

# Původ hmoty ve vesmíru

Radomír Šmída

*Před téměř 80 lety zformuloval britský fyzik Paul Adrien Maurice Dirac (1902–1984) relativistickou kvantovou teorii pohybu elektronu, jejímž řešením byla kromě elektronu také nová částice se stejnou hmotností, ale s odlišným znaménkem elektrického náboje. Jednalo se o protějšek elektronu, o jeho antičástici. V roce 1932 objevil Carl David Anderson (1905–1991) při zkoumání kosmického záření pozitron, lehkou částici s kladným nábojem, která má hmotnost shodnou s elektronem. Objev pozitronu potvrdil teorii antičástic a dnes známe ke každé částici v přírodě odpovídající antičástici (antiproton, antineutron, antineutrino atd.). Jedinou výjimkou jsou některé neutrální částice, jako například foton, který je současně sám sobě antičásticí. Proč je však vesmír vyskládan pouze z hmoty jako je elektron a proton a ne z jejich antičástic, které jsou jim plně rovnocenné? Odpověď na tuto otázku musíme hledat v procesech Velkého třesku, kdy se hmota začala upřednostňovat před antihmotou.*

## Antihmota ve vesmíru

Všechna dosavadní pozorování ukazují, že v současném vesmíru převažuje hmota nad antihmotou.

Naše Země je složena pouze z hmoty, stejně jako Měsíc a ostatní tělesa naší planetární soustavy, které byly zkoumány kosmickými sondami. Záření přicházející ze Slunce dokazuje, že i Slunce je celé složeno z hmoty. Antihmota se sice vyskytuje v kosmickém záření přicházejícím z Galaxie, ale počet antiprotonů je o čtyři řády nižší než počet protonů (zastoupení atomových antijader, především antihelia, bude předmětem výzkumu sondou *Alpha Magnetic Spectrometer* (AMS), která bude pracovat na *International Space Station* (ISS) od roku 2005). Tyto antiprotony lze vysvětlit jako produkty srážek vysokoenergetických částic kosmického záření. Společná existence galaxií sestavených z hmoty a antihmoty v kupách galaxií by vedla ke vzniku pozorovatelného pozadí záření gama z míst, kde se tyto dvě formy hmoty setkávají (srážky galaxií, místa dotyku kup galaxií). Ze všech současných pozorování je jasné, že současná pozorovatelná část vesmíru se skládá pouze z hmoty.

Pokud se částice setká s antičásticí dochází k interakci, kterou nazýváme anihilace. Při anihilaci se veškerá energie částice a antičástice přemění převážně na gama záření, pokud se jedná o anihilaci

elektromagnetickým procesem (elektron s pozitronem) nebo na mezony, je-li anihilace řízena silnou interakcí (případ protonu a antiprotonu), které se následně rozpadají na další částice. Kdyby vesmír obsahoval v několika prvních minutách přesně stejný počet částic a antičástic, musely by všechny anihilovat, jakmile by se teplota snížila pod šest miliard stupňů (minimální teplota při které může ze srážky fotonů vzniknout dvojice částice a antičástice) a nezbylo by nic než záření. Proti této možnosti existuje velice dobrá námitka – ve vesmíru je hmota stále přítomna. Muselo zde tedy být o něco více elektronů než pozitronů, protonů než antiprotonů, neutronů než antineutronů, aby po anihilaci částic a antičástic zůstalo něco, z čeho mohla vzniknout hmota dnešního vesmíru.

## Nerovnováha mezi hmotou a antihmotou

Veličina, která vyjadřuje nadbytek hmoty nad antihmotou, je baryonová asymetrie  $\eta_B$ . Je definována jako rozdíl mezi počtem baryonů a antibaryonů připadajícího na počet fotonů v libovolném objemu, který se rozpíná společně s vesmírem. Hodnota této veličiny se nemění a dá se snadno odhadnout, neboť jediné stabilní baryony (částice složené ze tří kvarků, které interagují silně) jsou nukleony, proton a v atomovém jádře vázaný neutron, plus jejich antičástice.

