

KOSMOLOGIE



Po staletí si lidé mysleli, že vesmír je neměnný, že obraz vesmíru, který poznáváme z pozorování, byl stejný v minulosti a bude stejný i v budoucnosti. Již v minulém století však vědci poznali, že hvězdy samotné mají svůj život, vznikají, vyvíjejí se a zanikají. V průběhu hvězdného vývoje se v nitru slučuje vodík na helium, v pozdějších etapách slučují obří a veleobří helium na těžší prvky. Nevratně se tak mění složení hmoty ve vesmíru. Ve 20. století lidstvo poznalo, že vesmír se s časem mění zcela zásadně. Dnes již snad nikdo nepochybuje o tom, že se náš vesmír rozpíná. V dobách dávno minulých měl podstatně menší rozměry, byl hustší, než dnes, a jeho teplota byla velmi vysoká. Také vlastnosti vesmíru byly v minulosti zcela jiné. Pro rozpínání vesmíru hovoří celá řada skutečností. Skutečné rozpínání bylo zjištěno pomocí červeného posuvu vzdálených galaxií [Edwinem Hubblem](#) v roce 1929 při sledování několika desítek galaxií. **Všechny vzdálené galaxie se pohybují směrem od nás, čím jsou vzdálenější, tím rychleji.**

Na začátku byl vesmír velmi malý, horký a hustý. Záření bylo provázáno s látkou a látka se zářením vzájemně interagovala. Teprve asi 380 000 let po vzniku vesmíru záření s látkou ochladly natolik, že přestaly interagovat. Záření se oddělilo od látky a postupně chladlo až na dnešní teplotu 2,73 K. Toto záření nazýváme **reliktní záření**. Bylo objeveno [Arno Penziasem](#) a [Robertem Wilsonem](#) v roce 1965 a jeho existence je dalším z klíčových důkazů horkého počátku vesmíru. V reliktním záření je uložen otisk dávných časů podobně jako paleolitické otisky trilobitů ve starých horninách.

Základní teorie rozpínání vesmíru vychází z obecné teorie relativity (OTR) formulované [Albertem Einsteinem](#) na počátku století. **Fridmanovo řešení OTR** z roku 1922 ukazuje, že vesmír nemůže být stacionární, musí se rozpínat nebo smršťovat. Na průměrné hustotě vesmíru závisí jak způsob zakřivení vesmíru, tak jeho budoucnost. První **teorii horkého vzniku vesmíru** vytvořil George Gamow se spolupracovníky. Při vzniku vesmíru vznikaly jen lehké prvky (těžké prvky jsou produktem termonukleární syntézy v jádrech hvězd a pocházejí z doby mnohem pozdější). Teoretická předpověď procentuálního zastoupení lehkých prvků ve vesmíru souhlasí se skutečností. To lze považovat za další nezávislý experimentální důkaz správnosti našeho obrazu prvních minut existence vesmíru.

Standardním modelem vesmíru nazýváme [Fridmanovo](#) řešení rovnic OTR, podporované experimentálně Hubbleovým vzdalováním galaxií a objevem reliktního záření. Vesmír se dnes rozpíná a jeho počáteční horké období, kdy byla látka v plazmatickém skupenství, nazýváme **Velkým třeskem**. Standardní model má však celou řadu problémů, které není schopen vyřešit, zejména v krátkých časech po vzniku vesmíru. Jde například o problém plochosti vesmíru (proč je hustota dnešního vesmíru blízko kritické?), problém Planckových škál (proč přirozené jednotky složené z konstant G , \hbar , c jsou tak malé?), problém horizontu

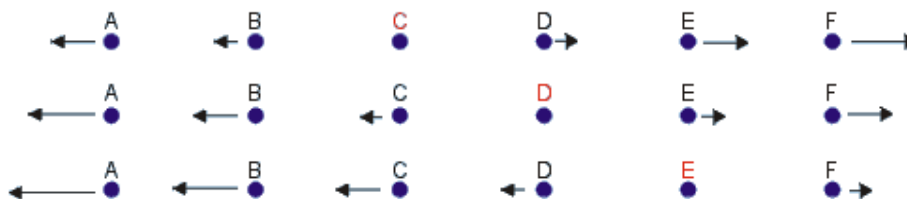
(Vesmír byl na počátku složen z mnoha kauzálně nespojených oblastí, přesto je dnes homogenní), problém baryonové asymetrie (proč ve vesmíru nepozorujeme antihmotu?), problém magnetických monopolů (kde jsou?) a další. Některé z těchto problémů vymizí, pokud v raném vesmíru proběhlo krátké, ale prudké exponenciální rozepnutí rozměrů vesmíru (tzv. inflační fáze). Důvody inflace vesmíru se zabývají inflační modely. Mnoho problémů také vyřeší využití kvantové teorie. Sám standardní model vychází z OTR. V počátcích vesmíru jsou však hustota hmoty a energie částic takové, že je třeba uvažovat společně kvantové i obecně relativistické jevy.

V roce 1998 se ukázalo ([Adam Riess](#), [Saul Perlmutter](#)), že vesmír dnes expanduje zrychlenou expanzí a že většinu hmoty a energie ve vesmíru tvoří mysteriózní **temná energie**, která by měla za tuto expanzi být zodpovědná. Zrychlená expanze probíhá přibližně od poloviny existence vesmíru. V posledních letech jsou poprvé v historii známy základní kosmologické parametry s vysokou přesností, a to z intenzivního výzkumu reliktního záření (sondy WMAP a Planck), ze sledování supernov typu Ia a z velkorozměrových přehlídek oblohy. Od základu různé experimenty přinášejí shodné výsledky. Kosmologie přestává být teorií, ale stává se významnou experimentální disciplínou. Shrňme základní parametry: ve vesmíru je 32 % látky (5 % atomární a 27 % temné hmoty) a 68 % temné energie. Vesmír je přibližně plochý a je starý 13,8 miliardy let. Velký třesk trval 380 000 roků a první hvězdy se objevily kolem 400 milionů let stáří vesmíru. Pouhé 1 % hmoty a energie ve vesmíru tvoří zářící látka, kterou vidíme v dalekohledech.

Následující stránky snad pomohou nalézt odpovědi alespoň na některé otázky, které napadnou každého z nás, pokud přemýšlí nad základní otázkou „Co bylo, když nic nebylo?“, a nechce si odpovědět známým výrokiem S. Hawkinga: „Bůh připravoval peklo pro lidi, kteří takové otázky klást“.

Kosmologický princip

Vesmír vypadá ve všech místech stejně. Každý pozorovatel, nezávisle na tom, kde se nachází, uvidí stejný obraz vesmíru kolem sebe. Všechna místa se jeví jako středy rozpínání vesmíru. Má-li rozpínání splňovat kosmologický princip (tj. ze všech míst vypadat stejně), musí být rychlost vzdalování objektů úměrná vzdálenosti objektů, a to v každém místě vesmíru.



Prohlédněte si vzdalování objektů na prvním řádku z hlediska objektu C. Všechny se od něho vzdalují rychlostí úměrnou vzdálenosti. Na druhém řádku jsou tytéž objekty s rychlostmi při pohledu z objektu D. Opět se všechny objekty vzdalují rychlostí úměrnou vzdálenosti. Ve

třetím řádku je situace z hlediska objektu E. Ze všech míst vidí pozorovatel naprosto stejnou situaci!

Antropický princip

Vesmír má přesně takové parametry, aby vyhovoval člověku. Existuje-li více vesmírů současně, žijeme právě v tom, kde se mohl vyvinout život našeho typu a proto se nemůžeme divit, že parametry našeho vesmíru jsou nastaveny tak, aby mohl vzniknout život. Nepatrná odchylka od hodnot základních konstant či jiných parametrů by znamenala vznik úplně jiného vesmíru, kde by nemohl existovat takový život, jak ho známe.

Antropický princip má své skalní příznivce i skalní odpůrce. Odpůrci argumentují zpravidla tím, že antropický princip odvádí pozornost od zkoumání skutečných počátečních podmínek v našem vesmíru. Uvedme některé zajímavé formulace antropického principu:

- **Brandon Carter (1974):** Vesmír se všemi základními konstantami je takový, že na určitém stupni vývoje připouští vznik pozorovatelů.
- **John D. Barrow, Frank J. Tipler (1986):** Ve vesmíru musí dojít k inteligentnímu zpracování informací. Jakmile k tomu dojde, nikdy už nezmizí (finální antropický princip).
Poznámka: To je možné chápat lokálně – inteligence je stále na jednom místě nebo se z něho šíří podobně jako lokální zákony zachování ve fyzice (kontinuita); nebo globálně – inteligence může zaniknout, ale jinde se objeví. Globální formulace připomíná již čistou spekulaci.
Poznámka: Kdyby měl finální antropický princip platit, nemohla by ve vesmíru proběhnout žádná další inflační fáze.
- **Stephen Hawking:** Proč je vesmír takový jaký je? Kdyby byl jiný, nebyl by v něm nikdo, kdo by mohl podobné otázky klást.

Holografický princip

Veškeré vlastnosti látky v černé díře jsou dány charakteristikami na povrchu (entropií). Mnozí se dnes pokouší aplikovat holografický princip na celý vesmír. Tam ale není ani u uzavřeného ani u otevřeného vesmíru zřejmé, co je jeho povrch. Zpravidla se nahrazuje horizontem částic (pozorovatelným vesmírem). Při inflační fázi a následném ohřevu, kdy se produkuje velké množství entropie, nemůže holografický princip v této podobě platit. Zdá se, že neplatí ani v uzavřeném vesmíru. Holografický princip také použil Eric Verlinde ve své nové gravitační hypotéze (gravitaci považuje za vnější projev chování částic v mikrosvětě, za tzv. entropickou sílu, viz [AB 46/2011](#))

Princip kosmické cenzury

Nikde ve vesmíru není možné pozorovat holé (nahé) singularity. Například singularita v centru černé díry je vnějšímu pozorovateli skryta pod horizontem událostí (pod Schwarzschildovým poloměrem).

Machův princip

Veškeré dění, setrvačnost těles a celý Newtonův pohybový zákon má původ ve všech tělesech ve vesmíru. Schopnost těles setrvávat v daném pohybu není proto vlastností těles samotných,

ale je způsobena všemi tělesy přítomnými ve vesmíru. Je například parabolický profil kapaliny v rotujícím vědru způsoben rotací vědra nebo vědro stojí a kolem rotuje celý vesmír? Podle Machova principu je to jedno. K tomu, aby setrvačnost indukovaná celým vesmírem byla konečná je ovšem třeba konečný vesmír.

Machův princip silně ovlivnil [Alberta Einsteina](#) při formulaci obecné relativity. Trajektorie těles jsou dány zakřivením časoprostoru, které způsobují všechna tělesa ve vesmíru. Machův princip používá preferovaný inerciální systém, ne všechny inerciální systémy jsou rovnocenné. Pokusů o vzkříšení Machova principu se objevuje celá řada a formulace jsou většinou takové, aby se předpovědi shodovaly s OTR. Například v roce 1999 se objevil tzv. *zobecněný Machův princip* (Sergio Dagach, Louis Dagach). Jeho základní myšlenky jsou:

- Změna vlastností hmotných objektů (hmotnost, elektrické a magnetické pole, dilatace času) jsou *způsobeny rychlostí vzhledem k okolní hmotě*, nikoli referenční soustavou pozorovatele.
- V okolí hmotného tělesa existuje ke každé události *preferovaný (Machův) lokální inerciální systém*, jeho okamžitá rychlost je pouze funkcí vzdálenosti od tělesa a jeho hmotnosti, například pro sféricky symetrické, nerotující, nenabitě těleso je rovna rychlosti systému padajícího volným pádem z nekonečna, $v = (2GM/r)^{1/2}$. V tomto systému jsou minimalizovány hodnoty fyzikálních veličin popisující testovací částici (tak ho lze definovat).
- Světlo se v Machově systému (a jedině v něm!?) pohybuje izotropně a hodnoty fyzikálních veličin popisující testovací částici nezávisí na směru.
- Hodnoty čtyřvektorů fyzikálních veličin testovací částice pro dvě různé rychlosti vzhledem k preferovanému Machově systému jsou spojeny Lorentzovou transformací. (Ale souřadnice ve dvou různých lokálně inerciálních systémech nejsou).

Většina předpovědí takto formulovaného Machova principu se shoduje s OTR, ale existují některé odlišnosti, které nebyly experimentálně potvrzeny. OTR stále zůstává jedinou základní teorií gravitace, která není ve sporu s experimentem.

Olbersův paradox (Heinrich Olbers, 1832)

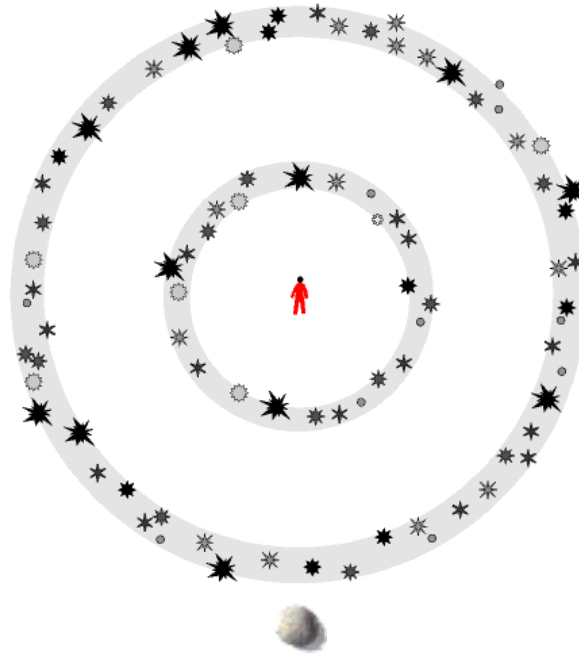
Počet hvězd v sférické slupce roste s kvadrátem vzdálenosti slupky. Intenzita záření přicházející k pozorovateli naopak klesá s kvadrátem vzdálenosti. Oba jevy by se tak měly vyrušit a k pozorovateli by všechny sférické slupky z celého vesmíru (je jich nekonečně mnoho) měly přispět stejnou intenzitou. Výsledkem by měl být nekonečný jas denní i noční oblohy. Provedeme-li opravu na zákryty hvězd, absorpci světla atd., stejně dostaneme alespoň konstantní konečný jas oblohy ve dne i v noci. Přesto je v noci tma. Proč?

Tento paradox zformuloval Heinrich Olbers, jeho závěry však byly chybné. Již dříve o tomto paradoxu hlouběji uvažoval Kepler, a proto se také někdy nazývá Keplerův paradox.

- Ve vesmíru dochází evidentně k vývoji jednotlivých objektů, stáří hvězd není neomezené. Hvězdy tedy nevyzařují po nekonečně dlouhou dobu, jak vyžaduje Olbersův paradox.
- Úvaha platí navíc jen pro vesmír nekonečný v prostoru i čase (= neomezeně trvajícím). Světlo od jednotlivých slupek k nám „cestuje“ určitou dobu. Jestliže vesmír někdy vznikl, ze vzdálenějších slupek k nám žádné světlo nedolétlo, protože vesmír ještě neexistoval. Počet slupek tedy není nekonečný.

- Vesmír se rozpíná, dochází ke kosmologickému červenému posuvu záření a dalšímu snížení intenzity záření.

Nejjednodušším důkazem vývoje objektů ve vesmíru a jeho proměnlivosti s časem je proto fakt, že v noci je tma.



Fridmanovo řešení (Alexandr Fridman, 1922)

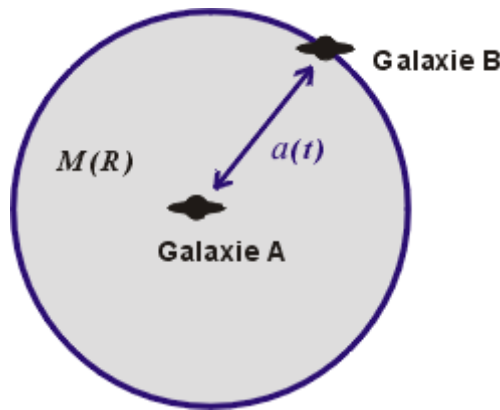
V roce 1922 ukázal sovětský vědec [Alexandr Fridman](#) (německý přepis jména je Friedmann), že Einsteinovy rovnice obecné relativity neposkytují konstantní řešení pro homogenní isotropní vesmír. Vesmír musí být nestacionární, buď se rozpíná nebo se smršťuje. Je to obdobné jako pohyb kamene hozeného vzhůru. Nikdy nezůstane viset ve vzduchu v konstantní vzdálenosti od Země, buď poletí vzhůru, nebo bude padat dolů. Charakter expanze nebo kolapsu prostorových souřadnic popisuje tzv. expanzní funkce $a(t)$. Můžeme si ji představit jako poměr vzdálenosti libovolných dvou objektů ve vesmíru dnes a v minulosti. Charakter řešení závisí na průměrné hustotě vesmíru ρ a popisuje ho Einsteinova-Fridmanova rovnice:

$$H^2 - (8/3)\pi G\rho = -c^2k/a^2; \quad H \equiv (da/dt)/a.$$

Význam jednotlivých proměnných v rovnici je následující:

$a(t)$	expanzní funkce (bezrozměrná),
da/dt	změna expanzní funkce s časem (1/s),
ρ	průměrná hustota vesmíru (kg/m^3),
k	skalární křivost vesmíru ($1/\text{m}^2$),
G	gravitační konstanta ($\text{Nm}^2\text{kg}^{-2}$).

Analogii této rovnice je možné odvodit i v klasické mechanice:



Představme si dvě galaxie ve vzdálenosti a . Pohyb galaxie B vzhledem k galaxii A je dán jen hmotou rozprostřenou uvnitř koule se středem v A a poloměrem AB . Předpokládejme, že celková hmotnost v této oblasti je M a průměrná hustota ρ . Zákon zachování energie pro galaxii B je

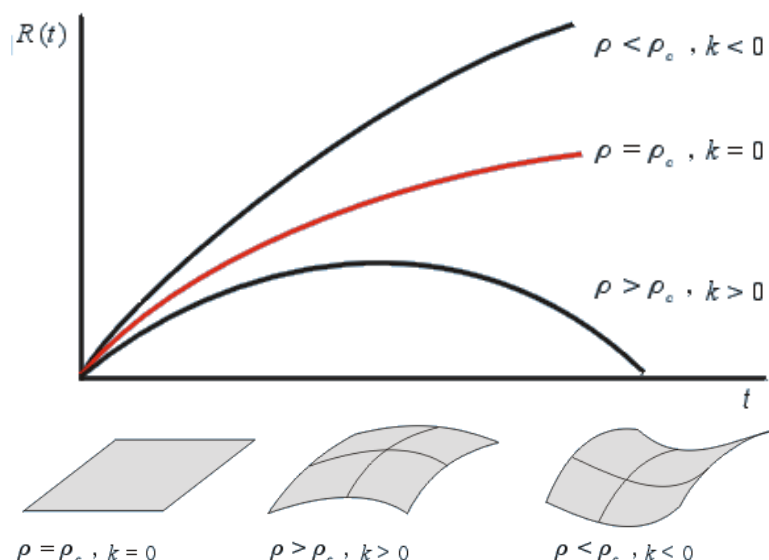
$$m(da/dt)^2/2 - GmM/a = E; \quad M = \rho V = \rho (4/3)\pi a^3$$

Po dosazení za hmotnost a jednoduché úpravě vyjde rovnice

$$H^2 - (8/3)\pi\rho G = \text{const}/a^2,$$

která je svým tvarem identická s Einsteinovou-Fridmanovou rovnicí, jen interpretace jednotlivých proměnných se významně liší (vzdálenost \leftrightarrow expanzní funkce, celková energie \leftrightarrow mínus křivost). Einsteinova-Fridmanova rovnice je diferenciální rovnicí, která spolu s další rovnicí pro hustotu umožňuje nalézt závislost expanzní funkce na čase. V řešení Einsteinovy-Fridmanovy rovnice mohou nastat tři odlišné případy:

- Členy na levé straně rovnice jsou si přesně rovny, vesmír má kritickou hustotu $\rho_c = 3H^2/8\pi G$. Křivost na pravé straně je nulová, vesmír je plochý a bude se rozpínat stále. Objem vesmíru je nekonečný.
- Potenciální (druhý) člen převládá nad kinetickým (prvním) členem. Hustota je vyšší než kritická, vesmír má kladnou křivost (ve dvourozměrné analogii by tomu odpovídal tvar povrchu míče). Rozpínání se po nějaké době zastaví a vesmír se začne smršťovat. Objem vesmíru je konečný.
- Kinetický (první) člen převládá nad potenciálním (druhým). Hustota je nižší než kritická, vesmír má zápornou křivost (ve dvourozměrné analogii by tomu odpovídal tvar koňského sedla). Vesmír se bude rozpínat stále. Objem vesmíru je nekonečný, je-li topologie vesmíru jednoduše souvislá (každou křivku lze stáhnout do bodu). Připustíme-li i topologie, které nejsou jednoduše souvislé, může být objem vesmíru konečný i v tomto případě.



Poznámka: Hmotnost a energie jsou provázány Einsteinovým vztahem $E = mc^2$ a mezi hustotami obou veličin platí vztah $\rho_E = \rho_m c^2$.

V tzv. normální soustavě jednotek ($c = 1$) obě veličiny splývají. V dosavadních vztazích znamenal symbol ρ hustotu hmoty, která má jednotku kg/m^3 . V následujícím textu budeme symbolem ρ označovat hustotu energie, která má jednotku J/m^3 . Čtenář by měl při čtení textů vždy zvážit, o kterou z obou hustot jde.

Vesmír se skládá z entit, které se při expanzi chovají různě. Hustota běžné látky (složené z částic s nenulovou klidovou hmotností) klesá při expanzi se třetí mocninou narůstajících rozměrů. Hustota energie záření (reprezentují ho polní částice s nulovou klidovou hmotností) klesá se čtvrtou mocninou, tedy rychleji. Hustota tzv. temné energie s největší pravděpodobností při expanzi neklesá vůbec. Obecně můžeme pokles hustoty dané entity vyjádřit vztahem $\rho \sim 1/a^\alpha$.

Z jednoduchých termodynamických úvah (viz sylabus [Astrofyzika v příkladech](#)) lze ukázat, že entita klesající při expanzi s mocninou závislostí na vzdálenostech splňuje jednoduchý vztah $p = w\rho$ mezi hustotou energie a tlakem (tzv. stavovou rovnicí). Koeficient w je podíl tlaku a hustoty energie a patří k velmi důležitým kosmologickým parametrům, jeho hodnota je $\alpha/3 - 1$.

Pro hmotu ($\alpha = 3$) je parametr w nulový a tato entita nepřispívá při expanzi žádným tlakem. Pro záření ($\alpha = 4$) je $w = +1/3$. Jde o známý vztah mezi tlakem záření a hustotou jeho energie $p = \rho/3$. Pro temnou energii ($\alpha < 3$) je koeficient w , a tedy i tlak, záporný. **Záporný tlak** podporuje expanzi vesmíru. Hodnota koeficientu w pro temnou energii je velmi důležitá. Aby docházelo k pozorované zrychlené expanzi vesmíru, musí podle rovnic obecné teorie relativity platit, že $w < -1/3$. Pro vakuovou energii spojenou s kvantově mechanickými procesy ve vakuu je $w = -1$ a expanzní funkce roste exponenciálně. Pokud by dokonce bylo $w < -1$ bude expanze natolik překotná, že zasáhne strukturu látky a rozerve v budoucnu samotná atomová jádra. Této situaci říkáme *big rip* – velké rozervání. Z měření [WMAP](#), [Planck](#), [CBI](#), [2dF](#) a [SDSS](#) vychází, že parametr w se pro temnou energii nachází v intervalu hodnot $(-1; -0,78)$ a scénář velkého rozervání je s nejvyšší pravděpodobností experimentálně vyloučen.

Látce, záření a vakuové hustotě energie odpovídají různá řešení Einsteinovy rovnice pro expanzní funkci:

	α ($\rho \sim 1/a^\alpha$)	expanzní funkce (1)	Hubblova konstanta	stavová rovnice (J/m ³)	parametr w (1)
obecná entita	α	$\sim t^{2/\alpha}$	$2/at$	$p = w\rho$	$\alpha/3 - 1$
záření	4	$\sim t^{1/2}$	$1/2t$	$p = \rho/3$	1/3
látka	3	$\sim t^{2/3}$	$1/3t$	$p = 0$	0
křivost ($k < 0$)	2	$\sim t^{2/3}$	$1/t$	$p = -\rho/3$	-1/3
energie vakua	0	$\sim \exp[\chi t]$	χ	$p = -\rho$	-1

Kosmologická konstanta

Einsteinovy rovnice obecné relativity mají jednoduchý tvar

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}.$$

Člen nalevo (Einsteinův tenzor) popisuje zakřivení časoprostoru a skládá se z různých kombinací metriky $g_{\mu\nu}$ a jejích derivací. Napravo je tzv. tenzor energie a hybnosti, který popisuje rozložení látky ve vesmíru. Einsteinovy rovnice OTR jsou pouze matematickým vyjádřením skutečnosti, že látka kolem sebe zakřivuje prostor a čas. Koefficient úměrnosti mezi Einsteinovým tenzorem G a tenzorem T vychází (z požadavku, aby v případě slabých polí daly Einsteinovy rovnice Newtonův gravitační zákon) $\kappa = 8\pi G/c^4$. V roce 1917 dodal Einstein na levou stranu navíc člen úměrný metrickému tenzoru, který měl zajistit statické řešení Einsteinových rovnic, neboť i Einstein věřil, že vesmír je statický:

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}.$$

Koefficient úměrnosti Λ se nazývá *kosmologická konstanta* (v SI má rozměr má 1/m²) a pro některé její hodnoty poskytují „nové“ rovnice OTR i stacionární řešení. Řešením Einsteinových rovnic s nenulovou kosmologickou konstantou se zabýval například belgický kněz [Georges Lemaitre](#) (1894–1966). V oné době mnoho lidí (včetně [Alberta Einsteina](#)) věřilo, že vesmír je neměnný v čase. Po objevu Hubblova rozpínání vesmíru Albert Einstein tento člen z rovnic opět vyškrtl a prohlásil, že šlo o největší omyl jeho života. Dnešní doba znamená velkou renesanci kosmologické konstanty. Člen úměrný metrickému tenzoru do rovnic skutečně patří, je však pravděpodobně způsoben kvantově polními projevy vakua a jeho původ je v kvantových procesech. Pro kvantové vakuum není střední hodnota tenzoru energie a hybnosti na pravé straně Einsteinových rovnic nulová, ale je úměrná metrickému tenzoru:

$$\langle T_{\mu\nu} \rangle = \rho_{\text{vakua}} g_{\mu\nu}.$$

Střední hodnota vakuové energie se proto chová stejně jako člen s kosmologickou konstantou na levé straně rovnic. Kvantové procesy tak do rovnic přirozeným způsobem zavádějí člen

úměrný metrickému tenzoru. Otevřenou otázkou zůstává, zda jsou kvantové procesy jediným zdrojem kosmologického členu. Na velkých měřítcích se člen pro některé hodnoty Λ projevuje jako jakási „odpudivá“ gravitace, nebo chcete-li záporný tlak či antigravitace. Projevy tohoto členu jsou dnes pozorovány jako zrychlená expanze vesmíru. K hustotě vesmíru způsobující jeho zakřivení přispívá záření (R), látka (M) a kvantové efekty (Λ)

$$\Omega \equiv \rho/\rho_c = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_\Lambda.$$

Pro plochý vesmír by bylo $\Omega = 1$. Dnešní vesmír se zdá být přibližně plochý ($\Omega = 1,02 \pm 0,02$) a kosmologická konstanta přispívá hodnotou ([Adam Riess](#) – 1998, [Saul Perlmutter](#) – 1999, [WMAP](#) 2003, [Planck](#) 2013)

$$\Omega_\Lambda = c^2\Lambda / 3H^2 \sim 0,68.$$

Měření byla prováděna na souboru supernov typu Ia, ve kterých je exploze způsobena rozmetáním bílého trpaslíka, který překročil Chandrasekharovu mez. Shodná hmotnost trpaslíků vede ke stejné absolutní magnitudě všech supernov. Vzdálenější supernovy byly méně jasné než podle propočtů. Z toho lze usuzovat na zrychlování expanze vesmíru způsobené nenulovou kosmologickou konstantou. Zrychlování expanze může v budoucnu přerůst v exponenciální fázi expanze vesmíru. Nezávislé měření hodnoty kosmologické konstanty bylo provedeno z rozboru fluktuací reliktního záření měřených sondami [WMAP](#) a [Planck](#). Podrobněji se s oběma experimenty seznámíme v kapitole [Současná kosmologie](#).

Einsteinova-Fridmanova rovnice ($\Lambda \neq 0$). Rovnice pro expanzní funkci má v přítomnosti kosmologické konstanty tvar (hustota je opět v kg/m^3)

$$H^2 - (8/3)\pi\rho G - \Lambda/3 = -c^2k/a^2.$$

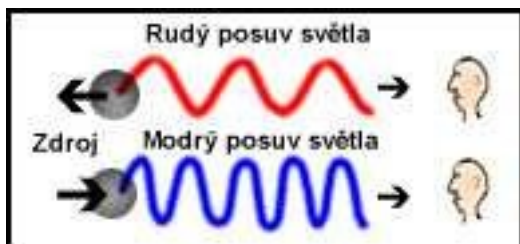
Pokud členy přeskupíme a nalevo ponecháme jen časový vývoj, dostaneme rovnici

$$H^2 = (8/3)\pi\rho_R G + (8/3)\pi\rho_M G - c^2k/a^2 + \Lambda/3.$$

Probíhající expanzi nejprve ovlivňuje záření ($\sim 1/a^4$), poté látka ($\sim 1/a^3$), pokud je křivost nenulová, následuje éra vlivu zakřivení vesmíru ($\sim 1/a^2$) a nakonec éra zrychlené expanze ($\sim 1/a^0$) daná kosmologickým členem (tzv. de Sitterův vesmír). Na levé straně rovnosti je kvadrát Hubbleovy konstanty. Pokud jím vydělíme, získáme rovnost:


$$1 = \Omega_R + \Omega_M - \Omega_k + \Omega_\Lambda.$$

Pro plochý Vesmír je Ω_k nulové a vztah přejde ve výše uvedenou relaci pro plochý vesmír.



