

Fyzika částic

Všechny jevy tohoto světa nejsou ničím jiným než klamným projevem mysli a samy o sobě nemají žádnou skutečnost.
 (Ašvaghoša: Drahma - buddhismus)

Když se provádí metodické bádání ve všech vědních oborech skutečně vědecky a podle mravních zásad, nebude nikdy ve skutečném rozporu s vírou, protože věci světské i věci víry pocházejí od jednoho a téhož Boha.
 (Dokument 2. Vatikánského koncilu Gaudium et spes)

Outline

1 Standardní model

- 1.1 Problémy standardního modelu

2 Rozdělení částic

- 2.1 Fyzikální parametry částic

3 Kvarky

- 3.1 Hmotnost kvarků
- 3.2 Generace kvarků
- 3.3 Přehled kvarků
- 3.4 Struktura kvarků
- 3.5 Kvark top
- 3.6 Kvark-gluonové plazma

4 Leptony

- 4.1 Elektron
 - 4.1.1 Elektronové neutrino
 - 4.1.2 Pozitron
- 4.2 Tau
 - 4.2.1 Tauonové neutrino
- 4.3 Mion
 - 4.3.1 Mionové neutrino

5 Hadrony

- 5.1 Mezony
 - 5.1.1 Piony
 - 5.1.2 Kaony
 - 5.1.3 Roony
 - 5.1.4 Hadrónová terapie
- 5.2 Baryony
 - 5.2.1 Nukleony
 - 5.2.1.1 Proton
 - 5.2.1.2 Antiproton
 - 5.2.1.3 Neutron
 - 5.2.1.4 Antineutron
 - 5.2.2 Hyperony
 - 5.2.2.1 Druhy hyperonů
 - 5.2.2.2 Hyperjádra

6 Částicové multiplexy

7 Antihmota a jinak opačné částice

- 7.1 Antičástice
- 7.2 Výroba antihmoty
- 7.3 Antihmota jako zdroj energie
- 7.4 Antisvěty
- 7.5 Anihilace
 - 7.5.1 Pozitronium
- 7.6 Invariance
 - 7.6.1 C Symetrie
 - 7.6.2 P Symetrie
 - 7.6.3 T Symetrie
 - 7.6.4 CP Symetrie
 - 7.6.5 CPT Symetrie
- 7.7 Supersymetrické částice

8 Hypotetické částice

- 8.1 Higgsovy bozony
- 8.2 Axiony
- 8.3 Preony
- 8.4 Magnetické monopóly
- 8.5 Leptokvarky
- 8.6 Superstruny
- 8.7 Tachyony

9 Interakce a intermediální částice – kvanta polí

- 9.1 Gravitační
 - 9.1.1 Gravitony
- 9.2 Elektromagnetická
 - 9.2.1 Fotony
- 9.3 Elektroslabá
- 9.4 Slabá
 - 9.4.1 Bozony
- 9.5 Silná
 - 9.5.1 Gluony

10 Výzkum částic

- 10.1 Urychlovače, generátory, reaktory
 - 10.1.1 Princip urychlovače
 - 10.1.1.1 Iontový zdroj
 - 10.1.1.2 Terčik
 - 10.1.1.3 Collidery – vstříčné svazky
 - 10.1.2 Lineární urychlovače
 - 10.1.2.1 Elektrostatické
 - 10.1.2.2 Vysokofrekvenční
 - 10.1.3 Kruhové urychlovače
 - 10.1.3.1 Cyklotron
 - 10.1.3.2 Synchrotron
 - 10.1.3.3 Betatron
 - 10.1.3.4 Elektronový cyklotron – Mikrotron
 - 10.1.4 Vysokofrekvenční generátory el. napětí
 - 10.1.4.1 Magnetron
 - 10.1.4.2 Klystron
 - 10.1.4.3 Dvouokruhový klystron
 - 10.1.5 Tokamak
 - 10.1.5.1 Princip Tokamaku
 - 10.1.5.2 ITER
- 10.2 Výzkumná centra
 - 10.2.1 CERN
 - 10.2.2 Fermilab
 - 10.2.3 SLAC

11 Budoucnost moderní částicové fyziky

- 11.1 Struktury kvarků
- 11.2 Teorie superstrun
- 11.3 GUT – Teorie všeho

12 Dodatky

- 12.1 Poznámky
- 12.2 Použité prameny
- 12.3 Přílohy
- 12.4 Tento dokument

1 Standardní model

Standardní model je v současnosti všeobecně uznávaná teorie částic a elektromagnetické, slabé a silné interakce.

1.1 Problémy standardního modelu

Standardní model sice dobře popisuje a vysvětluje řadu experimentálně pozorovaných jevů, avšak nelze jej považovat za úplnou teorii. Problém je v tom, že standardní model neumí vysvětlit (a ani se o to nepokouší), proč částice existují právě v té podobě a s těmi vlastnostmi, jak je známe. Standardní model ovšem nemůže být konečnou teorií mikrosvěta, protože na některé velmi podstatné otázky odpovědět neumí:

- Proč existují tři generace kvarků a leptonů?
- Jsou kvarky a leptony skutečně fundamentální, nebo se skládají z něčeho ještě menšího?
- Standardní model nedává žádnou předpověď pro hmotnosti částic; odkud vyplývají jejich hodnoty?
- Podle toho, co pozorujeme v experimentech s částicemi, by mělo ve vesmíru být stejně hmoty, jako antihmoty; proč je tedy pozorovaný vesmír tvořen převážně "obyčejnou" hmotou?
- Jak zapadá do obrázku zprostředkovaného standardním modelem gravitace?
- Víme, že ve vesmíru musí být mnohem víc hmoty, než astronomové bezprostředně pozorují. Co tvoří tuto neviditelnou hmotu?
- V běžném světě okolo nás pozorujeme pouze částice patřící k první generaci kvarků. K čemu příroda "potřebuje" další dvě generace?
- Kde se vzaly počáteční fluktuace nutné k tvorbě galaxií?
- Jestliže dnes, mnoho miliard let po Velkém třesku, má vesmír hustotu přibližně rovnou kritické, musel být v minulosti "nastaven" mimořádně přesně na kritickou hustotu. Jaké procesy jsou zodpovědné za toto nastavení?
- Proč je náš vesmír tak veliký, tak starý a tak hmotný?
- Jaký je význam Planckových jednotek?
- Co bylo, když nic nebylo?

V letech 1861-65 vytvořil například James C. Maxwell jednotnou teorii elektromagnetismu, v níž objasnil vzájemný vztah a propojenost elektrických a magnetických polí. V letech 1881-84 pak H. Hertz prakticky dokázal, že jak radiové vlny, tak světlo jsou elektromagnetické vlny, přesně jak to Maxwellova teorie předpověděla.

Jedním z hlavních cílů současné fyziky částic je spojit silnou, slabou a elektromagnetickou interakci do takzvané velké sjednocené teorie. Taková teorie nám možná jednou dokáže říci, při jaké energii vymizí rozdíly mezi interakcemi a to, co se při dnešních energiích jeví jako různé interakce, projeví svou skutečnou podstatu jako interakce jediná (viz kapitolu 11.3).

2 Rozdělení částic

Elementární částice se třídí a rozdělují do skupin podle svých význačných vlastností, vyjádřených fyzikálními parametry a kvantovými čísly. Tj. podle klidové hmotnosti nebo doby života nebo spinu. v následujících dvou kapitolách jsou rozděleny podle hmotnosti. Pro úplnost ze ještě uvádím rozdělení *podle statistického chování*; hlavně z důvodu vysvětlení pojmů fermiony a bosony.

Jedním ze základních rozdílů mezi částicemi je jejich chování ve vícečásticových systémech. Toto chování rozděluje částice na dvě třídy, bosony a fermiony. Rozdíly se projevují ve statistickém chování (tím se myslí chování velkého množství částic jako souboru), (anti)symetričnost vlnové funkce více částic, zda splňují Pauliho vylučovací princip a jejich kreační operátory vyhovují (anti)komutačním relacím, a spinu. Tyto rozdíly spolu vzájemně souvisejí.

Fermiony

- Mají poločíselný spin (všechny leptony a kvarky, všechny baryony - například elektron, neutrino, proton, neutron, Δ baryony Λ hyperon ...)
- Splňují Pauliho vylučovací princip^{v)}
- Vlnová funkce více částic je antisymetrická
- Podléhají Fermi-Diracově statistice
- Kreační operátory fermionů splňují antikomutační relace

Bosony

- Mají celočíselný spin (všechny skalární i vektorové mezony, foton, W^+ , W^- , Z^0 , ...)
- Nesplňují Pauliho vylučovací princip.^{v)} Při nízkých teplotách má každý boson ze systému tendenci zaujmout nejnižší energetický stav. Vzniká tzv. bosonový kondenzát, který může mít supravodivé a supratekuté vlastnosti. Soustava elektronů by nikdy nemohla být supravodivá - jde o fermiony splňující Pauliho vylučovací princip. Při snižování teploty dojde nejprve k pospojování elektronů do dvojic - Cooperových párů, které jako bosony již mohou mít supravodivé vlastnosti
- Vlnová funkce více částic je symetrická
- Podléhají Bose-Einsteinově statistice
- Kreační operátory bosonů splňují komutační relace

2.1 Fyzikální parametry částic

Vlastnosti elementárních částic se charakterizují vhodnými fyzikálními parametry, z nichž některé jsou známé i z klasické fyziky, jiné jsou čistě kvantové a nemají klasickou analogii. Těm parametrům elementárních částic, které jsou kvantovány, tj. nabývají diskrétních hodnot, se říká kvantová čísla.

Klidová hmotnost	je vyjadřovaná buď v gramech, častěji však v energetických jednotkách elektronvoltech eV, keV, MeV, či v násobcích hmotnosti elektronu (nekvantovaná veličina)
Doba života	resp. poločas rozpadu, vyjadřuje se v sekundách, u stabilních částic se považuje za ∞ (nekvantovaná veličina)
Elektrický náboj	je kvantován a proto se, místo v coulombech, vyjadřuje v násobcích velikosti náboje elektronu e s uvedením znaménka
Spin	neboli spinové číslo s , vyjadřující vlastní moment hybnosti částice v násobcích Planckovy konstanty h . Kromě nulového spinu (vyskytujícího se u mezonů p a K) je nejmenším možným spinem hodnota $s=1/2$ (takový spin mají elektrony, protony, neutrony, neutrina, miony). Spin $s=1$ mají fotony, $3/2$ těžké hyperony W , spin $s=2$ gravitony.
Magnetický moment	udávaný v násobcích elementárního Bohrova magnetonu $e\hbar/4m_e$, popř. jaderného magnetonu $e\hbar/4m_p$.
Parita	je kvantové číslo, charakterizující chování kvantově-mechanického systému - jádra či elementární částice, vzhledem k prostorovému zrcadlovému odrazu, tj. transformaci souřadnic $x \rightarrow -x$, $y \rightarrow -y$, $z \rightarrow -z$, $t \rightarrow t$. Pokud se vlnová funkce popisující stav částice nezmění, je parita kladná: $P=1$, či "+". Pokud při této transformaci vlnová funkce systému změní znaménko, je parita záporná: $P=-1$, neboli "-". Dá se ukázat, že parita systému s orbitálním momentem hybnosti l je $(-1)^l$. Analýza interakcí elementárních částic ukazuje, že parita protonu a neutronu je kladná, zatímco parita fotonů a mezonů p^{+-0} je záporná. Parita

se zachovává při silných a elektromagnetických interakcích, avšak při slabých interakcích se nezachovává. Parita P je vcelku ne příliš důležitým kvantovým číslem; uvádí se někdy jako index vpravo nahoře u kvantového čísla momentu hybnosti soustavy.

Leptonové číslo
Baryonové číslo

které pro leptony je $L = \pm 1$ (podle toho, zda se jedná o částici či antičástici), pro ostatní částice $L=0$
které pro baryony je $B = \pm 1$ (opět "+" pro částice a "-" pro antičástice) a pro částice jiné než baryony je $B=0$

Další kvantová čísla jako podivnost a hypernáboj jsou zmíněna v kapitolách o unitárních symetriích elementárních částic.

3 Kvarky

V roce 1964 nezávisle na sobě navrhli M. Gell-Mann a G. Zweig existenci kvarků, ze kterých jsou složeny proton, neutron i některé ostatní částice. Částice složené z kvarků nazýváme hadrony. Mohou být složeny z dvojic kvarků (kvarku a antikvarku), pak je nazýváme mezony, nebo z trojice kvarků a pak je nazýváme baryony (například neutron a proton).

Samo podivné slovo kvark našel Gell-Mann v románu *Finnegans Wake* od Jamese Joyce. Hlavnímu hrdinovi se zdá sen, ve kterém racci letící za plující lodí křičí: "Tři kvarky pro doktora Marka". V celém románu se toto slovo již jinde nevyskytuje. Gell-Mann sám zavedl čtyři kvarky, které nazval d (down, dolů), u (up, nahoru), s (strange, podivný), c (charm, půvabný) a nakreslil jejich úsměvné obrázky.

Později byly k těmto čtyřem kvarkům přidány ještě dva: b (beauty, krásný) a t (truth, pravdivý). Gell-Mann na základě svého modelu předpověděl existenci částice ω složené ze tří podivných kvarků. Tato částice byla nalezena ještě v roce 1964. V roce 1969 bylo v rozptylových experimentech na urychlovači SLAC ve Stanfordu potvrzeno, že neutron a proton se skládají ze tří kvarků. V roce 1974 bylo objeveno charmonium. Jde o vázaný stav kvarku c a antikvarku c . Nezávisle byla tato částice objevena na dvou místech, v Brookhavenu a ve Stanfordu. V roce 1976 bylo objeveno ypsilonium, vázaný stav kvarku b a antikvarku b . Poslední t kvark byl nalezen v roce 1995 v laboratoři Fermilab.

Viz také kapitolu 8.5 o leptokvarcích.

3.1 Hmotnost kvarků

Není vůbec jednoduché stanovit hmotnost kvarku a dokonce ani přesně vymezit, co se pod tímto pojmem myslí, protože jednotlivé kvarky nelze zkoumat odděleně.

To platí zejména pro nejjednodušší generaci (u a d), kde naprostá většina hmotnosti objektů, které jsou těmito kvarky tvořeny, není dána součtem hmotností jednotlivých kvarků, nýbrž má svůj původ v energii vazby.

3.2 Generace kvarků

Podobně jako leptony řadíme kvarky do generací, tj. první generaci tvoří kvarky (d , u) běžně se vyskytující v přírodě a jejich antikvarky. Druhou generaci (s , c) nacházíme v částicích kosmického záření (kaonech, Λ hyperonech, ...) a třetí generaci (b , t) dokážeme připravit uměle na urychlovačích. Tyto částice byly hojné při vysoce energetických procesech krátce po vzniku Vesmíru. Kvarky třetí generace se také někdy nazývají bottom a top (dolní a horní).

3.3 Přehled kvarků

kvark	spin	baryonové číslo	náboj	hmotnost	rok objevu
<i>d</i>	1/2	1/3	- 1/3	7 MeV	1969
<i>u</i>	1/2	1/3	+ 2/3	5 MeV	1969
<i>s</i>	1/2	1/3	- 1/3	150 MeV	1969
<i>c</i>	1/2	1/3	+ 2/3	1,4 GeV	1974
<i>b</i>	1/2	1/3	- 1/3	4,3 GeV	1976
<i>t</i>	1/2	1/3	+ 2/3	176 GeV	1994

3.4 Struktura kvarků

Kvarky mají bodovou strukturu až do rozměrů 10^{-18} m (tisícina velikosti protonu). V roce 1996 byly ve Fermilabu provedeny rozptylové experimenty, které naznačují, že by kvarky mohly být složeny z dalších částic, tzv. preonů (viz kapitola 8.3).