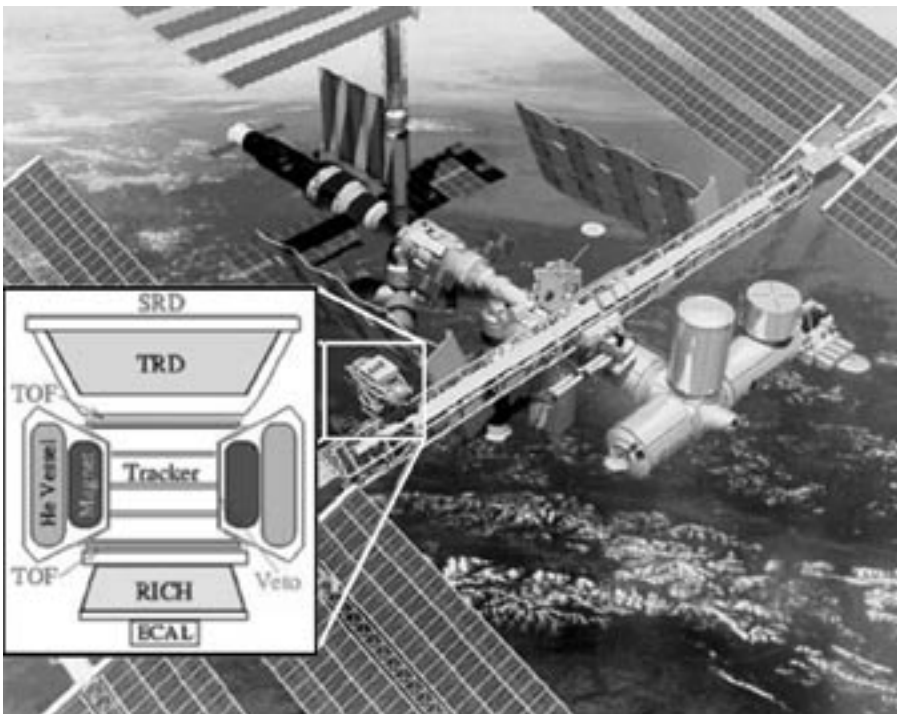
Protože ve vesmíru není žádné větší množství antihmoty, je baryonové číslo libovolné části současného vesmíru v podstatě rovno počtu nukleonů.

Nejjednodušší způsob odhadování hustoty baryonů se zakládá na pozorování zářící látky ve vesmíru. Tento odhad není příliš přesný, protože existuje také temná baryonní hmota (kompaktní objekty v halech galaxií, chladná vodíková oblaka). Studium jasnosti supernov typu Ia v závislosti na jejich vzdálenosti získáme celkovou hustotu hmoty (tj. baryonní i nebaryonní část). Podíl baryonní části z této celkové hustoty stanovíme z rentgenového záření kup a nadkup galaxií, protože jen baryonní látka tepelně vyzařuje. Září sice především elektrony, ale jejich hmotnostní podíl je za předpokladu elektrické neutrality zanedbatelný vůči nukleonům. Velice přesnou hodnotu podílu baryonní látky nám dává jeden z nejspěšnějších důsledků teorie horkého Velkého třesku: nukleogeneze. Nukleogeneze je děj, při kterém jsou zachycením volných neutronů vytvořeny atomy prvků těžších než vodík (jeho atomové jádro tvoří samotný proton). Tato tvorba atomových jader může probíhat jen vymezenou dobu od Velkého třesku a výsledný podíl vzniklých prvků je citlivý na rychlost expanze a na hustotu baryonní látky. Z měření četnosti deuteria (jádro v němž je přítomen proton spolu s neutronem) obdržíme nejpresnější výsledek, neboť množství těchto atomových jader vzniklých během nukleogeneze nebylo později výrazněji ovlivněno žádným dalším procesem.

Díky rok starým výsledkům sondy *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) známe podíl baryonní hmoty, ale i ostatní kosmologické parametry jen s několikaprocentní chybou. Sonda velmi přesně měří intenzitu teplotních fluktuací mikrovlnného reliktního záření v každém místě nebeské sféry. Reliktní záření vzniklo odpoutáním fotonů od látky asi 380 tisíc let po Velkém třesku, kdy byly do té doby volné elektrony zachyceny atomovými jádry. Velikost baryonní asymetrie získaná zpracováním výsledků sondy má hodnotu

### Mgr. Radomír Šmída (\*1978)

vystudoval astronomii a astrofyziku na MFF UK, nyní je doktorandem Centra částicové fyziky Fyzikálního ústavu AV ČR, kde se zabývá zejména kosmickým zářením a kosmologií.  
E-mail: smida@fzu.cz



Umístění experimentu AMS na ISS, ve výřezu je vidět náčrt detektoru. U částice letící do zařízení shora se nejdříve určí její rychlost, poté se její dráha zakříví magnetickým polem (1,5 kG) a sleduje se stopovým detektorem. Zakřivení závisí na hmotnosti a náboji prolétávající částice a jen tady se rozezná jádro helia od antihelia. Detekce antihelia je velice důležitá, protože kdyby ve vesmíru existovaly izolované oblasti antihmoty, musely by projít stejným kosmologickým vývojem a jejich kosmické záření by muselo antihelium obsahovat. Při srážkách částic kosmického záření totiž antihelium narozdíl od antiprotonů nevzniká. Přesné měření rychlosti pomocí Čerenkovova záření poskytne možnost, jak rozlišit izotopy lehkých prvků (např. izotopy Be, které jsou důležité pro měření stáří kosmického záření). Poslední částí detektoru je kalorimetr, kde jsou částice zastaveny a určena jejich energie.

