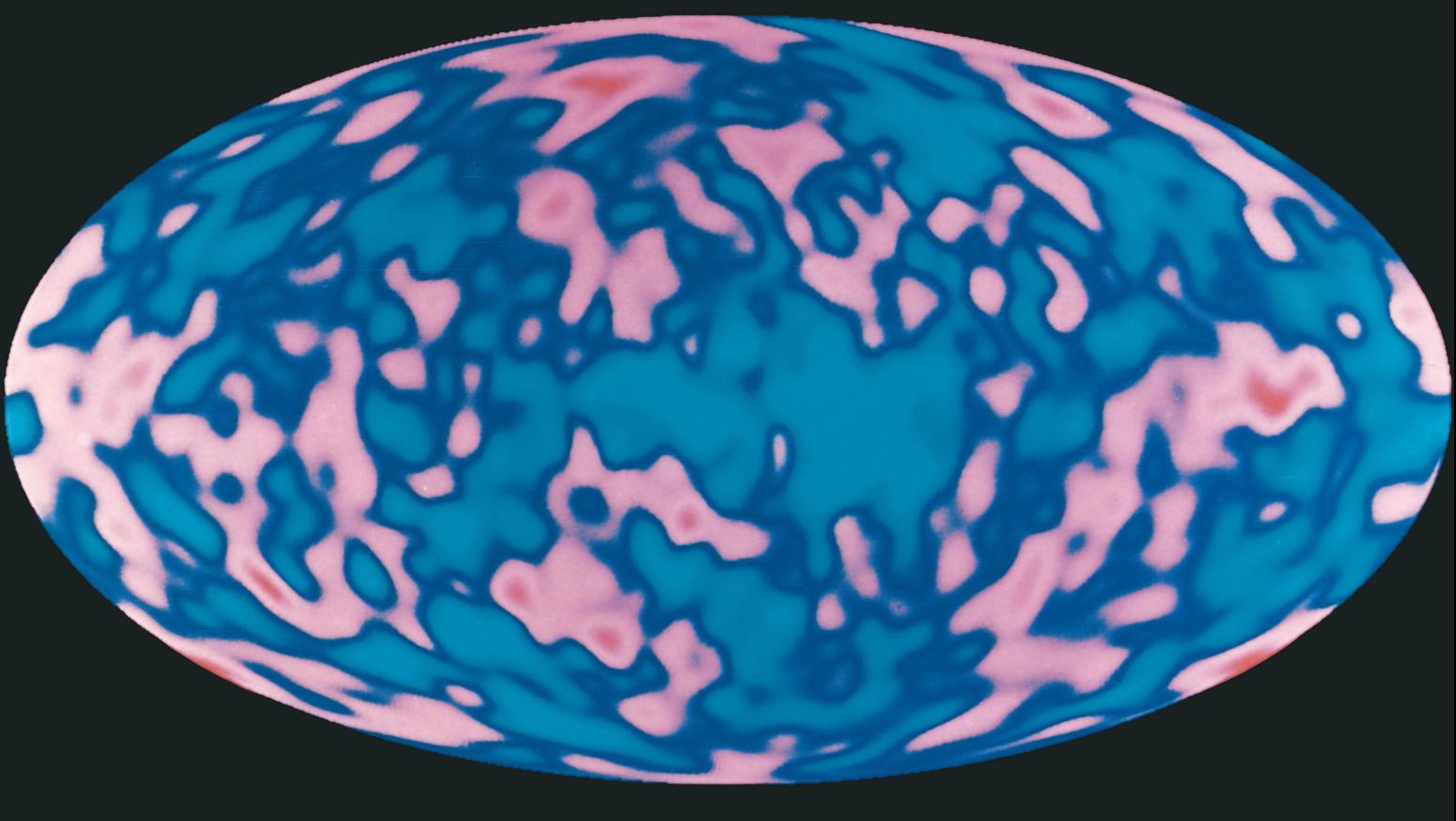


# 45

## *Kvarky, leptony a Velký třesk*



---

Tento obrázek můžeme považovat za „fotografií“ vesmíru starého pouze 300 000 let, tedy v době před asi  $15 \cdot 10^9$  lety. Takový obraz bychom tehdy viděli při pohledu do všech směrů (zorné pole bylo promítнуto do oválu obrázku). Skvrny světla z atomů se táhnou napříč „oblohou“, ale galaxie, hvězdy a planety se ještě nezformovaly. Jak můžeme takovou fotografií raného vesmíru získat?

---

## 45.1 ŽIVOT NA HRANĚ

Fyzikové často označují teorii relativity a kvantovou fyziku jako „moderní fyziku“, aby je odlišili od Newtonovy mechaniky a Maxwellovy elektromagnetické teorie, které jsou společně označovány jako „klasická fyzika“. Jak roky ubíhají, slovo „moderní“ je stále méně vhodné pro teorie, jejichž základy byly položeny na začátku dvacátého století. Nicméně jednou vytvořená nálepka již zůstává.

V této závěrečné kapitole budeme sledovat dva směry bádání, které jsou skutečně „moderní“, ale které zároveň mají ty nejstarší kořeny. Jsou soustředěny kolem dvou ošidně jednoduchých otázek:

*Z čeho je vytvořen vesmír?*

*Jak došlo k tomu, že vesmír je takový, jaký je?*

Pokrok ve schopnosti odpovídat na tyto otázky byl v posledních několika desetiletích velmi rychlý.

Mnoho nových poznatků je založeno na experimentech, prováděných na velkých urychlovacích částic. Jak ale fyzikové nechávají srážet částice při stále vyšších a vyšších energiích na stále větších a větších urychlovacích, dochází k poznání, že žádný myslitelný urychlovač vytvořený na Zemi nemůže produkovat částice s energiemi dostatečně vysokými k ověření jejich teorií. Byl zde jediný takový zdroj častic s potřebnými energiemi, a to byl vesmír sám během prvních několika minut své existence. „Kvarková polévka“ tvořící vesmír v prvních několika sekundách odpočítávaných kosmickými hodinami je sama tím nejzákladnějším testem pro ověřování teorií fyziky elementárních častic!

V této kapitole se setkáme s množstvím nových pojmu a skutečnou záplavou častic s názvy, které si nemusíte snážit zapamatovat. Jestliže budete na chvíli zmateni, budete jen sdílet zmatení těch fyziků, kteří tento vývoj prožívali a kteří často neviděli nic jiného než narůstající složitost s malou nadějí na pochopení. Jestliže ale vytrváte, budete také sdílet nadění, které fyzikové pociťovali, když báječné nové urychlovače chrlily nové výsledky a když teoretici předkládali nové myšlenky, stále odvážnější a odvážnější, až konečně ze zmatku vyvstal jasný obraz.

Možná by bylo vhodné si znova přečíst čl. 2.9, ve kterém jsme poprvé mluvili o základních čisticích fyziky.

## 45.2 ČÁSTICE, ČÁSTICE, ČÁSTICE

Ve třicátých letech 20. století bylo mnoho fyziků, kteří se domnívali, že bádání o základech struktury hmoty je na nejlepší cestě k vyřešení. K pochopení atomu stačily tři částice: elektron, proton a neutron. Kvantová teorie uměla dobře počítat strukturu atomu a radioaktivní  $\alpha$ -rozpad. K tomu při bylo předpokládané, ale tehdy ještě nepozorované neutrino,

které Enrico Fermi zařadil do úspěšné teorie  $\beta$ -rozpadu. Byla naděje, že použití kvantové teorie na proton a neutron brzy umožní počítat vlastnosti jádra. Co víc si ještě můžeme přát?

Nadění však nevydrželo dlouho. Již na konci zmíněné dekády začala doba objevů nových a nových častic, která trvá dodnes. Nové částice dostaly jména a označení jako *mion*,  $\pi$ -*mezón* (*pion*), *K-mezón* (*kaon*) a  $\Sigma$ -*baryon*. Všechny tyto nové částice jsou nestabilní, jejich střední doba života leží v intervalu od  $10^{-6}$  s do  $10^{-23}$  s. Tato poslední hodnota je tak malá, že existenci takové částice můžeme ověřit jen nepřímými metodami.

Zmíněné částice se vytvářejí při srážkách mezi protony nebo elektrony urychlenými na vysoké energie v urychlovacích v laboratořích jako Fermilab (blízko Chicaga), CERN (poblíž Ženevy), SLAC (ve Stanfordu) a DESY (nedaleko Hamburku). Částice objevujeme pomocí detektorů rozvinutých do důmyslných zařízení (příklad je na obr. 45.1), které si co do velikosti a složitosti nezadají s urychlovači budovanými před nějakými deseti lety.

**Obr. 45.1** Detektor OPAL (zkratka anglického názvu „omni-purpose apparatus“, mnohaúčelové zařízení) v CERNu, evropské laboratoři fyziky vysokých energií blízko Ženevy. OPAL je navržen pro měření energií častic vytvářených při srážce elektronů a pozitronů s energiemi kolem 50 GeV. Ačkoli má tento detektor obrovské rozměry (váží více než 3 000 tun), je malý ve srovnání s vlastním urychlovačem, prstencem s obvodem 27 km.



Dnes známe několik stovek částic. Jejich pojmenování brzy vyčerpalo zásobu písmen řecké abecedy a jsou většinou známy jen pod číslem v periodicky publikovaných komplacích. Abychom do této řady částic vtiskli řád, pokusíme se najít jednoduché fyzikální charakteristiky, z nichž každá umožní zařadit částice do právě jedné ze dvou skupin. Takový první hrubý řez částicemi můžeme provést alespoň třemi následujícími způsoby.

### Fermiony nebo bosony?

Všechny částice mají vlastní moment hybnosti nazývaný **spin**, jak jsme to již viděli v čl. 32.4 pro elektrony, protony a neutrony. Zobecníme-li značení z tohoto odstavce, můžeme psát pro složku spinu **S** v libovolném směru (předpokládejme, že v tomto směru je orientována osa *z*)

$$S_z = m_s \hbar \quad \text{pro } m_s = s, s-1, \dots, -s, \quad (45.1)$$

kde  $\hbar = h/(2\pi)$ ,  $m_s$  je *spinové magnetické kvantové číslo* a  $s$  je *spinové kvantové číslo*. Číslo  $s$  může nabývat buď polocíselných ( $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$ ), nebo celočíselných ( $0, 1, 2, \dots$ ) hodnot. Například pro elektron je  $s = \frac{1}{2}$ . Spin elektronu (měřený v průmětu do libovolného směru) může tedy nabývat hodnot

$$\begin{aligned} S_z &= \frac{1}{2}\hbar && (\text{spin nahoru}), \\ S_z &= -\frac{1}{2}\hbar && (\text{spin dolů}). \end{aligned}$$

Výraz *spin* se užívá ve dvou různých významech: správně označuje vlastní moment hybnosti částice **S**, ale často se také volněji používá k označení spinového kvantového čísla s částice. V takovém případě se například mluví o elektronu jako o částici se spinem  $\frac{1}{2}$ .

Částice s polocíselným spinovým kvantovým číslem (jako např. elektrony) se nazývají **fermiony**, podle Fermiho, který (současně s Paulem Diracem) objevil statistické zákony, kterými se řídí jejich chování. Stejně jako elektrony mají i protony a neutrony spin  $s = \frac{1}{2}$ , a jsou tedy fermiony.

Částice s celočíselným (nebo nulovým) spinovým kvantovým číslem se nazývají **bosony**, podle indického fyzika Satyendranatha Boseho, který (současně s Albertem Einsteinem) objevil statistické zákony pro *tyto* částice. Fotony, které mají spin  $s = 1$ , jsou bosony; brzy se setkáme s dalšími částicemi tohoto druhu.

Tato klasifikace částic se zdá být triviální, ale je velmi důležitá z následujícího důvodu:

Pro fermiony platí Pauliho vylučovací princip, který určuje, že v daném kvantovém stavu se může nacházet jeniná částice. Bosony se tímto principem *neřídí*. V daném kvantovém stavu se může nacházet libovolný počet bosonů.

Viděli jsme, jak důležitý je Pauliho vylučovací princip při rozdelení elektronů (spin  $\frac{1}{2}$ ) v atomu do jednotlivých kvantových stavů. Dokážeme tak plně vysvětlit strukturu a vlastnosti nejrůznějších atomů a také pevných látek jako kovů nebo polovodičů.

Protože se bosony *neřídí* Pauliho vylučovacím principem, mají všechny snahu zaujmít kvantový stav s nejnižší energií. V roce 1995 se podařilo skupině v Boulderu, Colorado získat kondenzát asi 2 000 atomů rubidia-87 — tyto atomy jsou bosony — v jediném kvantovém stavu s téměř nulovou energií.

Aby k takovému jevu mohlo dojít, muselo být rubidium získáno jako *pára* o teplotě tak nízké a hustotě tak vysoké, aby de Broglieho vlnová délka jednotlivých atomů byla velká ve srovnání se střední vzdáleností mezi atomy. Je-li tato podmínka splněna, vlnové funkce jednotlivých atomů se překrývají a celý soubor je možno považovat za jediný kvantový systém, nazývaný *Boseho-Einsteinův kondenzát*. Obr. 45.2 ukazuje, že když je teplota rubidiových par snížena asi na  $1,70 \cdot 10^{-7}$  K, systém se skutečně „zhroutí“ do jediného ostře definovaného stavu, který odpovídá přibližně nulové rychlosti jeho atomů.

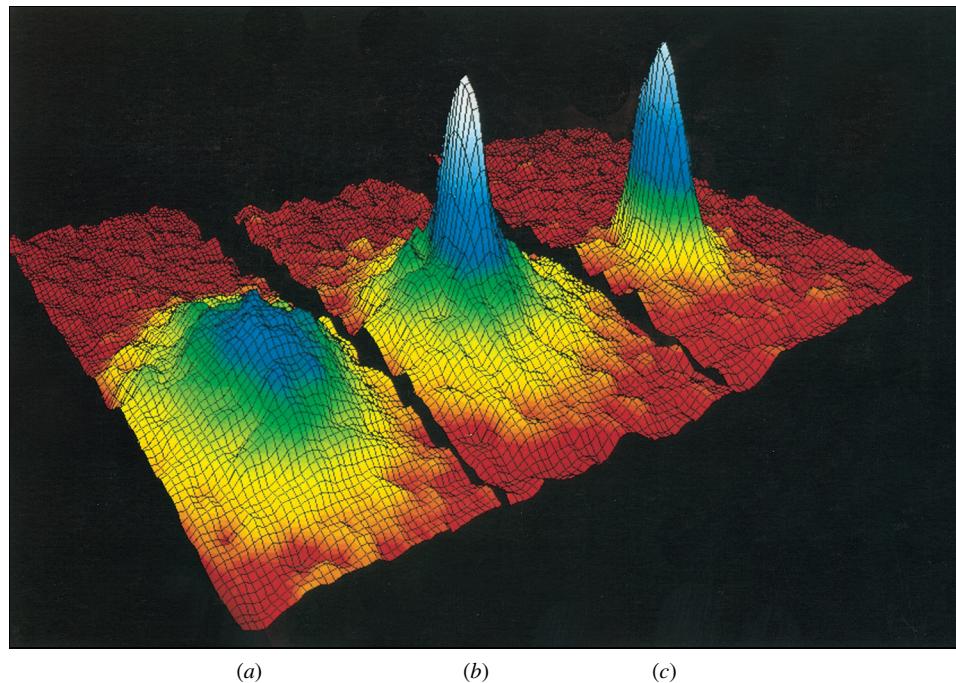
### Hadrony nebo leptony?

Částice také můžeme třídit podle sil, které na ně působí. V čl. 6.5 (který by bylo vhodné si znovu přečíst) jsme nastínila existenci čtyř základních sil. *Gravitační síla* působí na všechny částice, ale její účinek je na úrovni subatomových částic tak slabý, že ji nemusíme uvažovat (alespoň při současných výzkumech). *Elektromagnetická síla* působí na všechny částice s nenulovým elektrickým nábojem, její účinek je dobře znám a můžeme ji v případě potřeby uvažovat; v této kapitole to ale nebudeme potřebovat.

Zůstává nám tedy *silná jaderná síla*, což je síla, která k sobě váže nukleony, a *slabá jaderná síla*, která se projevuje při  $\beta$ -rozpadu a podobných dějích. Slabá jaderná síla působí na všechny částice, silná jaderná síla pouze na některé.

Částice tedy můžeme zhruba rozdělit podle toho, jestli na ně působí silná jaderná síla. Částice, na které tato síla působí, nazýváme **hadrony**. Částice, na které silná jaderná síla nepůsobí a kde je tedy dominantní slabá jaderná síla, nazýváme **leptony**. Protony, neutrony a piony patří mezi hadrony; elektrony a neutrino jsou leptony. Brzy se setkáme s dalšími členy obou tříd.

Další dělení hadronů můžeme provést podle toho, jsou-li bosony (těm říkáme **mezony**); příkladem je pion. Ostatní hadrony jsou fermiony (říkáme jim **baryony**); příkladem je proton.



**Obr. 45.2** Tři grafy znázorňují teoreticky vypočtené rozložení rychlostí atomů v páraph rubidia-87. Teplota páry se postupně snižuje od grafu (a) ke grafu (c). Graf (c) ukazuje ostré maximum rozložení kolem nulové rychlosti. To znamená, že všechny atomy jsou v témže kvantovém stavu. Boseho-Einsteinův kondenzát, často nazývaný Svatý Grál atomové fyziky, byl konečně získán v roce 1995.

### Částice nebo antičástice?

V roce 1928 Dirac předpověděl, že elektron  $e^-$  by měl mít kladně nabity protějšek se stejnou hmotností a spinem. Tento protějšek, *pozitron*  $e^+$ , objevil v kosmickém záření Carl Anderson v roce 1932. Fyzikové pak postupně přišli k poznání, že ke každé částici existuje také odpovídající **antičástice**. Členové takových dvojic mají stejnou hmotnost a spin, ale opačné znaménko náboje (jsou-li nabité) a opačná znaménka dalších kvantových čísel, o nichž jsme se zatím nezmínili.

