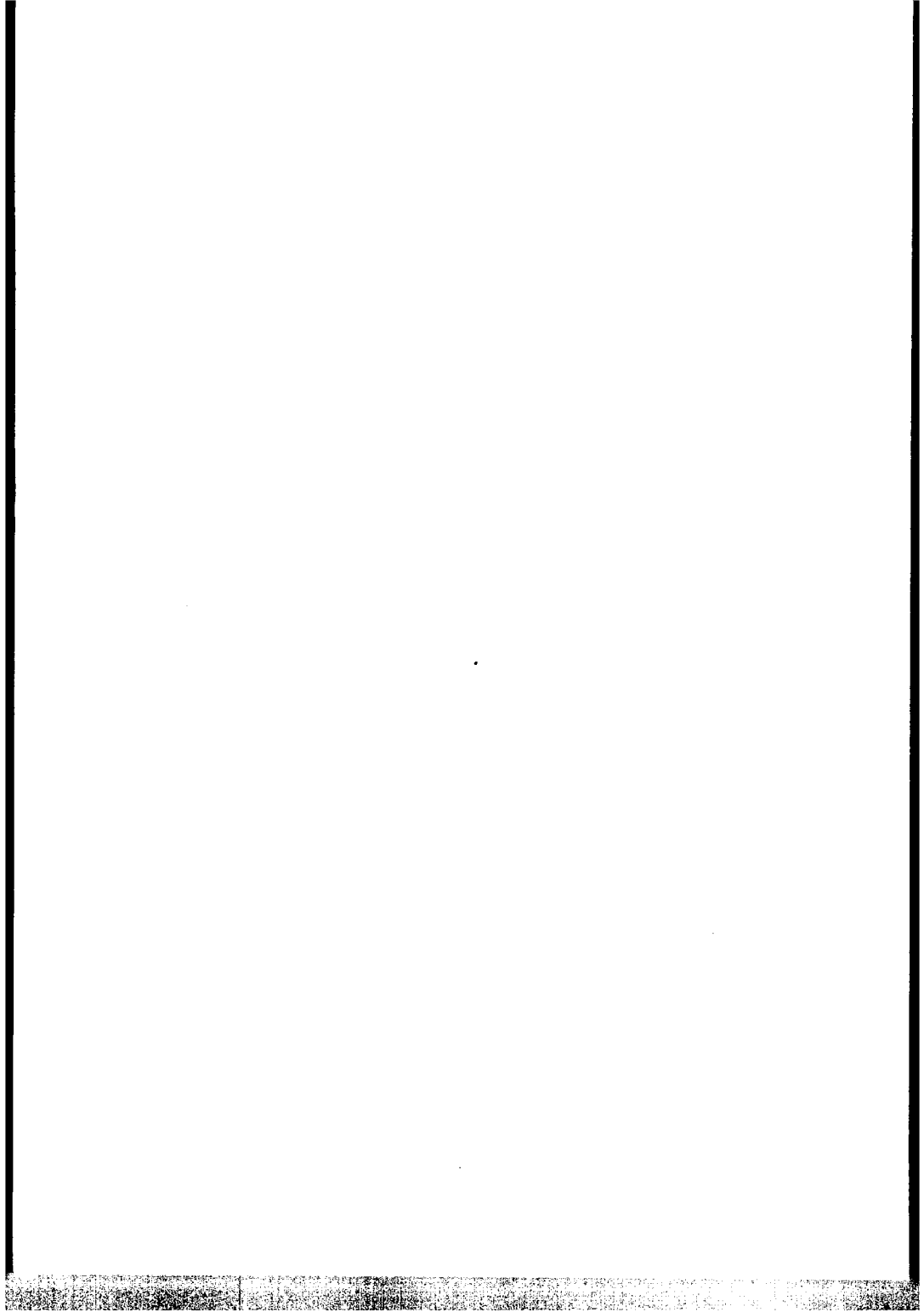


KOSMICKÉ ROZHLEDY

ROČNÍK 22 (1984) ČÍSLO 3

NEPERIODICKÝ VĚSTNÍK ČESKOSLOVENSKÉ ASTRONOMICKÉ SPOLEČNOSTI PŘI ČSAV



KOSMICKÉ ROZHLEDY, neperiodický věstník Československé astronomické společnosti při Československé akademii věd

ročník 22 (1984)

číslo 3

J. B. Zeldovič

Proč se vesmír rozpíná

Motto:

"Každý člověk si může vymyslet lidi obrácené naruby, světy podobné čince nebo odpudivou gravitaci. Aby tyto fantazie byly zajímavé, je nutné je přenést do každodenního života a z vyprávění striktně vyloučit ostatní zázraky."

H.G. Wells

Výbuch chemický a velký třesk. Shody a rozdíly

Rozpínání vesmíru je zcela přesvědčivě prokázáno. Asi před 15 miliardami let došlo k velkému třesku. Proč však k němu došlo? V čem se shoduje velký třesk s výbuchy, s nimiž se setkáváme v pozemských podmínkách, a v čem se od nich liší?

