

inflační vesmír

## INFLAČNÝ VESMÍR

Z. Stuchlík, katedra fyziky VŠB, Ostrava - Poruba

Počiatok 80 rokov priniesol radikálnu zmenu v našich predstavách na vesmír. Aby mohlo byť vysvetlených niekoľko zlyhaní štandardného kozmologického modelu (teória horúceho veľkého tresku), bol vyvinutý nový model, pre ktorý sa rýchlo vžil názov inflačný vesmír. Pri popise histórie nášho (t.j. pozorovateľného) vesmíru, tento model presne súhlasí so štandardným modelom vo všetkých dobách nasledujúcich po prvých  $10^{-30}$  s, uplynutých po veľkom tresku. Nedotknuté teda zostávajú všetky úspešné, observačne dobre overené predpovede teórie veľkého tresku. Ale v priebehu prvých  $10^{-30}$  s dáva inflačný vesmír celkom odlišnú predstavu; v tomto nepredstaviteľne krátkom období došlo k nesmierne rýchlej expanzii, inflácii nášho vesmíru, behom ktorej rozmery vesmíru narástli prinejmenšom  $10^{28}$  krát (to je minimum, nutné k vysvetleniu nedostatkov štandardného modelu). Pravdepodobne sa však náš vesmír behom inflácie nafúkol podstatne viac - podľa najnovšej verzie inflačného vesmíru by to malo byť až  $10^{5000}$  krát. Na konci inflačného obdobia bol celý hmotný obsah nášho vesmíru vytvorený z "ničoho" (tým "nič" sa rozumie tzv. falošné vákuum) a jeho ďalší vývoj už mohol prebiehať podľa štandardného scenára.

Podľa teórie horúceho tresku je celý vesmír homogenný, izotropný a rozpína sa z počiatočného singulárneho stavu, veľkého tresku, od ktorého uplynulo asi  $5 \times 10^{17}$  s kozmického času, určujúceho vek vesmíru.

Veľkému tresku nepriradzujeme nulovú hodnotu kozmického času ale tzv. Planckov čas  $10^{-44}$  s, čo je najmenšia možná hranica ku ktorej môžeme dôjsť pri používaní klasického pojmu času. V tejto situácii sa pre gravitáciu (t.j. pre samotný priestoročas) stávajú podstatné kvantové efekty, takže klasické pojmy spojitého času a priestoru strácajú zmysel.

(Uspokojivá teória kvantovej gravitácie, v ktorej by bol spojitý

priestoročas nahradený obecnější konceptiou, doteraz nebola objavená.

Vo veľmi rannom období svojej histórie bol celý vesmír takmer dokonale rovnomerne vyplnený nesmierne horúcou hmotou, ktorá pozostávala z elementárnych častíc nachádzajúcich sa v termodynamickovej rovnováhe (v čase  $10^{-44}$  s mala hmota teplotu  $\sim 10^{32}$  K a hustotu  $\sim 10^{94}$  g/cm<sup>3</sup>). Táto hmota sa rozpínala súčasne s priestorom, pričom v priebehu celej svojej evolúcie zostávalo, pri vystrekovaní cez dostatočne veľké oblasti, rozloženie hmoty vo vesmíre homogénne. Počas expanzie teplota a hustota hmoty rýchlo klesali, pritom sa predpokladalo, že stavové zmeny hmoty prebiehali tak hladko, že mali zanedbateľný vplyv na termodynamickú históriu vesmíru. Expanzia vesmíru bola teda považovaná za (približne) adiabatický dej. (Pripomeňme si definíciu z termodynamiky - pri adiabatickom deji nie je systému dodávané ani odoberané teplo.) Uvidíme, že drastické narušenie tohto predpokladu je kľúčom k inflačnému vesmíru.

Pri matematickom popise evolúcie vesmíru má fundamentálnu úlohu všeobecná teória relativity, pretože Einsteinove rovnice gravitačného poľa zväzujú štruktúru a dynamiku priestoročasu s rozložením hmoty v ňom. Ale samotné Einsteinove rovnice nestačia; "zbytok" fyziky musí dodať informácie o tom aké sú vlastnosti hmoty v rôznych obdobiach histórie vesmíru (určuje stavová rovnica hmoty). História vesmíru si musíme rozdeliť na tri etapy: veľmi ranný vesmír, ranný vesmír a súčasnú etapu gravitačnej nestability látky. Veľmi ranný vesmír pokrýva prvú sekundu nasledujúcu po veľkom tresku. Ranný vesmír končí zmrznutím elektromagnetických interakcií, t.j. oddelením látky od elektromagnetického žiarenia. K tejto udalosti došlo asi 500 000 rokov po veľkom tresku, kedy teplota vesmíru poklesla natoľko, že elektróny mohli s ľahkými jadrami vytvárať elektricky neutrálne atómy, takže fotóny, ktoré interagujú len s elektricky nabitými časticami, prestali s látkou interagovať. Tým začala etapa gravitačnej nestability látky, lebo už nič nebránilo tomu, aby sa vplyvom gravitácie mohla začať zhlukovať. V tomto období,

ktoré trvá dodnes sa objavujú galaxie hviezdy, planetárne systémy, život a vyvíja sa veľkoškálová štruktúra vesmíru, t.j. usporiadanie galaxií a hniezd galaxií vo vesmíre.

Všetky observačne overené predpovede štandardného modelu (vzdialovanie galaxií podľa Hubbleho zákona, existencia prvotného žiarenia pozadia o teplote  $\sim 3$  K, množstvo ľahkých jadier vzniknutých v priebehu prvotnej jadrovej syntézy) spadajú do obdobia ranného vesmíru a éry gravitačnej nestability látky - pokrývajú teda celú históriu vesmíru, počnúc prvou sekundou po veľkom tresku. Podrobný rozbor týchto úspechov si čitateľ nájde v knihe prof. Weinberga - Prvé tri minúty.

