

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

A. D. Černin

Neutrína, Slunce a vesmír

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 26 (1981), No. 3, 155--165

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138868>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1981

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

dem k euklidovským pohybům a na borelovských množinách splývá s Lebesguovou mírou (tato konstrukce využívá komutativnosti grupy  $SO_2$ , což neplatí při  $n \geq 3$ ).

K paradoxu tedy nedochází v  $\mathbb{R}^2$ . Jestliže však v definici  $X \equiv Y$  nahradíme euklidovské pohyby přímými afinními transformacemi, které zachovávají Lebesguovu míru, pak paradox nastává i v dvourozměrném případě.

Nehledali jsme zde konstrukci, která by byla co nejvíce ekonomická. Raphael Robinson ukázal  $S \equiv S' \cup S''$  s tím, že každá sféra  $S', S''$  je rozdělena na tři části.

V jednorozměrném případě řekneme, že  $A \geq B$ , jestliže existuje 1-lipschitzovská bijekce  $A$  na  $B$ , a  $A \underset{f}{\geq} B$  znamená, že existují rozklady  $(A_1, \dots, A_n)$  a  $(B_1, \dots, B_n)$  množin  $A$  a  $B$  takové, že  $A_i \underset{f}{\geq} B_i$  pro všechna  $i$ . Zde neplatí  $[0,1] \underset{f}{\equiv} [0,10]$ , ale platí  $[0,1] \underset{f}{\geq} [0,10]$ .

## Literatura

F. HAUSDORFF: *Grundzüge der Mengenlehre*. Leipzig (1914).

S. BANACH, A. TARSKI: *Sur la décomposition des ensembles de points en parties respectivement congruentes*. Fund. Math. 6 (1924) 244–277.

S. BANACH: *Sur le problème de mesure*. Fund. Math. 4 (1923) 7–33.

J. VON NEUMANN: *Zur allgemeinen Theorie des Massen*. Fund. Math. 13 (1929) 143–173.

# Neutrino, Slunce a vesmír

A. D. Černin. Leningrad

Fyzika elementárních částic a astrofyzika – dvě vědecké oblasti, které se zabývají přírodními jevy nejmenších a největších prostorových měřítek – odhalují stále více jevů svědčících o hlubokých vzájemných vnitřních vazbách. Je neustále zjevnější, že vlastnosti elementárních částic do značné míry určují stavbu a vývoj hvězd, galaxií a celého vesmíru. Na druhé straně zastoupení jednotlivých elementárních částic a dokonce i jejich původ jsou určeny bouřlivými procesy během krátkého okamžiku po počáteční singularitě.

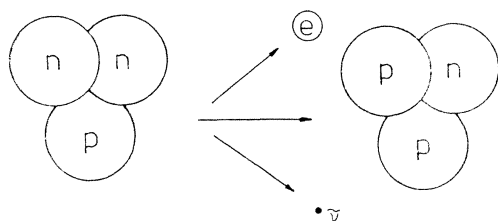
Nejnovější objevy, mezi nimi především určení klidové hmoty neutrino, které bylo americkými a sovětskými vědci oznámeno na jaře 1980, nás přiblížily k porozumění nejhlubších zákonitostí vesmíru. Ukazuje se, že odpověď na otázku, zda vesmír je

konečný nebo ne, souvisí s tím, co je známo o nejjednodušší elementární částici, neutrinu. Na novém, podstatně modernějším základě, než tomu bylo doposud, můžeme hledat odpovědi na takové fundamentální otázky astrofyziky, jako jsou vznik největších struktur ve vesmíru a podstata „skryté hmoty“.

## 1. Klidová hmota neutrina

Historie neutrina začíná již ve 30. letech tohoto století, ale sotva tehdy někdo předpokládal nějaký vztah mezi těmito těžko registrovatelnými elementárními částicemi a vesmírnými tělesy. V té době bylo při fyzikálních pokusech s rozpadem radioaktivních jader – např. jádra tritia (těžké vody) – stanoveno, že tato jádra se rozpadají na elektrony, avšak kromě toho ztrácejí jistou část své energie. Wolfgang Pauli se domníval, že část energie odnášejí nějaké neznámé částice, které při experimentu zůstávají nezaregistrovány (obr. 1). Nemají elektrický náboj, a proto jsou podobné neutronům (jejichž objev těsně předcházel), i když jsou mnohem lehčí. Na návrh Enrica Fermiho byly pojmenovány podle italštiny neutrina, tj. malé neutrony.

Obr. 1. Radioaktivní rozpad tritia, které se skládá z protonu a dvou neutronů, na jádro hélia, které se skládá ze dvou protonů a jednoho neutronu; elektron a antineutrino.



Následující výzkumy umožnily objasnit některé jejich další vlastnosti; základní z nich je, že málo interagují mezi sebou a s jinými elementárními částicemi. Na počátku 50. let se je podařilo při pokusech na urychlovači elementárních částic bezprostředně zaznamenat a v 70. letech byla zaregistrována neutrina vesmírného původu – neutrina pocházející ze Slunce.