Představme si náboj s výbušninou, např. s tritolem. Je to složitá sloučenina uhlíku, dusíku, vodíku a kyslíku. Její energie je větší než energie stejných prvků jinak seskupených (do molekul CO, H₂O, CO₂, H₂, N₂). Chemická reakce začne v důsledku místního zahřátí a šíří se do celého náboje. Během několika mikrosekund se náboj změní na produkty reakce - tj. na horkou směs plynů, které se ještě nerozpínají. Produkty reakce jsou v tomto okamžiku pod tlakem desítek gigapascalů.

V další etapě začíná rozpínání plynů, tj. proces, který označujeme jako výbuch. Hnací silou je rozdíl tlaků produktů reakce a okolního vzduchu. Právě rozdíl tlaků roztrhává obal náboje a uděluje úlomkům zrychlení. Produkty reakce se rozpínají, zmenšuje se jejich hustota a klesá teplota. Odpovídajícím způsobem se zmenšuje i tlak. Při výbuchu

náboje v atmosféře se objem zaplněný produkty reakce zvětšuje, dokud se tlak nevyrovná s atmosférickým tlakem. (Krátkodobě může být tlak menší než atmosférický.) Vzduchem se šíří rázová vlna.

Při výbuchu ve vakuu, ve vesmíru, pokračuje rozpínání neomezeně. Každý úlomek a každá částice vytvořená při reakci získá v době působení tlaku určitou rychlost a potom se teute rychleší dále rozlétají. Veškerá energie výbuchu se změní v kinetickou energii rozpínající se látky.

Nezastavil jsem se u popisu chemického výbuchu jenom proto, že jsem se mnoho let zabýval právě takovými procesy. Podstata věci je v tom, že je opravdu velmi pečuné srovnání chemického výbuchu (který známe do všech detailů) a velkého třesku.

Všimneme si zpočátku shodných vlastností:

1. Výbuch - nebo přesněji rozpínání produktů výbuchu - vede k poklesu teploty. Hovoříme o horkém vesmíru a rozumíme tím, že v prých sekundách dosahovala teplota miliardy a stovky milionů stupňů, takže mohly probíhat jaderné reakce. Současně ale dnešní teplota vesmíru 3 K (tj. -270°C) je velmi nízká. Pokles teploty je zákonitý důsledek rozpínání.

2. Při rozletu částic s konstantní rychlostí (po chemickém výbuchu a době urychlování) se ukazuje, že dráha \bar{r} proběhnutá každou částicí se bude s dobrou přesností rovnat rychlosti částice znásobené časem t

$$\bar{r} = \bar{u} t$$

To však není nic jiného než Hubbleův zákon pro rozpínání vesmíru. Přepíšeme-li uvedený vztah na tvar $\bar{u} = (1/t) \bar{r}$ a označíme-li $1/t = H$ (Hubbleova konstanta), dostaneme $\bar{u} = H \bar{r}$.

Tak jsme dostali dvě základní shodné vlastnosti chemického výbuchu a velkého třesku: ochlazení při rozpínání a prostorové rozdělení rychlostí.

Znamená to tedy, že jsme pochopili velký třesk a že veškeré rozdíly mezi ním a chemickým výbuchem jsou pouze kvantitativní? (Mám na mysli rozměry, velikost tlaku a teplotu.) Opravdu můžeme říci, že vybuchující náboj má malé rozměry (od centimetrů do metrů), kdežto vesmír je velmi veliký. Při chemické reakci je maximální teplota několik tisíc stupňů a hustota několik megagramů na krychlový metr ($\text{Mg/m}^3 = \text{g/cm}^3$, pozn. překl.). Procesy probíhající za těchto podmínek počítáme za předpokladu, že před daným okamžikem byly podmínky ještě extrémnější.

V tom je ale podstata věci, k níž chci přivést čtenáře: Hlavní rozdíl mezi chemickým výbuchem a velkým třeskem není kvantitativní, ale kvalitativní. I když mají některé shodné vlastnosti, jsou příčiny obou procesů zcela odlišné. Neuvědomíme-li si tento rozdíl a neprozkoujíme-li ho hluboce, nemůžeme pochopit kosmologii. A tak začneme výčet rozdílů pozorovanými fakty, které "bijí do očí" nebo - přesněji - jež zachycují optické i rádiové teleskopy.

První rozdíl: Rozlétání po chemickém výbuchu nevede k rovnoměrnému rozložení látky po objemu. Především v atmosféře zůstává hranice mezi produkty výbuchu a vzduchem. Při výbuchu ve vesmíru existuje maximální rychlost rozlétání u_m . Za hranicemi poloměru $r_m = u_m t$ zůstává vakuum, ale ani v oblasti $r < r_m$ není hustota v daný okamžik obooně všude stejná. V různých bodech prostoru je i nestejná hustota pro různé částice látky.

Při velkém třesku je hustota stejná v každém okamžiku a neexistují žádné hranice. Tato konstantnost hustoty (neboli homogenita vesmíru) se potvrzuje pozorováními - např. součty vzdálených galaxií.

Druhý rozdíl: Hlavní odlišnost velkého třesku tkví v tom, že hubbleovské rozpínání vesmíru nelze objasnit rozdílem tlaků působících na nějakou částici nebo vrstvu plynu.