3.5 Kvark top

2. března 1995 oznámil Fermilab objev kvarku top, posledního ze šesti typů kvarků předpověděných teorií. Pátrání po něm se datuje od roku 1977, kdy fyzikové ve Fermilabu objevili pátý kvark b (bottom). Hledání kvarku top trvalo tak dlouho, protože - jak se nakonec ukázalo - top má mnohem větší hmotnost, než se původně myslelo, a pro jeho vytvoření byl tedy zapotřebí silnější urychlovač.

Kvark top se sice rozpadá příliš rychle na to, aby se dal v detektoru přímo pozorovat, ale někdy při tom vzniknou takové částice, že z nich lze jasně usoudit na jeho přítomnost. Způsobů rozpadu kvarku top je ve skutečnosti několik. Protože k jeho vzniku dochází pouze při jedné z několika miliard srážek, bylo jich třeba uskutečnit biliony, aby se mohl zaznamenat dostatečný počet případů.

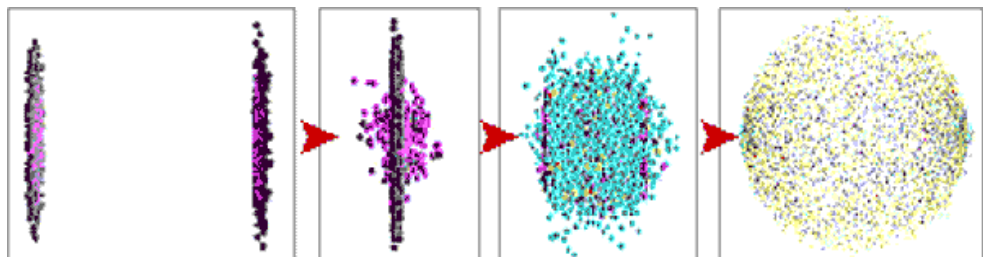
Fyzikové dosud neumějí vysvětlit, proč má top tak obrovskou hmotnost. Je čtyřicetkrát těžší než druhý nejtěžší kvark b a asi 35 000 krát těžší než kvarky u a d, které jsou základem prakticky veškeré hmoty okolo nás. Přísně vzato, dosud není uspokojivě vyřešeno ani to, proč mají částice vůbec jakoukoli nenulovou hmotnost. Fyzikové věří, že objev kvarku top a prozkoumání jeho vlastností pomůže toto tajemství poodhalit.

3.6 Kvark-gluonové plazma

Při velkých energiích, které panovaly těsně po vzniku Vesmíru, se kvarky s gluony chovají jako směsice volných nezávislých částic. Průměrné vzdálenosti jsou totiž menší než je poloměr uvěznění kvarků. Teprve později "kondenzuje" kvark-gluonové plazma na vázané dvojice (mezony) a trojice (baryony) kvarků. Tento stav látky se pravděpodobně poprvé podařilo simulovat na počátku roku 2000 na urychlovači SPS (svazek - terčík, Pb, 160 GeV/nukleon) v CERNu. Dnes se v těchto experimentech pokračuje v Brookhaven National Laboratory na zařízení RHIC. Nový experiment CERNu ALICE na zařízení LHC se připravuje a měl by být brzo spuštěn (2007).

Kvark-gluonové plazma obsahuje kvarky a gluony, podobně jako normální hadronová hmota. Na rozdíl od normální hmoty, ve které páry kvark-antikvark tvoří mezony nebo trojice kvarků dávají vzniknout baryonům (jako jsou proton a neutron, v kvark-gluonovém plazmatu tyto mezony a baryony ztrácejí svou identitu a vytvářejí velkou směs kvarků a gluonů. V normální hmotě jsou kvarky svázané, v kvark-gluonovém plazmatu pak volné.

Toto je pravděpodobně jediný možný způsob, jakým by mohly existovat volné kvarky. Je pojmenovaná analogicky podle skupenství plazmatu, v kterém jsou normální vazby mezi elektrony a atomovými jádry roztavené.



4 Leptony

Leptony^{E)} jsou lehké částice s malou klidovou hmotností. U leptonů nepozorujeme žádnou vnitřní strukturu. Spin všech těchto částic je $1/2$ a jde tedy o fermiony. Všechny leptony interagují slabou interakcí a neinteragují silně. Nabité leptony (elektrony) interagují navíc elektromagneticky, což způsobuje intenzivní interakci s hmotou. Nenabitá leptony (neutrína) interagují s hmotou velmi slabě. Přesto jich je v našem okolí značné množství. Tok slunečních neutrín se u naší Země odhaduje na $70 \times 10^9 \nu \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. V každém cm^3 je navíc 300 reliktních neutrín z období oddělení neutrín od ostatní hmoty v době cca 1 s po Velkém třesku. Při interakci kosmického záření s atmosférou vznikají asi 20 km nad zemí tzv. atmosférická neutrína. Žijeme tak v hustém neutrínovém moři, které s námi minimálně interaguje. Pro neutrína je celá Země zcela průhledná a neutrína s jejími atomy zainteragují jen zcela výjimečně.

LEPTONS

$$\begin{array}{ccc} e^- & \mu^- & \tau^- \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{array}$$

ANTILEPTONS

$$\begin{array}{ccc} e^+ & \mu^+ & \tau^+ \\ \bar{\nu}_e & \bar{\nu}_\mu & \bar{\nu}_\tau \end{array}$$

4.1 Elektron

Elektron je první objevená elementární částice vůbec. Je stabilní. Hmotnost elektronu je $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ a elektrický náboj elektronu je $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Rozdílné chování různých atomů je způsobeno rozdílnou konfigurací elektronových obalů. Makroskopický pohyb elektronů vnímáme jako elektrický proud. Elektron objevil lord Thomson v roce 1897. Antičástici elektronu - pozitron - teoreticky předpověděl P.A.M. Dirac v roce 1928 ještě před jeho objevením.



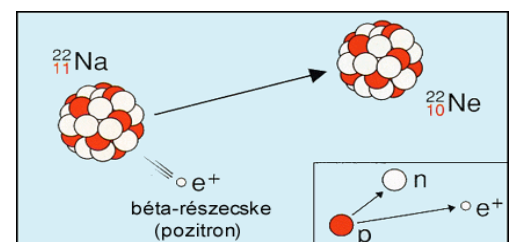
4.1.1 Elektronové neutrino

Všude tam, kde při různých slabých rozpadech částic vznikne elektron, vzniká i jeho neutrino (přesněji antineutrino). Jde o částici velmi malé hmotnosti, která interaguje s hmotou jen slabou interakcí, snadno proto hmotou proniká. Neutrino bylo objeveno při β rozpadu neutronu $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$ (elektron a proton jako produkty rozpadu neodnášely veškerou původní energii a hybnost). Jeho existenci předpověděl W. Pauli v roce 1930. Název neutrino mu dal Enrico Fermi po objevu neutronu v roce 1932 (v italštině znamená neutrino malý neutron). Jeho existence byla potvrzena v roce 1956 v jaderné elektrárně Savannah River v Jižní Karolině (F. Reines, L. Cowan).

4.1.2 Pozitron

Pozitron e^+ je antičásticí k elektronu, má tudíž stejnou hmotnost a spin, elektrický náboj je stejně 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, přičemž vznikají dvě kvanta záření γ rozlétající se v protilehlých směrech.

Viz také kapitola 7.5.1 Pozitronium.



4.2 Tau

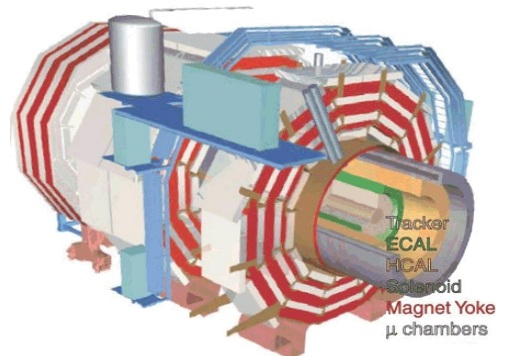
(Někdy také nazýván *tauon*). Částice tau je tzv. supertěžký elektron. Má hmotnost $3484 m_e$. Byl objeven v roce 1977 Martinem Perlem. Jde o nestabilní částici s dobou života $3 \cdot 10^{-13} \text{ s}$. Rozpadá se na lehčí částice elektron nebo mion a neutrína.

4.2.1 Tauonové neutrino

Doprovází tauon při slabých procesech. Bylo objeveno v laboratoři Fermilab v roce 1999 v experimentu DONUT (Do Nu Tau). Z objevitelského týmu jsou to např. P. Yager a V. Paoloneh.

4.3 Mion

Mion je tzv. těžký elektron. Tato částice se chová velmi podobně jako elektron. Má hmotnost $207 m_e$. Doba života je přibližně 2.10^{-6} s. Potom se těžký elektron rozpadá na normální elektron a neutrino: $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$. Mion je stejně jako elektron schopen vytvořit vázaný stav s protonem, tzv. mionium (vodík s mionem v obalu místo elektronu). Mion se vyskytuje v kosmickém záření a do zemské atmosféry vstupuje s relativistickými rychlostmi. Vzhledem ke své době života by neměl nikdy dopadnout na zemský povrch. Díky dilataci času však mion z hlediska pozorovatele na Zemi žije "déle" a má dosti času, aby dopadl na povrch Země. Z hlediska mionu se Země "přibližuje" relativistickou rychlostí a díky kontrakci vzdálenosti nemusí mion k povrchu Země uletět takovou vzdálenost. Vidíme, že z hlediska obou souřadnicových soustav (spojených se Zemí nebo s mionem) je výsledek stejný, mion dopadne na povrch Země. Mion byl objeven C. Andersonem v kosmickém záření za pomoci mlžné komoty v roce 1936.



The Compact Muon Solenoid

4.3.1 Mionové neutrino

Podobně jako elektronové neutrino doprovází při slabých rozpadech elektron, doprovází mionové neutrino mion. Má podobné vlastnosti jako neutrino elektronové. Mionové neutrino objevili L. M. Lederman, M. Schwartz a J. Steinberger v roce 1962 na urychlovači v Brookhavenu (Long Island, USA). Za tento objev obdrželi Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1988. V roce 1998 byla objevena jeho nenulová hmotnost na aparatuře Super Kamiokande v Japonsku: $m_\nu - m_e$ 0,07 eV.

5 Hadrony

Hadrony^{H)} jsou částice podléhající silné interakci.

5.1 Mezony

Elementární částice složené z kvarku a antikvarku. Patří do skupiny hadronů, částic, podléhajících silné interakci. Podle spinu dělíme mezony na skalární ($s=0$) a vektorové ($s=1$). Nejznámější mezony jsou tvořeny kvarky první generace (d, u). Skalární se nazývají π mezony (piony) a vektorové ρ mezony (roony). Mezony obsahující s kvark nazýváme κ mezony (kaony). Vznikají interakcí kosmického záření s horními vrstvami atmosféry a sehrály důležitou roli v 50. letech při objevu narušení levoprávé symetrie v přírodě. V roce 2000 byla produkce kaonů jedním z hlavních argumentů při objevu kvark gluonového plazmatu v komplexu laboratoří CERN.

5.1.1 Piony

Mezony tvořené kvarky první generace (d, u) mají nulový spin. V přírodě se vyskytují tři piony - kladně nabitý, záporně nabitý a s nulovým nábojem. Piony jsou nejčastějším druhem nových sekundárních částic, vznikajících částicovými interakcemi při vysokých energiích převyšujících cca 300MeV. Jsou to středně těžké nestabilní částice se spinem 0. Existují tři druhy: s nábojem +, - a 0.

5.1.2 Kaony

Kaony jsou středně těžké nestabilní částice se spinem 0. Vznikají při částicovými interakcemi při vysokých energiích převyšujících cca 1GeV tzv. asociovanou produkcí ve dvojicích buď spolu, nebo ve dvojicích s hyperony, a to buď při vzájemných interakcích nukleonů, nebo pionů s nukleony. Existují kaony κ^- , κ^0 a κ^+ .

5.1.3 Roony

Mezony ρ tvořené kvarky první generace (d, u) mají spin rovný jedné. V přírodě se vyskytují tři roony - kladně nabitý, záporně nabitý a s nulovým nábojem. Podléhají silné interakci a proto patří mezi hadrony.

5.1.3 Ostatní hadrony

Existuje mnoho hadronů, obsahujících kvarky c, b, t, a hadronů složených z kvarků, které nejsou v základním stavu. První byly objeveny v sedmdesátých letech na urychlovačích. Např. charmonium (1974), ypsilonium (1977) atd.

5.1.3 Hadronová terapie

Při tradiční radioterapii rentgenovým nebo γ zářením dochází k největšímu předání destrukční energie lidské tkáni těsně pod povrchem těla pacienta v místě proniknutí záření. S rostoucí hloubkou pak tato dávka exponenciálně klesá. V případě nádorů ležících v blízkosti důležitých orgánů proto prakticky není možné využít k léčbě tradiční radioterapii bez nebezpečí významného poškození okolních orgánů.

Naproti tomu metoda hadronové radioterapie funguje na zcela odlišném principu předávání energie. V tomto případě je destrukční dávka energie při vstupu do lidského těla velmi malá a prudce narůstá až na konci dráhy částic v těle pacienta. Volbou energie svazku částic proto lze regulovat dosah destrukční dávky energie, a tím i přesně zacílit na místo nádoru. Na rozdíl od konvenční radioterapie jsou zdravé tkáně před i za nádorem mnohem méně poškozeny. V případě léčby například očních nádorů radioterapií pomocí hadronů tak až 90 % všech pacientů opět vidí, užití konvenční radioterapie vede většinou ke ztrátě zraku.

V evropském centru fyziky částic CERN byl vypracován podrobný projekt ENLIGHT na stavbu urychlovače protonů a iontů pro léčebné účely. Některé země začaly podle tohoto projektu taková léčebná centra již stavět. Na projektu ENLIGHT se vedle CERN podílí Evropská společnost pro radiační onkologii, některé evropské instituce, a také pracovní skupina z ČR.

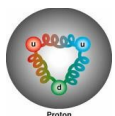
Hadronová terapie představuje další posun v léčebných možnostech nádorových onemocnění, ale vybudování léčebného centra je velmi nákladné. Stavba urychlovače včetně lůžkové části by v dnešních cenách přišla, podle odhadu na 1,3 až 1,8 miliardy Kč. O vybudování takového centra v České republice se zatím stále jedná. Ve světě již existuje několik takových center, další se budují. Zatím nejdále jsou ve Spojených státech, další střediska již jsou nebo se budují v západní Evropě a v Japonsku.

5.2 Baryony

Elementární částice složené ze tří kvarků různých barev. Výsledná barva je bílá. Baryony podléhají silné interakci a patří proto mezi hadrony. Baryony složené z kvarků první generace (d, u) dělíme na nukleony se spinem rovným 1/2 (nukleony) a delta baryony se spinem rovným 3/2 (4 částice s různým nábojem). Baryony obsahující s kvark nazýváme hyperony.

5.2.1 Nukleony

5.2.1.1 Proton



Protony, jakožto jádra vodíku, byly objeveny při studiu elektrických výbojů v plynech zhruba ve stejné době jako elektrony (koncem 19.stol.). Nese kladný elementární elektrický náboj stejné absolutní velikosti jako elektron. Proton je stabilní částice (pomineme zde některé spekulace o možném rozpadu protonu (viz následující odstavec). Počet protonů v jádře 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 s dobou života řádově $t_p > 10^{30} - 10^{33}$ let. Tento rozpad by byl způsoben přeměnou kvarku na lepton prostřednictvím bosonu X a vzhledem k obrovské hmotnosti bosonu X je jeho pravděpodobnost nesmírně malá. Experimenty zatím dávají odhady $t_p > 10^{30}$ 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 např. při detekci a spektrometrii neutrin.

5.2.1.1 Antiproton

Antiproton se od protonu liší jen svým záporným nábojem a opačným směrem magnetického momentu, ve vakuu je rovněž stabilní částicí.

5.2.1.2 Neutron

Neutron je elektricky neutrální, jeho klidová hmotnost je o něco vyšší než u protonu. Ve stabilních atomových jádrech jsou neutrony stabilní, volný neutron (ve vakuu) se rozpadá s poločasem asi 13 minut β -rozpadem na proton, elektron a antineutrino.

