

Stavba a vývoj vesmíru

doc. RNDr. **Zdeněk Mikulášek**, CSc., Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, PřF, MU v Brně

Kosmologie

- nauka o vesmíru jako celku (kosmos + logos)

Dříve dosti spekulativní, ideologizovaná nauka - v posledním čtvrt století se změnila v moderní, kvantitativní vědu opřená o spolehlivá relevantní pozorování: např. stáří vesmíru ($13,7 \pm 0,2$) mld let dnes známe s přesností lepší než 2%!

Předmět kosmologie

- zahrnuje vesmír jako celek, studium jeho vlastností, stavby a vývoje
- zvláštní povaha výzkumu - vesmír obsahuje vše, z vesmíru známe jen malou část, její vlastnosti extrapolujeme na vesmír jako celek.

Východisko kosmologie

- vesmír je jednotný na úrovni základních fyzikálních zákonů – jistě sporné, ale nic lepšího se nenabízí.

Platnost zákonů se ověřuje v pozemských laboratořích – zde se však nepracuje s hlavní – temnou a neinteragující složkou vesmírné látky.

Metoda kosmologie

- tvorba matematických modelů vesmíru zachycujících formou diferenciálních rovnic jeho rozhodující vlastnosti – srovnání s pozorováním

Vývoj názorů na vesmír

Mytologické období

- Odkud se vzal a jaký je svět v němž žijeme? Každá kultura, náboženství vlastní odpověď – součást víry, světónázoru.

Starověk, středověk

- Vesmír je celý viditelný, končí za sférou stálic, jejíž poloměr je jen několikanásobek poloměru centrálně situované kulové Země.

Aristotelovská fyzika – musela se vypořádat s děním v okolním světě, na obloze a skutečností, že Země má podobu koule. Obsahuje defacto dvě fyziky s různými zákony a materiemi matérie pozemské (čtyři živly) a nebeské (éter) – hranicí sféra Měsíce.

- spojujícím a rozhodujícím pojmem zde byl **střed vesmíru** = střed Země (střed obalený kamením vodou, ovzduším a ohněm).

Geocentrismus – přirozený pohled – paradigma starověku, středověku i části novověku (JAN ÁMOS KOMENSKÝ), **heliocentrismus** – názorový excés.

- Ptolemaios v rámci aristotelovské fyziky vypracoval komplikovaný geocentrický model sluneční soustavy – ten dokonale posloužil k předpovídání poloh planet na obloze, nedával však odpověď na otázku vzdáleností a velikosti vesmíru.
- Ke konci starověku však už bylo jasné, že vzdálenosti v SS jsou značné \Rightarrow Slunce mnohokrát větší než Země! Ale ani to k odmítnutí aristotelovské fyziky nestačilo!

Novověký heliocentrismus

- MIKULÁŠ KOPERNÍK na začátku novověku ukázal, že heliocentrismus dává přirozenější výklad dění na obloze, navíc poskytuje prostorový obraz.

Koperníkovo učení bylo odmítáno nejen církví, ale i astronomy – chyběl důkaz oběžného pohybu Země kolem Slunce – paralaxa \Rightarrow hybridní geocentrické systémy s vedlejším středem ve Slunci (TYCHO BRAHE)

- JOHANNES KEPLER – značné zdokonalení Koperníkovy soustavy – kvantitativní popis pohybu planet, pokusy o novou fyziku

Střed vesmíru se přesunul do středu Slunce, ale jeho význam klesal

- Kosmické objekty začaly být chápány jako objekty v třírozměrném prostoru. Intuitivně k tomu dospěl už GIORDANO BRUNO (hvězdy se pohybují prostorem, jsou od nás různě daleko), pak i další přírodovědci.

Nová fyzika, astrofyzika

Aristotelovský pohled na svět přestal vyhovovat pozorování – princip neměnnosti světa za sférou Měsíce narušily komety a proměnné hvězdy

- K vybudování nové fyziky přispěl GALILEI – objev setrvačnosti a zákonů volného pádu, ale hlavně ISAAC NEWTON formulací pohybových zákonů + zákon o všeobecné přitažlivosti
- Fyzika okolního světa a fyzika vesmíru splynuly v jedinou fyziku! Pohyb těles určený gravitací popisovaly tytéž zákony, pozemský svět se propojil s vesmírem! Nový pojem – **těžiště**.

Propojení ještě nebylo důsledné – vyřešilo se zatím jen: jak a proč se vesmírná tělesa pohybují, nevědělo se, z čeho jsou složena.

- Teprve 1/2 19. století – KIRCHHOFF a BUNSEN – spektrální analýza záření Slunce a hvězd \Rightarrow tělesa ve vesmíru složena z týchž chemických prvků jako Země – východisko nové vědy: astrofyziky

Kosmologický princip

- 1/2 19. století – paralaxy nejbližších hvězd – Slunce je jednou z hvězd, umísťovat právě tam střed vesmíru nemá smysl. Jeho poloha v Galaxii však byla poněkud matoucí – poblíž jejího středu, až 20. léta 20. stol. Dnes víme, že to je důsledek vlivu mezihvězdné extinkce. I naše Galaxie není celým vesmírem, ale jen jednou z mnoha galaxií.
- \Rightarrow základní kosmologické paradigma, **kosmologický princip**:

- **Žádný bod v prostoru nemá privilegované postavení !**
- Kosmologický (též koperníkovský nebo též postkoperníkovský) princip není jen filozofickou proklamací, ale má řadu zcela konkrétních, v principu ověřitelných důsledků.

Vesmír pak musí být homogenní a izotropní !

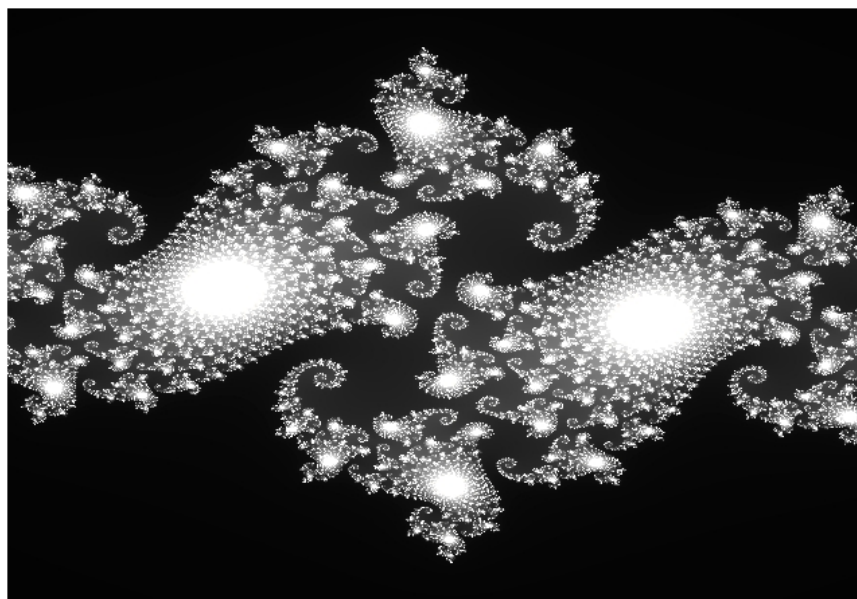
Homogenita a izotropie vesmíru

s naší zkušeností na první pohled se nesrovnávají – pohled na oblohu: naše vesmírné okolí silně nehomogenní (hvězdy a prázdnota mezi nimi, galaxie a pustý mezigalaktický prostor, kupy galaxií, buněčná struktura vesmíru), a anizotropní (Mléčná dráha, Supergalaxie).

- Záleží však na měřítcích – od 10^8 pc nahoru ale již homogenitu vesmíru konstatujeme. Kostka o hraně cca 200 miliónů sv. let – reprezentativní vzorek vesmíru, takových leží v našem dohledu milión!
- Ukažte kde se nachází střed pozorované expanze? Kde leží epicentrum výbuchu? Ve všech směrech – reliktní záření – nejstarší záření ve vesmíru k nám přichází izotropně ze všech směrů.

Má vesmír povahu fraktálu?

Na počátku 20. století CHARLIER propracoval představu neomezeně hierarchicky strukturovaných fraktálových vesmírů o stále menší hustotě – chtěl se tak vyhnout gravitačnímu a fotometrickému paradoxu.



- Lákavá idea však nebyla potvrzena pozorováním – při zvětšování dohlednosti se to, co vidíme, začíná opakovat. Nepozorujeme už další, stále vyšší struktury – hierarchická výstavba vesmíru má svou mez – končí buněčnou strukturou vesmíru.

Kosmologický princip se uplatnil i v tomto ohledu.

Poznatelnost vesmíru

Platnost kosmologického principu podporuje naději, že vesmír lze poznat i když z něj známe jen jeho nepatrnou část: vesmír opakuje a my známe jak jeho dostatečně velkou část, tak i zákony, jimiž se řídí.

- V opačném případě by nebylo možné naše poznávání ukončit a spolehnout se třeba na všeobecnou platnost „místních“ zákonů

Nevyhnutelná nestatičnost vesmíru

- Vesmír má dvě možnosti – buď se může rozpínat nebo smršťovat, rozhodně nemůže být statický, neměnný.

Důsledek skutečnosti, že proti gravitační síle, kterou na sebe součásti vesmíru působí, nelze v homogenním vesmíru postavit *gradient tlaku* – tlak je v určité době v celém vesmíru stejný, výsledná tlaková síla působící na libovolnou plošku je nulová.

- Tlak sám (energie v objemu) je zdrojem gravitace: látka s kladným tlakem – přitažlivá gravitace, s negativním tlakem (temná energie) – odpudivá gravitace – ta třeba nyní urychluje expanzi vesmíru.

Nestatičnost vesmíru je tak důsledkem jeho homogenity – toto si lidé uvědomili až po nalezení nestatických relativistických řešení modelů vesmíru – platí ale i pro klasickou, Newtonovu teorii gravitace.

Ověřování kosmologického principu

Kosmologický princip není „zjevenou pravdou“, ale vědeckým předpokladem, který poskytuje jasné, ověřitelné předpovědi. Platnost principu je neustále prověřována a konfrontována se skutečností, ale zatím odolává všem zkouškám.

Newtonův model vesmíru

První model vesmíru sestrojil již ISAAC NEWTON. Model to byl homogenní a izotropní v prostoru (vyhovuje kosmologickému principu) a **čas**!!! Navíc byl v čase a prostoru nekonečný a zcela statický, síly jsou v něm dokonale vyrovnány. Rozhodující silou v něm je gravitace, která je jedinou vskutku dalekodosahovou a neodstímitelnou silou, která působí na všechna hmotná tělesa bez výjimky (možnost tuto interakci vyřešit geometrií prostoročasu).

Problémy Newtonova modelu

- Dynamická rovnováha je vratká, i malá výchylka by musela vést k zhroucení vesmíru, k čemuž při nekonečném trvání už muselo dojít. Statičnost homogenního vesmíru nelze dlouhodobě dosáhnout!
- Gravitační paradox – síly sice vyrovnány, ale potenciály jdou do nekonečna!
- V nekonečném a věčném vesmíru platí i Keplerův, Olbersův či též *fotometrický paradox*.

Fotometrický paradox. Proč je v noci tma?

V nekonečně velkém vesmíru (dosti rozlehlém) vesmíru by měla být obloha úplně pokryta obloha kotoučky hvězd (krátery na Měsíci). Zářila by jasně slunečního disku. Nikdy by nebyla tma.

Skutečnost – kotoučky hvězd z Galaxie vykrývají jen $3 \cdot 10^{-13}$ výměry oblohy, z mezigalaktického prostoru jen 10^{-15} !

K tomu se nabízí řada vysvětlení, jen některá jsou správná.

Vlastní vysvětlení: Hypotetický vesmír – 10^{15} krát více hvězd – kotoučky by se slily dohromady, efektivní teplota 3300°C . 10^{15} krát víc fotonů.

- Hvězdy by ve vesmíru musely zářit nejméně $10^{15} \times 10^{10}$ let = 10^{25} let.
- K tomu však nemají dostatek energie – i kdyby se kompletně změnily na fotony, bylo by to 10^{10} krát méně, než by bylo zapotřebí.
- To přitom vůbec nebereme v úvahu rozpínání vesmíru, které situaci dále zhoršuje.

Temnota nočního nebe je dána tím, že vesmír neobsahuje dostatek energie, aby se vytvořila dostatečně zářivá obloha.

- Světlo všech hvězd bylo, je a bude příliš slabé na to, aby osvítilo temný vesmír.

Fotometrický paradox ukazuje, že i další základní premisa Newtonova modelu - věčnost vesmíru, není splněna.

Rozpínání vesmíru a jeho povaha

Statičnost a věčnost – zcela přirozené atributy vesmíru až do začátku 20. stol.