Pri určovaní vlastností hmoty po prvej sekunde vystačíme s jadrovou fyzikou a astrofyzikou, ktorá však sama zahŕňa veľmi širokú škálu fyzikálnych teórií počínajúc teóriou hydrodynamiky a končiac napr. molekulárnou fyzikou. Ak sa ale chceme pozrieť do obdobia veľmi ranného vesmíru, zmene výzbroje sa nevyhneme. V tomto období už jadrová fyzika nestačí, nakoľko je všetka hmota rozložená na elementárne častice - musíme sa vyzbrojiť teóriou elementárnych častíc.

Najcharakteristickejším rysom súčasných teórií elementárnych častíc je tendencia unifikácie fyzikálnych interakcií. Napr. v teórii veľkého zjednotenia /GUT/ vystupujú tri interakcie - silná, slabá a elektromagnetická - ako zložky jednej unifikovanej interakcie. V GUT teda existuje medzi týmito interakciami symetria.

Keďže v pozemských podmienkach sú tieto interakcie celkom odlišné ako svojim charakterom, tak svojou intenzitou, sú GUT vybudované tak, že v súčasnom vesmíre je grandunifikačná symetria spontánne narušená. Spontánne narušená symetria je vec, ktorá je vo fyzike dobre známa z fázových prechodov medzi kvapalinou a kryštalicke pevnom látkou. Napr. voda je popísaná rotačne symetrickými zákonmi a v kvapalnom stave je taktiež sama rotačne symetrická. (Rozloženie molekúl nezávisí na pootočení kvapaliny). Ak však vodu ochladíme pod bod mrazu, dochádza k fázovému prechodu a vznikajú kryštály ľadu s význačnými smermi v rozložení



molekúl. Rotačná symetria sa stráca, lebo pre vodu pod kritickou teplotou je energeticky výhodnejší stav so spontánne narušenou symetriou. Pri ohriatí nad bod mrazu vzniká opäť kvapalné skupenstvo a symetria je obnovená. Analogicky vyzerá grandunifikačný fázový prechod ale s tým rozdielom, že kritická teplota je asi  $10^{27}$  K. I tu sa systém dostane do stavu so spontánne narušenou symetriou, ak je to preňho energeticky výhodnejšie (t.j. pod kritickú teplotu) a musí sa vrátiť do symetrického stavu pri nadkritických teplotách.

V GUT je mechanizmus spontánneho narušenia symetrie zaistovaný tzv. Higgsovými poliami (obr.1). Pokiaľ majú všetky Higgsové polia nulovú hodnotu, symetria fyzikálnych interakcií je presná, ale akonáhle aspoň jedno z Higgsových polí nadobudne nenulovú hodnotu, dochádza k narušeniu symetrie. V stave s najnižšou energiou (čo je vlastne pravé vákuum) má isté Higgsove pole nenulovú hodnotu, ktorej veľkosť odpovedá teplote grandunifikačného prechodu, pri teplotách na  $10^{27}$  K však tepelná fluktuácia spôsobí, že rovnovážna hodnota tohto poľa bude nulová - symetria bude obnovená.

Veľmi dôležitým dôsledkom GUT je narušenie jedného zo základných zákonov fyziky: zachovanie baryonového čísla. (Elementárne baryóny sú kvarky, ale v pozemských podmienkach sa môžeme stretnúť len s viazanými stavmi kvarkov, akými sú nepr. protóny a neutróny pozostávajúce z troch kvarkov.) Doposiaľ vo všetkých uskutočnených experimentoch sa rozdiel počtu baryónov a antibaryónov nemenil - baryónové číslo sa zachovalo. Podľa GUT sa však za nadkritických teplôt v symetrickej fáze môžu baryóny ľahko rozpadáť na leptóny (t.j. nepr.  $e^-$ , neutrína a ich antičastice). To je dané tým, že v symetrickej fáze tvoria baryony a leptony jednu skupinu (grupu) častíc; unifikovaná interakcia zväzuje všetky častice skupiny, prevádza teda kvarky na leptóny a naopak - baryónové číslo sa môže meniť. V spontánne narušenom stave dôjde k oddeleniu silnej jadrovej interakcie, ktorá sprostredkúva pôsobenie len medzi kvarkami - baryónové číslo sa zachováva.

Pokiaľ je zachovanie baryónového čísla celkom presné, protón musí byť v pozemských podmienkach celkom stabilný, keďže je najľahším baryónom a nemôže sa teda ďalej rozpadáť. Podľa GUT avšak ani v dnešnom vesmíre neplatí zákon zachovania baryónového čísla celkom presne. Protóny si občas môžu "spomenúť" na symetriu fyzikálnych interakcií z počiatku vesmíru a rozpadnúť sa. Sú však dnes nesmierne sklerotické: na spomenutie potrebujú približne  $10^{31}$  rokov (narušenie zachovania baryónového čísla je v súčasných podmienkach nesmierne vzácné.)

Meranie doby života protónu je jednou z mála možností, ako bezprostredne overovať platnosť rôznych verzií GUT, lebo každá verzia dáva odlišné predpovede pre spôsoby a polčas rozpadu protónu. Doposiaľ vytvorené verzie GUT sa líšia tým, aká veľká je základná grupa častíc a aké druhy kvarkov a leptónov obsahuje. Tieto teórie obsahujú rad parametrov, ktorých hodnotu nepoznáme. Principiálne by bolo možné tieto parametre určovať experimentálne, to však naráža na neprekonateľné potiaže technického rázu: pokiaľ by sme chceli postupovať štandardnou metódou, t.j. vychádzať z rozborov experimentov na urýchľovačoch, potrebovali by sme urýchľovač dlhý niekoľko svetelných rokov (minimálne) k tomu iste netreba nič dodávať. Musíme sa teda uspokojiť s efektami, ktoré GUT dávajú v pozemských podmienkach - rozpadom protónu a elektrickým dipólovým momentom neutrónu. Tieto efekty sú však nesmierne slabé a dávajú na hľadané parametre len slabé obmedzenia - prípustné rozmedzia sú značne široké.