Červený posuv galaxií (Edwin Hubble, 1929)

[Edwin Hubble](#) pozoroval galaxie na observatoři Mt. Wilson v zrcadlovém dalekohledu o průměru 250 cm. V té době šlo o největší dalekohled na světě. E. Hubble dokázal, že spirální a eliptické mlhoviny jsou ve skutečnosti galaxie složené z hvězd. Navrhl první metody odhadu vzdálenosti galaxií podle nejjasnějších hvězd. V roce 1929 experimentálně zjistil červený posuv vzdálených galaxií. Všechny spektrální čáry jsou u vzdálených galaxií posunuty k červenému konci spektra. To podle Dopplerova jevu znamená, že se všechny vzdálené galaxie od nás vzdalují. Obdobná měření konal již dříve Vesto Slipher, ale nedokázal je správně interpretovat.

Změna frekvence periodického signálu (posuv spektrálních čar u světla) je zpravidla způsobena Dopplerovým jevem. Přibližuje-li se zdroj a pozorovatel, dojde k zvýšení frekvence, vzdaluje-li se zdroj a pozorovatel, dojde k snížení frekvence signálu. Může jít o zvuk, světlo, ale třeba i o autobusy, které z nádraží vyjíždějí pravidelně každou minutu. Půjdeme-li proti nim, budeme je potkávat častěji než půjdeme-li ve směru jejich jízdy. U zvuku tento jev známe ze změny frekvence automobilu, který nás mívá. Při přibližování má jeho zvuk vyšší frekvenci než při vzdalování. Máte-li zvukovou kartu, klepněte myší na obrázek automobilu: . U světla dochází při vzdalování k posuvu spektrálních čar k červenému konci spektra a při přibližování k modrému konci spektra.

Edwin Hubble zjistil, že čím jsou galaxie vzdálenější, tím větší červený posuv ve spektru mají, tj. tím rychleji se vzdalují. To vystihuje Hubbleův vztah $V = H d$. Dnešní hodnota Hubbleovy konstanty a veličin z ní odvozených (viz dále) je:

Hubbleova konstanta	H	$(67 \pm 1) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
Hubbleův čas	$1/H$	14,6 miliard let
Hubbleova vzdálenost	c/H	4 500 Mpc
kritická hustota	$\rho_c = 3H^2/(8\pi G)$	$0,84 \times 10^{-26} \text{ kg/m}^3$ (5 nukleonů na 1 m^3)

Hubbleův čas je maximální doba stáří vesmíru, *Hubbleova vzdálenost* je velikost pozorovatelného vesmíru a *kritická hustota* je hustota hmoty ve vesmíru nutná k jeho uzavření. V průběhu experimentů se hodnota Hubbleovy konstanty výrazně měnila podle zpřesňování metod odhadu vzdálenosti galaxií. Poslední a nejpresnější hodnota je z pozorování sondy Planck. Rozpínání vesmíru s rychlostí úměrnou vzdálenosti je geometricky možné jen ve vesmíru, který se současně rozpíná z každého bodu. Ve

dvourozměrné analogii si můžeme představit povrch nafukujícího se balónku, na kterém jsou namalovány tečky, představující galaxie. Každý bod se zdá být středem rozpínání a čím vzdálenější bod, tím rychleji se vzdaluje. Střed balónku nemá žádný hlubší význam, protože je mimo povrch balónku tvořícího „vesmír“. Povšimněte si, že vesmír jako celek se rozpíná. Rozměry jednotlivých galaxií se však nemění. Jsou dány hodnotou gravitační konstanty, která se v průběhu rozpínání nemění. Stejně tak se nemění expanzí vesmíru rozměry člověka. Ty jsou dány elektromagnetickou interakcí, tj. hodnotou elektromagnetického náboje a permitivitou či permeabilitou vakua (resp. hodnotou rychlosti světla ve vakuu). Představte si prádelní gumu s navěšenými sponkami. Pokud gumu natahujeme, je každé místo středem expanze. Expanduje guma, nikoli sponky.



Hubblovo pozorování je jedním z nejdůležitějších experimentálních důkazů rozpínání vesmíru.

Hubblova konstanta souvisí s kritickou hustotou (dosadíme Hubbleův vztah

$H = V/d = (da/dt)/a$ do vztahu pro kritickou hustotu) rovnicí

$$\rho_c = 3H^2/(8\pi G).$$

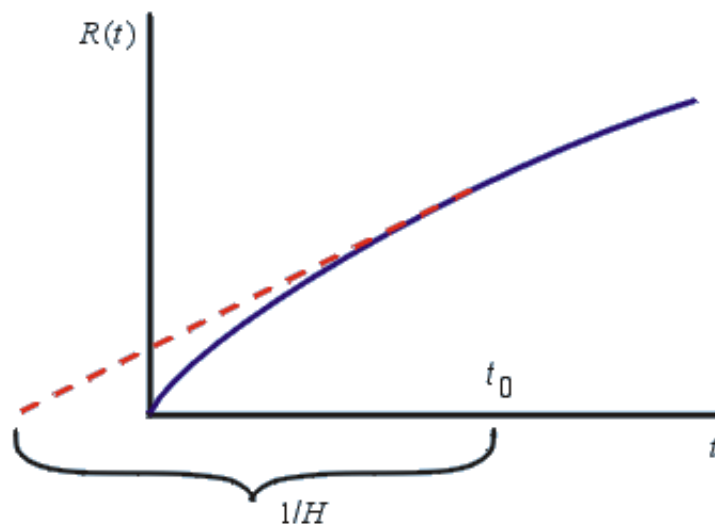
S kritickou hustotou souvisí další dva významné kosmologické parametry:

$$\Omega \equiv \rho/\rho_c,$$

$$\varepsilon \equiv \Omega - 1.$$

($\Omega = 1$ a $\varepsilon = 0$ pro plochý vesmír).

Kdybychom extrapolovali dnešní rozpínání do minulosti, určili bychom stáří vesmíru jako dobu $1/H$. Rozpínání vesmíru se však v první polovině jeho existence zpomalovalo, v druhé polovině naopak dochází ke zrychlené expanzi. Proto je skutečné stáří vesmíru jiné než hodnota $1/H$. Dnes se z rozboru fluktuací reliktního záření odhaduje stáří vesmíru na 13,8 miliard let.



Edwin Hubble měřil tzv. červený posuv $z = \Delta\lambda/\lambda$. Červené posuvy naměřené Hubblem byly menší než 0,003. Pro takto blízké galaxie lze červený posuv galaxií interpretovat jako Dopplerův jev $z \sim v/c$. Pro vzdálenější objekty a vyšší hodnoty z je změna frekvence způsobena rozpínáním geometrie vesmíru (kosmologický červený posuv) a hodnotu z je třeba interpretovat jako $[a(t)-a(t_0)]/a(t_0)$. Nejevzdálenější dosud pozorovanou galaxií je objekt UDFy-38135539 s červeným posuvem $z = 8,6$. Světlo opustilo tento objekt pouhých 600 milionů let po Velkém třesku.

Scénář horkého Vesmíru ([Ralph Alpher](#), [Hans Bethe](#), [George Gamow](#), 1948)

George Gamow vytvořil spolu se svým asistentem Ralphem Alpherem první scénář horkého vzniku vesmíru. Na slavném článku se podepsal na naléhání Gamowa i jaderný fyzik Hans Bethe. Tím se autory stali Alpher, Bethe a Gamow, což připomíná řecká písmena alfa, beta a gama a naznačuje principiální důležitost modelu...

Gamow se zabýval tvorbou prvků v průběhu Velkého třesku. Za teplot miliard stupňů došlo k vytvoření vodíku, helia a dalších lehkých prvků. Gamow určil procentuální zastoupení jednotlivých lehkých prvků ve vesmíru (podle tehdejších modelů silné interakce), které ne zcela odpovídalo skutečnosti, ale podle dnešních modelů silné interakce je v dobré shodě se skutečností. (Těžké prvky vznikaly až v nitru hvězd). Byl-li vesmír ve svých raných fázích horký, záření bylo vázáno na hmotu. Tím se rozumí, že kvanta záření – fotony – silně interagovala s hmotou (například záchyt fotonu a následná excitace elektronu nebo ionizace, vyzáření fotonu a deexcitace). Záření mělo charakter rovnovážného záření černého tělesa. Spolu s rozpínáním Vesmíru docházelo k chladnutí hmoty se zářením. Asi 380 000 let po vzniku Vesmíru končí jeho plazmatická éra (a tím i Velký třesk). Volné elektrony se stávají součástí atomárních obalů a látka je od této chvíle elektricky neutrální. Právě volné elektrony doposud udržovaly kontakt záření s látkou. Vesmír se stal pro záření průhledným a interakce záření s hmotou minimální. Záření se oddělilo od látky a započalo svou samostatnou pouť Vesmírem.

Přibližně v téže době také poprvé poklesla hustota energie záření ($\rho \sim 1/a^4$) pod hodnotu hustoty energie hmoty ($\rho \sim 1/a^3$). Proto období před oddělením záření od hmoty nazýváme

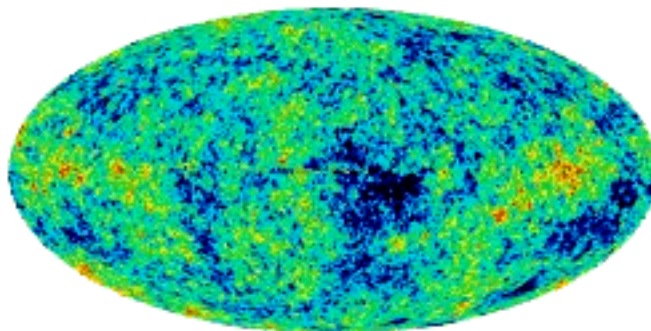
éra záření, následné období **éra látky**. Podle Stefanova-Boltzmannova zákona je celková energie záření úměrná čtvrté mocnině teploty. Z toho je zřejmé, že teplota záření musí klesat jako $1/a$. Gamow teoreticky předpověděl, že záření z období oddělení záření od hmoty by dnes mělo být pozorovatelné jako všudypřítomné záření absolutně černého tělesa o teplotě cca 6 K. Toto záření nazýváme reliktní záření, jeho skutečná teplota je 2,73 K.

Současné procentuální zastoupení lehkých prvků a později objevené reliktní záření o teplotě 2,73 K lze řadit k dalším experimentálním důkazům expanze našeho vesmíru.

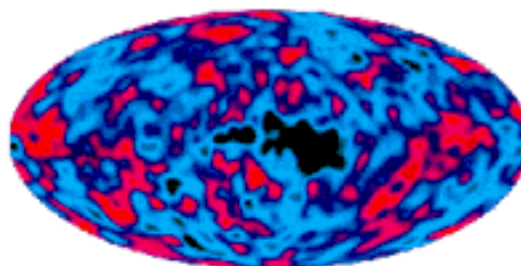
Reliktní mikrovlnné záření (Cosmic Microwave Background Radiation)

- **1965: A. Penzias, R. Wilson** Reliktní záření objevili na vlnové délce 73,5 mm v Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey. Se speciální radiovou anténou z roku 1960 (konstrukci navrhl A. B. Crawford) byly zpočátku sledovány odrazy signálu od družice Echo. Anténa měla trychtýřovitý tvar se sběrnou plochou 25 m². Poměr citlivosti v dopředném a zpětném směru byl 3000:1. Úroveň šumu tisícinásobně převyšovala vlastní signál. V roce 1963 byly ukončeny práce s družicí Echo. Arno Penzias a Robert Wilson chtěli pokračovat s radiovým mapováním Mléčné dráhy a sledováním radiových signálů galaxií. Při měření mikrovlnného pozadí vyloučili vlastní šum antény, vlnovodu, maseru, konvertoru, oblohy, atmosféry a známých zdrojů. Přesto zůstalo ještě všesměrové záření pozadí, které se chovalo jako záření absolutně černého tělesa o teplotě 2,7 K. Toto záření nevymizelo ani po dvojnásobném rozebrání a vyčištění antény. Šlo právě o reliktní záření, jehož teplota řádově souhlasí s prvním Gamowovým odhadem. Za tento objev získali Arno Penzias a Robert Wilson v roce 1978 Nobelovu cenu za fyziku.

- **1989, družice COBE (Cosmic Background Explorer)** Penzias a Wilson měřili na jediné vlnové délce. Mnohem podrobnější měření byla provedena koncem 90. let po vypuštění družice COBE v roce 1989. Družice provedla detailní průzkum reliktního záření. V průběhu prvních osmi minut provozu zjistila, že reliktní záření je zářením absolutně černého tělesa o teplotě 2,73 K s přesností 10^{-3} .



- V roce 1992 byla objevena anisotropie reliktního záření. Záření je nepatrně teplejší v jednom směru a nepatrně chladnější směru. Tomu naše rychlost pohybu k záření 390 km/s. známý pohyb Slunce Galaxie, vychází pro naši Galaxie rychlost Jinak je záření



v opačném odpovídá vzhledem Odečteme-li kolem středu vlastní pohyb 600 km/s. vysoce

isotropní. Záření sledované družicí COBE není zcela homogenní. Na mapě intenzity reliktního záření označují červené oblasti teplejší fluktuace a modré a černé oblasti chladnější fluktuace než je průměr. Odchylky těchto fluktuací od průměrné hodnoty jsou asi 1/100 000. Pravděpodobně jde o primordiální fluktuace z období oddělení záření od hmoty, které vedly ke vzniku galaxií. Družice COBE tak přispěla k lepšímu poznání mikrovlnného reliktního záření hlavně dvěma objevy: Objevem **anizotropie záření** a objevem **fluktuací teploty záření**. Rozlišovací schopnost COBE: 7°. Autoři experimentů na družici COBE ([George Smoot](#) a [John Mather](#)) získali Nobelovu za fyziku pro rok 2006.

- **1998 – 2000: balónová měření (BOOMERang, MAXIMA a další)**

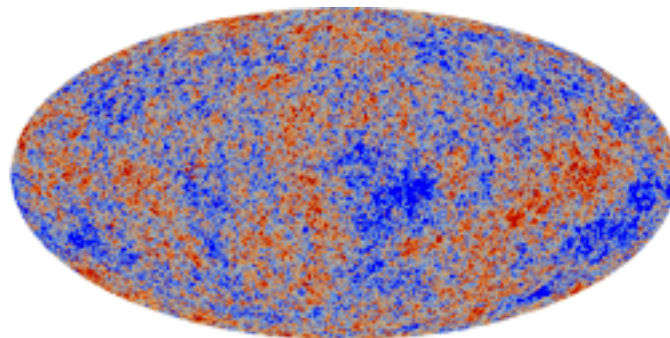
BOOMERang: balónem vyneseny dalekohled 35 km nad Antarktidu v prosinci 1998. Hmotnost 1 400 kg, doba pobytu 10 dní. Balóny jsou schopné vynést poměrně rozměrná zařízení. Vyšší rozlišovací schopnost než u COBE, asi 1/6°. Zpřesnění teploty reliktního záření a hodnoty fluktuací (70 μ K). Měření podpořila inflační teorii a plochost našeho vesmíru.

- **2001: sonda WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)**

Tato sonda, která se původně jmenovala MAP (*Microwave Anisotropy Probe*), byla po oznámení prvních výsledků přejmenována na počest Davida Wilkinsona, hlavního autora projektu, na WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*). WMAP sledovala anizotropii, fluktuace a polarizaci reliktního záření. Úhlové rozlišení sondy bylo 0,3° a teplotní citlivost 20 μ K. Sonda pozorovala v pěti oddělených frekvenčních pásmech od 22 do 90 GHz a byla umístěna v blízkosti [Lagrangeova bodu L2L2](#) soustavy Země-Slunce, který je vzdálen 1,5 milionů kilometrů od Země. Na stanovišti pracovala od 14. září 2001. Plánovaná délka celé mise byla 27 měsíců (měla zásoby paliva na více než 3 roky): 3 měsíce na let a 24 měsíců na samotné pozorování. První výsledky byly zveřejněny 11. 2. 2003, šlo o první přesnější určení parametrů našeho vesmíru za pomoci rozboru spektra fluktuací reliktního záření. Detaily naleznete v kapitole [Současná kosmologie](#).

- **2009: sonda Planck**

Sonda Planck, která byla pojmenována podle německého vědce [Maxe Plancka](#), je nejnovější sondou pozorující reliktní záření. Úhlové rozlišení sondy je 5' a teplotní citlivost 2 μ K. Misi pořádá Evropská kosmická agentura. Sondu Planck (spolu s infračerveným dalekohledem Herschel o průměru zrcadla 3,5 metru) vynesla nosná raketa Ariane 5 ECA dne 14. května 2009. Planck pozoroval, stejně jako sonda WMAP, v [Lagrangeově bodě L2L2](#) soustavy Země-Slunce. Sonda uskutečnila 4 celé přehlídky oblohy. Chlazení došlo v prosinci 2012. Sonda poskytla dosud nejpresnější hodnoty parametrů našeho vesmíru, nejpodrobnější mapu fluktuací reliktního záření a vynikající mapu vesmíru v mikrovlnném oboru. Definitivní výsledky by měly být známy na konci roku 2014. Detaily naleznete v kapitole [Současná kosmologie](#).



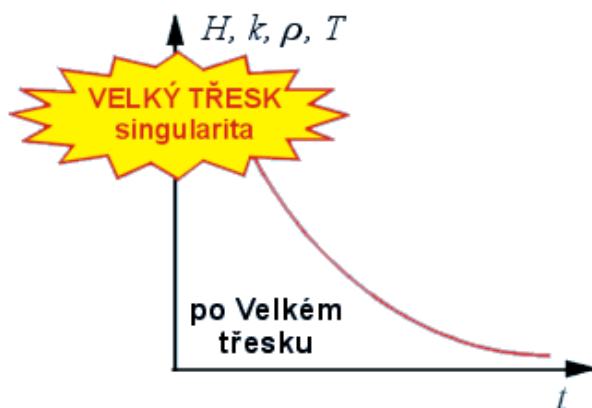
PROBLÉMY STANDARDNÍHO MODELU

Na této stránce naleznete:

- ▼ [Problém počáteční singularity](#)
- ▼ [Problém Planckových škál](#)
- ▼ [Problém plochosti Vesmíru](#)
- ▼ [Problém horizontu](#)
- ▼ [Další problémy](#)

Problém počáteční singularity (co bylo, když nic nebylo?)

Jestliže se dnes vesmír rozpíná, znamená to, že v minulosti byla hustota a teplota vesmíru vyšší než dnes. Kdybychom chtěli popsat vlastnosti vesmíru v čase $t = 0$ (v okamžiku Velkého třesku), dojdeme k závěru, že poloměr vesmíru byl nulový a hustota a teplota nekonečná. Nikdo si samozřejmě vesmír těchto parametrů nedokáže představit ani ho popsat. V roce 1970 dokázal [Stephen Hawking](#), že v rámci Obecné teorie relativity je tato počáteční singularita nevyhnutelná a v teorii se vždy zákonitě objeví. Je tedy jednou z nepříjemných vlastností standardního kosmologického modelu. Týž Hawking mnohem později ukázal, že při popisu počátečních fází vzniku vesmíru mohou hrát podstatnou roli kvantové jevy a že v takovém případě se lze teoreticky počáteční singularitě vyhnout. Po roce 1985 se objevily první inflační modely vzniku vesmíru. Jejich podstatou je krátkodobé exponenciální rozpínání vesmíru s časem v raných fázích vývoje vesmíru (tzv. inflační fáze), které řeší řadu problémů standardního modelu. V inflační fázi může dojít k uvolnění energie a následnému ohřevu vesmíru. To znamená, že dnešní teplotu vesmíru nemůžeme extrapolovat až do času $t = 0$, ale jen do konce inflační fáze. Teplota vesmíru by potom na počátku již nemusela být nekonečná. Navíc v počátečních časech nemusela existovat gravitační interakce, jak ji známe, a obecná relativita nemusela platit, takže extrapolovat k nulovému času je nesmyslné.



Problém Planckových škál

V minulosti lidé zvolili základní mechanické jednotky (metr, sekunda, kilogram) pro měření vzdáleností, času a hmotnosti podle okolí, ve kterém žijí. Například kilometr byl původně stanoven jako 1/10 000 délky zemského kvadrantu (čtvrtina obvodu poledníku), sekunda jako 1/60 minuty, ta jako 1/60 hodiny a ten jako 1/24 dne, který je dobou jedné otočky Země kolem osy. Dnes jsou tyto jednotky definovány mnohem přesněji než za pomoci vlastností naší Země.

Při popisu přírodních jevů vystupují ve fyzikálních zákonech tři základní konstanty s rozměrem daným kombinací základních mechanických veličin:

rychlost světla	$c = 2,997924580 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
gravitační konstanta	$G = 6,6720 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$
Planckova konstanta	$\hbar = 1,054 588 7 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$

Velikost těchto konstant je právě dána volbou mechanických jednotek. Kdyby v minulosti lidé zvolili metr, kilogram a sekundu jiným způsobem, měly by rychlost světla, gravitační a Planckova konstanta jiné hodnoty. Max Planck ukázal, že lze najít jednoznačné mocninné kombinace těchto konstant takové, že mají rozměr délky, času, hmotnosti či energie.

Výsledek je:

$$l_p = (\hbar G/c^3)^{1/2} \approx 10^{-35} \text{ m},$$

$$t_p = (\hbar G/c^5)^{1/2} \approx 10^{-43} \text{ s},$$

$$m_p = (\hbar c/G)^{1/2} \approx 10^{-8} \text{ kg},$$

$$E_p = (\hbar c^5/G)^{1/2} \approx 10^{19} \text{ GeV}.$$

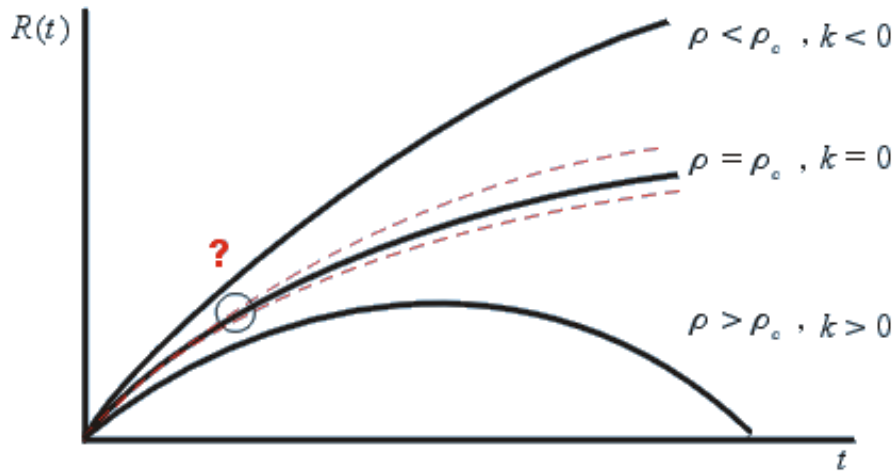
Tento výsledek je více než zářející. Planckova délka, Planckův čas, Planckova hmotnost a energie by měly být jakýmsi přirozenými jednotkami v našem vesmíru. Pak se ale musíme ptát: „Proč je náš vesmír tak veliký, tak starý a tak hmotný? Jaký je význam Planckových jednotek?“



Problém plochosti vesmíru

Budoucnost vesmíru je ve standardním modelu dána především hustotou. Vesmír s hustotou nižší než kritická hustota se bude rozpínat stále a má zápornou křivost, vesmír s hustotou vyšší než kritickou se v budoucnosti začne smršťovat a má kladnou křivost. Zdá se tedy, že pro poznání budoucnosti vesmíru postačí změřit průměrnou hustotu vesmíru. To může být značně komplikované. V dalekohledech a našich přístrojích registrujeme jen tzv. svítící hmotu, které je pouhé 1 %. Další 4 % je nsvítící hmota atomární povahy. Z gravitačních projevů galaxií a z dalších experimentů však víme, že ve vesmíru je 27 % temné hmoty a

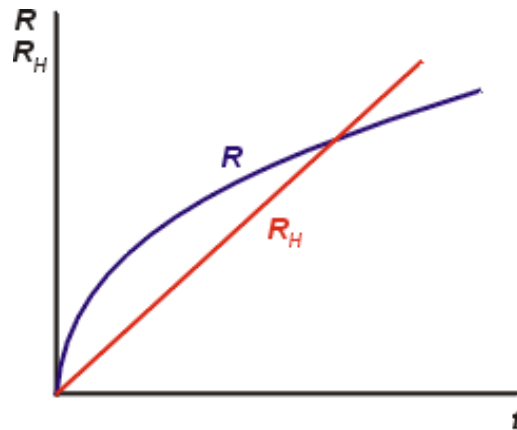
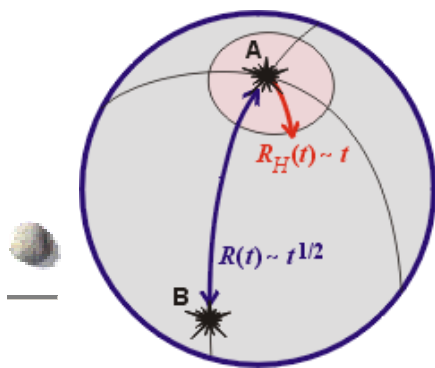
68 % temné energie, kterou nevidíme. Veškeré dosavadní experimenty (přehlídka supernov typu Ia, spektrum fluktuací reliktního záření a další) ukazují na to, že vesmír jako celek má přibližně kritickou hustotu a je pravděpodobně plochý.



Jestliže dnes, mnoho miliard let po Velkém třesku, má vesmír hustotu přibližně rovnou kritické, musel být v minulosti „nastaven“ mimořádně přesně na kritickou hustotu. Jaké procesy jsou zodpovědné za toto nastavení? Například v Planckově čase by musela být odchylka hustoty vesmíru od kritické hustoty

$$\delta\rho/\rho = (\rho - \rho_c)/\rho_c \sim 10^{-59} !!$$

Můžeme samozřejmě tvrdit, že na počátku byl vesmír právě takto „připraven“ a chápat rovnost hustoty vesmíru hustotě kritické jako počáteční podmínku. To je však značně umělé a nepravděpodobné. V dalším uvidíme, inflační fáze v raném vývoji vesmíru

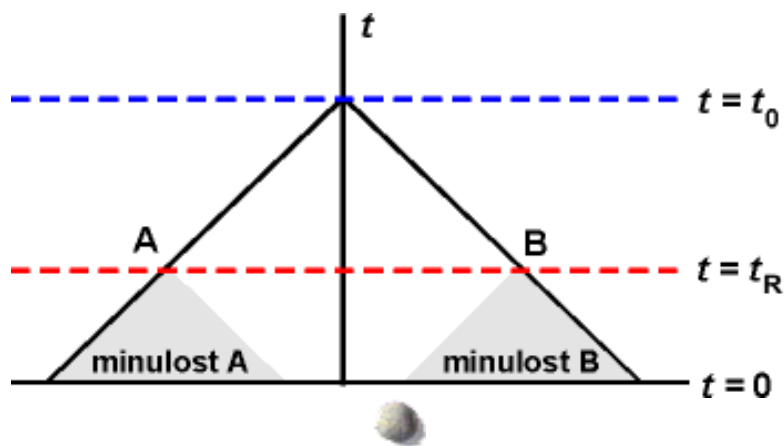


že právě mohla způsobit nastavení vesmíru na kritickou hustotu.

Problém horizontu

Podle standardního modelu se rozměry vesmíru R v počáteční éře záření zvětšovaly podle vztahu $R \sim a \sim t^{1/2}$. Horizont některé částice R_H (oblast, kterou částice může ovlivnit z ní vyslanou informací, pro částici viditelná část vesmíru, viz [Astrofyzika v příkladech](#)) je ale

úměrný rychlosti šíření informace a času, tedy: $R_H \sim t$. Na obrázku vlevo je ve dvojdimenzionální analogii oblast, do které se z objektu A došlá světlo od doby vzniku vesmíru (pro A viditelná část vesmíru, horizont) označena světle červeně. V Planckově čase by měly být rozměry vesmíru mnohonásobně větší než horizont částic. Rozměry vesmíru se odhadují na 10^{-4} cm a horizont částic odpovídá Planckově délce 10^{-35} m. Vesmír je tak složen z řádově 10^{87} kauzálně oddělených oblastí, které spolu nemohou komunikovat. To má závažné důsledky pro charakter reliktního záření. Jestliže zvolíme dnes (čas t_0) dva body A a B v opačných směrech od pozorovatele, nebyly v době oddělení záření od hmoty (čas t_R) podle standardního modelu tyto body kauzálně svázány (jejich kužely minulosti se neprotínají). Potom ale není žádný rozumný důvod pro vysokou homogenitu reliktního záření, které dnes pozorujeme, ani pro pozorovanou homogenitu vesmíru v měřítkách nad 500 Mpc. Opět bychom počáteční homogenitu vesmíru mohli chápat jako zcela umělou počáteční podmínku. Je ale přirozenější pátrat po procesech, které mohly způsobit „domluvení se“ kauzálně nespojených oblastí. Pomoci může například opět inflační fáze s jinou závislostí expanzní funkce než $a \sim t^{1/2}$.