$\eta_B = (6,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-10}$ . Tento výsledek se dá převést se znalostí hustoty fotonů (410,4 na  $\text{cm}^3$ ) na podíl baryonní látky v celkové hustotě vesmíru ( $\Omega_B = 0,044$ ). Vidíme, že nám známá látka tvoří jen zanedbatelný čtyřprocentní zlomek veškeré energie vesmíru, ale i přesto je pro nás tato složka nejdůležitější.

### Za hranicí Standardního modelu

Pro vysvětlení baryonové asymetrie se nabízejí dva základní mechanismy: Zaprvé, vesmír vznikl již s touto asymetrií. Tato hypotéza nic nevysvětluje a navíc je v rozporu s inflačními teoriemi vzniku vesmíru, které vylučují jakékoliv počáteční asymetrie. Druhý mechanismus předpokládá vytvoření asymetrie mezi hmotou a antihmotou jako důsledek dynamických procesů v reakcích elementárních částic. Tento proces, který zřejmě stojí za původem hmoty ve vesmíru, přesněji řečeno zachránil hmotu před zničením anihilací, se nazývá baryogeneze. Jeho teoretický popis je podán fyzikou elementárních částic.

Svět elementárních částic je popisován v rámci Standardního modelu hmoty a interakcí (vyjma gravitace), který pracuje v oblasti energií, kdy je silná interakce oddělena od elektroslabé. Tato teorie popisuje silnou interakci pomocí teorie nazývané kvantová chromodynamika, elektromagnetická a slabá interakce jsou společně popsány teorií elektroslabých interakcí. Jak už plyne z jejího názvu, jde o model, který je experimentálně velmi dobře potvrzen a obsahuje jen málo neznámých parametrů (jedním z nich je například dosud neobjevený Higgsův boson). Avšak vznik přebytku hmoty nad antihmotou nelze v rámci Standardního modelu popsat a jeho vysvětlení je třeba hledat za jeho hranicemi v obecnější teorii nebo alespoň v jeho rozšíření. Současný stav poznání, který se odráží v existenci několika paralelních teorií rozšiřujících Standardní model, teorií Velkého sjednocení či supersymetrických teorií, a nedostatek experimentálních údajů, které by umožnily zvolit mezi nimi ty nejprav-

děpodobnější, způsobuje, že rovněž existuje několik různorodých vysvětlení přebytku hmoty nad antihmotou.

### Sacharovovy podmínky baryogeneze

Tři podmínky nezbytné k tomu, aby proces baryogeneze proběhl úspěšně, formuloval již v roce 1967 Andrej Dmitrijevič Sacharov (1921–1989).

(1) Porušení zákona zachování baryonového čísla. Při zachování baryonového čísla by žádné reakce nemohly upřednostňovat baryony oproti antibaryonům.

(2) Porušení nábojové symetrie C a kombinované symetrie CP. Bez narušení symetrií by postupně došlo k ustavení rovnováhy přeměny baryonů na antibaryony a naopak, takže by se jejich počet vyrovnal.

(3) Třetí podmínkou pak je, že tyto procesy proběhnou v době, kdy nejsou částice, v jejichž rozpadu se zmíněná narušení zákonů projevují, ve stavu tepelné rovnováhy s okolím.

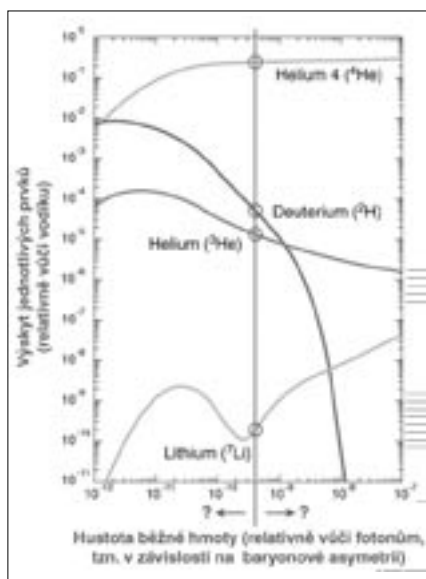
Experimentálně bylo potvrzeno, že slabá interakce nezachovává C i CP symetrii. Narušení samostatné C a P symetrie bylo pozorováno v řadě jevů, narušení kombinované symetrie CP bylo objeveno v roce 1964 v rozpadech neutrálních K mezonů a dnes je intenzivně zkoumáno u neutrálních B mezonů.