Existuje ale ešte jedna možnosť: astronomické pozorovania. Veď predsa celá obloha je monitorom, na ktorom môžeme sledovať výsledky najdokonalejšieho experimentu fyziky vysokých energií - samotného veľkého tresku. Postupujeme teda tak, že rôzne verzie GUT aplikujeme na veľmi ranné obdobie štandardnej kozmológie a skúmame, či sú získané predpovede v súlade s tým čo sa pozoruje. To je pomerne účinná metóda previerky, ale i ona má svoje problémy. Nie je ľahké vyznať sa v tom čo nám o období veľkého zjednotenia interakcií poskytujú astronomické pozorovania - veď ide o informácie maskované celým nasledujúcim vývojom vesmíru.

Aplikácia GUT na popis hmoty vo veľmi rannom vesmíre rozšírila zoznam úspechov štandardného modelu o ďalší, veľmi dôležitý príspevok: vysvetlenie asymetrie hmoty a antihmoty vo vesmíre. Existujú veľmi presvedčivé argumenty, že všetky hviezdy, galaxie hniezda galaxií, ktoré pozorujeme vo vesmíre sú vytvorené z hmoty, t.j. jadrá ich atómov sú vytvorené z baryónov, nie antibaryónov. Aby v období prvotnej jadrovej syntézy mohlo vzniknúť pozorované množstvo ľahkých jadier, musel byť na počiatku tohto obdobia (v 1.sekunde, kedy už všetky antibaryóny vymizli) pomer počtu baryónov a fotónov  $n_b/n_p \sim 10^{-9}$ . Odtiaľ plynie, že pred anihiláciou pripadal na každú miliardu baryónov a antibaryónov približne jeden baryón navyše. Pokiaľ by sa baryónové číslo zachovávalo, štandardný model by toto veľmi malé, ale nenulové baryónové číslo vesmíru nedokázal vysvetliť a musel by ho zabudovať do počiatočných podmienok vo veľkom tresku. Vďaka tomu, že v GUT zachovanie baryónového čísla neplatí, dá sa prebytok hmoty nad antihmotou vysvetliť pomocou rozpadu istých veľmi ťažkých a nestabilných častíc po prebehnutí grandunifikačného fázového prechodu. Pomerne zložité výpočty ukazujú, že pozorovaný prebytok baryónov môže byť vytvorený z počiatočného, celkom symetrického stavu pre prípustné hodnoty parametrov GUT.

Doposiaľ bola reč o úspešných predpovediach štandardného modelu. Teraz nastal čas obrátiť list a venovať sa zlyhaniam štandardnej kozmológie.

Veľmi vážne zlyhanie vzniká pri použití ideí GUT vo veľmi rannom vesmíre. Pri fázovom prechode rôznych oblastí symetrickej fázy do odlišných spontánne narušených stavov vzniká značné množstvo porúch tam, kde sa stretávajú oblasti - domény narušené odlišným spôsobom. (I tu je prípadná analógia s fázovým prechodom vody na ľad: rôzne oblasti vody môžu kryštalizovať s odlišnou orientáciou kryštalografických osí, tieto domény rastú a pri stretnutí sa snažia vyhladiť nesúlad v orientácii pozdĺž svojich hraníc. Vyhladenie však nie je dokonalé - vznikajú poruchy. (Domény so spontánne narušenou symetriou môžeme charakterizovať parametrami dvojitého typu (diskrétnymi a spo-



jitými), čomu odpovedajú dva typy porúch (plošné a bodové). Plošné poruchy - doménové steny vznikajú na hranici medzi dvoma doménami s odlišným diskretným parametrom. Bodové poruchy - magnetické monopóly vznikajú v oblasti s pevným diskretným parametrom tam, kde sa pretne mnoho domén s odlišnými hodnotami spojitého parametru. Tento parameter vlastne udáva smer magnetizácie, takže magnetický monopól je centrom, kde sa magnetické pole vyruší, pričom okolo nej zostane sféricky symetrické magnetické pole (obr.2). Doménové steny a magnetické monopóly sú extrémne stabilné a ťažké objekty - napr. kludová hmotnosť monopólu je  $\sim 10^{16}$  GeV; porovnaj s kludovou hmotnosťou protónu  $\sim 1$  GeV. Pritom pri fázovom prechode by mali byť hojne tvorené; počet monopólov by mal byť porovnateľý s počtom baryónov. To je ale zjavný nezmysel! V takom prípade by sme mohli vysvetliť akurát bibliu, ale geológom by sme sa už nemohli pozrieť do očí: uvedené množstvo monopolov by zvýšilo hustotu vesmíru natoľko, že by do 100 000 rokov od veľkého tresku musel znovu skolabovať. Spojenie GUT so štandardnou kozmológiou si teda vyžaduje mechanizmus, schopný veľmi radikálne obmedziť výskyt porúch, aby mohol byť vesmír tak starý, ako je, musí byť monopólov aspoň  $10^{14}$  krát menej ako baryónov.

Štandardný model má ovšem ešte dva ďalšie problémy, ktoré tesne súvisia s tým, že je vesmír veľmi starý. Prvý z nich je problém presného vyladenia, či plochosti vesmíru, druhý je známy ako problém kauzálneho horizontu.

Aby vesmír dosiahol svojho isto požehnaného veku, musela byť počiatočná rýchlosť jeho expanzie nastavená s obrovskou presnosťou na tzv. únikovú rýchlosť, ktorou expanduje plochý, parabolický vesmír, ktorý je limitným prípadom vesmírov, ktoré nesolabujú späť do singulárneho stavu. V parabolickom vesmíre je priestor euklidovský (plochý) a hustota energie sa v ňom označuje ako kritická; taký vesmír večne expanduje, ale rýchlosť jeho expanzie sa blíži nule.