Neutrony byly objeveny až v roce 1932 J. Chadwickem při ostřelování jader Be částicemi α .

5.2.1.2 Antineutron

Antineutron je neutrální částice jako neutron, od něhož se liší jen opačnou orientací magnetického momentu. Poločas jeho rozpadu ve vakuu je stejný jako u neutronu, rozpadá se na antiproton, pozitron a neutrino.

5.2.2 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 Ξ^0 který má spin 3/2. Všechny hyperony jsou dále hadrony vykazující silnou interakci a jsou to částice vysoce nestabilní s velmi krátkou dobou života – cca 10^{-10} s. Je známo 7 druhů hyperonů (a jejich antičástice):

5.2.2.1 Druhy hyperonů

Hyperon Λ^0 je elektricky nenabíjí, má hmotnost $2183m_e$, dobu života $2,5 \cdot 10^{-5}$ s a rozpadá se podle schémat:

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^- \quad (66\%) \quad \Lambda \rightarrow n + \pi^0 \quad (34\%).$$

Hyperon S^- se záporným elementárním nábojem má hmotnost $2327m_e$, s poločasem $0,8 \cdot 10^{-10}$ s se rozpadá na nukleony a piony:

$$S^- \rightarrow p + \pi^- \quad S^- \rightarrow n + \pi^0.$$

Hyperon S^+ s kladným elementárním nábojem má hmotnost $2340m_e$ a s poločasem $1,65 \cdot 10^{-10}$ s se rozpadá na neutron a pion:

$$S^+ \rightarrow n + \pi^+.$$

Hyperon S^0 bez elektrického náboje má hmotnost $2332m_e$ s velmi krátkým poločasem blízkým 10^{-20} s se rozpadá na hyperon a foton:

$$S^0 \rightarrow \Lambda + \gamma.$$

Hyperon X^- se záporným nábojem má hmotnost $2585m_e$ a s poločasem $1,7 \cdot 10^{-10}$ s se rozpadá na hyperon lambda a pion:

$$X^- \rightarrow \Lambda + \pi^-.$$

Hyperon X^0 bez elektrického náboje má hmotnost $2566m_e$ a s poločasem $3 \cdot 10^{-10}$ s se rozpadá na hyperon lambda a pion:

$$X^0 \rightarrow \Lambda + \pi^0.$$

Hyperon W^- se záporným nábojem má hmotnost $3405m_e$ a s poločasem $1,5 \cdot 10^{-10}$ s se rozpadá na hyperony a mesony:

$$W^- \rightarrow X^{0-} + \pi^{-0} \quad W^- \rightarrow \Lambda + \kappa^-.$$

Ve velmi malém procentu případů byly pozorovány i další možnosti rozpadu hyperonů.

5.2.2.2 Hyperjádra

Hyperony vykazují silné interakce, takže mohou vstupovat do jader a být tam navázány jadernými silami - vznikne tzv. hyperjádru či hyperfragment. V typickém hyperjádře je jeden z neutronů nahrazen hyperonem; takové hyperjádru se pak značí NAL. Např. v jaderných emulzích ozařovaných mesony κ^- z urychlovače byla pozorována hyperjádru ${}^9\text{Be}\lambda$. Hyperjádru jsou nestabilní útvary, které se rozpadají dvojitým způsobem: mesonovým rozpadem nebo nukleonovým rozpadem.

Při mesonovém způsobu se hyperon λ uvnitř jádra rozpadne podle schématu $\lambda \rightarrow p + p^-$, nebo $\lambda \rightarrow n + p^0$, takže např. hyperjádru ${}^9\text{Be}\lambda$ se rozpadne na meson p^- , proton p^+ a jádro ${}^8\text{Be}^4$ (které se pak v tomto případě rozpadá na dvě α -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 hyperjádru ${}^9\text{Be}\lambda$ by se rozpadlo způsobem: ${}^9\text{Be}\lambda \rightarrow 4\text{He} + 3\text{He} + n$.

6 Částicové multiplexy

Částice se často vyskytují jako skupiny velmi podobných částic, které nazýváme multiplety (dublet nukleonů, triplet pionů, kvadruplet Δ baryonů, atd.) Tyto částice lze chápat jako kvantové stavy jediné částice, které se liší projekcí veličiny nazývané *izospin*. Multipletu přiřadíme *hypernáboj* Y (dvojnásobek průměrného elektrického náboje multipletu) a *izospin* $T = (N - 1)/2$ (kde N je počet částic v multipletu). Projekce izospinu do jednotlivých částic potom je:

$$T_3 = Q - Y/2.$$

Podobně jako u spinu může hodnota projekce izospinu nabývat $2T + 1$ hodnot:

$$T_3 = -T, -T + 1, \dots, T-1, T$$

Například Δ kvadruplet, $Y = 1$, $T = 3/2$:

Δ^-	$Q = -1$	$T_3 = -3/2$
Δ^0	$Q = 0$	$T_3 = -1/2$
Δ^+	$Q = +1$	$T_3 = +1/2$
Δ^{++}	$Q = +2$	$T_3 = +3/2$

7 Antihmota a jinak opačné částice

7.1 Antičástice

Ke každé elementární částici existuje její opačný partner - antičástice, která má stejnou hmotnost, spinové číslo, dobu života a izospin, ale její náboj a magnetický moment jsou opačné (stejně co do velikosti, ale opačné znaménko); opačné je i leptonové číslo, baryonové číslo a projekce izospinu.

Jedná-li se o neutrální částice bez elektromagnetických vlastností, mohou být sdruženy buď samy k sobě (foton, p^0 , graviton), takže vlastně nemají antičástice, nebo mohou mít částice a antičástice od sebe odlišné (např. neutrina). V případě fermionů vznikají částice a antičástice v párech a rovněž v párech zanikají.

Antičástice mají vzhledem k sobě úplně stejné vlastnosti svých interakcí, takže kolem antiprotonu může obíhat pozitron a vytvořit tak atom antivodíku. Podobně mohou antiprotony a antineutrony vytvářet atomová antijádra, kolem nichž mohou obíhat pozitrony (=antielektrony) ve slupkách o stejných energiích a podle stejných výběrových pravidel jako v atomové fyzice. Takovéto antiatomy pak budou mít úplně stejné chemické i spektroskopické vlastnosti jako atomy hmoty - budou vytvářet prvky či sloučeniny antihmoty se stejnými vlastnostmi jaké známe z normální hmoty.

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

7.2 Výroba antihmoty

V urychlovačích se produkuje velké množství pozitronů i antiprotonů a antineutronů, takže by se zdálo, že nic nestojí v cestě umělému poskládání těchto částic do antiatomů. Ve skutečnosti však je umělé vytváření antihmoty neobyčejně obtížné. Částice produkované v urychlovačích se totiž pohybují vysokými rychlostmi - mají vysoké kinetické energie, o mnoho řádů přesahující vazbové energie atomů. Aby mohl vzniknout atom antivodíku, musejí být pozitrony a antiprotony z původních energií řádově MeV zpomaleny na dostatečně malou vzájemnou rychlost, aby antiproton mohl pozitron zachytit a udržet. To není nijak snadné, takže se teprve nedávno na urychlovači LEAR v laboratoři CERN podařilo vytvořit pouhých 9 atomů antivodíku. Antiprotony se nechaly prolétat xenonem, čímž se brzdily a při interakci zároveň vznikaly m.j. i páry elektronů a pozitronů. V uvedených několika případech pak byl pozitron následně zachycen prolétajícím antiprotonem za vzniku atomu antivodíku. Během řádově 10^{-11} sec. pak při svém letu prostředím anihiloval s normální hmotou a záblesk anihilačního záření prokázal jeho kratičkou existenci. Kromě produkce vlastních antiatomů je dalším krajně obtížným problémem jejich izolace od okolní hmoty (snad by se daly po určitou dobu udržet v magnetickém poli), aby se zabránilo okamžité anihilaci. Na vytvoření většího množství antihmoty, stejně jako složitějších antiatomů, není zatím žádná naděje v blízké budoucnosti.

7.3 Antihmota jako zdroj energie

Ve sci-fi (Star-Trek apod.) se často uvádí, že při anihilaci hmoty s antihmotou dochází ke 100% přeměně hmoty na energii, v souladu s Einsteinovým vztahem $E = m \cdot c^2$. Mohla by tedy ve vzdálené budoucnosti být antihmota nevyčerpatelným zdrojem energie, popř. sloužit k pohonu mezihvězdných lodí (fotonové rakety) na rychlosti blízké rychlosti světla? Bohužel tomu tak není, resp. problém je mnohem složitější, vyskytují se překážky nejen technického, ale i principiálního fyzikálního charakteru.

Při anihilaci elektronu s pozitronem se skutečně veškerá klidová hmotnost obou částic mění na elektromagnetické záření. Není to však na světlo, ale na tvrdé záření γ , které by se zrcadlem fotonové rakety neodráželo, ale pohlcovalo. Při anihilaci protonů a neutronů s antiprotony a antineutrony však nevzniká elektromagnetické záření, ale p-mezony; ty se pak rozpadají na miony a neutrina. Následuje rozpad mionů a teprve potom by mohla nastávat anihilace elektronů s pozitrony. V hypotetickém anihilačním reaktoru by tedy muselo být dosaženo nejen účinné energetické využití tvrdého záření γ , ale i uzavření protonového, pionového, mionového a elektronového (a antičásticového) vysokoenergetického plazmatu tak, aby sekundární částice mohly spolu účinně anihilovat. Zatím není znám žádný fyzikální mechanismus, který by to umožňoval. A už vůbec není možné využít eneralfagii odnášenou neutrinou atd.



7.4 Antisvěty

Aby mohla dlouhodobě existovat, musí se antihmota nacházet odděleně od hmoty, jinak by docházelo k masivní anihilaci. Pomocí běžných spektrometrických metod to na dálku nepoznáme - světlo z antihvězd či antigalaxií by vzhledem k identickým vlastnostem antiatomů mělo úplně stejná spektra jaká známe u hvězd a galaxií. Jsou však dvě indicie, podle nichž se v nám dostupné části vesmíru antihmota nevyskytuje:

1. V primárním kosmickém záření ze vzdáleného vesmíru se vyskytují pouze protony, nikoli antiprotony (nepatrný podíl cca 10^{-4} antiprotonů vzniká při interakcích protonů vysokých energií s mezihvězdným prostředím - s částicemi i fotony reliktního záření).

2. Pokud by některé hvězdy nebo galaxie byly z antihmoty, na rozhraní hmoty a antihmoty by docházelo k intenzivní anihilaci za vzniku tvrdého záření γ . Žádná měření zatím takové anihilační záření nezaznamenala.

Ve vesmíru se tedy buď žádné znatelné množství antihmoty nevyskytuje, nebo se antisvěty nacházejí v tak velkých vzdálenostech, že žádné jejich projevy nemůžeme v našem místě registrovat.

7.5 Anihilace

Anihilace je proces, který může nastat, když se setká částice se svou antičásticí. Původní částice zanikají a jejich hmota se přemění na nějakou formu energie. Tato energie je odnášena nosiči polí (fotony, W a Z bosony ...), které se mohou dále rozpadat na jiné částice.

Anihilace se týká kvarků stejně tak jako hadronů.

7.5.1 Pozitronium

Těsně před vlastní anihilací elektron e^- a pozitron e^+ mohou na chvíli kolem sebe obíhat (kolem svého společného těžiště) - vytvoří zvláštní vázaný systém (podobný atomu vodíku) zvaný pozitronium (Ps). Rozměr "atomu" pozitronia je dvojnásobek atomu vodíku. 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).

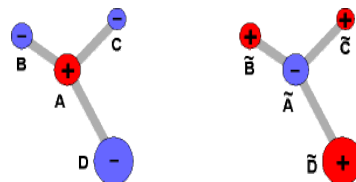
Tento systém pozitronia je však nestabilní, obě částice se za vyzařování elektromagnetických vln k sobě po spirále přibližují; za cca 120ps na sebe "dopadnou" a dojde k vlastní anihilaci na dva fotony γ . V případě o-Ps je anihilace na dva fotony zakázána kvantovými výběrovými pravidly, takže o-Ps by 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 náhodným elektronem z okolního prostředí, který má opačnou orientaci spinu - vznikají opět dva fotony γ .

7.6 Invariance

Invariance nevytváří pravé antičástice; mění pouze jednu jejich vlastnost: náboj, otočení nebo souřadnici čtvrtého rozměru.

7.6.1 C Symetrie

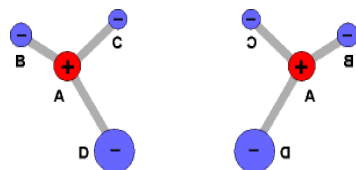
C symetrií se označuje záměna všech částic za částice s opačnými kvantovými náboji. Základní otázkou je, zda by se takto vytvořený svět nebo jen nějaké zařízení chovaly stejně jako originál vybudovaný z částic, tj. zda C symetrie platí. Potom by naše zákony popisující přírodu musely tuto symetrii v sobě obsahovat, by byly C invariantní.



7.6.2 P Symetrie

P symetrie znamená záměna všeho levého za pravé resp. zrcadlové obrazy. Tato operace se nazývá také právě *zrcadlová operace* a příslušnou symetrii nazýváme zrcadlovou, paritní neboli P symetrií.

Důležitou otázkou opět je, zda by takovýto svět fungoval stejně jako originál, tj. zda platí P symetrie.



Do roku 1956 fyzikové věřili v P symetrii. V roce 1956 byly pozorovány slabé rozpady K^+ mezonů, které nezachovávaly pravolevou symetrii; zrcadlový obraz rozpadu vypadá jinak než obraz původní. To by znamenalo, že pravý a levý směr není zcela rovnoprávný.

K ověření tohoto důležitého tvrzení navrhli T. D. Lee a C. N. Yang experiment s izotopem kobaltu ^{60}Co . Experiment provedla C. S. Wu z Kolumbijské university v roce 1957.

Kobalt reaguje na magnetické pole. Proto byl izotop ^{60}Co podroben působení velmi silného magnetického pole za nízkých teplot. Magnetické momenty atomů kobaltu se při nízké teplotě zorientovaly ve směru magnetického pole. Předem tedy byl znám směr magnetického momentu atomů kobaltu (ve směru vnějšího magnetického pole). Atom kobaltu podléhá β rozpadu, při kterém se uvolňují elektrony. V experimentu se ukázalo, že ve směru orientace vnějšího pole vylétá méně elektronů než ve směru opačném. Narušení pravolevé symetrie tak bylo definitivně potvrzeno. Při slabé interakci neplatí P symetrie.

Dnes dokonce známe procesy, ve kterých pozorujeme 100% narušení P symetrie. Neutrino se například vyskytují jen v levotočivém provedení.⁴⁾

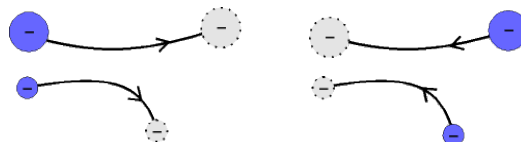
7.6.3 T Symetrie

T symetrie znamená obrácení chodu času. Všechny procesy by měly být možné i v obráceném pořadí. Procesy budou probíhat pozpátku, zaměníme počáteční a koncové stavy částic a obrátíme vektory jejich rychlostí.

Základní zákony elektřiny a magnetismu i gravitace jsou neměnné při obrácení chodu času. Na úrovni elementárních procesů lze každou "akci" pustit pozpátku. Nikoli však ale pro velké soubory částic - zde jsou sice obrácené procesy principiálně možné, ale jejich pravděpodobnost je mimořádně malá. U makroskopických dějů existují tedy nevratné procesy. (Je skutečně velmi malá pravděpodobnost, že se rozbitá sklenička poskládá sama zpět, i když bychom čekali velmi dlouhou dobu.)

Jsou procesy vratné alespoň na elementární úrovni srážek dvou částic? Bohužel, ani zde to například při slabé interakci neplatí. Obrátíme-li u částic směr rychlosti, nebude se děj odvíjet pozpátku přesně stejně.

