak je vidět z níže popsaných interakcí ostatních částic. Kromě atomové a jaderné fyziky hrají elektrony klíčovou roli v jevech elektromagnetických, jejichž převážná většina je založena na pohybu elektronů, vytvářejících **elektrický proud**.

Elektron byl, jakožto vůbec první elementární částice stavby hmoty, objeven v r.1895 J.J.Thomsonem při studiu elektrických výbojů v plynech.

Pozitron e^+ je antičásticí k elektronu, má tudíž stejnou hmotnost a spin, elektrický náboj je stejné velikosti, ale opačného (kladného) znaménka. Ve vakuu je pozitron

stabilní částicí, stejně jako elektron. Jakmile se však nachází v látkovém prostředí zaplněném atomy a tudíž i elektrony, zaniká v **anihilační interakci** s elektrony: $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$, přičemž vznikají dvě kvanta záření gama rozlétající se v protilehlých směrech.

Pozitronium

Těsně před vlastní anihilací elektron e^- a pozitron e^+ mohou na chvíli kolem sebe **obíhat** (obíhají kolem společného těžiště) - utvoří zvláštní **vázaný systém** (podobný atomu vodíku) zvaný **positronium** (Ps). Rozměr "atomu" pozitronia je dvojnásobek atomu vodíku, vazbová energie pozitronia je 6,8 eV. Podle vzájemné orientace spinů elektronu a pozitronu může být pozitronium buď v singletním stavu 1S_0 s opačně orientovanými spiny - tzv. *parapozitronium* p-Ps (1/4 případů), nebo v tripletním stavu 3S_1 se souhlasně orientovanými spiny - tzv. *orthopozitronium* o-Ps (3/4 případů).

Tento systém pozitronia je však **nestabilní**, obě částice se za vyzařování elektromagnetických vln k sobě po spirále přibližují; u p-Ps za cca 120ps na sebe "dopadnou" a dojde k vlastní anihilaci na dva fotony γ . V případě o-Ps je anihilace na dva fotony zakázána kvantovými výběrovými pravidly (souvisí se zákonem zachování spinového momentu hybnosti - každý z fotonů má spin 1), takže o-Ps by se ve vakuu rozpadalo emisí 3 fotonů s poměrně dlouhou dobou života cca 140ns; v látce však pozitron vázaný v o-Ps daleko dříve stačí anihilovat s některým "cizím" elektronem z okolního prostředí, který má opačnou orientaci spinu - vznikají opět dva fotony γ .

Při anihilaci pozitronu s elektronem vznikají v naprosté většině případů 2 fotony gama, jak bylo výše uvedeno. Někdy jich však může vzniknout i *více*, avšak s velmi malou pravděpodobností (pravděpodobnost, že při e^-e^+ -anihilaci vznikne $2+n$ fotonů je úměrná α^n , kde $\alpha=1/137$ je konstanta jemné struktury). Pokud pozitron interaguje s elektronem vázaným v atomovém obalu, může být zánik takového páru doprovázen i vysláním pouze *jediného* fotonu, přičemž část energie a příslušná hybnost mohou být předány buď atomovému jádru nebo některému z ostatních elektronů; pravděpodobnost tohoto procesu je však velice malá a v praxi se neuplatňuje.

Doba života pozitronů v látkách činí řádově stovky pikosekund. Přesná hodnota však záleží na lokálních elektronových hustotách a konfiguracích, čehož se využívá ve spektroskopické metodě **PLS** (Positron Lifetime Spectroscopy). Zkoumaný materiál se lokálně ozařuje β^+ - γ zářičem (nejčastěji ^{22}Na), přičemž doba života pozitronů se stanovuje na základě měření zpožděných koincidencí mezi detekcí fotonu záření γ z ozařujícího radionuklidu (u ^{22}Na je to γ 1274 keV) a detekcí anihilačního fotonu γ 511 keV.

V pozemské přírodě se tudíž pozitrony za normálních okolností nevyskytují, vznikají jen na kratičkou dobu při určitých interakcích elementárních částic a vzápětí (za cca 10^{-10} - 10^{-7} s) opět anihilují. Nejznámějším procesem, při němž vznikají pozitrony, je β^+ -radioaktivita způsobená přeměnou protonu p^+ v jádře na neutron n^0 , pozitron e^+ a neutrino: $p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu_e$. Pozitrony jsou dále poměrně častými produkty při interakcích částic při vysokých energiích (viz níže).

Pozitron byl poprvé pozorován v r.1932 C.D.Andersonem v kosmickém záření detekovaném pomocí Wilsonovy mlžné komory umístěné v magnetickém poli, kde se objevila stopa částice stejných ionizačních vlastností jako elektron, ale s opačným směrem stáčení v magnetickém poli, tedy "kladný" elektron.

Protony a neutrony

Protony a neutrony, souhrnně nazývané **nukleony**, jsou stavebními částicemi atomových jader, jsou to těžké částice ze skupiny baryonů, vykazují silnou interakci což je řadí mezi **hadrony**. Jsou přírodního původu - vznikly v "ohnivé peci" velkého třesku na počátku tzv. hadronové éry, v první miliontině sekundy existence vesmíru. Kromě toho vznikají při řadě procesů a interakcí jiných elementárních částic; při radioaktivních přeměnách β^{\pm} dochází k vzájemným přeměnám neutronů a protonů. **Proton** p^+ nese kladný elementární elektrický náboj stejné absolutní velikosti e jako elektron, jeho klidová hmotnost je $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{kg} = 1836,151 m_e = 938,256 \text{MeV}$. Magnetický moment protonu je $e \cdot h / 4\pi m_p$ - tzv. *jaderný magneton*, který je 1836-krát menší než Bohrov magneton (zjednodušeně si to můžeme představit tak, že při stejném spinu a náboji těžký proton "rotuje pomaleji", než lehký elektron). Proton je **stabilní** částice (pomineme zde některé spekulace o možném rozpadu protonu *). Počet protonů v jádře (protonové číslo Z) určuje zároveň i počet elektronů v obalu a tudíž i "velikost" atomu a jeho chemické vlastnosti při slučování s dalšími atomy.

*) Tzv. *grandunifikační teorie* připouštějí **nestabilitu protonu**, který by se měl rozpadat na miony či pozitrony a na jeden neutrální či dva nabitě piony [$p^+ \rightarrow (\mu^+ \text{ nebo } e^+) + (\pi^0 \text{ nebo } \pi^+ + \pi^-)$] s dobou života řádově $\tau_p \approx 10^{30}$ - 10^{33} roků. Tento rozpad by byl způsoben přeměnou kvarku na lepton prostřednictvím bosonu X a vzhledem obrovské hmotnosti bosonu X je jeho pravděpodobnost nesmírně malá.