Další problémy standardního modelu

- problém baryonové asymetrie (proč ve vesmíru nepozorujeme antihmotu?)
- problém magnetických monopolů (kde jsou?)
- kde se vzaly počáteční fluktuace nutné k tvorbě galaxií?
- proč je dimenze vesmíru právě 4 (tři prostorové dimenze a jedna časová)?

INFLAČNÍ VESMÍR A PBB

Na této stránce naleznete:

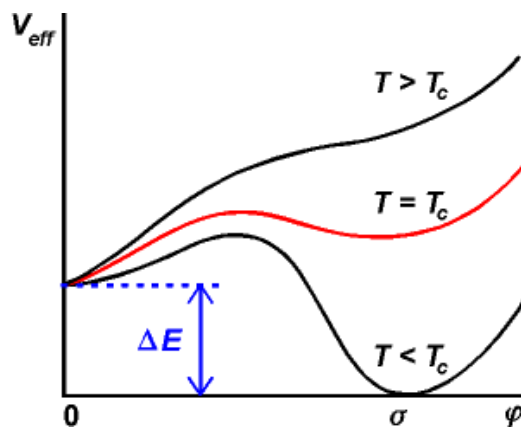
- ➡ [Standardní inflační scénář](#)
- ➡ [Řešení problémů standardního modelu](#)
- ➡ [Nový inflační scénář](#)
- ➡ [Pre Big Bang](#)

Standardní inflační scénář

Některé problémy standardního modelu může vyřešit krátkodobé exponenciální zvětšování vesmíru těsně po jeho vzniku. Tuto myšlenku poprvé vyslovil Alan Guth v roce 1980. Fázi překotného rozpínání vesmíru nazýváme *inflací*. Dnes známe řadu teoretických i experimentálních faktů, které tuto myšlenku podporují, nicméně s jistotou její existence dokázána není.

Nejpravděpodobnějším důvodem inflační fáze bylo spontánní narušení GUT symetrie a následné oddělení interakce silné od elektroslabé při energiích 10^{14} GeV (tomu odpovídá čas 10^{-35} s po vzniku vesmíru a teplota 10^{27} K). Změna vlastností našeho vesmíru při této teplotě připomíná fázové přechody druhého druhu. Jako příklad lze uvést přechod feromagnetika přes Curieovu teplotu. Při teplotách $T < T_c$ existují ve feromagnetiku Weissovy domény s orientovanými magnetickými momenty a tím feromagnetické vlastnosti. Při teplotách $T > T_c$ jsou magnetické momenty uspořádány chaoticky a materiál nemá makroskopické magnetické vlastnosti.

Také v našem vesmíru při ochlazování pod teplotu $T_c = T_{\text{GUT}} = 10^{27}$ K došlo k prudké změně vlastností vesmíru a možná k nějakému typu fázového přechodu. Průběh potenciálu Higgsových polí φ , která způsobují narušení symetrie, se s klesající teplotou vesmíru výrazně mění:

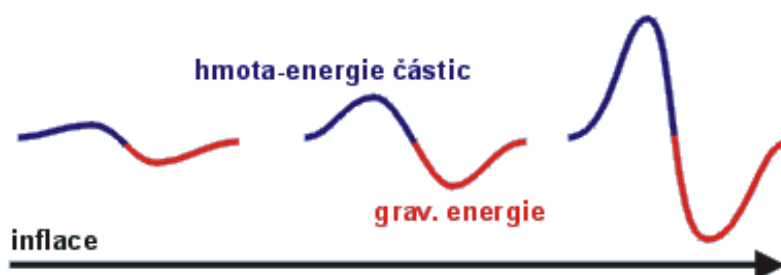


V počátečních fázích, při vysoké teplotě vesmíru, měla Higgsova pole jediné energetické minimum pro hodnotu pole $\varphi = 0$. Vesmír tedy vznikl s touto nejnižší hodnotou energie Higgsova pole. Jak se vesmír rozpínal a postupně chladl, objevilo se sekundární minimum energie s hodnotou $\varphi = \sigma$. Energie vakua tak už nemá nejnižší možnou hodnotu (hovoříme o „falešném“ vakuu). Při teplotě $T < T_c$ dojde k fázovému přechodu, podobně jako tyto přechody známe u laboratorních materiálů. Fázový přechod nemusí nutně nastat při $T = T_c$, ale i později, vesmír se chová jako podchlazená kapalina, u které ještě nedošlo ke krystalizaci. Energetický rozdíl obou minim se odhaduje na $\Delta E \approx (kT_c)^4 \approx 10^{56} \div 10^{60}$ GeV. V průběhu fázového přechodu, který by měl trvat cca 10^{-33} s, se tato energie uvolní, dojde k ohřevu vesmíru téměř zpět na T_c , k zvýšení entropie faktorem 10^{87} a k zvětšení rozměrů faktorem 10^{29} . Expanzní funkce se mění podle exponenciální závislosti $a(t) = \exp[\chi t]$.

Fázové přechody s narušením symetrie známe i z běžného života. Máme-li vodu, kterou postupně ochlazujeme, krystalizuje v pevnou fázi – led. Přitom fáze při vyšší teplotě měla vyšší symetrii (sférickou), fáze při nižší teplotě má nižší stupeň symetrie. V teoretických modelech jsou tyto fázové přechody doprovázeny vznikem různých topologických defektů:

- **Narušení diskretní symetrie** (potenciál s několika minimy): vznik *doménových stěn*, které oddělují fáze s různou hodnotou minima potenciálu. Příkladem může být právě feromagnetikum a Weissovy domény. Vesmírné domény mohou souviset s velkorozměrovou strukturou vesmíru.
- **Narušení válcové symetrie**: vznik *kosmických strun* – lineárních velmi tenkých hmotných oblastí, které se postupně rozpadají. Přitom vznikají gravitační vlny. Odhaduje se, že v dnešním vesmíru by nemělo být více jak 40 kosmických strun. Pro představu: cca 10 km kosmické struny by mělo mít hmotnost jako naše zeměkoule.
- **Narušení kulové symetrie**: vznik *monopólů* (nositelé magnetického náboje). Jestliže neproběhla inflační fáze, mělo by být těchto monopólů značné množství.

V průběhu inflace se vytváří značné množství částic na úkor prohlubující se záporné gravitační energie. Hmoty těchto částic je tak vytvářena na dlouhodobý „dluh“ gravitační energii. Tento dluh bude možná splacen v závěrečných fázích vývoje vesmíru. Díky překotné tvorbě částic při inflaci zůstává hustota hmoty-energie při této expanzi konstantní.



Právě konstantní hustota energie ve vesmíru způsobuje fiktivní *záporný tlak*, který je odpovědný za expanzi. Lze to ukázat například z první věty termodynamické aplikované na vesmír:

$$dQ = dU + pdV.$$

Vesmír jako celek lze chápat jako adiabaticky izolovaný, tj. $dQ = 0$. Energie $U = Mc^2 = \rho Vc^2$. Při konstantním ρ potom máme

$$0 = (\rho c^2 + p) dV$$

a tlak ve vesmíru v průběhu inflace tak opravdu vychází záporný

$$p = -\rho c^2.$$

S ukončením inflační fáze teprve začíná standardní Fridmanova kosmologie.



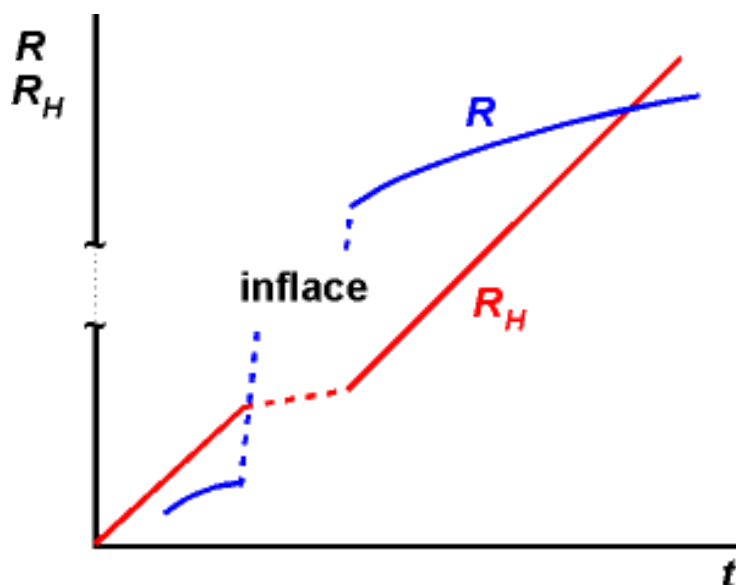
Řešení problémů standardního modelu

Inflační model elegantně řeší oba dva základní problémy standardního modelu: [problém plochosti](#) vesmíru i [problém horizontu](#). Připomeňme si ještě jednu Einsteinovu rovnici pro expanzní funkci (viz [standardní model](#))

$$H^2 - (8/3)\pi G\rho = -c^2 k/a^2; \quad H \equiv (da/dt)/a.$$

Čítec i jmenovatel v prvním členu se chovají exponenciálně a exponenciální závislost se zkrátí. V druhém členu se exponenciální závislost výrazně neprojeví. Člen na pravé straně bude inflací ovlivněn zcela dominantně. Ve jmenovateli se objeví faktor $\exp[2\chi t]$, který způsobí zmenšení tohoto členu v průběhu inflační fáze faktorem 10^{58} . Efektivní křivost vesmíru tak bude v průběhu inflační fáze nastavena téměř na nulu. Bezprostředně po inflaci bude $\rho/\rho_c \approx 1 \pm 10^{-58}$ a v dnešní době $\rho/\rho_c \approx 1 \pm 10^{-6}$. Problém plochosti vesmíru je tak řešen nastavením vesmíru na kritickou hustotu v průběhu inflační fáze.

Před inflační fází byly rozměry vesmíru 10^{58} krát menší než po jejím ukončení. To ale znamená, že rozměry vesmíru před inflační fází byly menší než horizont částic a že všechny oblasti byly kauzálně spojeny. Dokonce celý dnešní pozorovatelný vesmír byl v čase t_{GUT} v jediném světelném kuželu. To je způsobeno tím, že horizont částic narůstá lineárně s časem i v průběhu inflační fáze.



V průběhu inflační fáze dochází také k „vyhlazení“ vlivu některých typů počátečních podmínek. Podobně jako na nafukujícím se míči zmizí nerovnosti povrchu, zmizí vliv chaotických počátečních podmínek na budoucí podobu vesmíru (ne však všech typů).

Dalším zajímavým efektem je „tvorba hmoty“. V inflační fázi zůstává zachována hustota energie před inflací. Zvětší-li se objem vesmíru, zvětší se ve stejném poměru i záporná gravitační energie a kladná hmotnost materiálních částic. Jakoby z ničeho se tvoří hmota a přesto se nemění celková energie (součet gravitační potenciální energie a energie hmotnosti částic) ani její hustota.

Inflační scénář řeší i některé další problémy standardního modelu. Za všechny připomeňme ještě problém neexistence magnetických monopolů. Ty by měly vzniknout v dosti značném množství jako topologické defekty Higgsova pole při narušení GUT symetrie. Jestliže však proběhla inflační fáze a celý dnešní vesmír se v čase t_{GUT} nacházel v jediném světelném kuželu, může být v celém vesmíru monopolů jen několik.

Vyřešené problémy:

- problém plochosti vesmíru,
- problém horizontu,
- problém vytvoření velkého množství částic (10^{90}) z „ničeho“,
- problém magnetických monopolů,
- vznik topologických defektů.

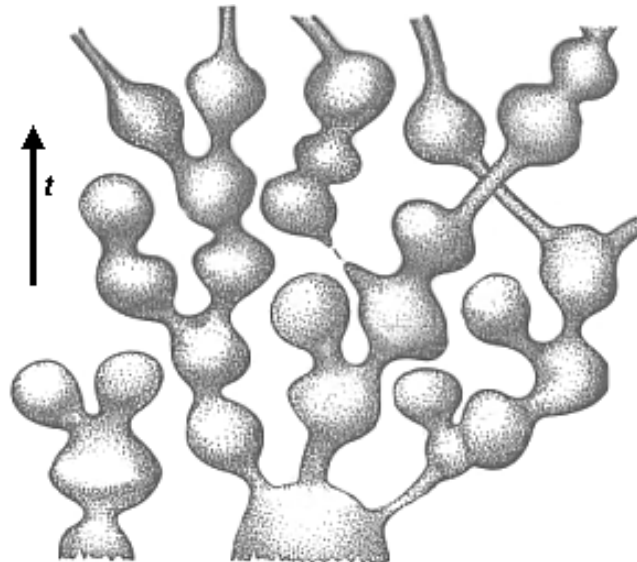
Nové problémy:

- nutnost tunelování potenciálovou bariérou,
- pomalý vznik mnoha bublin nové fáze, obtížné spojování bublin,
- vzniklý vesmír je silně nehomogenní.



Nový inflační scénář

Tak jak to bývá, inflační model řeší některé problémy standardního modelu a přitom přináší jiné. Podle standardního inflačního scénáře došlo k přechodu ze stavu falešného vakua do stavu s nejnižší energií kvantovým tunelovým jevem. „Nová fáze“ vesmíru vznikala v různých místech vesmíru a šířila se v podobě jakýchsi bublin, které se postupně propojovaly. Charakter Higgsova potenciálu vyžaduje tunelování potenciálovou bariérou. V průběhu tohoto procesu by ve vesmíru vznikalo velké množství bublin nové fáze, které by se obtížně propojovaly a výsledkem by byl silně nehomogenní vesmír. Proto v roce 1982 navrhli Andrej Linde, Paul Steinhardt a Andreas Albrecht nový inflační scénář. Je založen na jiném průběhu potenciální energie Higgsova pole (na tzv. *Colemanově-Weinbergově potenciálu*). Tento potenciál má potenciálovou bariéru velmi plochou a dokonce při $T \rightarrow 0$ tato bariéra vymizí. Podle nového scénáře mohlo vzniknout bublin nové fáze jen několik nebo jen jedna jediná.



V dnešní době se intenzivně zkoumají možnosti vzniku inflační fáze bez fázového přechodu, inflační fáze s chaotickými počátečními podmínkami, možnosti inflace v jiných časech než je t_{GUT} (například přímo v Planckově čase, tj. v t_{SUSY}) nebo i existence několika inflačních fází a fázových přechodů v průběhu vývoje vesmíru (při každém narušení symetrie). V roce 1986 dokázal Andrej Linde, že k inflaci může dojít v bezprostředních okamžicích po Velkém třesku, jsou-li zde přítomna pole s parabolickou závislostí potenciální energie na velikosti pole (tzv. *inflatonová pole*, $V = m\phi^2/2$). K nastartování inflace postačí, je-li počáteční hodnota pole větší než trojnásobek Planckovy hmotnosti.

Je-li nenulová [kosmologická konstanta](#), probíhá vývoj vesmíru ve třech fázích:

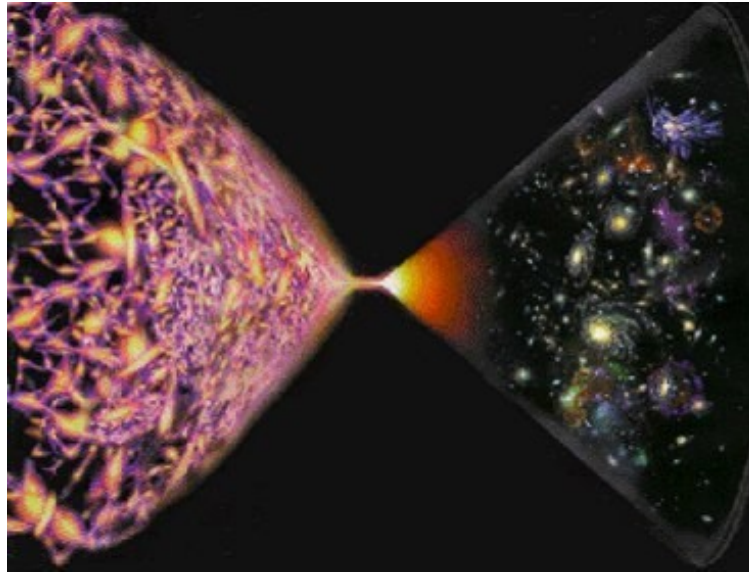
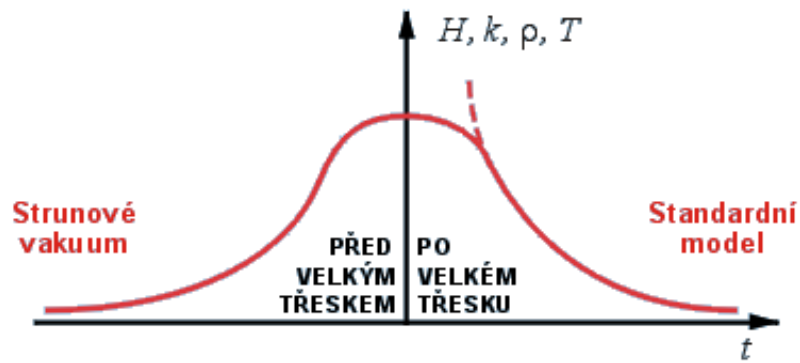
I.	$\exp[\chi t]$	Lindeho inflace,
II.	$t^{2/3}, t^{1/2}$	Fridmanova expanze,
III.	$\exp[(\Lambda/3)^{1/2}t]$	De Sitterova inflace.

Na počátku je klasická inflační fáze následovaná standardním Fridmanovým rozpínáním vesmíru s dominancí záření a později látky. Po dostatečném zředění vesmíru začne dominovat člen s kosmologickou konstantou. Vesmír se začne chovat jako prázdný (de Sitterův) vesmír s exponenciální expanzí způsobenou kosmologickým členem.

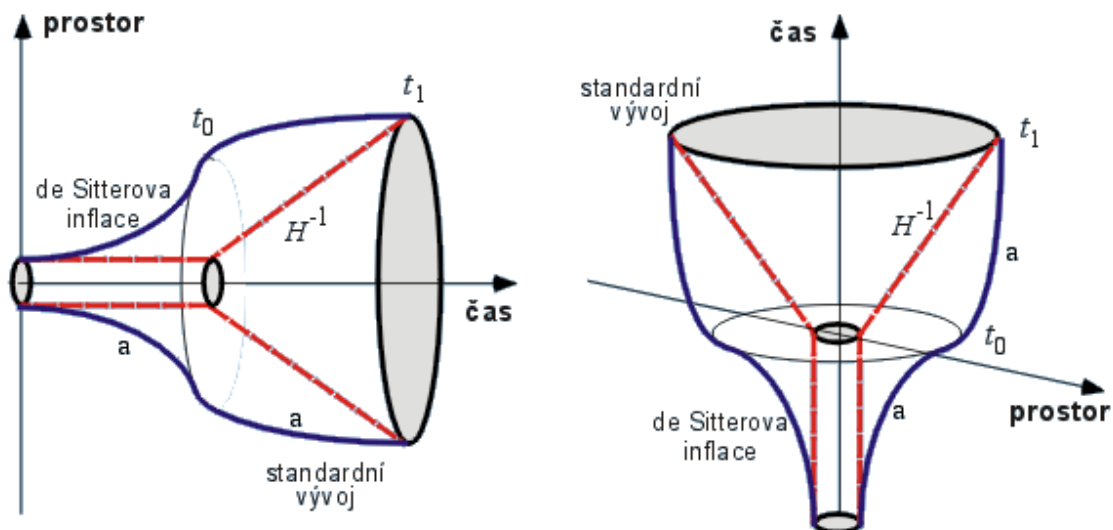


Pre Big Bang fáze

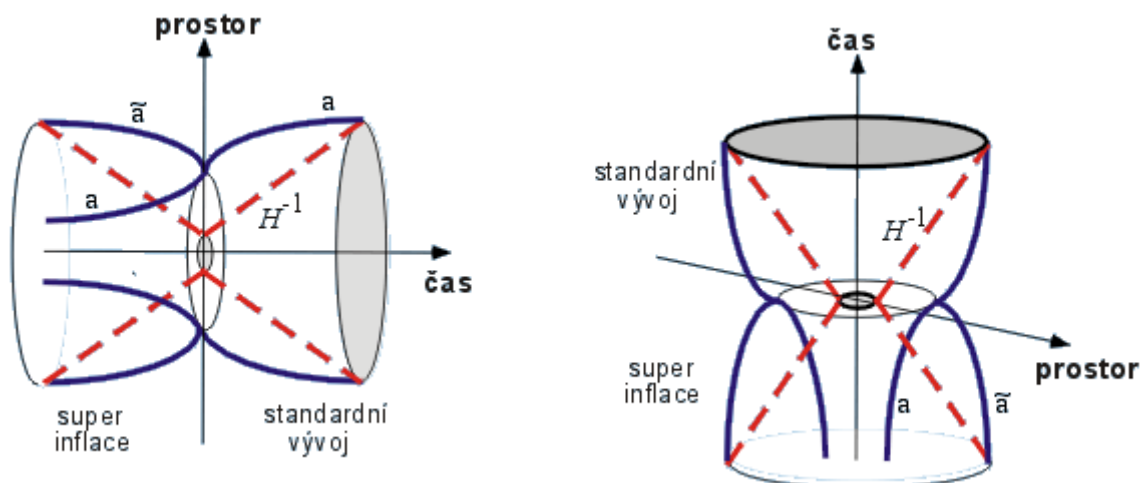
Dostí často se dnes také hovoří o stavu vesmíru před Velkým třeskem (PBB fáze – *Pre Big Bang*). Znamená to do popisu vesmíru zapojit i kvantovou teorii pole, protože v počátečních fázích měly na vývoj vesmíru rozhodující vliv všechny 4 interakce. Ukazuje se, že potom není bezprostředně nutná divergence klasických veličin (hustota teplota, křivost, Hubbleova konstanta) v počátečním čase. Čas $t = 0$ lze chápat spíše jako okamžik maximální křivosti vesmíru.



V PBB fázi je vesmír ovládán zákony kvantové mechaniky (tzv. Wheelerovou-de Wittovou rovnicí). Jde o bezčasový kvantový stav bez klasických vlastností. V průběhu dojde k *dekoherenci* – nevratné interakci kvantového subsystému s přirozeným okolím, které vede k objevení se klasických vlastností. V teoretických pokusech o spojení všech 4 interakcí (například strunové teorie se supersymetrií SUSY) se vyskytuje většinou nové skalární pole – tzv. *dilatonové* pole. Toto pole může způsobit prudkou inflaci či kontrakci vesmíru již před Velkým třeskem. Těmto vývojovým fázím říkáme *superinflace* a *superkontrakce*. Strunové teorie se supersymetrií vnášejí do kosmologie řadu nových prvků (dilatonové pole, vícerozměrný vesmír, superpartnery normálních částic, částice jako struny). Kosmologii založené na těchto teoriích se zpravidla říká *strunová kosmologie*.



Na obrázku vidíte standardní model vesmíru. Tmavomodrá křivka znázorňuje rozměry vesmíru (expanzní funkci). Zpočátku rostou exponenciálně (de Sitterova inflace) a později přechází ve standardní rozpínání typu $t^{1/2}$ či $t^{2/3}$. Červená křivka znázorňuje horizont částic (vzdálenost do které dolétlo světlo od vybrané částice. V inflační fázi je expanze natolik prudká, že horizont částice je konstantní. Pravý obrázek je jen otočen o 90°, připomíná vinnou sklenici a říká se mu „*wineglass*“. Na následujícím obrázku je stejná situace ve strunové kosmologii. Před Velkým třeskem dochází k superinflaci či superkontrakci, smysl mají i záporné časy.

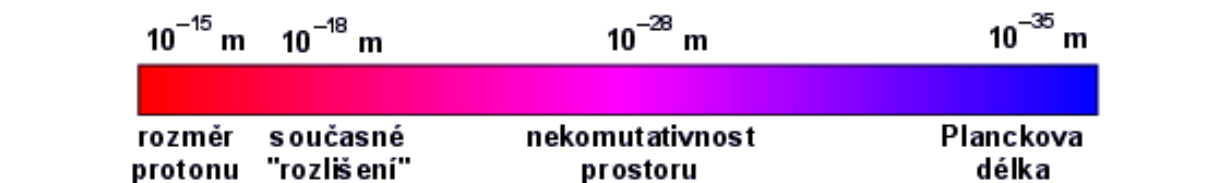


Dnes se zdá, že superinflační předbigbangová fáze může mít současný experimentální dopad. Intenzita gravitačních vln vytvořená při superinflační fázi je podle stávajících teorií o 8 až 9 řádů vyšší než intenzita gravitačních vln vzniklá při konvenční Guthově či Lindeho inflaci. V roce 2000 započatý experiment LIGO (*Laser Interferometry Gravitational Wave Observatory*) má délku interferometrických ramen plně 4 kilometry a je schopen měřit změny velikosti ramen při průchodu gravitační vlny s rozlišením 10^{-18} m! Přesto je jeho citlivost pro detekci gravitačních vln hraniční. V Evropě je detektor VIRGO (v Itálii, 10 km od Pisy) s délkou ramen 3 km. Připravuje se ale ještě citlivější experiment LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*). Půjde o tři sondy obíhající společně kolem Slunce. Z každé sondy budou mířit dva laserové paprsky k ostatním dvěma sondám. Vzdálenost sond by měla být 5 milionů

kilometrů. Tento obří interferometr již bude mít zcela dostatečnou citlivost k detekci gravitačních vln z předbigbangových fází. Vyslání sond se plánuje po roce 2020.



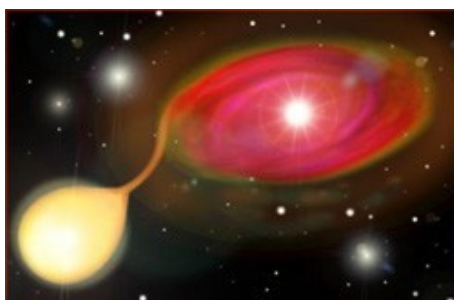
Vícerozměrný vesmír v raných fázích obsahuje méněrozměrné útvary *D-branes*, *Dirichlet branes*). Jde o nelokální časoprostorové defekty (solitony, membrány), které vytvářejí diskrétní buněčnou strukturu časoprostoru. Na těchto „*membránách*“ jsou lokalizována kalibrační a ostatní pole. Jediná gravitace je objemová a je lokalizována v celém prostoru. Vytvářejí ji membrány deformací Minkowského metriky podle vztahu $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + O(E/M_p)$. Membrány mohou být také příčinou inflace. Membrány se mohou překrývat a interagovat pomocí strun, jejichž otevřené konce jsou lokalizovány na membránách. Tímto mechanismem vzniká nekomutativní geometrie časoprostoru, předpokládá se na škálách 10^{-28} m. Přítomnost membrán na Plankovských škálách ovlivňuje šíření fotonů a mělo by proto dojít k novému typu disperze nezávislé na frekvenci fotonů. Tento jev by měl být detekován ve vysoce energetických gama záblescích i u některých pozemských experimentů s kaony s *b* kvarkem.



SOUČASNÁ KOSMOLOGIE



Na této stránce naleznete:



[Supernovy SN Ia](#)



[Fluktuace reliktního záření](#)



[Temný věk](#)

[První hvězdy](#)

[Temná hmota](#)

[Temná energie](#)

[SCP Projekt \(2010\)](#)

[Ekpyrotický model](#)

[Kosmologické projekty](#)

[Aktuální parametry](#)

[Přečtěte si](#)



Supernovy SN Ia

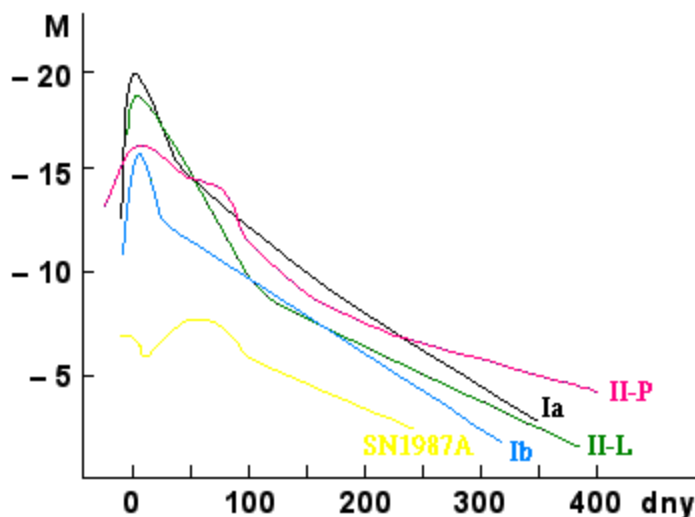
Odhad velikosti základních kosmologických parametrů, jako je například Hubbleova konstanta, se vždy potýkal s přesným určením velkých vzdáleností ve vesmíru. Čím vzdálenější objekty, tím hrubší byl odhad vzdálenosti. U nejbližších objektů lze využít trigonometrie, například měřením paralaxy blízkých hvězd. Na středních vzdálenostech pomohou cefeidy – proměnné hvězdy u nichž je známa závislost svítivosti na periodě. Ze změřené periody se spočte skutečný zářivý výkon cefeidy a z její relativní magnitudy na obloze potom určíme, jak je ve skutečnosti daleko. Metoda cefeid pomáhá i v blízkých galaxiích. V kosmologických vzdálenostech ale do konce 20. století byly prováděny jen hrubé odhady. Chyběla „standardní svíčka“, pomocí které by se určovaly vzdálenosti ve vesmíru.