Ak označíme pomer hustoty energie vesmíru ku kritickej hustote (určenej rýchlosťou expanzie) ako  $\Omega$ , potom pre  $\Omega$  väčšie ako 1

máme uzavreté vesmíry a pre  $\Omega$  menšie ako 1 otvorené vesmíry, ktorých priestor je síce zakrivený ale neuzaviera sa do seba ako v uzavretých vesmíroch. Každý vesmír pri tom musí zostať takým, akým bol na počiatku. Nie je napr. možné aby sa v priebehu evolúcie stal uzavretý vesmír otvorený. Ak je  $\Omega$  presne rovné 1 na počiatku, musí tak zostať aj naďalej. Ak sa na počiatku  $\Omega$  trochu líši od 1, musí podľa štandardného modelu táto odchýlka s časom rásť veľmi rýchle. Potom je však nesmierne divné, že ešte dnes je v našom vesmíre  $\Omega$  veľmi blízke 1 (maximálny rozsah je od 0,01 do 10). To je možné len vtedy, ak sa  $\Omega$  sekundu po veľkom tresku líšilo od 1 až na 15 desatinnom mieste a v dobe grandunifikačného prechodu ( $10^{-35}$  s) prichádza do úvahy najskôr 55 miesto za desatinnou čiarkou. Toto enormne presné vyladenie štandardný model vysvetliť nevie: musí ho pokladať za počítačnú podmienku.

Najfundamentálnejšou vadou na kráse štandardného modelu je to, že nedokáže vysvetliť homogenitu a izotropiu pozorovanú v dnešnom vesmíre na veľkých škálach. Problém spočíva v tom, že evolúcia vesmíru je v štandardnej kozmológii príliš rýchla na to, aby rovnorodosť nášho vesmíru mohla vzniknúť v dôsledku prirodzených procesov vedúcich k termodynamickej rovnováhe. Dnes pozorovaný vesmír bol totiž vždy väčší ako kauzálny horizont, ktorého rozmer je daný vzdialenosťou, ktorú v uvažovanom čase vykoná svetlo od okamihu veľkého tresku (obr.3). S príchodom k počítačnej singularite sa podiel veľkosti horizontu a dnes pozorovaného vesmíru blíži nule a problémy narastajú. Napr. na konci ranného vesmíru neboli zdroje prvotného tepelného žiarenia vzdialené na dnešnej oblohe o viac než  $1^\circ$  nikdy predtým v kauzálnom kontakte - náš vesmír vtedy pozostával z  $10^{10}$  oblastí, ktoré nikdy predtým nemohli komunikovať v dobe vlády GUT ( $10^{-38}$  s) sa už rozpadá na  $10^{84}$  takých oblastí. Keďže sa fyzikálne procesy nemôžu šíriť rýchlejšie než svetlo, len v oblastiach menších než kauzálny horizont mohol vzniknúť termodynamický, rovnovážny, rovnorodý stav. Uniformita nášho vesmíru môže byť vysvetlená len tak, že je zahrnutá do počítačných



podmienok vo veľkom tresku; potom zostane zachovaná stále.

Rozloženie hmoty v rannom vesmíre nemohlo byť uniformné celkom presne - muselo obsahovať malé fluktuácie, z ktorých sa v ére gravitačnej nestability látky vyvinuli galaxie usporiadané do veľkoškálovej štruktúry. Z pozorovania prvotného tepelného žiarenia plynie, že v okamihu zmrznutia elektromagnetických interakcií museli byť fluktuácie hustoty veľmi malé (menšie než desatťtisícina t.j.  $\delta\rho/\rho \sim 10^{-4}$ ). Výskumy priestorového rozloženia z počiatku 80 rokov ukazujú, že veľkoškálová štruktúra vesmíru pripomína štruktúru neusporiadaného včelieho úľa. Prevažná väčšina galaxií je rozložená v akýchsi stenách, popr.vláknach. Presne také usporiadanie galaxií však predpovedá tzv. teória "lievencov" rozpracovaná skupinou akademika Zeldoviča, čo môžeme považovať za ďalší úspech štandardnej kozmológie. S týmto úspechom súvisí posledný problém štandardného modelu, pretože počiatočná fluktuácia musí mať dosť špecifické vlastnosti. Prípustné sú len nehomogenity hustoty hmoty a geometrie, zatiaľ čo pomer baryónov a fotónov musel byť všade rovnaký (tzv. adiabatické fluktuácie). Veľkosť fluktuácií je v rannom vesmíre približne rovnaká na všetkých astrofyzikálne významných vzdialenostiach - vravíme, že spektrum nehomogenít je škálovo invariantné. Veľkosť počiatočných fluktuácií a škálovo invariantný charakter ich spektra štandardný model nevysvetľuje; i tieto charakteristiky musia byť postulované ako súčasť počiatočných podmienok. Len adiabatickou povahou fluktuácií môžeme vysvetliť v rámci vzniku baryónovej asymetrie vesmíru: grandunifikačný fázový prechod je vo všetkých miestach daný týmito mikroskopickými parametrami, takže veľkosť vytvoreného baryónového čísla musí byť všade rovnaká.

Diagnóza neuhov štandardnej kozmológie bola stanovená, môžeme teda pristúpiť k liečbe. Ako už bolo povedané, zázračný liek sa nazýva inflácia. Idea inflačného vesmíru vychádza z vlastností fázového prechodu pri narušení symetrie fyzikálnych interakcií. Tento prechod by mal nastať pri kritickej teplote

$T_c$  ( $\sim 10^{27}$  K), ale pre isté prípustné hodnoty neznámych parametrov GUT je fázo vý prechod oveľa pomalší než expanzia vesmíru - dôjde k podchladeniu symetrickej fázy, takže prechod prebehne neskôr pri nižšej teplote. (I tu funguje analógia s fázovým prechodom vody na ľad - voda môže byť podchladená až na  $20^\circ$  pod bod mrazu).