Pozorovatelské zpochybnění:

- VESTO SLIPHER kolem roku 1920 zjistil, že z 41 galaxie (tehdy ještě jenom mlhovin) jich jeví 36 posuv směrem k červenému konci spektra. Pozorovaná skutečnost se běžně interpretovala jako důsledek Dopplerova efektu, čili vzdalování těchto objektů.¹
- EDWIN HUBBLE kolem 1923 objevil v M31 cefeidy – byl to konečný důkaz o extragalaktické povaze galaxií a současně to bylo východiskem pro určení jejich vzdálenosti.
- Hubble zkoumal též pohyb Galaxie vzhledem k poli nejbližších galaxií a zjistil, že červený posuv z spektrálních čar je zhruba přímo úměrný vzdálenosti galaxií:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}; \quad v = z \cdot c; \quad v = H \cdot r.$$

Konstanta úměrnosti H nazvána po jejím objeviteli – *Hubbleova*. Hubble znal de Sitterovy modely vesmíru, věděl již o jeho očekávané nestatičnosti, tu potvrdil.

- Uvedený vztah ovšem neplatí zcela přesně, přes uspořádaný pohyb, ARTHUREM EDDINGTONEM správně interpretovaný jako důsledek rozpínání prostoru vesmíru, se překládají vlastní, individuální (pekuliární) pohyby galaxií (100 až 1000 km/s) – nejvíce se to projevuje u těch nejbližších.

¹ Toto zjištění pak paradoxně posloužilo jako pádný argument proti extragalaktické povaze těchto objektů, protože se tu nebyl žádný závažný důvod, proč by měly samostatné hvězdné soustavy od nás jen vzdalovat!

- Rozměry Hubbleovy konstanty běžně: km/s/Mpc. $1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc} = 10^6 \cdot 206\,256 \cdot 1 \text{ a.j.} = 3,086 \cdot 10^{22} \text{ m} = 3,086 \cdot 10^{19} \text{ km}$. V SI je rozměr Hubbleovy konstanty s^{-1} – definuje tedy okamžité tempo rozpínání, $\tau = 1/H$ – je odhad stáří vesmíru, který expanduje bez zrychlení v s, $1 \text{ rok} = 3,156 \cdot 10^7 \text{ s}$.
- Často se lze setkat místo Hubbleovy konstanty s bezrozměrným parametrem $h = H/100 \text{ km/s/Mpc}$. Dokažte, že pak platí, že $\tau = 9,78 \cdot 10^9 h^{-1} \text{ let}$.

Poslední měření klasickými metodami: $H = (70 \pm 7) \text{ km/s/Mpc} \approx 1/H = 14 \cdot 10^9 \text{ let}$.

- S tím, jak se vesmír rozpíná, hodnota Hubbleovy konstanty klesá → je třeba vždy uvést, k jaké době se vztahuje – běžně k současnosti H_0 .
- Sám Hubble H_0 hodnotu silně přecenil – původně 500 km/s/Mpc – následná několikanásobná recalibrace vzdáleností ve vesmíru.

Povaha rozpínání

Z faktu, že v našem okolí platí: $\mathbf{v} = H \mathbf{r}$, ještě nevyplývá, že existuje nějaký privilegovaný střed rozpínání. Je-li \mathbf{r}_A vektor vzdálenosti z bodu A k nějaké galaxii \mathbf{v}_A vektor rychlosti vzdalování, \mathbf{r}_B vzdálenost k témuž objektu z jiného pozorovacího stanoviště B, \mathbf{r}_{AB} je pak polohový vektor z místa A do B, pak platí:

$$\mathbf{v}_A = H \mathbf{r}_A; \quad \mathbf{v}_{AB} = H \mathbf{r}_{AB}; \quad \mathbf{r}_B = \mathbf{r}_A - \mathbf{r}_{AB}; \quad \mathbf{v}_B = \mathbf{v}_A - \mathbf{v}_{AB}; \quad \mathbf{v}_B = H \mathbf{r}_B.$$

Takže tentýž Hubbleův zákon platí z bodu B.

- Součásti vesmíru – galaxie, objekty ve vesmíru se rozpínání neúčastní. Naopak na vlny ve vesmíru rozpínání platí
- Modely – nafukovací balónek s cizím středem, kynoucí vánočka.
- Současnosti se vesmír rozpíná tak, že k 1 m^3 ročně přibude $0,2 \text{ mm}^3$ nového prostoru. Za dobu existence Země vzrostly vzdálenosti mezi galaxiemi o $1/4$.

Kam se vesmír rozpíná? Není žádný jiný prostor, než ten náš. Vesmír si vytváří a nese svůj prostor sebou.

Kosmologický červený posuv – velký dar astronomům – velmi spolehlivé měřítko vzdálenosti objektů v kosmologických vzdálenostech – stačí mít jen spektrum, posuv je měřitelný velmi přesně. K přesné interpretaci pozorování je však mít k dispozici spolehlivý model vesmíru. Jednoduchá závislost platí jen jako první aproximace.

Fridmanovy modely vesmíru

1922-4 Alexandr Fridman sestavil první relativistický model. Homogenní, izotropní vesmír s určitou hustotou. Dokázal nestatičnost vesmíru, i když ta platí pro všechny homogenní modely.

- Důsledky: Pozorujeme-li dnes expanzi, musel mít vesmír v minulosti singularitu – všechny body vesmíru pospolu – velký třesk.
- Bylo místo velkého třesku středem vesmíru? – obsahoval v sobě všechny body současného vesmíru. Velký třesk – nebyla to žádná exploze, která by se šířila prostorem, ta „exploze“ naplňovala od počátku celý prostor vesmíru. Velký třesk je tak začátkem rozpínání samotného prostoru.

Filozoficky závažný je fakt konečnosti vesmíru v čase (alespoň ze strany minulosti) → pokusy o zpochybnění

- interpretace červeného posuvu rozpínáním – např. stárnutí světla. Nebylo potvrzeno.
- aplikace *ideálního kosmologického principu* – vesmír je stejný ve všech směrech i v libovolném čase. Rozpínání prostoru, hustota látky konstantní – tvorba látky z *ničeho*. Hubbleova konstanta vskutku konstantní. Odmítnuto na základě pozorování – existuje jakási mezní dohlednost ve vesmíru – staví se nám do cesty zeď z níž vystupuje reliktní záření. → důsledek předchozího vývoje vesmíru, ten nebyl stejný (horký, hustý). Rovněž tak pozorovaný chemický vývoj ideálního kosmologického princip nepotvrdil.

Newtonovský model vesmír

K pochopení základních rysů chování vesmíru není nutná OTR, i když ta náš pohled obohacuje o nové momenty. Teprve poté, co byly zveřejněny první realistické modely v rámci OTR se ukázalo, že newtonovské modely vesmíru dávají takřka shodné výsledky.

Zvolme si v prostoru vesmíru libovolnou kouli o poloměru r , která se bude zvětšovat s tím, jak se bude vesmír rozpínat ($H > 0$). Pro rychlost vzdalování bude platit: $\mathbf{v} = H \mathbf{r}$,

přičemž hodnota Hubbleovy konstanty bude funkcí času. Důvodem změny je nejen gravitační interakce, ale i změna měřítek vesmíru.

Vesmír bez gravitace

- pouze expandující prostor bez gravitační interakce:

$$\dot{\mathbf{v}} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{0}. \quad \text{Dosadíme-li za } \mathbf{v}; \quad \mathbf{v} = H \mathbf{r}, \quad \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d(H \mathbf{r})}{dt} = \mathbf{r} \frac{dH}{dt} + \frac{d\mathbf{r}}{dt} H = \mathbf{r} \frac{dH}{dt} + (H \mathbf{r})H = 0,$$

$$\frac{dH}{dt} = -H^2, \quad H^2 > 0 \rightarrow \text{velikost Hubbleovy konstanty klesá. Po integraci: } \frac{dH}{H^2} = -dt \rightarrow H = \frac{1}{t}.$$

Bude-li proti rozpínání vesmíru působit přitažlivá gravitace, bude Hubbleova konstanta s časem klesat rychleji.

- Názorný model – rychle vystartovavší roj včel. Nejrychlejší včely včele, nejpomalejší vzadu. Zpočátku jsou včely i rozdílných rychlostí blízko u sebe, postupně roj včel řídne a u poblíž sebe jsou pouze ty včely, které měly přibližně stejnou rychlost. Rozdíl v rychlostech včel v bezprostředním okolí stále klesá.
- Odhad stáří vesmíru – zdůvodnění $\tau = 1/H$.

Škálovací faktor $R(t)$

bezrozměrná veličina – popisuje *velikost vesmíru*, bude jí charakterizovat jeho rozpínání.

Definujeme, že pro současnost ($t = 0$) $R(0) = 1$, pro velký třesk bude roven 0. Vzdálenost mezi dvěma body v čase t :

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}(0) R(t); \quad \mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{d(\mathbf{r}(0) R(t))}{dt} = \mathbf{r}(0) \frac{dR(t)}{dt} = \frac{\mathbf{r}(t)}{R(t)} \dot{R}(t) = \mathbf{r}(t) \frac{\dot{R}(t)}{R(t)} = \mathbf{r}(t) H(t). \rightarrow H = \frac{\dot{R}}{R}.$$

Decelerační parametr

K vyjádření míry brzdění rozpínání vesmíru gravitací se často používá bezrozměrná veličina nazvaná *decelerační parametr*:

$$q = -\frac{R\ddot{R}}{R^2}.$$

V prázdného případě vesmíru je roven 0.

Vlastní model

Běžná látka – prach – hmotnost vybrané koule. Vliv tlaku zanedbáváme. Mje s časem konstantní:

$$M \equiv M_0 = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho_0 \rightarrow \rho = \rho_0 R^{-3}.$$

Síla působící na jednotku hmoty je úměrná R^{-2} – běžný Newtonův zákon. Zákon zachování energie. Na hranicích koule si zvolíme testovací objekt o hmotnosti 1 kg. Energie je pak dána vztahem:

$$E = \frac{1}{2}v^2 - G \frac{M}{r} = \frac{1}{2}(Hr)^2 - G \frac{4}{3}\pi r^2 \rho = \frac{1}{2}r_0^2 R^2 H^2 - \frac{4}{3}\pi Gr_0^2 R^2 \rho. \quad | : \frac{4}{3}\pi Gr_0^2 R^2$$

$$\frac{3E}{4\pi Gr_0^2 R^2} = \frac{3H^2}{8\pi G} - \rho = \frac{3H_0^2}{8\pi G} - \rho_0 = \frac{3\dot{R}^2}{8\pi GR^2} - \rho.$$

Diskuse:

- 1) $E > 0$ roste-li čas nade všechny meze, jde hustota k 0, $H > 0$ – rozpínání se nezastaví – analogie – kámen vržený větší než únikovou rychlostí – otevřený vesmír. Limitní případ bez hmoty $E = v^2/2$, $R = t/t_0$.
- 2) $E < 0$ v určitém okamžiku se rozpínání zastaví, vesmír se zase začne smršťovat – uzavřený vesmír.
- 3) $E = 0$ – tento stav se zřejmě realizuje, parabolický vesmír – vesmír s tzv. *kritickou hustotou*
Vztah ke *kritické hustotě* – to je funkce okamžité Hubbleovy konstanty, pro současnost platí:

$$\rho_{k0} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}. \quad \text{Dokažte, že: } \rho_k = 1,879 \cdot 10^{-26} h^2 \text{ kg/m}^3 = 11,23 h^2 \text{ protonů/m}^3.$$

Pro kritickou hustotu vesmíru platí, že si vesmír během rozpínání tuto kritickou hustotu udržuje ($E = 0$).

Řešení pro $E = 0$, vesmír s kritickou hustotou:

a) Prach

$$\frac{3\dot{R}^2}{8\pi GR^2} = \rho = \frac{\rho_0}{R^3}; \rightarrow \dot{R}\sqrt{R} = \sqrt{\frac{8\pi G\rho_0}{3}}; \quad \text{metodou separace proměnných:}$$

$$R^{1/2}dR = \left(\frac{8\pi G\rho_0}{3}\right)^{1/2} dt = H_0 dt; \rightarrow \frac{2}{3}R^{3/2} = \left(\frac{8\pi G\rho_0}{3}\right)^{1/2} t; \rightarrow R = (6\pi G\rho_0)^{1/3} t^{2/3}.$$

$$\rho = \frac{\rho_0}{R^3} = \frac{1}{6\pi G t^2}; \quad H = \frac{\dot{R}}{R} = \frac{k \frac{2}{3} t^{-1/3}}{k t^{2/3}} = \frac{2}{3t}. \quad q = -\frac{R\ddot{R}}{R^2} = \frac{1}{2};$$

Meze použití modelu – blízké vzdálenosti, malé oblasti. Neplatí pro záření.

b) záření – tam je hustota rovna energii záření $/c^2$. Při rozpínání rovnovážného záření o termodynamické teplotě T klesá jednak koncentrace fotonů a spolu s prostorem prodlužuje i

vlnová délka záření (při rozpínání záření koná práci) – takže hmotnost koule záření s rozpínáním klesá:

$$M \equiv M_0 R^{-1}; \quad \rho = \rho_0 R^{-4}; \quad T = T_0 R^{-1}.$$

Je zřejmé, že záření je tím důležitější, čím blíže velkého třesku jsme. Také se tomuto údobí někdy říká éra záření.