Experimenty zatím dávají odhady $\tau_p > 10^{30}$ let. Tyto pokusy o pozorování rozpadu protonu se

provádějí hluboko pod zemí (z důvodu odstínění kosmického záření), kde jsou umístěny velké nádrže s vodou, opatřené mnoha fotonásobiči, které by mohly zaregistrovat slabé záblesky způsobené průchodem rychlých částic vzniklých jako produkty rozpadu protonu.

Nejdokonalejším zařízením tohoto druhu je **Superkamioka-NDE** v Japonsku, které sice nezaznamenalo žádný rozpad protonu, ale bylo velice úspěšné při detekci a spektrometrii neutrin (viz pasáž "[Neutrino](#)" v §1.2 "Radioaktivita").

Neutron n^0 je elektricky neutrální, jeho klidová hmotnost $m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27} \text{kg} = 1838,65 m_e = 939,55 \text{MeV}$ je o něco vyšší než u protonu. Ve stabilních atomových jádrech jsou neutrony stabilní, volný neutron (ve vakuu) se **rozpadá** s poločasem cca 13minut β^- -rozpadem $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu_e$ na proton, elektron a antineutrino.

Protony, jakožto jádra vodíku, byly objeveny při studiu elektrických výbojů v plynech zhruba ve stejné době jako elektrony (koncem 19.stol.). Neutrony byly objeveny až v r.1932

J.Chadwickem při ostřelování jader berylia částicemi alfa

Antiproton p^- se od protonu liší jen svým záporným nábojem a opačným směrem magnetického momentu, ve vakuu je rovněž stabilní částicí. **Antineutron** n^0 je neutrální částicí jako neutron, od něhož se liší jen opačnou orientací magnetického momentu, poločas jeho rozpadu ve vakuu je stejný jako u neutronu, rozpadá se podle schématu $n^0 \rightarrow p^- + e^+ + \nu_e$ na antiproton, pozitron a neutrino.

Antiprotony a antineutrony se v pozemské přírodě nevyskytují, vznikají při interakci částic vysokých energií a zase pak zanikají interakcemi s nukleony.

Vzhledem k zákonu zachování baryonového čísla mohou být antinukleony produkovány pouze v párech společně s nukleony. Nejobvyklejší způsob produkce antiprotonů p^- je v reakcích



přičemž prahová kinetická energie ostřelujícího protonu (v laboratorní terčíkové soustavě) činí asi 5,6GeV, resp. 3,6GeV; pokud však tato interakce probíhá při ostřelování jádra, může být prahová energie produkce antiprotonů i nižší (kolem 3GeV). Antineutrony vznikají v podobných reakcích $p + p \rightarrow 2p + n + n'$, resp. $p + n \rightarrow p + 2n + n'$, dále pak v reakcích antiprotonů $p^- + p \rightarrow n + n'$, $p^- + n \rightarrow n + n' + \pi^-$.

Při interakcích antinukleonů jsou nejdůležitější interakce (p^-,p) antiprotonů s protony.

Při vysokých energiích zde mohou vznikat i další těžké částice jako jsou hyperony, což bude zmíněno níže. Při nízkých energiích antiprotonů nebo při jejich zastavení (viz níže) dochází k **zániku nukleonových párů** s produkcí mezonů, kvant gama, popř. dochází k reakci $p'+p \rightarrow n+n'$ ("výměna náboje"). Zánik párů (p',p) je silnou interakcí, při níž nejčastěji vznikají mezony π (jen v malém procentu mezony K); nejmenší počet vzniklých mezonů vzhledem k zákonu zachování hybnosti jsou 2 mezony π , většinou jich však vzniká více, nejčastěji 5 mezonů - typická interakce tohoto druhu je: $p'+p \rightarrow 2\pi^+ + 2\pi^- + \pi^0$.

Při vniknutí antiprotonu do látky dochází vlivem elektromagnetické interakce k ionizaci atomů, podobně jako u každé jiné nabitě částice, čímž se antiproton brzdí a zpomaluje. Během tohoto zpomalování může antiproton zaniknout při interakci s jádrem, avšak může se zpomalit (či téměř zastavit) natolik, že může být zachycen protonem (vodíkovým jádrem) - vzniká nový "exotický atom", zvaný **protonium**, sestávající z protonu a antiprotonu obíhajících kolem společného těžiště. Podobně může být zachycen i jiným těžším jádrem na některé vyšší dráze (odkud vyrazil elektron) a při svém oběhu pak přechází na nižší dráhy, což je doprovázeno emisí buď fotonů X-záření, nebo Augerových elektronů. Nakonec je pohlcen jádrem a zanikne intrakcí s protonem za vzniku pionů.

Antihmota

Antiproton, kolem něhož obíhá pozitron, tvoří atom "**antivodíku**", který má analogické vlastnosti jako obyčejný vodík. Antiprotony a antineutrony mohou vytvářet "anti-atomová jádra", kolem nichž mohou obíhat pozitrony v úplně stejných konfiguracích jako je tomu u příslušných obyčejných atomů - jedná se o "**antiatomy**", které by v rámci "**antisvěta**" měly úplně stejné chemické i spektroskopické vlastnosti jako naše atomy - tvořily by **antihmotu** - (bylo diskutováno výše).

Antiproton byl objeven v r.1955 na urychlovači v Berkeley při ostřelování měděného terčíku protony urychlenými na 6,2GeV. V r.1956 byl objeven antineutron na téže urychlovači: se stejnou energií byl protony ostřelován beryliový terčík a vzniklé antiprotony byly vedeny do soustavy scintilátorů a Čerenkovova detektoru zapojených v antikoincidenci, kde reakcí

$p+p \rightarrow n+n'$ s vodíkovými jádry vznikaly antineutrony, které při interakci s nukleony v Čerenkovově detektoru byly registrovány jako intenzivní záblesky.

Fotony

Fotony jsou kvanta elektromagnetického záření. Mají nulovou klidovou hmotnost, pohybují se rychlostí světla, jsou nositeli energie $E = h \cdot \nu$, kde h je Planckova konstanta a ν je frekvence elektromagnetické vlny o vlnové délce $\lambda = c/\nu$. Jsou bosony se spinovým číslem 1. Fotony vznikají při všech zrychlených pohybech elektricky nabitých částic (např. brzdné záření), emitují se při **deexcitacích** v atomových obalech a atomových jádrech, kde odnášejí příslušný energetický rozdíl excitovaného stavu. Fotony záření gama dále vznikají při anihilacích pozitronů s elektrony ($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$), jakož i v řadě dalších interakcí elementárních částic.