Počáteční podmínky velkého třesku

Teorie velkého třesku neboli - jinak řečeno - teorie horkého vesmíru nevysvětluje rozpínání. Do této teorie bylo rozpínání "importováno" na počátku. Jak říkají teoretikové - bylo "zajištěno rukama" cestou libovolného zadání počátečních podmínek. Na otázky, proč se vesmír rozpíná, proč se galaxie i dnes rozbíhají, odpověď spočívá v tom, že už po prvé sekundě (a možná i dříve) existovalo počáteční rozdělení rychlostí odpovídající rozlétání. Do počátečních podmínek musí být "vtěleno" i homogenní rozdělení prostorové hustoty. Jinak řečeno - rozlétání se děje setrvačností nebo - ještě přesněji - rozlétání probíhá v důsledku setrvačnosti bez ohledu na to, že je brzděno gravitací.

Naštěstí rozpínání podle Hubbleova zákona mění hustotu všude stejně. Proto je hustota funkcí času a nezávisí na souřadnicích. Pokud jde o gravitaci homogenní látky, ta zmenšuje rychlost rozletu libovolné dvojice částic. Nenarušuje však Hubbleův zákon. To znamená, že relativní rychlost každé dvojice částic je úměrná okamžité vzdálenosti mezi nimi. Koeficient úměrnosti neboli Hubbleova konstanta závisí na čase. Pojmu konstanta se dává takový smysl, že nezávisí ani na směru, ani na vzdálenosti uvažovaných částic.

Podobné úvahy umožňují dostat právě takový vesmír, jaký pozorujeme dnes, jestliže jsme do něho na počátku dosadili homogenní hustotu a hubbleovské rozdělení rychlostí. Proto odpověď na otázku uvedenou v záhlaví článku je téměř anekdotickou antitezí proslulého čechovovského "nemůže to tak být proto, že to tak nemůže být nikdy". V teorii velkého třesku řekneme: "Rozpíná se dnes proto, že se rozpínal vždycky".

Otázka, proč se vesmír rozpíná, však zůstává nezodpovězenou. Vede tedy k otázce, co podmiňuje nutné počáteční rozdělení rychlostí v horké plazmě.

Výše jsme uvedli, že vysoký tlak v plazmě nemůže vytvořit takové rozdělení rychlostí. V newtonovské mechanice

síla závisí na rozdílu tlaků (na gradientu tlaku). Totéž platí i o relativistické mechanice. V newtonovské teorii gravitace relativní zrychlení dvou částic zmenšuje rychlost jejich rozletání a závisí na hustotě látky zaplňující prostor mezi částicemi. V moderní relativistické teorii gravitace (tzv. obecné teorii relativity) se ve vzorci pro zrychlení nevyskytuje hustota, ale součet hustoty a trojnásobku tlaku děleného c^2

$$\rho + 3p/c^2,$$

kde c je rychlost světla. V plazmě je tlak veliký $p = \rho c^2/3$ a zrychlení se zdvojnásobuje ve srovnání se zrychlením látky stejné hustoty, ale bez tlaku.

Jenomže, třebaže jsme mluvili o zrychlení, ve skutečnosti jde o zápornou veličinu, protože gravitační síla zpomaluje rozletání látky. Proto počáteční rychlost každé dvojice částic musela být větší než současná. Vysoký tlak plazmy pouze zesiluje zpomalování rozletu.

Nakonec, jako v dobré detektivce, jsme dospěli těsně až ke správné odpovědi. Kladný tlak není schopen způsobit rozletání; je proto třeba vzít velký záporný tlak. Stanovíme-li, že v nějakém velmi raném období byla určitá hustota energie ϵ_0 (což odpovídá hustotě hmoty ϵ_0/c^2) a záporný tlak $p = -\epsilon_0 = -\rho_0 c^2$, potom veličina v einsteinovských gravitačních rovnicích byla záporná ($\rho_0 + 3p_0/c^2 = -2\rho_0$). Fyzikálně to znamená, že v takovémto stavu docházelo k rozdělování hmot gravitačními silami. Takto i z počátečního klidového stavu gravitační síly vytvoří stav všeobecného hubblovského rozpínání. A to je i moderní odpověď na otázku, která je v záhlaví článku.

Historie gravitačního rozdělování

Kdo je autorem této myšlenky? Přišla mi na mysl historka o žákovi, který se zamyslel nad čímsi vedlejším. Na nenadálou učitelovu otázku, kdo napsal Evžena Oněgina, odpověděl: "Na mou duši, já ne". Především mi dovolte připojit se k této odpovědi.

Ve své první práci z roku 1916, zabývající se kosmologií, Einstein vycházel z nejobecnějších (ne zcela osvědčených) úvah a hledal statické - tj. na čase nezávislé řešení. Ukázalo se, že výchozí rovnice takové řešení nemají. Einstein je doplnil o tzv. kosmologický člen úměrný konstantě Λ . Kladná hodnota odpovídala odpuzování, které kompenzovalo přitažlivost "obyčejné" látky. Zanedlouho W. de Sitter - holandský astronom a matematik - našel zajímavé exaktní řešení: Je-li $\Lambda > 0$ a nevyskytuje-li se ve vesmíru látka, bude se vesmír rozpínat, a to exponenciálně (tj. podle geometrické řady vzhledem k času). Odpovídá to rozdělování - tj. zrychlenému vzájemnému vzdalování každé dvojice testovacích částic umístěné do de Sitterova vesmíru. Velikost tohoto zrychlení je však malá. Vzrůst poloměru na dvojnásobek potřebuje vždy stejný, velmi dlouhý časový interval (ne méně než několik miliard let). Pozorování nepotvrzují de Sitterovo kosmologické řešení, aplikujeme-li je na dnešní vesmír.