Avšak až do poslední doby zůstávalo záhadou, zda neutrina mají klidovou hmotu. Ve všech experimentech 30. a 40. let se nepodařilo jejich klidovou hmotu ani změřit ani odhadnout, bylo možno pouze nepřímě usuzovat, že je v každém případě mnohokrát menší než hmota elektronu, avšak nebylo vyloučeno, že může být také rovna nule. Mnozí teoretičtí fyzikové se pokoušeli dokonce postulovat rovnost hmoty neutrina nule, aby tato vlastnost přiblížila neutrina podle jejich mechanických, tj. pohybových vlastností k dobře známým částicím bez klidové hmoty – fotonům, kvantům světla – a tím by příslušné rovnice byly jednodušší a také krásnější.

V květnu 1980<sup>1)</sup> změřila skupina sovětských experimentálních fyziků, vedená V. A.

<sup>1)</sup> Pozn. překladatele: Ve stejné době (duben 1980) oznámil F. REINES na zasedání Americké fyzikální společnosti výsledky experimentů s detekcí neutrin na jaderném reaktoru v Savannah River (USA). Tyto výsledky ukazují, že neutrinum má nenulovou klidovou hmotu, rovnou přibližně  $13 \text{ eV}/c^2 = 2,3 \cdot 10^{-35} \text{ kg}$ .

Ljubimovem z Ústavu experimentální fyziky Akademie věd SSSR, klidovou hmotu neutrína. V tradičním pokusu neutrinové fyziky s rozpadem tritia se neutrína chovala jako částice, které mají klidovou hmotu nerovnou nule, přibližně třicetisíckrát menší, než je hmota elektronu<sup>2</sup>), tím se neutrino stává nejléčší známou částicí. Zdá se, že tento objev povede k přehodnocení mnohých představ v teorii elementárních částic a velmi vážné důsledky z něho vyplývají i pro astrofyziku.

## 2. Sluneční neutrína

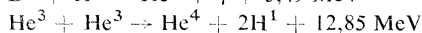
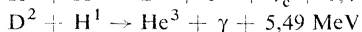
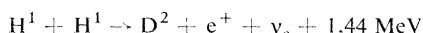
Neutrína vznikají nejen při radioaktivním rozpadu, ale i při jiných jaderných reakcích. Slučování vodíku na hélium, ke kterému dochází v jádrech Slunce a hvězd, je zdrojem světla nebeských těles<sup>3</sup>). Na základě teorie jaderných reakcí je možno vypočítat, kolik neutrin se rodí v jádře Slunce společně se světlem, a tím i navrhnout testovací experiment, tzv. měření toku slunečních neutrin. Tento experiment byl uskutečněn v posledních letech ve Spojených státech<sup>4</sup>). Neutrína slunečního původu byla skutečně zaregistrována, avšak ukázalo se, že intenzita toku je asi třikrát menší než teoretická předpověď. Tento nesouhlas teorie s experimentem vrhal stín na mnohé z toho, co se dříve zdálo naprosto jasné, a mnozí vyjadřovali podezření, že nerozumíme něčemu velmi důležitému ve fyzice Slunce a hvězd. Dokonce se připouštělo, že procesy, které produkují světlo hvězd, možná ani nejsou jaderné reakce, ale zcela neznámé fyzikální procesy.

Důmyslné řešení navrhl před několika lety jeden ze zakladatelů neutrinové fyziky, Bruno Pontecorvo<sup>5</sup>). Podstata spočívá v tom, že v přírodě existují tři druhy neutrin, která se liší svou schopností reagovat s různými elementárními částicemi: elektronové neutrino,  $\mu$  mezonové neutrino a tau neutrino. V jádře Slunce vznikají elektronová neutrína a právě na tento druh neutrin je citlivý experiment s „neutrinovým dalekohledem“. Co když však neutrína mění během svého letu ze Slunce svůj druh, např.

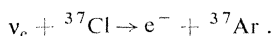
<sup>2</sup>) Přesněji: je pravděpodobné, že hmota neutrína leží v mezích od  $10 \text{ eV}/c^2$  do  $40 \text{ eV}/c^2$ , tj. od  $1,8 \cdot 10^{-35} \text{ kg}$  do  $7,1 \cdot 10^{-35} \text{ kg}$ .

Pozn. překladatele: Pozoruhodná je shoda mezi výsledky sovětské a americké skupiny. Jde o naprosto odlišné experimenty.

<sup>3</sup>) Pozn. překladatele: Např. p–p cyklus:



<sup>4</sup>) Pozn. překladatele: Jedná se o zachycování neutrin v bazénu naplněném chlórem. Chlór se po zachycení neutrína mění na agron:



Teorie předpovídá intenzitu toku neutrin rovnou 4,7 SNU (Solar Neutrino Unit), avšak výsledkem tohoto experimentu je hodnota  $(1,7 \pm 0,4) \text{ SNU}$ .

<sup>5</sup>) Pozn. překladatele: Např. BILENKY, S. M. PONTECORVO, B. Phys. Rep. 41, 225 (1978).

$v_e \rightarrow v_\mu$ ?<sup>6)</sup> Pak by měl být skutečně pozorovaný tok elektronových neutrin nižší než tok vycházející ze Slunce. Pokud dochází k „přechodu“ na tři různá neutrina, měl by být tok třikrát nižší.