Interakce fotonů středních energií s látkou (fotoefekt, Comptonův rozptyl, tvorba e^-e^+ -párů) jsou popsány v §1.6. Fotony **vysokých energií** mohou svými interakcemi vyvolávat tzv. **fotojaderné reakce**, při nichž jsou z jader vyráženy neutrony, protony, popř. více nukleonů, deuterony, α -částice; nad prahovou energii záření gama asi 140MeV pak při interakci vznikají další částice, např. π -mesony: $\gamma + p \rightarrow n + \pi^+$, $\gamma + p \rightarrow p + \pi^0$, a pod.

Foton, jakožto kvantum elektromagnetického vlnění, byl zaveden A.Einsteinem v r.1905 při studiu fotoefektu.

Neutrina a antineutrina

Neutrino ν a antineutrino ν' jsou nejlehčí a nejslaběji interagující ze všech známých druhů elementárních částic - náleží mezi leptony. Jsou to fermiony se spinovým číslem 1/2, nenesou elektrický náboj, nevykazují silnou interakci, ale pouze slabou interakci. Rozeznáváme tři druhy neutrin: neutrino elektronové ν_e , mionové ν_μ a tauonové ν_τ , které se však mohou spontánně vzájemně přeměňovat - tzv. oscilace neutrin.

Elektronová neutrino vznikají typicky při vzájemných přeměnách neutronů a protonů β^- -rozpadem: $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu'_e$, $p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu_e$, mionová a tauonová neutrino pak při rozpadu mionů a tauonů: $\mu^- \rightarrow e^- + \nu'_e + \nu_\mu$, Neutrino kromě toho

vznikají v řadě interakcí elementárních částic, v nichž se uplatňují slabé interakce. Velké množství neutrin vzniká při termojaderných reakcích v nitru Slunce a hvězd, odkud díky své velmi slabé interakci snadno pronikají ven a jsou vyzařovány do okolního prostoru. Ve vesmíru se nachází i obrovské množství tzv. reliktních neutrin pocházejících z leptonové éry vesmíru těsně po velkém třesku. Vlastnosti neutrin, včetně metod jejich detekce a příp. kosmologického významu neutrin, jsou podrobněji popsány v §1.2, část "Radioaktivita beta" - "[neutrina](#)".

Neutrina byla jako hypotetické částice zavedena W.Paulim při studiu energetické bilance β -rozpadu (viz §1.2, část "[Radioaktivita beta](#)", obr.1.2.3), jejich název a specifikace vlastností pocházejí od E.Fermiho. Experimentálně byla neutrina prokázána až v r.... experimenty nastíněnými ve zmíněných odkazech.

Miony μ a tauony τ

Miony μ^- a μ^+ (jsou to vzájemně antičástice), označované též jako "těžké elektrony", jsou středně těžké částice s hmotností $m_\mu = 206 m_e$, nesou záporný nebo kladný elektrický náboj stejné velikosti jako je elementární náboj elektronu; neexistují neutrální miony bez elektrického náboje. Miony jsou **nestabilní** částice, které se s poločasem $\approx 2 \cdot 10^{-6} \text{s}$ rozpadají na elektron, resp. pozitron, a dvě neutrina: $\mu^- \rightarrow e^- + \nu'_e + \nu_\mu$, $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \nu'_\mu$. Tento rozpad má charakter slabé interakce a je podobný radioaktivnímu rozpadu beta; rovněž energetické spektrum elektronů nebo pozitronů je spojitě, maximální energie činí $\approx 53 \text{MeV}$.

Miony se v pozemské přírodě vyskytují v sekundárním **kosmickém záření**. Vznikají ve vyšších vrstvách atmosféry (nad 10km) při srážkách protonů a dalších částic primárního kosmického záření s protony a neutrony jader dusíku a kyslíku v atmosféře. V těchto primárních srážkách vznikají nejdříve π -mezony, které se během cca $2,5 \cdot 10^{-8} \text{s}$ rozpadnou na miony, které se s kinetickou energií cca 4MeV pohybují relativistickou rychlostí. Vzhledem ke své době života $\approx 2 \cdot 10^{-6} \text{sekundy}$ by podle klasické mechaniky mion uletěl jen zhruba 500metrů a pak se rozpadl - na povrch Země by tedy prakticky žádné miony neměly dopadnout. Díky relativistické **dilataci času** však mion z hlediska pozorovatele na Zemi "žije déle" a má dost času, aby dopadl na povrch Země. Tento experimentální fakt, že mion uletí dráhu 20-krát delší než by v klasické mechanice odpovídalo jeho době života, je přesvědčivým důkazem efektu **zpomalování toku**

času podle speciální teorie relativity.

Nejčastější způsob vzniku mionů je při rozpadu π -mezonů: $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu^-$, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu^+$.

Interakce mionů s nukleony probíhají podle schématu: $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu^-$, $\mu^+ + n \rightarrow p + \nu_\mu^+$,

Vnikne-li záporný mion μ^- do látky, může být (po svém zpomalení ionizací) zachycen Coulombovým polem jádra a vytvořit svéráznou vázanou soustavu podobnou atomu - tzv. **mionový atom** nebo **mezoatom**. Kladný mion μ^+ prolétající látkovým prostředím může zase zachytit elektron a vytvořit nestabilní vázanou soustavu mionu μ^+ a obíhajícího elektronu e^- , zvanou **mionium**; je to soustava analogická pozitroniu a má strukturu podobnou vodíkovému atomu.

Mion μ byl objeven v r.1936 C.D.Andersonem a S.H.Neddermeyerem při studiu kosmického záření ve Wilsonově mlžné komoře (podobně jako pozitron).

Tauony τ^- a τ^+ (jsou to vzájemně antičástice), označované též jako "supertěžké elektrony", jsou velmi těžké částice s hmotností $m_\tau \approx 3484m_e \approx 1177\text{MeV}$, nesou záporný nebo kladný elektrický náboj stejné velikosti jako je elementární náboj elektronu. Tauony jsou vysoce **nestabilní** částice, které se s poločasem $\approx 3 \cdot 10^{-13}\text{s}$ rozpadají na elektron nebo mion a dvě neutrina: $\tau^- \rightarrow e^- + \nu_e^- + \nu_\tau^-$, $\tau^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu^+ + \nu_\tau^+$.