Po několika letech (1922-1924) A.A.Fridman našel řešení

pro rozpínající se vesmír zaplněný látkou. Za dalších pět let E. Hubble objevil rudý posuv spektrálních čar ve spektrech vzdálených galaxií. Rozpínání vesmíru bylo s konečnou platností dokázáno. V teorii rozpínajícího se nestacionárního vesmíru je zavedení kosmologického členu Λ možné, ale nikterak není nutné. Podle principu jednoduchosti (nešlo někdy o jednoduchost, která spíš škodí než prospívá?) zapoměla většina teoretiků na kosmologický člen a trvalo to 40 let. Tento člen práve nebyl nutný. Opětovný zájem vznikl roku 1967. Zdálo se, že z rozdělení kvasarů (práce G. Burbidge) vyplývá nerovnoměrné rozpínání vesmíru. E. Salpeter, V. Petrosjan a P. Szekeres v USA a N. S. Karďašov a I. Š. Šklovskij v SSSR vysvětlili Burbidgeovy výsledky zavedením konstanty Λ .

Když jsem se zajímal o tyto práce, také jsem se začal orientovat ve fyzice kosmologického členu. Pochopil jsem, že se vlastně jedná o hustotu energie vakua. Kladné hustotě energie vakua musí odpovídat záporný tlak $p_v = -c^2 \rho_v$. V kosmologii dnešního vesmíru by dokonce velmi malá hodnota Λ způsobovala velké defekty. Kosmologická fakta tudíž svědčí o malé hodnotě Λ . Pochopil jsem, že z hlediska kvantové fyziky je malá hodnota Λ netriviální. V posledních letech se touto otázkou intenzivně zabývá S. Hawking. Problém, proč je malý (nebo nulový) kosmologický člen v nejnižším energetickém stavu - tj. ve vakuu, jež nás obklopuje - nebyl do současnosti (konec roku 1983, pozn. překl.) řešen.

Rozvoj teorie pole vedl k myšlence o možnosti existence neobyčejného stavu vakua, při němž kosmologický člen může nabývat velkých hodnot. Ukázalo se, že existují takové stavy, při nichž nastává odpuzování. V kvantové teorii samo zakřivení prostoru nutně vytváří určitou hustotu energie a tlak ve vakuu. A. A. Starobinskij si všiml takových řešení, v nichž hustota energie a tlak ve vakuu vytvářejí zakřivení prostoročasu. Naopak toto zakřivení vytváří potřebnou hustotu energie a tlak. Ve všech těchto případech získáváme kosmologické řešení s exponenciálním inflačním rozpínáním.

Zde je třeba poznamenat, že už koncem šedesátých let E. B. Gliner předpokládal, že při stlačování musí v limitě vznikat stav se záporným tlakem. Nyní víme, že takový stav lze dostat jen během rozpínání. Nezávisle na tomto zprůsňení jsou však v pracích E. B. Glinera, I. G. Dymnikové a L. E. Gureviče (1975) zcela přesné poznatky, týkající se gravitačního odpuzování při záporném tlaku jakožto příčiny rozpínání, exponenciálního řešení a kosmologických paradoxů.

Roku 1981 (bez znalosti prací leningradských fyziků) A. Guth z USA formuloval teorii inflačního vesmíru v moderním jazyce skalárního pole.

V současnosti se buduje teorie spontánního vzniku vesmíru. Pouze takovou kosmologickou teorií, která v sobě zahrnuje proces vzniku, lze považovat za úplnou. V takové teorii inflační stadium představuje nejdůležitější etapu mezi vznikem vesmíru a "plazmovou érou", které kvalitativně rozumíme.

Jeden důležitý problém je spojen s nezachováním počtu

baryonů. Jenom díky němu si můžeme představit, že po svém vzniku vesmír baryony neobsahoval, kdežto dnes je ve vesmíru látka a téměř není antilátka. Vznik látky (původně to byla převaha látky nad antilátkou) se datuje do počátku plazmové éry, kdy byly teploty okolo 10^{26} K.

Tak vznikají obrysy úplné teorie vysvětlující vznik vesmíru, jeho rozpínání a strukturu látky zaplňující vesmír dnes. Byly nalezeny zákony velmi důležité stapy vývoje vesmíru, během níž se jeho rozměry zvětšily tolikrát (10^{30} krát), kolikrát se zvětšily během celého následujícího plazmového vývoje. Bylo nalezeno i názorné a jasné vysvětlení nejdůležitějšího faktu - rozpínání vesmíru. Konečně byly formulovány podmínky, jimž musí vyhovovat předchozí etapa. Navíc jde o podmínky rozumné a ne vyumělkované.