Možnost vzájemných přechodů mezi neutriny různého druhu, tzv. oscilace neutrin, připouštějí fyzikální zákony pouze za podmínky, že neutrina mají klidovou hmotu.<sup>7)</sup> Pokud budou potvrzeny výsledky na jaderném reaktoru v Savannah River, které svědčí o existenci neutrinových oscilací, definitivně padnou veškeré pochybnosti o správnosti našich představ o zdrojích světla Slunce a hvězd.

### 3. Galaktické korony

Naše Galaxie společně s galaxií v Andromedě a s několika desítkami dalších utvářejí systém, který se nazývá místní kupa galaxií. Jiné dobře známé kupy galaxií jsou kupa v souhvězdí Panny nebo kupa v souhvězdí Vlasů Bereniky. Tyto kupy obsahují několik tisíc galaxií, které se pohybují charakteristickou vzájemnou rychlostí přibližně tisíc kilometrů za sekundu. Rozměr kupy galaxií je asi 100 000 světelných let. Pokud známe charakteristický rozměr a charakteristickou rychlost v kupě galaxií, můžeme pomocí viriálového teorému,<sup>8)</sup> který svazuje potenciální a kinetickou energii stacionárního dynamického systému, určit hmotnost dané kupy. Hmotnost kupy galaxií v souhvězdí Panny vypočítaná tímto způsobem je rovna řádově  $10^{15} M_\odot$ .

Výše zmíněný dynamický odhad hmoty galaxií předpokládá, že jde o stacionární systémy. Tato hypotéza však není doposud zcela potvrzena a pochybnosti vznikají především proto, že dynamický odhad hmotnosti kup galaxií se neshoduje s odhadem založeným na měření jasností galaxií kupy. Tato druhá metoda předpokládá, že poměr hmotnosti galaxie k její svítivosti, tj. k energii vyzářené za jednu sekundu, je pro galaxie stejného typu konstantní. Pokud známe vzdálenost galaxie a její typ – je-li spirální, eliptická či iregulární, můžeme měřením toku jejího záření určit její hmotnost, a tak

<sup>6)</sup> Pozn. překladatele: Pravděpodobnost oscilace mezi  $v_e$  a  $v_\mu$  je rovna

$$P_{v_e v_\mu}(R) = 1/2 \sin^2 2\vartheta (1 - \cos 2\pi R/L)$$

$$L = 4\pi\rho/|m_1^2 - m_2^2|.$$

$R$  je vzdálenost mezi místem vzniku neutrina a místem měření,  $m_1$ ,  $m_2$  jsou hmotnosti neutrina 1, 2, ze kterých jsou elektronová a  $\mu$  mezonová neutrina složena.  $\vartheta$  je poměr určující, jaká část pravděpodobnosti výskytu elektronového neutrina je určena neutrinem 1 a jaká část je určena neutrinem 2,  $\rho$  je hybnost měřeného neutrina. Pro oscilace mezi  $\mu$  mezonovými neutriny platí:

$$P_{v_\mu v_\mu}(R) = 1 - P_{v_e v_\mu}.$$

<sup>7)</sup> Pozn. překladatele: Oscilace neutrin jsou měřitelné pro  $L \lesssim R$  (viz. pozn. 6) tj. pro  $|m_1^2 - m_2^2| \gtrsim 4\pi\rho/R$ .

To znamená, že čím dále jsme od zdroje detekovaných neutrin, tím menší rozdíly v jejich hmotě mohou působit registraci oscilací.

<sup>8)</sup> Pozn. překladatele: Z viriálového teorému dostáváme:  $M \cong (VD/2G)^{1/2}$ , kde  $M$  kde je celková hmotnost kupy,  $V$  je charakteristická vzájemná rychlost členů kupy,  $D$  je charakteristický rozměr kupy a  $G$  je gravitační konstanta.

postupně stanovit hmotnost celé kupy. Hmotnosti kup určené tímto způsobem jsou však několikanásobně nižší (někdy i o několik řádů) než hmotnosti určené pomocí dynamického odhadu.

Tak vzniká alternativa: buď kupy galaxií nejsou stacionární a dynamické určení jejich hmotnosti není možné, nebo je v kupách galaxií značné množství hmoty, která se neprojevuje zářením.

Nečekaný argument ve prospěch stacionárního modelu kup galaxií přinesla rentgenová astronomie, jedno z nejmladších odvětví této vědy. Roku 1972 bylo objeveno pomocí speciální družice UHURU rentgenovské záření kup galaxií. Toto záření vychází z velmi horkého plynu, který vyplňuje veškerý objem zkoumané kupy. Teplota tohoto plynu dosahuje v kupě v souhvězdí Vlasů Bereniky stovek miliónů stupňů a tepelný pohyb jeho částic<sup>9)</sup> se pohybuje okolo tisíce kilometrů za sekundu, což se shoduje s relativními rychlostmi galaxií v této kupě. Shoda těchto dvou rychlostí je sotva náhodná, mohla by být důkazem toho, že plyn i galaxie jsou v celkovém gravitačním poli kupy, které je stacionární. Pouze v tomto případě se pohybují všechna tělesa stejnou průměrnou rychlostí.