Síla působící na jednotkovou hmotnost bude úměrná R^{-3} !

Řešit věc budeme jen pro případ parabolického vesmíru, $E = 0$.

$$\frac{3\dot{R}^2}{8\pi GR^2} = \rho = \frac{\rho_0}{R^4}; \quad \rightarrow \quad \dot{R} = \sqrt{\frac{8G\pi\rho_0}{3}} R^{-1}; \quad \rightarrow \quad RdR = \sqrt{\frac{8G\pi\rho_0}{3}} dt; \quad \rightarrow \quad R = \sqrt[4]{\frac{32G\pi\rho_0}{3}} t^{1/2}$$

$$q = -\frac{R\ddot{R}}{R^2} = 1; \quad T = T_0 / R = T_0 \left(\frac{t}{t_0}\right)^{-1/2}$$

c) pokud se vesmír rozpíná, pak se hustota energie vakua (je-li nenulová) se nemění:

$$\rho = \rho_0; \quad M = M_0 R^3.$$

Síla působící na jednotkovou hmotnost bude úměrná R !

$$\frac{3\dot{R}^2}{8\pi GR^2} = \rho = \rho_0; \quad \rightarrow \quad \frac{\dot{R}}{R} = \sqrt{\frac{8G\pi\rho_0}{3}} = H_0; \quad \rightarrow \quad \frac{dR}{R} = H_0 dt; \quad \rightarrow \quad \ln R = H_0 t; \quad \rightarrow \quad R = e^{H_0 t}$$

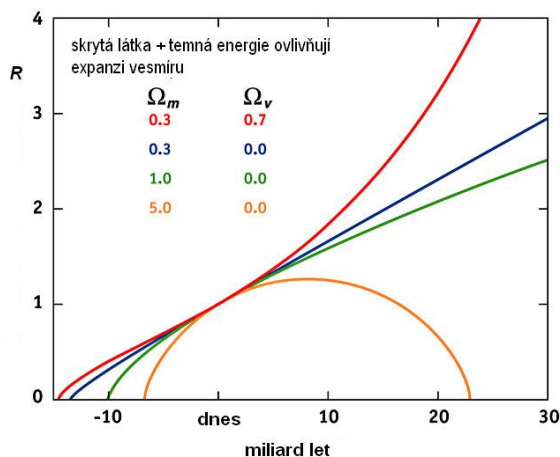
$$\rho = \rho_0 = \frac{3H_0^2}{8\pi G}; \quad \rightarrow \quad H = H_0; \quad q = -\frac{R\ddot{R}}{R^2} = -1; \text{ akcelerace, velký třesk by nebyl, inflace ano}$$

Na rozdíl od předchozích grafů závislosti R na čase by byl graf konkávní, exponenciálně rostoucí nade všechny meze.

Budoucnost vesmíru

Závisí na poměru hustoty látky k hustotě kritické a na typu látky vyplňující vesmír. Pokud jde o prach, pak, pro $\rho_0 > \rho_{k0}$ se vesmír smrští zase zpět do singularity – tzv. *velký křach*. V opačném případě se rozpíná do nekonečna. Odhad střední hustoty ve vesmíru obtížný. Jen menší část baryonové hmoty svítí, ukazuje se, že tato hmota činí jen asi 4% kritické hmoty, existují ale i jiné, skryté formy látky a energie, které se projevují jen svou gravitací.

Expanze vesmíru



V reálném vesmíru obecně směs záření – to se projevuje zejména na počátku vývoje vesmíru, kdy je velká hustota a teplota, později dominuje přitažlivá látka (baryonní + skrytá látka), při velkém zředění vesmíru nabude vrchu temná energie s konstantní hustotou energie (kosmologická konstanta).

Geometrie vesmíru

Zde už s newtonovským modelem nevystačíme – geometrie (zakřivení) prostoru, vesmíru je jednoznačně přínosem obecné teorie relativity. O křivosti prostoru rozhoduje poměr celkové střední hustoty k hustotě kritické, označuje se písmenem Ω :

$$\Omega = \frac{\rho_b + \rho_m + \rho_v}{\rho_k} = \frac{\rho}{\rho_k}$$

Prostor obecně zakřiven, místo přímek nejkratší spojnice 2 bodů – tzv. geodetická čára (na kouli – hlavní kružnice, ortodroma). Představa zakřivené plochy dvourozměrné do třírozměrné je jen názornostní berlička, další dimenze, do níž povrch zakřívujeme podstatě není nutná.

$\Omega_0 > 1$, vesmír je konečný (konečný objem), kladné zakřivení kulová plocha,

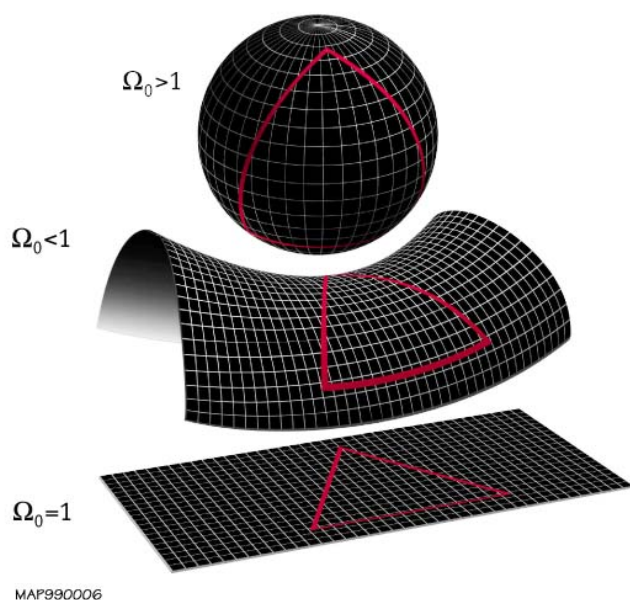
součet úhlů v trojúhelníku $> 180^\circ$

$\Omega_0 < 1$, vesmír je nekonečný (konečný objem), záporné zakřivení, sedlovitá plocha,

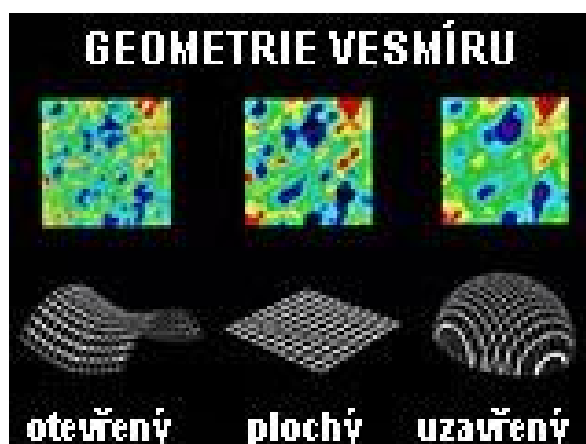
součet úhlů v trojúhelníku $< 180^\circ$

$\Omega_0 = 1$, vesmír je nekonečný plochý, eukleidovský

součet úhlů v trojúhelníku $= 180^\circ$



Rozdíl součtu úhlů v trojúhelníku proti 180° je úměrný ploše trojúhelníku – projeví se jen tehdy, jsou-li to trojúhelníky přes celý pozorovatelný vesmír. Křivost prostoru lze v principu zjistit měřením - porovnáváním pozorovaných a očekávaných úhlových rozměrů vzdálených objektů. Nejlépe v případě reliktního záření.



Měření jasně hovoří o tom, že náš vesmír je s velkou přesností plochý, jeho hustota je právě hustotou kritickou, $\Omega_0 = 1$.

Horizont vesmíru

Hledíme-li do hloubky vesmíru, pozorujeme jejich světlo se stále větším zpožděním, což je dáno konečnou rychlostí světla. Dalekohled je tak *stroj času*, umožňující nám nahlédnout do historie našeho vesmíru – v důsledku homogenity a izotropie vesmíru, tedy i té naší místní části.

- Vesmír je starý cca 13,6 mld let a to je i mez, kam můžeme dohlédnout. Tento horizont vesmíru nelze překročit. Současně je to i oblast vesmíru, která v principu může ovlivnit zdejší dění, ty části, co jsou mimo tento obzor na nás vliv nemají (již na nás nemají vliv).
- Každým rokem se poloměr horizontu vesmíru zvětšuje o 1 světelný rok. Zvětšuje se počet objektů, které můžeme zahlédnout?
- To závisí i na tempu rozpínání. Vzhledem k tomu, že je tu spíše akcelerace, pak ty objekty z našeho horizontu spíše odplouvají, mizí.

S horizontem je spojen i kosmologický rudý posuv, objekty na hranici horizontu mají nekonečně velký rudý posuv – pokud bychom to interpretovali rychlostně, vzdaluje se rychlostí světla.

- Mohou se některé části vesmíru od nás vzdalovat nadsvětelnými rychlostmi? Ano, určitě existují, my s nimi ale pokud svou rychlost vzdalování nesníží, nikdy s nimi nevstoupíme do kontaktu.

Kosmologický červený posuv a povaha rozpínání

Kosmologický červený posuv je důsledkem natažení fotonu při jeho cestě rozpínajícím se prostorem: vesmír se od vyslání fotonu zvětšil $(z+1)$ krát, všechny děje vidíme $(z+1)$ krát zpomalené.

$$z = \frac{R(t_{\text{pozorování}}) - R(t_{\text{emise}})}{R(t_{\text{emise}})}; \quad z + 1 = \frac{R(t_p)}{R(t_e)}$$

- Nejvzdálenější objekty – aktivní jádra galaxií – kvasary + supernovy Ia, vzdálenosti vyjadřované v z . Dohlédneme až k $z = 1400$ – reliktní záření, čas tam plyne 1400krát pomaleji!

Jak souvisí z a vzdálenost – odvození Hubbleova vztahu.

Pro jednoduchost si vybereme nějaký hodně blízký objekt s $z \ll 1$. Průběh závislosti $R(t)$ si aproximujeme tečnou v bodě $t = 0$, $R(0) = 1$.

$$H_0 = \frac{\dot{R}}{R_0} = \dot{R}; \quad R(t_e) \cong 1 - \dot{R}(t_0 - t_e) = 1 - H_0 \Delta t; \quad z + 1 = \frac{1}{R(t_e)} \cong \frac{1}{1 - H_0 \Delta t} \cong 1 + H_0 \Delta t; \quad \rightarrow$$

$$z \cong H_0 \Delta t = H_0 \frac{r}{c}; \quad \rightarrow \quad r = \frac{c z}{H_0}.$$

Zjednodušený tvar Hubblova zákona. Vzdálenost je problematická záležitost pro větší vzdálenosti. V důsledku rozpínání vesmíru se odlehlost bodů mění. V okamžiku vyslání světelného kvanta bude objekt jinde, než když jeho záření zachytíme.

Geometrická vzdálenost – dráha, kterou paprsek s cestovní rychlostí c urazil: $c(t_0 - t_e)$

Fotometrická vzdálenost – vzdálenost, z níž by daný objekt s jistou absolutní hvězdnou velikostí měl právě pozorovanou hvězdnou velikost m .

Úhlová vzdálenost – vzdálenost, z níž by byl objekt určité velikosti viditelný právě pod příslušným pozorovaným úhlem.

Tyto vzdálenosti jsou obecně různé, záleží na reálných poměrech, které ve vesmíru panují, je třeba mezi nimi rozlišovat.

Příklad – geometrická vzdálenost v plochem vesmíru s přitažlivou hmotou.