Současnost a budoucnost vesmíru

Bez ohledu na detailní rozbor příčin záporného tlaku z předkládaného obecného schématu vzniku a rozpínání vyplývají některé důsledky pro dnešní vesmír. Hlavní z nich spočívá v tom, že vesmír je uzavřený. To znamená, že průměrná hustota látky v něm je větší než kritická. Jenomže hustota "obyčejné" látky - tj. protonů, jader a elektronů - je mnohonásobně větší (desetkrát až padesátkrát) než kritická. Proto je potřebná "skrytá hmota" v jakékoliv formě. A tak úvahy o vzniku vesmíru dávají nové argumenty pro skrytou hmotu a zpřesňují odhady její střední hustoty.

Další důsledek se týká stáří vesmíru. Při kritické hustotě je stáří rovno $2/3$ veličiny $1/H$, kde H je dnešní hodnota Hubbleovy konstanty. Při $H = 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ je stáří kolem 13 miliard let, při $H = 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ je to 6,7 miliard let. Druhá hodnota je poněkud malá a není v souladu s astronomickými odhady stáří hvězdokup a se stářím vesmíru určeném z celkového množství radioaktivních prvků.

Můžeme říci, že důvody vysoké teorie se tvrdě vměšují do dlouhodobého sporu mezi přívrženci $H = 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ a těmi, kteří se domnívají, že $H = 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, a to ve prospěch prvé varianty.

Pro mne má obecnější argument větší váhu než složitá a pracná pozorování nutná pro přímé určení dnešní hodnoty H .

Konečně, současná inflační teorie předpovídá určitý tvar počátečního spektra poruch homogennosti vesmíru. Je totožné s rovinným spektrem, které řada autorů (včetně mne) předpokládali už dříve, když zobecňovali pozorování. Bohužel však teorie vzniku galaxií nestojí dosud na pevných základech; neznáme totiž vlastnosti všech částic, které vytvářejí skrytou hmotu. Mají klidovou hmotnost neutrino? Neexistují další skryté (= slabě interagující) částice s klidovou hmotností? Nebo další pole?

Dnes "nově zní" i otázka, jaká bude vzdálená budoucnost vesmíru. Je známo, že pro $\Lambda = 0$ uzavřený vesmír v budoucnosti změní rozpínání na smršťování a nakonec se zhroutí. Novost spočívá v tom, že poloměr inflačního vesmíru je pravdě-

podobně mnohonásobně větší než pozorovaná oblast vesmíru (tj. větší než horizont). Odpovídá to předpokladu, že střední hustota sice převyšuje kritickou (Q_k), ale jen velmi málo - např. $\bar{Q} = Q_k (1 + 10^{-10})$. Pruh nad \bar{Q} značí střední hodnotu. Střední hustota je však idealizovaný pojem. Místní hustota v měřítku pozorované části vesmíru se od střední hodnoty liší o $\pm 10^{-4}$ své velikosti. Takový odhad vyplývá ze sledování reliktního záření, které svrchu omezuje fluktuace teploty (nejsou větší než 10^{-3}) a z existence struktury vesmíru, které omezují fluktuace zdala (nejsou menší než 10^{-6}). Při takovém vzájemném vztahu mezi střední hustotou a fluktuacemi je celkem pravděpodobné, že se nalzáme v oblasti, kde (přinejmenším do horizontu) je hustota menší než kritická. To znamená, že se nalzáme tam, kde např. $\bar{Q}_1 = (1 - 10^{-4} + 10^{-10}) Q_k < Q_k$. Téměř stejnou pravděpodobností je charakterizována i "opačná" situace - že se nalzáme v oblasti, kde $\bar{Q}_2 = (1 + 10^{-4} + 10^{-10}) Q_k > Q_k$. Zde \bar{Q}_1 a \bar{Q}_2 jsou střední hodnoty vzhledem k oblastem 1 a 2, které jsou sice veliké (řádově 10 miliard světelných let), ale stále malé ve srovnání s vesmírem.

Jaký osud nás čeká v prvním případě? Kdybychom se omezili na měření uvnitř horizontu a dosáhli přesnosti dovolující zjistit 0,01 % hustoty, mohli bychom naivně říci: Sláva, vesmír je otevřený a bude se rozpínat trvale.

Avšak teoretik, který ví, že vesmír jako celek je uzavřený - tj. ví o nadbytku $10^{-10} Q_k$, zchladí naše nadšení. Řekne, že během dostatečně dlouhé doby (řádově 10^{20} let) se látka z oblastí s $\bar{Q} > Q_k$ "přestěhuje" do té oblasti, kterou pozorujeme dnes a rozpínání se přesto změní na smršťování. K tomuto závěru vedou zjednodušené výpočty L.P. Griščuka a autora článku.

Dnes bereme veličinu 10^{-10} jako příklad "spadlý shůry". Můžeme doufat, že během několika let fundamentální teorie umožní toto číslo zpřesnit. Přitom se rozumí samo sebou, že se obecné představy o raném vesmíru nezmění.

Jeden velmi uštěpačný teoretik řekl o lidech, kteří se zabývají kosmologií (a možná celou astrofyzikou nebo fyzikou elementárních částic): "Tito lidé nikdy nepochybuji, i když často chybují". Podle mého hlubokého přesvědčení stanovení hypotéz a jejich objektivní prověrka - to je široká cesta pro rozvoj každé vědy. Pouhé shromažďování faktů a skeptické vyhýbání se jakýmkoli hypotézám nevede k žádným výsledkům.