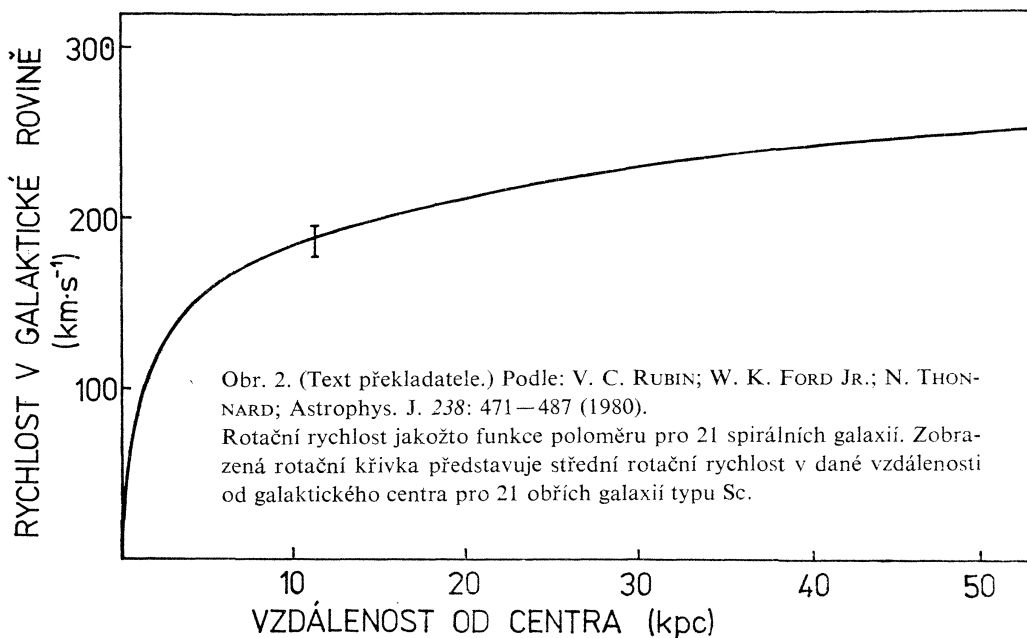
Proto dnes mnozí astronomové více důvěřují dynamickému odhadu hmoty. Pak je však nutno přijmout druhou z výše zmíněných hypotéz a připustit, že kromě svítící hmoty je v kupách galaxií ještě neviditelná hmota, která určuje dynamiku těchto soustav.

Na nové, velmi podstatné argumenty ve prospěch skryté hmoty poukázali roku 1974 estonští astronomové z observatoře v Tartu a američtí teoretikové z princetonské univerzity. Zaměřili pozornost na jednu zvláštní vlastnost pohybu trpasličích galaxií a mračen plynu, které rotují okolo gigantických galaxií. Údaje o takovýchto satelitech naší Galaxie, mlhoviny v Andromedě a řady dalších obřích galaxií přesvědčivě ukazují, že rychlosti jejich satelitů nezávisí na vzdálenosti od viditelné centrální části galaxie (obr. 2). Je-li všechna hmota galaxie soustředěna v hranicích její viditelné hmoty, působí na každý satelit přitažlivost pouze této hmoty a rychlosti satelitů jsou nepřímo úměrné vzdálenosti od centra.<sup>10)</sup> Nezávislost rychlostí satelitů na poloměru jejich dráhy nás vede k předpokladu, že hmota centrální galaxie není omezena pouze na její viditelnou část. Kromě této části by měla existovat ještě jiná gravitačně působící část, která je podstatně rozsáhlejší. Viditelná část galaxie je do této neviditelné části- korony — jakoby vnořena. Není to právě ta část hmoty, která je zaznamenávána také při dynamickém určení hmoty kup galaxií? Taková hypotéza se přímo sama nabízí.

<sup>9)</sup> Plyn je v kupách galaxií ionizován, jde o jádra nejrozšířenějšího prvku ve vesmíru, jádra vodíku.

<sup>10)</sup> Rychlosti satelitů by měly ubývat nepřímo závisle na druhé odmocnině poloměru dráhy, podobně jako rychlosti planet ve sluneční soustavě.

Pozn. překladatele: Autor má zřejmě na mysli práce V. C. RUBINOVÉ (V. C. RUBIN: *Rotation curves of high-luminosity spiral galaxies and the rotation curve of our Galaxy*, IAU Symp. No. 84, 1979, ed. W. B. BURTON, s. 211—220- V. C. RUBIN, W. K. FORD, N. THONNARD, *Astrophys. J.* 238: 471—487, 1980), kde jsou publikovány rotační křivky obřích spirálních galaxií, tj. závislosti lineární rychlosti kruhové dráhy okolo galaktického centra na vzdálenosti od centra. Ukazuje se, že pro vzdálenosti větší než 15 kpc rychlost kruhové dráhy neustále roste nebo je přibližně konstantní (obr. 2), což je v rozporu se zákony pro pohyb v poli centrální síly.