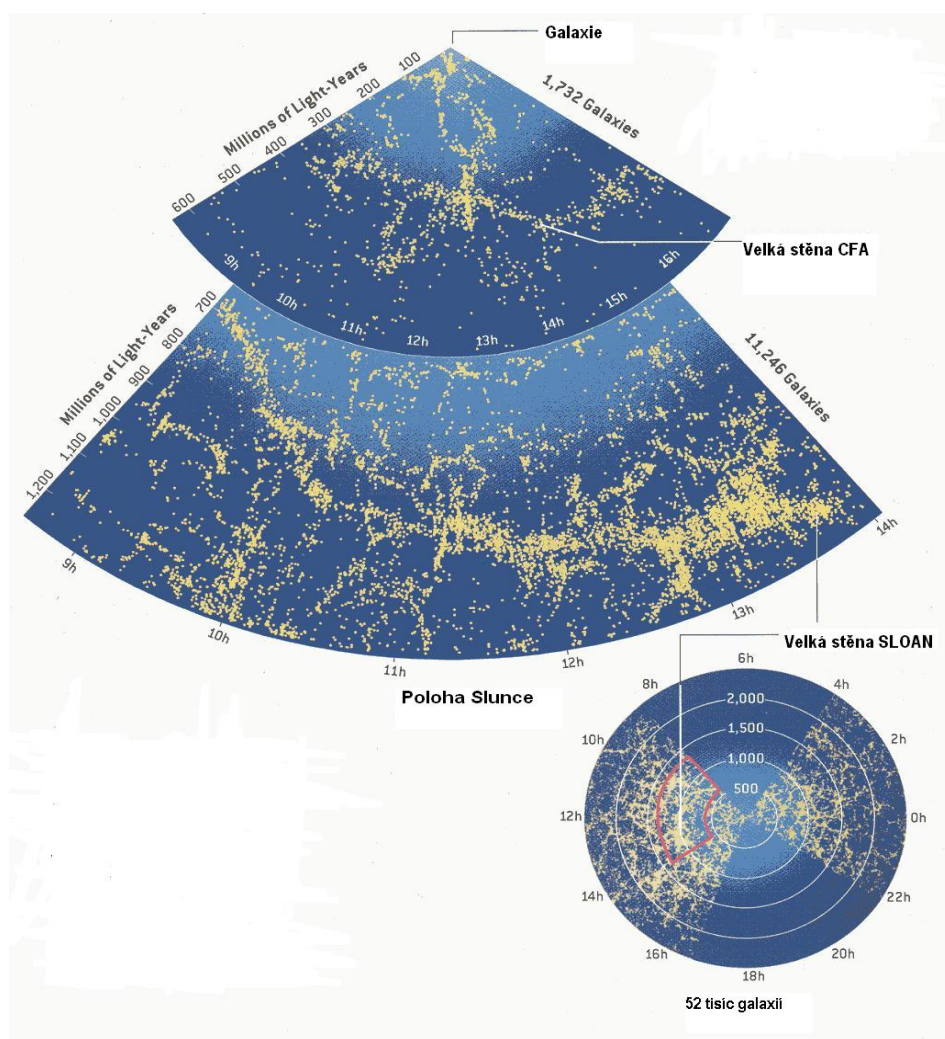
$$R = At^{2/3}; \quad z + 1 = \frac{At_0^{2/3}}{At_e^{2/3}}; \quad \rightarrow \quad \frac{t_e}{t_0} = (z + 1)^{-\frac{3}{2}}; \quad \rightarrow \quad 1 - \frac{t_e}{t_0} = 1 - (z + 1)^{-\frac{3}{2}};$$

$$\frac{t_0 - t_e}{t_0} = 1 - (z + 1)^{-\frac{3}{2}}; \quad \rightarrow \quad r_{geom} = c(t_0 - t_e) = ct_0 \left[1 - (z + 1)^{-\frac{3}{2}} \right]; \quad ct_0 - \text{poloměr horizontu.}$$

pro $z = 5$ $r_{geom} = 12,7$ mld světelných let.

„Ukaž mi jak se červenáš, já ti povím, jak jsi daleko!“

Kosmologický červený posuv z – nejspolehlivější *relativní* míra vzdálenosti kosmologických objektů – pomocí něj řada odhalení – buněčná struktura vesmíru.



K zjištění absolutních rozměrů vesmíru je ovšem nutno tuto míru navázat na reálné vzdálenosti ve vesmíru. V lokálním měřítku – zjištění reálné hodnoty Hubbleovy konstanty, ve větším měřítku pak například zjištění deceleračního parametru q , nebo ještě lépe realistického modelu rozpínajícího se vesmíru.

Vzdálenosti vesmírných objektů

Rozměry vesmíru

- Zprvu: vesmír je celý viditelný, končí sférou stálic. Rozměry: několikanásobek poloměru Země
- 1850 první úspěšná měření vzdálenosti nejbližších hvězd – vesmír $> 10^5$ světelných let

Začátek 20. století, většina astronomů soudila: vesmír \equiv Galaxie

20. léta 20. století Edwin Hubble ukázal, že tzv. spirální mlhoviny jsou vlastně hvězdné soustavy podobné naší Galaxii \rightarrow vesmír se rozrostl na miliardy světelných let.

Galaxie – komplikované hvězdné soustavy, čítají $10^9 - 10^{12}$ hvězd, obsahují mhv. látku, skrytou hmotu, jejíž hmotnost několikanásobně převyšuje hmotnost hvězdné složky.

Galaxie spirální, eliptické, nepravidelné, liší se obsahem hvězdných populací. Naše Galaxie – spirální, možná s příčkou.

Pohled do vzdáleného vesmíru – pohled do minulosti – v principu lze takto zrekonstruovat celou expanzní historii vesmíru

V současnosti ve zvláštních případech můžeme pozorovat i soustavy, které vznikly bezprostředně poté, kdy se ve vesmíru začaly tvořit hvězdy a galaxie. Příkladem gravitační čočkou zesílená galaxie, jež k nám vysílala své světlo, když byl vesmír starý cca 1 miliardu let.



V roce 1929 určil E. Hubble hodnotu H_0 na 500 km/s/Mpc, sedmkrát větší, než dnešní hodnota – příčinou vadné kalibrace indikátorů vzdáleností. Vzdálenosti ve vesmíru jsou tedy 7krát větší než se dříve soudilo.

1950 – Baade 1. rekalibrace vzdáleností: 250 km/s/Mpc

1958 – Sandage: hodnota H_0 něco mezi 50 km/s/Mpc a 100 km/s/Mpc. Rozpětí sice správné, ale příliš široké – dlouho tu vedle sebe existovaly skupiny hájící krajní meze intervalu. Rozhodující řešení přineslo až měření Hubblovým kosmickým dalekohledem – byl to jeden z jeho klíčových projektů.

Běžně se přitom využívá postupná metoda tzv. žebříku vzdálenosti, kdy se vychází od nejbližších objektů, u nichž je možné přímo určit trigonometrickou paralaxu, které představují jeho nejnižší příčku až po nejvyšší příčky, kde těmi standardními svíčkami jsou už celé galaxie nebo jejich skupiny.

Trigonometrické paralaxy, kinematické a dynamické paralaxy

Základem jsou roční paralaxy bližších hvězd vznikajících v důsledku oběhu Země kolem Slunce. Jejich změření je náročnou astrometrickou úlohou, která až do roku 1850 byla mimo možnosti astronomické techniky a způsobu zpracování pozorování. Ani potom nebyla přesnost pozorování nijak valná cca 0,007“ – s nejistotou do 10% bylo možno měřit vzdálenosti hvězd do 15 pc. Jednalo se tak jen o cca 1000 hvězd, vesměs mnohem slabších než Slunce, které jako standardní svíčky nebylo možné využít.

Obrat znamenaly výsledky astrometrická družice Hipparcos, ta změřila vzdálenosti cca milionu hvězd. Přesnost 0,001“, s 10% přesnosti bylo možné měřit do 100 pc, s touto přesností změřeno na 28 000 hvězd. Základ skutečně přesného proměřování. Mezi spolehlivě změřenými vzdálenostmi byly i vzdálenosti několika galaktických cefeid – velmi důležité, tyto velmi jasné veleobří hvězdy jsou další významnou příčkou žebříku kosmických vzdáleností.

U vizuálních dvojhvězd lze určit tzv. *dynamickou paralaxu* na základě vzhladu jejich vzájemných drah na obloze, periody a radiálních rychlostí. Přesnost metody je nepřímo úměrná vzdálenosti systému.

Pro potvrzení spolehlivosti byly významná měření vzdáleností nezávislých na fotometrii – kinematických paralax, sekulárních paralax – odraz pohybu Slunce mezi hvězdami. Jinou metodou sledování vlastních pohybů a radiální rychlosti souběžně se pohybující skupiny hvězd – metoda tzv. *pohybových hvězdokup*. Nejčastěji využívána hvězdokupa Hyády. Na obdobném principu založena metoda tzv. *statistických paralax* – opět vlastní pohyby, radiální rychlosti jistých skupin hvězd – dosah až 500 pc. Ale ani to nestačí např. pro průzkum celé Galaxie, ta rozměry několik desítek kpc.

Fotometrické vzdálenosti, standardní svíčky

Základní metoda určování vzdálenosti vychází z měření jasnosti objektů, jejichž zářivý výkon L známe. Pozorujeme-li jejich bolometrickou jasnost F z (fotometrické) vzdálenosti d_L , pak platí:

$$d_L = \left(\frac{L}{4\pi F} \right)^{1/2},$$

Problém ovšem představuje míra spolehlivosti stanovení oné hodnoty zářivého výkonu L , jisté zkreslení může vnést i mezihvězdná a mezigalaktická extinkce, která pozorovaný tok záření zeslabuje.

Zákrytové dvojhvězdy

Pokud získáme spolehlivé světelné křivky zákrytových dvojhvězd a současně získáme křivku jejich radiálních rychlostí, můžeme určit absolutní velikosti složek, jejich efektivní teploty a tudíž zářivé výkony L , respektive jejich absolutní bolometrické hvězdné velikosti M_{bol} .

Z pozorované bolometrické jasnosti F po odečtení případného vlivu extinkce lze odvodit skutečnou vzdálenost zákrytové soustavy. Tato metoda je zcela nezávislá na předchozích kinematických nebo astrometrických měřeních, její přesnost v zásadě nezávisí na vzdálenosti, jen je problematické ve velkých vzdálenostech tyto zákrytové systémy vůbec odhalit, většina z nich totiž nevyniká velkým zářivým výkonem.

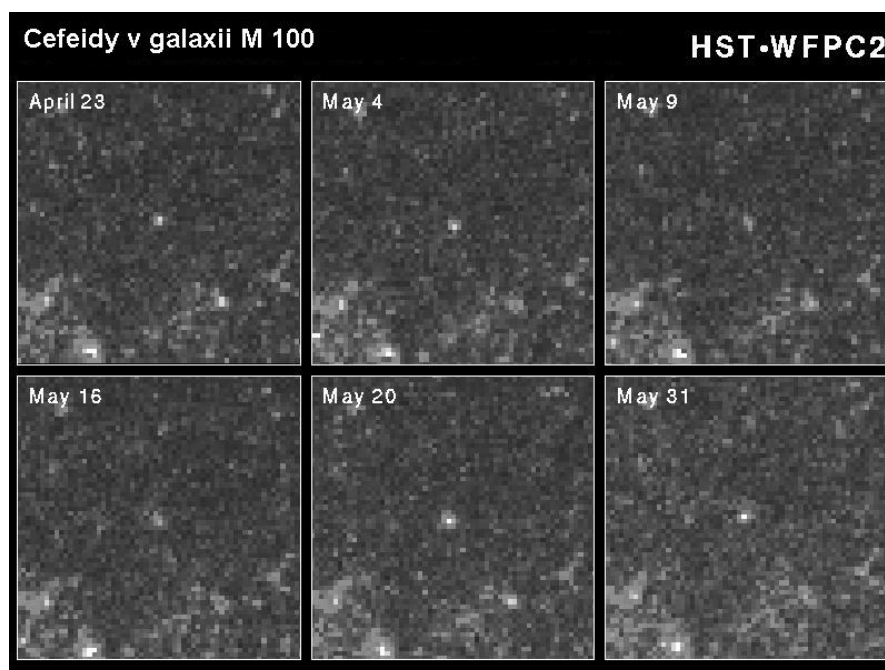
Pulsující hvězdy pásu nestability

Výhodnější skupinou hvězd jsou pulsující obří a veleobří hvězdy patřící do pásu nestability – proměnné typu *RR Lyrae* a tzv. *cefeidy*. Zde existuje jasná závislost mezi jejich absolutní hvězdnou velikostí a periodou P . Ta je nepřímo úměrná odmocnině střední hustoty hvězd a vyjadřuje tak rozměry hvězdy. Hvězdy typu RR Lyr pozorujeme ve všech typech galaxií, relativně hmotnější cefeidy jsou ovšem pouze tam, kde jsou zastoupeny hvězdy tzv. populace I, tedy ve spirálních a nepravidelných galaxiích.

$$M_V = -2,80 \log P - 1,43.$$

Sklon závislosti byl znám již dávno pozorování cefeid v sousedních galaxiích – Velkém a Malém Magellanově mračnu, absolutní člen je až výsledkem nedávné recalibrace založené na výsledcích Hipparca. Nalezením cefeid ve vzdálených galaxiích lze velmi spolehlivě stanovit jejich vzdálenost. Cefeidy jsou považovány za tzv. *standardní svíčky* v metodě určování vzdálenosti a je jim dáována přednost ostatními metodami. Jejich výhodou navíc je, že jde o hvězdy mimořádně zářivé, byť ne úplně nejjasnější. Právě pomocí nich se stanovuje lokální hodnota Hubblovy konstanty. Dlouholeté pozorování cefeid v blízkých galaxiích pomocí HST a jejich navázání na moderní efektivní metody určování vzdáleností galaxií vedlo ke „kompromisní“ hodnotě: $H = (70 \pm 7) \text{ km/s/Mpc}$. Tato hodnota byla potvrzena i jinými nezávislými metodami jako je třeba sledování reliktního záření.

Dosah metody je určen mezní hvězdnou velikostí dalekohledu. Je-li $M = -6 \text{ mag}$ a $m = 22 \text{ mag}$, pak lze určovat vzdálenosti galaxií do 4 Mpc (M 31 je vzdálena 0,725 Mpc).