Před lidmi jako celkem a možná před každým jednotlivcem je ještě mnoho času. Tento čas bude třeba pro rozvoj vědy a konkrétně kosmologie.

Podle Priroda No 2/1984 volně přeložil P. Andrie

O původu sil

Souhrn

Nedávné pokroky ve fyzice fundamentálních interakcí slibují, že se nám do jisté míry podaří porozumět "hluboké" podstatě přírodních sil. Konkrétně tzv. teorie velkého sjednocení (Grand Unified Theories - GUTs) převádějí vazbové konstanty, účinné dosahy a vazbové kapacity tří přírodních sil (jaderné, elektromagnetické, slabé) na fundamentálnější parametry, jako jsou multiplicita grupy a stupeň spontánního narušení symetrie.

Na druhé straně, jednoduché fyzikální argumenty ukazují, že rozměry a hmotnosti všech "organizovaných objektů" ve vesmíru mohou být (přibližně ...) vyjádřeny prostřednictvím mocnin poměrů vazbových konstant, a to při určitých zadaných účinných vzdálenostech a vazbových kapacitách.

Dále, "antropický princip" poskytuje některé argumenty ve prospěch tvrzení, že inteligentní tvorové mohou vzniknout pouze ve vesmírech s vazbovými konstantami, jejichž hodnoty se příliš neliší od hodnot vazbových konstant v našem vesmíru (spekulacemi o exotických formách života, souvisejících např. s dislokacemi krystalů, se zde nebudeme zabývat).

Porozumění tomu, proč jsou přírodní síly takové, jaké jsou, se tak jeví jako velmi významné pro pochopení celého vesmíru.

Popis a vlastnosti sil

Přírodní síly bývá zvykem charakterizovat třemi hlavními vlastnostmi, ačkoliv tyto vlastnosti ve skutečnosti nejsou navzájem nezávislé.

A. Zaprvé, je to velikost vazbové konstanty. Je vyjádřena buď konstantou g nebo bezrozměrným parametrem $\alpha = g^2/\hbar c$, t.j. bezrozměrným číslem. Známým příkladem je elektromagnetická síla, kde g je elementární elektrický náboj (obvykle označovaný e) a $\alpha_{em} = e^2/\hbar c = 1/137$ se nazývá konstantou jemné struktury.

B. Zadruhé, je to účinný dosah síly, popisující jak "daleko" síla působí od svého zdroje. Pro elektrickou sílu nebo pro gravitaci platí zákon, že ubývá s kvadrátem vzdálenosti, známý již z doby Newtona a Ampéra. Účinný dosah je rovněž charakterizován silou integrovanou přes kouli o poloměru r , která obklopuje náboj (zdroj síly)

$$\int_{\text{sféra}} \mathbf{F} \cdot d\Omega = f(r)$$

V případě, že síla ubývá s druhou mocninou vzdálenosti, integrál nezávisí na poloměru. Tato skutečnost se označuje jako "nekonečný dosah". Existují případy, které budou diskutovány dále, kde integrál je funkcí poloměru, přičemž je úměrný

$\exp(r/r_0)$. Veličina r_0 může být např. Comptonovou vlnovou délkou částice o hmotnosti M_V , představující hmotnost částice zprostředkující danou interakci (výměnná částice). Může být rovněž Debyeovou délkou, pokud je náboj obklopený jinými náboji. Jiným způsobem popisu účinného dosahu je charakteristika prostřednictvím efektu redukce intenzity síly při pozorování z větší vzdálenosti. Toto se nejlépe provádí pomocí výpočtu objemového integrálu s danou silou souvisejícího potenciálu až do vzdálenosti r a porovnáním výsledku se stejným integrálem počítaným pro případ nekonečného účinného dosahu. Efektivní intenzita je pak součinem reálné intenzity a tohoto poměru.

C. Zatřetí, je zde ještě vazbová kapacita. Může daná síla vytvářet vázané systémy? Vazbová kapacita je numericky vyjádřena poměrným hmotnostním schodkem (defektem) $\Delta M/M$, kde ΔM je rozdíl hmotnosti mezi vázaným systémem a součtem M hmotností všech složek tohoto systému. Tato hodnota souvisí s α a rovněž s M_V (hmotnost výměnných částic) prostřednictvím tlumení dosahu síly.) V případě příliš velké M_V by neexistovala žádná vazba.