Nad kritickou teplotou sa vesmír nachádzal v symetrickom stave, v ktorom hustota energie samotného priestoročasu (vákua) bola približne rovná  $T_c^4$ . To je však obrovská hustota energie - také vákuum sa nazýva falošným. Keď teplota hmoty v expandujúcom vesmíre klesla pod kritickú hodnotu, pre vesmír sa stal energeticky výhodnejším stav s narušenou symetriou a nulovou hustotou energie vákua v ktorom sa nachádza teraz, ale od asymetrického stavu ju oddeľovala energetická bariéra, takže zostal uväznený v symetrickom stave. S pokračujúcou expanziou teplota a hustota hmoty klesala, zatiaľ čo hustota energie falošného vákua zostávala konštantná a stala sa rozhodujúcou pre priebeh expanzie (obr.4,5). Vesmír sa tak dostal do obdobia, kedy v ňom celková hustota energie, daná falošným vákuom, bola konštantná. V takom prípade musí podľa Einsteinových rovníc dôjsť k urýchľovanej expanzii - inflácii, kedy vesmír rastie exponenciálne rýchlo, jeho rozmer sa zdvojnásobí behom každých  $10^{-34}$  s. Pôvod tejto urýchľovanej expanzie sa musí hľadať v neobvyklých vlastnostiach falošného vákua, tlak falošného vákua je záporný a čo do veľkosti je rovný hustote energie (ak je vyjadrený v rovnakých jednotkách). Podľa obecnej relativity prispieva ku gravitačným účinkom tiež tlak, ktoré sú úmerné súčtu hustoty energie a trojnásobku tlaku, v prípade falošného vákua teda "zvíťazí" záporný tlak, čo vedie k nezvyčajným dôsledkom: gravitačné účinky falošného vákua sú repulzívne, takže expanziu vesmíru urýchľujú.

Ak na konci inflačnej éry dôjde v nejakej oblasti k prechodu do asymetrickej fázy s nulovou energiou vákua, uvoľní sa latentná energia falošného vákua, čo vedie k enormnej produkcii vysoko energetických elementárnych častíc, t.j. k opätovnému

ohrevu tejto oblasti vesmíru. Dosiagnuta teplota vytvorenej hmoty závisí na účinnosti premeny energie falošného vákua, pri vysokej účinnosti môže byť porovnateľná s teplotou na počiatku inflácie ( $10^{27}$  K). Ďalší vývoj ohriatej oblasti už prebieha presne podľa štandardného modelu.

Éra inflácie je základom modelu inflačného vesmíru, ktorý nám umožňuje vysvetliť celkom automaticky základné zlyhanie štandardného modelu (problém horizontu, plochosti a prebytku magnetických monopolov a doménových stien), pokiaľ v priebehu inflácie vzrástli rozmery vesmíru aspoň  $10^{28}$  krát. Potom sa každá uniformná oblasť vesmíru, porovnateľná na počiatku inflácie s kauzálnym horizontom nafúkla natoľko, že sa z nej vyvinul celý dnes pozorovateľný rovnorodý vesmír. Rozmer takejto oblasti na počiatku inflácie je  $\sim 10^{-25}$  cm a jej krivosť (určená parametrom  $\Omega$ ) môže byť ľubovoľná. Behom inflácie sa táto krivosť rýchlo zmenšovala, podobne ako sa zmenšuje zakrivenie nafukovaného balónu. Odborne povedané: rovnice popisujúce evolúciu parametru  $\Omega$  behom inflácie zabezpečujú, že na jej konci  $\Omega$  s patričnou presnosťou rovné 1. Posledný zo základných problémov je vyriešený tým, že infácia drasticky rozriedi hustotu magnetických monopolov a doménových stien (tieto objekty vznikajú pred započatím inflácie).

A. Guth, autor pôvodného inflačného modelu si predstevoval, že v exponenciálne expandujúcom falošnom vákuu začnú vznikáť bubliny asymetrickej fázy, ktoré postupne rastú a splývajú, až vyplnia celý priestor. Prechod do spontánne narušenej fázy je možný vďaka kvantovým efektom. Falošné vákuum nie je stabilné, keďže v ňom neustále prebiehajú kvantové fluktuácie polí; môže sa teda stať, že si Higgsové pole, zodpovedné za fázový prechod "vypožičia" energiu v malej oblasti priestoru, pretuneluje energetickú bariéru a vytvorí bublinu asymetrickej fázy (obr.6). Bublina skutočného vákua potom expanduje rýchlosťou svetla do oblasti falošného vákua - to je možné vďaka tomu, že asymetrický stav je energeticky výhodnejší než symetrický a má tiež väčší tlak (nulový tlak skutočného vákua je oveľa väčší než záporný



tlak falošného vákua). Pri splývání bublín je energia obsiahnutá v ich povrchu transformovaná na tepelnú a vesmír sa ohreje na pôvodnú teplotu fázového prechodu.

Aby mohlo dôjsť k dostatočne veľkej inflácii musí byť bariéra oddeľujúca pravé a falošné vákuum dostatočne "tvrdá", t.j. rýchlosť tvorenia bublín musí byť veľmi malá. Lenže potom fázový prechod v pozorovateľnom vesmíre nemohol byť dokončený, pretože rýchlosť expanzie bublín je príliš malá v porovnaní s infláciou falošného vákua. Výsledkom by boli skupiny bublín oddelené falošným vákuom. V každej skupine by dominovala jediná najväčšia bublina, v ktorej povrchu by bola sústredená najväčšia energia celého systému. Nič podobného sa nepozoruje.