V hvězdných soustavách, kde nepozorujeme cefeidy je třeba vzít zavedek hvězdami v pokročilém stupni vývoje – typu W Virginis a RR Lyrae, u nich podobný vztah, ale jde o hvězdy slabší – dosah metody je tedy omezenější.

Sekundární indikátory vzdálenosti

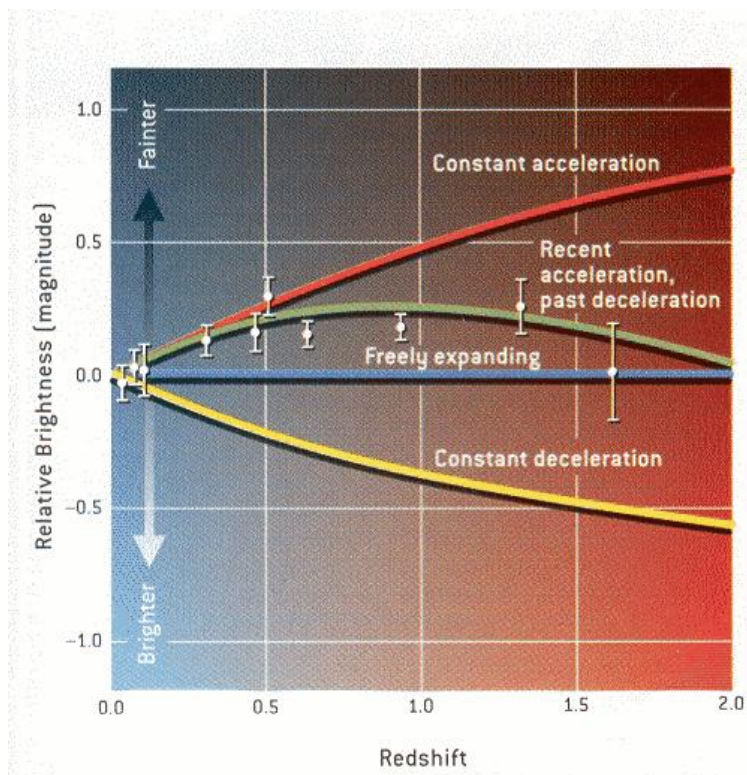
Jedná se zpravidla o skupiny velmi jasných objektů, které jsou nápadné a dobře viditelné i na velkou vzdálenost, spolehlivost znalosti jejich zářivého výkonu je ovšem mnohem menší. Běžně se k tomuto účelu používají *červení a modří veleobři, nejjasnější hvězdy v galaxiích, oblasti ionizovaného vodíku H II, novy a kulové hvězdokupy*. K určení absolutní jasnosti nov se používá rozboru jejich světelných křivek – zejména tempa poklesu jejich jasnosti.

Dosah těchto způsobů určení vzdálenosti je až 100 Mpc.

Supernovy

jsou závěrečným stadiem vývoje některých typů hvězd. I když příčiny jejich vzplanutí jsou různé, opticky se projevují prudkým nárůstem jasnosti ve škále několika dní a poklesem ve škále měsíců.

Absolutně nejlepším indikátorem vzdálenosti, zařazeným tak mezi *standardní svíčky* jsou *supernovy typu Ia*, které vznikají zhroucením a následným termionukleárním zažehnutím identických předchůdců. Navíc jde o supernovy s absolutně největším zářivým výkonem v maximu, proto je možné je sledovat až do kosmologických vzdáleností. Pozorováním supernov typu Ia jsme získali informaci o povaze rozpínání vesmíru v době před řadou miliard let.



Pozorování vzdálených supernov se $z > 1$ jasně ukazují, že vesmír se v minulosti vlivem své vlastní gravitace nejdříve brzdil, pak se však začal urychlovat, což je nejspíš důsledek odpudivé gravitace temné energie vakua.

Nevýhoda měření vzdáleností galaxií pomocí supernov spočívá v tom, že supernovu si v určité není možné „objednat předem“, vybuchnou si kde samy chtějí... Nutné je najít další indikátory zářivého výkonu galaxií, které fungují vždy.

galaxie

V posledních 50 letech byly nalezeny zajímavé metody, pomocí nichž lze poměrně spolehlivě odhadnout vzdálenosti jednotlivých galaxií a kup galaxií. Dostí účinná a rychlá je metoda tzv. *nejjasnějších galaxií* galaktických kupách – jde o zvláštní typ kanibalistických galaxií typu cD vyznačujících se víceméně standardním zářivým výkonem.

Ve spirálních galaxiích byla v roce 1977 objevena tzv. pozitivní závislost mezi rozšířením „rohaté“ emisní čáry neutrální vodíku s vlnovou délkou 0,21 m vyjadřujícím oběžnou rychlost mezihvězdné látky kolem centra galaxie a absolutní hvězdnou velikostí galaxie: $L \sim V^{\alpha}$. Vztah je však třeba kalibrovat, např. pomocí vzdáleností určených pomocí cefeid.

Pozoruhodně dobře funguje metoda s oblibou aplikovaná na eliptické galaxie, jež se přirozeně rozvinula v souvislosti se zavedením CCD techniky. Sleduje se zde fluktuace jasu galaxií pixel od pixelu, která závisí na vzdálenosti soustavy. Počet hvězd připadající na jeden pixel je přímo úměrný čtverci vzdálenosti a relativní fluktuace jasu je nepřímo úměrná odmocnině počtu hvězd v 1 pixelu, a tedy vzdálenosti.

Velmi cenné jsou určení vzdálenosti proměnných galaxií (nebo jejich aktivních jader) zesílených efektem *gravitační čočky*, kde vzdálenost lze odečíst z posuvu časů proměnnosti jednotlivých obrazů.

Mírou vzdálenosti určité daleké galaxie je i velikost tzv. *Sjunjajevova-Zeldovičova efektu* daného interakcí fotonů reliktního záření s relativistickými fotony z oné galaxie – vede k poklesu intenzity dlouhovlnného mikrovlnného reliktního záření a k nárůstu intenzity rentgenového. Kombinací radiového a rentgenového záření lze odvodit vzdálenost galaxie.

Velký třesk a co bylo po něm

Třesklo to při velkém třesku?

Kosmologové svorně soudí, že vesmír vznikl i s celým časoprostorem před cca 14 miliardami let velkým třeskem - BIG BANGem. Není to otázka víry, ale nejlepší známé zdůvodnění toho, co pak následovalo.

Velký třesk je jedním z pilířů současného chápání světa. Jeho největší vadou je nešťastně zvolený název: navozuje totiž představu gigantické exploze. Vesmír se však po velkém třesku rozpínal do vlastního prostoru, absolutně klidně a tiše! Byl to naprosto důstojný, velebný akt!



Z názvů *Velký třesk*, *big bang* – ovšem přímo čišší velkohubost, humpoláctví, není divu – *big bang* totiž byl míněn jako nadávka, urážka. Autorem této nálepky byl kosmolog Fred Hoyle – autor konkurenční teorie věčného, stále se doplňujícího, expandujícího vesmíru (*steady state universe*). Jeho protivníci: abbé Lemaitre, George Gamow.

V roce 1993 redakce časopisu *Sky and Telescope* vypsala soutěž na přiléhavější název big bang. U poroty pak z 11 tisíc návrhů zvítězil „návrh“ Hoyleův : big bang – velký třesk.

Račí historie vesmíru

Pro výklad dějů v raném vesmíru použijeme račí postup – postupovat budeme s opačným chodem času. Postupně se tak budeme dostávat stále blíže k vlastnímu velkému třesku.

Vesmír, dnes starý 13,7 mld let se neustále rozpíná, řídne a chladne, v okolí velkého třesku teplota a hustota rostly nade všechny meze.

$t = 1,5 \cdot 10^9$ let, $z = 6$. Kvasary, běžné galaxie, vše v dohledu těch nejvýkonnějších dalekohledů.

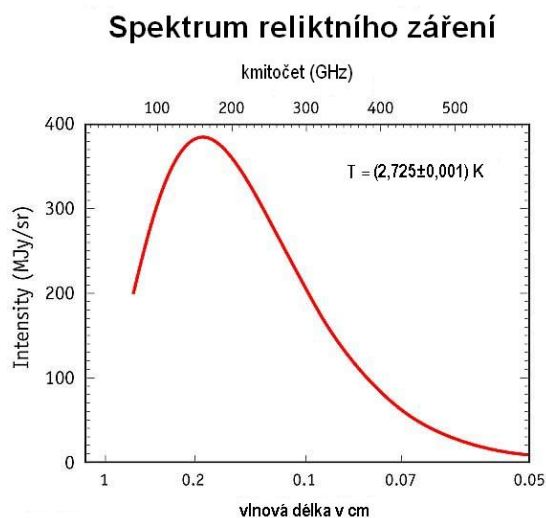
$t = 2 \cdot 10^8$ let, $z = 20$. Konec období temného vesmíru – rozzářily se v něm první hvězdy. Ty máme v principu možnost ještě spatřit, i když jejich záření musí být silně zčervenalé červeným posuvem a velmi slabé.

$t = 380\,000$ let, $z = 1100$ – záření se oddělilo od látky – vznik reliktního záření, předtím byl už vesmír **zcela** neprůhledný, o jeho stavu vypovídá už jen teorie. Vesmír byl v tom okamžiku asi dvoumiliardkrát hustější, teplota 3000 K. Už v něm ale existovaly zárodky budoucích kup galaxií a buněčné struktury vesmíru.

Reliktní záření, éra záření

1948 : G. Gamow, R. Alpher, R. Herman v rámci svého horkého modelu vesmíru předpověděli existenci mikrovlnného záření o teplotě 5 K přicházejícího ze všech směrů z vesmíru, o praktické pozorování se ale nepokusili. 1965 je předpověděli nezávisle J. Zeldovič, F. Hoyle aj. Taylor (Velká Británie).

- 1965 A. Penzias, R. Wilson – objev reliktního záření na vlnové délce 73,5 mm u antény na sledování balónovité družice Echo. Snažili se technicky eliminovat veškeré zdroje šumu, nepodařilo se jim to u dokonale všesměrového záření o jasové teplotě 2,7 K. Za objev získali v roce 1978 Nobelovu cenu za fyziku. Teoretické zdůvodnění – Dicke, Roll, Wilkinson, Peebles v témže čísle časopisu *Astrophysical Journal*.



Reliktní záření – pozůstatek a svědek horké fáze vesmíru. Obsahuje v sobě třicetkrát více energie než kolik jí bylo kdy vyzářeno z hvězd.

Okamžik oddělení reliktního záření $z = 1100$ – chvíle kdy vesmír ochladl na 3000 K, elektrony vesměs rekombinovaly s protony a vytvořily neutrální vodík, průhledný k postupujícímu záření. Vlastnosti reliktního záření v současnosti: záření absolutně černého tělesa o teplotě $T = 2,725 \text{ K}$.

Koncentrace fotonů reliktního záření: $n_r = 2,029 \cdot 10^7 \text{ m}^{-3} \text{ K}^{-3} T^3 = 4,11 \cdot 10^8 \text{ fotonů/m}^3$. Počet nukleonů v m^3 (4% kritické hustoty): $n_n = 0,22 \text{ nukleonu/m}^3 \rightarrow$ poměr je 1:1 900 000 000!

Hustota energie: $w_r = \frac{4\sigma}{c} T_r^4$; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4} \rightarrow w_r = 4,17 \cdot 10^{-14} \text{ J/m}^3$, odpovídající hustota $\rho_r = w_r/c^2 \rightarrow \rho_r = 4,63 \cdot 10^{-31} \text{ kg/m}^3$.

To je ale podstatně méně než kolik činí kritická hustota hmoty ve vesmíru, $h = 0,70$: $\rho_k = 1,879 \cdot 10^{-26} h^2 \text{ kg/m}^3 = 9,2 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$, $\rightarrow \rho_r/\rho_k = 5,03 \cdot 10^{-5}$, $\rho_r/\rho_n = 1/800$.

V minulosti ovšem byl ovšem význam záření větší, než je v současnosti – poměr počtu nukleonů a fotonů se zachovával, energie fotonů však byla úměrná $1/R$, tedy $(z+1)$. Například když bylo $z > 800$, byly fotony důležitější než nukleony (v době $380\,000 \text{ let} \times (1100/800)^{3/2} = 610\,000 \text{ let}$ po velkém třesku a dříve).

- Ve vesmíru kromě baryonové a leptonové hmoty ale ještě existuje další forma gravitačně přitažlivé látky – tzv. temná látka – její hustota spolu s baryonovou složkou odpovídá cca 27% kritické hustoty. Temná energie v raném vesmíru roli nehrála, neboť její hustota je víceméně konstantní a vrchu nabývá až v současnosti, kdy se přitažlivé formy látky dost naředily. V současnosti poměr hustoty energie přitažlivé hmoty k hustotě energie záření je $\rho_r/\rho_a = \rho_r/(0,27\rho_k) = 1/5400$. Hustoty energií byly vyrovnány v čase, kdy byl vesmír 5400krát menší a teplota byla $3000 \times 5400/1100 = 15\,000 \text{ K}$.