Na konci dvacátého století se k určování vzdálenosti začaly používat, jako zdaleka viditelné standardní svíčky, supernovy typu Ia. *Supernova typu Ia* je závěrečné vývojové stádium těsné dvojhvězdy, ve které dochází k přenosu látky z obra na bílého trpaslíka, který tak zvětšuje svoji hmotnost. Po překročení Chandrasekharovy meze ($1,4 M_{\odot}$) se bílý trpaslík zhroutl do neutronové hvězdy, dojde k explozivnímu termonukleárnímu hoření C, O na Ni 56 v celém objemu trpaslíka a uvolněná potenciální energie se explozivně projeví jako supernova typu Ia. Množství energie je vždy zhruba stejné, takže z relativní pozorované jasnosti lze vypočítat vzdálenost příslušné supernovy. Přesnější hodnoty se pak určí z tvaru světelné křivky (z průběhu nárůstu a poklesu jasnosti). Supernovu typu Ia lze jednoznačně identifikovat podle tvaru jejího spektra. Navíc jsou tyto objekty ve vesmíru relativně časté, v průměrné galaxii dojde ke dvěma explozím za století.

V letech 1998 a 1999 prováděly měření vzdálenosti a červeného posuvu (a tím expanzní funkce) supernov Ia dvě nezávislé vědecké skupiny. Jedna byla vedená Saulem Perlmutterem (Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999) a druhá Adamem Riessellem (Space Telescope Science Institute, Baltimore, 1998). Obě skupiny na vybraném souboru supernov určovaly dvě veličiny: vzdálenost z jejich skutečné jasnosti (průběhu světelné křivky) a rychlost expanze vesmíru z červeného kosmologického posuvu spektrálních čar. To umožnilo určit, jak se vesmír rozpínal v různých časových údobích. Výsledek byl překvapivý. Spíše než zpomalování rozpínání vesmíru bylo naměřeno jeho urychlování. To znamená ve svém důsledku přítomnost temné energie ve vesmíru, která se projevuje záporným tlakem a způsobuje urychlování expanze vesmíru. Tato temná energie se projeví nenulovou hodnotou

kosmologické konstanty, která z Perlmutterových i Riessových měření vycházela kolem 70 % celkové hustoty vesmíru. Nejuvzdálenější použitá supernova byl objekt 1997ff.

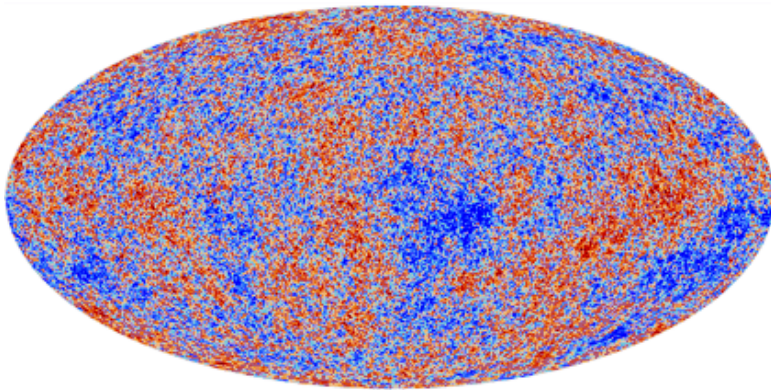
V posledních letech existuje celá řada projektů vyhledávajících supernovy typu Ia. Obě zmíněné skupiny pořídily do roku 2003 soubor 230 supernov. Tyto objekty byly vyhledávány také v klíčovém projektu HST pro určení Hubbleovy konstanty i v současných přehlídkových projektech, například projektu [GOODS](#).



Světelné křivky různých typů supernov

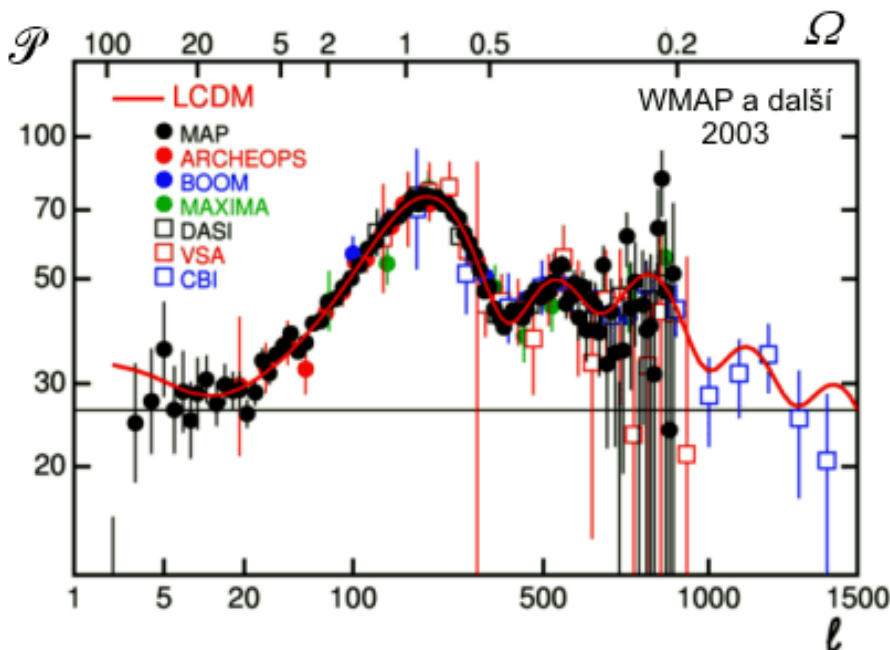
Fluktuační reliktního záření

[Reliktální záření](#) je dnes pravděpodobně nejdůležitějším zdrojem informací z minulosti našeho vesmíru. Mnoho kosmologických parametrů se dá zjistit rozborem fluktuací reliktního záření a polarizace reliktního záření ([COBE](#) 1998, [WMAP](#) 2001, [Planck](#) 2009). V raném vesmíru se vyskytovaly zárodečné fluktuační hmoty, které se v budoucnu vyvinuly v dnes známé vesmírné struktury – galaxie a kupy galaxií. Pokud látka interagovala intenzivně se zářením, přenesl se obraz těchto struktur i do elektromagnetického záření vesmíru. Po oddělení záření od hmoty (380 000 let po Velkém třesku) zůstaly fluktuační hmoty vtištěny do reliktního záření podobně jako paleolitický otisk trilobita v prvohorní usazenině. Odchytky těchto fluktuací od průměrné hodnoty jsou asi 1/100 000. Informace nesená fluktuacemi reliktního záření je nesmírně cenná.

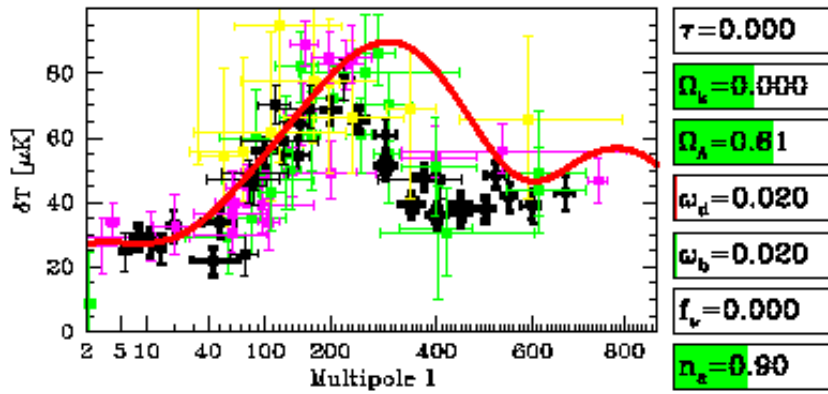


Mapa fluktuací reliktního záření z evropské sondy Planck. Planck je sonda z roku 2009, která pořídila dosud nejpodrobnější mapu fluktuací reliktního záření s úhlovým rozlišením 5' a teplotní citlivostí 2 μK . Zrcadlo sondy mělo rozměr 1,5 m a teplota chlazeného ohniska byla 0,1 K. Sonda provedla 4 celé přehlídky oblohy v oblasti od 0,2 mm do 10 mm rozdělené na 9 frekvenčních pásem. Mapa byla zveřejněna v roce 2013, data se budou zpracovávat až do roku 2014. Jsou nejdůležitějším zdrojem informací o raných fázích vývoje vesmíru.

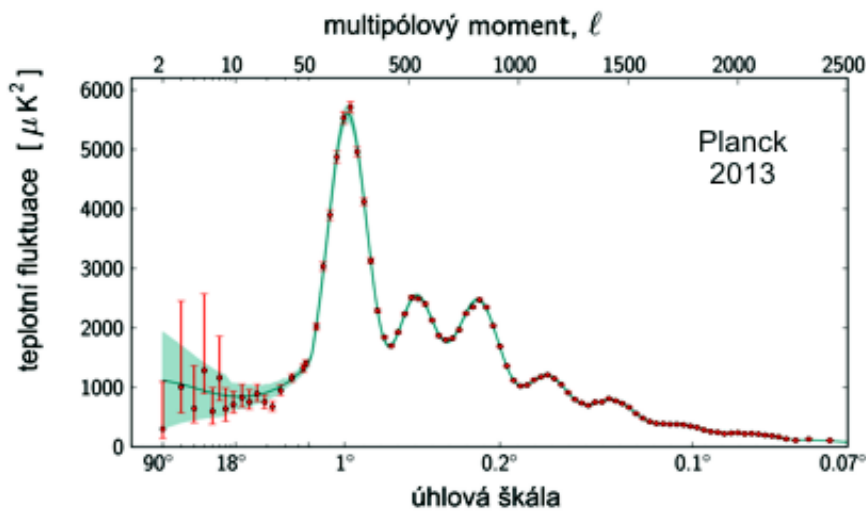
Fluktuace reliktního záření jsou otiskem fluktuací hmoty v raných fázích vývoje vesmíru, které jsou v podstatě zvukovými vlnami šířícími se vesmírem. A tak jako u zvukových vln můžeme rozkladem do jednotlivých harmonických určit charakteristiky nástroje, ze kterého zvuk přichází, můžeme ze zastoupení různě velikých (úhlově) fluktuací usuzovat na vlastnosti vesmíru. Matematicky se tato analýza provádí pomocí spektra fluktuací – jejich rozkladu do kulových funkcí neboli do jednotlivých harmonických.



Spektrum fluktuací z WMAP, CBI, DASI a dalších zdrojů. Na vodorovné ose se nachází jednotlivé frekvence rozvoje dokulových funkcí číslované hodnotou tzv. multipólu l . Toto číslo souvisí s úhlovým rozměrem fluktuací vztahem $\Omega = 180^\circ / l$. Na svislé ose je veličina úměrná zastoupení fluktuací. Vidíme, že nejvíce jsou zastoupeny fluktuace o úhlovém rozměru přibližně 1° . Z polohy jednotlivých maxim a jejich velikosti lze určit křivost vesmíru,



hodnotu kosmologické konstanty, zastoupení jednotlivých entit ve vesmíru a další parametry. Z polarizace je možné určit dobu vzniku prvních hvězd.



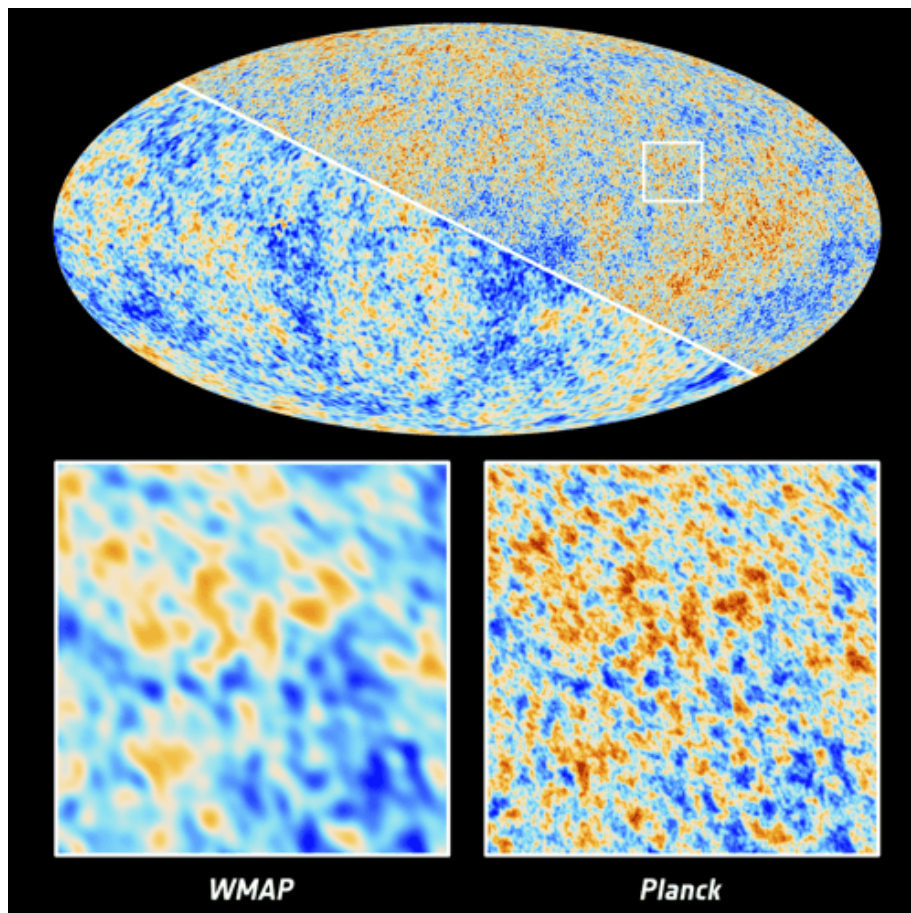
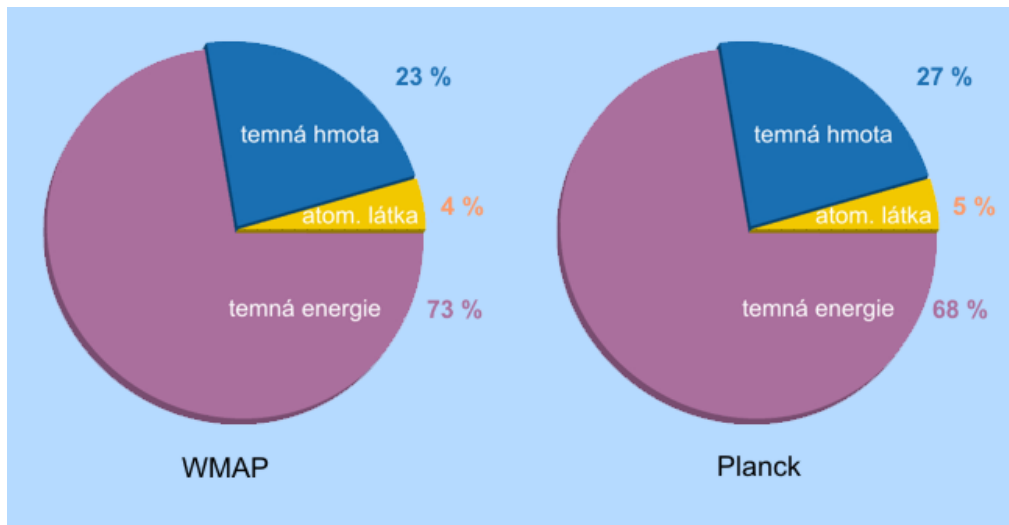
Na prostředním obrázku je ukázka, jak se mění poloha a velikosti maxim teoretického průběhu (červeně) v závislosti na zastoupení temné hmoty ve vesmíru.

Na posledním obrázku je **spektrum fluktuační porízené sondou Planck**. Ze spektra se poprvé podařilo zjistit polohu prvních pěti maxim a výrazně zpřesnit základní kosmologické parametry vesmíru. Definitivní spektrum provedené ze všech čtyřech mikrovlnných přehlídek oblohy porízených Planckem bude k dispozici v roce 2014. Poloha maxim odpovídá parametru $w \sim -1$.

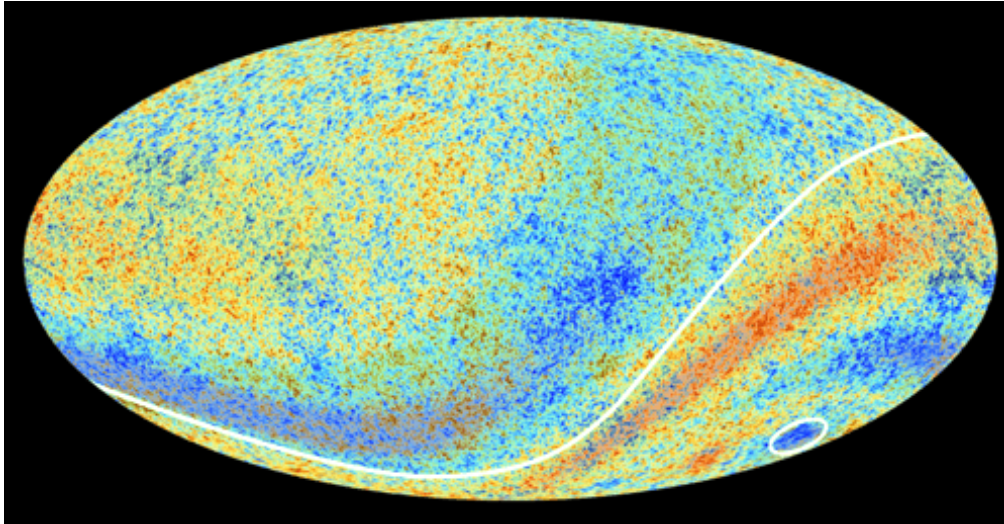
Zajímavé je, že u fluktuační hodnotách nad 60° . Bud' y, které dlouhovlnné mily nebo se tyto poruchy tože má vesmír možná

Výsledek rozboru fluktuační reliktního záření z dat sondy WMAP byl oznámen 11. 2. 2003 na slavnostní tiskové konferenci. Výsledky ze sondy Planck byly zveřejněny téměř přesně o deset let později – 22. března 2013. Potvrdila se nenulová hodnota kosmologické konstanty zjištěná již ze sledování červeného kosmologického posuvu supernov typu Ia. Ukázalo se, že hustota atomární (baryonové) hmoty činí pouhých 5 % hustoty vesmíru a pouhé 1 % představuje hmotu svítící. Podobně jako se kdysi ukázalo, že Země není středem vesmíru, nyní bezpečně víme, že vesmír není tvořen z hmoty, kterou běžně vidíme. Celých 27 % hmoty je zde nebaryonové povahy, jde o tzv. temnou hmotu, jejíž projevy jsou pozorovány od roku

1933 ([Fritz Zwickey](#)) a jejíž podstatu neznáme. Plných 68 % pak tvoří temná energie související buď s kvantovými projevy vakua, nebo dalšími neznámými jevy. Sonda Planck měla desetkrát lepší teplotní rozlišení a čtyřikrát lepší úhlové rozlišení než sonda WMAP.



Porovnání pořízené mapy fluktuací ze sond WMAP a Planck



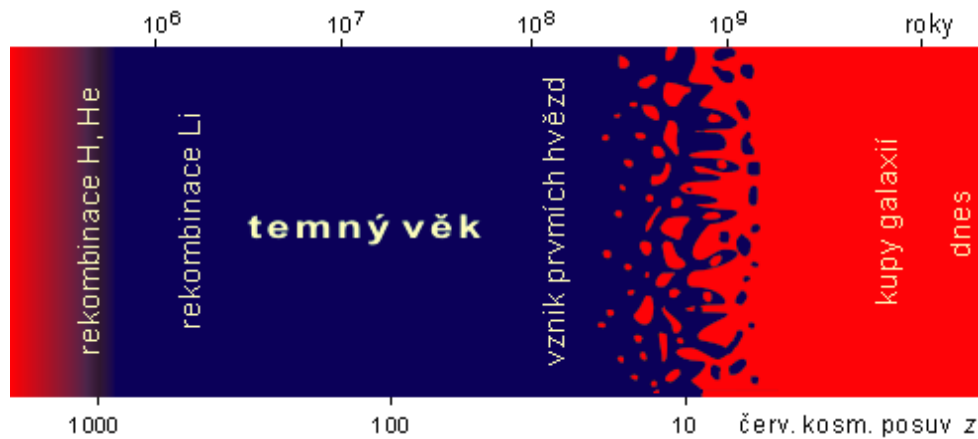
Počítačově zesílená anomálie ve fluktuacích reliktního záření ze sondy Planck. Z různých směrů jsou fluktuace z neznámých příčin různé. Navíc je vpravo dole podivná chladná skvrna. Tyto jevy čekají teprve na vysvětlení.

Temný věk

Po svém vzniku byl vesmír horký a záření bylo provázáno s hmotou. Fotony intenzivně interagovaly s volnými elektrony. Jak vesmír expandoval, postupně chladl a měnily se energetické poměry. Přibližně 380 000 let po velkém třesku vytvořily elektrony atomární obaly a fotony s nimi výrazně omezily svou interakci. Hovoříme o tzv. *období rekombinace*, při kterém se záření oddělilo od hmoty a vytvořilo záření pozadí. Dnes ho pozorujeme v mikrovlnné oblasti a v podobě fluktuací v sobě nese otisk dávných struktur vesmíru. Tomuto okamžiku odpovídá červený kosmologický posuv $z_{\text{rec}} \sim 1100$. Předpokládá se, že hodnota pro vodík a hélium se bude nepatrně lišit.

Po rekombinaci se vesmír zahalil do tmy, hmota nevyzařovala světlo. Nastal tzv. *temný věk vesmíru*, anglicky *dark age*. Vesmír nadále expandoval, prvopočáteční fluktuace se přetvářely do výraznějších struktur a zhruba 400 milionů let po velkém třesku vznikly první hvězdy. Jejich pronikavé záření zanedlouho ionizovalo všudypřítomný vodík a hélium, docházelo k tzv. *reionizaci*, skončila éra temného věku vesmíru. Právě okamžik reionizace je dalším důležitým kosmologickým parametrem, ze kterého lze odhadnout období vzniku prvních hvězd.

Existuje několik vzájemně provázaných parametrů, které jednoznačně definují okamžik reionizace. Především je to samotný časový údaj počítaný od Velkého třesku. Častěji se ale používá hodnota kosmologického červeného posuvu v okamžiku reionizace $z_{\text{ion}} \sim 15$ nebo optická tloušťka $\tau \sim 0,15$, která udává pravděpodobnost, že se vybraný foton rozptýlí právě jednou. Zatím je nejasné proč z korelací mezi polarizací a teplotou reliktního záření pro fluktuace na velkých úhlových škálách vychází nepatrně vyšší hodnota, $z_{\text{ion}} \sim 17$.



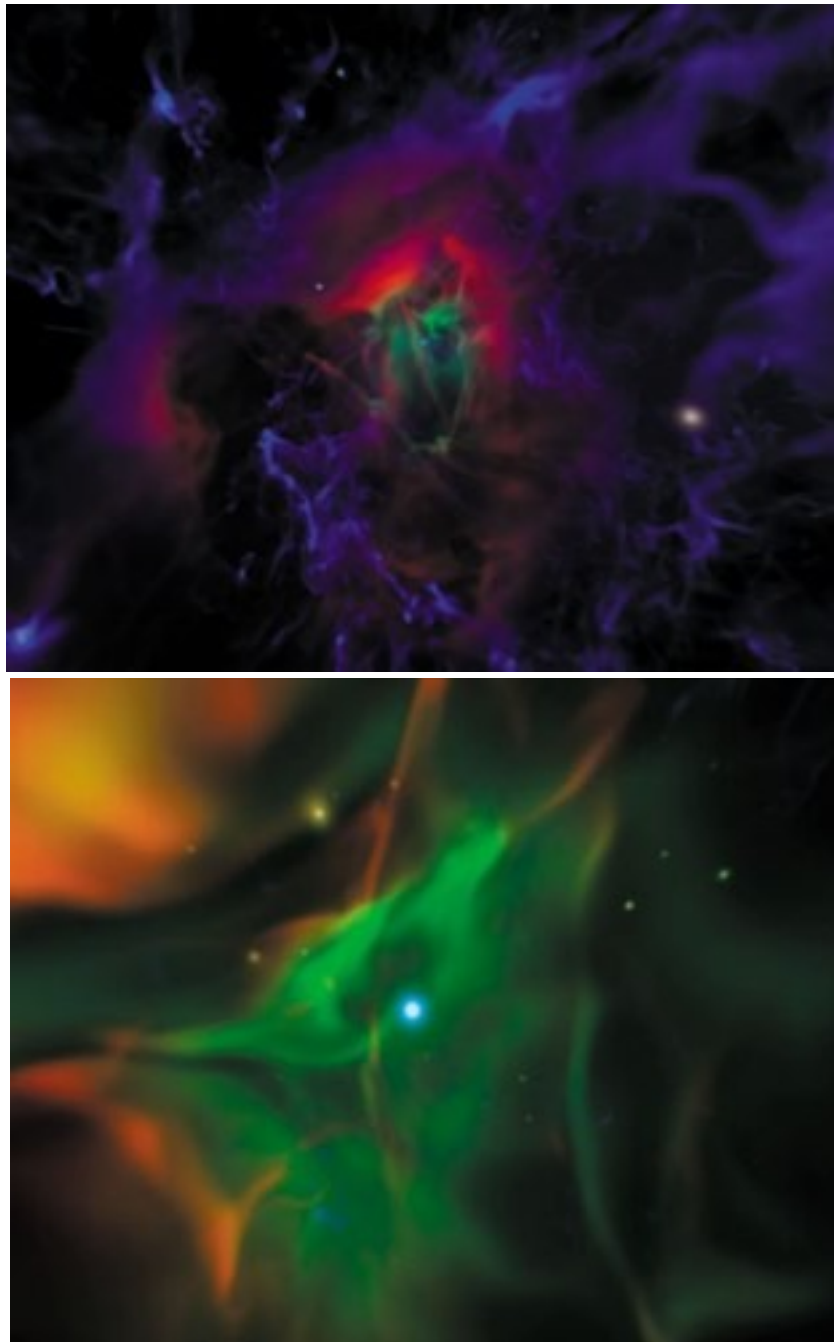
První hvězdy

Asi největším překvapením při rozboru výsledků měření sondy WMAP bylo určení doby vzniku prvních hvězd na 400 000 000 let po Velkém třesku. Podle všech dosavadních teorií měly vznikat první hvězdy mnohem později, kolem jedné miliardy let po Velkém třesku. Jak se vůbec zjišťuje z reliktního záření doba vzniku prvních hvězd? První hvězdy svým pronikavým zářením ionizují látku ve vesmíru a jejich vznik tak ukončí období temného věku vesmíru. Ionizovaná látka způsobuje polarizaci reliktního záření, ze které lze zpětně určit časový okamžik vzniku hvězd.

Existují i další nezávislé indicie pro to, že první hvězdy vznikaly mnohem dříve, než jsme si dosud mysleli. Jednou z nich je kvazar J 1148+5251 objevený na počátku roku 2003 v rámci velkého astronomického přehlídkového projektu „*Sloan Digital Sky Survey*“. Radoteleskopovou interferenční spektroskopií byl v tomto kvazaru detekován oxid uhelnatý CO. Jako interferometr byla zapojena síť *Very Large Array* v Novém Mexiku a radioteleskop Plateau de Bure (IRAM) ve Francouzských Alpách. Vzhledem k tomu, že červený kosmologický posuv tohoto kvazaru je 6,3, znamená to, že ve velmi raných fázích vesmíru již musel existovat uhlík a kyslík. Tyto prvky vznikají ale jen při termojaderné syntéze uvnitř hvězd. Proto v době odpovídající červenému posuvu 6,3 již musel proběhnout celý životní cyklus hvězd nulté generace. Existence CO v tomto kvazaru tak posouvá dobu vzniku prvních hvězd do období dříve než 650 milionů let po Velkém třesku.

V roce 2003 byla objevena planeta obíhající kolem milisekundového radiového pulsaru PSR B1620–26. Pulsar se nachází v blízkosti centra kulové hvězdokupy M4 v souhvězdí Štíra, ve vzdálenosti 7 200 světelných let od Země. Samotný objev planety, obíhající okolo neutronové hvězdy, nebyl pro astronomy ničím novým. Roku 1994 byly u pulsaru PSR B1257+12 objeveny tři planety s hmotností srovnatelnou se Zemí, obíhající po kruhových drahách do vzdálenosti 1 AU od neutronové hvězdy. Dosud není zcela jasné, zda mohly planety přežít takovou událost, jako je výbuch supernovy, jež vzniku neutronové hvězdy předchází, nebo zda se zformovaly dodatečně z vyvrženého materiálu. Navíc jsou kulové hvězdokupy vzhledem k častým gravitačním kolizím hvězd a vzhledem k malému zastoupení těžších prvků zcela nevhodnými místy pro tvorbu planet. Podle navržených scénářů se planeta se zformovala na okraji kulové hvězdokupy M4 před více než 12,5 miliardami let! To ale opět znamená, že v této době zde již musel existovat materiál pro

tvorbu planet, který již jednou prošel hvězdným vývojem a první hvězdy musely proto vzniknout velmi brzo po Velkém třesku.



Počítačová simulace vzniku hvězdy. Nalevo: zárodečná mlhovina. Napravo: narozená hvězda.
David Nadeau, expert přes počítačové simulace v centru San Diego Supercomputer Center.