Původně se *částicemi* nazývaly obecně známé částice, jako jsou elektrony, protony a neutrony, a *antičásticemi* jejich velmi zřídka pozorované protějšky. Pro méně známé částice se zařazení do skupiny *částic* nebo *antičástic* děje tak, aby bylo konzistentní s určitými zákony zachování, které probereme později v této kapitole. Často, ale ne vždy důsledně, označujeme antičástici pruhem nad symbolem příslušné částice. Tak p je symbol pro proton a  $\bar{p}$  je symbol pro antiproton.

Při setkání částice a její antičástice může dojít k vzájemné anihilaci. To znamená, že obě částice zmizí a jejich souhrnná energie se objeví v jiných formách. Pro anihilující dvojici elektron a pozitron se tato energie objeví ve formě dvou fotonů gama záření:

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma \quad (Q = 1,02 \text{ MeV}). \quad (45.2)$$

Jestliže obě částice jsou při anihilaci v klidu, mají oba fotony stejnou energii a — aby se zachovala hybnost a pro-

tože fotony nemohou být v klidu — rozletí se do opačných směrů.

V roce 1996 se podařilo fyzikům v CERNu alespoň na několik prchavých nanosekund vytvořit hrstku antivodíkových atomů, tvořených vzájemně vázaným pozitronem a antiprotonem (pravděpodobně přesně tak, jako jsou vázány elektron a proton v atomu vodíku). Pro takový soubor antičástic užíváme název *antihmota*, když pro soubor částic užíváme běžně slovo *hmota*.

Můžeme si představit, že existují celé galaxie antihmoty, obsahující atomy, molekulky a dokonce fyziky. Můžeme dokonce uvažovat o katastrofě, která by nastala, kdyby se například asteroid uniklý z takové galaxie setkal (tedy anihiloval) s částí Země. Naštěstí ale současné poznatky svědčí o tom, že nejen naše galaxie, ale i celý vesmír pozůstávají především z hmoty. (Tato ztráta symetrie ovšem znepokoujuje fyzika, který by normálně očekával, že v přírodě najde symetrii.)

Shrneme si tuto část takto: jestliže naleznete novou částici, musíte si položit tyto tři otázky:

- Je to fermion nebo boson?
- Je to lepton nebo hadron? Je-li to hadron, je to mezon nebo baryon?
- Je to částice nebo antičástice?

### 45.3 MEZIHRA

Dříve, než se hlouběji ponoříme do problému klasifikace částic, zastavme se na chvíli a pokusme se zachytit způsob

bádání ve fyzice částic tím, že budeme analyzovat typickou událost, zachycenou na fotografii z bublinkové komory (obr. 45.3a).

Stopy na obrázku jsou proudy bublinek vytvářených průchodem vysokoenergiových nabitéch částic, které se pohybují komorou naplněnou tekutým vodíkem. Částici, která zanechává danou stopu, můžeme identifikovat — mimo jiné — podle relativní vzdálenosti mezi bublinkami. Komora je umístěna v magnetickém poli, které vychyluje kladně nabité částice proti směru a záporně nabité částice po směru otáčení hodinových ručiček. Ze změřeného poloměru křivosti stopy můžeme vypočítat hybnost částice. Tab. 45.1 obsahuje některé vlastnosti částic a antičástic, které se účastnily události zobrazené na obr. 45.3a. Podle obecné zvyklosti vyjadřujeme hmotnost částic v tab. 45.1 — a ve všech dalších tabulkách této kapitoly — v jednotkách  $\text{MeV}/c^2$ . Důvod pro takovou volbu je dán tím, že spíše než hmotnost částice je potřeba znát její klidovou energii. Je-li tedy uvedena v tab. 45.1 hmotnost protonu  $938,3 \text{ MeV}/c^2$ , najdeme klidovou energii protonu vynásobením této hmotnosti  $c^2$ , tedy  $938,3 \text{ MeV}$ .

Nástroje, které užijeme při analýze události, jsou zákony zachování energie, hybnosti, momentu hybnosti a náboje. Přidáme k nim další zákony zachování, o kterých jsme se zatím nezmíňovali. Obr. 45.3a je jeden z dvojice stereosnímků, v praxi tedy probíhá analýza ve třech rozměrech.

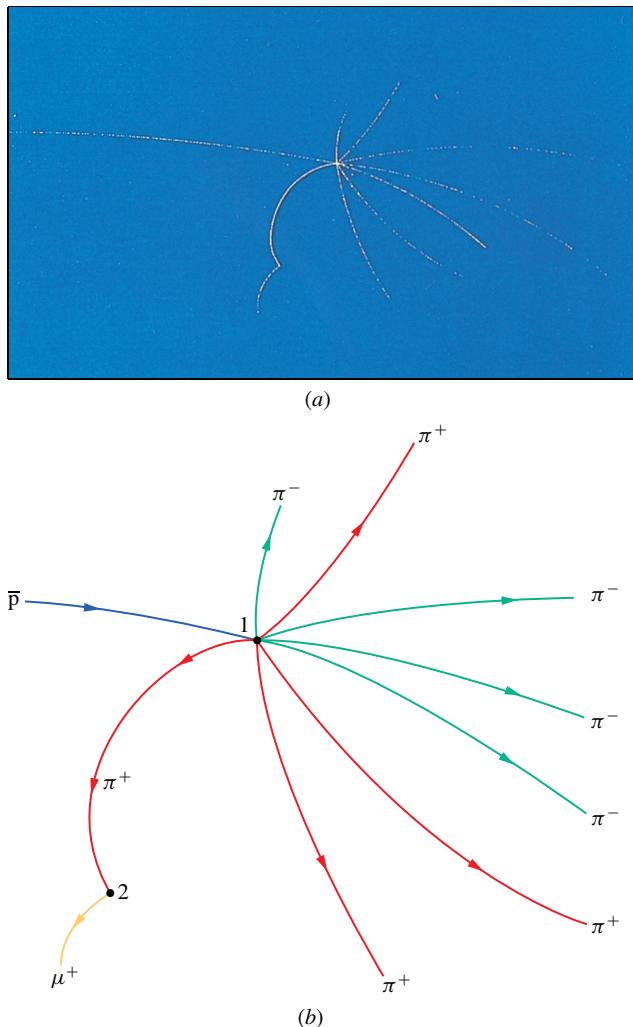
Událost na obr. 45.3a je spuštěna antiprotonem ( $\bar{p}$ ) o vysoké energii, který byl urychlen v urychlovači Lawrence Berkeley Laboratory a vstupuje do komory zleva. Proběhly tři oddělené události; dvě jsou viditelné jako body 1 a 2 na obr. 45.3b a třetí je už mimo obrázek.

**1. Anihilace protonu a antiprotonu.** V bodě 1 na obrázku 45.3b narazí antiproton (modrá stopa) do protonu z kapaliny v komoře a výsledkem je jejich vzájemná anihilace. O tom, že při anihilaci byl antiproton v pohybu, svědčí to, že převážná část částic vzniklých při srážce se pohybuje dopředu, tj. doprava na obr. 45.3. Ze zákona zachování hybnosti totiž plyne, že antiproton musel mít před anihilací hybnost odpovídající pohybu vpřed.

Tabulka 45.1 Částice a antičástice z události na obr. 45.3

ČÁSTICE	SYMBOL	NÁBOJ	HOMOTNOST ( $\text{MeV}/c^2$ )	SPIN	TYP	STŘEDNÍ DOBA ŽIVOTA <sup>a</sup> (s)	ANTIČÁSTICE
Neutrino	$\nu$	0	0	1/2	lepton	stabilní	$\bar{\nu}$
Elektron	$e^-$	-1	0,511	1/2	lepton	stabilní	$e^+$
Mion	$\mu^-$	-1	105,7	1/2	lepton	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$\mu^+$
Pion	$\pi^+$	+1	139,6	0	mezon	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\pi^-$
Proton	p	+1	938,3	1/2	baryon	stabilní	$\bar{p}$

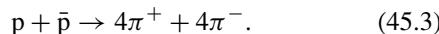
<sup>a</sup> Střední doba života  $1/\lambda$  se liší od poločasu rozpadu  $(\ln 2)/\lambda$ ; rov. (43.8).



Obr. 45.3 (a) Fotografie z bublinkové komory ukazuje řadu událostí spuštěných antiprotonem, který vnikl do komory zleva. (b) Dráhy částic jsou překresleny a popsány. Tečky v bodech 1 a 2 ukazují místa sekundárních událostí popsaných v textu. Dráhy jsou zakřiveny, protože magnetické pole v komoře vychyluje pohybující se nabité částice.

Celková energie při srážce antiprotonu s protonem (v klidu) je součtem kinetické energie antiprotonu a kli-

dových energií obou částic ( $938,3 \text{ MeV} + 938,3 \text{ MeV} = 1876,6 \text{ MeV}$ ). To je energie dostačující k tomu, aby vznikla řada lehčích částic i s jistou kinetickou energií. V našem případě vznikly po anihilaci čtyři kladné piony (červené stopy) a čtyři záporné piony (zelené stopy). Pro jednoduchost předpokládáme, že nevznikly žádné fotony  $\gamma$ -záření; ty by nezanechaly na snímku žádné stopy, neboť nemají elektrický náboj. Reakce je tedy



Z tab. 45.1 vidíme, že kladné piony ( $\pi^+$ ) jsou částice a záporné piony ( $\pi^-$ ) antičástice. Reakce popsaná rov. (45.3) je silná interakce (mezi částicemi působí silná jaderná síla), poněvadž všechny částice účastnící se reakce jsou hadrony.

Všimněme si, že se zachovává náboj. Náboj můžeme psát jako  $Qe$ , kde  $Q$  je nábojové kvantové číslo. (Nezměňte ho s  $Q$ , které označuje energii uvolněnou nebo pohlcenou v reakcích jako je rov. (45.2).) Hodnoty  $Q$  pro reakci popsanou v rov. (45.3) jsou

$$(1+) + (-1) = 4 \cdot (1+) + 4 \cdot (-1),$$

což nám říká, že celkový náboj je nulový před anihilací i po ní.

Pokud jde o energiovou bilanci, poznamenejme, že využitelná energie při anihilaci páru  $p - \bar{p}$  je minimálně rovna součtu klidových energií protonu a antiprotonu, tj.  $1876,6 \text{ MeV}$ . Klidová energie pionu je  $139,6 \text{ MeV}$ , tedy klidová energie všech osmi pionů je  $8 \cdot 139,6 \text{ MeV}$ , tj.  $1116,8 \text{ MeV}$ . Tak je k dispozici nezanedbatelné množství energie (minimálně kolem  $760 \text{ MeV}$ ), která se rozdělí na kinetickou energii uvedených osmi pionů. Vidíme, že při naší reakci můžeme snadno vyhovět požadavku zachování energie.

**2. Rozpad pionů.** Piony jsou nestabilní částice; rozpad nabitého pionu je charakterizován střední dobou života  $2,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ . V bodě 2 na obr. 45.3b se jeden z kladných pionů v komoře zastaví a spontánně rozpadne na antimion  $\mu^+$  (žlutá stopa) a neutrino  $\nu$ :



Poněvadž neutrino nemá elektrický náboj, nezanechává na snímku žádnou stopu. Jak antimion, tak neutrino jsou leptony; jsou to částice, které na sebe nepůsobí silnou jadernou silou. Mezi částicemi působí slabá jaderná síla, rozpad popsaný rov. (45.4) je slabá interakce. Klidová energie mionu je  $105,7 \text{ MeV}$ , takže pro kinetickou energii antimionu a neutrina zůstává  $139,6 \text{ MeV} - 105,7 \text{ MeV}$ , tj.  $33,9 \text{ MeV}$ .

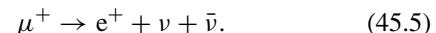
Spinové kvantové číslo pionu je nula a spinová kvantová čísla antimionu a neutrina jsou  $\frac{1}{2}$ ; proto bude zákon

zachování momentu hybnosti splněn pro reakci (45.4) tehdy, budou-li spiny antimionu a neutrina orientovány opačně (jedna částice bude mít spin nahoru, druhá dolů):

$$0\hbar = \frac{1}{2}\hbar + \left(-\frac{1}{2}\hbar\right).$$

Z rov. (45.4) je vidět, že je splněn zákon zachování náboje.

**3. Rozpad mionu.** Miony (ať už  $\mu^-$  nebo  $\mu^+$ ) jsou také nestabilní, střední doba života je  $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ . Mimo zorné pole obr. 45.3b se antimion vzniklý v reakci popsané rov. (45.4) zastaví a spontánně rozpadá podle schématu



Klidová energie mionu je  $105,7 \text{ MeV}$  a klidová energie pozitronu je pouze  $0,511 \text{ MeV}$ , takže pro kinetickou energii tří častic vytvořených podle rov. (45.5) zůstává  $105,2 \text{ MeV}$ .

Můžeme se podivit: Proč máme v reakci (45.5) dvě neutriny? Proč nestačí jedno, podobně jako při rozpadu pionu v reakci (45.4)? Jedním důvodem je, že antimion, pozitron i neutrino mají spinové kvantové číslo  $\frac{1}{2}$  a že tedy v reakci s jedním neutrinem by nemohl být splněn zákon zachování spinového momentu hybnosti v rov. (45.5). V čl. 45.4 rozebereme další důvod.

### PŘÍKLAD 45.1

V roce 1964 byly v Brookhaven National Laboratory prováděny experimenty s fokusovaným svazkem kaonů ( $K^-$ ). Kaony, jejichž kinetická energie byla  $5000 \text{ MeV}$  a které byly produkovány v tamním synchrotronu, putovaly relativistickou rychlostí zhruba  $140 \text{ m}$  dlouhou vakuovou trubicí k bublinkové komoře, kde probíhaly experimenty.

Klidová energie  $mc^2$  kaonů je  $494 \text{ MeV}$  a střední doba životaje  $8,6 \cdot 10^{-9} \text{ s}$ . O kolik se snížila intenzita svazku kaonů při jejich cestě od synchrotronu k bublinkové komoře?

**ŘEŠENÍ:** Kinetická energie kaonu souvisí s klidovou energií  $mc^2$  podle rov. (38.33):

$$E_{K,K} = mc^2(\gamma - 1).$$

Lorentzův faktor  $\gamma$  pro  $5000 \text{ MeV}$  kaony je

$$\gamma = \frac{E_{K,K}}{mc^2} + 1 = \frac{(5000 \text{ MeV})}{(494 \text{ MeV})} + 1 = 11,1.$$

Střední doba života  $\tau$  těchto pohybujících se častic v laboratorní soustavě je rovna střední době života v klidové soustavě častic násobené dilatačním faktorem podle rov. (38.8):

$$\begin{aligned} \tau &= \gamma \tau_0 = (11,1)(8,6 \cdot 10^{-9} \text{ s}) = \\ &= 9,55 \cdot 10^{-8} \text{ s}. \end{aligned}$$

Při pohybu přibližně rychlostí světla po dobu  $\tau$  urazí kaon dráhu, která měřena v laboratorní souřadné soustavě je

$$\begin{aligned} L &= c\tau = (3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})(9,55 \cdot 10^{-8} \text{ s}) = \\ &= 28,7 \text{ m}. \end{aligned}$$

Střední době života kaonů odpovídá vzdálenost  $L = 28,7 \text{ m}$  v laboratorní soustavě a počet častic ve svazku se tedy sníží

na polovinu vždy po proběhnutí této dráhy. Na samém konci, poté co svazek překoná vzdálenost 140 m, poklesne díky rozpadu částic počet kaonů ve svazku (tj. intenzita svazku) na

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{\left(\frac{140}{28,7}\right)} = 0,034 \text{ neboli } 3,4\% \quad (\text{Odpověď})$$

pocáteční hodnoty.

Takový útlum svazku je nevítaný, ale stále ještě přijatelný. Povšimněte si, jak důležitý je jev dilatace času. Bez něj by totiž došlo k zeslabení intenzity svazku na

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{\left(\frac{140}{28,7}\right)(11,1)} \doteq 5 \cdot 10^{-17}$$

původní hodnoty. (Zdůvodnění najdete při opětném čtení předchozí argumentace.) Dilatace času způsobuje vzrůst intenzity v řádu milionů miliard.

### PŘÍKLAD 45.2

Pion v klidu se rozpadá podle rov. (45.4):

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu.$$

Jaká bude kinetická energie antimionu  $\mu^+$ ? Jaká bude kinetická energie neutrina?

**ŘEŠENÍ:** Z tab. 45.1 známe klidové energie pionu a antimionu 139,6 MeV a 105,7 MeV. Rozdíl těchto energií musí být kinetická energie antimionu a neutrina, tedy

$$\begin{aligned} 139,6 \text{ MeV} - 105,7 \text{ MeV} &= \\ &= 33,9 \text{ MeV} = E_{k,\mu} + E_{k,\nu}. \end{aligned} \quad (45.6)$$

Poněvadž pion byl v klidu, vyžaduje zákon zachování hybnosti

$$p_\mu = p_\nu,$$

kde  $p_\mu$  je *velikost* hybnosti antimionu a  $p_\nu$  neutrina. Vhodná forma tohoto vztahu je

$$(p_\mu c)^2 = (p_\nu c)^2. \quad (45.7)$$

Rov. (38.37)

$$(pc)^2 = E_k^2 + 2E_k mc^2 \quad (45.8)$$

dává relativistický vztah mezi kinetickou energií částice  $E_k$  a její hybností  $p$ . Po dosazení do rov. (45.7) dostaváme

$$E_{k,\mu}^2 + 2E_{k,\mu}m_\mu c^2 = E_{k,\nu}^2, \quad (45.9)$$

neboť pro neutrino předpokládáme  $m_\nu c^2 = 0$ . Nyní vypočteme z rov. (45.6)  $E_{k,\nu}$  a dosadíme do rov. (45.9). Odtud pak pro  $E_{k,\mu}$  dostaneme

$$\begin{aligned} E_{k,\mu} &= \frac{(33,9 \text{ MeV})^2}{2(33,9 \text{ MeV} + m_\mu c^2)} = \\ &= \frac{(33,9 \text{ MeV})^2}{2(33,9 \text{ MeV} + 105,7 \text{ MeV})} = \\ &= 4,12 \text{ MeV}. \end{aligned} \quad (\text{Odpověď})$$

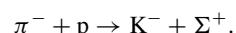
Kinetická energie neutrina je potom z rov. (45.6)

$$\begin{aligned} E_{k,\nu} &= 33,9 \text{ MeV} - E_{k,\mu} = 33,9 \text{ MeV} - 4,12 \text{ MeV} = \\ &= 29,8 \text{ MeV}. \end{aligned} \quad (\text{Odpověď})$$

Z výsledku vidíme, že ačkoliv velikosti hybnosti obou rozdíhajících se častic jsou stejné, neutrino získá větší část (88 %) kinetické energie.