Baryogeneze musela navíc proběhnout až po inflačním rozpínání, aby vzniklá asymetrie nebyla smazána exponenciálním



Andrej Dmitrijevič Sacharov

nárustem objemu vesmíru. K inflaci došlo v časovém intervalu  $10^{-35}$  až  $10^{-33}$  sekundy a rozměr vesmíru se při ní zvětšil  $10^{50}$  krát. Ačkoli inflace byla velice krátká, zajistila, že dnešní hustota vesmíru je velice blízká ke kritické a jeho geometrie je plochá, že má makroskopické rozměry, je homogenní a izotropní a neobsahuje viditelné množství



Graf produkce lehkých atomových jader během nukleogeneze. Četnost vztahovaná k vodíkovému jádru je vynesena v závislosti na baryonové asymetrii.

magnetických monopolů. Po skončení fáze inflačního rozpínání pokračuje Friedmanova expanze. Přítomnost inflace vylučuje usku-tečnění baryogeneze během Planckovy éry, i když přímo netvrdí, že by v té době nemohla také nastat.

### Elektroslabá baryogeneze

Protože již slabá interakce splňuje druhou Sacharovovu podmínku, stačí nám nalézt období, kdy byl vesmír v nerovnováze a podívat se, jestli zde existovaly reakce nezachováající baryonové číslo. Rozhodujícím argumentem pro posouzení procesů bude velikost vyprodukovaného rozdílu mezi množstvím hmoty a antihmoty.

První období nerovnovážného stavu vesmíru je spojeno s fázovým přechodem vesmíru, kdy se oddělila slabá interakce od elektromagnetické (v čase okolo  $10^{-10}$  s při energii 100 GeV). Teorie vysvětlující

vznik baryonové asymetrie ve spojení s elektroslabým přechodem nazýváme elektroslabou baryogenezi. Ve Standardním modelu silných a elektroslabých interakcí platí na klasické úrovni zákon zachování baryonového čísla, ale připouští se jeho narušení na kvantové úrovni. Toto narušení je však příliš slabé a navíc i narušení C a CP symetrie elektroslabou interakcí nepostačuje k vysvětlení existující baryonové asymetrie. Některé formy rozšíření Standardního modelu by mohly zavedením supersymetrických částic a procesů narušujících zákony zachování baryonového a leptonového čísla, či C a CP symetrie tyto nedostatky vyřešit.

### GUT baryogeneze

Druhým obdobím je fázový přechod, který nastal po skončení inflace při energii  $10^{15}$  GeV. Podle Teorie Velkého sjednocení (*Grand Unified Theory*) se v té době oddělila silná a elektroslabá interakce. Tato teorie, kladoucí si za cíl sjednocení všech interakcí vyjma gravitace, předpovídá nestabilitu protonu a existenci magnetických monopolů. Ani jedna z těchto předpovědí, které by měly závažné kosmologické důsledky, nebyla zatím pozorována. Změnu celkového baryonového čísla i narušení symetrií obstarávají v GUT rozpady X a Y bosonů (zprostředkovávají přeměnu kvarků na leptony).

Z hranice životnosti protonu (současné experimenty udávají hodnotu vyšší než  $10^{32}$  let) vyplývá, že hmotnost těchto bosonů bude větší než  $10^{14}$  GeV.

### Affleck-Dineho baryogeneze

V roce 1985 byla představena nová hypotéza nazvaná podle autorů Affleck-Dineho baryogeneze, zkráceně AD baryogeneze. Je založená na supersymetrických teoriích (SUSY), které sjednocují všechny dosud

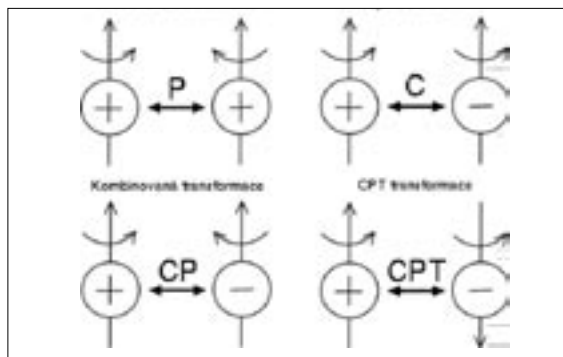
známé interakce. Každý z fermionů kvark a lepton získávají v těchto teoriích své supersymetrické partnery s-kvark a s-lepton, které jsou bosony. Každý intermediální boson (částice přenášející interakce) pak svého supersymetrického partnera, který je fermion (jeho název se tvoří příponou ino, takže supersymetrický partner gravitonu je gravitino). Existuje zde řada procesů, které mohou vést ke vzniku převahy hmoty nad antihmotou.