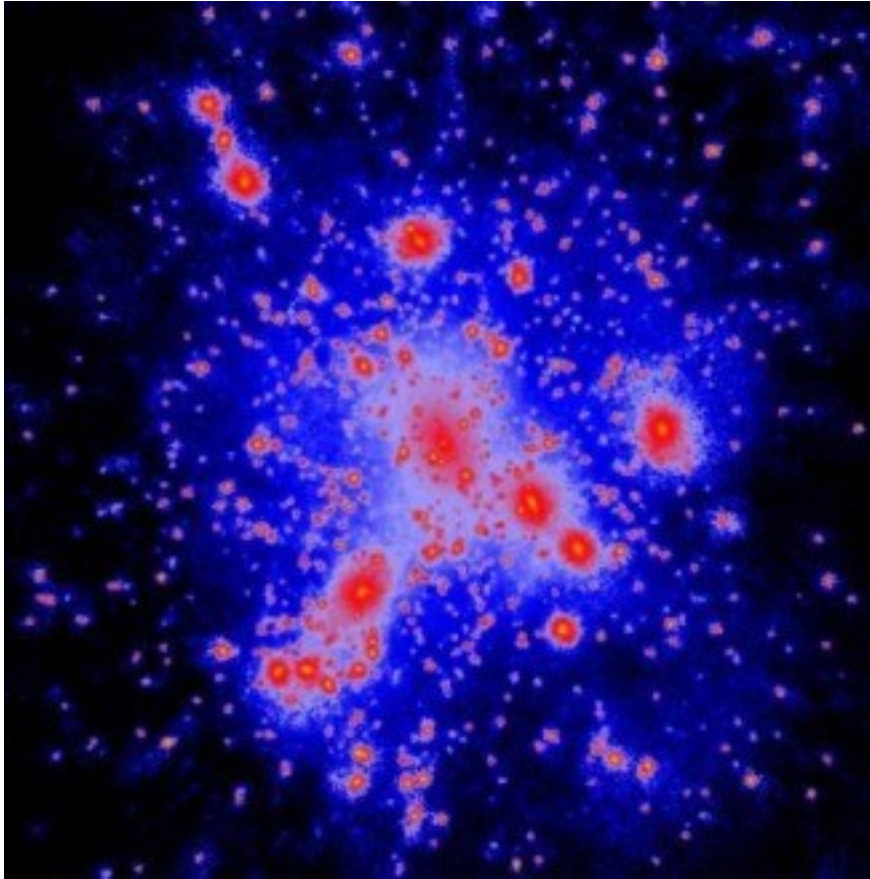
Jak vypadaly první hvězdy nulté generace? Zřejmě vznikaly překotně v obrovském množství a jejich hmotnost musela být mnohonásobně vyšší než hmotnost dnešních hvězd. Jedině hmotné hvězdy se totiž vyvíjejí dostatečně rychle a zaplní v krátké době vesmír těžkými prvky. Životní kariéru tyto hvězdy končí většinou jako supernovy či hypernovy – mohutnou explozí, která těžké prvky vzniklé v jejich nitru rozmetá do okolí. Právě tento materiál se stane zárodečným materiálem další generace hvězd.

Temná hmota

Již v roce 1933 upozornil F. Zwicky, že ve vnějších oblastech galaxií jsou rotační rychlosti vyšší než teoretické, což odpovídá většímu množství hmoty v galaxiích než se pozoruje. Kdyby byla v galaxiích jen pozorovaná hmota, hvězdy v periferních částech by díky odstředivé síle odlétly do mezigalaktického prostoru. Proto by galaxie měly obsahovat skrytou hmotu, kterou nevidíme. Nejpřesnější měření $v(r)$ byla od té doby provedena pro velké spirální galaxie na vlnové délce 21 cm odpovídající přechodu mezi ortovodíkem a paravodíkem. Tato čára je dobře pozorovatelná právě v periferních částech galaxií. Měření potvrdila přítomnost neznámé temné hmoty v galaxiích.

Svítící (registrované) hmoty v galaxiích je jen asi 1 %. Malá část hmoty atomární (baryonové) povahy může být soustředěna ve velmi starých a málo svítících bílých trpaslících, kteří doposud nebyly pozorovány. Jde pravděpodobně o staré vyhasínající hvězdy, které vyplňují celé haló Galaxie. Obdobně tomu bude asi i u ostatních galaxií. K řešení problému temné hmoty však jen bílí trpaslíci nestačí. Podle současných znalostí tvoří temná hmota nebaryonové povahy zhruba 50 % hmoty galaxií a 27 % hmotnosti celého vesmíru. Temná hmota ve vesmíru je z drtivé většiny tvořena *chladnou temnou hmotou* (CDM, Cold Dark Matter). Kdyby byla temná hmota *horká* (HDM, Hot Dark Matter), velká kinetická energie jejích částic by vedla k difúzi těchto částic a k vyhlazení zárodečných fluktuací hustoty ve vesmíru. Přetrvání těchto fluktuací je ale zárukou pozdějšího vzniku pozorovaných struktur ve vesmíru – galaxií a kup galaxií. Pokud existuje horká temná hmota, může jí být jen malá část.

Nejčastěji se uvažuje o tom, že temnou hmotu tvoří exotické částice nebaryonové povahy, například *wimpy* (Weakly Interacting Massive Particles, slabě interagující hmotné částice). Vhodnými kandidáty na tyto částice (*wimpy*) jsou nejlehčí superpartneři, tzv. *neutralina*, jejichž existenci předpokládají SUSY teorie. Mělo by jít o směs kvantových stavů higsina, zina a fotina (superpartneři Higgsovy částice, Z^0 a fotonu). Tento nejlehčí superpartner se nemůže samovolně rozpadat a měl by ve vesmíru přetrvat až dodnes. Je nejvýznamnějším kandidátem na částice temné hmoty. Dalšími nadějnými kandidáty na chladnou temnou hmotu jsou *axiony*, málo hmotné (10^{-5} eV) bosony postulované kvantovou chromodynamikou, které mohly vznikat v raných stádiích vývoje vesmíru. Existuje řada dalších kandidátů na částice temné hmoty a je největší výzvou současné fyziky rozluštit tajemství povahy temné hmoty. Možná, že prvním krokem může být podivný oblak HVC 127–41–330, o kterém se v roce 2003 ukázalo, že by mohl být celou galaxií z temné hmoty. Obdobným objektem je „galaxie“ VIRGOHI21 objevená v roce 2005, která září na čáře 21 cm (neutrální vodík). Ovšem poměr vodíku ku ostatní neviditelné látce je 1:1000.

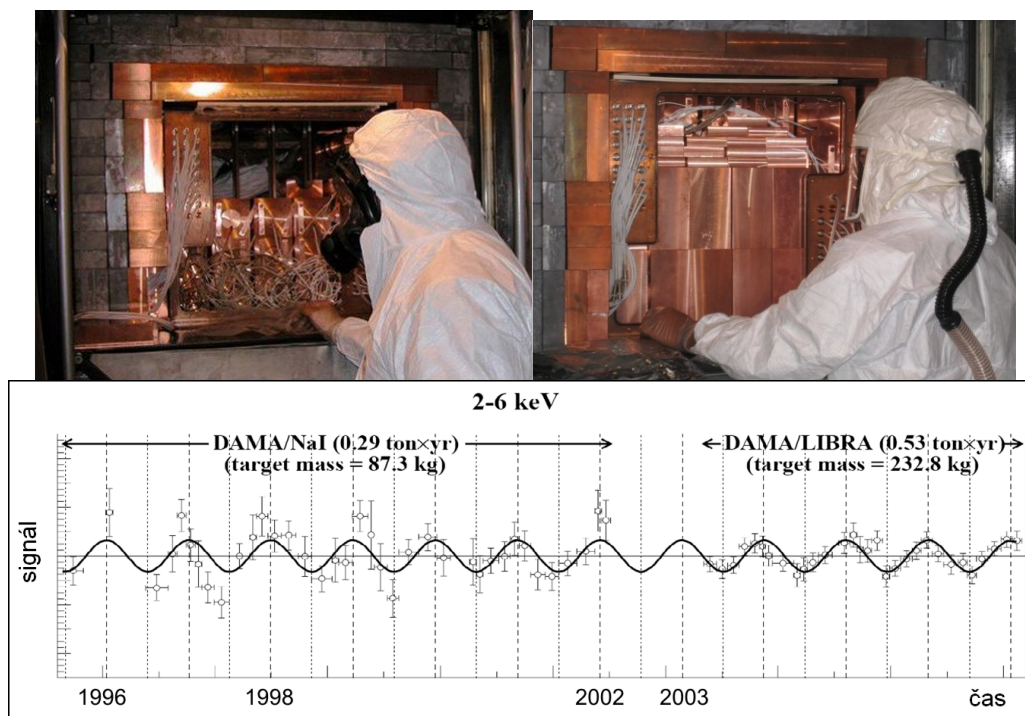


Rozložení temné hmoty (modře) v kupě galaxií.
Dopočet z gravitačního čočkování.

Temnou hmotu hledá několik desítek experimentů. Detektory nejnadějnějších kandidátů – wimpů – je možné rozdělit na pět skupin: scintilační, ionizační, polovodičové, tepelné a nepřímé. K neznámějším patří scintilační detektory – částice temné hmoty při přímé srážce s atomovým jádrem ve scintilátoru (například NaI) vytvoří elektromagnetický záblesk detekovaný fotonásobičem. Na obdobném principu pracují ionizační detektory, při srážce dojde k ionizaci. Jako médium může posloužit kapalným vzácným plynem, zpravidla xenon nebo argon. Jiným typem jsou polovodičové detektory, ve kterých namísto záblesku či ionizace dojde ke vzniku elektronu a díry, jež se následně detekují elektronicky. Existují i detektory, které fungují jako kalorimetry měřící energii předanou částicí temné hmoty atomovému jádru. Všechny tyto detektory jsou založeny na sledování výsledku srážky wimpu s jádrem, některé jsou i kombinacemi výše uvedených typů. Detektory jsou vždy umístěny hluboko pod zemí, aby byla potlačena detekce částic jiného původu. Wimpy mohou slabě interagovat s běžnou látkou, elastickými procesy ztrácejí postupně energii a nakonec mohou být gravitačně zachyceny Zemí, Sluncem nebo Galaxií. Zachycené wimpy by měly anihilovat za vzniku rentgenových fotonů (v galaktickém haló) nebo se při srážkách měnit na částice X a neutrina (v Zemi, ve Slunci nebo v kulových hvězdokupách). Nepřímá detekce je založena na hledání produktů těchto procesů: rentgenových fotonů a neutrin.

K neznámějším detektorům patří italský scintilační detektor DAMA (Dark Matter) umístěný pod horou Grand Sasso. Je provozován ve dvou konfiguracích. První je DAMA/NaI. V tomto detektoru je celkem 9 krystalů NaI o hmotnosti 9,7 kg. Okolí detektoru vypadá jako hranatá cibule. Prvním obalem je měď, pak následuje olovo, další vrstva je z polyetylénu a vosku, následuje atmosféra z velní čistého dusíku, která zamezuje kontaminaci radonem, poslední vrstvu tvoří metr tlustý betonový kontejner. To vše je umístěno hluboko pod zemí.

Experimentem druhé generace je konfigurace DAMA/LIBRA, kde je obdobných detektorů 25 (celková hmotnost krystalů je 250 kilogramů). DAMA/LIBRA sbírá data od roku 2003. Oba experimenty nacházejí signál s roční variací, která by mohla odpovídat tomu, že se Země při oběhu Slunce pohybuje jednou ve směru galaktického haló wimpů a o půl roku později proti. Výsledek ale nebyl potvrzen žádným jiným experimentem. Obdobný kladný signál našli i experimenty CRESST a CoGeNT (viz [AB 49/2011](#)).



Experiment DAMA/Libra. Nalevo je dřívější konfigurace, napravo současná konfigurace, dole měřený signál. Gran Sasso National Laboratory.

Temná energie

Vakuum v kvantové teorii je netriviální dynamický systém, ve kterém se neustále kreují a anihilují páry virtuálních částic a antičástic. Tyto páry způsobují známé jevy, jako je polarizace vakua, Lambův posuv spektrálních čar i další. Energie vakua je nenulová a mohla souviset například s inflačními fázemi vesmíru v jeho počátcích. Vakuová energie se s expanzí nezmenšuje, zůstává konstantní (je dána hustotou virtuálních párů v objemové jednotce). Právě nenulová hodnota vakuové energie je zodpovědná za nenulovost kosmologické konstanty v relativistické teorii gravitace. Ve vesmíru ale může existovat více složek, jejichž hustota klesá pomaleji než $1/a^3$, které souhrnně nazýváme temnou energií. Pokud hustota temné energie klesá jako $\rho \sim 1/a^\alpha$, má stavová rovnice tvar $p = (\alpha/3 - 1)\rho$ a tlak je záporný. Pro vakuovou energii je $\alpha = 0$ a pro tlak vychází $p = -\rho$. Klíčovým parametrem pro temnou energii je koeficient úměrnosti mezi tlakem a hustotou temné energie, označuje se w a je roven $\alpha/3 - 1$.

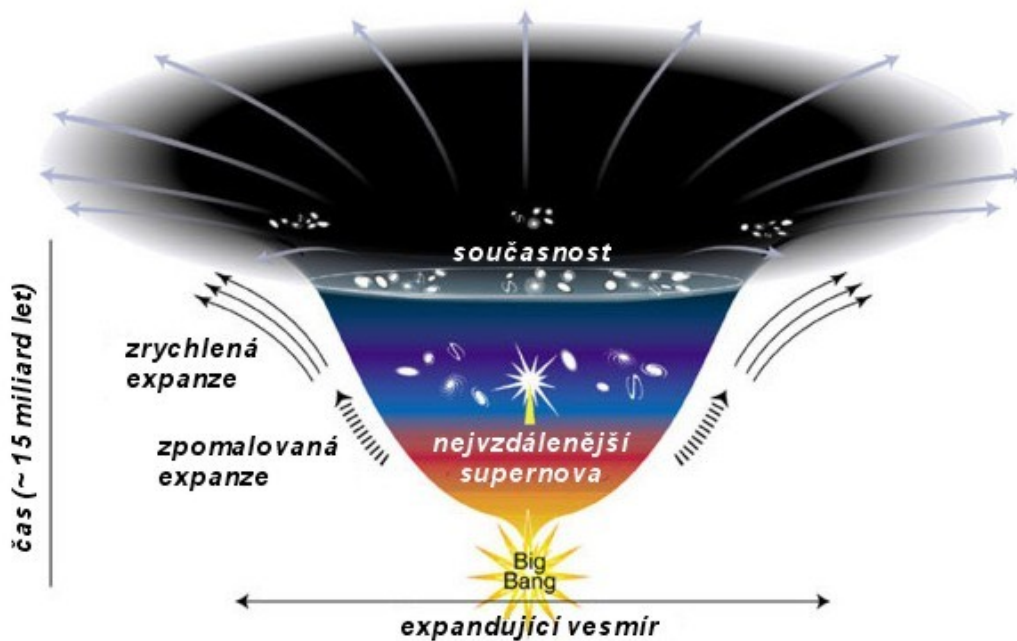
koeficient α ($\rho \sim 1/R^\alpha$)	koeficient w ($p = w\rho$)	expanzní funkce	Hubblova konstanta	entita
4	+ 1/3	$\sim t^{1/2}$	1/2t	záření ($m_0 = 0$)
3	0	$\sim t^{2/3}$	2/3t	látka ($m_0 \neq 0$)

2	-1/3	$\sim t$	1/t	křivost ($k < 0$)
0	-1	$\sim \exp[\chi t]$	χ	kosmologická konstanta, projevy vakua

Pro $\alpha < 2$ dochází ke zrychlené expanzi. Pro $\alpha < 0$ by došlo k velkému rozervání (big rip)

Aby docházelo k pozorované zrychlené expanzi vesmíru, musí podle rovnic obecné teorie relativity platit, že $\alpha < 2$ ($w < -1/3$). Pro vakuovou energii spojenou s kvantově mechanickými procesy ve vakuu je $w = -1$ a expanzní funkce roste exponenciálně. Pokud by dokonce bylo $\alpha < 0$ ($w < -1$) bude expanze natolik překotná, že zasáhne samotnou strukturu látky a rozerve v budoucnu samotná atomová jádra. Této situaci říkáme *big rip* – velké rozervání a příslušné pole nazýváme *pole fantómů*. Z měření [WMAP](#), [CBI](#), [2dF](#) a [SDSS](#) vychází, že parametr w se pro temnou energii nachází v intervalu hodnot $< -1; -0,78$). Z měření sondy Planck a projektu SCP se zdá, že je parameter w blízky hodnotě -1 .

Pokud temná energie není vakuové povahy, je její původ zcela nejasný. Většinou se hovoří o skalárním poli, které by mělo být zodpovědné za temnou energii. Toto pole se nazývá *kvintesence*. Pro kvintesenci může být parametr w proměnný v čase a tato forma energie nemusí být ani prostorově homogenní. Experimentální určení hodnoty w pro temnou energii je proto mimořádně důležité. Dnešní fyzika zná dobře projevy temné energie spojené se zrychlenou expanzí vesmíru. Nezná však zatím podstatu temné energie.



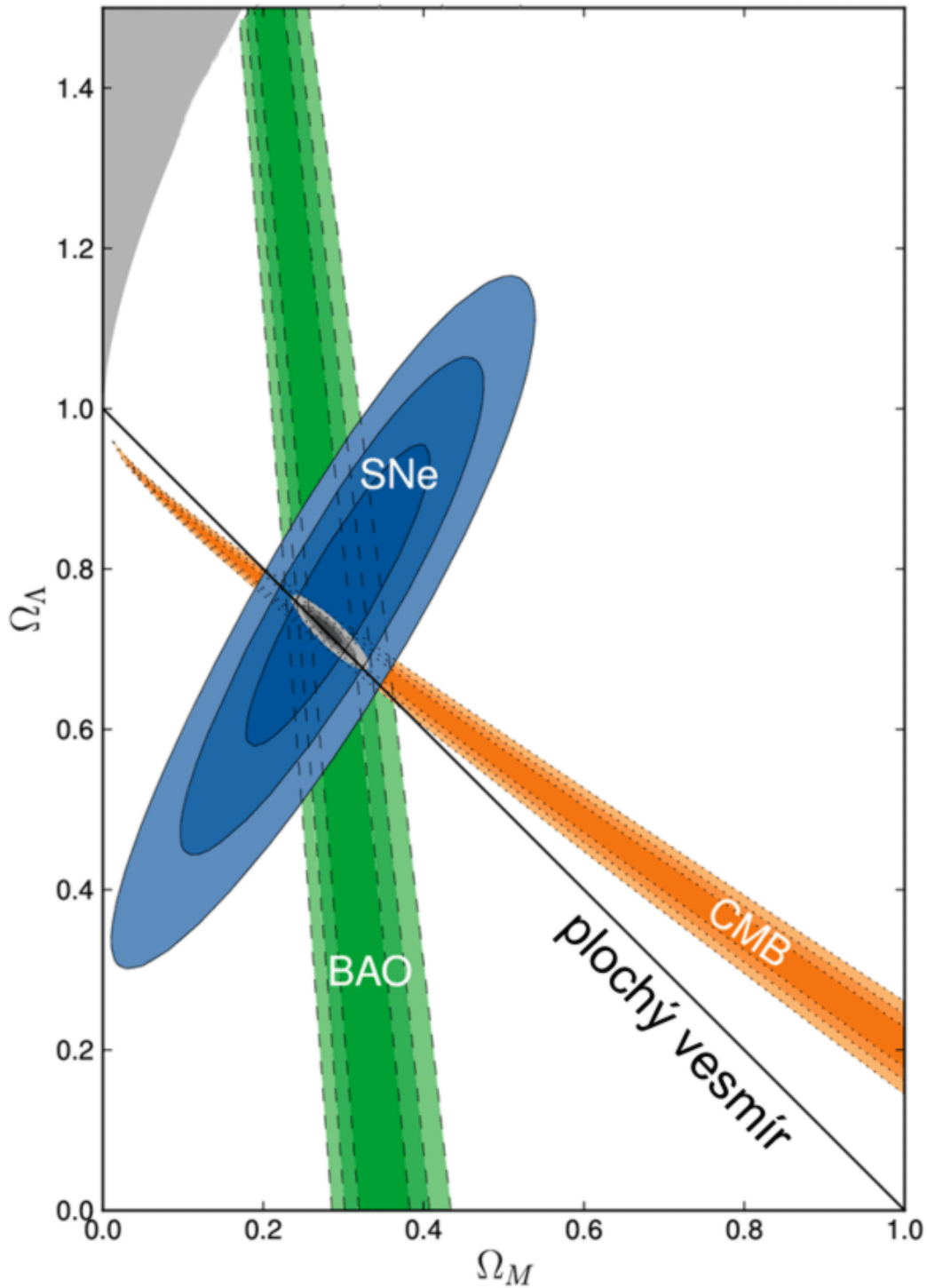
Temná energie je zodpovědná za zrychlující se expanzi. Podle materiálů NASA.

SCP projekt (2010)

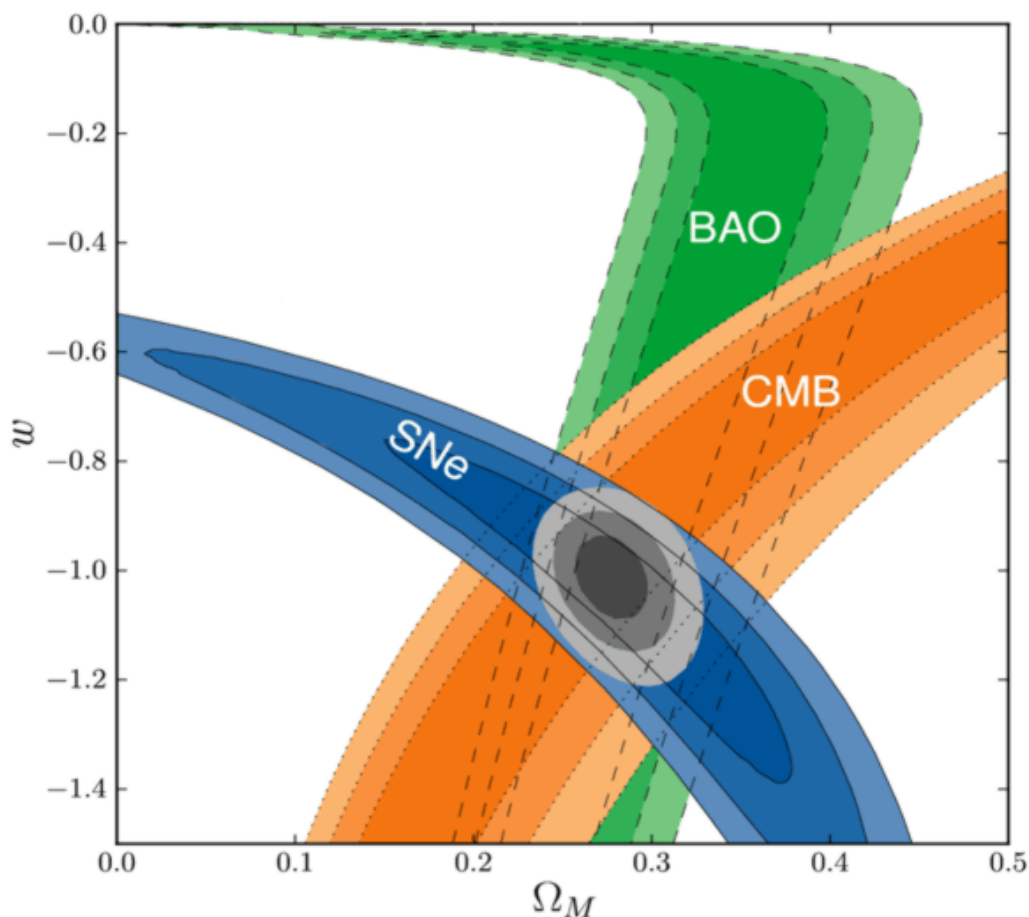
V roce 2010 byly zveřejněny výsledky projektu SCP (Supernova Cosmology Project). Autoři důkladně analyzovali dostupná data ze tří zdrojů (supernovy, reliktní záření a velkorozměrové přehlídky oblohy). Výsledek je mimořádně elegantní. Každá z těchto tří analýz vymezila

možné oblasti parametrů Ω_A , Ω_M , w . Všechny tři se setkají v jedné jediné oblasti. Pojd'me se stručně seznámit s těmito třemi analýzami:

1. **SNe – supernovy typu Ia.** Autoři projektu shromáždili veškerá dosud naměřená data, z 719 měření bylo 557 použitelných. Tato část projektu se označuje SNe (Supernovae).
2. **CMB – fluktuace reliktního záření.** Analýzou fluktuací reliktního záření (CMB, Cosmic Microwave Background) byly zjišťovány oblasti možných kosmologických parametrů našeho vesmíru.
3. **BAO – baryonové akustické oscilace.** Analýzou dat z celooblohových přehlídek je možné detekovat velkorozměrové struktury, do nichž se vyvinuly prvotní fluktuace pozorované v reliktním záření. Tyto fluktuace záření ovlivnily látku, ve které vznikly tzv. baryonové akustické oscilace a z nich později velkorozměrové struktury. Tato část projektu nese označení BAO (Baryonic Acoustic Oscillations).



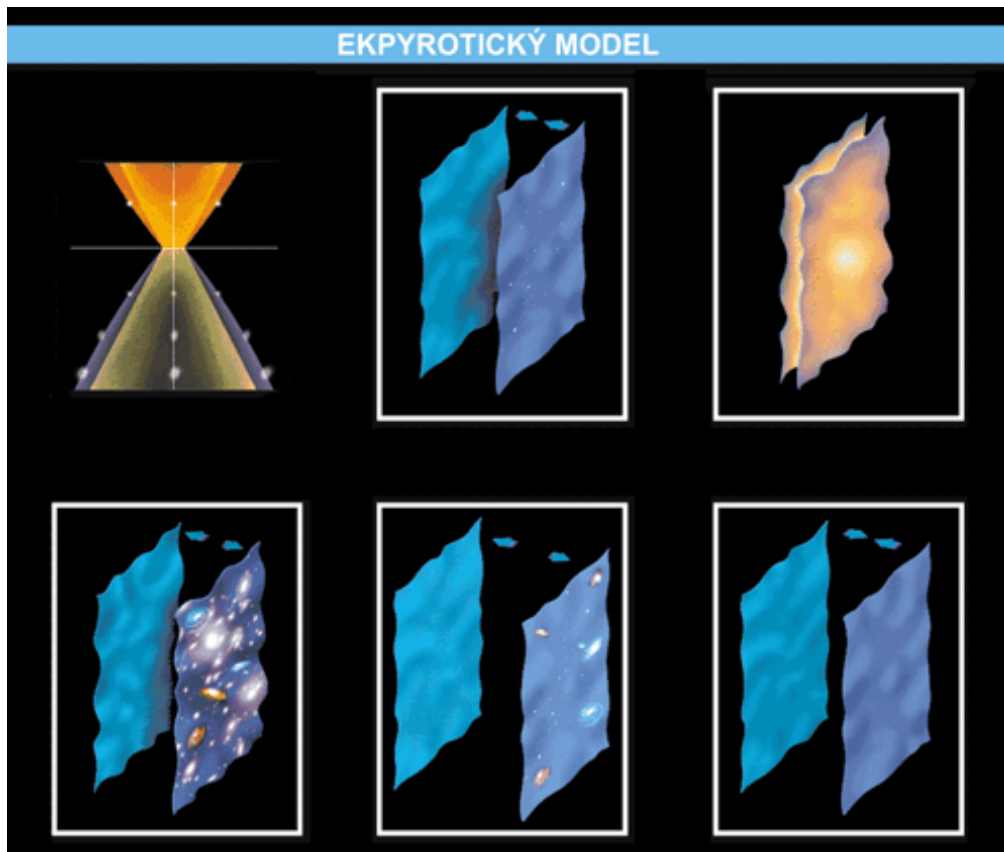
Na svislé ose je podíl kosmologického členu ke kritické hustotě (procentuální zastoupení temné energie) na vodorovné ose procentuální zastoupení látky (baryonové + temné). Všechny tři znázorněné oblasti se protínají přibližně na úsečce popisující plochý vesmír ($\Omega_\Lambda + \Omega_M = 1$) v hodnotách $\Omega_\Lambda = 68\%$, $\Omega_M = 32\%$. Z toho je 27 % temné hmoty a 5 % baryonové hmoty. Zdroj: Zdroj: Amanullah et al., Astrophysical Journal, 2010.



Stejný graf jako předchozí, ale na svislé ose je parametr w (koeficient úměrnosti mezi tlakem a hustotou temné energie. Je zjevné, že vychází $w \approx -1$, což by odpovídalo energii vakua. Zdroj: Amanullah et al., Astrophysical Journal, 2010.

Ekpyrotický model

Ekpyrotický model navrhli v roce 2001 Neil Turok, Paul Steinhardt, Burt Ovrut a Justin Khoury jako alternativu k inflačnímu modelu. Název znamená „z ohně pocházející“. Model vychází ze strunové teorie, v níž jsou částice lineárními útvary v mnohorozměrném světě. Základem modelu je tvrzení, že vesmír představuje méněrozměrný objekt ve vícerozměrném světě (tzv. bránu). Počátek vesmíru je ztotožněn se setkáním dvou bran v místě největší kvantové fluktuace. Základní přírodní konstanty (gravitační, Planckova, rychlost světla) mohou být v různých bránách různé. Po doteku dojde v „naší“ bráně k prudké expanzi a následné tvorbě galaxií. Pokračující expanze zředí látku v bráně a gravitační síla působící i v dimenzi kolmé na náš vesmír přitáhne opět druhou bránu a dojde k dalšímu dotyku. Výsledkem je jednoduchý model dvou oscilujících bran, který předpovídá, že při doteku bran vzniknou gravitační vlny, jejichž amplituda roste směrem ke krátkovlnné části spektra.