### PŘÍKLAD 45.3

Protony v bublinkové komoře jsou bombardovány zápornými piony o vysoké energii a nastává následující reakce:



Klidové energie těchto častic jsou:

$$\begin{array}{ll} \pi^- & 139,6 \text{ MeV} \\ p & 938,3 \text{ MeV} \end{array} \quad \begin{array}{ll} K^- & 493,7 \text{ MeV} \\ \Sigma^+ & 1189,4 \text{ MeV} \end{array}$$

Jaká je energie rozpadu při této reakci?

**ŘEŠENÍ:** Energie rozpadu je

$$\begin{aligned} Q &= (m_\pi c^2 + m_p c^2) - (m_K c^2 + m_\Sigma c^2) = \\ &= (139,6 \text{ MeV} + 938,3 \text{ MeV}) - \\ &\quad - (493,7 \text{ MeV} + 1189,4 \text{ MeV}) = \\ &= -605 \text{ MeV}. \end{aligned} \quad (\text{Odpověď})$$

Záporné znaménko výsledku říká, že jde o *endotermickou* reakci. To znamená, že pokud je proton v klidu, musí mít dopadající pion ( $\pi^-$ ) kinetickou energii větší než nějaká prahová hodnota, aby reakce mohla vůbec proběhnout. Prahová energie je větší než 605 MeV vzhledem k tomu, že musí být splněn i zákon zachování hybnosti, tedy nejenže vznikne dvojice kaon ( $K^-$ ) a  $\Sigma$ -baryon ( $\Sigma^+$ ), ale že tyto částice musí získat jistou kinetickou energii. Relativistický výpočet, jehož detaily pro nás v tuto chvíli nejsou důležité, ukazuje, že prahová energie pro dopadající pion je 907 MeV.

## 45.4 LEPTONY

Pokračujme nyní s naším programem klasifikace částic. Budeme se nejprve zabývat leptony, tedy částicemi, na které nepůsobí silná jaderná síla.

Zatím jsme se jako s leptonem seznámili se známým elektronem a s neutrinem, které jej provází při  $\beta$ -rozpadu. Jiným příkladem leptonu je mion, jehož rozpad popisuje rov. (45.5). Fyzikové postupně objevili, že neutrino, které se objevuje v rov. (45.4) při vzniku mionu, není ta samá částice jako neutrino v  $\beta$ -rozpadu, které je spojeno s výskytem elektronu. Pokud je musíme rozlišovat, nazýváme první z nich **mionové neutrino** (symbol  $\nu_\mu$ ) a druhé pak **elektronové neutrino** (symbol  $\nu_e$ ).

To, že se skutečně jedná o dva různé druhy neutrin, dokazuje skutečnost, že při dopadu mionových neutrín (produkovaných při pionovém rozpadu podle rov. (45.4)) na terč pevné látky jsou vždy pozorovány pouze miony, ale nikdy elektrony. Naopak dopadají-li elektronová neutrina (produkovaná při  $\beta$ -rozpadu štěpných produktů v jaderném reaktoru) na terč pevné látky, jsou vždy pozorovány pouze elektrony, ale nikdy miony.

Další lepton, **tauon** (symbol  $\tau$ ), byl objeven ve SLAC v roce 1975; jeho objevitel Martin Perl se stal v roce 1995 laureátem Nobelovy ceny za fyziku. Také k tauonu existuje přidružené neutrino, odlišné od obou předchozích. V tab. 45.2 jsou shrnutý dnes známé leptony. Leptony jsou rozděleny do tří rodin, z nichž každá obsahuje částici (elektron, mion a tauon) a k ní přidružené neutrino. Máme také důvod věřit, že existují právě jen tři rodiny leptonů uvedené v tab. 45.2. Leptony nemají žádnou rozeznatelnou vnitřní strukturu ani měřitelné rozměry; při interakci s ostatními částicemi nebo elektromagnetickými vlnami se chovají jako opravdu bodové fundamentální částice.

### Zachování leptonového čísla

V každé ze tří leptonových rodin v tab. 45.2 můžeme definovat kvantové číslo, tzv. **leptonové číslo**: přiřadíme  $L = +1$

**Tabulka 45.2 Leptony<sup>a</sup>**

RODINA	ČÁSTICE	SYMBOL	HMETNOST (MeV/c <sup>2</sup> )	NÁBOJ	ANTIČÁSTICE
Elektron	elektron	e <sup>-</sup>	0,511	-1	e <sup>+</sup>
	elektronové neutrino <sup>b</sup>	$\nu_e$	0	0	$\bar{\nu}_e$
Mion	mion	$\mu^-$	105,7	-1	$\mu^+$
	mionové neutrino <sup>b</sup>	$\nu_\mu$	0	0	$\bar{\nu}_\mu$
Tauon	tauon	$\tau^-$	1 777	-1	$\tau^+$
	tauonové neutrino <sup>b</sup>	$\nu_\tau$	0	0	$\bar{\nu}_\tau$

<sup>a</sup> Všechny leptony (částice i antičástice) mají spin  $\frac{1}{2}$  a jsou tak fermiony.

<sup>b</sup> Nejsou-li hmotnosti neutrín nulové, jsou velmi malé. V roce 2000 je tato otázka stále otevřená.

každé částici a  $L = -1$  každé antičástici. Částicím jiných druhů (jako třeba proton) přiřadíme  $L = 0$ . Je experimentálně ověřeno, že při všech reakcích se zachovává leptonové číslo *zvlášť pro každou leptonovou rodinu*. Máme tedy vlastně tři leptonová čísla,  $L_e$ ,  $L_\mu$  a  $L_\tau$ , přítom každé z nich se při reakcích zachovává.

Příkladem je již uváděný rozpad antimionu v rovnici (45.5), který si nyní podrobněji napíšeme jako

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu. \quad (45.10)$$

Podívejme se na rozpad nejprve z pohledu mionové rodiny leptonů.  $\mu^+$  je antičástice (tab. 45.2) a má tedy mionové leptonové číslo  $L_\mu = -1$ . Částice  $e^+$  a  $\nu_e$  nepatří do mionové rodiny a mají tedy  $L_\mu = 0$ . Nakonec poslední člen na pravé straně  $\bar{\nu}_\mu$  je antičástice a má proto také mionové leptonové číslo  $L_\mu = -1$ . Obě strany rov. (45.10) mají stejné mionové leptonové číslo, jmenovitě  $L_\mu = -1$ ; kdyby tomu tak nebylo, nemohlo by k takovému rozpadu  $\mu^+$  docházet.

Na levé straně rov. (45.10) není žádná částice elektronové rodiny, elektronové leptonové číslo je tedy  $L_e = 0$ . Na pravé straně rov. (45.10) má pozitron jako antičástice (tab. 45.2) leptonové číslo  $L_e = -1$ . Elektronové neutrino je částice a má tedy elektronové leptonové číslo  $L_e = +1$ . Celkové elektronové leptonové číslo částic na pravé straně rov. (45.10) je také nula; i elektronové leptonové číslo se zachovává.

V rov. (45.10) se neobjevuje žádný z členů tauonové rodiny, budeme tedy mít  $L_\tau = 0$  na obou stranách. Všechna leptonová čísla  $L_\mu$ ,  $L_e$  a  $L_\tau$  zůstávají při rozpadu popsáném v rov. (45.10) konstantní, jejich hodnoty jsou -1, 0 a 0. Rozebrali jsme tak jeden příklad obecného zákona, nazývaného **zákon zachování leptonového čísla**; tento zákon platí pro všechny typy částicových interakcí.

**KONTROLA 1:** (a)  $\pi^+$  mezon se rozpadá reakcí  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ . Do které leptonové rodiny patří toto neutrino? (b) Je toto neutrino částice, nebo antičástice? (c) Jaké má leptonové číslo?

## 45.5 HADRONY

Nyní budeme uvažovat hadrony (baryony a mezony), tedy částice, které na sebe působí silnou jadernou silou. Začneme tím, že k našemu seznamu zákonů zachování přidáme ještě jeden: **zákon zachování baryonového čísla**.

Abychom se k tomuto zákonu dostali, uvažujme rozpad protonu

$$p \rightarrow e^+ + \nu_e \quad (Q = 937,8 \text{ MeV}). \quad (45.11)$$

Taková reakce *nikdy* nenastává. Můžeme být rádi, že tomu tak je, neboť jinak by se postupně všechny protony ve vesmíru přeměnily na pozitrony, což by mělo zhoubné následky. Ale přesto tento rozpad zatím nenarušuje žádný z nám známých zákonů zachování, včetně zachování leptonového čísla.

Pozorovanou stabilitu protonu — a nepřítomnost mnoha dalších reakcí v přírodě, které by byly jinak možné — započítáme zavedením **baryonového čísla**  $B$  a nového zákona zachování, zachování baryonového čísla.

Každému baryonu přiřadíme hodnotu  $B = +1$  a každému antibaryonu hodnotu  $B = -1$ . Částicím jiných druhů přiřadíme pak hodnotu  $B = 0$ . Nemohou probíhat takové částicové reakce, které mění celkové baryonové číslo.

Proton je baryon, zatímco pozitron a neutrino nejsou. Reakce popsaná rov. (45.11) tedy nemůže nastat, neboť narušuje zachování baryonového čísla. Je totiž

$$(+) \neq (0) + (0).$$

Zákon zachování baryonového čísla je užitečný právě tím, že vysvětluje, proč mnohé rozpady a částicové reakce nenastávají, i když by byly jinak dobré možné.

**KONTROLA 2:** V přírodě *není* pozorován následující typ rozpadu neutronu:

$$n \rightarrow p + e^-.$$

Který z následujících zákonů zachování by byl takovou reakcí narušen: (a) energie, (b) momentu hybnosti, (c) hybnosti, (d) náboje, (e) leptonového čísla, (f) baryonového čísla? Hmotnosti částic jsou:  $m_n = 939,6 \text{ MeV}/c^2$ ,  $m_p = 938,3 \text{ MeV}/c^2$  a  $m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2$ .

### PŘÍKLAD 45.4

Analyzujte hypotetický rozpad stacionárního protonu podle vztahu

$$p \rightarrow \pi^0 + \pi^+ \quad (\text{nенastává!})$$

tak, že budete zkoumat různé zákony zachování. (Oba piony jsou mezony se spinem a baryonovým číslem rovným nule. Klidová energie  $\pi^0$  mezonu je  $135,0 \text{ MeV}$ .)

**REŠENÍ:** Vidíme hned, že náboj se zachovává a že není obtížné splnit zákon zachování hybnosti — stačí, když se piony budou pohybovat v opačných směrech od protonu s hybnostmi o stejně velikosti. Snadno vidíme i zachování leptonového čísla, neboť leptonové číslo všech tří častic v reakci je nula.

Energii rozpadu najdeme odečtením klidových energií částic. Užitím tab. 45.1 dostaneme

$$\begin{aligned} Q &= (m_p c^2) - (m_0 c^2 + m_+ c^2) = \\ &= (938,3 \text{ MeV}) - (135,0 \text{ MeV} + 139,6 \text{ MeV}) = \\ &= 663,7 \text{ MeV}. \end{aligned}$$

Kladné znaménko pro energii  $Q$  říká, že reakce není vyloučena zákonem zachování energie.

Zaznamenali jsme již, že oba piony mají nulový spin. Proton ale má spinové kvantové číslo  $\frac{1}{2}$ . V reakci se tedy *nezachovává* moment hybnosti a tento důvod stačí k tomu, aby tento rozpad protonu nemohl nastat.

Navíc se nezachovává ani baryonové číslo. Pro proton máme  $B = +1$  a pro oba piony je  $B = 0$ . Takže uvažovaná reakce je tak dvakrát zakázána, neboť by narušila dva z našich pěti zákonů zachování.

### PŘÍKLAD 45.5

Částice se symbolem  $\Xi^-$  (ksí minus) se rozpadá podle vztahu

$$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-.$$

Obě částice, tj.  $\Lambda^0$  (lambda nula) a  $\pi^-$ , jsou nestabilní. Než dostaneme stabilní částice, dojde ke kaskádě rozpadových reakcí:

$$\begin{aligned} \Lambda^0 &\rightarrow p + \pi^-, \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \\ \mu^- &\rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e. \end{aligned}$$

(a) Zapište výraz pro konečný stav rozpadu částice  $\Xi^-$ .

**REŠENÍ:** Sloučením všech vztahů pro rozpady nestabilních častic dostaneme

$$\Xi^- \rightarrow p + 2(e^- + \bar{\nu}_e) + 2(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu). \quad (\text{Odpověď})$$

Všechny částice na pravé straně tohoto celkového vztahu jsou stabilní. Všimněte si zachování náboje, celkové nábojové kvantové číslo na obou stranách je  $-1$ .

(b) Je částice  $\Xi^-$  mezon, nebo baryon?

Tabulka 45.3 Osm baryonů se spinem 1/2

ČÁSTICE	SYMBOL	HMETNOST (MeV/c <sup>2</sup> )	KVANTOVÁ ČÍSLA NÁBOJ	PODIVNOST
Proton	p	938,3	+1	0
Neutron	n	939,6	0	0
Lambda	Λ <sup>0</sup>	1 115,6	0	-1
Sigma	Σ <sup>+</sup>	1 189,4	+1	-1
Sigma	Σ <sup>0</sup>	1 192,5	0	-1
Sigma	Σ <sup>-</sup>	1 197,3	-1	-1
Ksí	Ξ <sup>0</sup>	1 314,9	0	-2
Ksí	Ξ <sup>-</sup>	1 321,3	-1	-2

**ŘEŠENÍ:** Proton je baryon. Všechny další částice na pravé straně celkového vztahu mají  $B = 0$ . Aby byl splněn zákon zachování baryonového čísla, musí být baryonové číslo částice  $\Xi^-$  rovno  $B = +1$ , částice  $\Xi^-$  je tedy baryon. Kdyby měla být mezon, její baryonové číslo by bylo nula.

(c) Jsou u celkovém vztahu zachována leptonová čísla?

**ŘEŠENÍ:** Částice  $\Xi^-$  na levé straně vztahu se neobjevuje v tab. 45.2, která obsahuje všechny leptony, musí mít tedy leptonové číslo nula. Pravá strana vztahu obsahuje osm leptonů, čtyři z elektronové a čtyři z mionové rodiny. Uvnitř každé rodiny se tyto leptony objevují jako dvojice částice s antičasticí a ty mají opačná znaménka leptonového čísla. Je tedy jak celkové elektronové leptonové číslo  $L_e$ , tak celkové mionové leptonové číslo  $L_\mu$  rovno nule a leptonová čísla se v reakci zachovávají.

(d) Co můžete říci o spinu částice  $\Xi^-$ ?

**ŘEŠENÍ:** Všechn devět částic na pravé straně celkového vztahu má spin  $\frac{1}{2}$ . Devět hodnot  $m_s = \pm \frac{1}{2}$  dá dohromady vždy poločíselnou hodnotu, bez ohledu na to, jaké bude znaménko jednotlivých složek  $S_z$ . Výsledné kvantové spinové číslo částice  $\Xi^-$  musí být poločíselné. (Skutečně, toto kvantové číslo je  $\frac{1}{2}$ , částice  $\Xi^-$  je uvedena spolu s dalšími baryony se spinem  $\frac{1}{2}$  v tab. 45.3.)

Naopak reakce

$$\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + \Sigma^+, \quad (45.13)$$

která neporušuje žádný ze zákonů zachování známých v počátcích částicové fyziky, nenastane nikdy.

Proto se začalo předpokládat (navrhli to nezávisle na sobě Murray Gell-Mann ve Spojených státech a K. Nishijima v Japonsku), že některé částice mají novou vlastnost, nazvanou **podivnost** (strangeness), které přísluší nové kvantové číslo  $S$  a pro toto číslo existuje vlastní zákon zachování. (Je třeba odlišovat zde zavedený symbol  $S$  od spinu.) Název *podivnost* pochází z doby před tím, než se odhalily vlastnosti těchto častic; tehdy byly známy jako „podivné částice“ a název už zůstal.

Proton, neutron a pion mají  $S = 0$ ; nejsou to „podivné částice“. Částici  $K^+$  byla přiřazena podivnost  $S = +1$  a částici  $\Sigma^+$  podivnost  $S = -1$ . Je tedy v rov. (45.12) podivnost zachována

$$(0) + (0) = (+1) + (-1) \quad (\text{hodnoty } S),$$

ale není zachována v rov. (45.13)

$$(0) + (0) \neq (0) + (-1) \quad (\text{hodnoty } S).$$

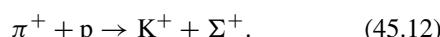
Reakce popsaná rov. (45.13) nenastává, protože narušuje zákon **zachování podivnosti**:

Podivnost se při interakci prostřednictvím silné jaderné síly zachovává.

Může se zdát těžkopádné vymýšlet novou vlastnost částic jen proto, abychom vyřešili malou záhadu, jakou představují rov. (45.12) a (45.13). Podivnost a její kvantové číslo se však brzy projevily v mnoha dalších oblastech fyziky elementárních častic, a podivnost je dnes plnohodnotnou charakteristikou částice, podobně jako třeba náboj nebo spin. Pro ty, kteří znají a mají rádi elementární částice, už podivnost vůbec není podivná.