Tauon τ byl objeven v r.1977 M.Perlem

Mezony π a K

π -mesony (nazývané též **piony**) jsou nejčastějším druhem nových sekundárních částic, vznikajících částicovými interakcemi při vysokých energiích převyšujících cca 300MeV ; při ještě vyšších energiích (nad $\approx 1\text{GeV}$) pak vznikají i K-mesony a hyperony.

Mesony π a K mají následující společné vlastnosti: jsou to středně těžké částice se spinem 0 (patří tedy mezi bosony), vykazují silné interakce (jsou hadrony) a jsou **nestabilní**.

Nabité mesony π^- a π^+ , které jsou vzájemně antičásticemi, nesou záporný či kladný elementární náboj stejné velikosti jako elektron, mají klidovou hmotnost $\approx 2,4898 \cdot 10^{-27}\text{kg}$.

$^{25}g \approx 273m_e \approx 140\text{MeV}$ a s poločasem $\approx 2,55 \cdot 10^{-8}\text{s}$ se rozpadají (slabou interakcí) na miony a neutrina: $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu^-$, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu^+$. Při tomto rozpadu se uvolňuje celková energie $(m_\pi - m_\mu) \cdot c^2 \approx 34\text{MeV}$, z čehož mion μ odnáší menší část cca 4,2MeV a zbytek kinetické energie necelých 30MeV získává mionové neutrino ν_μ .

Neutrální meson π^0 má klidovou hmotnost $\approx 264m_e \approx 135\text{MeV}$ a s velmi krátkým poločasem rozpadu $\approx 0,9 \cdot 10^{-16}\text{s}$ se rozpadá (elektromagnetickou interakcí) na dvě kvanta gama: $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$.

Mesony K, zvané též kaony, jsou více než 3-krát těžší než π -mesony.

Nabité mesony K^+ a K^- , které jsou vzájemně antičásticemi, nesou kladný či záporný elektrický náboj stejné velikosti jako elektron, mají klidovou hmotnost $\approx 966,6m_e \approx 494\text{MeV}$ a s poločasem $\approx 1,24 \cdot 10^{-8}\text{s}$ se rozpadají na π -mesony, miony a neutrina: $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$, $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$, $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$, $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \pi^0$, $K^+ \rightarrow \pi^0 + \mu^+ + \nu$, $K^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu$; analogicky (sdruženě) i K^- .

Neutrální meson K^0 má hmotnost $\approx 974,2m_e \approx 498\text{MeV}$ a velmi rychle se rozpadá na π -mesony a též na miony a neutrina dvěma druhy rozpadů:

dvoučásticové rozpady: $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$, $K^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0$, - (poločas $\approx 0,9 \cdot 10^{-10}\text{s}$);

tříčásticové rozpady: $K^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$, $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$, $K^0 \rightarrow \pi^+ + \mu^- + \nu$, $K^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu$, - (poločas $\approx 5,7 \cdot 10^{-8}\text{s}$).

To, že se meson K^0 rozpadá s dvěma různými poločasy a různými pochody, lze vysvětlit předpokladem, že meson K^0 je "směsí" dvou neutrálních částic K^{01} a K^{02} , které mají různé doby života a různá schémata rozpadu. Tyto skutečnosti se interpretují tak, že meson K^0 je "směsí" či superpozicí K^0 a jeho antičástice $K^{0'}$.

Interakce mesonů π a K

Mesony π^- a π^+ interagují při nízkých energiích s nukleony především reakcemi: $\pi^- + p \rightarrow n + \gamma$, $\pi^+ + n \rightarrow p + \gamma$, při vysokých energiích pionů pak dochází i ke sdružené produkci kaonů, hyperonů a antihyperonů, např. $\pi^- + p \rightarrow K^+ + K^- + n$, $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$, a pod. - další reakce viz níže v odstavci o hyperonech.

Při interakci s látkou mohou být π^- -mesony (po příslušné zabrzdění ionizačními ztrátami energie) zachycovány na orbitě kolem jádra (podobně jako elektrony v atomu), takže na velmi krátkou dobu se vytvoří mesoatom s pionem π^- , který je

pak pohlcen jádrem a tam se sloučí s protonem ($\pi^- + p \rightarrow n + \gamma$).

Vznik mesonů π a K

π -mesony vznikají především jako nové **sekundární částice** při interakcích protonů s nukleony, pokud kinetická energie v laboratorní (terčíkové) soustavě je vyšší než $2 \cdot m_\pi \cdot c^2 \approx 300 \text{ MeV}$. Reakcí tohoto typu může být několik:

$p + p \rightarrow p + n + \pi^+$, $p + p \rightarrow p + p + \pi^0$, $p + n \rightarrow n + n + \pi^+$, $p + n \rightarrow p + p + \pi^-$,

$p + n \rightarrow p + n + \pi^0$, $n + n \rightarrow n + p + \pi^-$, $n + n \rightarrow n + n + \pi^0$,

přičemž tyto reakce mohou probíhat jak na volných nukleonech, tak na nukleonech vázaných v jádře. Piony mohou být také produkovány fotojadernými reakcemi tvrdého záření gama: $\gamma + p \rightarrow n + \pi^+$, $\gamma + p \rightarrow p + \pi^0$, jejichž prahová energie záření gama činí zhruba $m_\pi \cdot c^2 \approx 140 \text{ MeV}$.

Mesony K vznikají tzv. **asociovanou produkcí** ve dvojicích buď spolu, nebo ve dvojicích s hyperony, a to buď při vzájemných interakcích nukleonů, nebo π -mesonů s nukleony. Příklady takových interakcí jsou: $p + p \rightarrow \Lambda + K^+ + p$, $\pi^- + p \rightarrow K^+ + K^- + n$, $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$, atd., další kombinace s hyperony jsou uvedeny v následujícím odstavci.

Hyperony

Nejtěžší dosud známé částice, vznikající při částicových interakcích za vysokých energií, jsou **hyperony**. Všechny hyperony jsou **fermiony**, většinou se spinem 1/2, s výjimkou Ω^- který má spin 3/2. Všechny hyperony jsou dále **hadrony** vykazující silnou interakci a jsou to částice vysoce **nestabilní** s velmi krátkou dobou života.

Známe 7 druhů hyperonů (+ jejich antičástice), které zde stručně vyjmenujeme:

Hyperon Λ^0 je elektricky nenabitý, má hmotnost $\approx 2183 m_e \approx 1116 \text{ MeV}$, dobu života $\approx 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ a rozpadá se podle schémat: $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ (66%), $\Lambda \rightarrow n + \pi^0$ (34%).