Tak vznikla představa o neviditelných, tj. skrytých korunách galaxií, ve kterých je rozmístěna skrytá hmota kup galaxií. Korony galaxií se rozkládají do velkých vzdáleností od středu galaxie, dosahují až k drahám nejvzdálenějších satelitů, takže tyto satelity se pohybují v prostředí, které obsahuje skrytou hmotu. Hmota, která svým gravitačním působením určuje rychlost pohybu satelitu galaxie, se skládá z viditelné a skryté části. Celková hmotnost galaxie je — vzhledem k výše popsanému chování rychlostí satelitů — přímo úměrná poloměru dráhy nejvzdálenějšího satelitu.<sup>11)</sup> Do vzdálenosti několikrát nebo i o několik řádů převyšující poloměr viditelné galaxie vzrůstá celková hmotnost galaxie úměrně vzdálenosti od centra. Z toho vyplývá, že celková hmotnost galaxie společně s korunou je několikrát nebo o několik řádů vyšší než hmotnost viditelné části galaxie, která byla galaxií klasicky připisována.

Co je však podstatou skryté hmoty? Plyn, vyhaslé hvězdy nebo černé díry? Do nedávné doby za nejreálnější byla považována možnost, že se skrytá hmota skládá z velmi malých a málo svítících hvězd, které jsou příliš slabé na to, aby byly zaznamenány. Avšak objev klidové hmoty neutrino obrátil pozornost k nové možnosti, která se zdá být velmi přirozená.

Podstata spočívá v tom, že podle současných kosmologických představ je neutrino jedna z nejrozšířenějších částic ve vesmíru. Střední hustota neutrin je přibližně 500 na kubický centimetr, což je asi miliardkrát více než protonů a elektronů. Přitom zcela převládají neutrino původní, která vznikla na počátku vývoje vesmíru, kdežto neutrino pocházející z hvězd jsou v menšině. Neutrino, která mají klidovou hmotu, nemohou být

<sup>11)</sup> Pozn. překladatele: Zde má autor na mysli tzv. integrovanou hmotnost  $M_{\text{int}}$ , hmotnost obsaženou ve válci, jehož poloměr je  $R$ . Pro takový případ platí:  $M_{\text{int}} = V^2 R$ , kde  $V$  je postupná rychlost satelitu v kruhové dráze ve vzdálenost  $R$  od centra galaxie.

rozdělena v prostoru homogenně, ale musí být soustředěna do zhuštěnin s jistým charakteristickým rozměrem. Nemohou být soustředěna do hvězd, ale mohou být obsažena v mezihvězdném prostoru v galaxiích. Mimoto mohou v okolí každé dostatečně velké galaxie vytvářet rozlehlé mračno.

Nejsou to právě neutrina, která představují onu skrytou hmotu? Takovou hypotézu navrhl K. Marx a jeho budapeštsí kolegové. Poněvadž nyní je známa klidová hmota neutrina, je jasné, že množství kosmických neutrin je dostatečně vysoké, aby zaplnilo galaktické korony a zvýšilo tak dostatečně hmotu galaxií. Neutrinové korony galaxií se dostaly do centra všeobecného zájmu, staly se předmětem intenzivních výzkumů. Je-li tato hypotéza správná, představují galaxie a jejich kupy soustavy, jejichž podstatná část se skládá z neutrin. Například celková hmota v koruně naší Galaxie je asi desetkrát vyšší než celková hmota jejich hvězd a plynu, takže viditelná Mléčná dráha je vlastně pouze hvězdnatá ozdoba obrovského neviditelného neutrinového systému.

#### 4. Struktura vesmíru ve velkém

Tradiční kosmologický názor o vzniku nebeských těles, který pochází od I. Newtona, spočívá na představě tvorby nebeských těles fragmentací a kondenzací z původně homogenního řídkého předhvězdného prostředí. „Pokud by byla někdy veškerá hmota vesmíru rozdělena stejnoměrně v nekonečném prostoru... a pokud by každá částice byla nadána přitažlivostí ke všem ostatním..., pak by se libovolné částice hmoty seskupovaly do jedné větší hmoty, a jiné částice do jiné a vznikalo by nekonečné množství větších hmot roztroušených po celém nekonečném prostoru ve velkých vzájemných vzdálenostech. Tak by mohlo vzniknout Slunce a stálice...“. To je výňatek z Newtonova dopisu (1692), který obsahuje náčrt programu, jehož realizace se stává v současné době aktuální.

Po tom, co Hubble objevil koncem 20. let rudý posuv a po objevu reliktního záření vesmíru (1965)<sup>12)</sup>, se zdá pravděpodobné, že veškerá hmota ve vesmíru byla před 15–20 miliardami let skutečně rozmístěna v celém prostoru homogenně. Tehdy neexistovaly ani hvězdy, ani galaxie a hustota, teplota a tlak homogenního kosmického prostředí dosahovaly velmi vysokých hodnot<sup>13)</sup>, mnohem vyšších než těch, které jsou charakteristické pro jádra hvězd. Toto prostředí je jako celek v expanzi, všechny jeho části se jedna od druhé vzdalují díky obrovské energii, která jim byla udělena v počáteční singularitě. Vzájemná přitažlivost částic však expanzi zpomaluje. Tyto dva vlivy vedou ke vzniku a růstu nehomogenit v rozdělení hmoty na základě příčin, které popisuje I. Newton.