Kosmologické přehlídkové projekty

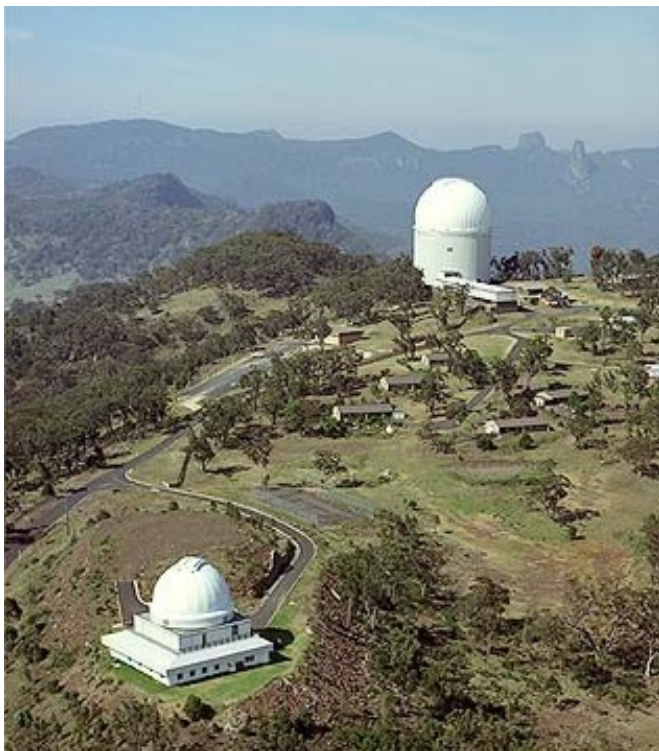
HST (Hubble Space Telescope): Hubbleův vesmírný dalekohled. Největší dalekohled na oběžné dráze kolem Země, kde byl umístěn ve výšce 614 km v roce 1990. Průměr primárního zrcadla je 2,4 m. Z hlediska kosmologie je zajímavý HST Key Project (klíčový projekt HST, 1999), ve kterém byla pečlivě proměřena vzdálenost a rychlost 31 galaxií. Měření vzdálenosti se provádělo pomocí cefeid – proměnných hvězd, u kterých je známa závislost mezi periodou a svítivostí. Z periody cefeidy se určí svítivost hvězdy a z relativní jasnosti hvězdy na obloze lze dopočítat její vzdálenost a tím i vzdálenost mateřské galaxie. Kalibrace měření vzdálenosti byla prováděna i pomocí dalších objektů v těchto galaxiích – supernov typu Ia a supernov typu II. Pomocí těchto měření vychází hodnota Hubbleovy konstanty $H = (72 \pm 3) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

2dF (2 degree Field): Unikátní spektrograf připojený k dalekohledu AAT (Anglo Australian Telescope), který má zrcadlo o průměru 3,9 metru a je umístěn od roku 1974 na observatoři AAO (Anglo Australian Observatory) v Siding Spring v Austrálii v nadmořské výšce 1 150 m. Spektrograf pořídí v poli o velikosti 2° naráz spektra 400 objektů. Aktivním projektem je *2dFGRS* (2dF Galaxy Redshift Survey), v rámci kterého již byla pořizena spektra více jak 260 000 galaxií. V roce 2002 byl ukončen projekt *2QZ* (2dF Quasar Redshift Survey), v rámci kterého byla pořizena spektra více jak 23 000 kvazarů.

6dF (6 degree Field): Přehlídka oblohy prováděná na UK Schmidtově dalekohledu o průměru zrcadla 1,2 m na observatoři AAO (Anglo Australian Observatory) v Siding Spring v Austrálii v nadmořské výšce 1 150 m. K přehlídce je využíván speciální

spektroskop, který pořídí naráz spektra objektů v poli o velikosti 6° v oborech V (550 nm) a R (640 nm). Práce byly započaty v roce 2001, první data byla uvolněna v roce 2004, předpokládané ukončení projektu je v roce 2005. Projekt pořizující spektra galaxií se nazývá *6dFGS* (6dF Galaxy Survey).

APM Galaxy Survey: Přehledka oblohy více jak 2 milionů galaxií a 10 milionů hvězd pokrývající cca 1/10 celé oblohy kolem jižního galaktického pólu. Přehledka je vytvořena skenováním 185 fotografických polí získaných UK Schmidtovým dalekohledem o průměru zrcadla 1,2 m na observatoři AAO v Siding Spring v Austrálii. Snímání probíhalo mezi deklinací -72 a -18° . Limitní magnituda pro detekci obrazu je $m < 21,5$, pro klasifikaci hvězd v galaxii $m < 20,5$. Výsledky byly publikovány v roce 1990.



AAO (Anglo Australian Observatory). Nachází se v Siding Spring v Austrálii v nadmořské výšce 1 150 m. V popředí je UKST (UK Schmidt Telescope), Schmidtův dalekohled s průměrem zrcadla 1,2 m z roku 1974. V pozadí je dalekohled AAT (Anglo Australian Telescope), který má zrcadlo o průměru 3,9 metru, také z roku 1974. Oba dalekohledy spolupracují od roku 1988, kdy se Schmidtův dalekohled stal součástí AAO. Dalekohledy se v současnosti podílejí na významných přehledkových projektech 2dF, 6dF a APM.

2MASS: Two Micron All Sky Survey, přehledka oblohy na vlnové délce 2 μm . Přehledka byla prováděna automaticky dvěma 1,3 m dalekohledy umístěnými na Mt. Hopkins (Arizona) a na Cerro Tololo (Chile). Přehledka byla prováděna v pásmech J (1,25 μm), H (1,65 μm) a K (2,17 μm) v letech 1997 až 2001.

SDSS: Sloan Digital Sky Survey, projekt přehledky oblohy podporovaný nadací Alfreda Pritcharda Sloana založenou v roce 1934. Alfred P. Sloan (1875-1976) byl americký obchodník a výkonný ředitel společnosti General Motors po více jak dvacet let. Nadace jím založená podporuje mimo jiné vědu a školství. V rámci SDSS se pořizují spektra galaxií a kvazarů.

GOODS: Great Observatories Origins Deep Survey, program zaměřený na sledování vývoje velmi starých objektů, vedlejším produktem je řada pozorování supernov SN Ia. Do projektu jsou zapojeny 4 vynikající vesmírné dalekohledy: [HST](#) (vizuální obor), SST (IR obor), [Chandra](#) (RTG obor) a [XMM](#) Newton (RTG obor).

IRAS PSC Redshift Survey (PSCz): přehlídka červených posuvů 15 000 galaxií zachycených v katalogu bodových zdrojů IRAS Point Source Catalogue. Přehlídka zahrnuje více jak 83 % oblohy, jde o nejrozsáhlejší celooblohovou přehlídku, která v současnosti existuje. Pozorování probíhala na několika přístrojích v letech 1992 – 1995.

Aktuální parametry (Planck)

Parametr	Označení	Hodnota	Poznámka
Hubbleova konstanta	H	$67 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$	
Stáří vesmíru	t	$13,8 \times 10^9 \text{ let}$	
Doba oddělení záření od hmoty (čas rekombinace)	t_{rec}	$\sim 380\,000 \text{ let}$	
Vznik prvních hvězd (čas reionizace)	t_{ion}	$\sim 400\,000\,000 \text{ let}$	
Podíl baryonové hmoty	Ω_{B}	4,9 %	
Podíl temné hmoty	Ω_{DM}	26,8 %	
Podíl temné energie	Ω_{Λ}	68,3 %	
Podíl záření	Ω_{R}	0,046 %	
Podíl hmotných neutrin	Ω_{N}	$\sim 0,1 \%$	dolní hranice
Celková hmota-energie	Ω_{TOT}	~ 1	snad plochý (1)
Parametr w pro temnou energii	w	~ -1	$p = w \rho$

Přečtěte si

[Petr Kulhánek: *Most temné hmoty mezi dvěma galaktickými kupami*; AB 29/2012](#)

[Petr Kulhánek: *Planck – první výsledky I, II, III*; AB 6,7,8/2011](#)

[Petr Kulhánek: *Temná hmota v roce 2011*; AB 49/2011](#)

[Ivan Havlíček: *Temný proud*; AB 30/2010](#)

[Ivan Havlíček: *První časoprostorová mapa temné hmoty – projekt COSMOS*; AB 10/2007](#)

[Milan Červenka: *Zvuk raného vesmíru*, AB 3/2003](#)

[Milan Červenka: *Temná hmota ve vesmíru*, AB 29/2003](#)

[Milan Červenka: *Supernovy a temná energie*, AB 33/2004](#)

[Petr Kulhánek: *WMAP – co víme o vesmíru v roce 2003?*, AB 10/2003](#)

[Petr Kulhánek: *Klíčové parametry našeho vesmíru*, AB 40/2004](#)

MINULOST A BUDOUCNOST



Na této stránce naleznete:

➤ [Šipky času ...](#)

➤ [Minulost a budoucnost ...](#)



Šipky času ...

Šipkou času nazýváme směr toku času. Podle dnešních poznatků lze rozlišit minimálně tři způsoby určení směru toku času:

Termodynamická šipka času. Čas míří ve směru narůstající neuspořádanosti uzavřených systémů. Plyne z druhé věty termodynamické jako experimentální fakt. Neplyne z elementárních přírodních zákonů, které jsou, s výjimkou slabé interakce, symetrické v čase.

Psychologická šipka času. Pamatujeme si minulost, nikoli budoucnost. Čas míří do budoucnosti, směrem k jevům, jejichž výsledek nepředpovíme pomocí paměti.

Kosmologická šipka času. Čas míří ve směru expanze vesmíru.

Často se diskutuje problém uzavřeného vesmíru, který v závěrečných fázích zmenšuje své rozměry. Nemíří kosmologická šipka času v této fázi proti ostatním? Z inflačního modelu plyne nastavení vesmíru na téměř kritický. To znamená, že fáze kolapsu nastane (pokud vůbec nastane) po dosti dlouhé době, tak dlouhé, že neuspořádanost vesmíru bude v této fázi téměř maximální. Vesmír bude chaotický, složen z elektron pozitronových párů a záření. Nebudou zde již existovat žádné uspořádané struktury a tedy ani život. Existence života je neslučitelná s fází kolapsu vesmíru. Psychologická šipka nemá žádný význam. Stejně tak termodynamická šipka, protože v této fázi se neuspořádanost již nezvyšuje. Vesmír dosáhl "téměř" maximální možné entropie (neuspořádanosti).

Minulost a budoucnost ...

PBB *Pre Big Bang Phase.* Kvantově gravitační fáze existence vesmíru. Vesmír je popsán Wheeler-de Wittovou rovnicí, jejímž řešením je bezčasový kvantový stav $\psi(R, \varphi, f)$ bez klasických vlastností. Stav závisí na expanzní funkci R , inflatonovém či dilatonovém poli φ (způsobuje inflaci) a dalších polích a parametrech f . Klasické vlastnosti vesmír teprve získá v průběhu kvantového procesu, který nazýváme *dekoherence*. Budoucí hmota vesmíru vznikne na úkor záporné gravitační energie. Vesmír prochází superkontrakcí či superinflací.

10^{-43} s $T = 10^{32}$ K, $E = 10^{19}$ GeV, $\rho = 10^{94}$ g/cm³. Planckův čas – hodnota, kterou získáme kombinací základních konstant c , G , h . Oddělení gravitační interakce od ostatních. Narušení SUSY symetrie. Převládá éra záření. Kvarky, leptony, IM částice a těžké částice vznikající při energetických

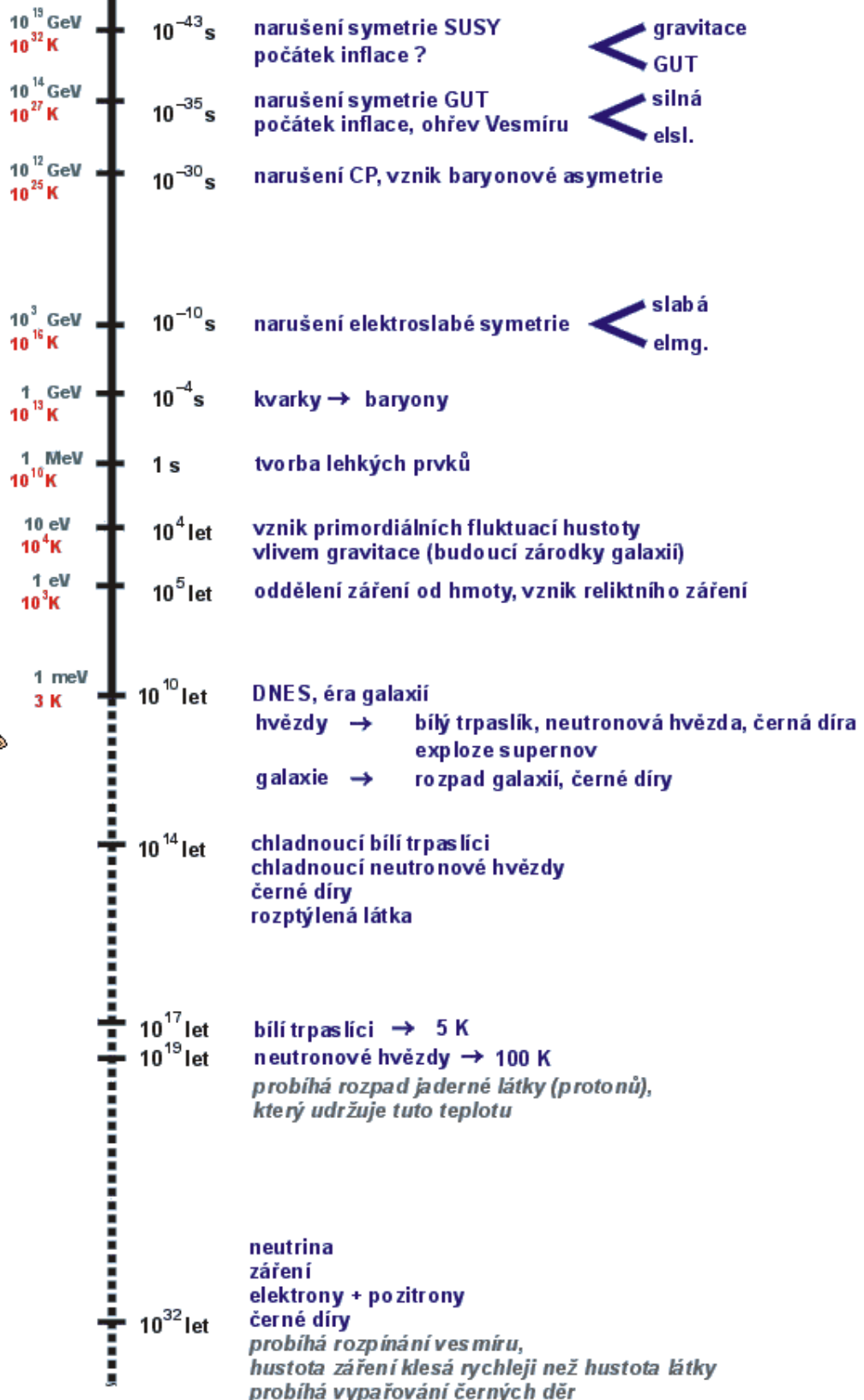
	srážkách. Možná jsou zde přítomni superpartneři: fotina, selektrony, atd. Částice jsou struny v 10 dimenzionálním prostoru. $R(t) \sim t^{1/2}$, probíhá-li inflace $R(t) \sim \exp[\chi t]$.
10^{-39} s	$T = 10^{29}$ K, $E = 10^{16}$ GeV, $\rho = 10^{84}$ g/cm ³ . Vznik bosonů X a Y z fluktuací vakua. Jde o částice, které by v dnešní době měly být zodpovědné za rozpad protonu s poločasem přes 10^{33} let.
10^{-35} s	$T = 10^{27}$ K, $E = 10^{14}$ GeV. Oddělení silné interakce od ostatních. Narušení GUT symetrie. Převládá éra záření. S narušením symetrie může být spojen fázový přechod, následná inflace a ohřev vesmíru uvolněnou energií. Částice X a Y se rozpadají na kvark-antikvarkové páry nebo na dvojice antikvark a lepton. Antičástice X a Y se rozpadají na dvojice kvark a antilepton. Současně při interakcích kvarků, antikvarků, leptonů a antileptonů vznikají opětovně částice X a Y.
10^{-30} s	$T = 10^{25}$ K, $E = 10^{12}$ GeV. Prahová energie pro samovolný vznik částic X a Y, tyto částice přestávají samovolně vznikat. Narušení CP invariance. Bosony X a Y se postupně rozpadají na dvojice antikvark a lepton, antibosony X a Y na dvojice kvark a antilepton. Procesy přechodu mezi leptony a kvarky probíhají mírně asymetricky a postupně ustávají. V reakcích kvark \leftrightarrow antilepton a antikvark \leftrightarrow lepton převládne nepatrně směr kvark \leftarrow antilepton a antikvark \rightarrow lepton. Tím dojde v budoucnu k nadvládě hmoty nad antihmotou. V tuto chvíli se však na miliardu reakcí v obou směrech vyskytne jen jedna navíc ve prospěch hmoty. (Poměr 1 000 000 000 : 1 000 000 001.)
10^{-10} s	$T = 10^{15}$ K, $E = 10^2$ GeV. Narušení elektroslabé symetrie. Oddělení slabé interakce. Za narušení symetrie jsou odpovědné dosud nenalezené částice – Higgsovy bosony. Od tohoto okamžiku mají všechny 4 interakce vlastnosti jaké známe z našich experimentů. S narušením symetrie mohl být opět spojen fázový přechod do nižšího vakuového energetického stavu a následná inflační fáze spojená s ohřevem vesmíru. V těchto inflačních fázích došlo k nastavení vesmíru téměř na kritickou hustotu. Vesmír stále složen z kvarků, leptonů, IM částic a částic vznikajících při srážkách, které odpovídají energii 10^2 GeV.
10^{-5} s	$T = 10^{13}$ K, $E = 1$ GeV. Průměrná vzdálenost mezi kvarky je již větší než 10^{-15} m. Končí éra volných kvarků (kvark-gluonového plazmatu). Asymptotická svoboda omezuje volný pohyb kvarků právě do vzdálenosti 10^{-15} m. Od této chvíle se kvarky sdružují po dvojicích (kvark-antikvark) do mezonů nebo po trojicích do baryonů. Počet vzniklých částic a antičástic je v poměru 1 000 000 001 : 1 000 000 000 daném narušením CP invariance v minulosti.
	Střední tepelná energie vesmíru je rovna prahové teplotě nukleonů ($kT \sim mc^2$) a rovnováha mezi baryony a antibaryony je narušena. Při procesu anihilace zůstane jediný baryon z miliardy baryonů a antibaryonů. Zpočátku je poměr vzniklých protonů a neutronů stejný, později se díky nepatrně různé hmotnosti bude měnit. V tuto dobu je počet elektronů, fotonů a neutrin vyrovnaný.
1 s	$T = 3 \times 10^{10}$ K, $E = 1$ MeV. Oddělení neutrin od ostatní látky. Střední volná dráha neutrin narostla tak, že přestávají interagovat s látkou. Do této doby byly díky srážkám v termodynamické rovnováze s ostatním zářením a hmotou. Od této chvíle neutrina žijí vlastním životem a postupně chladnou.

	Dnes by reliktní neutrina měla mít teplotu kolem 2 K, hustotu 300 neutrin na cm^3 a nést v sobě obraz vesmíru z doby jejich oddělení. Oddělení neutrin znamená prudké zeslabení slabé interakce. Do této chvíle probíhala intenzivní slabá interakce mezi neutrinami, elektrony, neutrony a protony. Neutrony a protony se vzájemně přeměňovaly a bylo jich stejné množství. Nyní převládá rozpad neutronů nad jejich tvorbou a jejich počet začíná oproti protonům klesat. Vesmír je stále v éře záření, kromě neutrin jsou všechny ostatní částice v termodynamické rovnováze.
10 s	$T = 5 \times 10^9 \text{ K}$, $E = 500\,000 \text{ eV}$. Prahová teplota elektronů a pozitronů (střední tepelná energie vesmíru kT je rovna klidové energii elektronů a pozitronů $m_e c^2$). Nad touto teplotou jsou elektrony a pozitrony v rovnováze se zářením a probíhá stejný počet anihilačních procesů i kreačních procesů: elektron + pozitron \leftrightarrow záření . V tomto okamžiku poprvé převládá anihilace, mizí elektron pozitronové plazma. Z anihilujících párů vzniká záření, které zahřeje celý vesmír (kromě již oddělených neutrin). Teplota vesmíru bude nakonec o 40 % vyšší než teplota reliktních neutrin. Díky narušení CP invariance zůstane z miliardy elektronů a pozitronů po anihilaci jeden volný elektron. Ten mnohem později poslouží ke stavbě atomárních obalů ... Nadále klesá počet neutronů vzhledem k protonům, způsobený jejich rozpadem (poločas 10 minut).
4 min	$T = 9 \times 10^8 \text{ K}$, $E = 90\,000 \text{ eV}$. Prahová teplota vazebné energie deuteria (střední tepelná energie vesmíru kT je rovna vazebné energii deuteria). Nad touto teplotou záření zabránilo spojování neutronů a protonů k sobě. Od tohoto okamžiku může část neutronů a protonů vytvářet dvojice – atomová jádra (samozřejmě bez obalů). Je odstartován proces tvorby lehkých prvků. Stav nukleonů: 13 % neutronů a 87 % protonů. Nadále se poměr již nebude měnit, neutrony přestávají existovat jako volné neutrony a proto se nadále nerozpadají. Tomu bude odpovídat vznik 26 % hélia a 74 % vodíku. Vodík se v dnešním vesmíru skládá z 94 % izotopu H a 6 % izotopu D. V malém množství mohly prvky vznikat již před touto teplotou. Těžší prvky nebudou mít šanci vzniknout, vesmír se zakrátko zvětší natolik, že srážky mezi částicemi již nebudou dostatečně efektivní.
10 000 let	$T = 10\,000 \text{ K}$, $E = 1 \text{ eV}$. Snad vznik primordiálních fluktuací hustoty vlivem gravitace, budoucích zárodků galaxií.
380 000 let	$T = 4\,000 \text{ K}$, $E = 0,4 \text{ eV}$. V této době došlo ke dvěma klíčovými událostem: <ol style="list-style-type: none"> 1. Prahová teplota vazebné energie elektronů v atomárních obalech (střední tepelná energie vesmíru kT je rovna vazebné energii v atomárních obalech). Elektrony začínají vytvářet atomární obaly, přestávají existovat volné elektrony, na kterých docházelo k rozptylu fotonů. V důsledku toho záření přestává interagovat s hmotou a odděluje se od látky. Toto elektromagnetické záření nazýváme reliktní záření a dnes má teplotu 2,73 K. Teplota tohoto záření je cca o 40 % vyšší než teplota reliktních neutrin (bylo zahřáno při procesech anihilace). Vesmír se tím, že látka přestala interagovat sse zářením na dlouhou dobu ponořil do temnoty. Nastává tzv. <i>temný věk</i> vesmíru (v angličtině "dark age"). 2. Hustota energie záření je právě rovna hustotě energie hmoty ($\rho_{\text{záření}} \sim 1/R^4$, $\rho_{\text{hmoty}} \sim 1/R^3$). Do této chvíle převládala energie záření, od této chvíle převládá energie látky. Říkáme, že ve vesmíru začíná éra látky. Mění se

	charakter rozpínání vesmíru, od této chvíle je $R(t) \sim t^{2/3}$. (Dosud, s výjimkou inflační fáze, v éře záření platilo $R(t) \sim t^{1/2}$.)
200×10^6 let	$T = 200$ K, $E = 20$ meV. Období překotné tvorby velmi hmotných hvězd. Ve velkém množství vznikají obří hvězdy nulté generace s velmi rychlým vývojem. Již nikdy v budoucnu nebude produkce hvězd natolik intenzivní a jejich životní cyklus tak krátký. Látka je znovuionizována pronikavým zářením vzniklých hvězd, končí <i>temný věk</i> vesmíru.
10^{10} let	$T = 3$ K, $E = 1$ meV. Dnes. Existují galaxie a hvězdy, které umírají na bílé trpaslíky, neutronové hvězdy a černé díry. Také v mnoha galaktických jádrech se nacházejí černé díry. Kolem některých hvězd obíhají planety a alespoň na jedné z nich se nachází inteligentní tvorové, kteří se snaží zjistit, jak vzniknul vesmír ...

PBB - Pre Big Bang

VELKÝ TŘESK singularita?



Z našeho hlediska je nejvýznamnější období kolem jedné vteřiny, kdy se začaly tvořit první lehké prvky. Teplota odpovídala 10^{10} K (přibližně teplota v centru vybuchlé vodíkové bomby). K překotnému slučování nukleonů do jader však dochází až v období minut (teplota 10^9 K – jako v centru nejžhavějších hvězd) a je ukončeno v čase několika hodin. Poté už se v našem vesmíru z hlediska chemického složení již příliš mnoho neděje ...

Scénářů budoucnosti našeho vesmíru bylo napsáno mnoho. Zde použitá vize tepelné smrti vesmíru pochází od I. Novikova a mohla by být pravdivá, jestliže skutečně dochází k rozpadu protonu.

OTR

Trocha historie

Gravitační interakce se od všech ostatních výrazně odlišuje. Jako jediná působí na všechny částice. Toto působení má zvláštní charakter: Testovací (malá) tělesa se v gravitačním poli pohybují po stejných trajektoriích. Už Galileo Galilei věděl, že doba volného pádu malé kuličky i velkého kamene v tíhovém poli Země je shodná. (Nesmí jít například o pírkó, kde je podstatnou silou odpor vzduchu.) To je důsledkem tzv. *principu ekvivalence* mezi setrvačnou a gravitační hmotou. Hmota se projevuje setrvačnými a gravitačními účinky a ty jsou si úměrné. Nelze proto od sebe odlišit setrvačné a gravitační jevy. Je jedno, zda se nacházíme v urychlovaném výtahu, tj. neinerciální soustavě, nebo v tíhovém poli se stejným gravitačním zrychlením. V obou soustavách dopadnou experimenty stejně. To vedlo Alberta Einsteina k zobecnění speciální relativity platící v inerciálních soustavách na veškeré souřadnicové systémy a k vzniku obecné relativity, jejíž kostru dokončil v roce 1915.

Právě universálnost gravitační interakce a jednotná odezva všech testovacích částic na zdroj gravitačního pole vedla k přehodnocení klasického pojmu síly. Zakřivení trajektorií již není způsobeno těžko definovatelnou silou, ale vlastnostmi prostoru a času. V obecné relativitě sama tělesa zakřivují čas a prostor a v tomto zakřiveném časoprostoru se pohybují po nejrovnějších možných drahách - *geodetikách*. Například volný pád všech těles probíhá stejně proto, že se pohybují v časoprostoru zakřiveném Zemí a toto zakřivení je pro všechna tělesa stejné.

Prostor a čas v obecné relativitě bez samotných těles neexistuje. Tělesa sama časoprostor vytvářejí. Zakřivení časoprostoru je matematicky popisováno *metrickým tenzorem* - jde vlastně o koeficienty $g_{\mu\nu}$ v Pythagorově větě, které určují vlastnosti času a prostoru.

Základní metriky - Pythagorova věta

$$dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

Kvadrát vzdálenosti v kartézském souřadnicovém systému, kartézská metrika.

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$$

Časoprostorový interval ve speciální relativitě, Minkowského metrika.

$$ds^2 = g_{00}dt^2 + g_{11}dx^2 + g_{22}dy^2 + g_{33}dz^2$$

Metrika v obecné relativitě,
Riemannova metrika.
Ortogonalní systém souřadnic.

Koeficienty $g_{\mu\nu}$ se zavádějí nejen v pokriveném kartézském souřadnicovém systému, ale v jakékoli souřadnicové soustavě, například sférické. Sám pojem souřadnic v obecné relativitě ustupuje do pozadí, význam mají měřitelné efekty na gravitujících tělesech.

Albert Einstein našel rovnice pro metrické koeficienty $g_{\mu\nu}$. Jde o deset diferenciálních rovnic druhého řádu. První řešení pro sféricky symetrické gravitační pole centrálního tělesa našel Karl Schwarzschild v roce 1916. Jeho řešení ve velké vzdálenosti od zdroje přechází v Minkowského metriku speciální relativity, pohyby těles ve větších vzdálenostech od zdroje jsou shodné s pohyby v Newtonově teorii. V silnějších polích (blíže ke zdroji) je ale v předpovědích možné pozorovat rozdíly. Světelný paprsek se zakřivuje, dráhy těles nejsou uzavřené elipsy, dochází ke stáčení celé trajektorie, hodiny jdou v různých místech gravitačního pole různě a pro vnějšího pozorovatele není možné pozorovat děje pod tzv. Schwarzschildovým poloměrem. Je-li těleso vytvářející pole pod Schwarzschildovým poloměrem, jedná se o černou díru.

Jiným důležitým řešením rovnic obecné relativity je Fridmanovo řešení z roku 1922, podle kterého homogenní izotropní Vesmír jako celek nemůže být statický, musí se rozšiřovat nebo smršťovat. Nezávisle řešil Einsteinovy rovnice pro modely vesmíru G. Lemaitre.