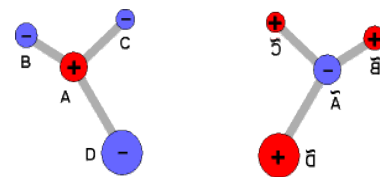
Experimentálně bylo narušení T symetrie dokázáno v experimentech na zařízení LEAR v CERNu. Experimenty byly prováděny v letech 1990-1996, teoreticky byly zpracovány až na přelomu roku 1998 a 1999 (ohlášení objevu). Později došlo i k nezávislému potvrzení v laboratoři Fermilab.



7.6.4 CP Symetrie

Kombinace C a P symetrie (vše levé je zaměněno za pravé a částice jsou vyměněny za antičástice).

V roce 1964 byly pozorovány rozpady levotočivého K^0_L mezonu na piony π^+ a π^- , které sice málo, ale přece jen narušují i CP symetrii (z 22 700 případů bylo 45 ± 9 narušeno). Narušení CP symetrie pravděpodobně mělo za následek převládnutí hmoty nad antihmotou při vzniku Vesmíru. Zhruba na jednu miliardu reakcí oběma směry proběhlo o jednu reakci více směrem k hmotě. Když se Vesmír dostatečně ochladil, došlo k anihilaci látky a antilátky, ohřevu Vesmíru vzniklým zářením. Při anihilaci však na každou miliardu částic a antičástic zbyla díky narušení CP invariance jedna částice. Právě z nich je postaven dnešní Vesmír.



7.6.5 CPT Symetrie

V současné době se věří, že skutečnou realizovanou symetrií v přírodě je CPT symetrie, tj. aby procesy byly symetrické, musíme

1. zaměnit částice za antičástice
2. zaměnit levé za pravé
3. obrátit chod času (koncové a počáteční polohy částic a změnit znaménko vektoru rychlosti)

Zatím žádný provedený experiment této symetrii neodporuje.

7.7 Supersymetrické částice

Nejedná se o antičástice v pravém slova smyslu ani o částice symetrické podle nějakého ze tří typů symetrie uvedených výše - je to protějšek částic - superpartner.

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 superpartneri k leptonům, např. **s-elektron**, **s-mion**, **s-neutrino** (=neutralino - mělo by mít vysokou hmotnost desítky GeV), či kvarkům - **s-kvark**, gluon - **gluino**, Z - **zino**, W - **wino**, graviton - **gravitino** atd.

8 Hypotetické částice

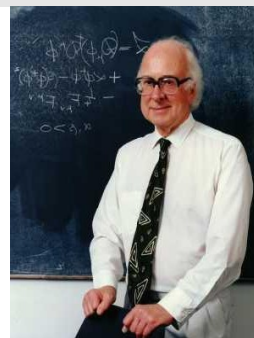
V této kapitole jsou popsány některé exotické částice, které by měly existovat podle určitých více či méně ověřených teorií a modelů, avšak nebyly dosud experimentálně prokázány. Někdy jsou také označovány jako modelové nebo virtuální. Patří sem také gluony a gravitony – o nich je ale řeč v kapitole věnované interakcím stejně jako s-částice, o nichž se hovoří v kapitole o Antihmotě v článku syppersymetrické částice.

8.1 Higgsovy bozony

Higgsovův bozon „je“ částice, která narušuje elektroslabou symetrii a je zodpovědná za existenci hmotnosti, současně ale představuje jeden z nejzapeklitějších problémů moderní fyziky.

Podstatnou úlohu hrají v teorii elektroslabé interakce, kde způsobují nenulovou hmotnost intermediálních částic slabé interakce a její konečný dosah. Tyto částice také měly rozhodnou měrou ovlivnit počáteční fáze našeho Vesmíru.

Vědecky řečeno „jsou“ to kvanta tzv. Higgsova-Kibleova skalárního pole, které se v kalibračních unitárních teoriích pole zavádí do lagrangiánu za účelem onoho tzv. spontánního narušení symetrie. Toto pole vede též k tomu, že některé intermediální bozony získají hmotnost a příslušné interakce se stanou silami krátkého dosahu. Spin částic je nulový. Po částicích se intenzivně pátrá a měly by být detekovatelné v současné době stavěnými urychlovači.



Peter Higgs, objevitel spontánního narušení symetrie

8.2 Axiony

Axiony „jsou“ lehké (klidová hmotnost cca 10-5eV) částice se spinem 0, které se v rámci kvantové chromodynamiky zavádějí při řešení CP-problému narušení kombinace nábojové symetrie a parity v teorii kvarků. Patří také mezi WIMPW)

Více v kapitole Antihmota ve článku o CPT invarianci.

8.3 Preony

Částice, ze kterých by mohly být složeny kvarky a leptony. První preonový model byl vytvořen Salamem a Patim již v roce 1974. Každý kvark či lepton by měl být tvořen ze tří částic: somonu (3 druhy, určuje generaci, nulový náboj), flavonu (2 druhy, určuje vůni "dolní" či "horní", náboj má $\pm 1/2$) a chromonu (4 druhy, určuje barvu, náboj má $\pm 1/6$). Dohromady získáme $3^2 \cdot 4 = 24$ částic, 12 leptonů a 12 kvarků.

Problémy modelu: kvarky a leptony jsou bodové až do 10^{-18} m. Preony musely zaujímat menší prostor a z Heisenbergových relací by musely mít značnou hybnost. Leptony a kvarky by měly větší hmotnost než ve skutečnosti mají. Nadvětelné preony by ale přinesly zápornou hmotnost a za cenu ztráty kauzality bychom dostali správné hmotnosti. V roce 1996 byly provedeny skupinou CDF experimenty, které připouštějí možnost struktury kvarků na základě rozptylových experimentů protonů a antiprotonů.

8.4 Magnetické monopóly

Jsou to částice duální vůči elektrickému náboji. Magnetický monopol 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 říká, že magnetické pole je nezářivé s uzavřenými siločárami, tj. magnetické monopóly neexistují.

8.5 Leptokvarky

„Existují“ dva typy: X a Y. Jsou to vektorové bozony zvané též leptokvarky, protože způsobují přechody mezi kvarky a leptony. Zavádějí se v tzv. grandunifikačních teoriích. Měly by mít velmi vysoké hmotnosti řádově $m_{X,Y} \sim 10^{15} \text{GeV}$.

Více v kapitole Budoucnost moderní částicové fyziky ve článku o GUT.

8.6 Superstruny

Superstruny „jsou“ jednorozměrné elementární útvary cca Planckovy délky, jejichž různé excitované vibrační stavy a vzájemná propojení by podle teorie superstrun měly být základem veškerých částic a polí. Struny mohou být otevřené nebo uzavřené. Zobecněním superstrun jsou tzv. p-brány, které mohou mít více prostorových dimenzí a vyvíjejí se v 11-rozměrném prostoročase.

Více v kapitole Budoucnost moderní částicové fyziky ve článku o teorii superstrun.

8.7 Tachyony

Ze speciální teorie relativity plyne, že žádné hmotné těleso či částice se nemůže pohybovat rychleji než světlo, přičemž rychlostí světla se pohybují pouze částice s nulovou klidovou hmotností. Někteří fyzikové se však s tímto omezením a asymetrií v oblasti rychlostí nechtěli smířit a vyslovili spekulativní hypotézu, že by mohly existovat exotické částice zvané tachyony¹⁾, které by se pohybovaly vyšší rychlostí než světlo.

Zastánci hypotézy tachyonů rozdělují částice na tři druhy: Částice s (reálnou) nenulovou klidovou hmotností, pohybující se podsvětelnou rychlostí, nazývají bradyony či tardyony. Částice s nulovou klidovou hmotností, pohybující se rychlostí světla, označují jako luxony. A částice, které by se pohybovaly nadsvětelnou rychlostí, se všeobecně nazývají tachyony. Ze základních vztahů relativistické dynamiky mezi hmotností, rychlostí, hybností a energií, plynou některé neobvyklé "exotické" vlastnosti tachyonů. Například vychází imaginární hmotnost tachyonu.

Pokud tachyon urychlujeme, snižuje se jeho energie; tachyon s nulovou energií by se pohyboval nekonečně rychle. Z hlediska kvantové fyziky by se naráželo na problém, že při vzniku virtuálních párů tachyonů by se tyto od sebe vzdálily velmi rychle na větší vzdálenost než je Comptonova a nemohly by zpětně anihilovat - vakuum by se tím stalo zcela nestabilní. Pokud by byl tachyon elektricky nabitý, při svém pohybu vakuem nadsvětelnou rychlostí by vyzařoval Čerenkovovo elektromagnetické záření²⁾ - to by snižovalo jeho energii a tedy zvyšovalo jeho rychlost, elektricky nabitě tachyony by samovolně vyzářily veškerou svoji energii. I u elektricky nenabitěho tachyonu lze podle obecné teorie relativity očekávat, že při svém pohybu vakuem rychlostí větší než c by měl tachyon vyzařovat gravitační Čerenkovovo záření³⁾ (vytvářející kužel táhnoucí se za ním), které by odnášelo energii tachyonu, který by se tím urychloval na stále vyšší rychlost.

Reálná existence tachyonů ve fyzice obecně odmítána. Žádné jevy svědčící pro účast tachyonů nebyly pozorovány, tyto částice nemají ani žádnou úlohu v logické stavbě teoretické fyziky. Tachyony se občas objevují jako některá řešení při sjednocování různých teorií.



9 Interakce, intermediální částice – kvanta polí

Každá částice podléhající interakci je obklopena oblakem intermediálních částic. Pojem pole (elektromagnetické, slabé, silné, gravitační) tak neznamená nic jiného než tento oblak intermediálních částic. Každá elektricky nabitá částice je obklopena fotony (elektromagnetickým polem), každý kvark je obklopen gluony (gluonovým - silným polem). Gluony vytvářejí kolem kvarku jakýsi těžký *gluonový kožich*, jeho hmotnost několikanásobně přesahuje hmotnost samotného kvarku.

9.1 Gravitační interakce

Gravitační interakce působí na všechny částice bez rozdílu, má nekonečný dosah tj. má univerzální povahu a je vždy přitažlivá⁹⁾. Odpovídá za strukturu Vesmíru (pohyby planet, soudržnost galaxií, celkový vývoj Vesmíru).

Gravitační interakce je nejrozšířenějším druhem interakce v přírodě. Na klasické úrovni (pro slabá pole) je gravitace popsána Newtonovým zákonem všeobecné gravitace, v obecné a exaktní formě pak Einsteinovými rovnicemi gravitačního pole v rámci obecné teorie relativity - gravitace je zde vyjádřena jako *zakřivený prostoročas*. Při zrychleném pohybu gravitujících těles se budí časově proměnné gravitační pole, přičemž podle Einsteinových rovnic vznikají *gravitační vlny*, které se šíří do prostoru a odnášejí část energie (a hybnosti) zdroje. Kvanty těchto gravitačních vln se jsou gravitony.

I když je gravitace nejslabší silou, při velkém nahromadění hmoty může zesílit natolik, že překoná všechny ostatní síly. Může pak vést ke katastrofickým jevům jako je gravitační kolaps a vznik černých děr, v kosmologickém měřítku pak gravitace rozhoduje o osudu celého vesmíru (jedna z možností je dokonce gravitační zhroucení celého vesmíru do "ohnivé pece velkého krachu").

Při běžném studiu interakcí elementárních částic nemá gravitace díky své slabosti žádný vliv, i když tušíme, že v nejmenších mikroměřítkách řádu 10^{-33} cm (Planckova délka) může i zde hrát rozhodující úlohu v geometricko-topologické struktuře prostoročasu.

9.1.1 Gravitony

Gravitony jsou kvanta gravitačního vlnění. Graviton má nulovou klidovou hmotnost, pohybuje se rychlostí světla, jeho spinové číslo je 2.

Gravitační vlny předpovídá obecná teorie relativity jakožto fyzika gravitace a prostoročasu. Jsou zatím prokázány jen nepřímo, zatím se je nepodařilo přímo detekovat. Na experimentální prokázání gravitonů není naděje v dohledné budoucnosti.

9.2 Elektromagnetická interakce

Tato druhá nejrozšířenější interakce působí jen mezi částicemi s elektrickým nábojem. Elektrické síly jsou přitažlivé i odpudivé, což interpretujeme pomocí dvou druhů elektrického náboje - kladného a záporného, přičemž stejnojmenné náboje se odpuzují a opačné náboje se přitahují.

Elektrický náboj je kvantován - existuje nejmenší (elementární) možné množství náboje $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Základním nositelem záporného elementárního náboje je elektron, kladného elementárního náboje proton. Přitažlivé elektrické síly mezi protony v jádře a elektrony v obalu především udržují pohromadě strukturu atomů, následně k sobě vážou atomy v molekulách a v krystalových mřížkách. Elektrické síly jsou tak zodpovědné za veškerou různorodost tvarů i chemického složení našeho světa.

Běžná hmota v nám známém Vesmíru většinou obsahuje v průměru stejný počet protonů a elektronů, takže je navenek elektricky neutrální. Porušení této rovnosti v zastoupení protonů a elektronů je základem veškerých jevů elektrických. Elektrické náboje kolem sebe budí elektrické pole. Důležitou vlastností elektromagnetismu je to, že pohybem elektrických nábojů vzniká magnetické pole a časovou proměnností magnetického pole zase se indukuje pole elektrické.

Elektromagnetické pole je fyzikálně popsáno tzv. Maxwellovými rovnicemi elektrodynamiky, které v obecné formě odrážejí všechny zákonitosti buzení pole, vzájemných indukčních přeměn mezi elektrickým a magnetickým polem i dynamiku šíření změn v poli. Zrychleným pohybem elektrických nábojů vzniká časově proměnné elektromagnetické pole a dochází k buzení elektromagnetických vln, které se odpoutávají od svých zdrojů, šíří se rychlostí světla a odnášejí do prostoru část energie (a hybnosti) zdrojové soustavy. Vyzářování elektromagnetických vln je kvantováno - děje se ve formě fotonů.

Kromě elektronů a protonů vykazují elektromagnetickou interakci a nesou elektrický náboj i mnohé další elementární částice. Elektromagnetická síla tak hraje důležitou úlohu při většině vzájemných interakcí částic.

9.2.1 Fotony

Fotony jsou kvanta elektromagnetického záření. Mají nulovou klidovou hmotnost, pohybují se rychlostí světla, jsou nositeli energie $E = h \cdot n$, kde h je Planckova konstanta a n je frekvence elektromagnetické vlny o vlnové délce $l = c/n$.

Jsou to bosony se spinovým číslem 1, 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 γ dále vznikají při anihilacích pozitronů s elektrony a v řadě dalších interakcí elementárních částic.

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 energií záření γ (asi 140MeV) pak při interakci vznikají další částice, např. p-mezony.

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

9.3 Elektroslabá interakce

V šedesátých letech se ukázalo, že je možné vytvořit teorii, která by jednotně popisovala elektromagnetickou i slabou interakci. Slabá interakce podléhá SU(2) symetrii - symetrii mezi elektronem a jeho neutrinem. Slabá interakce tyto částice nerozlišuje.

Problém jednotného popisu elektroslabé interakce je otázkou nalezení symetrie, která obsahuje jak U(1)_{loc} tak SU(2) symetrii, tj. symetrii elektromagnetické a slabé interakce. To se podařilo Steven Weinbergovi, Abdus Salamovi a Sheldon Lee Glashowovi, kteří za teorii elektroslabé interakce obdrželi Nobelovu cenu za fyziku (1979). Teorie elektroslabé interakce předpověděla, že kromě fotonu existují ještě další tři výměnné částice: intermediální bosony W^+ , W^- , Z^0 , které odpovídají za slabou interakci. Intermediální bosony W^+ , W^- , Z^0 byly objeveny v CERNu v roce 1983 ve vstřícných proton antiprotonových svazcích o energii 270 GeV. Jejich objevitelé Carlo Rubbia a Simon van der Meer obdrželi za tento objev Nobelovu cenu za fyziku v roce 1984.