Inflačný model v pôvodnej podobe stroskotal, ale vzápätí prišiel Linde (a nezávisle Albrecht so Steinhardtom) s myšlienkou novej inflácie. Podľa nového modelu inflácia prebehla i v samotnej bubline, takže sa celý náš vesmír nachádza vnútri jednej obrovskej bubliny, ktorá vznikla ako v pôvodnom modeli tunelovým prechodom Higgsovho poľa energetickou bariérou. V novej inflácii sa však predpokladá, že závislosť energie vesmíru na Higgsovom poli má špeciálny charakter (obr.7). Zatiaľ čo v pôvodnom modeli prešla bublina ihneď do stavu s pravým vákuom, v novej inflácii je energetická bariéra veľmi malá a za ňou sa prestiera rozsiahla oblasť, v ktorej zostáva hustota energie stále približne konštantná a rovná energii falošného vákua v symetrickom stave. Higgsove pole spotrebuje relatívne dlhú dobu (až  $10^{-30}$  s) na to, aby prekonalo toto rozsiahle plató. Rýchlosť rastu Higgsovho poľa sa dá prirovnať k rastu rýchlosti guľôčky, ktorá sa valí z kopca za pôsobenia síl trenia, ktorá má rovnaký tvar ako krivka hustoty energie z obr.7. Uvedené prirovnanie dáva názov mechanizmu novej inflácie: prechod pomalým valením. V priebehu "pomalého valenia" Higgsovho poľa zostáva vnútri bubliny falošné vákuum, takže i bublina prejde obdobím inflačnej expanzie, kedy sa jej rozmer zdvojnásobí každých  $10^{-34}$  s. Expanzia prestane byť urýchľovaná, ak sa Higgsove pole dostane

do oblasti, kde je krivka hustoty energie strmá. Ak si teda spočítame čas, ktorý Higgsove pole spotrebuje na pomalé valenie, môžeme určiť aká veľká bola inflácia. Doba pomalého valenia závisí od toho z akej teórie vychádzame; pohybuje sa od  $10^{-32}$  s do  $10^{-30}$  s, čomu odpovedá inflácia od  $10^{50}$  do  $10^{5000}$ . Na počiatku inflácie je veľkosť bubliny asi  $10^{-25}$  cm, po inflácii to bude asi  $10^{25}$  cm až  $10^{5000}$  cm, pričom na náš vesmír z toho pripadá približne 1 cm! Pri tak obrovskej inflácii sa počiatočná hustota častíc v bubline redukuje v podstate na nulovú, takže všetka energia bubliny je ukrytá v Higgsovom poli. K uvoľneniu latentnej energie dôjde v strmej oblasti krivky hustoty energie, ktorá sa rozkladá v okolí pravého vákua. V strmej oblasti začne Higgsove pole veľmi rýchle oscilovať okolo svojej hodnoty odpovedajúcej stavu vesmíru s nulovou energiou vákua (tam je jeho veľkosť približne charakterizovaná energiou falošného vákua).

Behom oscilačnej fázy prechodu sa vybaví v značnom počte veľmi ťažké, nestabilné higgsovské častice, ktoré sa rýchlo rozpadajú - vzniká veľmi horúca zmes obyčajných elementárnych častíc nachádzajúcich sa v termodynamickovej rovnováhe. Ďalej je to už všetko ako v štandardnom modeli. Počiatočná teplota znovu ohriateho vesmíru je daná intenzitou väzby medzi Higgsovým polom a obyčajnou hmotou. Čím tesnejšia je táto väzba, tým je ohrev silnejší - dosiahnutá teplota môže byť porovnateľná s teplotou symetrickej fázy na počiatku inflácie, ale pri silnej väzbe môže byť oveľa menšia. (Ohrev však musí byť dostatočne silný, aby po inflácii mohla vzniknúť baryonová asymetria nášho vesmíru).

Riešenie problému horizontu a plochosti je v novom modeli dané mierou inflácie, t.j. tým, že náš vesmír je len nepatrnou časťou jednej bubliny. Na jednu bublinu pripadá rádovo jeden monopol a jedna doménová stena - ani tu teda nie sú žiadne problémy. Navyše sa ukazuje, že idea inflačného modelu predpovedá vznik nehomogenít so škálovo invariantným spektrom a to nezávisle na detailoch teórie použitej pre popis fázového prechodu. Inflácia celkom vyhladí nehomogenity prítomné v bubline na počiatku. V priebehu prechodu pomalým valením sú potom tvorené nové



nehomogenity kvantovými fluktuáciami Higgsovho poľa na veľmi malých škálach, ktoré inflácia rozťahne na všetky škály typické pre náš vesmír i väčší. Behom inflácie musia fyzikálne pomery v expandujúcej bubline zostať stále rovnaké - i veľkosť vznikajúcich nehomogenít musí byť stále rovnaká. Keďže inflácia veľmi rýchlo nehomogenity rozťahne na rozmery väčšie než kauzálny horizont, nemôže sa ich veľkosť v priebehu ďalšej histórie vesmíru meniť. Po dokončení fázového prechodu sa vo vesmíre popisovanom štandardným modelom vynárajú spod horizontu rovnako veľké nehomogenity, ktoré sa až potom môžu začať vyvíjať na veľkoškálovú štruktúru - a práve to predpokladá teória vzniku a evolúcie galaxií.

Náš vesmír sa podľa nového inflačného modelu nachádza vo vnútri obrovskej bubliny. Ale čo je vo vnútri tejto bubliny? Pokiaľ je rýchlosť vzniku bublín malá, bude to exponenciálne rýchlo expandujúce falošné vákuum, v ktorom občas vznikne kvantovou fluktuáciou bublina, podobná tej, v ktorej sa nachádzame aj my. Táto predstava je reinkarnáciou kozmologického modelu ustáleného stavu; neustále vznikajú nové bubliny - vesmíry, ktoré zostanú vždy od seba oddelené. Vnútro každej bubliny sa vyvíja v intenciách teórie veľkého tresku opravené inflačným obdobím.

Existuje však ešte jedna varianta novej inflácie, ktorá dáva úplne rovnaké predpovede ako vyššie uvedený model pre náš vesmír, ale líši sa v určení štruktúry celého vesmíru. V tejto variante sa predpokladá, že s poklesom teploty dostatočne hlboko pod kritickú hodnotu, energetická bariéra oddeľujúca pravé a falošné vákuum celkom vymizne (obr.8) I v tomto prípade je krivka hustoty energie veľmi plochá v rozsiahlej oblasti okolo nulovej hodnoty Higgsovho poľa a strmá v okolí pravého vákua. Kvantové a tepelné fluktuácie vytvoria malé odchýlky Higgsovho poľa od nulovej hodnoty (nepatrne ho vychýlia z nestabilnej rovnováhy), pričom nasledujú nám už dobre známe pomalé valenie Higgsovho poľa do pravého vákua.