V té době (řádově tisíce let před velkým třeskem a méně) jasně převládalo záření – mluvíme proto o *éře záření*. Charakteristikou tu byla hlavně termodynamická teplota T – materiál ve vesmíru byl v dokonalém kontaktu, ve stavu termodynamické rovnováhy.

$$R = \sqrt[4]{\frac{32\pi G \rho_{0k}}{3}} t^{1/2} = 2,1 \cdot 10^{-9} t^{1/2}, \quad T = \frac{T_0}{R} = \frac{2,72}{2,1 \cdot 10^{-9}} t^{-1/2} = 1,3 \cdot 10^9 \text{ K } t^{-1/2} \approx 10^9 \text{ K } t^{-1/2}$$

Střední energie připadající na 1 foton $\varepsilon_s = 2,7 kT = 3,726 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1} T$, takže při teplotách vyšších než cca $2 \cdot 10^9 \text{ K}$ se při srážkách dvou fotonů musí běžně vytvářet páry pozitron+elektron, při teplotách nad $4 \cdot 10^{12} \text{ K}$ se tvoří páry proton a antiproton. Při teplotách vyšších než tato mez se tedy ve fotonovém plynu musí běžně nacházet i množství částic a antičástic, které spolu anihilují, jiné fotony se naopak materializují.

Kde se vzalo ve vesmíru hélium?

V 30. letech 20. století ještě nebylo zřejmé, zda byl počátek našeho vesmíru chladný nebo horký. Zpočátku se zvažovala spíše první eventualita – na počátku tu byla suprahustá látka složená z chladných neutronů. Při poklesu hustoty v důsledku rozpínání se měly neutrony rozpadat: $n \rightarrow p + e + \nu$. Vzniklé protony by se ovšem rychle spojily se zbylými neutrony na deuterium, a to by se pak snadno přeměnilo na hélium. Veškerá látka by se tak změnila v hélium, což ovšem odporuje skutečnosti.

Proto v roce 1948 přišel Georgie Gamow s jinou variantou, horkého počátku vesmíru, právě aby vysvětlil pozorované zastoupení chemických prvků. První problém, který musel vyřešit byl problém vzniku prvotního hélia a jeho skutečné zastoupení ve vesmíru.

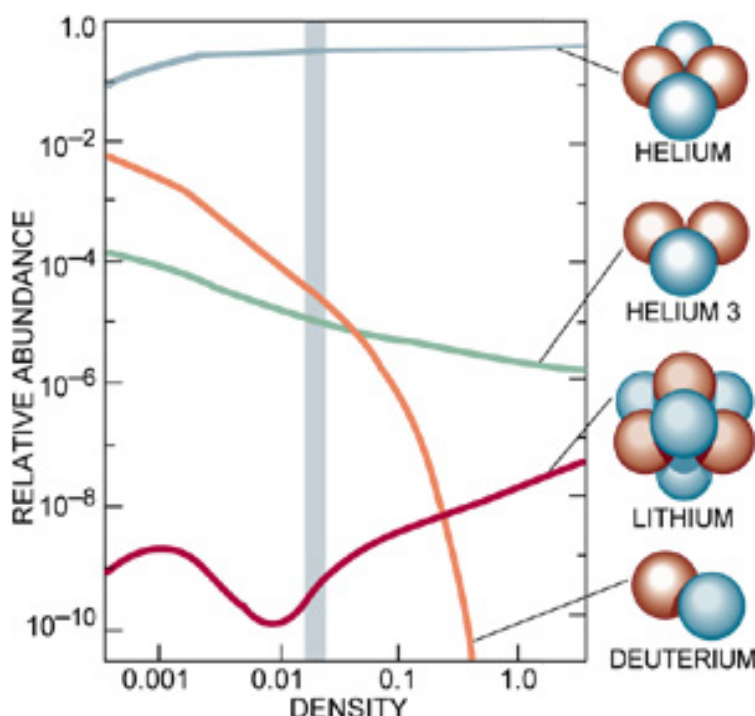
Standardní složení hvězd: 1 – 5 % prvků těžších než hélium, **24 % He**, zbytek vodík. Těžší prvky vznikly v nitrech předcházejících generací hvězd a dalším vývojem se dostaly do prostoru, do mezihvězdné látky, z níž se potom formovala další pokolení hvězd.

V jádrech hvězd ovšem hélium vzniká ($4 \text{ H} \rightarrow \text{He}$), v dalším jaderném vývoji hélium takřka kompletně se mění na těžší prvky ($\text{He} \rightarrow \text{C}, \text{O}$), takže obsah He se nakonec nezmění. I ty nejstarší hvězdy ve vesmíru mají 24% hélia!

Ukazuje se že vůbec veškerá prvopočáteční hmota ve vesmíru tento díl hélia obsahovala. Existence tohoto tzv. *primordiálního* hélia se stala silným argumentem ve prospěch konceptu **horkého** a hustého počátku raného vesmíru.

V raném, velmi horkém vesmíru o stáří menším než 1 minuta byl stejný počet protonů a neutronů. Jádra se hned po utvoření v důsledku prudkých srážek znovu rozpadala. S tím, jak vesmír chladnul, energie částic klesala, a mezi baryony začaly v důsledku své menší hmotnosti převládat protony nad neutrony. Nakonec připadlo na jeden neutron na 7 protonů. Neutrony by se s polčasem tisíce sekund postupně rozpadly na p , e^- , ν . Většina z nich se zachránila reakcí: $p + n \rightarrow D$, $D + n \rightarrow T$ jádra tricia se pak rychle spojila s dalšími dvěma protony a vzniklo pevně vázané jádro helia He^4 .

Zastoupení helia ^4He (22-24%) je jen málo citlivé na parametrech vesmíru. Jsou tu ale i jiné nuklidy: ^7Li , ^2H , ^3He . Z jejich dnešního zastoupení plyne, že hustota **baryonové látky** činila odedávna jen 4% očekávané kritické hustoty vesmíru.



Co to znamená?

1. Buď je vesmír celkově řídký, hyperbolický, to ale odporuje pozorování, které nasvědčuje tomu, že vesmír je plochý, jeho hustota = hustotě kritické,
2. nebo v něm převládá **nebaryonová skrytá látka**, představující úhrnem 96% hmoty.

Kam se poděla antihmota?

V dnešním vesmíru takřka chybí antihmota – vzniká jen při jaderných reakcích, ale velmi rychle anihiluje. Úplně na počátku vývoje vesmíru však vládla kompletní symetrie – částic i antičástic bylo stejně, srážkami energetických fotonů se tvořily páry částice-antičástice, které po čase znovu anihilovaly. S tím jak vesmír chladnul, vznikaly generace stále méně hmotných částice, **anihilace** ale vše převracela v záření.

Svět antihmoty však naštěstí není dokonale věrný zrcadlovým obrazem našeho (hmotného) světa. Když byl vesmír starý cca 10^{-35} s, a jeho teplota činila řádově 10^{28} K, převládaly v hmotě

vesmíru velmi hmotné částice zvané bozony X. Ty, když se rozpadaly, tak to nebylo zcela symetrické, neboť vznikalo o zhruba $1/2 \cdot 10^{10}$ více částic než antičástic. Vesmír starý 10^{-35} s si zahrál hru *Škatule, škatule hejbejte se!*

V důsledku toho v dnešním vesmíru prakticky zcela chybí antihmota, přičemž relativní zastoupení reliktních **fotonů**, **neutrin** a nukleonů: $1,7 \cdot 10^{10} : 1,2 \cdot 10^{10} : 1$.

Nezbytnost inflačního modelu velkého třesku

Standardní model velkého třesku je sice schopen v zásadě vysvětlit spektrum reliktního záření i zastoupení lehkých prvků a absenci antihmoty, selhává při těchto otázkách:

1. Proč je vesmír tak homogenní i v těch největších měřítkách, v částech, které vlastně nikdy neměly být v kontaktu?!
2. Proč je rozměr vesmíru mnohem větší než bychom čekali? Proč je **plochý**? Proč je hustota vesmíru právě kritická – platí to zejména v době kolem velkého třesku.
3. Kde se vzaly fluktuace, které pak daly vznik galaktickým strukturám a hvězdám?

Pro vše se našlo jediné, ambiciózní vysvětlení – předpokládající existenci tzv. **inflačního vesmíru**.

S myšlenkou, že vesmír v období krátce po velkém třesku prošel dramatickou epizodou expanze o mnoho desítek řádů, přišli už v 80. letech minulého století Alan Guth, Paul Steinhardt, Andrei Linde, Andy Albrecht, kteří vypracovali teorii inflačního vesmíru.

Teorie je založena na řadě moderních fyzikálních idejí: např., že na počátku vesmíru byly všechny čtyři základní fyzikální interakce sjednoceny v jedinou. Vesmír byl zcela hladký symetrický. V průběhu vývoje vesmíru pak docházelo k jeho řídnutí a postupnému osamostatňování jednotlivých sil (interakcí), k všestrannému spontánnímu narušování symetrie a k fázovým přechodům.

V době před 10^{-35} s se v dynamice vesmíru dostalo ke slovo *pseudovakuum* s gigantickou hustotou energie a odpudivou gravitací. Inlace doslova rozfoukla celý tehdejší vesmír do gigantických rozměrů, dodala mu energii a expanzi. Zapříčinila to, že vesmír má právě kritickou hustotu, a je tedy absolutně plochý.

Pseudovakuum fázově přešlo na současné „pravé vakuum“, jeho energie posloužila k tvorbě částic a antičástic, z jejichž nepatrné části vznikl i náš baryonový svět.

K rozpadům falešného vakuu nedocházelo najednou, vznikala zde ohniska, centra fluktuací, z nichž později povstaly galaxie a kupy galaxií. Zřejmě současně vznikla i nebaryonová skrytá látka s přitažlivou gravitací. Ukazuje se, že i „dnešní vakuum“ obsahuje jisté zbytkové množství temné, gravitačně odpudivé energie. Ta se před 11 miliardami let znovu prosadila a začala náš vesmír opět inflačně rozfukovat. V dnešním vesmíru zcela dominuje.

Vlastní velký třesk

Velký třesk je začátkem vývoje vesmíru, okamžikem, kdy začal plynout čas, vzdálenosti všech bodů byly nulové, $R = 0$ - časoprostorová singularita. Pro hypotetického vnějšího pozorovatele počátek časové škály ($z \rightarrow \infty$) existuje, ačkoli jednotlivé děje jsou zde absolutně zpomaleny. Ve skutečnosti nelze dohlédnout hlouběji než do doby, kdy měl vesmír 370 000 let (poslední rozptyl – pozůstatek je reliktní záření).

Předpovědi chování hmoty a časoprostoru v období krátce po velkém třesku podmíněny alespoň rámcovou znalostí odpovídající fyziky.

Při nahlížení do minulosti vesmíru dlouho vystačíme se čtyřmi interakcemi v dnešním pojetí.

Pak místo slabé a elektromagnetická interakce se setkáváme už jen s tzv. *elektroslabou interakcí*, pak se elektroslabá interakce spojí se silnou, čemuž se říká *velké sjednocení*, nakonec spojením s gravitací dostáváme jedinou *univerzální interakci*.

Bohužel, tak daleko fyzika ještě vůbec nepokročila. Neexistuje vlastně ani kvantová teorie gravitace – ta se nutně uplatní při hustotách odpovídajících tzv. Planckově hustotě $5 \cdot 10^{96} \text{ kg/m}^3$, při Planckově stáří vesmíru cca 10^{-44} sekundy. Nemáme už ani tušení, jak se chová taková kvantová gravitace, eventuálně propojená s ostatními sjednocenými interakcemi.

Kosmologické paradoxy všeho druhu

Co jsou to paradoxy?

(řecky nečekaný, neuvěřitelný), překvapivý a neřešitelný spor, protimluv (Lucie noci upije...). Klasické antické paradoxy - krokodýl, lhář Kréťan Epimenides, učitel Prótagoras a žák Euathlos. Často důsledek nesprávného očekávání - např. tzv. hydrostatický paradox, paradox perigea Pokusy o axiomatizaci matematiky (paradoxy množin, nekonečna, Gödelova věta), Odstraňování paradoxů – třeba najít, která očekávání jsou falešná, neoprávněná, případně, kde došlo k chybě v logice.

Fotometrický paradox. Proč je v noci tma?

V nekonečně velkém vesmíru (dosti rozlehlém) vesmíru by měla být obloha úplně pokryta obloha kotoučky hvězd (krátery na Měsíci). Zářila by jasně slunečního disku. Nikdy by nebyla tma.

Skutečnost – kotoučky hvězd z Galaxie vykrývají jen $3 \cdot 10^{-13}$ výměry oblohy, z mezigalaktického prostoru jen 10^{-15} !

Řada vysvětlení, jen některá jsou správná.