### Leptogeneze

Výzkum neutrin zaznamenal významné úspěchy v posledních letech. Byla potvrzena oscilace neutrin a tím vyřešen dlouholetý rozpor mezi teoreticky předpovězeným a pozorovaným tokem neutrin ze Slunce. Aby tři známá neutrina mohla oscilovat, musí mít velmi malou ale nenulovou hmotnost. Malou hmotnost neutrin vysvětluje *seesaw* („houpačkový“) mechanismus zavedením minimálně jednoho dalšího neutrina. Toto čtvrté neutrinu narozdíl od ostatních vůbec neinteraguje s hmotou, ale právě jeho rozpad by vedl k leptonové asymetrii, která se pak jinými procesy převede do sektoru baryonů.

Problémem navržených mechanismů baryogeneze je, že v pozdějších stádiích rozpínání vesmíru, třeba během elektroslabého přechodu, se může získaná baryonová asymetrie smazat. Baryonová asymetrie se však dá přes kritické období přenést ve formě částic či singularit, které mají dostatečně dlouhou dobu života a při svém rozpadu nezachovávají baryonové číslo ani C a CP symetrii.

Rozpadem těchto singularit vzniknou také X a anti-X bosony, z nichž pak mohla vzniknout pozorovaná baryonová asymetrie. Teorie GUT baryogeneze musí vyřešit ještě jeden závažný problém. Musí přeběh-



K obrázku vlevo: Každá fyzikální teorie je symetrická, pokud ji nějaká transformace ponechává beze změny. Zdálo se, že fyzikální procesy jsou neměnné vůči prostorové a nábojové transformaci, ale tato domněnka byla vyvrácena experimenty. Prostorová transformace je vytvoření zrcadlového obrazu přenesením předmětů zleva doprava a naopak a obrácením směru otáčení (v našem případě spinu částice). Při nábojové transformaci vzájemně prohodíme částice s antičásticemi, při kombinované transformaci je ještě zrcadlově obrátíme. Skutečně realizovanou symetrií je až CPT symetrie (obrátime chod času v kombinované transformaci). Platnost CPT symetrie je důsledkem invariance Lorentzovy transformace a sama CPT symetrie určuje základní vlastnosti hmoty (chování částic s polovičním a celočíselným spinem, shodné hmotnosti a doby života u částic a antičástic, ale opačná znaménka elektrického náboje a vnitřních kvantových čísel).

nout při energiích vyšších než je hmotnost X a Y bosonů, ale energie vyšší než  $10^9$  GeV vede v postinflačním období ke kosmologickým problémům, jako je nadměrná tvorba gravitonů.

Všem teoriím postaveným na SUSY zase schází experimentální potvrzení jakékoliv supersymetrické částice (hledání neutralina) a baryogeneze vzniklá leptogenezí naráží na otázku existence nového neutrina.

### Závěr

Vzhledem k nově budovaným experimentům (namátkou LHC v CERNu, IceCube v Antarktidě a zmiňované AMS na ISS) očekáváme bouřlivý vývoj částicové fyziky v následujícím desetiletí, který se, jak doufáme, úspěšně projeví v kosmologii. Vždyt nalezení odpovědi na původ baryonové asymetrie posune hranici poznání vývoje vesmíru až téměř k jeho počátku!

Rozpadové větve	Čistota
$X \rightarrow \text{antikvark} + \text{antikvark}$	$1 - \epsilon$
$X \rightarrow \text{kvark} + \text{lepton}$	$\epsilon$
$\bar{X} \rightarrow \text{kvark} + \text{kvark}$	$1 - \epsilon'$
$\bar{X} \rightarrow \text{antikvark} + \text{antilepton}$	$\epsilon'$

U rozpadu X bosonu a jeho antičástice převažují větve vedoucí ke kvarkům a leptonům. Výsledná změna baryonového čísla z těchto rozpadů je úměrná hodnotě  $\epsilon - \epsilon'$ , přičemž tento rozdíl je kladný.