Hyperon Σ^- se záporným elementárním nábojem má hmotnost $\approx 2327 m_e \approx 1189 \text{ MeV}$ a s poločasem $\approx 0,8 \cdot 10^{-10} \text{ s}$ se rozpadá na nukleony a piony: $\Sigma^- \rightarrow p + \pi^0$, $\Sigma^- \rightarrow n + \pi^+$.

Hyperon Σ^+ s kladným elementárním nábojem má hmotnost $\approx 2340 m_e \approx 1197 \text{ MeV}$ a s poločasem $\approx 1,65 \cdot 10^{-10} \text{ s}$ se rozpadá na neutron a pion: $\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$.

Hyperon Σ^0 bez elektrického náboje má hmotnost $\approx 2332 m_e \approx 1193 \text{ MeV}$ a s velmi krátkým poločasem blízkým 10^{-20} s se rozpadá na hyperon lambda a foton gama: Σ^0

$\rightarrow \Lambda + \gamma$.

Hyperon Ξ^- se záporným nábojem má hmotnost $\approx 2585m_e \approx 1321\text{MeV}$ a s poločasem $\approx 1,7 \cdot 10^{-10}\text{s}$ se rozpadá na hyperon lambda a pion: $\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$.

Hyperon Ξ^0 bez elektrického náboje má hmotnost $\approx 2566m_e \approx 1315\text{MeV}$ a s poločasem $\approx 3 \cdot 10^{-10}\text{s}$ se rozpadá na hyperon lambda a pion: $\Xi^0 \rightarrow \Lambda + \pi^0$.

Hyperon Ω^- se záporným nábojem má hmotnost $\approx 3405m_e \approx 1675\text{MeV}$ a s poločasem $\approx 1,5 \cdot 10^{-10}\text{s}$ se rozpadá na hyperony a mesony: $\Omega^- \rightarrow \Xi^{0,-} + \pi^{-,0}$, $\Omega^- \rightarrow \Lambda + K^-$.

Pozn.: Ve velmi malém procentu případů byly pozorovány i další možnosti rozpadu hyperonů, např. $\Lambda \rightarrow p + e + \nu$, $\Sigma^+ \rightarrow p + \gamma$, $\Xi^0 \rightarrow p + \pi^-$, a řada dalších.

Hyperjádra

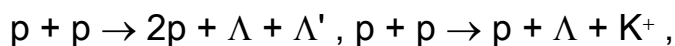
Hyperony vykazují silné interakce, takže mohou vstupovat do jader a být tam navázány jadernými silami - vznikne tzv. **hyperjádro** či hyperfragment. V typickém hyperjádře je jeden z neutronů nahrazen hyperonem Λ^0 ; takové hyperjádro se pak značí ${}^N\text{A}_\Lambda$. Např. v jaderných emulzích ozařovaných mesony K^- z urychlovače byla pozorována hyperjádra ${}^9\text{Be}_\Lambda$. Hyperjádra jsou **nestabilní** útvary, které se rozpadají dvojím způsobem: mesonovým rozpadem nebo nukleonovým rozpadem. Při **mesonovém** způsobu se hyperon Λ uvnitř jádra rozpadne podle schématu $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$, nebo $\Lambda \rightarrow n + \pi^0$, takže např. hyperjádro ${}^9\text{Be}_\Lambda$ se rozpadne na meson π^- , proton p^+ a jádro ${}^8\text{Be}_4$ (které se pak v tomto případě rozpadá na dvě alfa-částice ${}^4\text{He}_2$). Při **nukleonovém** rozpadu dochází k reakcím $\Lambda + p \rightarrow p + n$, nebo $\Lambda + n \rightarrow n + n$, takže např. zmíněné hyperjádro ${}^9\text{Be}_\Lambda$ by se rozpadlo způsobem: ${}^9\text{Be}_\Lambda \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He} + n$.

Antihyperony

Podobně jako k nukleonům existují antinukleony, i ke každému z uvedených hyperonů existuje příslušný **antihyperon** (všechny tyto hyperony jsou samostatné, nejsou vzájemně antičásticemi jako je to kupř. u mesonů π^- a π^+ či μ^- a μ^+). Podle principu nábojové symetrie mají antihyperony stejné hmotnosti, spin a dobu života jako hyperony, avšak opačná znaménka el. náboje, baryonového čísla a magnetického momentu. Rozpadová schémata antihyperonů jsou rovněž nábojově

sdužená s rozpadovými schémata hyperonů a rovněž i reakce částic, při nichž antihyperony vznikají, jsou analogické jako u hyperonů (dochází často k "asociované" produkci hyperonů a antihyperonů či mesonů - viz níže). Je třeba mít na paměti, že antihyperony k nabitým hyperonům mají opačná znaménka el. náboje, např. antihyperon Σ'^- má kladný jednotkový náboj, takže přesněji bychom jej mohli označit jako $(\Sigma'^-)^+$.

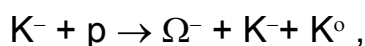
Hyperony vznikají při interakcích protonů, antiprotonů, π a K mesonů s nukleony při vysokých energiích ($> \approx 5 \text{ GeV}$), přičemž v silných interakcích typu (nukleon+nukleon) nebo (π +nukleon) vznikají současně dvě částice ze skupiny mesonů a hyperonů (meson+meson, meson+hyperon, hyperon+antihyperon) - dochází ke **sdužené** či **asociované produkci** hyperonů, antihyperonů a mesonů, např.:



.....

.....

.....



Dráhy hyperonů, resp. jejich rozpadových produktů, jsou pozorovány ve Wilsonových mlžných komorách, jaderných fotoemulzích a bublinových komorách. Již v r.1947 pozorovali G.D.Rochester a C.C.Butler při studiu kosmického záření ve Wilsonově mlžné komoře dráhy dvou částic vylétajících z jednoho bodu - další výzkumy ukázaly, že šlo o meson K^0 rozpadající se na mesony π^- a π^+ a o hyperon Λ rozpadající se na proton p^+ a meson π^- . Když pak urychlovače s dostatečně velkou energií umožnily vytvářet svazky protonů a mesonů π , byly při studiu jejich interakce v bublinových komorách a fotoemulzích objeveny všechny další hyperony a zákonitosti jejich asociované produkce s mesony K.