V skutočnosti existuje niekoľko Higgsových polí, ktoré spôsobujú prechod do rôznych spontánne narušených stavov, určených

kombináciou Higgsových polí, ktoré nadobudnú nenulové hodnoty. Tieto rôznym spôsobom narušené stavy sú však fyzikálne ekvivalentné (majú nulovú energiu vákuua), podobne ako sú ekvivalentné kryštály toho istého typu, ak ich osi sú v priestore rôzne orientované. Fluktuácie vychýľujúce pole z rovnováhy sú náhodné. V rôznych oblastiach symetrickej fázy teda vznikajú domény odlišných asymetrických stavov, ktorých rozmery vzrastú infláciou z počiatočných  $10^{-25}$  cm znovu najmenej  $10^{50}$  krát - celý pozorovateľný vesmír je kúskom jednej domény. Medzi doménami ale nie je falošné vákuum - vyplňujú celý priestor a sú oddelené doménovými stenami. Vnútri stien zostáva symetrická fáza, takže protóny, ktoré preniknú do takej steny sa okamžite rozpadnú. Postupom času sa doménové steny narovnávajú, relatívne malé domény miznú, zostávajú a rastú veľké domény. Bohužiaľ sa nemôžeme presvedčiť či žijeme v bubline obklopenej falošným vákuom, alebo v doméne obklopenej inými doménami.

Zostáva základná otázka: Poskytuje GUT také závislosti hustoty energie na Higgsových poliach, aby nová inflácia vysvetlila všetky problémy? Ukázalo sa, že pre istý veľmi špecifický výber parametrov GUT môžeme dostať dostatočne ploché krivky. Lenže nehomogenity, ktoré by v tomto prípade vznikli behom inflačnej éry by boli príliš veľké - mohli by z nich vzniknúť obrie čierne diery, ale nikdy nie galaxie. Takže zasa smola. Poznamenajme, že najjednoduchšia verzia GUT o ktorej bola doposiaľ reč, bola vyvrátená i experimentálne (pre polčas rozpadu protónu dáva  $10^{30}$  rokov, zatiaľ čo podľa experimentov to musí byť minimálne  $10^{32}$  rokov). Jej zlyhanie v inflačnom mechanizme je teda pochopiteľné. Lenže každá rozumná verzia GUT predpovedá príliš veľké nehomogenity. Čo teraz?

Záchranu je treba hľadať v teórii, ktorá vykladá všetky štyri fyzikálne interakcie (i gravitáciu) na jednotnom základe. Vraví sa jej supergravitácia - gravitačné pole sa odštepí od ostatných zjednotených interakcií pri spontánnom narušení tzv. supersymetria, mechanizmus tohto narušenia je rovnaký ako pri grandunifikačnom prechode - je zaistovaný tzv. superhiggsovskými poliami.

Čo je supersymetria? V GUT sa hodia do jednej grupy baryóny a leptóny - medzi týmito typmi častíc teda existuje symetria. V supersymetrických teóriách sa do jednej grupy zahrňujú nielen baryóny a leptóny t.j. častice s poločíselným spinom, ale aj také častice s celočíselným spinom (napr. fotóny), ktoré sprostredkujú fyzikálne interakcie medzi baryónmi a leptónmi. Lokálne supersymetrické supergravitačné teórie sú jednou zo sľubných ciest k riešeniu problému kvantovej gravitácie. Je ale nesmierne obtiažné experimentálne overovať ich platnosť, pretože sa v plnej kráse prejavajú až pri energiách  $10^{19}$  GeV, ešte  $10^{14}$  krát väčších, než energia odpovedajúca veľkému zjednoteniu. Rôzne verzie supergravitačných zjednotení môžeme najľahšie testovať tým, že overujeme či vyhovujú požiadavkám na novú infláciu. A skutočne sa zdá, že supergravitačné teórie budú úspešné. Veľkou výhodou je, že dávajú fázový prechod pomalým valením, pričom nie je nutné presne nastavovať ich parametre.

Prvotná supergravitačná inflácia - to je názov, ktorý dala skupina fyzikov z CERNu (Nanopoulos a spol.) svojmu modelu, ktorý zrejme vyrieši všetky nedostatky štandardnej kozmológie. Model prvotnej inflácie vychádza z narušenia supersymetrie "pomalým" valením superhiggsovského poľa: automaticky teda rieši problémy s horizontom, plochosťou a spektrom nehomogenít. Pokiaľ je inflačný narast rozmerov extrémne veľký ( $10^{5000}$ ) budú mať nehomogenity vznikajúce v bubline behom inflácie veľkosť akurát vhodnú na vznik galaxií. Oveľa obtiažnejšie a zložitejšie je v modeli prvotnej inflácie riešenie problému monopólov a vzniku baryónovej asymetrie vesmíru, pretože v rámci supergravitácie je narušenie grandunifikačnej symetrie komplikovaná záležitosť. Použitá verzia supergravitácie predpovedá grandunifikačný fázový prechod opozdený na kritickú teplotu  $10^{22}$  K, čo je podstatne menej než  $10^{27}$  K z obyčajných GUT. Keď na konci inflačnej éry dôjde pri teplote  $10^{22}$  K k "zadržanému" grandunifikačnému prechodu, vytvorí sa vďaka podstatne nižšej teplote počet magnetických monopólov odpovedajúcich maximálnemu množstvu, ktorý pre dnešný vesmír pripúšťajú kozmologické obmedzenia (približne jeden