Recept na vesmír

Popis všech fyzikálních vlastností vesmíru začíná sestavením Lagrangeovy funkce \mathcal{L} , do které se seutřídí vše, co je nutné k vysvětlení všech pozorování. Tvar Lagrangeovy funkce podléhá požadavku, že funkce musí být kalibračně invariantní vzhledem k lokální transformaci v prostoru $x - t$ a ve všech vnitřních prostorech. Pro každou sílu s indexem i je potřebná jedna Lagrangeova funkce \mathcal{L}_i a

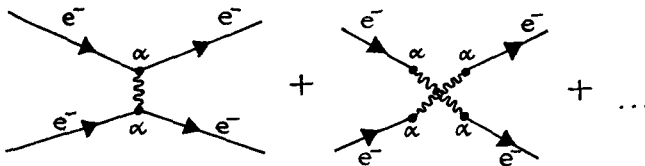
$$\mathcal{L} = \sum_i \mathcal{L}_i.$$

Ve velmi schématickém vyjádření má Lagrangeova funkce \mathcal{L}_i tvar

$$\mathcal{L}_i = g_i J_N(\vec{x}) Q^{N \times N} J_N^T(\vec{x}),$$

kde g_i je vazbová konstanta zavedená v tomto článku již dříve. J_N představuje řádkový vektor N "objektů", které podléhají dané síle. Těchto N objektů je prvky grupy, přičemž tyto prvky mohou procházet vzájemnými transformacemi. $Q^{N \times N}$ je "generalizovaný náboj", který je nositelem interakce (transformace) mezi prvky drupy. Je to matice tvaru $N \times N$.

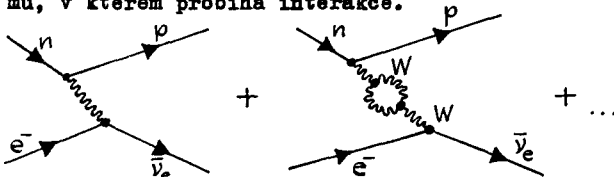
Kalibrační invariance Lagrangeovy funkce vyžaduje existenci n výměnných částic, které jsou nositeli síly (transformace). Pro $N=1$ je $n=1$; pro $N>1$ je $n=N^2 - 1$. N částic může vzájemně interagovat prostřednictvím jedné, dvou nebo libovolného počtu výměnných částic. Pravděpodobnost jevu je součtem pravděpodobností výměny jedné, dvou atd. částic. První člen je úměrný α^2 (g^4), druhý α^4 , atd., to znamená že exponent u α je roven počtu "vrcholů" v odpovídajícím Feynmanově diagramu:



Otázka: je $\alpha \ll 1$? Pokud ano, je možné využít teorie perturbací a první člen je dominantní. Pokud ne, život je tvrdý

Dimenze grupy

Hodnota N , tj. dimenze grupy popisující danou sílu, hraje dominantní roli v určení vazbové konstanty této síly. Je to důsledek dvou efektů: 1. polarizace vakua a 2. náboje výměnné částice, které jsou dány samy o sobě požadavkem kalibrační invariance. Pokud $N=1$ (elektrický náboj), je $n=1$ (foton), jako je tomu v teorii elektromagnetismu. Náboj Q je zde skalárem, interakce nemění podstatu částic: např. elektron při vyzáření fotonu nemění svůj náboj. Jinými slovy, foton nenesé žádný náboj. Pokud $N=2$, pak $n=3$ (jako je tomu u slabé interakce), a pokud $N=3$, je $n=8$ (jako je tomu v kvantové chromodynamice), výměnné částice (bosony W nebo gluony) jsou samy o sobě nabitě (slabý náboj resp. barevný náboj) a reagují samy mezi sebou, což zvyšuje "prostorový náboj" objemu, v kterém probíhá interakce.