Rezonance

Bosony W^-, W^+, Z^0

W-bosony jsou intermediální částice zprostředkující slabou interakci (Weak int.) v rámci Weinbergova-Salamova modelu sjednocení elektromagnetické a slabé

interakce. W^- a W^+ nesou záporný a kladný elementární náboj stejné velikosti jako elektron, mají hmotnost $\approx 82\text{GeV}$ a zprostředkovávají vzájemné β -přeměny neutronů a protonů podle schématu: (viz též obr.1.2....). Neutrální Z^0 boson má hmotnost $\approx 93\text{GeV}$, Intermediální bosony W^-, W^+, Z^0 byly experimentálně prokázány v.1983 při interakcích ve vstřícných proton-antiprotonových svazcích $270\text{GeV} \leftarrow \rightarrow 270\text{GeV}$ collideru velkého protonového synchrotronu v CERN.

Hypotetické a modelové částice

Pro úplnost zde nakonec letmo zmíníme i některé "exotické" částice, které by měly existovat podle určitých více či méně ověřených teorií a modelů, avšak nebyly dosud experimentálně prokázány - zůstávají částicemi **hypotetickými**.

Kvarky jsou modelové "stavební" částice hadronů (jak je nastíněno níže). Kvarky jsou fermiony se spinem $1/2$ a nesou třetinový elektrický náboj $-(1/3)e$, $+(2/3)e$. Bylo zavedeno celkem 6 druhů kvarků, každý má svou antičástici - antikvark. Kvarkový model hadronů je stručně popsán níže.

Gluony jsou kvantové nositelé silné interakce mezi kvarky.

Gravitony jsou kvanta gravitačního vlnění. Gravitační vlny předpovídá obecná teorie relativity jakožto fyzika gravitace a prostoročasu; jsou řešením Einsteinových rovnic gravitačního pole, podobně jako z Maxwellových rovnic elektrodynamiky plyne existence elektromagnetických vln. Gravitační vlny se od elektromagnetických liší jednak svým velmi nepatrným působením na látku, jednak svým tzv. kvadrupólovým charakterem. Graviton má nulovou klidovou hmotnost, pohybuje se rychlostí světla, jeho spinové číslo je 2.

Gravitační vlny se zatím nepodařilo přímo detekovat, jsou prokázány jen nepřímě. Na experimentální prokázání gravitonů není naděje v dohledné budoucnosti. O gravitačních vlnách pojednává např. [§2.7 "Gravitační vlny"](#) v knize "[Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu](#)".

Higgsovy bozony - jsou to kvanta tzv. Higgsova-Kibleova skalárního pole, které se v kalibračních unitárních teoriích pole zavádí do lagrangiánu za účelem tzv. spontánního narušení symetrie. Toto pole vede též k tomu, že některé intermediální

bozony získají hmotnost a příslušné interakce se stanou silami krátkého dosahu.

Supersymetrické částice

V supersymetrických unitárních teoriích elementárních částic je ke každé částici přiřazen její tzv. **superpartner** - každý boson má svého fermionového superpartnera a fermion má naopak svůj bosonový protějšek. Nejčastěji diskutované supersymetrické částice jsou gravitina a fotina:

Gravitina jsou kvanta kalibračního pole v supergravitační unitární teorii pole (superpartner gravitonu), mají spin $3/2$ nebo $5/2$.

Fotina jsou slabě interagující hmotné částice se spinem $1/2$, zaváděné jako supersymetrický partner fotonu.

Někdy se diskutují i supersymetrické částice k fermionům: *s-leptony* jako superpartneři k leptonům, např. *s-elektron*, *s-mion*, *s-neutrino* (zvané též *neutralino* - mělo by mít vysokou hmotnost desítky GeV), či kvarkům - *s-kvark*.

Další hypotetické částice:

Axiony jsou lehké (klidová hmotnost cca $10^{-5}eV$) hypotetické částice se spinem 0, které se v rámci kvantové chromodynamiky zavádějí při řešení CP-problému narušení kombinace nábojové symetrie a parity v teorii kvarků.

Pozn: Výše uvedené částice - gravitina, fotina, axiony - se někdy souhrnně označují jako "slabě interagující hmotné částice" - zkratka **WIMP** (Weak Interacting Mass Particle). Mohly by tvořit podstatnou složku tzv. **temné hmoty** ve vesmíru (viz např. §5.5 "[Mikrofyzika a kosmologie. Inflační vesmír](#)" v knize "Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu").

Magnetické monopóly - hypotetické částice duální vůči elektrickému náboji.

Magnetický monopól vzniká při záměně elektrických a magnetických veličin v Maxwellových rovnicích a aplikaci kvantové teorie pole.

Klasická teorie elektromagnetického pole magnetické monopóly **nepřipouští**: jedna z Maxwellových rovnic $\text{div } \mathbf{B} = 0$ říká, že magnetické pole je nezářivé s uzavřenými siločarami, tj. magnetické monopóly neexistují (viz např. §1.5 "[Elektromagnetické pole. Maxwellovy rovnice](#)" v knize "Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu").

Leptokvarky X,Y - hypotetické vektorové bosony X a Y (zvané též leptokvarky, protože způsobují přechody mezi kvarky a leptony) se zavádějí v tzv.

grandunifikačních teoriích GUT. Měly by mít velmi vysoké hmotnosti řádově $m_{X,Y} \sim 10^{15} \text{GeV}$.

Superstruny jsou hypotetické (modelové) jednorozměrné elementární útvary délky řádu 10^{-33}cm (Planckova délka), jejichž různě excitované vibrační stavy a vzájemná propojení by podle tzv. **teorie superstrun** měly být základem veškerých částic a polí - základem **unitární teorie pole** sjednocující všechny 4 interakce v přírodě. Struny mohou být otevřené nebo uzavřené. Zobecněním superstrun jsou tzv. **p-brány**, které mohou mít více (p) prostorových dimenzí a vyvíjejí se v 11-rozměrném prostoročase. O teorii superstrun je stručně pojednáno v závěrečné části §B.6 "[Sjednocování fundamentálních interakcí](#)" knihy "[Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu](#)".

Tachyony jsou ryze spekulativní částice, které se mohou pohybovat pouze **nadsvětelnou rychlostí** a mají (v souvislosti se známým vztahem závislosti hmotnosti na rychlosti $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$) ve speciální teorii relativity) **imaginární hmotnost**. Motivací pro zavedení tachyonů je pouze spekulace o jakési symetrii vzhledem k rychlosti světla, nesvědčí pro ně žádné fyzikální argumenty; spíše by vyvolávaly vážné problémy s principem kauzality. Z hlediska teorie relativity jsou tachyony stručně diskutovány v pasáži "[Tachyony](#)" §1.6 "[Čtyřrozměrný prostoročas a speciální teorie relativity](#)" zmíněné knihy "[Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu](#)".