Nyní, když je objevena klidová hmota neutrina, je jasné, že právě těmito částicím přísluší klíčová úloha při vytváření nejméně struktury ve vesmíru — galaxií

<sup>12)</sup> A. PENZIAS a R. WILSON za tento objev dostali Nobelovu cenu za rok 1978.

Pozn. překladatele: Překlady jejich přednášek pro švédskou královskou Akademii viz Čs. čas. fyz. 30, s. 209–221–241 (1980).

<sup>13)</sup> Pozn. překladatele: Pro stáří vesmíru asi 0,01 s má teplota hodnotu asi  $10^{11}$  K a hustota asi  $10^{12}$  kg m<sup>-3</sup>.



a jejich kup. Pokud má neutrino takovou hmotu, kterou navrhují experimentátoři, a vzhledem k tomu, že neutrino převyšují svým počtem všechny ostatní částice, je ve vesmíru asi desetkrát více hmoty ve formě neutrin než veškeré jiné hmoty. To znamená, že přitažlivou sílu určují především neutrino, jejichž vlastní gravitace vytváří velmi hmotné a velmi rozsáhlé zhuštění. Všechny ostatní částice — protony, neutrony a elektrony — sledují pohyby neutrin a jsou přitahovány gravitačním polem neutrinových zhuštění.

Podle teorie vypracované J. B. Zeldovičem a jeho moskevskými spolupracovníky se nejdříve vytvářejí neutrinové zhuštění, jejichž hmotnost odpovídá hmotnosti několika desítek kup galaxií. Dochází ke stlačování a zvyšování teploty protonového a elektronového plynu<sup>14)</sup> zachyceného v těchto nadkupách, později nastává fragmentace nejhustších částí na protokupy galaxií a protogalaxie. Samotné nadkupy galaxií obsahují mnoho galaxií a jejich kup, avšak nerozpadají se bezprostředně po vzniku galaxií, i když mohou být nestacionární (na rozdíl od galaxií a jejich kup). Hlavní část hmoty nadkup galaxií je představována neutrinami a viditelné astronomické objekty jsou asi desetkrát méně hmotné.

Představy o nadkupách galaxií se opírají o tuto nedávno objevenou vlastnost rozdělení galaxií a jejich kup v prostoru: Podle výzkumů amerických a sovětských astronomů jsou skupiny a kupy galaxií v prostoru převážně rozmístěny v relativně tenkých vrstvách neboli „řetízích“. Řetízky se navzájem spojují a kříží a vytvářejí tak jakési „buňky“ nepravidelného tvaru — celek bychom mohli popsat jako kvaziuspořádanou strukturu připomínající včelí plástve. Rozměry buněk jsou asi 100—300 miliónů světelných let a jejich stěny jsou tvořeny nadkupami galaxií, což jsou zploštělé objekty s poměrem charakteristických rozměrů asi 1 : 5. Uvnitř se nevyskytují ani izolované galaxie ani jejich kupy.

Je nutno zdůraznit, že výzkum výše zmíněné struktury vesmíru ve velkých měřítkách je pouze v počátcích. Doposud jsou známy pouze 3 až 4 případy nadkup galaxií. Astronomové se doposud zcela neshodli v odhadech jejich základních parametrů. Často vyjadřují i pochybnosti o samotné existenci buničité struktury vesmíru jakožto jeho univerzální vlastnosti. V každém případě je třeba ještě velmi dlouhé a namáhavé práce s pozorovacím materiálem o prostorovém rozdělení galaxií a jejich kup, než se oddělí skutečné struktury od zdánlivých.

Nicméně mnozí astrofyzikové jsou již dnes plní entuziasmu ohledně buněčné struktury vesmíru. Nedávno se za tuto myšlenku vynikající postavil astronom J. Oort<sup>15)</sup>. Fenomen buničité struktury, pokud skutečně existuje, má vývojové vysvětlení vycházející z celé řady současných kosmologických představ v rámci Zeldovičovy teorie. Tato teorie především dovoluje pochopit, proč nadkupy galaxií mají tak veliké zploštění. Zeldovič uvažuje chování gravitujících zhuštění v tom stupni jejich vývoje, kdy již nepředstavují malé poruchy v homogenním rozdělení hmoty, ale přesně oddělená mračna, a uzavírá, že další stlačování těchto mračen nepostupuje rovnoměrně ve všech směrech. Podél jistého směru dochází soustavně k rychlejšímu stlačování a rozdíly v rychlosti

<sup>14)</sup> Tento plyn obsahuje příměs jader helia, ve kterých jsou vázány neutrony.