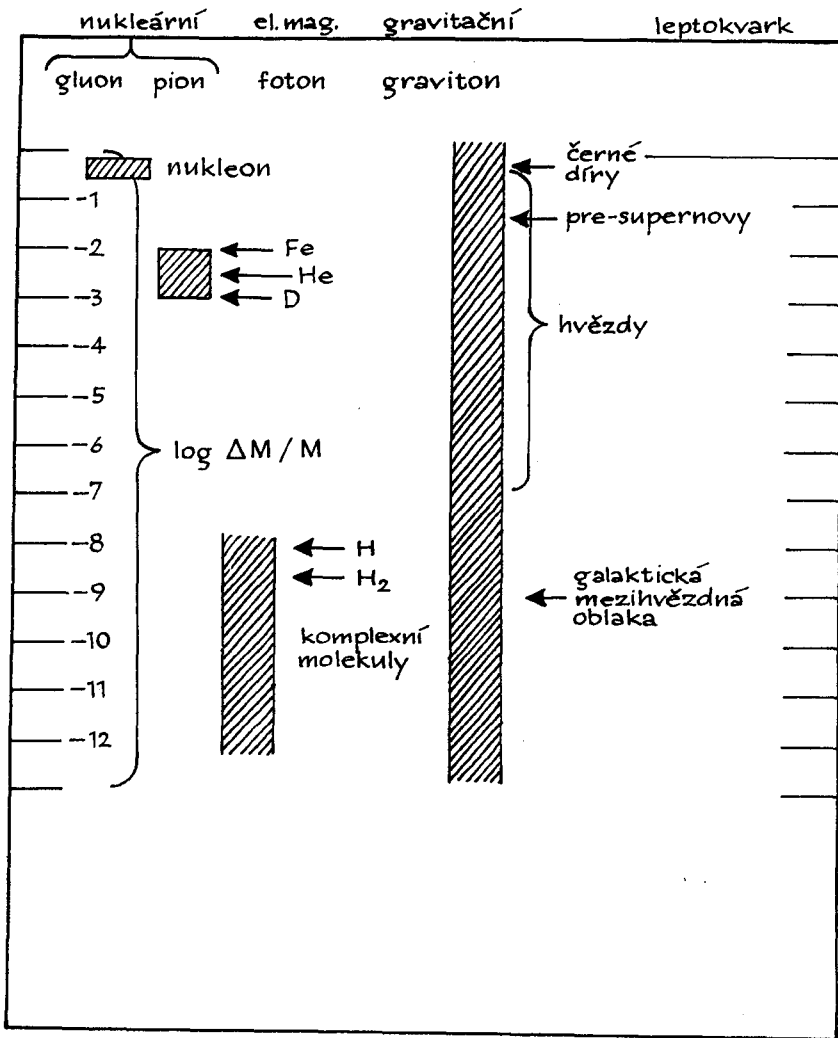


Jak tyto fakty ovlivňují g ? Pro případ elektromagnetismu ($N=1$), existence virtuálních pozitron-elektronových párů kolem fixovaného elektrického náboje vytváří "polarizaci" vakua. Efektivní náboj, měřený ve vzdálenosti r , klesá v důsledku stínícího efektu virtuálních párů. Pokud napíšeme

$$F_{1,2} / \hbar c = \alpha_{em} Q_1 Q_2 / r_{12}$$

s celočíselnými Q_1 a Q_2 (podle definice), pak α_{em} již nadále není konstantní. Pokud se přiblížíme k náboji, je při zvětšení energie stínění méně efektivní a α_{em} roste. To však v atomové fyzice není pozorováno, jelikož α_{em} vždy měříme ve vzdálenostech $\approx 10^{-8}$ cm. Jev je však pozorován ve fyzice vysokých energií. V současnosti se věří, že při velmi vysokých energiích α_{em} vzrůstá na 2×10^{-2} .

Co se stane při $N > 1$? Hodnotu α jako funkci vzdálenosti mění dva odlišné jevy (α je samozřejmě též funkcí energie): Zprvé, polarizace vakua. obdobně jako u elektro-



Obr. 1 - Vazbové kapacity

magnetismu. Páry virtuálních kvarků-antikvarků budou stínit libovolný reálný kvark. Ale, zadruhé, fakt, že výměnné částice (intermediární bosony, gluony) jsou samy o sobě nabitě, bude zvyšovat efektivní náboj reálných částic. Například, kvark bude oblakem gluonů se stejným (většinou stejným) barevným nábojem, jaký má sám. Tento barevný náboj se bude jevit jako rostoucí se vzdáleností v důsledku stále většího počtu gluonů vstupujících do oblaku obklopujícího daný kvark.

Kvantitativně se ukazuje, že druhý efekt (gluonový oblak) je silnější než efekt první (polarizace vakua), takže efektivní α klesá s rostoucí energií. Navíc, druhý efekt je silnější pro $N=3$ než pro $N=2$ (takže odpovídající α klesá ještě rychleji).

Myšlenka velkého sjednocení vychází z faktu, že tři vazbové konstanty, jak se zdá, konvergují v oblaku velmi vysokých energií ($E \approx 10^{24}$ eV) k hodnotě $\alpha_{\text{GUT}} = 1/42$. Při těchto vysokých energiích by elektrony, neutrina a kvarky byly rovnocennými členy jedné grupy. V nejpopulárnější verzi má tato grupa pět rozměrů ($N=5$, $n=24$). Jedním důležitým důsledkem tohoto přegrupování je, že náboj odpovědný za interakci (matice 5×5) může transformovat kvark na lepton, tedy např. proton na elektron (+ další částice). Naštěstí doba života protonu je velmi dlouhá ($\sim 10^{31}$ let). Podobné jevy jsou nyní aktivně hledány.

Spontánní narušení symetrie

Požadavek kalibrační invariance Lagrangeovy funkce byl dlouho chápán jako požadavek, že výměnné částice musejí mít nulovou klidovou hmotnost, jakou mají např. foton a gluony. Později však bylo ukázáno, že za cenu zavedení nových skalárních částic (označovaných jako Higgsovy bosony), je možné připustit existenci hmotné výměnné částice prostřednictvím "spontánního narušení" symetrie Lagrangeovy funkce transformací. Pro nás bude základní otázkou: jaká je hmotnost výměnných částic vytvořených tímto mechanismem? Z Heisenbergovy relace neurčitosti vyplývá, že virtuální částice o hmotnosti M_V může existovat maximálně po dobu $(M_V c^2/\hbar)^{-1}$, přičemž za tuto dobu může daná částice urazit dráhu maximálně $\hbar/M_V c$, což je právě Comptonova délka této částice. Výsledným efektem je redukce dosahu síly přibližně na tuto hodnotu (v kontrastu s případem částic o nulové klidové hmotnosti, které se mohou šířit do nekonečna).

Pro sílu s $\alpha \ll 1$ (tj. kde je v rozvoji perturbací významná pouze výměna jedné výměnné částice), je možné ukázat, že potenciál může mít jednoduchý Yukawův tvar

$$V \sim \alpha \exp(-r/\lambda_c) / r,$$

nebo α/r pro případ elektromagnetismu, což vede k již dříve zmíněnému nekonečnému dosahu síly.

V dalším přejdeme k vazbovým kapacitám různých sil. Nejdříve zde napíšeme Hamiltonovu funkci H síly jako funkci