## 45.6 A JEŠTĚ JEDEN ZÁKON ZACHOVÁNÍ

Částice mají ještě další vnitřní charakteristiky než ty, které jsme dosud uvažovali: hmotnost, náboj, spin, leptonové číslo a baryonové číslo. První z těchto dalších charakteristik se vynořila, když si experimentátoři povídali, že některé nové částice jako je kaon (K) a sigma (Σ) vznikají jen spolu. Zdálo se nemožné získat v reakci jen jednu z nich. Při interakci svazku pionů s vysokou energií s protony kapaliny v bublinkové komoře dojde často k reakci



Nenechme se mýlit zvláštností jména. Podivnost není o nic záhadnější vlastností částic než náboj. Podivnost i náboj jsou vlastnosti, které má (nebo nemá) každá částice; každá vlastnost je určena příslušným kvantovým číslem. Každá splňuje zákon zachování. Později byly objeveny další charakteristiky částic a dostalo se jim ještě podivnějších jmen, jako *půvab* (charm) nebo *bottomness*, ale všechny jsou dokonale odůvodněné. Podívejme se například, jak se vyplatilo používání podivnosti pro odhalení důležitých pravidelností v charakteristikách elementárních částic.

## 45.7 OSMINÁSOBNÁ CESTA

Existuje skupina osmi baryonů — jsou mezi nimi neutron a proton — jejichž spinové kvantové číslo je  $\frac{1}{2}$ . Tab. 45.3 obsahuje některé jejich další vlastnosti. Na obr. 45.4a je fascinující obrazec, který vzniká, když zobrazujeme podivnost těchto baryonů v závislosti na jejich nábojovém kvantovém čísle. Šest z osmi vytváří šestiúhelník, v jehož středu jsou zbyvající dva baryony.

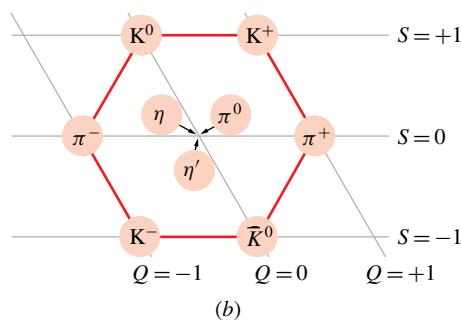
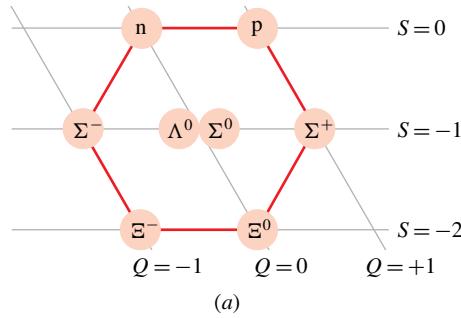
Obraťme nyní pozornost od hadronů zvaných baryony k hadronům zvaným mezony. Některé vlastnosti skupiny devíti mezonů se spinem nula jsou uvedeny v tab. 45.4. Jestliže vykreslíme tuto skupinu do grafu s osmi podivností — nábojem, jak ukazuje obr. 45.4b, dostáváme opět stejný fascinující obrazec! Existenci těchto a podobných grafů, nazývaných diagramy *Osminásobné cesty*\*, předpověděli nezávisle v roce 1961 Murray Gell-Mann z California Institute of Technology a Yuval Ne'eman z Imperial College v Londýně. Oba obrazce z obr. 45.4 jsou příkladem velkého

\* Převzato z východní mystiky. „Osm“ odpovídá osmi kvantovým číslům (z nichž my jsme definovali pouze několik), které užívá teorie založená na předpokladu určitých symetrií a která předpovídá existenci zmínovaných diagramů.

**Tabulka 45.4 Devět mezonů se spinem nula<sup>a</sup>**

ČÁSTICE	SYMBOL	HMETNOST (MeV/c <sup>2</sup> )	KVANTOVÁ ČÍSLA NÁBOJ	PODIVNOST
Pion	$\pi^0$	135,0	0	0
Pion	$\pi^+$	139,6	+1	0
Pion	$\pi^-$	139,6	-1	0
Kaon	$K^+$	493,7	+1	+1
Kaon	$K^-$	493,7	-1	-1
Kaon	$K^0$	497,7	0	+1
Kaon	$\bar{K}^0$	497,7	0	-1
Eta	$\eta$	547,5	0	0
Eta s čárkou	$\eta'$	957,8	0	0

<sup>a</sup> Všechny mezony jsou bozony se spinem 0, 1, 2, ...



**Obr. 45.4** (a) Obrazec Osminásobné cesty pro osm baryonů se spinem  $\frac{1}{2}$  z tab. 45.3. Částice jsou zobrazeny jako kroužky v souřadnicích podivnost — náboj, osa nábojového kvantového čísla je nakloněná. (b) Podobný diagram pro devět mezonů se spinem nula z tab. 45.4.

počtu symetrických diagramů, do kterých jsou uspořádány skupiny baryonů a mezonů.

Symetrie diagramu Osminásobné cesty pro baryony se spinem  $\frac{1}{2}$ , který zde neukazujeme, vyžaduje deset částic uspořádaných jako skupina deseti kuželek na kuželníku. Když však byl diagram poprvé zveřejněn, bylo známo pouze devět takových částic; „čelní kuželka“ chyběla. V roce 1962 Gell-Mann předpověděl na základě teorie a symetrie diagramu toto:

Existuje baryon se spinem  $\frac{3}{2}$ , nábojem  $-1$ , podivností  $-3$  a klidovou hmotností přibližně  $1\,680\text{ MeV}$ . Jestliže budeme tuto částici hledat (navrhují pojmenovat ji omega minus), myslím, že ji musíme najít.

Skupina fyziků, kterou vedl Nicholas Samios z Brookhaven National Laboratory, se této výzvy chopila a skutečně nalezla „chybějící“ částici a potvrdila, že má všechny předpovězené vlastnosti. Nemůže být nic lepšího pro pozvednutí důvěry v teorii než rychlé experimentální potvrzení nové předpovědi!

Obrazce Osminásobné cesty mají ve fyzice elementárních častic stejně postavení jako periodická tabulka prvků v chemii. V obou případech máme jistý obraz uspořádanosti, ve kterém jsou prázdná místa (chybějící částice nebo chybějící prvky) velice nápadná a ukazují experimentátorům směr bádání. Samotná existence periodické tabulky prvků ukazuje na to, že atomy prvků nejsou elementárními objekty, ale že musí mít vnitřní strukturu. Podobně také existence obrazců Osminásobné cesty naznačuje, že mezonu a baryony musí mít nějakou vnitřní strukturu, pomocí níž mohou být pochopeny jejich vlastnosti. Tato struktura je *kvarkový model*, kterým se nyní budeme zabývat.

## 45.8 KVARKOVÝ MODEL

V roce 1964 Gell-Mann a Georg Zweig nezávisle poukázali na to, že diagramy Osminásobné cesty můžeme jednoduše pochopit, když budeme předpokládat, že mezonu a baryony jsou složeny z částeček, které Gell-Mann nazval **kvarky**. Pojednáme nejprve o třech z nich, nazvaných *u-kvark* (nahoru — „up“, symbol u), *d-kvark* (dolů — „down“, symbol d) a *s-kvark* (podivný — „strange“, symbol s) a přiřadíme jim vlastnosti podle tab. 45.5. (Jména pro tyto tři kvarky, stejně tak jako pro tři další, se kterými se setkáme později, nemají jiný význam než jako vhodné značky. Do hromady mluvíme o těchto jménech jako o *vnějších kvarku*

**Tabulka 45.5 Kvarky<sup>a</sup>**

ČÁSTICE	SYMBOL	HMOTNOST (MeV/ $c^2$ )	KVANTOVÁ ČÍSLA			
			NÁBOJ $Q$	PODIVNOST $S$	BARYONOVÉ ČÍSLO $B$	ANTIČÁSTICE
Nahoru (Up)	u	5	$+\frac{2}{3}$	0	$+\frac{1}{3}$	$\bar{u}$
Dolů (Down)	d	10	$-\frac{1}{3}$	0	$+\frac{1}{3}$	$\bar{d}$
Půvabný (Charm)	c	1 500	$+\frac{2}{3}$	0	$+\frac{1}{3}$	$\bar{c}$
Podivný (Strange)	s	200	$-\frac{1}{3}$	-1	$+\frac{1}{3}$	$\bar{s}$
Horní (Top)	t	$\approx 180\,000$	$+\frac{2}{3}$	0	$+\frac{1}{3}$	$\bar{t}$
Dolní (Bottom)	b	4 300	$-\frac{1}{3}$	0	$+\frac{1}{3}$	$\bar{b}$

<sup>a</sup> Všechny kvarky mají spin  $\frac{1}{2}$  a jsou tak fermiony. Kvantová čísla antikvarků  $Q$ ,  $S$  a  $B$  mají opačná znaménka než jsou znaménka odpovídajících kvarků.

(flavors). Stejně dobře bychom mohli místo nahoru, dolů a podivný užít třeba vanilkový, čokoládový a jahodový.)

Zlomková nábojová kvantová čísla kvarků vypadají poněkud otřesně. Počkejte však se soudem, až uvidíte, jak hladce jsou z těchto zlomkových nábojů složeny pozorované celočíselné náboje mezonů a baryonů. Kvarky nebyly (dosud) přesvědčivě experimentálně pozorovány jako volné částice, a teoretici předložili rozumné důvody, proč tomu tak je. V každém případě je však kvarkový model tak užitečný, že nemožnost vidět volné kvarky nebrání fyzikům ve všeobecném přijetí kvarkového modelu.

Viděli jsme již, jak lze vytvořit atom kombinací elektronů a jádra. Nyní se podívejme, jak můžeme vytvořit mezonu a baryony kombinací kvarků. Již předem si řekněme, že při tom dosáhneme úspěchu pro všechny částice, složené z kvarků u, d a s.

Nejsou známy žádné mezonu nebo baryony, jejichž vlastnosti bychom nemohli pochopit jako výsledek vhodné kombinace kvarků. Naopak každá možná kombinace kvarků odpovídá nějakému pozorovanému mezonu nebo baryonu.

Začneme nejprve s baryony.

### Kvarky a baryony

Každý baryon je kombinací tří kvarků; kombinace jsou znázorněny na obr. 45.5a. Pokud jde o baryonové číslo, vidíme že libovolné tři kvarky (každý s  $B = +\frac{1}{3}$ ) vytvázejí skutečně baryon (s  $B = 1$ ). Pro spiny je to také v pořádku. Máme-li tři spinová kvantová čísla  $\frac{1}{2}$ , můžeme vždy vzít dva spiny paralelně a jeden antiparalelně. To vede k celkovému spinu  $s = \frac{1}{2}$ , což je spinové kvantové číslo všech baryonů uvedených v tab. 45.3 a na obr. 45.4a.

Správné hodnoty dostáváme i pro náboj, jak můžeme vidět ze tří příkladů. Proton je složen z kvarků uud, takže

jeho nábojové kvantové číslo je

$$Q(uud) = (+\frac{2}{3}) + (+\frac{2}{3}) + (-\frac{1}{3}) = +1.$$

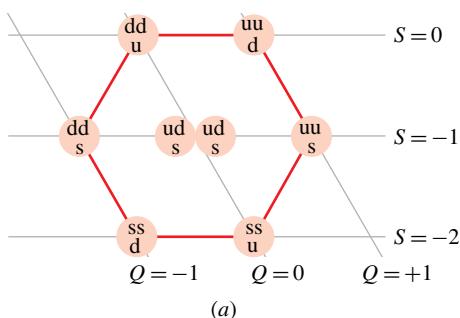
Neutron je složen z kvarků udd a jeho nábojové kvantové číslo je

$$Q(udd) = (+\frac{2}{3}) + (-\frac{1}{3}) + (-\frac{1}{3}) = 0.$$

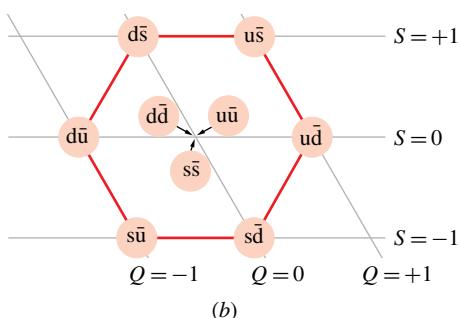
Baryon  $\Sigma^-$  je složen z kvarků dds, takže jeho nábojové kvantové číslo je

$$Q(dds) = (-\frac{1}{3}) + (-\frac{1}{3}) + (-\frac{1}{3}) = -1.$$

O správnosti hodnot podivnosti se můžeme přesvědčit užitím hodnot z tab. 45.3 pro  $\Sigma^-$  a z tab. 45.5 pro kvarky.



(a)



(b)

**Obr. 45.5** (a) Kvarková struktura osmi baryonů se spinem  $\frac{1}{2}$  zobrazených na obr. 45.4a. (Oba centrální baryony mají stejnou kvarkovou strukturu, ale  $\Sigma$  je nabuzený stav  $\Lambda$ , který přechází rozpadem na  $\Lambda$  při emisi fotonu  $\gamma$ -záření.) (b) Kvarková struktura devíti mezonů se spinem nula zobrazených na obr. 45.4b.

## Kvarky a mezony

Mezony jsou dvojice kvark + antikvark; jejich kvarková struktura je ukázána na obr. 45.5b a souhlasí s tím, že všechny mezony na obr. 45.4b a v tab. 45.4 mají nulový spin. Jak kvark, tak antikvark mají  $s = \frac{1}{2}$ , takže dvojice vytvářející mezon musí mít opačně orientované spiny, aby výsledný spin byl roven nule.

Model mezonu jako dvojice kvark + antikvark je také v souladu s tím, že mezony nejsou baryony; tedy, že baryonové číslo mezonu  $B = 0$ . Baryonové číslo kvarku je  $+\frac{1}{3}$  a antikvarku  $-\frac{1}{3}$ ; výsledné baryonové číslo mezonu je tedy skutečně nula.

Všimněme si blíže mezonu  $\pi^+$ , který je vytvořen z u-kvarku a  $\bar{d}$ -antikvarku. Z tab. 45.5 vidíme, že nábojové kvantové číslo u-kvarku je  $\frac{2}{3}$  a  $\bar{d}$ -antikvarku je  $\frac{1}{3}$  (opačně znaménko než kvantové číslo d-kvarku). To se pěkně sečte na nábojové kvantové číslo +1 pro  $\pi^+$  mezon

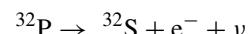
$$Q(u\bar{d}) = (+\frac{2}{3}) + (+\frac{1}{3}) = +1.$$

Všechna kvantová čísla náboje a podivnosti v obr. 45.5b souhlasí s čísly v tab. 45.4 a obr. 45.4b. Snadno se můžeme přesvědčit, že jsou užity všechny kombinace dvojic kvark + antikvark, které vyčerpávají všechny známé mezony se spinem nula. Všechno dobře souhlasí.

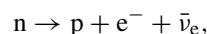
**KONTROLA 3:** Částice je kombinací d-kvarku a  $\bar{u}$ -antikvarku. Je tato částice (a)  $\pi^0$  mezon, (b) proton, (c)  $\pi^-$  mezon, (d)  $\pi^+$  mezon, nebo (e) neutron?

## Nový pohled na $\beta$ -rozpad

Podívejme se teď, jak vypadá  $\beta$ -rozpad z pohledu kvarkovo-vlásky modelu. V rov. (43.10) jsme uvedli typický příklad takového rozpadu:



Po tom, co bylo objeveno neutrino a Fermi vypracoval svou teorii  $\beta$ -rozpadu, fyzikové pohlíželi na základní reakci v  $\beta$ -rozpadu jako na přeměnu neutronu na proton uvnitř jádra:



ve kterém je neutrino definováno úplněji. Dnes se díváme hlouběji a vidíme, že přeměna neutronu (udd) na proton (uud) je vlastně přeměnou d-kvarku na u-kvark. Za základní reakci  $\beta$ -rozpadu považujeme tedy nyní



Jak více a lépe poznáváme základní vlastnosti hmoty, můžeme studovat známé jevy na stále hlubší úrovni. Vidíme také, že kvarkový model nejenom umožňuje porozumět struktuře elementárních částic, ale také jasněji vysvětluje jejich interakce.

## Ještě více kvarků

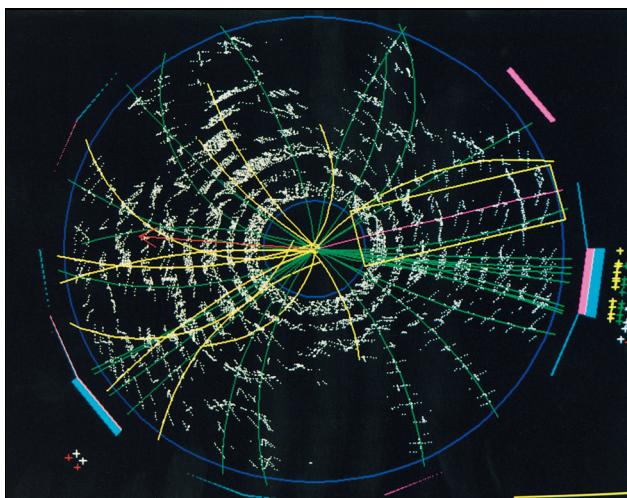
Existují další částice a další obrazce Osminásobné cesty, o kterých jsme se nezmíňovali. Abychom je mohli popsát,

musíme předpokládat existenci ještě tří dalších kvarků, nazvaných *c-kvark* (půvabný — „charm“, symbol c), *t-kvark* (horní — „top“, symbol t) a *b-kvark* (dolní — „bottom“, symbol b).