Rovnice OTR poskytují řešení ve tvaru gravitačních vln a v mnoha dalších předpovědích se odlišují od Newtonova gravitačního zákona. Uveďme alespoň některé z nich:

- zakřivení světelného paprsku v gravitačním poli (1,75" u povrchu Slunce),
- gravitační čočky (první objevena v roce 1979),
- stáčení perihelia planet (zejména Merkuru: 43" za století),
- gravitační červený posuv (závislost chodu hodin na gravitačním poli, poprvé prokázán pro bílé trpaslíky),
- zpoždění elektromagnetického signálu,
- kosmologický červený posuv,
- Lensův-Thirringův jev (strhávání souřadnicové soustavy),
- gravitační vlny,
- černé díry,
- rozpínání Vesmíru,
- neeuclidovská geometrie časoprostoru.

Počátky obecné teorie relativity



Základní relativistické principy

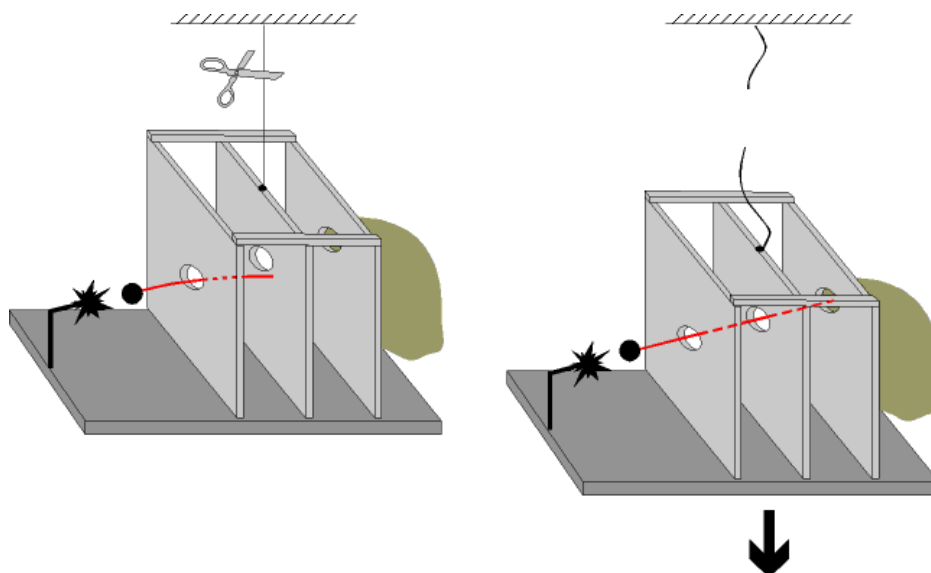
Klasický princip relativity	Mechanické děje dopadnou ve všech inerciálních soustavách stejně. Žádný z inerciálních systémů není nijak privilegován.
Speciální relativita	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Mechanické i elektromagnetické děje dopadnou ve všech inerciálních systémech stejně. Žádný z inerciálních systémů není nijak privilegován.</i> 2. <i>Rychlost světla je ve všech inerciálních souřadnicových soustavách stejná.</i>
Obecná relativita	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Všechny děje dopadnou v libovolném souřadnicovém systému stejně. Žádný systém není nijak privilegován.</i> 2. <i>Gravitaci a setrvačné děje od sebe nelze odlišit. V urychlující se raketě dochází ke stejným dějům jako ve skutečném gravitačním poli. Naopak ve volně padajícím letadle pocítíme stav beztlíže a gravitační pole nevnímáme. Bohužel jen na chvíli. Vyjádřením tohoto faktu je tzv. princip ekvivalence.</i>
Princip ekvivalence	<p><i>Setrvačná a gravitační hmotnost jsou si navzájem úměrné, při vhodné volbě jednotek jsou si rovné.</i></p> <p>Princip ekvivalence vede k neodlišitelnosti setrvačných a gravitačních jevů a umožňuje popisovat gravitaci za pomoci křivého časoprostoru.</p>
Silný princip ekvivalence	Energie odpovídající elektromagnetickému poli se také projevuje jako setrvačná hmotnost. I tato hmotnost má své gravitační účinky.

Velmi silný princip ekvivalence	Energie, která by odpovídala samotnému gravitačnímu poli má také projevy jako setrvačná a gravitační hmotnost.
Matematický popis OTR	<ol style="list-style-type: none"> 1. Každé těleso zakřivuje svou přítomností prostor a čas kolem sebe. 2. V tomto zakřiveném časoprostoru se tělesa pohybují po nejrovnějších možných drahách (geodetikách). <p>Tělesa tedy časoprostor sama vytvářejí, bez nich časoprostor neexistuje a nemá smysl.</p>



Princip ekvivalence

Hmotnost lze určovat ze setrvačných účinků těles (schopnosti setrvávat v daném pohybovém stavu) nebo z gravitačních účinků (schopnosti všech těles se přitahovat). Z experimentů se ukazuje, že **obě hmotnosti jsou si úměrné a při vhodné volbě jednotek rovné**. V Newtonově gravitačním zákoně se potom setrvačná hmotnost pokrátí s gravitační hmotností tělesa (například pro volný pád $m_s d^2y/dt^2 = m_g g$) a všechna tělesa se budou pohybovat po stejných trajektoriích. V malé volně gravitující kleci (padající výtah) se proto tělesa chovají jako ve stavu beztlíže a naopak v urychlované kleci se tělesa chovají jako v tíhovém poli. V prostorově malé kleci v dosti krátkém časové okamžiku **nerozlišíme gravitační a setrvačné efekty**. Hledaný inerciální systém, ve kterém platí zákony speciální teorie relativity, je právě po krátkou dobu volně gravitující (padající) klec malých rozměrů. Jde o tzv. lokální inerciální systém (LIS). Nejlépe snad lze zavedení LIS pochopit v experimentu Harolda Waaga. Představme si tři propojené rovnoběžné desky s otvory na přímce. K první desce je připojeno zařízení vrhající kuličku, k poslední vak, který ji zachytí. Jeli zařízení v klidu vzhledem k povrchu Země (stojí na Zemi, visí na laně), kulička díky tíhovému poli neprojde až do vaku. Je to tím, že systém není inerciální a tělesa se nepohybují rovnoměrně přímočaře. Přestřihneme-li závěs a zařízení bude padat volným pádem, stává se lokálním inerciálním systémem (LIS), tělesa se pohybují po přímkách a kulička dopadne do zachytného vaku.



Ověření principu ekvivalence:

- 1922:** L. Eötvös, E. Fekete, D. Pekár: Systém dvou těles na torzním vlákně z různých materiálů v poli Země. Přesnost 5×10^{-9} .
- 1964:** R.H. Dicke, R. Krotkov, P.G. Roll: Au-Al v poli Země a Slunce. Přesnost 10^{-11} .
- 1971:** V.G. Braginski, V.I. Panov: Au-Pt v poli Země a Slunce. Přesnost 10^{-12} .
- 1994:** Y. Su: Be-Cu v poli Země a Slunce. Přesnost 2×10^{-12} .
- 1996:** J.O. Dickey: Země-Měsíc v poli Slunce. Přesnost 4×10^{-13} .

Přesností rozumíme relativní odchylku vzdálenosti dvou těles při volném pádu.

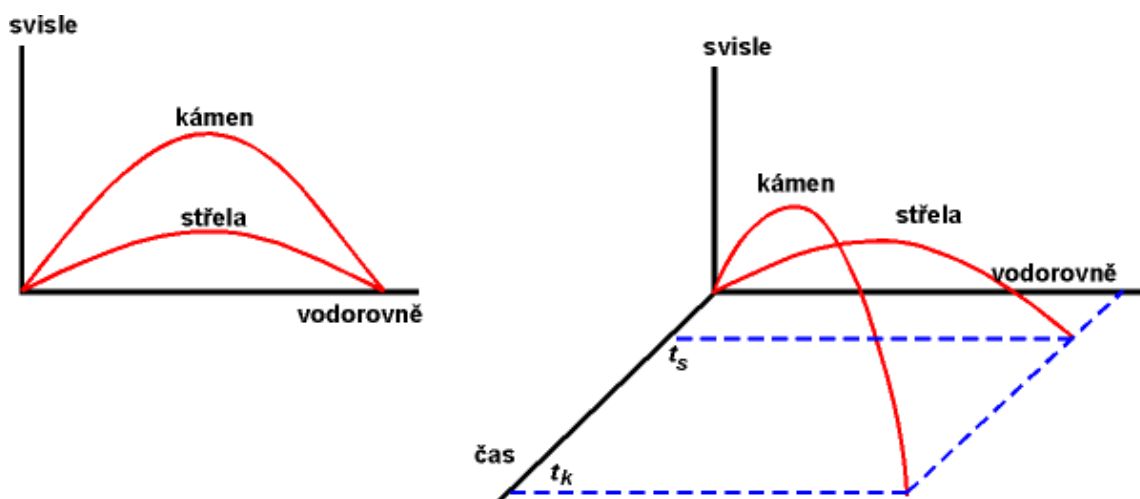


Stavba obecné relativity

Tělesa pohybující se pod vlivem gravitačních polí se díky ekvivalenci setrvačné a gravitační hmotnosti pohybují po stejných trajektoriích (pokud je jejich vlastní pole zanedbatelné). Například cihla a malá kulička padající ze stejné výšky dopadnou na zem za stejný čas. To přivedlo Alberta Einsteina k myšlence, že křivost trajektorií je vlastností samotného prostoru a času. Prostor a čas je zakřiven a tělesa se pohybují po rovných drahách v tomto křivém prostoru (lépe časoprostoru, časovou souřadnici nikdy ze svých úvah nemůžeme vynechat). Dva kameny na obrázku se podle newtonovské teorie potkají proto, že Slunce na ně působí gravitační silou, která zakřivuje jejich dráhu v prostoru. Podle obecné relativity se oba

kameny pohybují po "přímkách", ale v křivém čase a prostoru. Zakřivení času a prostoru samozřejmě způsobuje Slunce.

Zakřivení třídimenzionálního prostoru si můžeme jen dosti těžko představit. Celkem bez problému si ale představíme zakřivenou dvojdimenzionální plochu (povrch jablka, míče, sedlo koně, reliéf krajiny). Nejkratší spojnicí dvou bodů na takto zakřivené ploše již není přímka. Je to křivka, kterou nazýváme **geodetika**. Jak si ale představit zakřivení v čase? Kupodivu je to velmi jednoduché. Zakřivení časové osy vlastně neznámá nic jiného než různý chod hodin v různých místech. Různě vysoko nad povrchem Země jdou hodiny různě. Na časovou osu nesmíme nikdy zapomínat. Ukažme si to na jednoduchém příkladě: Z nějakého místa na povrchu Země hodíme kámen a pod menším úhlem vystrelíme střelu tak, aby dopadly stejně daleko. Na první pohled se zdá, že něco je špatně. Prostor je zakřiven přítomností Země a tak by se kámen i střela měly pohybovat po stejných křivkách. Zapomněli jsme ale na časovou osu. Na obrázku vpravo je stejná situace zakreslena i s časem. Vidíme, že kámen i střela se pohybují různými místy časoprostoru. Jestliže na časové a prostorových osách zvolíme stejné jednotky (to lze zařídit například tak, že místo času budeme používat kombinaci ct), zjistíme, že obě trajektorie mají stejnou křivost.



Základní myšlenky obecné teorie relativity tak lze shrnout do dvou tvrzení:

1. Každé těleso zakřivuje prostor a čas kolem sebe (prostor i čas!).
2. Tělesa se pohybují po geodetikách (nejrovnějších možných drahách) v zakřiveném časoprostoru.

Matematické zpracování těchto postulátů může být i značně obtížné, využívá se poznatků z diferenciální geometrie a problémy gravitačního působení se převádějí na geometrické vlastnosti prostoru a času. Nicméně základní myšlenky OTR jsou jednoduché a přímočaré.

Jaký je vztah mezi obecnou a speciální relativitou? Obecná relativita platí v jakémkoli souřadnicovém systému, třeba zrychleném, rotujícím a podobně. Speciální relativita platí jen v inerciálních systémech. Ty, jak víme, existují jen lokálně. Lze je vybudovat jako klece malých rozměrů volně padající v prostoru po krátkou dobu. Chceme-li například sledovat

pohyb světelného paprsku v blízkosti Slunce v rámci speciální relativity, musíme v každém místě, do kterého se paprsek dostane, vybudovat LIS, v něm pohyb vyřešit (uvnitř LIS je to pohyb po přímce, ale celá klec padá volným pádem a pro vnějšího pozorovatele je proto trajektorie paprsku zakřivena). Přejdeme k dalšímu LIS, opět pohyb vyřešíme, atd. Výsledný pohyb bude integrací pohybů v jednotlivých LIS. Pomocí rovnic obecné relativity můžeme najít přímo řešení celého pohybu bez zavádění lokálně inerciálních systémů.



Zakřivení času

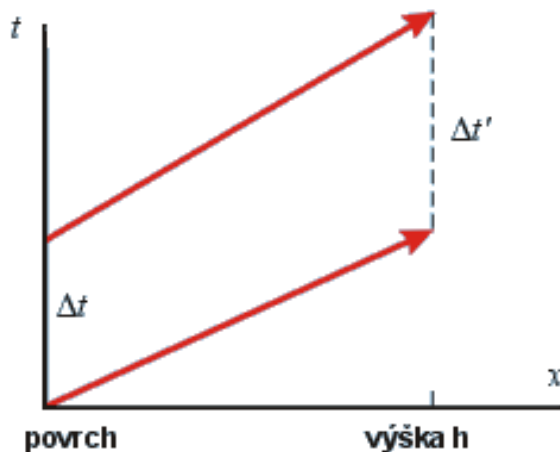
Gravitační pole ovlivňuje chod hodin jakékoli konstrukce. Foton (jeho kmity mohou posloužit jako jednoduché hodiny) vystupující z gravitačního pole tělesa zmenšuje svou frekvenci, prodlužuje vlnovou délku a červená. Důvodem je zákon zachování energie, například v tíhovém poli

$$\hbar \omega + mgh = \text{const}, \quad \text{kde } m = E/c^2 = \hbar \omega/c^2.$$

Červený posuv lze odvodit i z chování vystupujícího fotonu vzhledem k LIS. Vzhledem k vnějšímu pozorovateli LIS s fotonem v tíhovém či gravitačním poli padá a uplatní se Dopplerův jev. V obecném gravitačním poli s měnícím se potenciálem pro infinitezimální změnu frekvence platí:

$$d\omega/\omega = -d\Phi/c^2; \quad \Phi \equiv W_p/m.$$

Tato změna chodu hodin se podle principu ekvivalence uplatňuje i v přítomnosti setrvačných efektů (brždění, rozjíždění). Právě červený posuv je odpovědný za různé stáří bratrů ve známém paradoxu dvojčat. Ke změně chodu hodin dochází při urychlování rakety, v otočce a při přistání. Změna frekvence fotonu byla pozorována i při vstupu fotonu do gravitačního pole Země. V Poundově Rebkově experimentu byla pozorována změna frekvence fotonu při průletu starou vodárenskou věží o výšce pouhých 22,6 m. Různý chod hodin v různých výškách nad povrchem znamená, že rovnoběžník vytvořený ze dvou světočar fotonů a dvou časových intervalů není ve skutečnosti rovnoběžníkem, geometrie časoprostoru není eukleidovská:



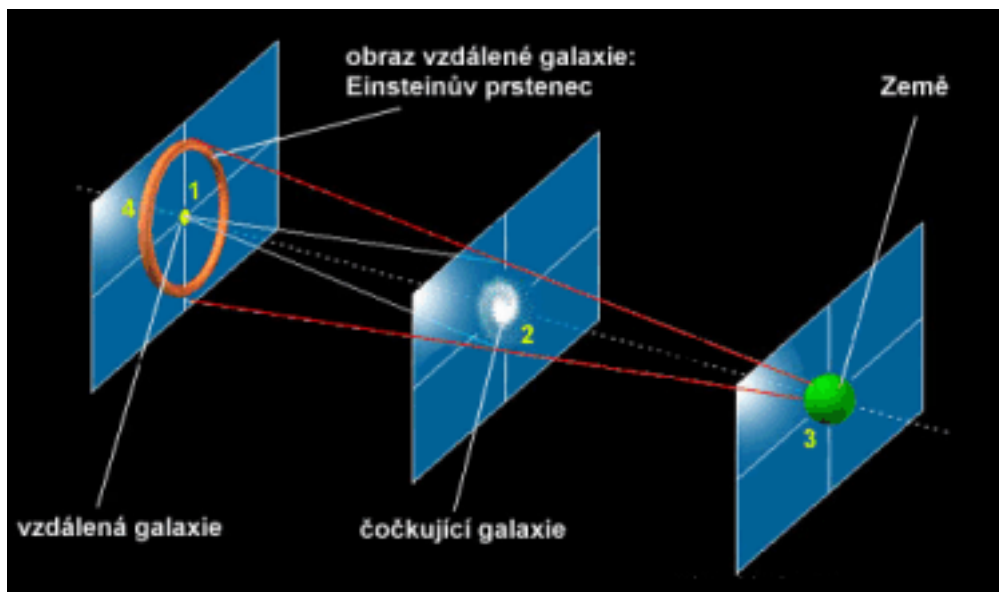


Zakřivení prostoru

V zakřiveném prostoru (například na povrchu koule) již neplatí známé vztahy z Eukleidovské geometrie. Součet úhlů v trojúhelníku není 180° , obvod kružnice není $2\pi r$, plocha koule není $4\pi r^2$, čtyři kolmé přímky nevytvoří obdélník, atd. Důsledkem zakřivení prostoru kolem našeho Slunce je například stáčení perihélia Merkuru a odklon světelného paprsku hvězd od přímky. Kdybychom měřili poloměr Slunce ze skutečných radiálních měření, bude se nalezená hodnota lišit v důsledku zakřivení prostoru od hodnoty získané z měření plochy povrchu Slunce, $r = (S/4\pi)^{1/2}$, o hodnotu

$$\Delta r = r_g/6; \quad r_g = 2Gm/c^2,$$

tedy o šestinu Schwarzschildova poloměru. Pro naše Slunce jde o 0,5 km. Nejčastěji dnes měřeným projevem zakřivení prostoru jsou gravitační čočky, jejichž existenci předpověděl A. Einstein v roce 1936. Hmotný objekt ležící mezi zdrojem záření a pozorovatelem zakřivuje světelné paprsky podobně jako skleněná čočka v laboratoři.



Klepnutím na tento symbol spustíte aplet, ve kterém si můžete vyzkoušet ohyb světelného paprsku v okolí hmotného tělesa. SW předpoklady: Netscape 4.5 a vyšší nebo Explorer 4.0 a vyšší. Autorem apletu je [Ondřej Pšenčík](#).



Zakřivení časoprostoru - gravitační vlny

Nejjednodušším příkladem kombinovaného zakřivení časoprostoru, které je navíc periodické, je gravitační vlna. Objevuje se u těles s nenulovým kvadrupólovým momentem a metriku časoprostoru lze rozložit na dvě části:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu},$$

kde veličina $\eta_{\mu\nu}$ je obyčejná Minkowského metrika speciální relativity a $h_{\mu\nu}$ je malá odchylka od této metriky, která splňuje vlnovou rovnici

$$(\Delta - 1/c^2 \partial^2/\partial t^2) h_{\mu\nu} = 0.$$

Gravitační vlny mají dva módy skloněné o 45°. Tato odlišnost od elektromagnetických vln (také dva módy, ale odkloněné o 90°) souvisí se spinem pole (fotony mají $s = 1$, gravitony $s = 2$). Existenci gravitačních vln předpověděl Albert Einstein již v roce 1916. Znamé jsou neúspěšné Weberovy pokusy o hledání gravitačních vln. V současnosti probíhá velmi ambiciózní projekt LIGO na detekci gravitačních vln. Detaily o hledání gravitačních vln naleznete na stránce [Testy obecné relativity](#).



Některé vztahy z OTR

$$\Delta\omega/\omega_0 = -\Delta\lambda/\lambda_0 = \Delta\Phi/c^2$$

Změna frekvence fotonu způsobená změnou gravitačního potenciálu Φ . V tíhovém poli je $\Delta\Phi = g\Delta l$.

$$ds^2 = -c^2(1 - r_g/r) dt^2 + (1 - r_g/r)^{-1} dr^2 + r^2 d\omega^2$$

Schwarzschildova metrika. Tvar intervalu ve sférických souřadnicích v okolí černé díry.

$$r_g = 2GM/c^2$$

Schwarzschildův poloměr. Poloměr, pod ze kterého se od hmotného tělesa nemůže vzdálit ani světlo.

$$M, L, Q = \text{const}$$

„No hair“ teorém. Černá díra si ponechává jen informaci o hmotnosti, momentu

$$\Sigma S_k(t) \leq \Sigma S_k(t+\Delta t)$$

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t)[dr^2/(1-kr^2) + r^2 d\omega^2]$$

$$H^2 - 8/3 \pi G \rho = -c^2 k/a^2$$

$$H \equiv (da/dt)/a$$

$$\rho_C = 3H^2/(8\pi G)$$

$$z = \Delta\lambda/\lambda_0 = [a(t) - a(t_0)]/a(t_0)$$

hybnosti a náboji.

Termodynamika černých děr. Ať probíhají jakékoli procesy včetně spojování černých děr, celkový povrch se nezmenší. Povrch černé díry v jistém smyslu představuje pojem entropie klasického souboru částic

Fridmanova-Lemaitre-Robertsonova-Walkerova metrika rozpínajícího se Vesmíru.

Einsteinova-Fridmanova rovnice. Diferenciální rovnice pro expanzní funkci $a(t)$. Veličina k je křivost Vesmíru.

Hubbleova konstanta. Udává koeficient úměrnosti mezi rychlostí rozpínání Vesmíru a vzdáleností objektu. $H \sim 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

Kritická hustota. Pro hustotu vyšší než je kritická se Vesmír bude v budoucnu smršťovat, jeho křivost je kladná a objem konečný. Pro hustotu nižší než kritická je křivost záporná, objem nekonečný a Vesmír se bude neustále rozpínat.

Kosmologický posuv. Změna frekvence

vyzařovaného světla
způsobená změnou
geometrie prostředí,
kterým se světlo šíří,
tedy rozpínáním
Vesmíru.

RŮZNÉ METRIKY



Na této stránce naleznete:

- ▶ [Kartézské souřadnice](#)
- ▶ [Polární souřadnice](#)
- ▶ [Sférické souřadnice](#)
- ▶ [Souřadnice na povrchu koule](#)
- ▶ [Minkowského metrika](#)
- ▶ [Schwarzschildova metrika](#)
- ▶ [FLRW metrika](#)



Kartézské souřadnice

Metrika vlastně popisuje vzdálenost dvou bodů v prostoru nebo v časoprostoru. Nahrazuje nám tak Pythagorovu větu pro infinitezimálně malý úsek vzdáleností a umožňuje vypočítat mnohé vlastnosti prostoru či časoprostoru. Zde jen uvedeme nejčastěji používané metriky a v připravovaných Seminářích k astrofyzice si procvičíte na metriky řadu příkladů. Používáme-li k popisu známého prostoru jen nový typ ortogonálních souřadnic (souřadnicové plochy jsou navzájem kolmé), stačí se infinitezimálně z daného bodu posunout ve směru jednotlivých souřadnicových os a sečíst kvadráty těchto posunutí. Jde vlastně o aplikaci Pythagorovy věty. V obecně zakřiveném časoprostoru je třeba metriku vypočítat z Einsteinových rovnic OTR. Často jsou k dispozici nekorektní a nepřesné postupy, které však mohou jednoduchým způsobem ukázat alespoň tvar metriky v dané situaci.

V kartézských souřadnicích (x, y, z) jsou infinitezimální posuny ve směru jednotlivých os, interval a metrické koeficienty

$$dl_x = dx, \quad dl_y = dy, \quad dl_z = dz,$$

$$dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2,$$

$$g_{ij} = \text{diag} \{1, 1, 1\}.$$



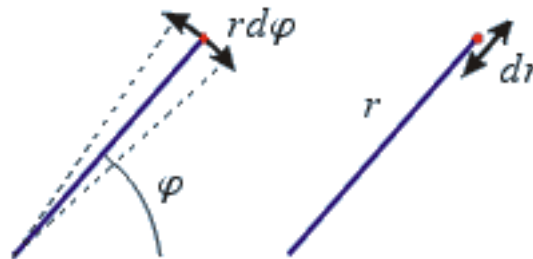
Polární souřadnice

V polárních souřadnicích (r, φ) je situace obdobná. Jen je třeba si uvědomit, že posuneme-li se v úhlu φ , pohybujeme se po infinitesimálním oblouku, který je dán jako součin poloměru a úhlu:

$$dl_r = dr, \quad dl_\varphi = r d\varphi,$$

$$dl^2 = dr^2 + r^2 d\varphi^2,$$

$$g_{ij} = \text{diag} \{1, r^2\}.$$

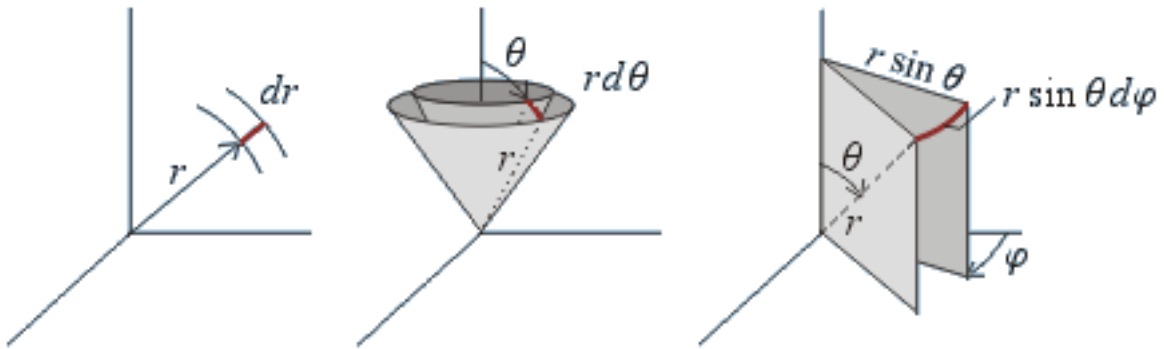


Metrické koeficienty již nejsou rovny jedné. Tentokrát je prostor stále rovný, křivočaré jsou jen použité souřadnice.



Sférické souřadnice

Ve sférických souřadnicích (r, θ, φ) je posun v radiální ose evidentně dr . Posouváme-li se v ose θ (rozevíráme kuželovou plochu), je posun roven oblouku $r d\theta$. Posun v ose φ , znamená potočení plochy konstantního φ . Bod se posune o $r_\perp d\varphi = r \sin \theta d\varphi$. Proto máme:



$$dl_r = dr, \quad dl_\theta = r d\theta, \quad dl_\varphi = r \sin \theta d\varphi,$$

$$dl^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 \equiv dr^2 + r^2 d\omega^2,$$

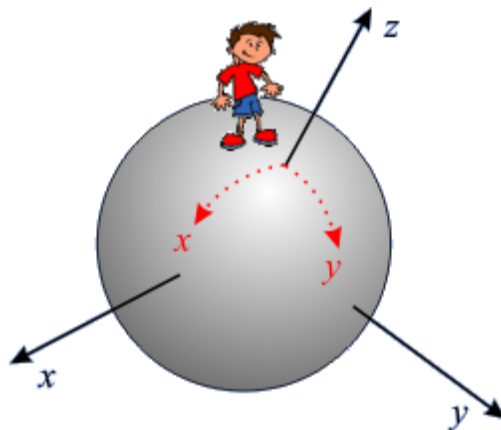
$$g_{ij} = \text{diag} \{1, r^2, r^2 \sin^2 \theta\}.$$

Nezajímají-li nás podrobnosti o úhlových částech metriky, zkracujeme je symbolem $d\omega^2$.



Souřadnice na povrchu koule

Představme si, že chceme vybudovat souřadnicový systém na povrchu kulové plochy o poloměru R . Použijeme nejprve standardní 3D kartézské souřadnice vycházející ze středu koule. Předpokládejme, že osa z protíná povrch koule v místě pozorovatele a vytváří tak na povrchu koule přirozený pól. Souřadnice x a y lze v těsné blízkosti pólu (pozorovatele) považovat za lokální kartézský systém na povrchu koule. Dále od pólu je ale zjevné, že průsečíky souřadnicových rovin s povrchem koule nejsou přímky.



Integrální a diferenciální vztah pro povrch koule dává:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2; \quad xdx + ydy + zdz = 0.$$

V elementu vzdálenosti pomocí uvedených vztahů postupně eliminujeme proměnnou z :

$$dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 = dx^2 + dy^2 + (xdx + ydy)^2/(R^2 - x^2 - y^2).$$

Zavedeme-li běžným způsobem polární souřadnice (v těsné blízkosti pólu se budou pozorovateli zdát jako lokální polární souřadnice na povrchu koule, souřadnice r má význam vzdálenosti od osy z)

$$x = r \cos \varphi; \quad y = r \sin \varphi,$$

dostaneme po dosazení a úpravách metriku

$$dl^2 = dr^2/(1 - r^2/R^2) + r^2 d\varphi^2.$$

Často se zavádí takzvaná skalární (Gaussova) křivost $k \equiv 1/R^2$. S tímto označením získá metrika finální tvar

$$dl_r = dr/(1 - k r^2)^{1/2}, \quad dl_\varphi = r d\varphi,$$

$$dl^2 = dr^2/(1 - k r^2) + r^2 d\varphi^2,$$

$$g_{ij} = \text{diag} \{1/(1 - k r^2), r^2\}.$$

Poprvé v tomto příkladu znamenají nejednotkové koeficienty u metriky skutečně zakřivený „svět“. Budeme-li na povrchu koule konstruovat kružnice, nebude jejich obvod roven $2\pi a$, kde a je vzdálenost měřená po povrchu koule. Stejný příklad řešený pro 3D „povrch“ na 4D kouli naleznete ve skriptu [Astrofyzika v příkladech](#).