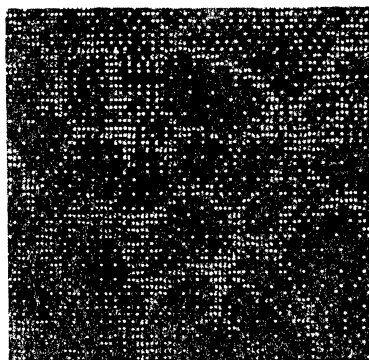
<sup>15)</sup> Pozn. překladatele: J. OORT, *Astron. Astrophys.* 7, 381—404 (1970).

stlačování podél různých směrů se s časem zvětšují. Působením tohoto procesu vznikají velmi zploštělé útvary, které Zeldovič nazývá „pecny“.<sup>16)</sup>

Předpokládá se, že pecny, z nichž každý představuje hmotnost srovnatelnou s hmotností typické nadkupy galaxií (asi  $10^{16}$  hmot slunce), vznikaly ve vesmíru 1–3 miliardy let po počátku kosmologické expanze. Dále bylo objasněno, že pecny nevznikají izolovaně, ale vždy se vzájemně ovlivňují, jako by si mezi sebou rozdělovaly veškerou existující hmotu a soustřeďovaly tuto hmotu do vrstev, které začínají postupně vytvářet něco, co skutečně připomíná buničitou strukturu (obr. 3). Teoretický model, ze kterého tento obraz vyplývá, je matematicky poměrně složitý. Jednou z metod prozkoumání vývoje takového modelu jsou experimenty na velkém počítači. Stroj „přehraje“ za několik hodin veškerou historii narůstání a rozvoje zhuštěnin hmoty ve vesmíru, která ve skutečnosti probíhala miliardy let.

Obr. 3. (Text překladatele.) Podle: A. G. DOROŠKEVIČ, E. V. KOTOK, I. D. NOVIKOV, A. N. POLYUDOV, S. F. ŠANDARIN a J. S. SIGOV; *Mon. Not. R. astr. Soc.*: 192, 321–337 (1980).

Dvojrozměrné rozdělení částic na základě numerické simulace vývoje vesmíru.



Teorie pecnů objasňuje i rentgenové záření kup galaxií – fakt, o kterém jsme hovořili výše. Neutrina velmi málo interagují mezi sebou. Jednotlivé, gravitací stlačené neutrinové zhuštěniny se v pecnech svobodně a bez srážek pohybují a navzájem procházejí, ať je jejich relativní rychlost jakkoli malá. Neutrinové zhuštěniny „vlečou“ však s sebou plyn, skládající se z „normálních“ částic, které se nadzvukovými vzájemnými rychlostmi srážejí. Proto v plynu, který pecny vyplňuje, vznikají rázové vlny – hydrodynamické nespojitosti, ve kterých se značná část kinetické energie pohybu plynu transformuje na teplo. To vede ke zvyšování teploty plynu na velmi vysoké hodnoty, které odpovídají rentgenovskému záření (desítky až stovky miliónů stupňů). Takovou teplotu si může jistá část fragmentů podržet až do současné doby, neboť ochlazování řídkého rentgenovského plynu probíhá velmi pomalu i v kosmických časových škálách. Podobně jako každé zahřáté těleso, také plyn vyzařuje elektromagnetické vlny a za dané teploty nejvíce fotonů je emitováno v rentgenovském oboru.

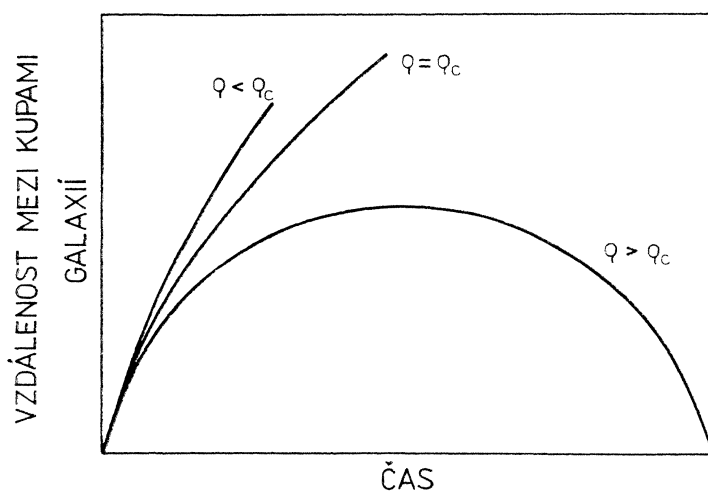
Teoretický výzkum bezsrážkových neutrinových systémů, které obsahují příměs plynu, teprve začíná a mnohé je třeba v budoucnu teprve probádat, než bude obraz kosmologického procesu ve vesmíru úplný, logický a ukončený. Je třeba například objasnit, zda fragmentace hmoty postupuje od velkých systémů k malým, tzn. od protogalaktických kup k protogalaxiím, nebo zda proces začíná dělením na protogalaxie, které se

<sup>16)</sup> Pozn. překladatele: rusky – blína; anglicky – pancake.

teprve později uspořádávají do kup. Je nutné také nalézt vysvětlení pro typické parametry galaxie a kupy galaxií, jakými jsou např. průměrná hustota, průměr, hmotnost a moment hybnosti. Teorie pecnů je dobrým základem pro další výzkumy.