Z tab. 45.5 vidíme, že tyto tři kvarky mají neobyčejně velkou hmotnost, u nejhmotnějšího z nich (t-kvark) je hmotnost téměř 170krát větší než u protonu. Abychom mohli vytvářet částice obsahující tyto kvarky, musíme přecházet k větším a větším energiím, což je také důvod, proč tyto tři kvarky nebyly objeveny dříve.

První pozorovanou částicí, která obsahuje c-kvark, byl J mezon (též značený  $\Psi$ ) s kvarkovou strukturou  $c\bar{c}$ . Byl objeven současně a nezávisle skupinami, které vedli Samuel Ting v Brookhaven National Laboratory a Burton Richter na Stanford University.

Nejhmotnější t-kvark odolával všem pokusům o produkci v laboratoři až do roku 1995, kdy byla jeho existence prokázána na Tevatronu, obřím urychlovači ve Fermilab. V tomto urychlovači dochází ke srážce protonů a antiprotonů, z nichž každý má energii  $0,9 \text{ TeV} = 9 \cdot 10^{11} \text{ eV}$ , uprostřed dvou velkých detektorů částic. Velmi zřídka dojde k tomu, že se při srážce vytvoří pář t-kvark a  $\bar{t}$ -antikvark ( $t\bar{t}$ ), který se rychle rozpadá na částice s nižší energií. Obr. 45.6 ukazuje zobrazení stop zmíněných produktů rozpadu vytvořené počítačem. Existence páru t-kvark a  $\bar{t}$ -antikvark vyplývá z pečlivé analýzy těchto „úlomků“. Objev tohoto nejvíce hledaného t-kvarku je považován za triumf celého kvarkově-leptonového modelu fyziky elementárních částic.



**Obr. 45.6** Počítačem vytvořené zobrazení stop částic vzniklých při rozpadu páru t-kvark a  $\bar{t}$ -antikvark. Tento pář byl vytvořen na Tevatronu ve Fermilab při čelní srážce protonu a antiprotonu s vysokou energií.

Podívejme se ještě jednou na tab. 45.5 (kvarkové rodiny) a tab. 45.2 (leptonové rodiny) a všimněme si úhledně

symetrie těchto šestic částic, z nichž každá skupina je přirozeným způsobem rozdělena do tří dvojčlenných rodin. Podle současných poznatků považujeme kvarky a leptony za skutečně fundamentální částice, které již nemají žádnou vnitřní strukturu.

### PŘÍKLAD 45.6

Částice  $\Xi^-$  má spinové kvantové číslo  $\frac{1}{2}$  a kvantová čísla  $Q = -1$  a  $S = -2$ . Víme, že je vytvořena jako kombinace tří kvarků a že jsou to pouze kvarky u, d nebo s. Jaká musí být tato kombinace?

**ŘEŠENÍ:** Protože podivnost je  $S = -2$ , musí tato částice obsahovat dva podivné kvarky, z nichž každý má podivnost  $S = -1$  (tab. 45.5). Třetí kvark bude pak buď u-kvark, nebo d-kvark (oba mají  $S = 0$ ). Dva s-kvarky mají úhrnem náboj  $(-\frac{1}{3}) + (-\frac{1}{3}) = -\frac{2}{3}$ . Poněvadž náboj částice  $\Xi^-$  je  $-1$ , musí mít třetí kvark náboj  $-\frac{1}{3}$ ; tedy musí to být d-kvark. Kvarková struktura částice  $\Xi^-$  je tedy dss.

Jako závěrečný test uvažme, že podle tab. 45.5 je baryonové číslo d- i s-kvarků  $B = +\frac{1}{3}$ . Vidíme tedy, že baryonové číslo částice  $\Xi^-$  (dss) je

$$B = \left(\frac{1}{3}\right) + \left(\frac{1}{3}\right) + \left(\frac{1}{3}\right) = +1.$$

Tento výsledek jsme museli očekávat, protože  $\Xi^-$  je složena z kvarků (ne antikvarků) a je tedy částice (ne antičástice). Kdyby to byla antičástice, měla by  $B = -1$ .

## 45.9 ZÁKLADNÍ SÍLY A ZPROSTŘEDKUJÍCÍ ČÁSTICE

Přejděme nyní od třídění elementárních částic k silám, kterými na sebe vzájemně působí.

### Elektromagnetická síla

Na atomové úrovni jsme viděli, že dva elektrony na sebe působí elektromagnetickými silami podle Coulombova zákona. Na hlubší úrovni je tato interakce popsána vysoko úspěšnou teorií nazvanou **kvantová elektrodynamika** (QED). Podle kvantové elektrodynamiky elektron pociťuje přítomnost druhého elektronu tak, že si s ním vyměňuje fotony.

Tyto fotony nemůžeme detegovat, protože jsou emitovány jedním elektronem a po velmi krátké době absorbovány druhým elektronem. Pro jejich přechodný způsob existence je nazýváme **virtuální fotony**. Právě pro jejich zprostředkování roli při interakci dvou nábojů říkáme někdy o těchto fotonech, že jsou to *zprostředkující částice*.

Kdyby elektron v klidu emitoval foton a jeho stav by přitom zůstal nezměněn, nezachovávala by se energie. Zákon zachování energie však bude platit, uvážíme-li princip neurčitosti, zapsaný jako

$$\Delta E \Delta t \approx \hbar. \quad (45.14)$$

Tento vztah interpretujeme tak, že můžeme „přečerpat“ jisté množství energie  $\Delta E$ , narušující zachování energie, za předpokladu, že toto množství „vrátíme“ během doby  $\Delta t$ , dané vztahem  $\hbar / \Delta E$ . A to je právě případ virtuálních fotonů. Vezměme dvojici elektronů, které na sebe vzájemně působí. Když elektron A emituje virtuální foton, „nekrytá“ energie je rychle dodána pohlcením virtuálního fotonu emитovaného elektronem B a narušení zákona zachování energie pro uvažovanou dvojici elektronů nemůžeme pozorovat díky zákonité neurčitosti energie.

### Slabá jaderná síla

Teorie slabé jaderné síly, která působí na všechny částice, byla rozvinuta jako analogie k teorii elektromagnetické síly. Zprostředkující částice, tj. částice, která zprostředkuje slabou interakci dvou častic, není ale v tomto případě foton (s nulovou hmotností), ale tuto funkci plní dvě hmotné částice, označované symboly W a Z. Teorie byla tak úspěšná, že dokonce ukázala, že elektromagnetická síla a slabá jaderná síla jsou pouze rozdílné projevy jediné **elektroslabé síly**. Tento výsledek je logickým rozšířením Maxwellovy teorie, která ukázala, že elektrické a magnetické síly jsou rozdílný projev jediné **elektromagnetické síly**.

Teorie elektroslabé interakce dokázala předpovědět vlastnosti zprostředkujících častic. Například pro jejich hmotnost a náboj stanovila hodnoty

ČÁSTICE	NÁBOJ	HMETNOST
W	$\pm e$	$80,6 \text{ GeV}/c^2$
Z	0	$91,2 \text{ GeV}/c^2$

Připomeňme si, že hmotnost protonu je jen  $0,938 \text{ GeV}/c^2$ ; jsou to tedy opravdu velmi hmotné částice! Nobelovu cenu za fyziku získali v roce 1979 Sheldon Glashow, Steven Weinberg a Abdus Salam právě za vytvoření teorie elektroslabé interakce.

Teorie byla potvrzena v roce 1983 výsledky skupiny v CERNu, kterou vedl Carlo Rubbia. Byly pozorovány obě zprostředkující částice a jejich hmotnosti souhlasily s předpovězenými hodnotami. Již v roce 1984 byla tato vynikající experimentální práce oceněna Nobelovou cenou za fyziku, kterou obdrželi Carlo Rubbia a Simon van der Meer.

Jistou představu o složitosti dnešní fyziky elementárních častic získáme srovnáním s jiným experimentem

z této oblasti, oceněným Nobelovou cenou — objevem neutronu. Tento životně důležitý experiment byl proveden „na laboratorním stole“, kde byl jako zdroj čistic použit přirozeně radioaktivní materiál; výsledky byly uveřejněny v roce 1932 v článku s názvem „O možné existenci neutronu“ a jediným autorem byl James Chadwick.

Naproti tomu zprostředkující částice W a Z byly objeveny v roce 1983 na velkém urychlovači s obvodem kolem 7 km a energií čistic několik set miliard elektronvoltů. Základní detektor čistic sám vážil 2 000 tun. Na experimentu se podílelo více než 130 fyziků z 12 institucí v 8 zemích a s podporou velkého počtu pomocného personálu.

### Silná jaderná síla

Byla vypracována také teorie silné jaderné síly — tj. síly, která působí mezi kvarky a udržuje tak pohromadě hadrony. Zprostředkující částice se v tomto případě nazývají **gluony** a předpokládá se o nich, že mají podobně jako fotony nulovou hmotnost. Teorie předpokládá, že se každá kvarková „vůně“ vyskytuje ve třech druzích, které se pro pohodlí označují jako *červená*, *žlutá* a *modrá*. Máme tedy tři u-kvarky, od každé barvy po jednom, a podobně u kvarků dalších vůní. Antikvarky mají také tři barvy, *antičervenou*, *antižlutou* a *antimodrou*. Nesmíme tyto barvy brát doslova a chápout kvarky jako malinké barevné lenticinky. Ale i když jsou „barevné“ názvy jen konvence, mají v jistém smyslu své oprávnění, jak hned uvidíme.

Síle působící mezi kvarky se říká *barevná síla* a příslušné teorii pak v analogii s kvantovou elektrodynamikou (QED) **kvantová chromodynamika** (QCD). Podle této teorie se v přírodě vyskytují pouze takové kombinace kvarků, které jsou *barevně neutrální*.

Barevné neutrality lze dosáhnout dvěma způsoby. Při skládání skutečných barev dává červená + žlutá + modrá bílou, tedy barevně neutrální barvu; analogicky můžeme složit tři kvarky a vytvořit baryon. Antičervená + antižlutá + antimodrá dávají také bílou, takže můžeme složit tři antikvarky a vytvořit antibaryon. Ale také červená + antičervená + žlutá + antižlutá + modrá + antimodrá dají bílou. Tak můžeme skládat kombinace kvark + antikvark a vytvořit mezon. Pravidlo barevné neutrality nedovoluje žádnou jinou kombinaci kvarků a žádná jiná také není pozorována.

Barevná síla působí nejenom mezi kvarky, jež váže do baryonů a mezonů, ale působí také mezi takto vytvořenými časticemi; v této tradiční podobě je známa jako silná jaderná síla. Barevná síla tedy nejenom váže kvarky tak, že vytvářejí protony a neutrony, ale váže také protony a neutrony tak, že vytvářejí atomová jádra.

## Einsteinův sen

Snaha sjednotit základní síly v přírodě — které věnoval Einstein většinu svého zralého života — je dnes velmi aktuální problém. V tab. 6.2 je shrnut současný stav. Viděli jsme, že slabá jaderná síla byla úspěšně sjednocena s elektromagnetickou silou, takže na ně můžeme pohlížet jako na různé projevy jediné *elektroslabé síly*. Intenzivně se rozvíjejí teorie, které se snaží přidat k této kombinaci silnou jadernou sílu; říkáme jim *teorie velkého sjednocení* (GUTs — „grand unification theories“). Teorie, které se snaží zakončit úsilí o sjednocení přidáním gravitační síly — občas nazývané *teorie všeho* (TOE — „theories of everything“) — jsou zatím v nadějném, ale stále ještě velmi spekulativním stavu.

## 45.10 PŘESTÁVKA K ZAMYŠLENÍ

Pohleďme na to, co jsme se právě dozvěděli, s větším odstupem. Jestliže vše, co nás zajímá, je struktura světa kolem nás, můžeme slušně vystačit s elektronem, neutrinem, neutronem a protonem. Jak kdosi řekl, „vesmírná loď Země“ si docela dobře vystačí právě jen s těmito částicemi. Jestliže studujeme kosmické záření, pak pozorujeme několik dalších exotických částic, ale pro vytváření většiny dalších musíme budovat velké urychlováče a hledat tyto částice s velkým úsilím i náklady.

Je to tím, že — vyjádřeno pomocí energie — žijeme ve světě velmi nízkých teplot. Dokonce ve středu Slunce je hodnota  $kT$  jenom asi 1 keV. Abychom vytvářeli exotické částice, musíme být schopni urychlovat protony nebo elektrony na energie řádu GeV nebo TeV a vyšší. Kdysi dávno však *byla* teplota (všude) dostatečně vysoká, aby dodávala takové nebo i mnohem vyšší energie. Bylo to tehdy, kdy vesmír začal existovat. Obraťme proto nyní pozornost k této době.

Když se astronomové dívají do okolního prostoru, dívají se zároveň do minulých časů. Vesmír v dřívějším čase tedy můžeme studovat tak, že budeme pozorovat vzdálenější nebeské objekty. Nejvzdálenějšími objekty, které můžeme „vidět“, jsou **kvazary** (kvazistelární objekty); pořazujeme je za extrémně svítivé středy galaxií ve stadiu jejich utváření. V roce 2000 byla jako největší vzdálenost kvazaru od Země uváděna hodnota  $14 \cdot 10^9$  světelných let (kvazar RDJ 030117 + 002025 objevený astronomy z Palomar Observatory a z Kitt Peak National Observatory). Světlo, které nyní vstupuje do našich teleskopů, opouštělo kvazar zhruba před 14 miliardami let, a proto vidíme tento objekt ve stavu, v jakém byl tehdy.

## 45.11 VESMÍR SE ROZPÍNÁ

Jak jsme viděli v čl. 18.9, můžeme měřit relativní rychlosti, se kterými se k nám galaxie přibližují nebo se od nás vzdalují, pomocí Dopplerova posuvu světla, které emitují. Jestliže budeme sledovat pouze vzdálené galaxie a vynecháme naše nejbližší galaktické sousedy, dojdeme k překvapujícímu závěru. Všechny galaxie se od nás vzdalují!

V roce 1929 určil Edwin P. Hubble vztah mezi zdánlivou rychlosť  $v$  v vzdalování galaxie a její vzdáleností  $r$  od nás, jako přímou úměrnost. Platí

$$v = Hr \quad (\text{Hubblův zákon}), \quad (45.15)$$

kde konstanta úměrnosti  $H$  se dnes nazývá **Hubblůva konstanta**. Její hodnota je poněkud neurčitá, poněvadž je velmi obtížné měřit vzdálenosti vzdálených galaxií. Hodnota, založená na měřeních provedených v roce 1994 pomocí Hubblova vesmírného teleskopu, je

$$H = (80 \pm 17) \text{ km/(s}\cdot\text{Mpc}), \quad (45.16)$$

kde Mpc je délková jednotka megaparsek:

$$1 \text{ Mpc} = 3,084 \cdot 10^{19} \text{ km} = 3,260 \cdot 10^6 \text{ ly}. \quad (45.17)$$

Jiná hodnota, podložená dlouhou sérií měření a publikovaná v roce 1996, je  $57 \text{ km/(s}\cdot\text{Mpc)}$ . V roce 1999 publikované hodnoty se přiblížily, namísto 80 se udává 70 a namísto 57 se udává 59. Tyto dvě hodnoty naznačují, jaká je asi neurčitost ve stanovení tohoto důležitého parametru. My budeme v našich výpočtech užívat hodnotu  $H = 80 \text{ km/(s}\cdot\text{Mpc)}$ , která je ekvivalentní hodnotě  $24,5 \text{ mm/(s}\cdot\text{ly)}$ .

Hubblův zákon interpretujeme tak, že vesmír se rozpíná velmi podobně tomu, jako se při kynutí mazance s rozinkami od sebe vzdalují rozinky. Pozorovatelé v jiných galaxiích by všichni došli k závěru, že se od nich vzdálené galaxie vzdalují, a to podle Hubblova zákona. Přidržíme-li se naší analogie, žádná rozinka (galaxie) nemá jedinečné nebo privilegované postavení.

Hubblův zákon souhlasí dobře s hypotézou, že vesmír vznikl mohutným výbuchem (*Velký třesk*) před několika miliardami let. Vzdalující se galaxie jsou fragmenty této první exploze; jejich struktura se během času měnila a galaxie se od sebe vzájemně rozbíhají v důsledku rozpínání samotného vesmíru.

### PŘÍKLAD 45.7

Platí-li Hubblův zákon, jak daleko je kvazar, jehož zdánlivá rychlosť vzdalování je  $2,8 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ? (Povšimněte si, že je to 93 % rychlosti světla.)

**ŘEŠENÍ:** Z Hubblova zákona (rov. (45.15)) plyne

$$\begin{aligned} r &= \frac{v}{H} = \\ &= \frac{(2,8 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})}{(80 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc}))} \left( \frac{3,084 \cdot 10^{19} \text{ km}}{1 \text{ Mpc}} \right) \left( \frac{1 \text{ ly}}{9,46 \cdot 10^{15} \text{ m}} \right) = \\ &= 11 \cdot 10^9 \text{ ly}. \end{aligned} \quad (\text{Odpověď})$$

Tento výsledek je pouze přibližný, neboť kvazar se od nás nevzdaloval po celou dobu se stejnou rychlosí jako dnes.

### PŘÍKLAD 45.8

Předpokládejme, že se kvazar z př. 45.7 od nás vzdaloval stejnou rychlosí po celou dobu od Velkého třesku. Jakou minimální hodnotu to dává pro tu dobu? Jinak řečeno, jakou minimální hodnotu stáří vesmíru dostáváme na základě této rychlosí?

**ŘEŠENÍ:** Požadovanou dobu můžeme najít ze vztahu

$$\begin{aligned} t &= \frac{r}{v} = \frac{r}{rH} = \frac{1}{H} = \\ &= \frac{1}{(80 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc}))} \left( \frac{3,84 \cdot 10^{19} \text{ km}}{1 \text{ Mpc}} \right) \left( \frac{1 \text{ y}}{3,16 \cdot 10^7 \text{ s}} \right) = \\ &= 12 \cdot 10^9 \text{ y}. \end{aligned} \quad (\text{Odpověď})$$

Tento výsledek závisí na hodnotě Hubblovovy konstanty; menší hodnota  $H$  by vedla k většímu stáří vesmíru.