V teorii elektroslabé interakce je jeden zásadní problém. Platí-li symetrie U(1)_{loc} a SU(2) beze zbytku, vyjdou hmotnosti všech čtyř intermediálních částic nulové. Ve skutečnosti je nulová jen klidová hmotnost fotonu a částice W^+ a Z^0 mají klidové hmotnosti 80 GeV a 91 GeV. V teorii to znamená, že symetrie musí být narušena. Tento jev nazýváme *spontánní narušení symetrie*. Za narušení symetrie by měly být odpovědné Higgsovy bosony.

Energie Higgsova pole mohla být iniciátorem inflační fáze raného Vesmíru. Jev analogický spontánnímu narušení symetrie lze zhruba vysvětlit následovně:

Postavíme jehlu na povrchu stolu na špičku, měla by podle klasické teorie spadnout tím později, čím lépe je jehla na začátku postavena svisle. Při přesné symetrii (jehla přesně na špičce) by neměla spadnout vůbec, protože nelze vybrat žádný preferovaný směr. Přesto dojde k narušení symetrie a jehla v konečném čase dopadne na povrch stolu.

9.4 Slabá interakce

Slabá interakce jsou mikroskopické síly krátkého dosahu. Na rozdíl od ostatních třech druhů interakcí slabé interakce nevytvářejí vázané systémy - je to způsobeno tím, že mají slabou intenzitu a zároveň i velmi krátký dosah. Hlavní význam slabých interakcí spočívá v tom, že způsobují radioaktivitu β - vzájemnou přeměnu neutronů a protonů, doprovázenou emisí elektronu β^- , pozitronu β^+ , či pohlcením elektronu z obalu (elektronový záchyt). Slabá interakce je totiž schopna uvnitř hadronů přeměňovat kvarky \underline{d} na \underline{u} a naopak, za působení zprostředkujících intermediálních bosonů W^- a W^+ . Společným doprovodným jevem všech těchto přeměn je emise neutrina $\bar{\nu}$.

Slabá interakce se projevuje i při dalších procesech v mikrovětě, především při interakcích a přeměnách mionů m , p a K mesonů.

9.4.1 Bozony

Bozony W^- , W^+ a Z^0 (tzv. těžké bozony) a jsou nositeli slabé interakce. W^- a W^+ nesou záporný a kladný elementární náboj stejné velikosti jako elektron, mají hmotnost 82GeV a zprostředkovávají vzájemné β přeměny neutronů a protonů. Neutrální Z^0 boson má hmotnost 93GeV. Intermediální bosony W^- , W^+ , Z^0 byly experimentálně prokázány v roce 1983 při interakcích ve vstřícných proton-antiprotonových svazcích v collideru velkého protonového synchrotronu v CERN.

9.5 Silná interakce

Jedná se o nejsilnější interakci, která však působí jen mezi hadrony. Význačnou vlastností silných interakcí je jejich krátký dosah - působí efektivně jen do vzdálenosti řádu $10^{-15}m$, při větších vzdálenostech velmi rychle slábnou a stávají se zanedbatelnými.

Největší význam silných interakcí spočívá v tom, že drží pohromadě jádra atomů vůči elektrickým odpudivým silám mezi protony. Podle modelu kvarkové struktury hadronů jsou primárními nositeli silné interakce kvarky a interakce mezi hadrony je jejich zbytkovým projevem.

9.5.1 Gluony

Gluony jsou částice se spinem 1 zprostředkující kvanta silné interakce mezi kvarky neboli hypotetické kvantum silového pole kvarků.

Byl objeven v roce 1979 v Hamburгу po deseti letech od jeho předpovězení. Gluon tvoří podstatnou část kvark-gluonového plazmatu^{K)}. Zajímavé je, že gluon je svojí vlastní antičásticí.

10 Výzkum částic

10.1 Urychlovače, generátory, reaktory

Pro studium vlastností, struktury a interakcí elementárních částic, jakož i pro aplikace v různých oblastech vědy a techniky (včetně medicíny), je potřeba použít částic urychlených na vysoké kinetické energie. Uměle urychlit dovedeme pouze stabilní elektricky nabitě částice a ionty těžších prvků. Vysokoenergetické částice bez náboje a krátkožijící částice lze pak získat sekundárně - interakcemi urychlených nabitých částic s částicemi ve vhodném terčíku. Přístroje, které působením silných elektrických a magnetických polí urychlují nabitě částice, se nazývají urychlovače. Podle způsobu technické realizace a tvaru dráhy, na níž urychlování částic probíhá, rozdělujeme urychlovače na dva základní typy: lineární a kruhové.

Urychlovací elektrody některých typů urychlovačů jsou napájeny střídavým vysokofrekvenčním napětím či vysokofrekvenčním elektromagnetickým vlněním. To vzniká ve vysokofrekvenčních generátorech, které jsou osazeny speciálními elektronkami, které mohou pracovat jako vysokofrekvenční oscilátory o velmi vysokých frekvencích řádově GHz - magnetrony a klystrony.

Na závěr kapitoly je ještě krátký článek o reaktoru, ve kterém probíhá jaderná fúze.

Jakkoli je princip kruhového urychlování nabitých částic velmi úspěšný a efektivní, zdá se, že kruhové urychlovače se již přiblížily k hranicím svých možností. Pokud bychom chtěli nabitě částice urychlovat na ještě podstatně vyšší energie při reálně dostupných průměrech kruhové dráhy (t.j. průměrech urychlovacích trubic), čím dál více by se uplatňoval jev vzniku synchrotronového záření, které by odnášelo značnou část kinetické energie částic a nakonec by znemožnilo další urychlení. Zdá se tedy, že budoucí urychlovače pro nejvyšší energie budou muset být lineární.

10.1.1 Princip urychlovače

10.1.1.1 Iontový zdroj

Zdroj urychlovaných částic emituje do "startovacího" místa urychlovacího systému požadovaný druh částic, jako jsou elektrony, protony či těžší ionty. V nejjednodušším případě se jedná o ionizační trubici obsahující příslušný zředěný plyn (např. vodík), kde v doutnavém výboji mezi katodou a anodou (při napětí cca stovky voltů) vznikají ionty a ty jsou pomocí tenké kapiláry vedeny "odsávací" elektrodou do urychlovacího systému. Pro urychlovače elektronů je zdrojem prostá žhavená katoda opatřená vhodnými urychlujícími a fokusujícími anodami tzv. elektronovým dělem podobně jako u obrazovky CRT monitoru. U velkých urychlovačů vysokých energií se jako zdroje částic k urychlení někdy používají injektory - do hlavní komory jsou předurychlené částice vstříkovány pomocným lineárním urychlovačem (s energií jednotky až desítky MeV) a následně urychlovány na požadovanou vysokou energii (řádově GeV).

10.1.1.2 Terčik

Terčik, na nějž dopadá svazek urychlených částic, je buď vnitřní - je umístěn uvnitř urychlovacího systému, nebo vnější - svazek částic je vyveden ven z urychlovací trubice. Rovněž sekundární částice, produkované na vnitřním terčíku (jako jsou p nebo K mezony), se působením magnetického a elektrického pole vyvádějí ve formě svazku do prostoru laboratoře, kde jsou umístěny měřicí aparatury (detekční přístroje, bublinové komory atd.). Při dopadu urychlených částic na terčik se většina kinetické energie částic mění na teplo - ostřelovaný terčik se zahřívá. Aby nedošlo k jeho tepelnému poškození či odpaření terčíkové látky, je nutno toto ztrátové teplo (může činit i stovky wattů) odvádět - terčik se fixuje na masivní kovovou podložku s dutinou, chlazenou protékající vodou (podobně jako anody výkonových rentgenových trubic).

10.1.1.3 Collidery – vstříčné svazky

Dopadá-li urychlená částice na (pevný, nepohyblivý) terčik a tam se srazí s další částicí nebo jádrem, spotřebuje se na vlastní interakci ve skutečnosti jen část energie nalétající částice, neboť podle zákona akce a reakce se část energie dopadající částice přemění na kinetickou energii odražené částice. Pro výsledek interakce je důležitá kinetická energie v těžištové soustavě obou částic. Podstatného zvýšení efektivní energie interakce lze dosáhnout tím, že nalétající a terčíková částice se budou pohybovat proti sobě se srovnatelně vysokými kinetickými energiemi. V tom spočívá metoda vstříčných svazků bez použití klasického terčíku: obě částice, jejichž interakce chceme zkoumat, se urychlí na vysoké energie a ve vstříčných svazcích se pouštějí proti sobě tak, aby se vzájemně čelně srážely a interagovaly. Oba svazky se urychlují v jedné nebo ve dvou různých trubicích. Přístroje tohoto druhu se nazývají collidery a umožňují studovat interakce částic při podstatně vyšších efektivních energiích než je tomu u klasických urychlovačů s terčíky - v současné době se dosahuje až TeV.

Aby vstříčné srážky byly dostatečně časté, je třeba zajistit značně vysokou intenzitu obou svazků. Proto se na některých urychlovačích používají speciální akumulární prstence, v nichž se v silném magnetickém poli hromadí urychlené částice (např. protony a antiprotony) z několika dávek a teprve po dosažení dostatečné intenzity se realizuje srážka ve vstříčných svazcích.

10.1.2 Lineární urychlovače

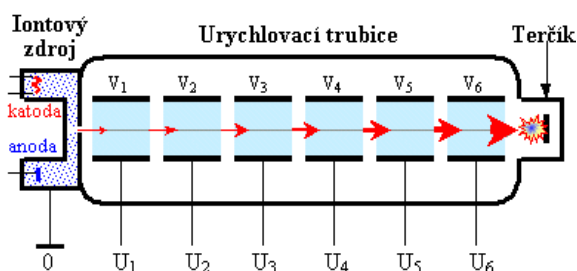
Lineární urychlovače urychlují nabitě částice působením elektrického pole během jejich pohybu po lineární přímkové dráze.

Vývoj těchto urychlovačů postupoval tak, že se frekvence f zvyšovala, přičemž místo válcových elektrod se používají dutinové rezonátory. Novější lineární urychlovače užívají pro vytvoření urychlujícího pole vlnovodů napájených frekvencí několika GHz z klystronových generátorů. Ve vlnovodu se vytváří vysokofrekvenční střídavé elektromagnetické pole, v němž se urychlovaná nabitá částice pohybuje stejnou rychlostí jako postupná vlna, přičemž na částici působí stálá urychlující síla daná elektrickou složkou E elektromagnetické vlny. Vysokofrekvenční lineární urychlovače s nosnou vlnou se používají pro energie až desítky GeV.

Malé lineární urychlovače elektronů jsou nyní velmi často používány v radioterapii (kde postupně vytlačily dříve používané betatrony), především jako zdroj tvrdého brzděného záření γ o energiích cca 5-40MeV.

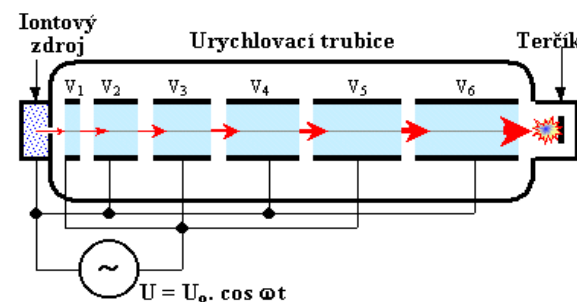
10.1.2.1 Elektrostatické

Z iontového zdroje vstupují požadované částice (elektrony, protony, deuterony apod.) do urychlovacího systému, tvořeného několika sousedními kovovými válcovými elektrodami V_1, V_2, \dots, V_n , mezi nimiž je rozloženo postupně vzrůstající vysoké napětí $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$. Elektrostatickým polem jsou nabitě částice s nábojem q na lineární dráze urychlovány na energii $E = q \cdot (U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n)$ danou součtem napětí na jednotlivých elektrodách. Mezera mezi dvěma po sobě následujícími válcovými elektrodami působí na letící částice jako elektrická čočka, fokusující proud částic do úzkého svazku, který nakonec dopadá na terčik. Urychlovací elektrody jsou napájeny vysokým napětím buď z elektronického kaskádního generátoru (soustava vhodně zapojených diod a kondenzátorů), nebo z elektrostaticko-mechanického Van de Graaffova generátoru. Používá se napětí od několika stovek kilovoltů až asi do 5MV (vyšších napětí je obtížné dosáhnout protože vznikají korónové výboje).



10.1.2.1 Vysokofrekvenční

Efektivnější způsob, jak na lineární dráze urychlit nabitě částice na značně vysokou energii bez použití extrémně vysokého napětí, je realizován ve vysokofrekvenčním lineárním urychlovači. Nabitě částice z iontového zdroje Z vstupují do urychlovacího systému válcových elektrod $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$, které jsou připojeny ke střídavému elektrickému napětí $U(t) = U_0 \cdot \cos(\omega t) = U_0 \cdot \cos(2\pi f t)$ o amplitudě U_0 a frekvenci f . Liché válce jsou připojeny k jednomu pólu, sudé válce k druhému pólu vysokofrekvenčního zdroje vysokého elektrického napětí. Přejde-li kladná částice s nábojem q a hmotností m ze zdroje Z ve fázi, kdy první válcová elektroda V_1 má záporný potenciál $-U_0$, pak získá energii $E_1 = q \cdot U_0$ i rychlost, takže délku l_1 uvnitř válce V_1 proletí za čas $t_1 = l_1/v_1$. Je-li frekvence f střídavého napětí volena tak, aby urychlená částice vstoupila do mezery mezi válci V_1 a V_2 v čase, kdy se polarita obrátí a válec V_1 má kladný a V_2 záporný potenciál, je částice znovu urychlena o energii $q \cdot U_0$, tj. má již energii $2 \cdot q \cdot U_0$. Je-li synchronizace mezi frekvencí f , napětím U_0 a délkami elektrod l_k volena tak, aby se vždy během průchodu mezi jednotlivými válcovými elektrodami V_k obrátila polarita střídavého napětí, budou se tyto synchronní částice při průchodu každou elektrodou znovu a znovu urychlovat.



10.1.3 Kruhové urychlovače

Velmi efektivním způsobem, jak urychlit nabitě částice na vysoké energie, je jejich mnohonásobné urychlení v elektrickém poli, kam jsou částice opakovaně vráceny po kruhové dráze působením magnetického pole. Na částici s nábojem q je zde aplikována nejen elektrická urychlující síla $F_e = q \cdot E$, ale i Lorentzova síla působící v magnetickém poli intenzity B kolmo ke směru pohybu nabitě částice rychlostí v . Tato magnetická síla způsobuje, že nabitá částice se bude pohybovat po kruhové dráze o poloměru $R = m \cdot v \cdot c / (q \cdot B)$. Je-li ve vhodných místech této kruhové dráhy synchronně aplikováno elektrické urychlující pole (v tečném směru), budou částice periodicky urychlovány při každém svém oběhu.

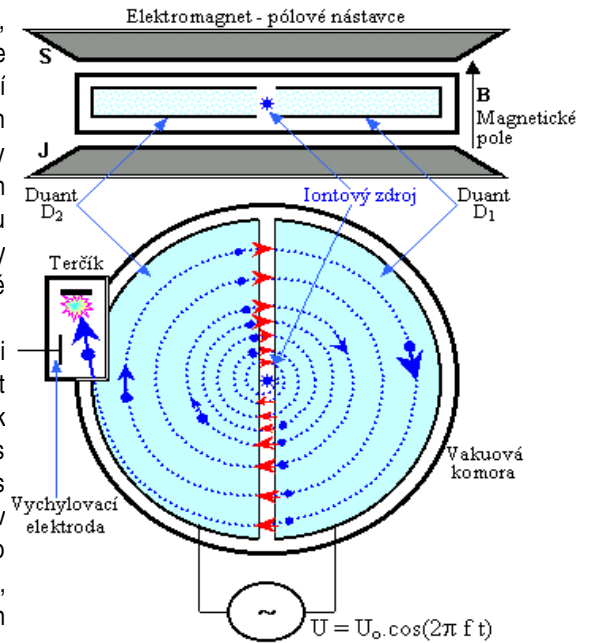
10.1.3.1 Cyklotron

Cyklotron je základním typem kruhového urychlovače. První cyklotron vyvinul E.O.Lawrenc v r.1932.