Unitární symetrie a multiplety částic

Velký počet elementárních částic, které byly objeveny při vysokoenergetických interakcích, přirozeně vedl ke snahám o jejich **systematiku** a zavedení **unitarizačních schémat**. Především, každému baryonu a leptonu je přiřazeno **baryonové číslo B** a **leptonové číslo L** (částice +1, antičástice -1), které se zachovávají při všech interakcích. Byly zjištěny výrazné **podobnosti** a **symetrie** mezi některými elementárními částicemi, především hadrony.

Odhlédneme-li od elektrického náboje, lze např. protony a neutrony považovat za dva stavy (dublet) jedné částice - nukleonu. Podobně piony π^+, π^0, π^- tvoří triplet podobných částic. Při studiu samotných silných interakcí, které jsou nábojově nezávislé, můžeme od náboje odhlédnout. Pro popis těchto podobností a symetrií byla zavedena nová veličina **izotopický spin** neboli **izospin T** *). Nukleony mají izospin $T = 1/2$, přičemž projekce izospinu $T = +1/2$ odpovídá protonu a $T = -1/2$ neutronu. Pionům se přiřadil izospin $T = 1$, s projekcemi -1, 0, +1 pro π^-, π^0, π^+ . V soustavě interagujících nukleonů a pionů pak platí zákon zachování izospinu.

*) Vyšlo se z formální analogie s obyčejným spinem, kde částice se spinem $1/2$ se vyskytuje ve dvou stavech s průmětem spinu $-1/2$, $+1/2$ a částice se spinem 1 ve třech stavech s průměty spinu $-1, 0, +1$. Izospin T je vektorem v myšleném (pomocném) "izotopickém prostoru". Obecně částice s izospinem T se může vyskytovat v $(2T + 1)$ stavech s projekcemi izospinu na vztáznou osu: $-T, (-T+1), (-T+2), \dots, -1, 0, 1, \dots, (T-2), (T-1), T$.

Dalším důležitým krokem byl objev některých "podivných" (nečekaných) vlastností interakcí mesonů K a hyperonů při jejich sdružené párové produkci, které vedly k zavedení pojmu **podivnosti**, popsaného kvantovým číslem \underline{S} ("Strange"). Později bylo zavedeno obecnější kvantové číslo zvané **hypernáboj** $Y = B + S$, dané součtem baryonového čísla \underline{B} a podivnosti \underline{S} . Ukázalo se, že při silných interakcích se zachovává jak izospin T , tak hypernáboj Y . Tato rozšířená symetrie vedla k sestavení multipletu baryonů - dekapletu ($3/2^+$), v němž však v té době chybělo jedno místo; byl tak předpovězen hyperon Ω , který byl zanedlouho skutečně objeven.

Jednotlivé hadrony se zakreslovaly do speciálních diagramů, kde na vodorovné ose se vynášela projekce izospinu T_z , na svislé ose hypernáboj Y a na šikmé ose elektrický náboj Q . Spojnice takto vyznačených multipletů částic tvořily pravidelné geometrické obrazce - trojúhelníky šestiúhelníky a jejich kombinace. Takováto analýza **unitární symetrie** (kterou provedli v r.1964 M.Gell-Mann a Y.Ne'eman) ukázala, že systematiku hadronů lze velmi dobře vysvětlit hypotézou, že hadrony jsou složeny ze subčástic - tripletu kvarků

Jsou elementární částice skutečně elementární ?

Kvarková struktura hadronů

Pokusme se nyní podívat, jak je to s "elementárností" a vnitřní strukturou základních stavebních částic hmoty. Důležitým vodítkem pro posouzení "elementárnosti" ("fundamentálnosti") částic nám může sloužit to, zda se daná částice **rozpadá** (přeměňuje) či **nerozpadá** na jiné druhy částic. Za opravdu elementární částice bez vnitřní struktury můžeme podle dosavadních poznatků považovat **foton** a **elektron**, které vznikají či zanikají vždy jako celek a nepřeměňují se na jiné druhy částic. Neutron a proton se mohou vzájemně přeměňovat za účasti elektronů, pozitronů a neutrin; nemohou být tedy v pravém slova smyslu "elementární". Totéž se týká π -mezonů a hyperonů.

Výše naznačená systematika hadronů ukazuje, že v jejich vlastnostech se dají nalézt výrazné tzv. unitární **symetrie**. Na základě těchto symetrií byl v r.1964

sestaven tzv. **kvarkový model** hadronů, podle něhož jsou všechny hadrony složeny z ještě "elementárnějších pračástic" - **kvarků**.

Slovo "quark", které nemělo žádný význam, převzali autoři kvarkového modelu M.Gell-Mann a Y.Ne'eman s notnou dávkou recese ze hry spisovatele Jamese Joyse.

Kvarky jsou **fermiony** se spinem $1/2$ a s **třetinovým elektrickým nábojem**: $-(1/3)e$, $+(2/3)e$, každý kvark má svou antičástici - **antikvark**. Pro vysvětlení systematiky hadronů pomocí aditivního kvarkového modelu bylo postupně zavedeno celkem 6 druhů kvarků, z nichž nejdůležitější jsou tři: "u" (up), "d" (down), "s" (strange).

Baryony jsou složeny vždy ze **tří kvarků**: např. proton $p = u u d$, neutron $n = d d u$.

Mezony jsou složeny z dvou kvarků (kombinace kvark-antikvark): např. $\pi^+ = u d'$, $\pi^- = d u'$, $\pi^0 = u u' + d d'$.

.....