## 45.12 KOSMICKÉ RELIKTNÍ ZÁŘENÍ

V roce 1965 testovali Arno Penzias a Robert Wilson z tehdejších Bell Telephone Laboratories velmi citlivý mikrovlnný přijímač pro telekomunikační výzkum. Objevili slaboučký „šelest“ pozadí, jehož intenzita vůbec nezávisela na orientaci antény. Brzo bylo zřejmé, že Penzias a Wilson pozorovali **kosmické reliktní záření**, které vzniklo v raném vesmíru a vyplňuje téměř rovnoměrně celý prostor. Toto záření, které má maximum rozložení intenzity na vlnové délce 1,1 mm, má stejnou závislost intenzity na vlnové délce jako záření černého tělesa — dutiny, jejíž stěny mají teplotu 2,7 K; „dutinu“ v tomto případě tvoří celý vesmír. Za svůj objev dostali Penzias a Wilson v roce 1978 Nobelovu cenu za fyziku.

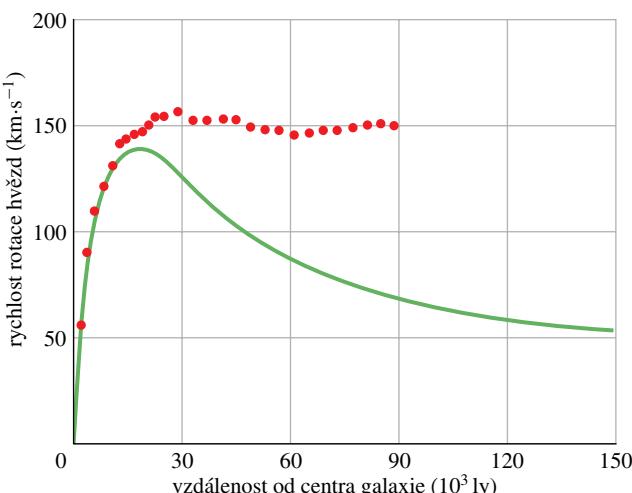
Záření vzniklo zhruba 300 000 let po Velkém třesku v době, kdy náhle začal vesmír propouštět elektromagnetické vlny. Záření v té době odpovídalo záření černého tělesa s teplotou asi 10<sup>5</sup> K. Při rozpínání vesmíru pak teplota klesala až na dnešní hodnotu 2,7 K podobně, jako klesá teplota adiabaticky se rozpínajícího plynu.

## 45.13 TEMNÁ HMOTA

Na Kitt Peak National Observatory v Arizoně měřila Vera Rubinová a její spolupracovník Kent Ford rychlosí rotace v řadě vzdálených galaxií. Rychlosí rotace určovali z měření Dopplerova posudu jasných hvězdokup dané galaxie v různých vzdálenostech od středu galaxie. Jak ukazuje obr. 45.7, jejich výsledky byly překvapivé: oběžná rychlosí hvězd na vnějším viditelném okraji galaxie je přibližně stejná, jako mají hvězdy blízko galaktického středu.

Jak ukazuje plná křivka na obr. 45.7, pozorování není vůbec v souladu s tím, co bychom očekávali, kdyby všechna hmota galaxie byla pozorovatelná ve viditelném světle. Křivka získaná Rubinovou a Fordem se také odlišuje od toho, co pozorujeme ve sluneční soustavě. Například oběžná rychlosí Pluta (planety nejvzdálenější od Slunce) je pouze desetina rychlosí Merkuru (planety nejbližší Slunci).

Chceme-li udržet soulad s Newtonovou mechanikou, pak můžeme výsledky Rubinové a Forda vysvětlit jedině předpokladem, že typická galaxie obsahuje mnohem více hmoty než jen tu, kterou můžeme skutečně vidět. Viditelná část galaxie by pak tvořila pouze 5 až 10 % její celkové hmotnosti. Kromě měření galaktických rotací existuje mnoho dalších pozorování, která vedou k závěru, že ve vesmíru je mnoho hmoty, kterou nemůžeme vidět.



**Obr. 45.7** Rychlosí rotace hvězd v typické galaxii v závislosti na jejich vzdálenosti od středu galaxie. Plná čára ukazuje, že kdyby všechna hmota v galaxii byla viditelná, musela by rychlosí rotace výrazně klesat při větších vzdálenostech. Tečky jsou experimentálně zjištěné hodnoty a ukazují, že rychlosí rotace je při větších vzdálenostech přibližně konstantní.

Co tedy je tato **temná hmota**, která prostupuje a obklopuje typickou galaxii jako gigantický závoj, jehož průměr je snad 30krát větší než průměr viditelné galaxie? Kandidáti

na temnou hmotu spadají do dvou kategorií s prapodivnými názvy: WIMP (z anglického „weakly interacting massive particles“ — slabě interagující hmotné částice) a MACHO (z anglického „massive compact halo objects“ — hmotné kompaktní závojové objekty). Mají-li neutrina nenulovou hmotnost, jsou to možné WIMP. MACHO mohou být objekty jako černé díry, bílé trpaslíci a hnědý trpaslíci; hnědý trpaslíci jsou objekty velikosti Jupiteru, které nejsou dost hmotné, aby se staly skutečnými hvězdami, které svítí díky jaderné fúzi.

V roce 2000 se zdá, že existují přesvědčivé důkazy o existenci MACHO v naší vlastní galaxii. Předpokládejme, že (neviditelný) MACHO v naší galaxii prochází náhodou před hvězdou v blízké galaxii. Einstein v obecné teorii relativity předpověděl, že se světelné paprsky procházející blízko hmotného objektu budou ohýbat (čl. 14.9). Budou-li tedy hvězda, MACHO a Země ležet na jedné přímce, bude MACHO působit jako *gravitační čočka*. Bude tedy fokusovat světelné paprsky vycházející z hvězdy, které procházejí v jeho blízkosti, a tím způsobí, že obraz hvězdy zjasní, když ji MACHO zastiňuje.

Takových jevů bylo pozorováno dostatečné množství, aby přesvědčilo některé astronomy, že MACHO mohou tvořit podstatnou část (řekněme kolem 50 %) temné hmoty v naší galaxii. Pozorování stále pokračují.

## 45.14 VELKÝ TŘESK

V roce 1985 pronesl jeden z účastníků fyzikální konference:

To, že vesmír začal Velkým třeskem zhruba před 15 miliardami let, je stejně jisté, jako že Země obíhá okolo Slunce.

Takové silné tvrzení dosvědčuje, jak velkou důvěru v teorii Velkého třesku, kterou poprvé rozvinul belgický fyzik Georges Lemaître, chovají lidé zabývající se touto problematikou.

Velký třesk si nelze představovat jako explozi nějaké gigantické petardy, kdy můžeme alespoň v principu odstoupit stranou a pozorovat. Tady není žádné „stranou“, protože Velký třesk představuje počátek existence samotného prostoročasu. Z pohledu našeho dnešního vesmíru není možné ukázat na nějaké místo prostoru a říci „Tady se odehrál Velký třesk.“ Ten se odehrával všude.

Navíc nebylo žádné „před Velkým třeskem“, protože čas *začal* tímto stvořením. V tomto kontextu ztrácí slovo „před“ svůj význam. Můžeme však uvažovat o tom, co se dělo v okamžicích po Velkém třesku.

$t \approx 10^{-43}$  s. To je nejranější čas, kdy můžeme říci něco smysluplného o vývoji vesmíru. V tomto čase také získaly pojmy prostor a čas svůj dnešní význam a začaly

platit fyzikální zákony, jak je známe. Celý vesmír byl tehdy mnohem menší než proton, zhruba odhadnuto, a jeho teplota byla asi  $10^{32}$  K.

$t \approx 10^{-34}$  s. V tomto okamžiku nastal neobyčejně rychle probíhající inflační proces, při kterém se rozměry vesmíru zvětšily zhruba  $10^{30}$ krát. Vesmír se stal horlkou polévkou tvořenou kvarky a leptony s teplotou asi  $10^{27}$  K.

$t \approx 10^{-4}$  s. Kvarky se nyní mohou kombinovat a vytvářet protony a neutrony a jejich antičástice. Vesmír se ochladil stálým rozpínáním (ale podstatně pomalejším než při inflaci) do takové míry, že energie fotonů už nedostačuje k rozbití těchto nových častic. Dochází ke srážkám častic hmoty a antihmoty a jejich anihilaci. Existuje však nepatrne více častic hmoty a tento přebytek, který nenachází příslušné partnery pro anihilaci, přežívá a vytváří hmotný svět, jak jej známe dnes.

$t \approx 1$  min. Vesmír se již ochladil natolik, že srážející se protony a neutrony mohou zůstat vázány do jader prvků s malým atomovým číslem  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$  a  $^7\text{Li}$ . Předpovězené relativní četnosti těchto nuklidů jsou v souhlase s tím, co dnes ve vesmíru pozorujeme. Je přítomno velké množství záření, ale světlo neurazí nikdy příliš velkou vzdálenost díky interakci s jádry. Vesmír je pro své vlastní záření neprůhledný.

$t \approx 300\,000$  let. Teplota nyní poklesla na asi  $10^4$  K, elektrony se mohou vázat po srážce s holými jádry a vytvářet tak atomy. Poněvadž světlo neinterahuje významně s (nenabitými) česticemi, jako jsou neutrální atomy, má světlo nyní možnost urazit volně velké vzdálenosti. Toto záření vytváří kosmické reliktní záření, diskutované v čl. 45.12. Vlivem gravitace se shlukují atomy vodíku a helia a začínají tak vytvářet galaxie a hvězdy.

První měření ukazovala, že kosmické reliktní záření je rovnoměrně rozděleno ve všech směrech (je izotropní), což vede k závěru, že 300 000 let po Velkém třesku byla hmota ve vesmíru rovnoměrně rozložena. Tato skutečnost byla velmi udivující, protože hmota v dnešním vesmíru není rozložena rovnoměrně, ale je soustředěna v galaxiích, kupách galaxií a nadkupách galaktických kup. Jsou tu také rozsáhlé oblasti prázdniny (*voids*) s nepatrnným množstvím hmoty a také oblasti tak zaplněné hmotou, že se jim říká zdi (*walls*). Jestliže je teorie Velkého třesku ve svém popisu počátků vesmíru alespoň přibližně správná, musely zde být zárodky tohoto nerovnoměrného rozložení hmoty ještě před tím, než vesmír dosáhl stáří 300 000 let a měly by se dnes projevovat nerovnoměrným rozložením kosmického mikrovlnného reliktního záření.

V roce 1992 také skutečně ukázala měření, prováděná družicí NASA zvanou Cosmic Background Explorer (COBE), že kosmické reliktní záření není dokonale izotropní. Obrázek na začátku této kapitoly byl vytvořen zpracováním těchto měření a ukazuje, jak vypadal vesmír v době, kdy mu bylo pouhých 300 000 let. Jak je na obrázku vidět, shlukování hmoty ve velkém měřítku již opravdu začalo; proto je teorie Velkého třesku, alespoň v principu, na správné stopě.

## 45.15 SHRNUТИ

Uvažme v těchto závěrečných odstavcích, kam nás přivádí rychle se zvětšující množství poznatků o vesmíru. Je mimo pochybnost, že přináší uspokojení mnoha zvídavým fyzikům a astronomům. Někteří lidé se však cítí pokrojení tím, že každý přírůstek v poznání ukazuje jasněji naši relativní bezvýznamnost v celkové struktuře vesmíru. Tak postupně muselo lidstvo dojít k poznání, že:

Naše Země není střed sluneční soustavy.

Naše Slunce je jenom jedna z mnoha hvězd.

Naše galaxie je jen jedna z mnoha a naše Slunce je bezvýznamná hvězda při jejím vnějším okraji.

Naše Země existuje pouze po zhruba třetinu stáří vesmíru a zcela jistě zmizí, když naše Slunce spálí své zásoby paliva a stane se rudým obrem.

Náš druh obývá Zemi po dobu kratší než milion let, což je v kosmologických měřítcích nepatrný okamžik.

A poslední drtivá rána: Neutrony a protony, ze kterých jsme stvořeni, nejsou převládající formou hmoty ve vesmíru.

Chceme-li to však vidět z lepší stránky, jsme to my sami, kdo objevil všechny tyto skutečnosti. Ačkoli naše postavení ve vesmíru je nevýznamné, zdá se, že zákony fyziky, které jsme objevili (poodhalili), platí v celém vesmíru — alespoň pokud víme — pro všechn minulý i budoucí čas. Přinejmenším nemáme žádné náznaky toho, že by v jiných částech vesmíru platily jiné zákony. Můžeme tedy až do doby, kdy by si někdo stěžoval, dávat na fyzikální zákony ochrannou známku „Objeveno na Zemi“. Ještě však zůstává mnoho neobjeveného, a tak můžeme náš text uzavřít těmito nadějnými slovy: *Vesmír je plný magických věcí, které trpělivě čekají na odhalení, až náš důvtip dostatečně vzroste.*

---

## PŘEHLED & SHRNUTI

### **Leptony a kvarky**

Podle současného stavu výzkumu je všechna hmota vytvořena ze šesti druhů *leptonů* (tab. 45.2) a šesti druhů *kvarků* (tab. 45.5). Všechny tyto částice mají spinové kvantové číslo  $\frac{1}{2}$  a jsou tedy *fermiony* (částice s poločíselným spinovým kvantovým číslem). Ke každému leptonu i kvarku existuje *antičástice*.

### **Interakce**

Částice s elektrickým nábojem na sebe působí elektromagnetickou silou, kterou zprostředkovávají vzájemně vyměňované *virtuální fotony*. Leptony působí na sebe a také na kvarky *slabou jadernou silou*, kterou zprostředkovávají hmotné zprostředkující částice W a Z. Navíc kvarky mezi sebou působí *barevnou silou*. Elektromagnetická a slabá síla jsou různé projevy jediné síly, nazývané *elektroslabá síla*.

### **Leptony**

Tři z leptonů (*elektron, mion a tauon*) mají elektrický náboj roven  $-1e$ ; mají také nenulovou hmotnost. Další tři leptony jsou *neutrina* s nulovým nábojem, každé z nich odpovídá jednomu nabitému leptonu. Neutrina mají velmi malou hmotnost, možná nulovou. Antičástice nabitéch leptonů mají kladný náboj.

### **Kvarky**

Šest kvarků (u — nahoru, d — dolů, s — podivný, c — půvabný, b — dolní, t — horní; pořadí je zvoleno podle zvětšující se hmotnosti) mají každý baryonové číslo  $+\frac{1}{3}$  a náboj rovný buď  $+\frac{2}{3}e$ , nebo  $-\frac{1}{3}e$ . Podivný kvark má podivnost  $-1$ , zatímco všechny ostatní mají podivnost rovnu nule. Pro antičástice jsou znaménka opačná.

### **Hadrony: baryony a mezony**

Kvarky se kombinují do častic, které na sebe působí silnou jadernou silou; nazývají se *hadrony*. *Baryony* jsou hadrony s poločíselným spinovým kvantovým číslem ( $\frac{1}{2}$ , nebo  $\frac{3}{2}$ ). *Mezony* jsou hadrony s celočíselným spinovým kvantovým číslem (0, nebo 1). Baryony jsou fermiony, mezony jsou bosony. Mezony mají baryonové číslo rovno nule; baryony mají baryonové číslo rovno  $+1$ , nebo  $-1$ . Podle *kvantové chromodynamiky* jsou povolené kombinace kvarků buď kvark a antikvark, tři kvarky nebo tři antikvarky (tentotéž závěr je v souladu s experimentem). Všechny hadrony s výjimkou protonu jsou nestabilní.

### **Rozpínání vesmíru**

Současné poznatky silně podporují představu, že se vesmír rozpíná. Vzdálené galaxie se od nás vzdalují rychlostí  $v$ , kterou určuje

Hubblův zákon:

$$v = Hr \quad (\text{Hubblův zákon}). \quad (45.15)$$

Za hodnotu Hubblový konstanty  $H$  zde bereme

$$H = 80 \text{ km}/(\text{s}\cdot\text{Mpc}) = 24,5 \text{ mm}/(\text{s}\cdot\text{ly}). \quad (45.16)$$

### Historie vesmíru

Rozpínání popsané Hubblovým zákonem a existence všudypřítomného kosmického reliktního záření nasvědčují tomu, že vesmír začal „velkým třeskem“ zhruba před 15 miliardami let.