Mezi póly silného elektromagnetu jsou v ploché vakuové komoře upevněny dva duté poloválce D_1 a D_2 , tzv. duanty, mezi nimiž je urychlovací mezera. Duanty jsou připojeny ke zdroji střídavého napětí, takže v mezeře mezi deskami je střídavé elektrické pole. Nabitě částice vstupují do středu urychlovací mezery z iontového zdroje. Následkem síly, kterou elektrické pole v mezeře působí na částici s nábojem q a hmotností m , je částice vtažena do jednoho z duantů (který má právě opačnou polaritu) s určitou rychlostí v_1 . Uvnitř duantu, kde je elektrické pole odstíněno, působením silného magnetického pole B opíše částice půlkružnici o poloměru $R_1 = m \cdot v_1 / (q \cdot B)^{1/2}$. Doba, za kterou projde částice tuto půlkružnici (půl-perioda) nezávisí na její rychlosti ani na jejím poloměru dráhy. Jestliže jsou duanty napájeny střídavým napětím právě o frekvenci f , pak v okamžiku kdy částice opíše půlkružnici v prvním duantu a ocitne se opět v urychlovací mezeře,

je polarita duantů již opačná a částice bude opět urychlena elektrickým polem, takže do druhého duantu vletí s větší rychlostí. V druhém duantu se bude pohybovat opět po kružnici, nyní však o poloměru $R_2 = m \cdot v_2 / (q \cdot B)$, který je větší než byl R_1 , ale se stejnou periodou a frekvencí kruhového pohybu. Stejným způsobem je pak částice při každém svém průchodu mezerou mezi duanty znovu a znovu urychlována, přičemž se pohybuje po kružnicích s rostoucím poloměrem, tedy po spirále. Z poslední své dráhy o maximálním poloměru (blízkém poloměru duantů) je urychlená částice elektrostaticky nebo magneticky vychýlena a vyvedena do prostoru terčíku, na nějž narazí a vyvolá tam patřičné jaderné procesy.

Nastíněný princip činnosti cyklotronu bude při konstantní frekvenci fungovat jen do té doby, kdy hmotnost urychlované částice můžeme považovat za konstantní, tj. pouze v nerelativistické oblasti. Chceme-li použít cyklotronu k urychlování částic na vyšší energie, kdy rychlost částic je již srovnatelná s rychlostí světla, přestává být hmotnost částice m konstantní, ale zvyšuje se s rostoucí rychlostí. Ve stejném tempu se snižuje frekvence oběhu částic v konstantním magnetickém poli. Aby mohla být částice dále urychlována i v této relativistické oblasti, je potřeba modulovat frekvenci urychlovacího napětí tak, aby byla stále v rezonanci s frekvencí oběhu částice. Takto upravený cyklotron se synchronizací se nazývá synchrociklotron nebo relativistický cyklotron^F. Tyto přístroje pracují v pulsním režimu, přičemž kmitočet urychlovacího napětí na duantech je modulován a mění se cca 50-krát za vteřinu z hodnot cca 25MHz na cca 12MHz, používají se pro urychlování protonů na energie do cca 1GeV.



10.1.3.2 Synchrotron^S

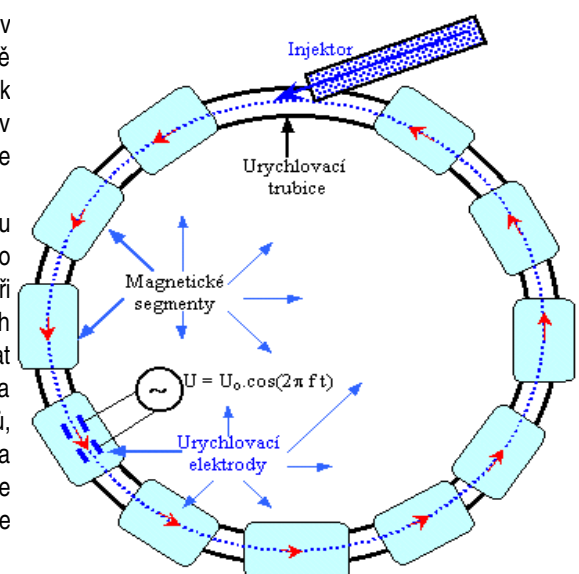
Pro urychlování částic na velmi vysoké energie vychází v kruhovém urychlovači velký poloměr jejich orbit, takže cyklotronový způsob se spirálovým pohybem částic v ploché vakuové komoře již není prakticky použitelný. Aby dokonale vakuový prostor nebyl enormně velký, stejně jako elektromagnety, je nutno použít kruhové urychlovače s pevnou kruhovou dráhou. Aby se nabitá částice urychlovala a udržela se na pevné kruhové dráze o poloměru R , je potřeba aby s rostoucí rychlostí urychlovaných částic se s časem synchronně zvyšovala jak frekvence urychlovacího napětí, tak intenzita magnetického pole, která již nemůže být konstantní, ale je rovněž funkcí času.

Částice jsou urychlovány ve vakuové trubici o průměru cca 3-8cm (většinou eliptického průřezu), stočené do kruhu o průměru stovek metrů až několika kilometrů. Trubice je obklopená velkým množstvím segmentů elektromagnetu, který budí magnetické pole udržující částice na kruhové orbitě. Synchrotron urychluje již předběžně urychlené částice, které se do urychlovací komory vstříkují z vhodného injektoru, kterým bývá nejčastěji lineární urychlovač s energií cca 20-100MeV. Spolu s magnety jsou ve vhodných místech kruhové dráhy umístěny urychlovací elektrody napájené střídavým vysokým napětím, jehož frekvence je synchronně modulována tak, aby částice mezi elektrodami přišla v době, kdy polarita zajistí vždy další a další urychlení částice. Současně s frekvencí je zvyšována i intenzita magnetického pole.

Synchrotron pracuje v pulsním režimu, kdy protony vstupující v pravidelných dávkách z injektoru do urychlovací trubice při energiích řádově 100MeV vykonají během urychlovacího cyklu, trvajícího cca 3-5 sekund, několik milionů oběhů, přičemž se urychlí na řádově 100GeV a magnetické pole v průběhu urychlovacího cyklu vzroste. Urychlovací cyklus se periodicky opakuje cca 5-10-krát za minutu.

Po skončení urychlovacího cyklu dopadají částice buď na vnitřní terčík, nebo jsou vyvedeny elektromagnetickým polem na vnější terčík, popř. jsou vedeny do akumulárního prstence pro realizaci interakcí částic ve vstřícných svazcích. Při nárazu svazku např. protonů na terčík vzniká množství částic nejrůznějších druhů, z nichž můžeme soustavou elektrických a magnetických polí odseparovat částice požadovaného druhu, fokusací je zformovat ve svazek a zamířit je na další terčík. Získáváme tak sekundární svazky např. antiprotonů, pionů, mionů, kaonů, hyperonů. K separaci částic se používá proměnných elektrických a magnetických polí, k zaostření svazků se používá magnetických čoček, kde se kříží dvě magnetická pole, jejichž gradienty postupně fokusují svazek ve vertikálním i horizontálním směru.

Při velkých hodnotách poloměru, který pro dosažení vysokých energií řádově stovky GeV musí dosahovat několika kilometrů, je potřeba, aby průřez urychlovací trubice byl co nejmenší - aby bylo možno dosáhnout potřebného vysokého vakuu a aby náklady na výrobu elektromagnetů, jakož i nároky na jejich elektrický příkon, nebyly enormně vysoké. Částice po vstříku do urychlovací trubice konají radiální a vertikální kmity kolem své základní kruhové dráhy. Kromě toho mají částice ve svazku tendenci rozbíhat se do všech stran, neboť jsou souhlasně nabitá a proto se odpuzují. Nemá-li dojít k dopadu částic na stěny



trubice, je třeba udržet urychlované částice na jejich orbitě s vysokou přesností, takže je třeba udržet amplitudu radiálních a vertikálních kmitů co nejnížší, stejně jako rozptyl částic - je potřeba provádět silnou fokusaci, při níž se shluk vstříknutých částic během urychlování koncentruje a formuje do intenzivního úzkého svazku prudce letících částic.

10.1.3.3 Betatron

Betatron je kruhový indukční urychlovač elektronů - vyrábí totiž záření β -, což jsou rychlé elektrony.

Urychlovací trubice betatronu má tvar toroidu^{R)} zhotoveného z elektricky nevodivého materiálu s vysokým vakuem uvnitř. Trubice je "navléknuta" na pólové nástavce elektromagnetu napájeného střídavým proudem. Elektrony jsou ve vhodném okamžiku (vhodné fázi periody střídavého proudu) vstříkovány do urychlovací trubice elektronovou tryskou, tvořenou žhavenou katodou, mřížkou a urychlující a fokusující anodou. Časově proměnné magnetické pole indukuje v trubici vířivé elektrické pole, jehož elektromotorická síla, směřující podél kruhové dráhy, tyto elektrony urychluje.

Z elektronického hlediska je betatron transformátorem, jehož primární vinutí je napájeno střídavým proudem a jehož sekundárním vinutím je urychlovací trubice, v níž se ve vakuu (místo v drátech vinutí) pohybují elektrony urychlované indukovanou elektromotorickou silou. Na kruhové dráze jsou elektrony udržovány magnetickým polem. K urychlování elektronů dochází jen v první čtvrtině sinusového průběhu střídavého napětí v elektromagnetu. Ve vhodném okamžiku vzestupné části sinusovky jsou injektovány elektrony, které jsou urychlovány, magnetické pole narůstá, elektrony se po spirále stáčíjí dovnitř a po určitou dobu obíhají po stacionární dráze, na níž jsou neustále urychlovány. Po dosažení vrcholu čtvrtperiody slábne vířivé elektrické pole, obrací svůj směr a elektrony by posléze byly naopak brzděny. Zároveň však dochází k zeslabení magnetického pole a elektrony se začnou pohybovat po spirále k zevnímu okraji trubice, kde narazí na terčík nebo jsou vyvedeny k zevnímu použití.

Elektromagnet menších betatronů bývá často napájen střídavým proudem z normální elektrické sítě 220V s frekvencí 50Hz, přiklon činí jednotky až desítky kW. Poloměr kruhové dráhy bývá desítky centimetrů. Během urychlovacího cyklu, který trvá cca 5ms, vykonají elektrony cca 2 miliony oběhů, přičemž se indukovanou elektromotorickou silou urychlí na cca desítky MeV. Pak dopadají buď na vnitřní terčík (přičemž emitují brzdné záření γ), nebo jsou ve svazku vyvedeny ven - slouží pak k elektronovému ozařování, např. pro technické či lékařské účely. Stejně využití má i tvrdé brzdné záření γ .

Betatrony se používají pro energie elektronů do cca 300MeV. Při velkých energiích je však potřeba (podobně jako u cyklotronu) provádět synchronizaci vzhledem k růstu hmotnosti elektronů s jejich energií. Spojením principu betatronu a synchrotronu vzniká betasynchrotron, který urychluje elektrony na kruhové orbitě uvnitř vakuovaného prstence nejprve na betatronovém principu pomocí elektromagnetů napájených střídavým proudem, načež takto předurychlené elektrony jsou dále urychlovány mezi elektrodami, na něž se zapojí vysokofrekvenční urychlovací napětí se synchronizovanou frekvencí, přičemž odpovídajícím způsobem vzrůstá magnetické pole.

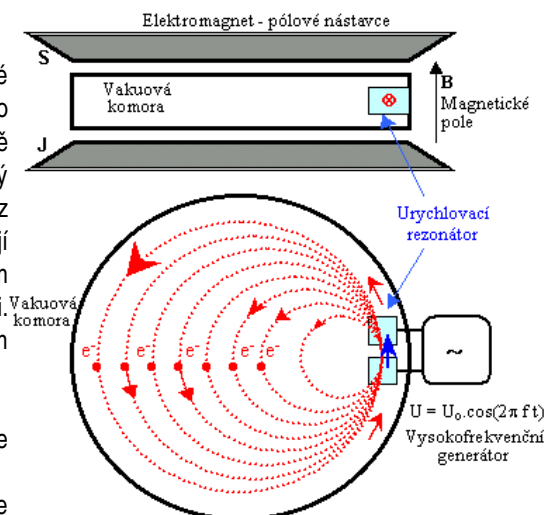
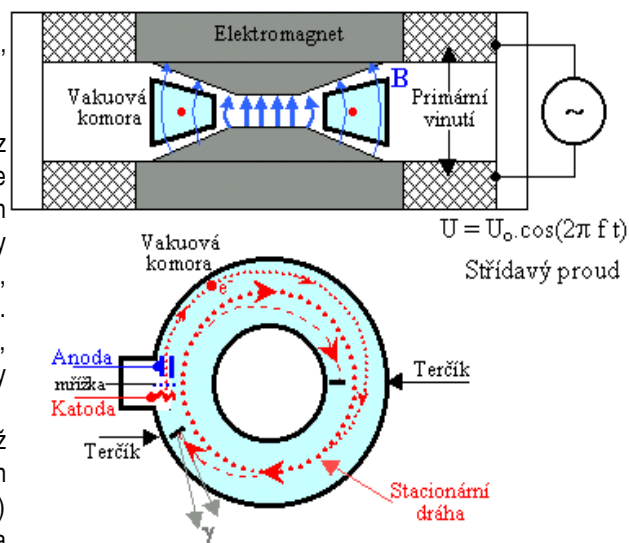
Menší betatrony se v 60.-80.letech hojně používaly v radioterapii, hlavně jako zdroj tvrdého brzdného záření γ o energiích do cca 40MeV. V posledních letech byly nahrazeny lineárními urychlovači elektronů, které mají výhodu vyšší intenzity toku elektronů a snadnější možnosti modulace svazku.

10.1.3.4 Elektronový cyklotron - Mikrotron

Speciálním typem kruhového urychlovače elektronů je mikrotron, označovaný také jako elektronový cyklotron. V magnetickém poli mezi pólovými nástavci silného elektromagnetu je umístěna plochá válcová komora s vysokým vakuem, podobně jako u cyklotronu, avšak místo duantů je u okraje komory namontován elektrický urychlovací systém - dutinový rezonátor, napájený vysokofrekvenčním napětím z magnetronového či klystronového generátoru (řádově GHz). Elektrony prolétají mnohokrát tímto rezonátorem, kam jsou po kruhové dráze vraceny magnetickým polem, přičemž při každém průletu jsou urychlovány na vyšší a vyšší energii. Vzhledem ke zvýšené kinetické energii je poloměr dráhy elektronu po každém průletu rezonátorem vždy větší a větší.

Elektrony pro urychlování se vstříkují elektronovým dělem, popř. se získávají emisí ze stěn rezonátoru.

Mikrotrony se občas používají pro urychlování elektronů na energie několika MeV, jejich předností je dosažení vysokých intenzit toku urychlených elektronů ve svazku. Lze vyextrahovat monoenergetické svazky elektronů z menších drah nižší energie, z největší dráhy při okraji urychlovací komory pak elektrony o maximální energii.



10.1.3.5 Vysokofrekvenční generátory elektrického napětí

Magnetrony a klystrony mají široké použití ve vysokofrekvenční technice - v UHF televizním vysílání, satelitním spojení, radarové technice, mikrovlnném ohřevu (např. v mikrovlnných troubách jsou mikrovlny buzeny magnetrony), v urychlovačích částic. Pracují často v pulzním režimu, přičemž dosahují výkonů až stovky megawatů.