monopól na  $10^{27}$  fotónov). Pokiaľ prechod prebehol po ukončení inflácie, nová inflácia v supergravitačnom "kabáte" predpovedá pomerne veľký počet monopolov na rozdiel od pôvodnej novej inflácie, ktorá pripúšťa rádovo len jeden monopól na pozorovateľný vesmír. Ak však prechod nastal pred ukončením inflácie, hustota výskytu magnetických monopolov bola infláciou patrične rozriedená. Podobným spôsobom sa môžeme zbaviť aj nepohodlných tzv. ionových častíc, ako sú gravitína a fotína. (Existenciu týchto častíc predpovedajú supergravitačné teórie: gravitína sú v nich partnermi gravitónov, t.j. kvánt gravitačného poľa, fotína doprevádzajú fotóny). Teória však dáva také množstvo týchto častíc, ktoré odporuje observačným obmedzeniam - i tu teda musí "zakročiť" inflácia! Najväčšie potiaže sa objavili pri vysvetlení baryónovej asymetrie vesmíru, ktorá vzniká pri rozpade Higgsových častíc o kludovej energii  $\sim 10^{10}$  GeV. Aby použitá verzia supergravitačnej teórie, v ktorej pri spontánnom narušení supersymetrie hraje kľúčovú rolu gravitína s kludovou energiou  $\sim 100$  GeV predpovedala pozorované baryónové číslo vesmíru, musel by byť počas rozpadu prototónu menší, než vravia experimenty. Našťastie sa tento neduh dá v princípe liečiť: je treba použiť iný typ supergravitačnej teórie, v ktorej gravitína nemá kľúčový význam.

Posledným veľkým "hitom" kozmológie sa stal tzv. model chaotickej inflácie, navrhnutý sovietskym fyzikom Lindom. Ide tu o zobecnenie modelu prvotnej inflácie, ktorá už pravdepodobne bude konečnou verziou modelu inflačného vesmíru.

Vo všetkých pôvodných variantách inflačného vesmíru sa predpokladalo, že inflačný vesmír "pomalé valenie" Higgsových polí do "pravého" vákua začína v symetrickom stave t.j. z nulových hodnôt týchto polí. Tento predpoklad je opodstatnený, pokiaľ po big bangy vesmír dostatočne dlho obsahoval hmotu o teplote vyššej než kritická teplota fázového prechodu. V takom prípade sa musel dostať do symetrického stavu, lebo pre nadkritické teploty má krivka potenciálu jediné minimum - práve pre nulovú hodnotu Higgsových polí (viď obr.1). Pri fázovom prechode spojeným

s prvotnou infláciou je však kritická teplota natoľko blízka Planckovej teplote ( $10^{19}$  GeV), že vysokoteplotné efekty nemusia stihnúť patrične ovplyvniť počiatkové rozloženie hodnôt Higgsovho poľa.

Na počiatku v big bangu bolo rozloženie hodnôt skalárneho Higgsovho poľa celkom chaotické, dané kvantovými fluktuáciami. Prípustné boli tiež hodnoty väčšie (i omnoho) než kritická hodnota odpovedajúca našemu pravému vákuu, ktorá je porovnateľná s Planckovou hodnotou ( $10^{19}$  GeV). Pritom v každej oblasti veľkosti kauzálneho horizontu, v ktorej bolo v Planckovom čase skalárne pole homogénne a dostatočne veľké, mohol "pomalým valením" prebehnúť inflačný prechod do pravého vákuu (obr.9). Tento prechod však prebieha od veľkých hodnôt skalárneho poľa k menším - žiadna počiatková symetria sa teda v chaotickej inflácii nemusí predpokladať! Inflácia zo symetrického stavu je len jednou z veľa možností.

Pre "minimálnu" infláciu (vysvetľujúcu náš vesmír) stačí, keď počiatková hodnota Higgsovho poľa je asi 5x väčšia než kritická, odpovedajúca našemu vákuu. S rastúcou počiatkovou hodnotou skalárneho poľa rastie i miera inflácie.

Výhodou modelu chaotickej inflácie je, že inflačné "minivesmíry" dáva do špeciálnych obmedzení na parametre zjednocovacích teórií, z celkom chaotického počiatku. Chaotické počiatkové podmienky totiž automaticky zabezpečujú, že hodnoty parametrov nutné pre patričnú infláciu sa vyskytujú v istých oblastiach, z ktorých sa vyvinú inflačné minivesmíry.

Spojenie ideí veľkého zjednotenia, supersymetrie a veľkého tresku sa ukázalo, ako veľmi plodné: zrodila sa superkozmológia, ktorá bude pravdepodobne schopná vysvetliť v rámci medziinflačných modelov všetky problémy ktoré sa objavia, pokiaľ berieme tri zložky superkozmológie samostatne. Na druhej strane je treba povedať, že jednoznačná experimentálna preverka platnosti modelu inflačného vesmíru doposiaľ neexistuje - nie je to totiž ani potrebné. Zatiaľ je to len možnosť, v ktorej prospech hovorí predovšetkým estetické dôvody: schopnosť vysvetliť "na jeden



záťah" všetky zlyhania štandardnej kozmológie. Problém spočíva v tom, že inflačný model je založený na GUT a super GUT, presnejšie povedané na ich kvalitatívnych vlastnostiach, pretože to zďaleka ešte nie sú hotové teórie. Ich experimentálna previerka je nesmierne náročný problém - je potrebné si uvedomiť, že doposiaľ neexistuje priamy experimentálny dôkaz, že základná idea týchto teórií je adekvátne skutočnosti: Nepriame indície sú však veľmi silné - máme veľmi dobré dôvody unifikáčnym teóriám veriť.

Nezostáva teda, než ďalej rozpracovávať unifikáčné teórie (dnes sa zdajú byť veľmi slubné teórie Kaluzova - Kleinovho typu, predpovedajúce existenciu skrytých prídavných dimenzií vesmíru), hľadať možnosti na ich experimentálne previerky, aplikovať ich na modely inflačného vesmíru. Na tejto ceste nás nepochybne čakajú mnohé prekvapenia.

---

Vydala: Krajská hviezdáreň a planetárium v Prešove

Zodpovedný: Štefánia Lenzová - riaditeľka KHaP

Náklad: 1000 výtlačkov

Autor: Z. Stuchlík

Odborný posudok: RNDr. J. Zverko, CSc.

Nepredajné !

---