## OTÁZKY

- 1.** Nejen částice jako elektron a proton, ale také celé atomy můžeme považovat za fermiony nebo bosony podle toho, je-li jejich celkové spinové kvantové číslo poločíselné nebo celočíselné. Uvažujme izotopy helia  $^3\text{He}$  a  $^4\text{He}$ . Které z následujících tvrzení je správné? (a) Oba jsou fermiony. (b) Oba jsou bosony. (c)  $^4\text{He}$  je fermion a  $^3\text{He}$  je boson. (d)  $^3\text{He}$  je fermion a  $^4\text{He}$  je boson. (Dva elektrony helia vytvářejí uzavřenou slupku a nehrájí tedy v těchto úvahách žádnou roli.)
- 2.** Míří magnetické pole na obr. 45.3b k nám, nebo od nás?
- 3.** Který z osmi pionů na obr. 45.3b má nejmenší kinetickou energii?
- 4.** Elektron se nemůže rozpadat na dvě neutrina. Který z následujících zákonů zachování by byl takovým rozpadem narušen? Zákon zachování (a) energie, (b) momentu hybnosti, (c) náboje, (d) leptonového čísla, (e) hybnosti, (f) baryonového čísla?
- 5.** Proton se nemůže rozpadnout na neutron a neutrino. Který z následujících zákonů zachování by byl takovým rozpadem narušen? Zákon zachování (a) energie, (b) momentu hybnosti, (c) náboje, (d) leptonového čísla, (e) hybnosti, (f) baryonového čísla?
- 6.** Proton má dostatek energie k rozpadu s vytvořením spršky elektronů, neutrin a jejich antičástic. Který z následujících zákonů zachování by byl takovým rozpadem narušen? Zákon zachování (a) energie, (b) momentu hybnosti, (c) náboje, (d) leptonového čísla, (e) hybnosti, (f) baryonového čísla?
- 7.** Viděli jsme, že mezon  $\pi^-$  má kvarkovou strukturu dū. Kdybychom předpokládali, že mezon  $\pi^-$  vytvoříme složením d-kvarku a u-kvarku, který ze zákonů zachování by byl narušen? Zákon zachování (a) energie, (b) momentu hybnosti, (c) náboje, (d) leptonového čísla, (e) hybnosti, (f) baryonového čísla?
- 8.** Částice  $\Sigma^+$  má tato kvantová čísla: podivnost  $S = -1$ , náboj  $Q = +1$  a spin  $s = \frac{1}{2}$ . Jakou kombinací kvarků je tvořena: (a) dds, (b) s $\bar{s}$ , (c) uus, (d) ssu, nebo (e) uu $\bar{s}$ ?
- 9.** V levém sloupci jsou pojmy z atomové fyziky, v pravém pojmy z fyziky elementárních částic. Přiřaďte k sobě analogické pojmy:

1. chemie	a. obrazce Osminásobné cesty
2. elektrony	b. chybějící hadrony
3. periodická tabulka	c. kvantová chromodynamika
4. chybějící prvky	d. fyzika elementárních částic
5. kvantová mechanika	e. kvarky

- 10.** Uvažujme neutrino označené  $\bar{\nu}_\tau$ . (a) Je to kvark, lepton, mezon, nebo baryon? (b) Je to částice, nebo antičástice? (c) Je to boson, nebo fermion? (d) Je stabilní vzhledem ke spontánnímu rozpadu?
- 11.** Přiřaďte k sobě analogické pojmy z následujících dvou sloupců:

1. tauon	a. kvark
2. pion	b. lepton
3. proton	c. mezon
4. pozitron	d. baryon
5. půvab	e. antičástice

- 12.** Seřaďte následující částice podle hmotnosti od nejmenší do největší: (a) proton, (b) neutrino, (c) mezon  $\pi^+$ , (d) s-kvark, (e) tauon, (f) elektron a (g) částice  $\Sigma^-$ . (Tip: Nahlédněte do tabulek v této kapitole.)
- 13.** Jaká jsou leptonová čísla následujících částic: (a)  $\pi^-$ , (b)  $e^-$ , (c)  $\mu^+$ , (d)  $\tau^-$ , (e)  $\bar{\nu}_\mu$ ?

## CVIČENÍ & ÚLOHY

### ODST. 45.3 Mezihra

- 1C.** Vypočtěte rozdíl v hmotnostech (v kilogramech) mionu a pionu z př. 45.2.
- 2C.** Neutrální pion se rozpadá na dva fotony záření gama:  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ . Spočtěte vlnovou délku fotonů vzniklých při rozpadu neutrálního pionu, který je v klidu.

- 3C.** Vzdálenost mezi elektronem a pozitronem je  $r$ . Najděte podíl gravitační a elektrické síly jejich vzájemného působení. Co můžete z výsledku soudit o silách působících mezi částicemi detegovanými v bublinkové komoře?

- 4C.** Kladně nabité pion se rozpadá podle rov. (45.4):  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ . Jak bude vypadat vztah pro rozpad záporně nabitého pionu? (Tip:  $\pi^-$  je antičástice k  $\pi^+$ .)

**5C.** Jaké množství energie by se uvolnilo při anihilaci Země a anti-Země?

**6Ú.** Klidová energie neutrálního pionu je 135 MeV a střední doba života  $8,3 \cdot 10^{-17}$  s. Je-li pion produkován s počáteční kinetickou energií 80 MeV a rozpadne-li se po době rovné střední době života, jaká je největší možná délka stopy, kterou zanechá v bublinkové komoře? Použijte vztahu pro relativistickou dilataci času. (Tip: Př. 45.1.)

**7Ú.** Pozorování neutrín emitovaných supernovou SN1987a (obr. 44.12) ve Velkém Magellanově mračnu vedou k hodnotě 20 eV pro horní hranici klidové energie neutrina. Předpokládejme tedy, že klidová energie neutrina není nulová, ale právě 20 eV. O kolik bude rychlosť takového neutrina emitovaného při  $\beta$ -rozpadu s energií 1,5 MeV menší, než je rychlosť světla?

**8Ú.** V některých teoriích se předpokládá, že proton je nestabilní s poločasem rozpadu kolem  $10^{32}$  let. Za předpokladu správnosti této představy spočtěte počet protonových rozpadů, které se odehrají během jednoho roku v olympijském bazénu se  $430 \text{ m}^3$  vody.

**9Ú.** Kladný tauon ( $\tau^+$ , jeho klidová energie je 1 777 MeV) se pohybuje s kinetickou energií 2 200 MeV na kruhové dráze kolmě k homogennímu magnetickému poli indukce 1,20 T. (a) Spočtěte hybnost tauonu v  $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Musíme uvažovat relativistický popis. (b) Najděte poloměr kruhové dráhy.

**10Ú.** Klidové energie mnoha částic s příliš krátkou dobou života nemůžeme měřit přímo, ale musíme je spočítat z měřených hybností a známých klidových energií produktů rozpadu. Uvažujme mezon  $\varrho^0$ , který se rozpadá reakcí  $\varrho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ . Spočtěte klidovou energii mezonu  $\varrho^0$ , jestliže změřená hodnota hybnosti vytvořených pionů pohybujících se v opačných směrech je 358,3 MeV/c. Klidové energie pionů odcítete z tab. 45.4.

**11Ú.** (a) Částice  $m_0$  v klidu se rozpadá na dvě částice  $m_1$  a  $m_2$ , které se pak pohybují s opačnými, ale stejně velkými hybnostmi. Ukažte, že kinetická energie  $E_{\text{k},1}$  částice  $m_1$  je dána vztahem

$$E_{\text{k},1} = \frac{1}{2E_0} [(E_0 - E_1)^2 - E_2^2],$$

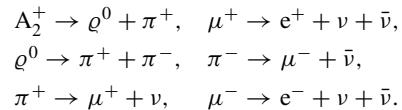
kde  $m_0$ ,  $m_1$  a  $m_2$  jsou hmotnosti a  $E_0$ ,  $E_1$  a  $E_2$  odpovídající klidové energie. (Tip: Použijte postup z př. 45.2 s tím, že v našem případě nemá ani jedna z vytvořených částic nulovou hmotnost.) (b) Ukažte, že výsledek získaný v (a) dává kinetickou energii mionu z př. 45.2.

### ODST. 45.5 Hadrony

**12C.** Ověřte, že hypotetické schéma rozpadu protonu podle rov. (45.11) nenarušuje zákon zachování (a) náboje, (b) energie, (c) hybnosti a (d) momentu hybnosti.

**13C.** Který zákon zachování je narušen v dálé uvedených rozpadových schématech? Předpokládejte, že rozpadající se částice je v klidu a produkty rozpadu mají nulový moment hybnosti. (a)  $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu$ , (b)  $\mu^- \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ , (c)  $\mu^+ \rightarrow \pi^+ + \nu_\mu$ .

**14Ú.** Částice  $A_2^+$  a její produkty se rozpadají podle následujících schémat:



(a) Jaké jsou konečné stabilní produkty rozpadu? (b) Je částice  $A_2^+$  fermion, nebo boson? Je mezon, nebo baryon? Jaké je její baryonové číslo? (Tip: Př. 45.5.)

### ODST. 45.7 Osminásobná cesta

**15C.** Reakce  $\pi^+ + p \rightarrow p + p + \bar{n}$  probíhá díky silné interakci. Užitím zákonů zachování odvoďte hodnoty náboje, baryonového čísla a podivnosti antineutronu.

**16C.** Sledováním podivnosti určete, které z následujících rozpadů probíhají díky silné interakci: (a)  $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ , (b)  $\Lambda^0 + p \rightarrow \Sigma^+ + n$ , (c)  $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ ; (d)  $K^- + p \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$ .

**17C.** Který ze zákonů zachování je narušen v následujících reakcích a rozpadech? (Předpokládejte, že produkty mají nulový moment hybnosti.) (a)  $\Lambda^0 \rightarrow p + K^-$ , (b)  $\Omega^- \rightarrow \Sigma^- + \pi^0$  (částice  $\Omega^-$  má  $S = -3$  a  $Q = -1$ ), (c)  $K^- + p \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+$ .

**18C.** Spočtěte energii reakce pro (a)  $\pi^+ + p \rightarrow \Sigma^+ + K^+$  a (b)  $K^- + p \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$ .

**19C.** Částice  $\Sigma^-$  se pohybuje s kinetickou energií 220 MeV a rozpadá se přitom podle vztahu  $\Sigma^- \rightarrow \pi^- + n$ . Vypočtěte celkovou kinetickou energii produktů rozpadu.

**20Ú.** Užijte zákon zachování pro identifikaci částice  $x$  v následujících reakcích, které probíhají díky silné interakci: (a)  $p + p \rightarrow p + \Lambda^0 + x$ , (b)  $p + \bar{p} \rightarrow n + x$ , (c)  $\pi^- + p \rightarrow \Xi^0 + K^0 + x$ .

**21Ú.** Ukažte, že kdybychom místo závislosti  $S$  na  $Q$  pro baryony se spinem  $\frac{1}{2}$  na obr. 45.4a a pro mezony se spinem 0 na obr. 45.4b vykreslili závislost veličiny  $Y = B + S$  na veličině  $T_z = Q - \frac{1}{2}B$ , dostali bychom hexagonální diagramy tehdy, byly-li by souřadné osy na sebe kolmé. (Veličina  $Y$  se nazývá hypernáboj a  $T_z$  je svázána s veličinou nazývanou izospin.)

**22Ú.** Uvažujme rozpad  $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$  za předpokladu, že částice  $\Lambda^0$  je v klidu. (a) Spočtěte energii reakce. (b) Spočtěte kinetickou energii protonu. (c) Jaká je kinetická energie pionu? (Tip: Úloha 11.)

### ODST. 45.8 Kvarkový model

**23C.** Kvarkové složení protonu a neutronu je uud a udd. Jaké je kvarkové složení (a) antiprotonu a (b) antineutronu?

**24C.** Z tab. 45.3 a 45.5 určete baryony s následujícím kvarkovým složením. Ověřte svůj výsledek porovnáním s baryonovým oktetem na obr. 45.4a: (a) ddu; (b) uus; (c) ssd.

**25C.** Jaké kombinace kvarků jsou potřeba k vytvoření částic (a)  $\Lambda^0$ , (b)  $\Xi^0$ ?

**26C.** Uvažujte pouze kvarky u, d a s. Vytvořte, je-li to možné, baryon s hodnotami (a)  $Q = +1$  a  $S = -2$  a (b)  $Q = +2$  a  $S = 0$ .

**27C.** Máme deset baryonů se spinem  $\frac{3}{2}$ . Jejich symboly a kvantová čísla jsou následující:

$Q$	$S$	$Q$	$S$		
$\Delta^-$	-1	0	$\Sigma^{*0}$	0	-1
$\Delta^0$	0	0	$\Sigma^{*+}$	+1	-1
$\Delta^+$	+1	0	$\Xi^{*-}$	-1	-2
$\Delta^{++}$	+2	0	$\Xi^{*0}$	0	-2
$\Sigma^{*-}$	-1	-1	$\Omega^-$	-1	-3

Vytvořte graf závislosti náboje na podivnosti pro tyto baryony, s použitím nakloněných souřadních os podle obr. 45.4. Porovnejte svůj diagram s tímto obrázkem.

**28Ú.** Neexistuje žádný mezon s  $Q = +1$  a  $S = -1$  nebo s  $Q = -1$  a  $S = +1$ . Pomocí kvarkového modelu vysvětlete proč.

**29Ú.** Baryon  $\Xi^{*0}$  se spinem  $\frac{3}{2}$  (cvič. 27) má klidovou energii 1 385 MeV (s nutnou vlastní neurčitostí, kterou zde neuvažujeme); baryon  $\Sigma^0$  se spinem  $\frac{1}{2}$  má klidovou energii 1 192,5 MeV. Má-li každá z těchto častic kineticou energii 1 000 MeV, pohybuje se některá z nich rychleji, a jestli ano, tak o kolik?

### ODST. 45.11 Vesmír se rozpíná

**30C.** Kdyby bylo možno Hubbleův zákon extrapolovat do velmi velkých vzdáleností, pro jakou vzdálenost by zdánlivá rychlosť vzdalování dosáhla rychlosti světla?

**31C.** Jaká je pozorovaná vlnová délka čáry 656,3 nm  $H_\alpha$  vodíku, byla-li emitována v galaxii ve vzdálenosti  $2,40 \cdot 10^8$  ly?

**32C.** V laboratoři má jedna ze sodíkových čar vlnovou délku 590,0 nm. Ve světle přicházejícím z jisté galaxie ji však naměříme na 602,0 nm. Spočtěte vzdálenost galaxie za předpokladu platnosti Hubblova zákona.

**33Ú.** Zdánlivé rychlosti vzdalování velmi dalekých galaxií a kvazarů jsou blízké rychlosti světla, takže musíme počítat s relativistickým vztahem pro Dopplerův posuv (rov. (38.25)). Rudý posuv se udává jako relativní rudý posuv  $z = \Delta\lambda/\lambda_0$ . (a) Ukažte, že rychlostní parametr  $\beta = v/c$  je vyjádřen pomocí  $z$  jako

$$\beta = \frac{z^2 + 2z}{z^2 + 2z + 2}.$$

(b) Kvazar objevený v roce 1987 má  $z = 4,43$ . Spočtěte jeho rychlostní parametr. (c) Spočtěte vzdálenost kvazaru za předpokladu, že Hubbleův zákon platí i v takových vzdálenostech.

**34Ú.** Bude se vesmír stále rozpínat i v budoucnosti? Při odpovědi na tuto otázku učiňme (rozumný?) předpoklad, že rychlosť vzdalování v galaxie ve vzdálenosti  $r$  je určena pouze hmotou, která je uvnitř koule poloměru  $r$  se středem u nás. Jestliže celková hmotnost uvnitř této koule je  $M$ , bude úniková rychlosť  $v_e$

rovna  $v_e = \sqrt{2GM/r}$  (rov. (14.26)). (a) Aby se zabránilo neomezenému rozpínání, musí být střední hustota  $\rho$  uvnitř koule nejméně

$$\rho = \frac{3H^2}{8\pi G}.$$

Dokažte to. (b) Spočtěte hodnotu této „kritické hustoty“ numericky a výsledek vyjádřete v počtu vodíkových atomů na jeden krychlový metr. Měření skutečné hustoty jsou obtížná a jsou komplikována existencí temné hmoty.

### ODST. 45.12 Kosmické reliktní záření

**35Ú.** Díky všudypřítomnému kosmickému mikrovlnnému záření není nejmenší možná teplota plynu v mezihvězdném nebo mezigalaktickém prostoru nula, ale 2,7 K. To znamená, že významná část molekul v prostoru, která se může nacházet v nabuzených stavech s nízkou excitační energií, se v těchto stavech nalézá. Následný přechod do nižšího stavu vede k emisi záření, které pak můžeme pozorovat. Uvažte (hypotetickou) molekulu s právě jedním excitovaným stavem. (a) Jaká musí být excitační energie, aby se v nabuzeném stavu nacházelo 25 % molekul? (Tip: Rov. (41.21).) (b) Jaká by byla vlnová délka fotonu emitovaného při přechodu takové molekuly do základního stavu?

### ODST. 45.13 Temná hmota

**36C.** Jaká by musela být hmotnost Slunce, aby měl Pluto (po většinu času nejvzdálenější planeta) stejnou oběžnou rychlosť, jako má nyní Merkur (nejbližší planeta)? Využijte údajů z dodatku C a vyjádřete výsledek pomocí současné hmotnosti Slunce  $M$ . (Předpokládejte kruhové dráhy.)

**37Ú.** Předpokládejme, že by se hmotnost Slunce nezměnila, ale jeho poloměr by se zvětšil na  $5,90 \cdot 10^{12}$  m (střední poloměr dráhy planety Pluto, nejvzdálenější planety), dále že hustota takového roztaženého Slunce by byla homogenní a planety by obíhaly uvnitř takového řídkého objektu. (a) Vypočtěte oběžnou rychlosť Země v tomto novém uspořádání a srovnajte s nynější oběžnou rychlosťí 29,8 km/s. Předpokládejte přitom, že poloměr oběžné dráhy Země by zůstal stejný. (b) Jaká by byla nová doba oběhu Země?

**38Ú.** Předpokládejte, že hmota nějaké galaxie (hvězdy, plyn, prach) o celkové hmotnosti  $M$  je rovnoměrně rozdělena uvnitř koule o poloměru  $R$ . Hvězda o hmotnosti  $m$  obíhá okolo středu galaxie po kruhové dráze o poloměru  $r < R$ . (a) Ukažte, že oběžná rychlosť  $v$  hvězdy je dána vztahem

$$v = r \sqrt{\frac{GM}{R^3}},$$

a proto je perioda oběhu

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{GM}}$$

nezávislá na  $r$ . Zanedbejte všechny odporové síly. (b) Jaký je vztah pro periodu, předpokládáme-li, že hmotnost galaxie je výrazně koncentrovaná ke středu galaxie, takže v podstatě všechna hmotnost se nachází ve vzdálenostech menších než  $r$ ?