10.1.3.5.1 Magnetron

Magnetron je válcová dioda, jejímž středem vede žhavená katoda, kolem níž je koaxiální anoda. Mezi katodu a anodu je přivedeno elektrické napětí. Dioda je ještě vložena do magnetického pole, jehož směr je rovnoběžný s katodou. Na elektrony emitované z katody tak působí kombinované zkřížené pole - radiální elektrické pole mezi katodou a anodou a podélné magnetické pole vnějšího magnetu. Lorentzovou silou se dráhy elektronů zakřivují tak, že při určité hodnotě anodového napětí a intenzitě magnetického pole již elektrony nedopadají přímo na anodu, ale vytvoří oblak kroužící v prostoru mezi katodou a anodou. Anoda magnetronu není jednoduchý válec, ale je tvořena kovovým blokem obsahujícím několik (většinou 8) obvodových dutinových rezonátorů. Elektrony během svého kruhového pohybu při průletu kolem rezonančních dutin odevzdávají část své energie a vzbuzují elektromagnetické oscilace v dutinách. Celkově je pohyb elektronů značně složitý. Kmitající elektromagnetické pole hustotně moduluje rotující elektronový oblak - dochází ke shlukování elektronů do ohnutých paprsků, které se otáčejí kolem osy. Lze říci, že celý systém magnetronu je uveden do stavu intenzivních vysokofrekvenčních oscilací, při nichž je elektrická energie protékajícího anodového proudu s vysokou účinností přeměňována na energii kmitajícího pole. Vzniklý vysokofrekvenční signál pak vlnovody vychází k vnějšímu použití.

10.1.3.5.2 Klystron

Klystron je také vakuová trubice, ve které jsou elektrony emitované žhavenou anodou urychlovány a fokusovány do úzkého svazku dutou anodou připojenou na kladné napětí. V tzv. reflexním klystronu po průchodu elektronů anodou jsou tyto elektrony navraceny zpět k anodě zápornou reflexní elektrodou. Rychlost elektronů uvnitř klystronu je modulována jejich interakcí s dutinovým rezonátorem. Každý elektron projde rezonátorem dvakrát. V přímém směru je rychlostně modulován, poblíž reflexní elektrody dochází ke shlukování elektronů, načež tyto shluky elektronů se zastaví a v opačně orientovaném poli se urychleně pohybují zpět k anodě a rezonátoru, do něhož tyto shluky elektronů vstupují a rezonátor budí. Při správné volbě napětí vzhledem ke geometrickým rozměrům vstupují shluky elektronů do rezonátoru vždy v okamžiku, kdy vysokofrekvenční pole má maximální hodnotu opačné polarity a odevzdávají mu energii - je dosaženo rezonance a oscilace se trvale udržují. Z dutinového rezonátoru je elektromagnetický vysokofrekvenční signál odváděn vlnovodem.

10.1.3.5.3 Dvouokruhový klystron

Ojedinele se lze setkat i s tzv. dvouokruhovým klystronem, kde elektrony z katody na své cestě k anodě procházejí nejprve jedním rezonátorem, který je rychlostně moduluje, načež vzniklé shluky procházejí druhým dutinovým rezonátorem, v němž v případě dosažení rezonance vzbuzují oscilace. Napájíme-li první rezonátor vnějším vysokofrekvenčním signálem, pak oscilace vzbuzené v druhém rezonátoru mají větší energii než energie přiváděná do vstupního rezonátoru. Tento druh klystronu slouží jako zesilovač vysokofrekvenčního výkonu. Zavedením zpětné vazby (spojením dutin obou rezonátorů dvouokruhového klystronu) je možno sestavit generátor samobuzených kmitů o vysokém výkonu, podobně jako u klystronu reflexního.

10.1.4 Tokamak

Tokamak je zařízení, vytvářející toroidní^(R) magnetické pole, používané jako magnetická nádoba pro uchování plazmatu. Slovo pochází z ruštiny, kde Токамак je zkratkou popisu тороидальная камера в магнитных катушках (toroidní komora v magnetických cívkách). Tokamak byl vynalezen v padesátých letech Igorem Jevgeněvičem Tammem a Andrejem Sacharovem.

Dnes se tokamaky považují za jednu z nadějných cest k realizaci kontrolované jaderné fúze. V principu totiž umožňují vytvoření velmi horkého plazmatu a při dosažení dostatečně vysoké teploty (stovky milionů kelvinů) a hustoty částic se mohou slučovat jádra lehkých atomů (helium, vodík) na jádra těžší (lithium). Ve světě existuje více tokamaků, kde probíhá výzkum příslušných fyzikálních dějů. Největším mezinárodním projektem je probíhající výstavba obřího tokamaku ITER ve francouzském Cadarache, na které se podílí mezinárodní konsorcium více států.

V Česku je v současnosti v provozu malý tokamak CASTOR v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd České republiky postavený v 50. letech 20. století v Moskvě. V nejbližší době má být nahrazen modernějším a větším tokamakem COMPASS-D který byl v roce 2005 bezúplatně převeden z Velké Británie.

TOKAMAK (TOroidnaja KAmera a MAgnetnyje Katuški) je první přístroj svého druhu, který vyprodukuje více energie než spotřebuje na rozpoutání termonukleární reakce. Jedná se vlastně o prototyp termonukleárního (fúzního) reaktoru, který by měl odpovědět na rozmanité otázky kolem termonukleární fúze a umožnit tak stavbu skutečné termonukleární elektrárny.

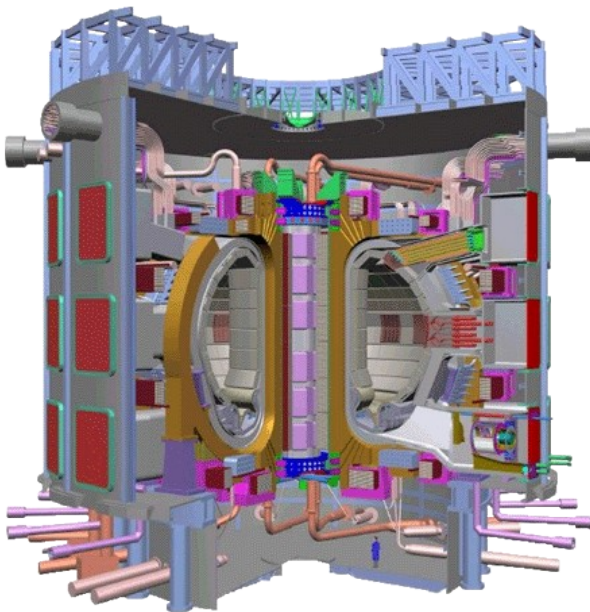
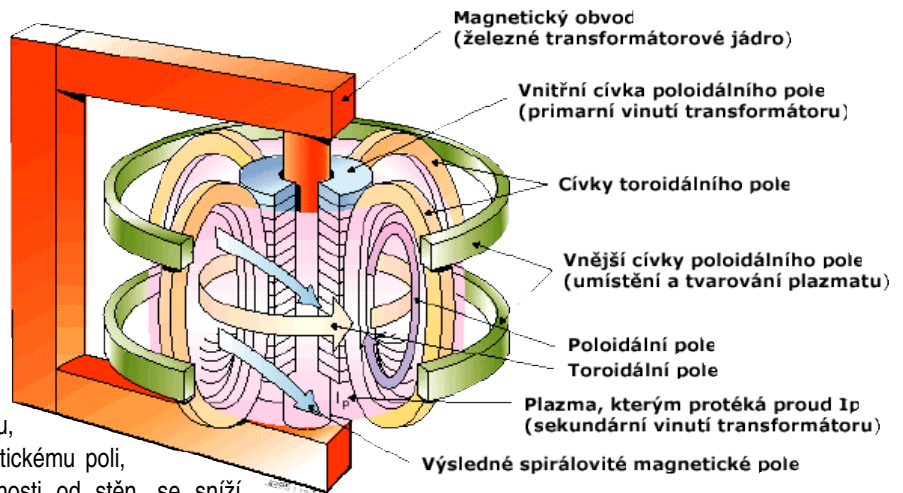
Slučování jader lehkých prvků na těžší je v podstatě jediným, dlouhodobě využitelným zdrojem energie s dostatečným výkonem pro uspokojení současných i budoucích energetických potřeb lidstva. Vzhledem k tomu, že zásoby paliv používaných v současné době vystačí pouze na několik málo stovek let, je nejvyšší čas začít se intenzivně věnovat výzkumu v oblasti termojaderné fúze. Finanční prostředky na výzkum nejsou malé, ale pokud by přišla energetická krize, byly by ztráty mnohanásobně vyšší.

(Tématem tokamaků se zabývá prezentace v příloze této práce.)

10.1.4.1 Princip Tokamaku

Jedná se o obrovský transformátor, jehož sekundární cívka mající pouze jeden závit má tvar toroidní trubice. Plazma tvořené deuteriem a tritiem (izotopy vodíku) se nachází právě uvnitř této trubice, ve které je jinak vakuum. Elektrický proud procházející primárním vinutím transformátoru indukuje elektromotorické napětí v sekundárním obvodu (toroidu). V plynu D+T vznikne výboj, plyn se ionizuje a indukovaný proud jej zahřívá na velmi vysokou teplotu (přibližně 100 milionů °C). Magnetické pole tohoto proudu udrží vzniklé plazma v ose toroidu, takže se stěn toroidu nedotýká. Díky magnetickému poli, které udržuje plazma v dostatečné vzdálenosti od stěn, se sníží tepelné zatížení stěn komory na technologicky zvládnutelnou hodnotu (předpokládá se teplotní zatížení stěn kolem 1000°C).

Tokamak pracuje v pulzním režimu. Do vyčerpané prstencové vakuové nádoby se napustí plyn s hustotou částic $(10^{18} \div 10^{21})\text{m}^{-3}$. Proudem tisíců až milionů ampérů se plyn zahřeje na teplotu kolem 1/2 keV. K dosažení potřebné teploty okolo 10 keV se používá ještě doplňkový ohřev: například ohřev absorpcí elektromagnetické iontově-cyklotronové vlny ionty, ohřev cyklotronní elektronovou rezonancí, vstřikováním neutrálních částic (také pro dodání paliva), ohřev parametrickými vlnami (s využitím intenzivních mikrovlnných nebo infračervených laserových svazků).



10.1.4.2

International Thermonuclear Experimental Reactor

V současné době několik světových velmocí (EU, USA, Japonsko a další) pracují na sestavení velkého TOKAMAKU ITER (obr. vlevo), který bude postaven ve Francii do roku 2016; na stavbě se už pracuje. Podrobnosti o tomto velmi zajímavém projektu jsou ale bohužel vysoko nad rámec této seminární práce, proto zde uvádím jen odkaz na stránky projektu, kde je velké množství informací o ITERu podáno srozumitelně i pro laika: <http://www.iter.org>.

10.2 Výzkumná centra



10.2.1 CERN

Evropská laboratoř pro fyziku částic je nejrozsáhlejší výzkumné centrum částicové fyziky na světě. Byla založena v roce 1954 a od té doby se tato laboratoř, která byla prvním takovým evropským společným dílem, stala zářným příkladem úspěšné mezinárodní spolupráce. Z původních 12 signatářů dohody o založení CERN

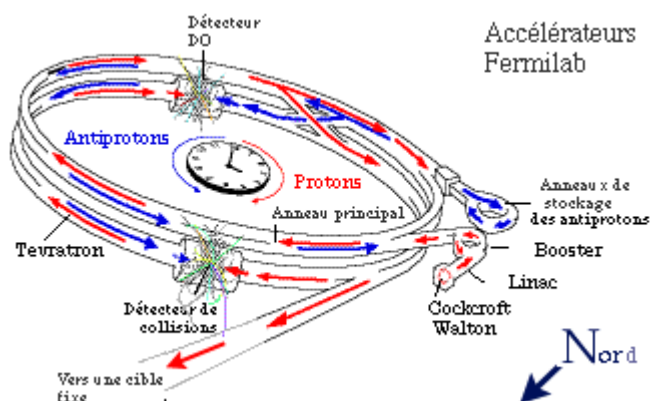


vzrostl počet členských zemí na 20. Laboratoř leží na francouzsko-švýcarské hranici západně od Ženevy na úpatí pohoří Jura. Se zařízením CERN pracuje okolo 6500 vědců, což je polovina všech částicových fyziků na světě. Vědci reprezentují 500 univerzit či jiných odborných pracovišť a více než 80 národností.

10.2.2 Fermilab

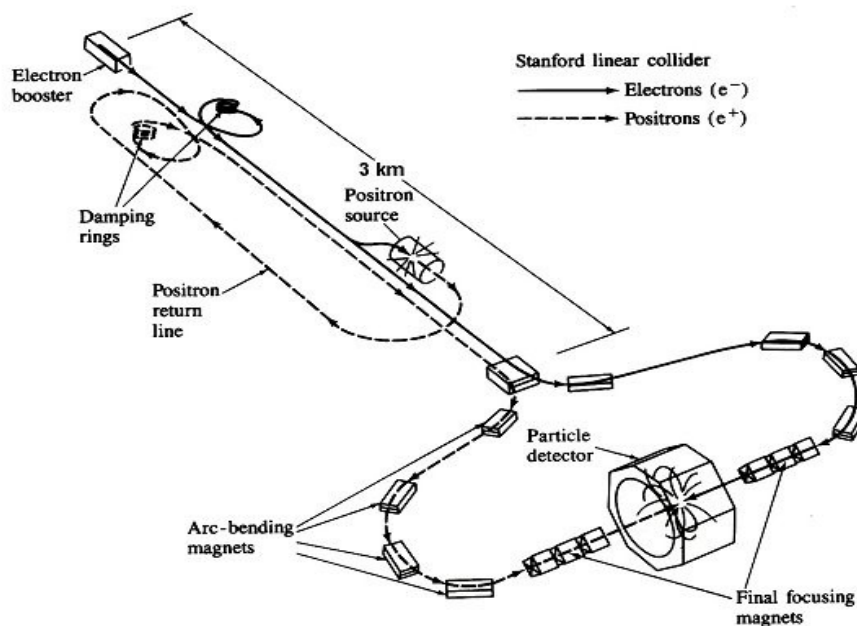
Komplex urychlovačů ve Spojených státech, ve státě Illinois asi 50km od Chicaga. Fermilab byl založen v roce 1967, prvním ředitelem se stal Robert Wilson, vynálezce mlžné komory. V současné době je zde největší urychlovač světa – Tevatron. K nejvýznamnějším objevům patří objev charmonia (částice J/Ψ) kvarku b (1977), kvarku t (1995) a τ neutrína (2000).

V současnosti se Fermilab zabývá výzkumem t kvarku, výrobou a výzkumem antivodíku, zkoumáním platnosti CPT invariance a výzkumem řady dalších vlastností hmoty a antihmoty.



10.2.3 SLAC

Ve Stanfordském středisku lineárního urychlovače (Stanford Linear Accelerator Center), které se rozkládá jižně od San Franciska, pracuje největší lineární urychlovač na světě. Je dlouhý přes 3 kilometry a urychluje elektrony a pozitrony, které po jeho opuštění pokračují k různým terčům či detektorům nebo do dalších urychlovacích prstenců. Prstenec PEP se přestavuje na tzv. továrnu na B (B factory), kde se bude pátrat po tajemstvích hmoty a antihmoty pomocí mezonů B. Podobný fyzikální program se chystá na urychlovači CESR na Cornellově univerzitě ve státě New York a na urychlovači KEK v Japonsku.



11 Budoucnost moderní částicové fyziky

Tuto kapitolu, necht' si každý přebere sám dle svého uvážení, vzdělání, náboženského přesvědčení, poněvadž je zatím i pro největší kapacity světové fyziky velkou neznámou.

I když je už mnoho let po Studené válce, nelze vyloučit, že v rámci nějakého tajného výzkumu v USA, Rusku, Číně se některé věci už experimentálně potvrdily/vyvrátily, ale ví o nich jen malá skupinka vědců; takový je ale osud vědy už odjakživa...

11.1 Struktury kvarků

V únoru 1996 v časopise Physical Review Letters členové skupiny CDF (Collider Detector at Fermilab) projektu Fermilab oznámili, že kvarky mají vnitřní strukturu. Výzkumníci podali první důkazy, že kvarky nejsou fundamentální částice, ale sami se skládají z jiných částic. Tento objev znamená průlom do současného standardního modelu fyziky částic, kterým je kvantová chromodynamika.