## 5. Neutrinový vesmír

Kosmologická expanze, která je nazývána „Big Bang Model“, pokračuje také v současné době. Projevuje se tím, že vzdálenosti mezi kupami galaxií a nadkupami galaxií s časem rostou. Gravitace, vzájemné přitahování kosmických soustav, se snaží tento proces zbrzdit a změnit ve stlačování. Gravitace je tím silnější, čím větší je hmota soustav a čím menší jsou vzdálenosti mezi nimi. Proto je možno čekat, že osud expanze závisí na hustotě vesmíru. K tomu, aby převládla gravitace, je nutné, aby byla dostatečně vysoká hustota, aby byla vyšší, než je jistá kritická hodnota. Tento poznatek byl učiněn leningradským teoretikem A. A. Friedmanem ve 20. letech tohoto století. Jeho teorie expandujícího vesmíru nalézá úplné a nadějně potvrzení v astronomických pozorováních v průběhu posledních padesáti let.



Obr. 4. (Text překladatele. S. WEINBERG: *Gravitation and Cosmology*. John Wiley & Sons, 1972.

Tři varianty kosmologické expanze.  $Q$  — průměrná hustota vesmíru,  $Q_c$  — kritická hustota vesmíru.

Kritickou hodnotu hustoty je možné nalézt, jestliže odhadneme zásobu energie představovanou expanzí kosmických soustav měřením rychlostí jejich vzájemného vzdalování. Podle současných pozorování by tato hodnota měla být blízká  $10^{-26} \text{ kg m}^{-3}$ . To je přibližně 10krát až 30krát více, než je hustota svítící hmoty galaxií vztahované na celkový objem vesmíru. Nyní však víme, že kromě hmoty, která svítí, jsou ve vesmíru neutrina. Jejich podíl na celkové hmotnosti vesmíru — a tím také na hustotě vesmíru — převyšuje podíl všech ostatních částic. A co je obzvláště zajímavé: průměrná hustota neutrin je velmi blízká kritické hustotě, možná je jí právě rovna. Pravděpodobně to není pouze náhodná shoda, domníváme se, že v důsledku nějakých hlubokých příčin, o kterých by bylo těžké hovořit, musí si být tyto dvě veličiny rovny. Úvahy o významu

kritické hustoty vesmíru jakožto o střední hustotě vesmíru se objevovaly již dříve, avšak teprve dnes získávají empirický základ z pozorování.

Pokud je hustota vesmíru rovna kritické hustotě, bude kosmologická expanze pokračovat nekonečně dlouho. To je odpověď současné vědy (léto 1980) na otázku o osudu vesmíru. Se závěrem o nekonečné expanzi vesmíru souvisí ještě jedna otázka. Z Friedmanovy kosmologie vyplývá, že existuje souvislost mezi dynamikou kosmologické expanze a geometrickými vlastnostmi vesmíru. Pokud vzájemné rozlétávání kosmických soustav bude pokračovat do nekonečna, také vzdálenosti mezi nimi se budou zvětšovat a budou směřovat s průběhem času do nekonečna, takže nekonečný musí být také prostor, ve kterém se pohybují. Nekonečnost vesmíru v čase implikuje jeho nekonečnost v prostoru. Při hustotě rovné kritické má prostor tu nejjednodušší vlastnost, že je euklidovský.<sup>17)</sup>

Neomezená budoucnost vesmíru je naplněna různorodými přeměnami, jejichž obraz se nedávno pokusil vytvořit americký vědec F. Davison. První velká událost v budoucnosti vesmíru je vyčerpání zásob jaderné energie všemi hvězdami. V případě našeho Slunce k tomu dojde „pouze“ za deset miliard let, avšak až bude stáří vesmíru deseti-tisíckrát větší než dnes, vyhasnou všechny hvězdy. Později, až bude stáří Vesmíru stotisíckrát vyšší než dnes, planety se odtrhnou od Slunce a rozptýlí se v prostoru díky přitažlivosti hvězd pohybujících se v sousedství Slunce. Později také samotné hvězdy opustí galaxie a galaxie kupy galaxií a všechny kosmické soustavy se rozpadnou a rozptýlí v prostoru. Během procesu tohoto všeobecného rozpadu se také vypaří neutrinové korony galaxií a neutrina budou opět tak jako v minulosti více méně rovnoměrně rozdělena v celém prostoru; pouze hustota tohoto rozdělení bude již zanedbatelně malá.

Současně s rozptylováním hmoty by měl probíhat také opačný proces – stlačování některých zhuštěnin, jako jsou například hvězdy, hustá jádra galaxií atd., které se dříve či později změní v černé díry. Avšak ani černé díry nejsou věčné, jak ukázal anglický fyzik S. W. Hawking. Také se rozpadají díky současnému působení jejich silných gravitačních polí a kvantových efektů při vzniku nových částic. Vzhledem k tomu emitují černé díry světlo a v to se konec konců musí změnit veškerá hmota, která je nyní soustředěna ve hvězdách.

Záhada podstaty skryté hmoty a nový pohled na minulost a budoucnost vesmíru, to jsou astrofyzikální důsledky objevu klidové hmoty neutrina. Zbývá jen doufat, že tento experiment bude brzy potvrzen a dále upřesněn výzkumy dalších vědeckých skupin. Pak vejde rok 1980 do dějin astronomie a fyziky jakožto rok neutrina.

*Přeložil a poznámkami doplnil Jan Palouš*

---

<sup>17)</sup> Jde o prostor, který se zúčastní expanze, tj. o prostor s takovým referenčním systémem, který je spojen s expandující hmotou.