**ODST. 45.14 Velký třesk**

**39C.** Teplota  $T$  záření v dutině a vlnová délka  $\lambda_{\max}$ , pro kterou je toto záření nejsilnější, jsou svázány *Wienovým posunovacím zákonem*

$$\lambda_{\max} T = 2898 \mu\text{m}\cdot\text{K}.$$

(a) Kosmické mikrovlnné záření má maximum na vlnové délce 1,1 mm. Jaké teplotě to odpovídá? (b) Zhruba 300 000 let po Velkém třesku začal být vesmír propustný pro elektromagnetické záření. Jeho teplota tehdy byla asi  $10^5$  K. Jakou vlnovou délku mělo maximum kosmického mikrovlnného záření?

**40C.** Vlnová délka fotonů, na které má záření černého tělesa maximum, je

$$\lambda_{\max} = (2898 \mu\text{m}\cdot\text{K})/T$$

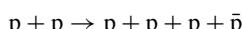
(cvič. 39). (a) Ukažte, že energii  $E$  takového fotonu můžeme vyjádřit vztahem

$$E = (4,28 \cdot 10^{-10} \text{ MeV/K})T.$$

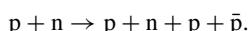
(b) Jaká je minimální teplota, při které může tento foton vytvořit elektron-pozitronový pár kreační reakcí diskutovanou v čl. 22.6?

**PROBLÉMY**

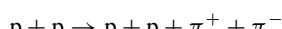
**41.** Na obr. 45.8 je část experimentálního zařízení, na němž byly v padesátých letech objeveny antiprotony. Svazek protonů s energií 6,2 GeV vstupoval z urychlovače a srážel se s jádrem měděného terče. Podle tehdejších teoretických předpovědí měly srážky protonů s protony a neutrony jader produkovat antiprotony v reakcích



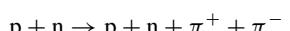
a



I kdyby se tyto reakce uskutečnily, byly by velmi řídké ve srovnání s reakcemi



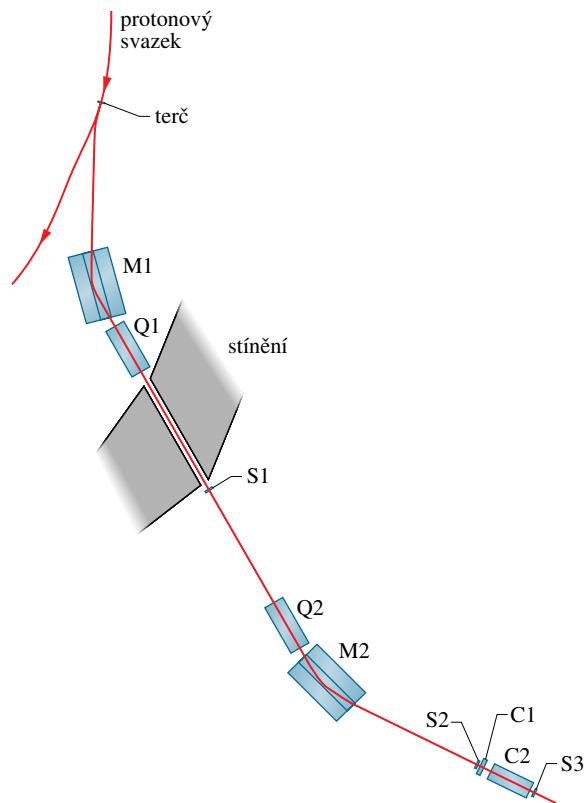
a



Mezi částicemi produkovanými při srážce protonů s energií 6,2 GeV s měděným terčem tedy převažují piony.

Aby bylo možno dokázat, že antiproton existuje a že také vzniká při srážkách, procházely částice opouštějící terčík řadou oblastí s magnetickým polem a množstvím detektorů, jak ukazuje obr. 45.8. První magnetické pole M1 zakřivilo dráhu každé nabité částice a navíc bylo orientováno tak, aby do druhého magnetického pole Q1 vstupovaly jen záporně nabité částice (tedy buď  $\bar{p}$ , nebo  $\pi^-$ ) s hybností  $1,19 \text{ GeV}/c$ . Kvadrupolové pole Q1 fokusovalo částice do svazku, který mohl projít otvorem v tlustém stínění ke scintilačnímu detektoru S1. Průchod nabité částice takovým detektorem spustí signál (podobně jako

na běžné televizní obrazovce vznikne světelný pulz při dopadu elektronu.) Každý signál tak znamenal průchod buď  $1,19 \text{ GeV}/c$  pionu  $\pi^-$ , nebo (hledaného)  $1,19 \text{ GeV}/c$  antiprotonu  $\bar{p}$ .



Obr. 45.8 Úloha 41

Po další fokusaci magnetickým polem Q2 byly částice naměřovány magnetickým polem M2 ke druhému scintilačnímu detektoru S2 a potom prošly dvěma Čerenkovovými detektory C1 a C2. Tyto detektory můžeme vyrobit tak, že budou vysílat signál pouze tehdy, má-li procházející částice rychlosť v určitém intervalu. V daném experimentu částice s rychlosťí větší než  $0,79c$  spustí čítač detektoru C1 a částice s rychlosťí mezi  $0,75c$  a  $0,78c$  spustí čítač detektoru C2.

Byly dva způsoby, jak odlišit předpovídané vzácné antiprotony od častých nadbytečných záporných pionů. Oba způsoby využívaly toho, že rychlosť antiprotonů s hybností  $1,19 \text{ GeV}/c$  se liší od rychlosti záporného pionu s stejnou hybností: (1) Podle výpočtu  $\bar{p}$  zaznamená jeden Čerenkovův detektor a  $\pi^-$  zaznamená druhý. (2) Časový interval  $\Delta t$  mezi signály z S1 a S2, které byly od sebe vzdáleny 12 m, bude mít jednu hodnotu pro  $\bar{p}$  a jinou hodnotu pro  $\pi^-$ . Je-li tedy spuštěn správný Čerenkovův detektor a má-li časový interval  $\Delta t$  správnou hodnotu, je tímto experimentem prokázána existence antiprotonu.

Jaká je rychlosť (a) antiprotonu s hybností  $1,19 \text{ GeV}/c$  a (b) záporného pionu s hybností  $1,19 \text{ GeV}/c$ ? Rychlosť antiprotonu v Čerenkovově detektoru bude ve skutečnosti o trochu menší než rychlosť vypočtená díky malým energiovým ztrátám při průchodu detektorem. Který Čerenkovův detektor bude spuš-

těn (c) antiprotonem a který (d) záporným pionem? Jaký časový interval  $\Delta t$  odpovídal průchodu (e) antiprotonu a (f) záporného pionu? [Problém byl připraven podle článku O. Chamberlain, E. Segrè, C. Wiegand a T. Ypsilantis, „Observation of Antiprotons“, *Physical Review*, Vol. 100, pp. 947–950 (1955).]

**42. Kosmologický rudý posuv.** Rozpínání vesmíru často znázorňujeme obrázkem podobným obr. 45.9a. Na tomto obrázku se nacházíme v místě symbolu MD (naše galaxie, Mléčná dráha), v počátku osy  $r$ , která míří od nás radiálně všemi směry. Jsou vyznačeny další velmi vzdálené galaxie. U jejich symbolů jsou přidány vektory rychlosti získané ze změřeného rudého posuvu světla, které k nám z těchto galaxií přichází. Podle Hubblova zákona je rychlosť galaxie úměrná vzdálenosti galaxie od nás. Takové obrázky ale mohou být zavádějící, protože naznačují, (1) že rudé posuvy jsou dány pohybem galaxií statickým (stacionárním) prostorem a (2) že my jsme ve středu celého tohoto pohybu.

Ve skutečnosti není rozpínání vesmíru a narůstání vzdáleností mezi galaxiemi způsobeno rozvíháním galaxií do předem daného prostoru, ale rozpínáním samotného prostoru všude ve vesmíru. *Prostor je dynamický, nikoli statický.*

Obr. 45.9b, c, d ukazují jiný způsob znázornění vesmíru a jeho rozpínání. Každá část obrázku ukazuje část jednorozměrného řezu vesmírem (podél osy  $r$ ); další dvě prostorové dimenze vesmíru nejsou zobrazeny. Každá ze tří částí obrázku ukazuje Mléčnou dráhu a šest dalších galaxií; části obrázku jsou uspořádány podél časové osy, čas vzrůstá směrem vzhůru. V části b, která odpovídá nejranějšímu času, jsou Mléčná dráha a ostatních šest galaxií vzájemně velmi blízko. Jak běží čas směrem vzhůru,

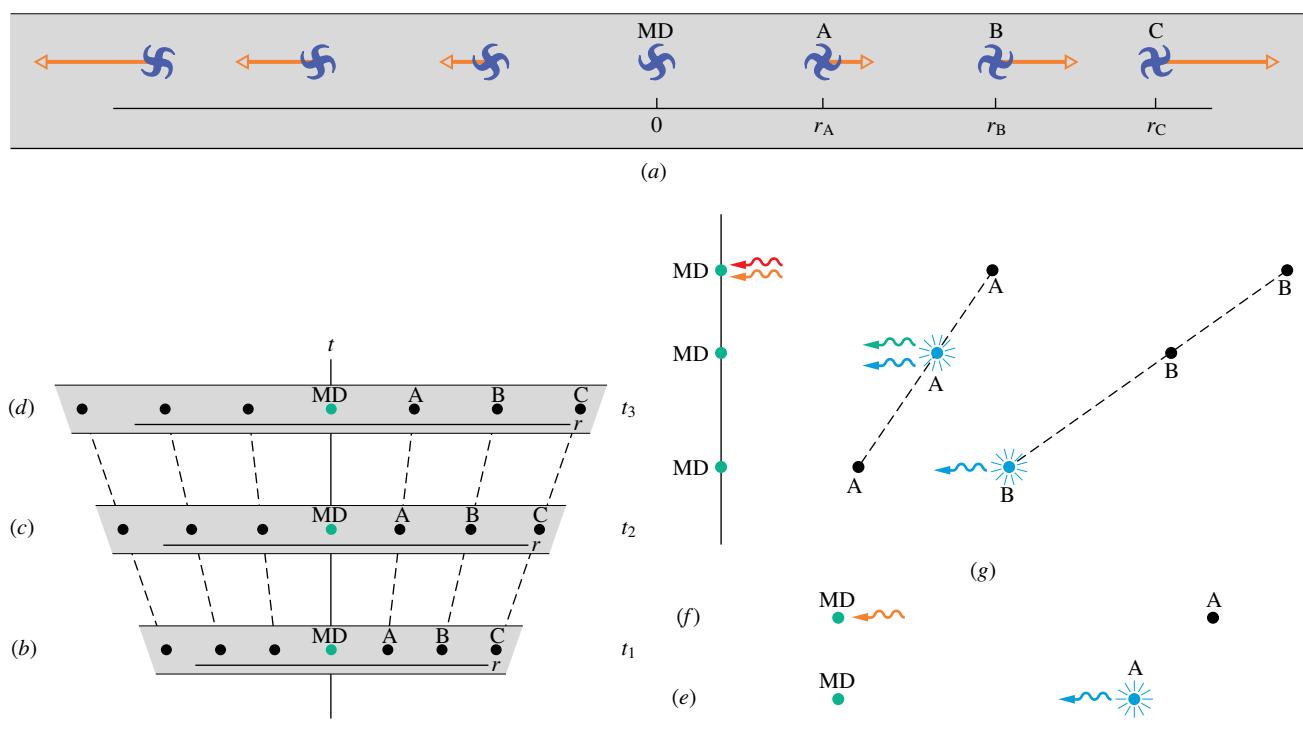
prostor se rozvíjí a galaxie se od sebe vzdalují. Vzhledem k nám se všechny ostatní galaxie vzdalují. Mléčná dráha však nemá žádné zvláštní postavení — galaxie se od sebe vzdalují, ať vybereme jakýkoli bod pozorování. Obr. 45.9e, f se soustředují jen na dvě galaxie, Mléčnou dráhu a jednu z dalších galaxií A ve dvou určitých časových okamžicích v průběhu rozpínání. V části e je galaxie A ve vzdálenosti  $r$  od nás v Mléčné dráze a emituje světelnou vlnu s vlnovou délkou  $\lambda$ . V části f, po uběhnutí časového intervalu  $\Delta t$ , pozorujeme tuto vlnu na Zemi. Označme rychlosť rozpínání na jednotku délky prostoru jako  $\alpha$  a předpokládejme, že se během doby  $\Delta t$  nezmění. Potom se během  $\Delta t$  každá jednotka délky prostoru (například každý metr) zvětší o  $\alpha \Delta t$ ; tedy každá vzdálenost  $r$  se zvětší o  $r\alpha \Delta t$ . Světelná vlna z obr. 45.9e, f urazí rychlosť světla  $c$  cestu od galaxie A k Zemi. (a) Ukažte, že

$$\Delta t = \frac{r}{c - r\alpha}.$$

Na Zemi změříme vlnovou délku  $\lambda'$  světla větší, než je vlnová délka emitovaného světla  $\lambda$ , protože během intervalu  $\Delta t$  došlo k rozpínání prostoru. Přírůstek vlnové délky nazýváme **kosmologický rudý posuv**; není to Dopplerův jev. (b) Ukažte, že přírůstek vlnové délky  $\Delta \lambda = \lambda' - \lambda$  je dán vztahem

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{r\alpha}{c - r\alpha}.$$

(c) Rozvíjte výraz na pravé straně pomocí binomického rozvoje (viz dodatek E a vysvětlení na str. 158). (d) Ponechte jen první člen rozvoje. Jaký je výsledný výraz pro  $\Delta \lambda / \lambda$ ?



Obr. 45.9 Úloha 42

Budeme-li vycházet z obr. 45.9a a předpokládat, že  $\Delta\lambda$  je dáno Dopplerovým jevem, dostáváme z rov. (18.57)

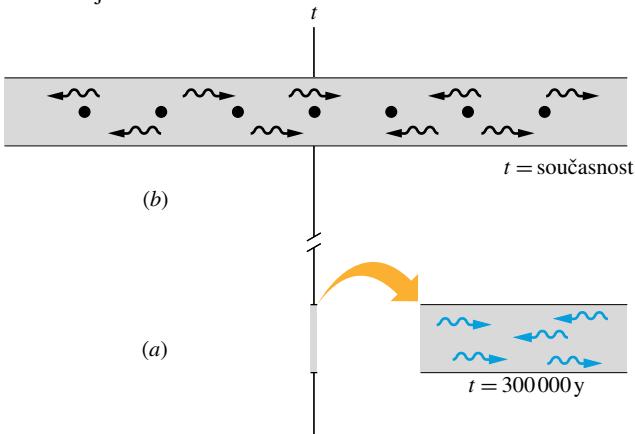
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c},$$

kde  $v$  je radiální rychlosť galaxie A vzhledem k Zemi. (e) Použitím Hubblova zákona porovnejte výsledek získaný jako Dopplerův jev s výsledkem (d) a najděte tak hodnotu  $\alpha$ . Z této analýzy je vidět, že oba výsledky, získané pomocí velmi rozdílných pohledů na rudý posuv světla emitovaného ve vzdálených galaxiích, jsou srovnatelné.

Předpokládejme, že světlo, které pozorujeme a které vzniklo v galaxii A, má rudý posuv  $\Delta\lambda/\lambda = 0,050$  a že rychlosť rozpínání vesmíru byla konstantní, s hodnotou uvedenou v této kapitole. (f) Použitím výsledku (b) nalezněte vzdálenost mezi galaxií A a Zemí v době, kdy bylo světlo emitováno. Vypočtěte, před jakou dobou bylo světlo galaxií A emitováno (g) pomocí výsledku (a), a (h) za předpokladu, že rudý posuv je způsoben Dopplerovým jevem. (*Tip:* Pro (h) je tato doba pouze vzdálenost v okamžiku emise dělena rychlosťí světla, neboť je-li rudý posuv čistě Dopplerův jev, nemění se vzdálenost při cestě světla k nám. V tomto bodě se výsledky dvou modelů rudého posudu liší.) (i) Jaká je vzdálenost mezi Zemí a galaxií A v době pozorování světla? (Předpokládáme, že galaxie A stále existuje; o jejím zániku se lidé nedozvědějí dřív, než poslední galaxii emitované světlo dosáhne Země.)

Nyní předpokládejme, že pozorované světlo přicházející z galaxie B (obr. 45.9g) má rudý posuv  $\Delta\lambda/\lambda = 0,080$ . (j) S využitím výsledku (b) nalezněte vzdálenost mezi galaxií B a Zemí v době, kdy bylo světlo emitováno. (k) S využitím výsledku (a) vypočtěte, před jakou dobou bylo světlo galaxií B emitováno. (l) Jaká byla vzdálenost mezi galaxiemi A a B v době, kdy bylo galaxií A emitováno světlo, které teď pozorujeme?

**43. Kosmické reliktní záření.** Na obr. 45.10a je řez vesmírem v době, kdy jeho stáří bylo 300 000 let a obr. 45.10b je řez vesmírem v současnosti. (Tento typ zobrazení je vysvětlen v diskusi úlohy 42.) V čase  $t = 300 000$  y se volné elektrony a protony vázaly a vytvářely atomy vodíku, které pak emitovaly světlo do všech směrů (na obr. 45.10a je nakresleno pouze světlo pohybující se ve směru délky řezu). Emitované světlo nyní pozorujeme na Zemi jako součást kosmického reliktního záření.



Obr. 45.10 Úloha 43

Předpokládejme, že stáří vesmíru je 14 miliard let a že rychlosť rozpínání se během té doby neměnila. (a) Jak se změnily vlnové délky světla emitovaného v čase  $t = 300 000$  y díky rozpínání vesmíru, měříme-li je v současné době? (b) Za předpokladu, že vodíkové atomy vzniklé v čase  $t = 300 000$  y byly stejné jako vodíkové atomy v současnosti, jaká dnes měřená vlnová délka odpovídá tehdy emitovanému světlu na hraně Lymanovy série? (c) Kosmické reliktní záření má maximum intenzity na vlnové délce 1,1 mm. Jaká byla odpovídající vlnová délka při emisi?