Minkowského metrika v STR

Jedním ze základních postulátů speciální teorie relativity je experimentálně mnohokrát ověřené tvrzení, že světlo se ve všech soustavách šíří se stejnou rychlostí. Míjejí-li se dvě souřadnicové soustavy a bliknu-li baterkou v počátku soustav právě když jsou počátky na stejném místě, bude se světlo v obou soustavách šířit v kulových vlnoplochách z počátku:

$$dl^2 = c^2 dt^2, \quad dl'^2 = c^2 dt'^2.$$

V obou soustavách tedy platí $dx^2 + dy^2 + dz^2 = c^2 dt^2$, neboli $-c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 = 0$. Právě kombinace na levé straně je vždy ve všech souřadnicových soustavách stejná a nazývá se interval. Přijímá význam vzdálenosti, resp. kvadrátu velikosti vektoru ve čtyřrozměrném časoprostoru. Čas budeme klást na nulté místo v pořadí souřadnic (časoprostor). Bylo by možné ho také klást na čtvrté pořadí (prostorčas). Minkowského metrika v kartézských

souřadnicích je:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2,$$

$$g_{ij} = \text{diag} \{-c^2, 1, 1, 1\}.$$

Minkowského metriku můžeme také zapsat ve sférických souřadnicích:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2,$$

$$g_{ij} = \text{diag} \{-c^2, 1, r^2, r^2 \sin^2 \theta\}.$$

Minkowského metrika je metrikou plochého časoprostoru speciální relativity, i když je zapsána v křivočarých souřadnicích.



Schwarzschildova metrika

Schwarzschildovo řešení je řešení Einsteinových rovnic v okolí sféricky symetrického hmotného objektu. Souřadnicový systém S zvolíme nepohyblivý vzhledem k objektu, systém je zjevně neinerciální. Představme si další systém LIS, tentokrát inerciální, který padá z nekonečna k uvažovanému objektu. Jeho okamžitá rychlost je ve vzdálenosti r od objektu rovna $v = (2Gm/r)^{1/2}$. Rychlost měříme vzhledem k objektu. V padajícím LIS zjistíme kontrakci délek a dilataci času událostí v S:

$$dr = dr_{\text{LIS}}/\gamma; \quad dt = \gamma dt_{\text{LIS}},$$

koeficient γ je dán rychlostí pohybu

$$\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2} = (1 - 2GM/rc^2)^{-1/2} = (1 - r_g/r)^{-1/2},$$

kde jsme označili tzv. Schwarzschildův poloměr

$$r_g \equiv 2GM/c^2.$$

V LIS platí speciální relativita a lze použít Minkowského metriku

$$ds^2 = -c^2 dt_{\text{LIS}}^2 + dr_{\text{LIS}}^2.$$

Úhlové rozměry jsou v obou soustavách nedotčeny. Metrika v pevném souřadnicovém systému by měla proto být

$$ds^2 = -c^2 dt^2/\gamma^2 + \gamma^2 dr^2 + r^2 d\omega^2, \text{ tj.}$$

$$ds^2 = -c^2(1 - r_g/r) dt^2 + dr^2/(1 - r_g/r) + r^2 d\omega^2.$$

Tento vztah skutečně rigorózně odvodil K. Schwarzschild z rovnic OTR. Naše „odvození“ je jen jakýmsi náznakem. Použili jsme nerelativistický vztah pro energii a systém, který je inerciální jen lokálně.

$$ds^2 = -c^2(1 - r_g/r) dt^2 + dr^2/(1 - r_g/r) + r^2 d\omega^2,$$

$$g_{ij} = \text{diag} \{-c^2(1 - r_g/r), 1/(1 - r_g/r), r^2, r^2 \sin^2\theta\}.$$

Úhlová část metriky je nedotčena (je to zjevné z „odvození“ pomocí padajícího systému – v úhlových směrech ke kontrakci nedochází). Časová část je ale nyní ovlivněna (v různých vzdálenostech od objektu jde čas různě) a radiální část metriky také. Ve velkých vzdálenostech od centrálního tělesa ($r_g \gg r$) přechází Schwarzschildova metrika v Minkowského metricku, časoprostor není zakřiven. Na Schwarzschildově poloměru se čas zastaví a radiální část metriky diverguje. Je to vlastnost zvoleného souřadnicového systému, který je pevný v prostoru. Padající pozorovatel by při průchodu Schwarzschildovým poloměrem nepozoroval nic zvláštního.

Fridmanova-Lemaitrova-Robertsonova-Walkerova metrika (FLRW)

Fridmanovo řešení je řešení Einsteinových rovnic v homogenním isotropním Vesmíru. Souřadnicový systém je součástí Vesmíru a spolu s ním se pohybuje (comoving coordinates).

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) [dr^2/(1 - kr^2) + r^2 d\omega^2].$$

Řešení má některé „odchylky“ od Minkowského metriky plochého časoprostoru speciální relativity. Časová část je zcela nedotčena. Celá prostorová část je násobena bezrozměrným koeficientem $a^2(t)$. Jde o tzv. expanzní funkci, která vyjadřuje, jak se rozpíná prostorová část metriky. Více se o ní dozvíte na stránce věnované [Standardnímu modelu](#). V rámci prostorové části je úhlová část nedotčena a radiální část je deformována stejně jako [metrika na povrchu koule](#). Jen skalární Gaussova křivost k může být kladná, záporná i nulová. Pro $k = 0$ a $a = 1$ přechází FLRW metrika v Minkowského metricku.

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) [dr^2/(1 - kr^2) + r^2 d\omega^2],$$

$$g_{ij} = \text{diag} \{-c^2, a^2(t)/(1 - kr^2), a^2(t) r^2, a^2(t) r^2 \sin^2\theta\}.$$

EXPERIMENTÁLNÍ TESTY OTR



Na této stránce naleznete:

- [Historické experimenty](#)
- [Gravitační čočky](#)
- [Pulsar PSR 1913+16](#)
- [Gravitační vlny - projekt Ligo a další](#)
- [Lense-Thirringův jev](#)



Historické experimenty

Stáčení perihelia Merkura: Dráha Merkura není přesná elipsa. Perihelium elipsy se postupně stáčí. Většina tohoto pohybu byla vysvětlena působením poruch od ostatních planet. Menší část stáčení (43" za století) objasnila až obecná relativita. Právě u Merkuru je vliv OTR největší, protože jde o planetu pohybující se nejbliže ke Slunci, kde je časoprostor nejvíce zakřiven a navíc efekt zesiluje značná výstřednost trajektorie Merkuru.

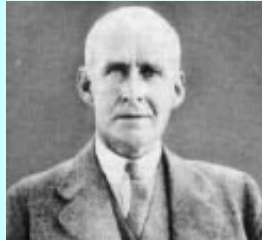
Odklon světelných paprsků v blízkosti Slunce: Již v roce 1911 předpověděl Albert Einstein (1879-1955), že světelný paprsek vzdálených hvězd se v blízkosti Slunce zakřivuje. Při zatmění Slunce, kdy sluneční svit neruší pozorování, jsou polohy hvězd úhlově blízkých k povrchu Slunce vychýleny z normální polohy vzhledem k úhlově vzdálenějším hvězdám. U Slunce činí odchylka u povrchu 1,745" a byla poprvé pozorována sirem Arturem Stanleyem Eddingtonem (1882-1944) při expedici za zatměním Slunce na Princův ostrov v západní Africe v roce 1919. Souběžně byla organizována expedice do Sobralu v Brazílii.

Hubbleův červený posuv galaxií: První přímý experimentální důkaz rozpínání Vesmíru podal Edwin Hubble (1889-1953) v roce 1929. Při přehlídce asi 35 galaxií Hubble zjistil, že vzdálené galaxie se od nás bez výjimky vzdalují a to tím rychleji, čím jsou dále (to přesně odpovídá [kosmologickému principu](#)). Dnes bývá často zpochybňováno proložení původních měření lineární závislosti. Šlo spíše o intuici než o solidní úvahu. Edwin Hubble byl také první, kdo rozpoznal, že v galaxiích jsou proměnné hvězdy - cefeidy.

Poundův-Rebkův experiment: V gravitačním poli jdou hodiny umístěné v různé vzdálenosti od centrálního tělesa různě. Fotony vzdalující se od těles červenají a přibližující se k tělesům modrají (mění se jejich frekvence). Tento jev nazýváme [gravitační červený posuv](#) a byl poprvé na Zemi měřen ve staré vodárenské věži na Harvardské universitě. Výška věže byla 22,6 m, tomu odpovídá relativní změna frekvence $2,5 \times 10^{-15}$. Experiment provedl Robert V. Pound a Glen A. Rebka v roce 1960. Jako zdroj záření použili radioaktivní izotop Fe 57 s vyletujícími fotony o energii 14,4 keV. Ke sledování změny frekvence využili Mösbauerův jev.

Weberovo hledání gravitačních vln: Existenci gravitačních vln předpověděl Albert Einstein v roce 1916. Znamé jsou neúspěšné pokusy Josepha Webera o detekci gravitačních vln pomocí dvou obřích hliníkových válců vzdálených 1000 km (Maryland, Aragon). Válce se chovaly jako přirozené oscilátory naladěné na frekvenci 1660 Hz. Parametry: materiál Al, hmotnost 1,4 tuny, poloměr 66 cm, délka 153 cm. Válce byly zprovozněny v roce 1966 a v roce 1969 byla naměřena jediná koincidence, která se již nikdy nezopakovala. Dnes se soudí, že citlivost $h \equiv \Delta L/L \sim 10^{-15}$ tohoto zařízení nebyla dostatečná.

Slavné experimenty



*A.S. Eddington
(1882-1944)*



*E. Hubble
(1889-1953)*



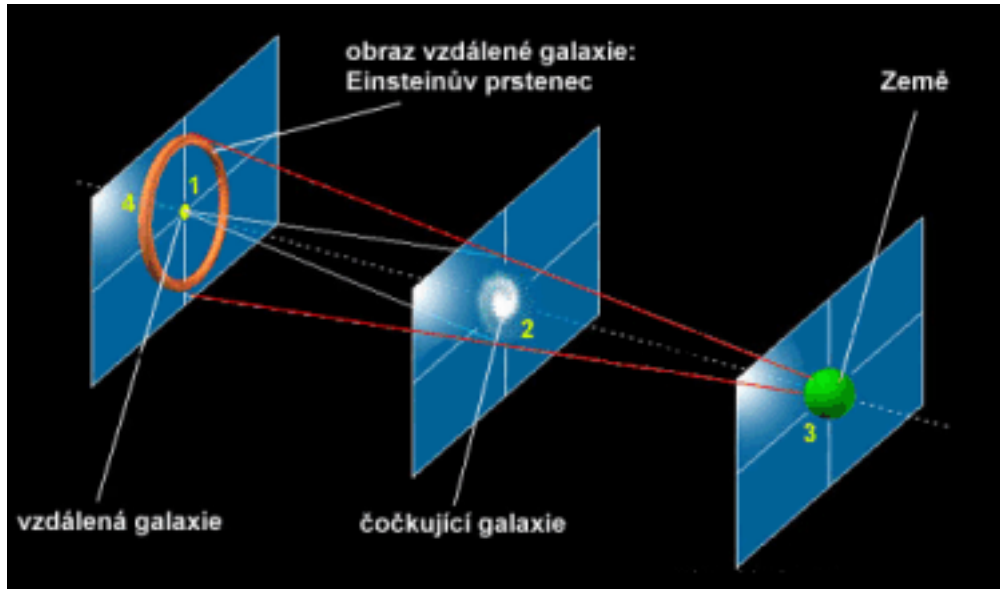
*J. Weber
(i s válcem)*



Gravitační čočky

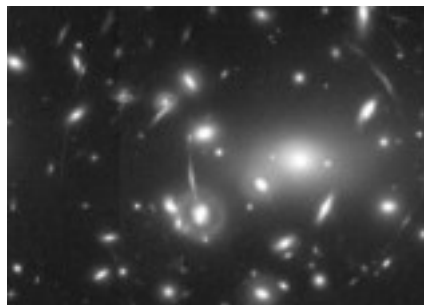
- 1979:** QSO 0957+561 - první objevená gravitační čočka (Walsh, Carswell, Weymann). Dvojitý obraz kvasaru se $z = 1,405$, $m = 17^m$.
- 1987:** Obří oblouky (Lynds, Petrosian, Soucailová). Asi dvacet oblouků - zčočkované světlo galaxií za bohatou kupou galaxií.
- 1988:** MG 1131+0456 - první Einsteinův prstenec v radiovém oboru (Hewitt). Kosmologický posuv $z = 1,13$, $\varnothing = 1,75''$.
- 90. léta:** Mikročočky: Zesílení obrazu při přechodu za hmotným objektem v Galaxii. Využívá se při detekci planet. Planeta v podvojně mikročočce způsobí "zoubek" na zesílení intenzity světla vzdálené hvězdy, který trvá řádově hodiny a představuje další zvýšení intenzity až o 10 %. Dnes (1999) bylo detekováno přes 200 mikročoček.

Efekt gravitační čočky předpověděl A. Einstein v roce 1936. Hmotný objekt (zpravidla velká galaxie) ležící mezi zdrojem záření a pozorovatelem zakřivuje světelné paprsky podobně jako skleněná čočka v laboratoři. Jsou-li objekty dokonale na přímce vznikne jako obraz vzdálené galaxie tzv. Einsteinův prstenec. Jsou-li objekty mírně vyosené, vznikne několikanásobný obraz vzdálené galaxie či kvasaru.



Abell 2218

Kupa galaxií z HST (1995). Jejich světlo se na cestu vydalo v době, kdy byl věk Vesmíru asi čtvrtinový v porovnání s dnešním. Hmotné členy kupy fungují jako gravitační čočky - vzdálené objekty zobrazují jako krátké oblouky, které najdete po celém snímku. Jejich celkový počet je asi sto padesát.



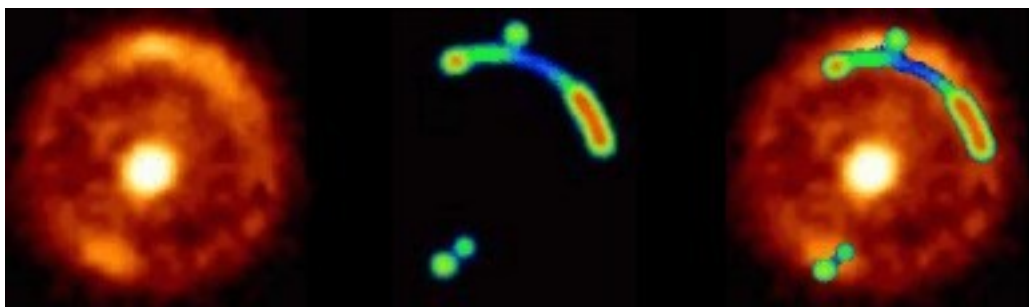
1938+666 (Býčí oko):

Galaxie zobrazená efektem gravitační čočky jako Einsteinův prstenec. Úhlový průměr 1".

Vlevo: IR obraz z HST ($1,6 \times 10^{-6}$ m, kamera NICMOS, 1998). Světlá skvrna uprostřed prstenu je mezilehlá hmotná galaxie.

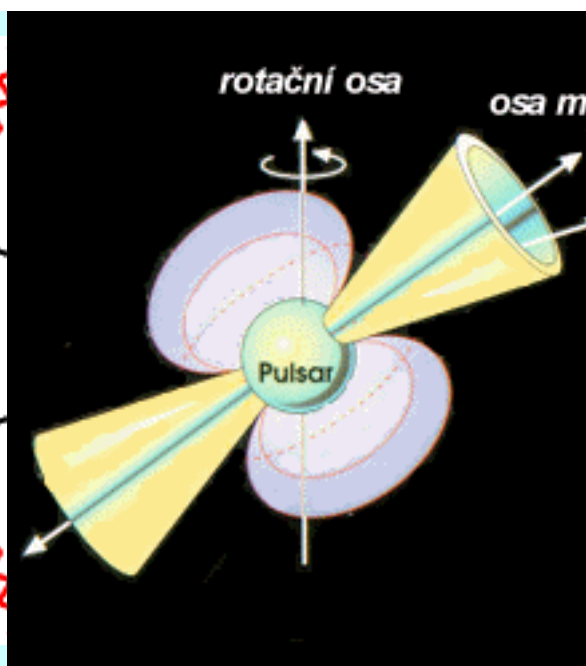
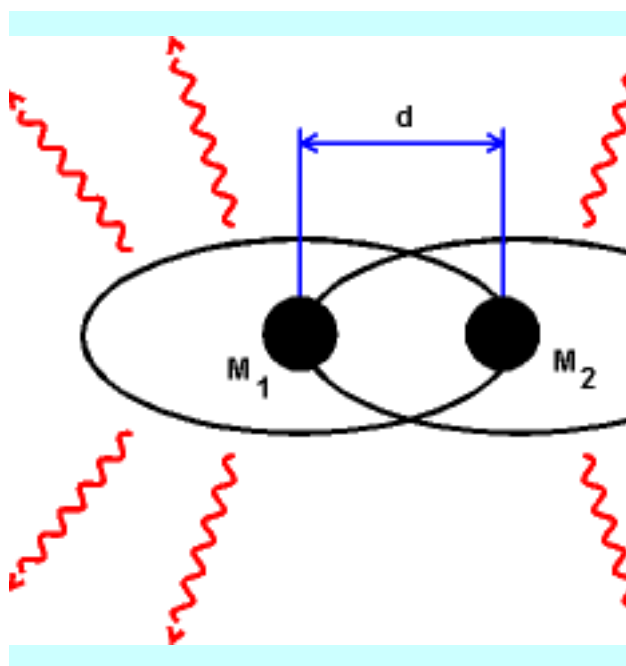
Uprostřed: Radiový obraz galaxie 1938+666 ze sítě šesti radioteleskopů MERLIN ve Velké Británii. Neúplný obraz svědčí o tom, že mezilehlá galaxie není přesně na spojnici pozorovatel - objekt. V radiovém oboru mezilehlá galaxie nezáří.

Vpravo: Superpozice obou obrazů.



Podvojný pulsar 1913+16

Nejdokonalejší objevenou relativistickou laboratoří, na které lze ověřovat efekty obecné relativity je podvojný pulsar 1913+16. Jde o dvě neutronové hvězdy v těsné blízkosti, takže zakřivení prostoru a času, na které složky reagují, je značné. Navíc v prostoru mezi složkami není žádný rozházený materiál, který by komplikoval interpretaci měřených veličin. Podvojný pulsar byl objeven v roce 1974 v Arecibu. Russel A. Hulse a Joseph H. Taylor obdrželi Nobelovu cenu za fyziku v roce 1993 za výzkum tohoto unikátního systému, především za objev zkracování periody odpovídající *vyzařování gravitačních vln*. Rozměry obou složek i celého systému jsou tak malé, že systém je téměř ideální relativistickou laboratoří. Dnes je známo přes 1000 pulsarů, z toho více jak 40 podvojných. Pulsar PSR 1534+12, objevený v roce 1991, má ještě lepší parametry pro testování OTR. Základní parametry podvojného pulsaru 1913+16 jsou: perioda 0,059 s, orbitální perioda 7 h 45 min, hmotnost první složky $1,44 M_S$, hmotnost druhé složky $1,39 M_S$, vzdálenost složek 700 000 km. Pro srovnání: poloměr Slunce je cca 700 000 km, do tohoto prostoru se obě dvě hvězdy vejdou a jejich hmotnosti jsou srovnatelné s hmotností Slunce.



Pulsar PSR 1913+16

$M_1 = 1,44 M_S$
 $M_2 = 1,39 M_S$
 $d = 700\,000\text{ km}$
 $T_{rot} = 0,059\text{ s}$
 $T_{orb} = 7\text{h } 45\text{ min}$



*Parametry
pulsaru*

*R.A. Hulse
(1950)*

*J.H. Taylor
(1941)*

Efekty naměřené u PSR 1913+16

- stáčení periastra 4° za rok !!!
- relativistický Dopplerův jev
- červený gravitační posuv
- dilatace času způsobená oběhem
- stáčení světelných paprsků
- zkracování periody o 76×10^{-6} s/rok díky vyzařování gravitačních vln



Gravitační vlny - projekt LIGO a další

[LIGO](#) (Laser Interferometry Gravitational-Wave Observatory). Ambiciózní projekt na hledání gravitačních vln. Vznikl ve spolupráci [Caltech](#) (California Institute of Technology) a [MIT](#) (Massachusetts University of Technology). Jde vlastně o dva obří interferometry. Každý z nich má dvě kolmá ramena (podobně jako měl Michelsonův interferometr). Parametry jsou však úctyhodné:

LIGO

Délka ramene: 4 km
 Průměr ramene: 60 cm
 Přesnost (h): 10^{-21}
 Laser: Nd:Yag, 10 W
 Frekvence: 10 Hz - 10 kHz
 Pracovní tlak: 10^{-9} Torr



Parametry LIGO

Hanford (Caltech, Washington)

Livingston (MIT, Louisiana)

Jde o první zařízení, které dosáhne relativní přesnosti 10^{-21} při měření délky ramen ($h = \Delta L_1 - \Delta L_2 / L$). Tato citlivost by měla být dostatečná na zjištění gravitačních vln od standardních zdrojů (rotující neutronové hvězdy, supernovy, binární systémy). Očekávaná frekvence vln je menší jak 10 kHz. V současné době (červen 1999) se zařízení vakuuje, na začátku roku 2000 budou provedeny první testy. Úplný provoz začne v roce 2002. Po následné přestavbě a výměně laseru by mělo zařízení dosáhnout do deseti let citlivosti 10^{-22} a pokusit se hledat gravitační vlny z období oddělení gravitační interakce v čase 10^{-43} s po Velkém třesku. V zařízení je částečně odstíněn tepelný šum a seismický hluk. Zařízení bude schopné detekovat tyto signály:

- rotující binární systémy (narůstání frekvence a amplitudy vln v důsledku jejich vyzařování),
- záblesky (supernovy, kolaps na černou díru),
- periodické signály (rotace neosově symetrických neutronových hvězd $f = 2 \times f_{rot}$),
- stochastické signály (gravitační vlny emitované v Planckově čase, v inflační fázi a při vzniku topologických defektů při narušení symetrií).

Na světě existují a staví se i další interferometrické detektory s nižší citlivostí (MARK, TAMA, GEO, VIRGO) a připravuje se ambiciózní projekt LISA umístěný ve Vesmíru. Půjde o tři sondy tvořící interferometrický systém se vzdáleností ramen 5 000 000 km a citlivostí h až 10^{-24} , který bude pracovat s frekvencemi od 10^{-4} Hz do 1 Hz a umožní tak i sledování supermasivních černých děr s pomalými frekvencemi gravitačních vln. Soustava těchto tří sond bude obíhat kolem Slunce ve vzdálenosti 1 AU.

Detektor	Umístění	Velikost	Provoz
MARK 2	USA (Pasadena)	40 m	1991
TAMA 300	Japonsko (Tokyo)	300 m	1999

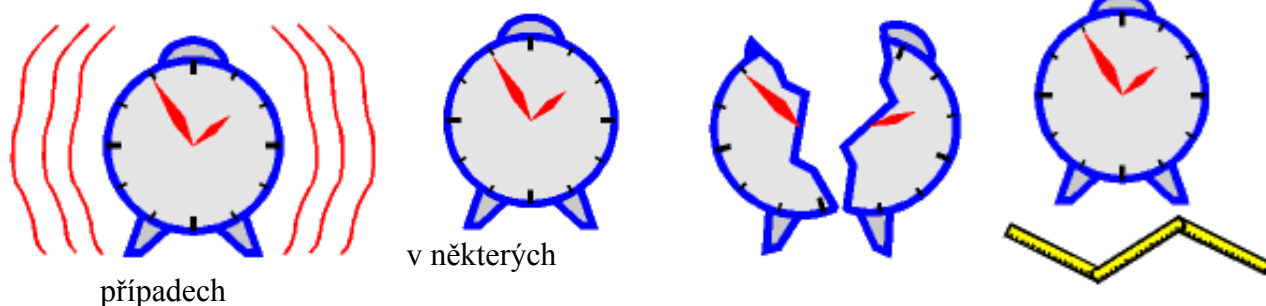
GEO 600	Německo (Hannover)	600 m	2000
LIGO	USA (Hanford, Livingstone)	4 km	2002
VIRGO	Itálie (Pisa)	3 km	2002
LISA	oběžná dráha kolem Slunce	5×10^6 km	2010

Lense-Thirringův jev

Strhávání souřadnic kolem rotujícího objektu, projevuje se precesním pohybem okolní látky a někdy i celého akrečního disku. Jev předpověděli J. Lense a H. Thirring již v roce 1918. Úspěšné pokusy o naměření jevu byly provedeny v akrečních discích černých děr v roce 1998. V roce 1999 byly oznámeny výsledky pokusů o naměření jevu u družic LAGEOS, jejichž dráha kolem Země je strhávána o cca $(2 \pm 0,2)$ m/rok. V letech 2004 až 2005 se jev pokusila změřit specializovaná družice Gravity Probe B. Bohužel se ukázalo, že její citlivost nebyla dostatečná a měření byla znehodnocena magnetickým polem slunečního plazmatu.

INTERAKCE

Člověk žije v prostředí, které se za tisíciletí naučil velmi citlivě vnímat. Snadno si dokážeme představit objekty s rozměry v metrech a hmotnostmi v kilogramech, vnímáme děje trvající sekundy, hodiny, roky... Každý z nás je také schopen provést základní měření délky, času i hmotnosti. Tělesa kolem nás intuitivně chápeme jako objekty, na které si lze sáhnout, přemístit je, natřít barvou, rozříznout a podobně. Kromě těles si



dokážeme představit i vlnění. Bez problémů se smíříme s vlnami na vodní hladině nebo se zvukem jako kmitajícími molekulami látky.

Začneme-li zkoumat elementární částice, vše je jinak. Pojmy, které jsme vybudovali v makrosvětě, jsou většinou ve světě elementárních částic nepoužitelné. Uveďme několik příkladů:

Typický čas: Atomová jádra mají rozměry řádově 10^{-15} metru. Fotony s rychlostí 3×10^8 m/s uletí tuto vzdálenost asi za 10^{-23} s. Právě tento čas je typickým časem dějů v atomovém jádře. Žije-li zde částice 10^{-10} s, je to z hlediska makrosvětla neuvěřitelně krátký okamžik. Z hlediska elementární částice jde o celou věčnost. Částici, která žije velmi krátkou dobu (kratší než 10^{-23} s) již ani nenazýváme částicí, říkáme jí **rezonance**.

Dělení: Rozřízneme-li v makrosvětě poleno, rozbijeme-li skleničku, jsou úlomky vždy menší (co do rozměrů, hmotnosti ...), než je původní celek. To je proto, že samotný akt řezání nebo rozlomení je energeticky zanedbatelný vzhledem k energii obsažené v úlomcích. Jak ale rozdělit atomové jádro nebo dokonce nějakou částici? Zde již nepomůže nůž ani pila. Do objektu je třeba „narazit“ jinou, velmi urychlenou částicí, která způsobí rozštěpení. Tato střela ovšem dodá rozbité částici značnou energii, té odpovídá podle vztahu $E = mc^2$ určitá hmotnost. Dostáváme se tak do zdánlivě paradoxní situace. „Úlomky“ budou mít větší hmotnost než původní částice.

Částice-vlna: V makrosvětě jsme si zvykli dělit jevy na částicové a vlnové. Bezpečně poznáme, co je těleso a co je vlnění. Objekty mikrosvětla však nejsou ani částice (tělesa), ani vlnění. Někdy nám jejich projevy připomínají vlnění, jindy částice. Chceme-li však odpovědět na otázku typu: „Co je tedy elektron – částice nebo vlna?“, musíme si uvědomit, odkud se vzala slova částice – těleso a vlna. Jsou to pojmy, které jsme si vybudovali ve svém světě, v makrosvětě. Pro popis objektů mikrosvětla jsou naprosto nevhodné. Takže odpověď by mohla znít nějak takto: „O tom, zda elektron je vlna nebo částice snadno rozhodnu... Bude to tehdy, až bude mít elektron hmotnost 10 kg a průměr 0,5 metru. Jinak otázka postrádá smysl.“

Měření: Akt měření v mikrosvětě ovlivní měřený objekt. Po změření jakékoli veličiny je měřený objekt v jiném stavu než před měřením. Měření různých veličin se mohou vzájemně ovlivňovat a **výsledky měření mohou záviset na pořadí měření**. Nic z toho neznáme v makrosvětě, kde provedení běžných měření ovlivní měřené objekty velmi málo. Zde jde snad o největší rozdíl mezi fyzikou makrosvětla a mikrosvětla. Proto kvantová teorie, která popisuje objekty mikrosvětla, elementární částice a interakce mezi nimi používá nekomutující objekty, pro které je **$AB \neq BA$** .

Kvantová teorie, podobně jako obecná relativita nepoužívá pojem síly. Řešení je však jiné. Interakci způsobují tzv. výměnné (**intermediální, polní**) částice. Interakce proběhne tak, že si dva objekty (například elektrony) vymění intermediální částici (například foton). Dnešní kvantová teorie pole používá ke znázornění interakcí elegantní grafické zkratky, tzv. **Feynmanovy diagramy**.