Už v roce 1974 fyzikové Salam a Pati navrhli první model vnitřní struktury kvarků. Podle jejich teorie se kvarky skládají s částic nazvaných preony. Dnes již existuje řada preonových modelů, které se snaží vysvětlit následující vlastnosti kvarků a leptonů. Jeden z preonových modelů představuje hmotnostní paradox. Kvarky a leptony by měly být složeny z menších částic, jejichž hmotnost, která odpovídá jejich hybnosti, o mnoho řádů převyšuje hmotnost kvarků a leptonů. Jednou z možností řešení vysoké hmotnosti, která plyne z vnitřní hybnosti preonů, je existence nové extrémně silné síly (nebo hyperinterakce), která by mohla udržovat preony uvnitř kvarků nebo leptonů. Tato hypersíla by musela být nejméně 100,000 krát silnější, než je silná interakce. Jenže tato hyperinterakce představuje komplikaci standardního modelu. Sice se vysvětlí, že značná hybnost preonů je kompenzována vysokou vazební energií, ale nevysvětlí se jiné vlastnosti kvarků a leptonů, jako jsou značné rozdíly hmotností mezi jednotlivými generacemi a mezi kvarky a neutriny.

V novém období fyziky vysokých energií kvantová chromodynamika jako standardní model fyziky částic potřebuje hlubší testování novými experimenty a teoretické zdokonalení. Ještě nedávno fundamentální kvarky dnes považujeme za složené z fundamentálnějších preonů. Možná se za čas ukáže, že ani preony nejsou fundamentálními částicemi hmoty.

Fyzikové potkali muže, který tvrdí, že Země je plochá. Proto se ho ptají, na čem tato Země leží. Muž s velkým přesvědčením odpovídá, že Země leží na velké želvě. Fyzikové se mu smějí a říkají, že jistě tato želva stojí na velkém slonu, a ten na draku.

"Ale ne," říká muž spiklenecky, "želva stojí na dalších želvách, a ty stojí na dalších, a pořád dál a dál..."

Je objev skupiny CDF skutečně důkazem základní struktury hmoty, nebo jsme jen objevili další vrstvu želv?

podle článku Johna G. Cramera

11.2 Teorie superstrun

V klasické mechanice byl pojem hmotného bodu pouhou idealizací skutečných těles, výhodnou pro analýzu jejich pohybu. Speciální teorie relativity posílila důležitost pojmu hmotného bodu: žádný elementární objekt nemůže mít konečné prostorové rozměry, protože žádný signál či interakce se nemůže šířit nadsvětelnou rychlostí. Při srážce dvou těles nenulových rozměrů nemohou všechny části reagovat ihned, z čehož plyne, že těleso je složeno z elementárnějších objektů.

Bodový charakter fundamentálních objektů (zdrojů pole) však vede k závažným problémům v teorii pole: při limitních přechodech k nulovým rozměrům vznikají (matematicky divergující) výrazy vedoucí k nekonečným hodnotám. Těchto divergencí je třeba se zbavit metodami renormalizace - provést třeba vhodnou kalibrační transformaci tak, aby se výsledky výpočtu shodovaly s experimentálními hodnotami.

Podařilo se však najít způsob, jak se těmto nepříznivým matematickým divergencím vyhnout systematicky - jsou to teorie, v nichž namísto bodů jsou elementárními objekty jednorozměrné čáry či smyčky nenulové délky - tzv. struny.

Představa jednorozměrných objektů - strun - se zrodila na konci 60.let při jednom z pokusů o popis silných interakcí.

V polovině 70.let byla vytvořena kvantová chromodynamika, která silné interakce interpretuje pomocí kvarků a gluonů, které na sebe působí prostřednictvím "barevného náboje". Velký úspěch kvantové chromodynamiky odsunul dosavadní strunové modely na více než 10 let do pozadí. Někteří fyzikové si ale v té době zjednodušeně představovali, že kvarky v hadronech jsou spojeny strunami (gluonovými trubnicemi), které je drží pohromadě jako "gumová vlákna".

Pokusy o sjednocení gravitační interakce s ostatními typy interakcí vedly k pojmu supersymetrie. Tato teorie spojuje bosony a fermiony: ke každému bosonu předpovídá superpartnera kterým je fermion, a naopak. Aplikace těchto nových symetrií, vyjádřených geometricky na teorii strun vedla ke snížení potřebného počtu rozměrů prostoročasu z původních $d=26$ na $d=10$. Vznikla tak supersymetrická teorie strun, neboli teorie superstrun.

Významnou úlohu v teorii superstrun v posledních letech sehrála analýza matematické ekvivalence neboli duality mezi různými modely superstrun. Tyto duality představují nové typy symetrií, sjednocující různé modely, které mohou mít na první pohled odlišnou formu,

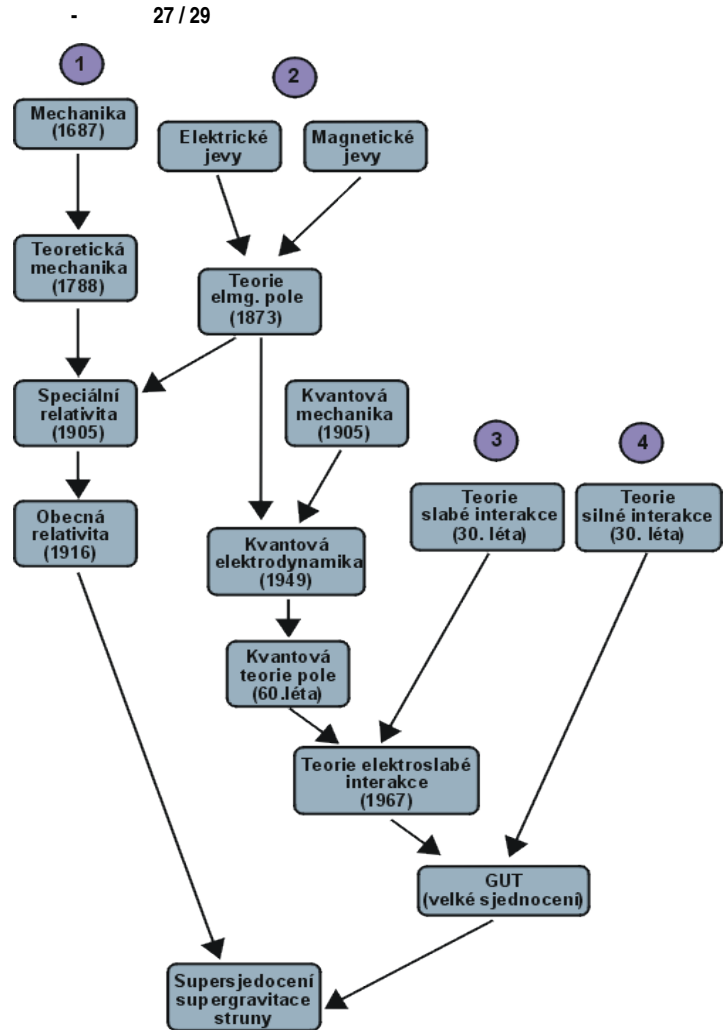
avšak vedou k rovnocenným fyzikálním výsledkům. Byly nalezeny dva typy dualit mezi stávajícími modely superstrun: S-dualita a T-dualita. Někdy je diskutována i tzv. U-dualita, vzniklá kombinací S a T-duality.

Studium strunových dualit ukázalo, že všechny stávající teorie superstrun lze sloučit do jedné obecnější teorie, zvané M-teorie (M-theory). Takovou sjednocenou M-teorii lze přitom realizovat pomocí zvýšení dimenze variety na $d=11$. Toto sjednocení bylo skutečně později dokázáno.

Zajímavé je, že různá řešení teorie superstrun mohou předpovídat různé vesmíry s různými vlastnostmi (dimenzemi, hodnotami fyzikálních konstant či spektry hmotností elementárních částic).

Teorie superstrun je v současné době ve stádiu intenzivního rozvoje. Superstrunová teorie je mnohými fyziky považována za nejnadějnějšího kandidáta na úplnou unitární teorii pole, sjednocující všechny 4 typy interakcí, na toužebně očekávanou "teorii všeho".

Řada fyziků je však k teorii superstrun skeptická. Poukazují na nejednoznačnost jejích závěrů, neprůhlednost a přílišnou matematickou komplikovanost, především pak na obtížnost až nemožnost experimentálního ověření v dohledné budoucnosti.



11.3 GUT – Teorie všeho

Příkladem unitarizace ve fyzice je sjednocení elektrických a magnetických sil, které se předtím zdály být zcela různými přírodními silami. Důsledkem jednoty elektřiny a magnetismu ve Faraday-Maxwellově elektrodynamice je existence elektromagnetického vlnění

Dále Einstein ve své speciální teorii relativity sjednotil prostor a čas do jednotného prostorčasového kontinua; v obecné teorii relativity pak ukázal, že Newtonovská gravitace a setrvačnost jsou společným projevem křivosti prostorčasu, který má dynamický charakter.

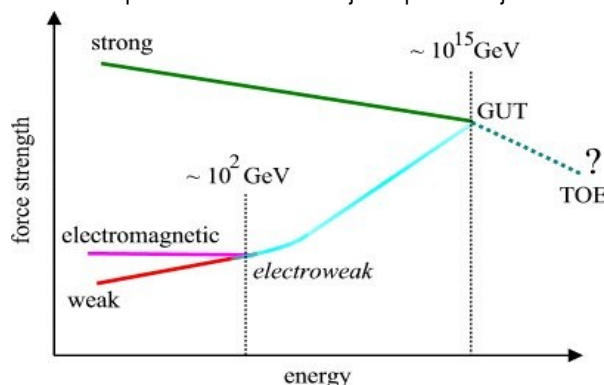
Teorie všeho – Grand Unified Theory (někdy také TOE - Theory of Everything) by měla být konzistentním popisem všech základních přírodních sil a hmoty v jednom rámci. Tento cíl teoretické fyziky vytyčil Albert Einstein, doposud však nebyl dosažen. Nadějným kandidátem je M-teorie (teorie superstrun).

Fyzikům se ale staví cesty několik překážek. Vlastně si nikdy nebudou moci být jisti, zda onu teorii skutečně našli. V logice vědy platí, že teorii nelze nikdy prokázat, ale pouze vyvrátit. Je však i další důvod, proč si teorii všeho nebudeme moci být jisti...

Teorie všeho by totiž v jistém ohledu znamenala největší možnou "kompresi skutečnosti". Tedy - množství částic a interakcí popíšeme např. prostřednictvím několika rovnic. Další komprese už přitom nebude možná, protože by již nedávala úplný popis skutečnosti.

V první řadě se samozřejmě opíráme o jakousi víru, že vesmír vůbec nějak komprimovatelný je a zda by jeho úplný popis nebyl opět množinou velkou jako vesmír sám. Tuto námitku však můžeme zamítnout odkazem na zkušenost - třeba objev gravitačního zákona ukázal, že je možné nějaké obecné tvrzení skutečně najít. Vesmír tedy není "zcela náhodný" (takové množiny komprimovat nejdu).

Druhý problém je však zásadní: Gregory Chaitin dokázal, že neexistují "nejkratší programy". Přesněji řečeno, sice někdy existují, ale nikdy nemůžeme dokázat, že před sebou máme nejkratší program řešící daný úkol. Proto ani u teorie všeho nebudeme mít jistotu, zda není možné zformulovat systém ještě jednodušší/obecnější.



12 Dodatky

12.1 Poznámky

- C) Čerenkovovo záření je elektromagnetické záření vznikající tehdy, když se elektricky nabitá částice pohybuje v optickém prostředí rychlostí převyšující rychlost světla v tomto prostředí (která je menší než c). Toto záření je jakousi "rázovou vlnou" podobnou akustickému třesku v atmosféře u letadla pohybujícího se nadzvukovou rychlostí. Jelikož podobně jako v elektrodynamice zrychleným pohybem elektrických nábojů vznikají elektromagnetické vlny, podle obecné teorie relativity vznikají zrychleným pohybem hmoty gravitační vlny šířící se rovněž rychlostí c , lze očekávat i gravitační analogii Čerenkovova záření.
- E) řecky leptos = tenký, jemný, slabý, útlý, hubený
- F) ve starší literatuře se vyskytuje název fázotron
- G) Pouze pro některé exotické a hypotetické druhy hmoty (či spíše konfigurace fyzikálních polí, např. tzv. *falešného vakua*) může mít gravitace odpuzivý charakter. Týká se to především hypotetických fázových přechodů na samém počátku vývoje vesmíru během tzv. inflační expanze vesmíru. Nyní se spekuluje o přítomnosti tzv. temné energie ve vesmíru, která by mohla způsobovat zrychlování expanze vesmíru i v současné době.
- H) řecky hadros = silný, těžký, tlustý, robustní
- K) Kvark-gluonové plazma (QGP) je skupenství hmoty, která existuje při extrémně vysokých teplotách a tlacích. Předpokládá se, že existovalo prvních asi 20 až 30 mikrosekund po té, co Velký třesk dal vzniknout našemu Vesmíru. V takovéto hmotě se udržují podmínky pro asymptotickou volnost částic. To znamená, částice nejsou pevně vázané. Toto je pravděpodobně jediný možný způsob, jakým by mohly existovat volné kvarky. Je pojmenovaná analogicky podle skupenství plazmatu, v kterém jsou normální vazby mezi elektrony a atomovými jádry rozbité.
- L) točivostí rozumíme orientaci spinu vzhledem ke směru pohybu částice
- M) Písmeno M je v různých pramenech vykládáno jinak. Nejpravděpodobnější varianta se mi zdá Membrane. Někde je však uváděno Mystery nebo Magic, což věru nepůsobí příliš vědecky...
- P) tento poměr je dán rovnováhou mezi odstředivou silou a Lorentzovou magnetickou silou
- R) toroidní = prstencový
- T) řecky tychos = rychlý
- S) ve starší literatuře se vyskytoval i název synchrofázotron nebo kosmotron
- V) "Žádné dva nerozlišitelné fermiony nemohou být ve stejném kvantovém stavu". Právě proto různé elektrony v atomovém obalu zaujímají různé kvantové stavy a tím vytvářejí různorodé chování chemických prvků.
- W) Gravitina, fotina a axiony se někdy souhrnně označují jako slabě interagující hmotné částice (WIMP – Weak Interacting Mass Particle). Mohly by tvořit podstatnou složku tzv. temné hmoty ve vesmíru.

12.2 Použité prameny

- <http://home.tiscali.cz:8080/~cz382002/element.html>
- <http://www.aldebaran.cz/astrofyzika>
- <http://cs.wikipedia.org>
- <http://www.vira.cz>
- <http://darbujan.fzu.cz/~rames>
- <http://www.vesmir.cz>
- <http://www.scienceworld.cz>
- <http://www.iter.org>
- <http://cern.ch>
- <http://natura.baf.cz/natura/2000/8/20000805.html>
- <http://projekty.astro.cz/adict>
- <http://press.avcr.cz>
- RNDr. Vojtěch Ullmann – Jaderná a radiační fyzika
- RNDr. Vojtěch Ullmann – Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu

12.3 Přílohy

- Prezentace na téma:
Současný výzkum jaderné fúze: Tokamaky
- Text k prezentaci (cca na 30min.)



12.4 Tento dokument

Tato práce si neklade za cíl vysvětlování a odvozování fyzikálních veličin týkajících se částicové fyziky. Má sloužit jako seznámení s tím, čím vším se tato oblast moderní fyziky zabývá, co se dnes ví a na co se teprve hledá odpověď, jak jsou vědci daleko, na co vůbec v současné době nebo v dohledné budoucnosti přijít lze, jaké metody zkoumání máme k dispozici a kde, za jakých podmínek a na jakých přístrojích se takový výzkum provádí.

Autor: Johan Hornof, Nov2005 - Feb2006
URI: http://doc.hornof.net/skewl/asf/particle_physics.pdf

Dokument byl vytvořen aplikací OpenOffice.org 2.0 na systému Ubuntu Linux 5.10