Vlastní vysvětlení: Hypotetický vesmír – 10^{15} krát více hvězd – kotoučky by se slily dohromady, efektivní teplota 3300°C . 10^{15} krát víc fotonů.

Náš vesmír je příliš mladý, hvězdy by v něm musely zářit nejméně $10^{15} \times 10^{10} = 10^{25}$ let.

Nemají však k tomu dostatek energie – i kdyby se kompletně změnily na fotony, bylo by to 10^{10} krát méně, než by bylo zapotřebí.

To přitom vůbec nebereme v úvahu rozpínání vesmíru, které situaci dále zhoršuje.

Temnota nočního nebe je dána tím, že vesmír neobsahuje dostatek energie, aby se vytvořila dostatečně zářivá obloha.

Světlo všech hvězd bylo, je a bude příliš slabé na to, aby osvítilo temný vesmír.

Termodynamický paradox. Čeká nás vbrzku tepelná smrt?

Vesmír neodvratně spěje do stavu termodynamické rovnováhy – jediným pohybem tepelný pohyb molekul a atomů. Všude táž teplota – svět upadne do smrtelné tepelné agónie.

Důsledek 2. věty termodynamické – vše směřuje od pořádku k nepořádku, entropie roste – tepelná smrt vesmíru – smrt chladem.

TD paradox děsil fyziky, pak se na něj zapomnělo.

Překvapující řešení – vesmír už ve stavu tepelné smrti **byl**, dnes se od něj jen nepatrně odchyluje. Na počátku vývoje vesmíru byl vesmír v TDR, všechny součásti v kontaktu, všude stejná teplota. Vesmír se narodil jako mrtvé dítě. Zázrak oživení – pořádek!

Ten do vesmíru vneslo jeho rozpínání, uspořádaný pohyb, který nelze převést na teplo.

Rozhodující moment – 379 000 let po VT – oddělení záření od látky, látka rychle zchladla, záření nevadilo. Mohl vzniknout bohatě strukturovaný svět (galaxie, hvězdy, život)

Entropie vesmíru blízka TR – reliktní fotony, neutrina v TR – 1: 26 miliardám!

Rozpínání vesmíru z něj sňalo kletbu tepelné smrti. Jenže: Proč se vesmír vlastně rozpíná?

Odpověď souvisí s tím: Odkud se ve vesmíru vzala hmota?

Za všechno může gravitace!

Vše se stalo v prvních okamžicích po VT – expanzi má na svědomí odpudivá gravitace –

důsledek existence látky (vakua) se záporným tlakem. Ta se časem změnila v normální látku.

Těchto inflačních vývojových etap zažil vesmír několik! Hned po VT, 10^{-35} s, od 5 mld let dodnes.

Lékem proti tepelné smrti je tedy gravitace.

Paradox horizontu. Proč je vesmír izotropní?

Kosmologický princip → vesmír homogenní, izotropní. Jak to ale zařídit – jednotlivé části vesmíru musejí vědět, jaké mají být (globální charakteristiky).

Pozorování potvrzují izotropii, tedy platnost KP – horizonty protilehlých částí vesmíru se ale neprotínají, v minulosti to muselo být ještě horší.

Řešení: inflační fáze vesmíru – rychlé rozpínání až o 80 řádů, blízké body se odpluly za obzor.

Něco podobného nás v budoucnu čeká

Paradox stáří vesmíru. Jsou hvězdy starší než vesmír?

Ukaž mi jak se červenáš, já ti povím, jak jsi daleko!

Od 1929 je nejspolehlivějším měřítkem kosmologických vzdáleností červený posuv – snadno měřitelný. K správnému oceňování – Hubblova konstanta.

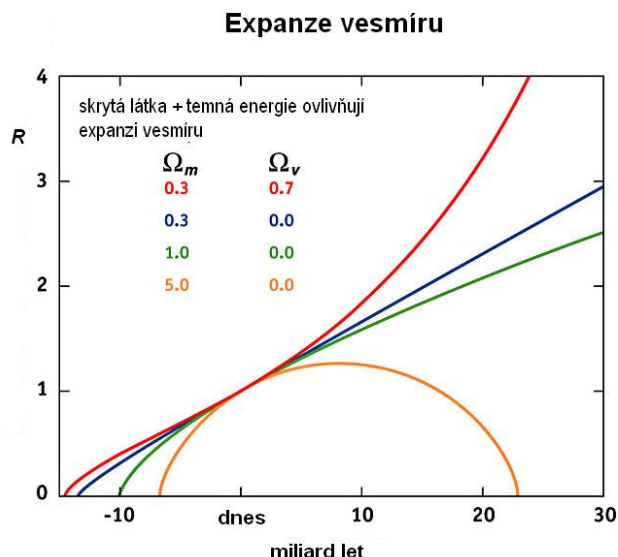
Poměr $1/H$ dává kvalifikovaný odhad stáří vesmíru.

Původní Hubblova měření 1,9 mld let, shoda s radioaktivní datací pozemských hornin. Brzy ale byly nalezeny horniny starší – dnes 4,6 mld let.

Chyba v kosmických měřících, několikerá rekalibrace. Zásluhy mají: Hipparcos, HST, WMAP

Hubbleova konstanta dnes: (71 ± 4) km/s/Mpc → za předpokladu plochosti vesmíru a přitažlivé gravitace vychází stáří vesmíru jen 10 mld let!

Nejstarší hvězdy v Galaxii ale mají 13 mld let!



Chyba v uvažování – předpoklad přitažlivosti gravitace. Ve vesmíru v současnosti dominuje gravitace odpudivá!

Antropický princip. Jak to, že tu jsme?

V prostoru vesmíru platí kosmologický princip, nikoli však v čase – velký třesk! Vesmír se v čase vyvíjí – mění se.

Časová privilegovanost pozorovatele – vesmír musel prodělat celý svůj vývoj od VT až doteď, aby se v něm objevil inteligentní život. Nezbytné je „vyladění“ kombinace základních fyzikálních konstant.

Formulace antropického principu: „Vesmír musí být takový, aby v určité fázi svého vývoje umožnil existenci jeho pozorovatelů.“ Jakoby vesmír už dopředu věděl, že se v něm objevíme!

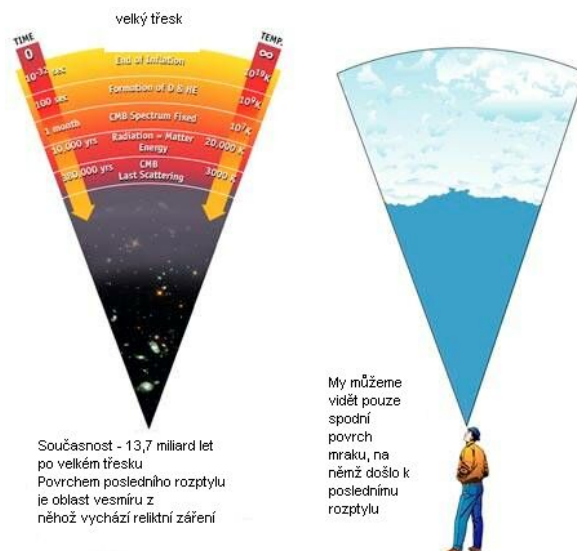
Řešením problému – princip multiversu – množství paralelně existujících vesmírů s různými vlastnostmi, z nichž jen některé mohou v sobě zrodit inteligentní život.

Odstraní se tím filozoficky nepřijatelná výlučnost našeho vesmíru, náš vesmír se stává jedním z mnohých. Je to (?) dovršení kosmologického principu.

Čertovo kopýtko – antropický princip není teorie, ale hypotéza, která na teorii nemá, protože dosud nic nepředpověděla – má stále nádech spekulace!

Nový životopis vesmíru

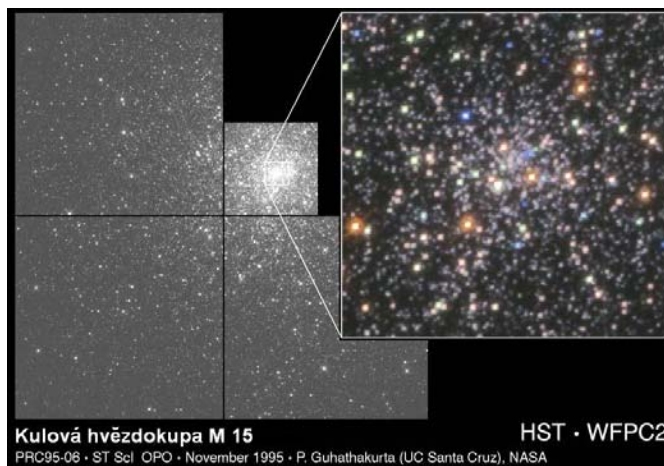
Úspěchy a problémy standardního modelu



- Standardní model horkého a hustého počátku vesmíru ve spojení se současnou fyzikou byl schopen vysvětlit i absenci antihmoty v dnešním vesmíru a pozorovanou početní převahu fotonů nad nukleony ($1:10^9$).
- Předpokladem překotné inflační fáze vývoje vesmíru v době 10^{-35} až 10^{-32} s, k níž došlo v důsledku oddělení silné interakce od elektroslabé, bylo možné vyřešit řadu dalších paradoxů vesmíru, vysvětlit jeho pozorovanou plochost, expanzi i velikost. Inflaci se vyřešila se i příčina stejných vlastností vesmíru ve všech směrech, i vznik fluktuací, z nichž vznikly zárodky pozdějších galaktických struktur.

Kosmologie až donedávna trpěla nedostatkem spolehlivých a dostatečně přesných informací o vesmíru. Pozorovatelé se museli vypořádávat zejména s extrémně nízkou úrovní signálů přicházejících z velmi vzdálených končin vesmíru, často i v oborech, kde nebyla ještě rozvinuta odpovídající detekční technika. Velmi nejisté byly i astronomické metody určování vzdáleností. Řešením bylo měření z kosmického prostoru – několik kosmologicky zasloužilých astronomických družic: Hubbleův kosmický dalekohled (HST), Hipparcos, COBE, WMAP.

- **Současné tempo rozpínání vesmíru** – Hubbleova konstanta. Sám Hubble ji stanovil na 534 km/s/Mpc. Změnou metodiky a základních škál se zmenšila na sedminu. Stále zde existovaly dvě školy: 50 km/s/Mpc a 100 km/s/Mpc. Teprve dlouholeté pozorování cefeid v blízkých galaxiích pomocí HST a jejich navázání na moderní efektivní metody určování vzdáleností galaxií vedlo ke „kompromisní“ hodnotě: $H = (70 \pm 7)$ km/s/Mpc. Problematický na této hodnotě byl fakt, že za předpokladu, že ve vesmíru převládá přitažlivá gravitace, pak stáří vesmíru vycházelo menší než stáří nejstarších hvězd v Galaxii – paradox stáří.

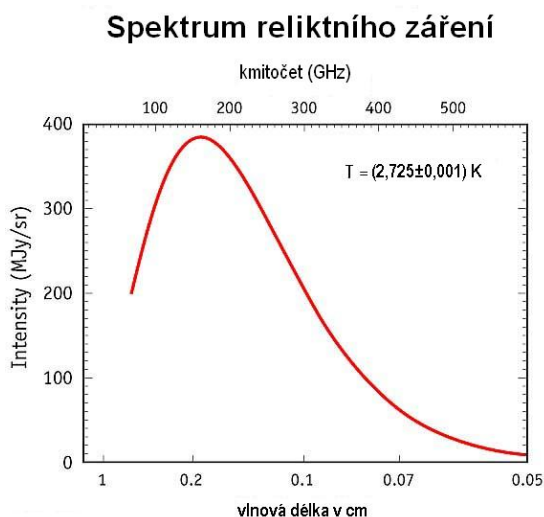


- **Střední hustota látky ve vesmíru** – podle Fridmana je osud vesmíru určen poměrem skutečné hustoty látky ku kritické hustotě dané tempem rozpínání. Z pozorování střední hustoty svítící látky ve vesmíru i z pozorovaného zastoupení lehkých prvků ve vesmíru, které vznikly v prvních minutách jeho vývoje, vyplývá, že tato hustota je mnohonásobně menší než hustota kritická. Znamená to, že žijeme v otevřeném, hyperbolickém vesmíru?
- **Plochosť vesmíru** – tomu ovšem odporuje skutečnost, že geometrie vesmíru je plochá, vesmír je podle všeho velmi blízký parabolickému, což předpovídají jednoznačně i inflační modely vesmíru, bez nichž bychom asi nedokázali vysvětlit řadu kosmologických paradoxů. Znamená to snad, že existuje ve vesmíru skrytá, nesvítivá hmota?
- **Skrytá hmota** – nesvítí ani neinteraguje se světlem, s normální baryonovou látkou interaguje snad jen gravitačně. Důkazy tu byly už ve 40. letech 20. století – Zwicky konstatoval, že k stabilitě kup galaxií je zapotřebí více přitažlivé hmoty, než kolik jí je obsaženo ve hvězdách a mezihvězdné látce. Rychlost, s níž hvězdy obíhají kolem center galaxií je vyšší než by odpovídalo jejich svítivé hmotnosti → většina látky v galaxiích nesvítivá, rozměry i hmotnosti galaxií až o řád větší. Povaha skryté hmoty – zůstává záhadou, nejspíš nepůjde o objekty složené z nukleonů (hnědí trpaslíci, neutronové hvězdy, gigantické planety), ale o rozptýlenou látku neznámých vlastností. Ta tu byla i v době pár s po velkém třesku. Odhady množství skryté látky naznačují, že i té je méně, než kolik by jí bylo zapotřebí, aby měl vesmír kritickou hustotu.
- **Decelerační vesmír** – vesmír by se při své expanzi měl zákonitě brzdit, tempo popisuje tzv. decelerační parametr. Jeho hodnotu lze zjistit z pozorování tzv. standardních svíček (objektů s definovanou jasností) ve velkých vzdálenostech. Ideálním objektem, viditelným skutečně zdaleka, jsou supernovy typu Ia, jež vznikají zhroutením a následnou jadernou explozí zhroutených bílých trpaslíků o přesně stanovené hmotnosti. Jejich pozorováním v posledních letech se došlo k závěru, že současný vesmír v jeho rozletu cosi urychluje. Jedinou silou, která to může dokázat je gravitace, a to *gravitace odpudivá*.