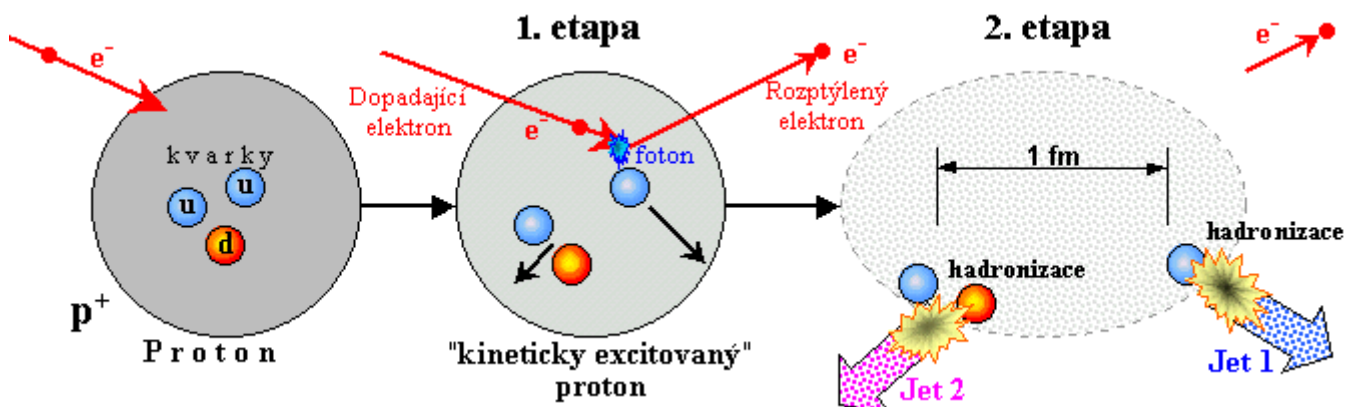
Uvězněné kvarky; jety; hadronizace kvarků

Úspěšnost kvarkového modelu přirozeně vedla k intenzívním snahám nalézt jednotlivé kvarky **experimentálně**. Ani v laboratořích vysokých energií na urychlovačích, ani v kosmickém záření se však žádné částice, které by měly třetinový elektrický náboj, nepodařilo nalézt. Pokud kvarky vůbec existují, musejí být v nukleonech **velmi silně vázány**. Kvarky tedy zůstávají částicemi **hypotetickými**, resp. **modelovými**, které sice velmi elegantně vysvětlují vlastnosti hadronů, ale jejichž existence nebyla přímo prokázána.

Nepřímo byl však kvarkový model podpořen výsledky experimentů s **rozptylem elektronů na protonech**, při nichž se měřily úhly a energie rozptýlených elektronů a protonů. Při nižších energiích (do cca 1GeV) se proton chová jako kompaktní "kulička" o poloměru $\approx 1 \text{ fm}$ ($=10^{-15}\text{m}$). Při vysokých energiích je však chování protonů zcela jiné; poprvé byl takový experiment s rozptylem vysokoenergetických elektronů (o energiích vyšších než 10^{10}eV) na nukleonech proveden na urychlovači ve Stanfordu. Při takovém "tvrdém ostřelování" se nukleon nechoval jako kompaktní částice s rovnoměrným rozložením náboje, ale jako soustava tří velmi malých

rozptylových center (o rozměru cca 10^{-16}cm), v nichž je koncentrován elektrický náboj. Tyto částice uvnitř protonů R.Feynman nazval **partony**. Přímému ztotožnění kvarků a partonů však bránil rozpor - na jedné straně se při experimentech partony v nukleonech chovaly jako volné, na druhé straně kvarky jsou tak silně vázány, že je nelze z nukleonů uvolnit.

Pro pochopení specifických vlastností kvarkové struktury hadronů byla v 70. letech vytvořena tzv. **kvantová chromodynamika** (QCD, řec. chromos = barva), což je polní teorie silné interakce. V rámci QCD byla vytyčena koncepce tzv. **asymptotické volnosti** kvarků (vazbový potenciál kvarků se blíží nule při velmi malých vzdálenostech $\approx 1\text{ fm}$) a dále byla vyslovena hypotéza dokonalého **uvěznění kvarků** v hadronech, podle níž kvarky nemohou existovat jako volné částice, ale pouze vázané v hadronech - vazbový potenciál rychle roste se vzdáleností, k úplnému uvolnění kvarků by byla potřebná nekonečně velká energie. Silná interakce mezi kvarky je v QCD zprostředkována vektorovým kalibračním polem, jehož kvanta s nulovou klidovou hmotností, zvaná **gluony**, zde hrají podobnou úlohu jako *fotony* v kvantové elektrodynamice, kde zprostředkovávají elektromagnetické působení mezi nabitými částicemi.



Obr.1.5... Schématické znázornění mechanismu interakce vysokoenergetického elektronu s protonem. Za velmi vysokých energií při tvrdých a hluboce nepružných srážkách elektronů s protony vzniká řada sekundárních částic, které vylétají **neizotropně** v jakýchsi směrovaných "výtryscích" - **jetech**. Detailní analýza úhlového rozdělení a energie částic v jetech ukázala následující mechanismus interakce, který lze rozdělit do dvou etap (obr.1.5...): Během 1.etapy vysokoenergetický elektron při interakci s

protonem předá část své kinetické energie jednomu z kvarků, který se po tomto rozptylu po určité kratičkové době pohybuje prakticky volně (asymptotická volnost) uvnitř protonu; podobně i zbytek protonu tvořený dvěma zbývajícími kvarky. Nedojde však k uvolnění kvarků z protonu. Jakmile vzdálenost mezi vyzářeným kvarkem a zbytkem protonu přesáhne zhruba 1fm ($=10^{-15}\text{m}$), nastává 2. etapa: síly mezi nimi začnou prudce narůstat a v kvark-gluonovém poli dojde k produkci kvarků a antikvarků, které se zformují do mesonů a baryonů - dojde k tzv. "**hadronizaci**" kvark-gluonového plasmatu *). Výsledkem je vyzáření dvou úhlově kolimovaných spršek částic - **jetů**, které vylétají přibližně ve směrech letu kvarku a zbytku protonu v první etapě. Tyto jety jsou vlastně **stopami po kvarcích**.

*) Můžeme si zjednodušeně představit, že kvarky v hadronech jsou spojeny jakýmsi "strunami" (gluonovými trubicemi), které je drží pohromadě jako "gumová vlákna". Při růstu vzdálenosti mezi kvarky se tato struna "trhá" na kratší struny délky cca 1fm, odpovídající mesonům a baryonům. Tato starší představa se často používala začátkem 70.let.

.....

PRVNÍ URYCHLOVAČ

Prvním urychlovačem, jenž byl v CERN postaven, byl synchrociklotron umožňující urychlovat protony na energii 600 MeV (obr. 2) a uvedený do provozu na sklonku roku 1957. Přestože tento urychlovač patřil svou koncepcí ke starší generaci urychlovačů a nedosahoval proto parametrů svých amerických rivalů v Brookhavenu a Berkeley, byl na něm v září 1958, jen několik měsíců po spuštění, pozorován první případ rozpadu nabitého pionu na pozitron a elektronové neutrino

.....