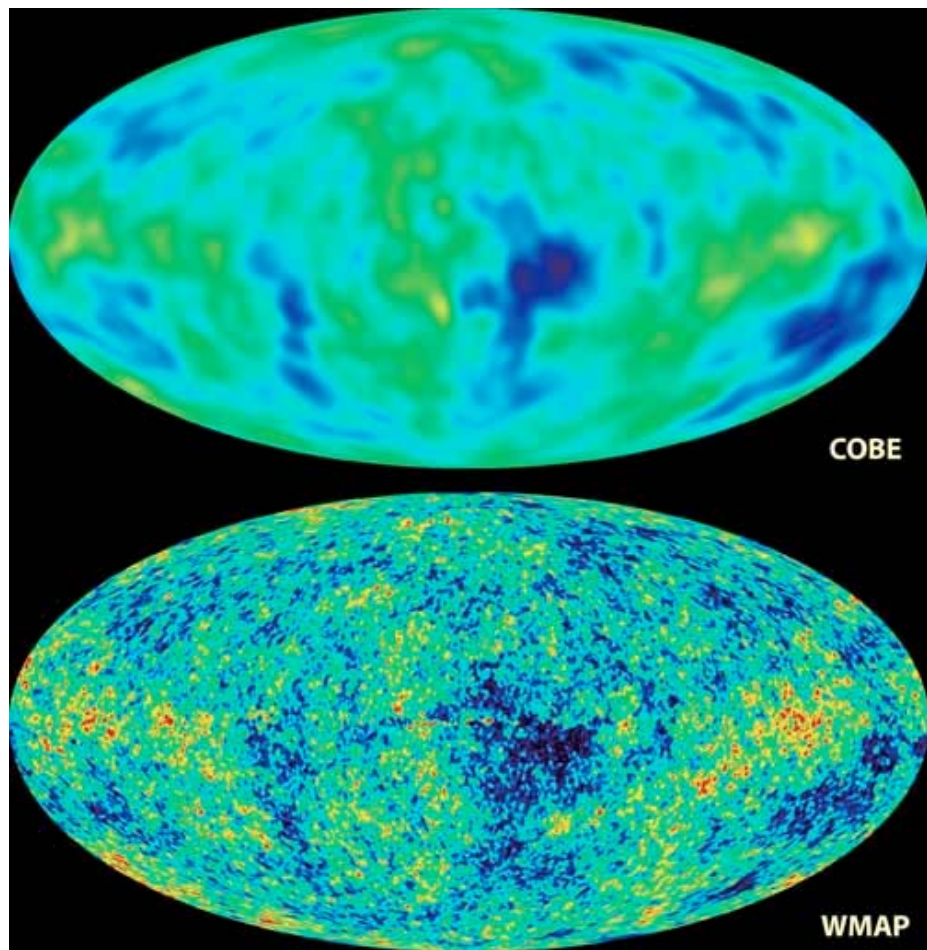
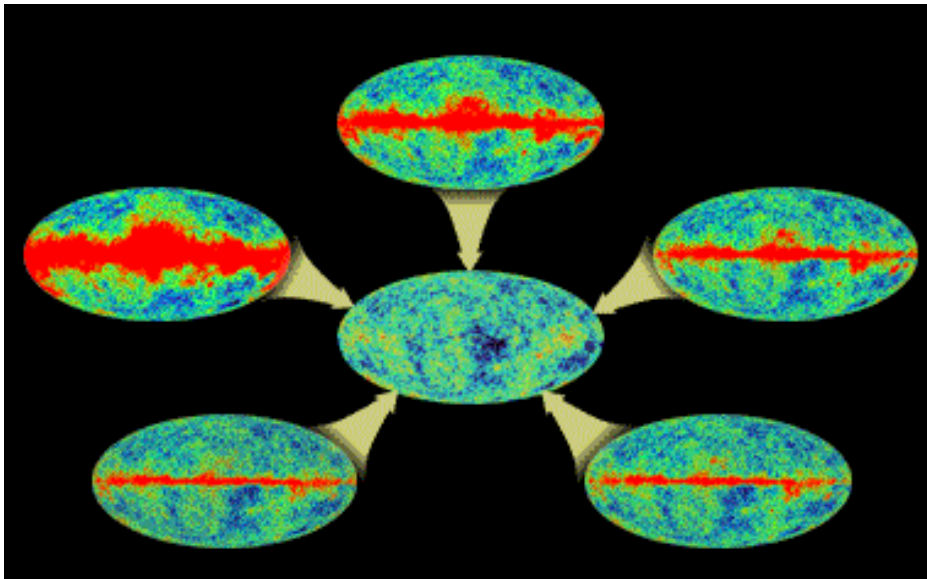
Reliktní záření

K vyřešení naznačených problémů a k sepsání nového životopisu vesmíru přispěla zejména pozorování nejstaršího světla přicházejícího z kosmu – reliktního záření.

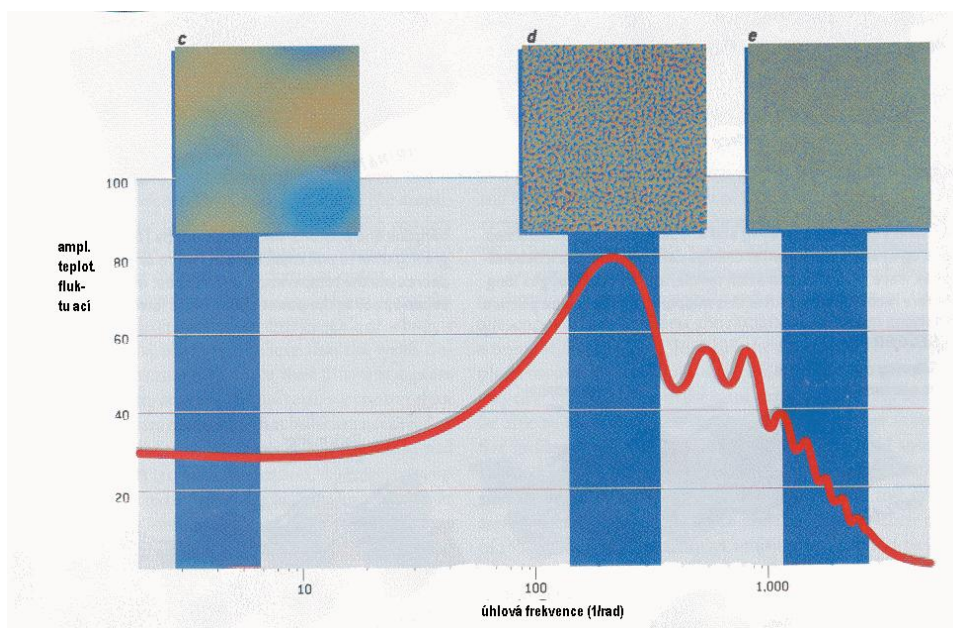
- Předpovědi: 1948 G. Gamow, R. Alpher, R. Herman, nehledali jej. 1965 J. Zeldovič, F. Hoyle aj. Taylor (Británie) – nezávisle.
- 1965 A. Penzias, R. Wilson – objev reliktního záření na vlnové délce 73,5 mm u antény na sledování balónové družice Echo. Snažili se technicky eliminovat veškeré zdroje šumu, nepodařilo se jim to u všesměrového záření o jasové teplotě 2,7 K. Za objev získali v roce 1978 Nobelovu cenu za fyziku. Teoretické zdůvodnění – Dicke, Roll, Wilkinson, Peebles v témže čísle časopisu *Astrophysical Journal*.



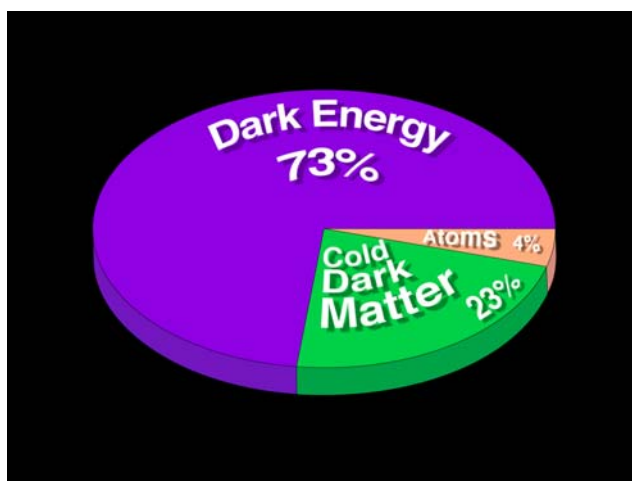
- 1989, 1992 – COBE (Cosmic Background Explorer) – podrobná pozorování za hranicemi zemské atmosféry – reliktní záření $2,73 \pm 0,001$ K. 1992 – objevena anizotropie záření – teplejší ve směru pohybu – pohyb k poli záření 390 km/s, odečteme-li pohyb Slunce kolem centra Galaxie – 600 km/s ve směru do souhvězdí Lva. Záření mimořádně izotropní – potvrzení inflační fáze vesmíru. Odchylky 1/100 000 teploty, rozlišovací schopnost 7° .
- Další experimenty – balony, měření v Antarktidě, rozlišení lepší. Družice – co nejdál od Země, ale tak, aby byla pod kontrolou – vnější Lagrangeův bod L2, 1,5 miliónu km od Země, směrem od Slunce. Nástupkyně – Wilkinson Microwave WMAP († David Wilkinson 1992). Na stanoviště dorazila sonda 14.9.2001. Podrobná mapa fluktuací reliktního záření – rozlišení $0,3^\circ$ a citlivost $20 \mu\text{K}$. Sonda pozoruje v 5 pásmech 22 až 90GHz, Zrcadlo $1,4 \times 1,6$ m, teplota chlazené části 95 K.
- Sestrojení mapy – obtížný oříšek, nutno vzít v úvahu velké množství efektů a vlivů, než se dojde k výsledku. Pohyb vůči poli reliktního záření, rozptyl na částicích mhv. látky, vliv hvězd v Galaxii apod. Po odečtení všech vlivů – mapa fluktuací teploty, kterou měla látka, když ji opustilo záření. S COBE jistá podobnost, ale struktura daleko jemnější.



- Příčinou teplotních fluktuací jsou zvukové vlny, které vznikly po rozpadu nehomogenit pocházejících z období inflačního rozpínání vesmíru. Je to vlastně jistý optický záznam zvuků, které tu byly v době před 13,5 mld let. Jak se látka rozptýlila, zvuk se přestal šířit a látka zkonzovala ve hvězdy, zvuk zanikl, ale jeho záznam se šíří prostorem. Někdo mluví o symfonii vesmíru – nadsázka, spíše je moment bez časového vývoje – mnohočetný akord, ale ani to ne – spíše zvukový mumraj před začátkem koncertu. Nicméně z toho halasu je schopen zkušený posluchač usoudit na mnohé – jaké je nástrojové složení symfonického tělesa, co předcházelo a co bude následovat, jak zdatní jsou jednotliví hráči.



- Při interpretaci pozorovaného power-spektra nehomogenit (obdobné frekvenčnímu rozkladu zvuku) lze amplitud odpovídajících velikosti určitých teplotních skvrn usoudit na celou řadu vlastností našeho vesmíru. Postupuje se tak, že se nejdříve sestaví model vesmíru s řadou volitelných parametrů, jako je třeba poměr jeho celkové hustoty k hustotě kritické, poměry temné energie, skryté látky, baryonové hmoty, velikost Hubbleovy konstanty atd. a ty parametry se různým způsobem mění, tak dlouho, dokud nenajdeme nejlepší shodu. Informací je dostatek, přesnost a spolehlivost závěrů je neuvěřitelně vysoká. Řadu variant je možno definitivně vyloučit. Do detailů se pouštět nebudeme,



Čas od velkého třesku

