

Dobrodružství moderní kosmologie

Jan Novák

České vysoké učení technické v Praze

Gymnázium Nad Alejí, 27.9.2022

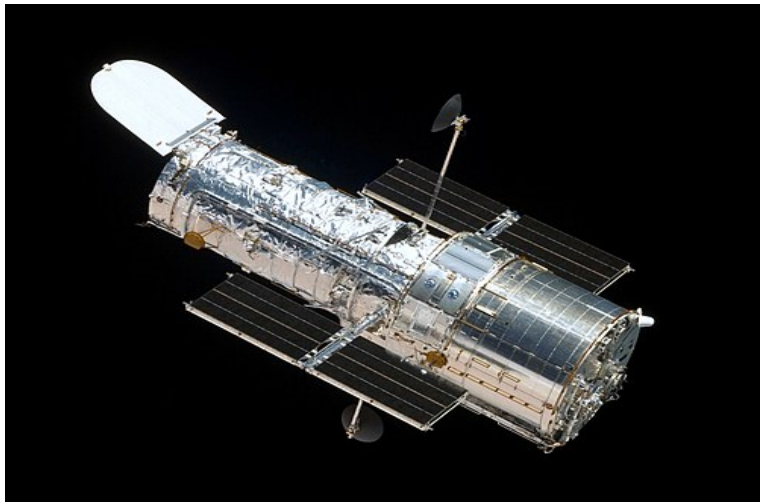
Co vidíme na jasné noční obloze?

Měsíc, hvězdy, Mléčnou dráhu, galaxie, planety, ...



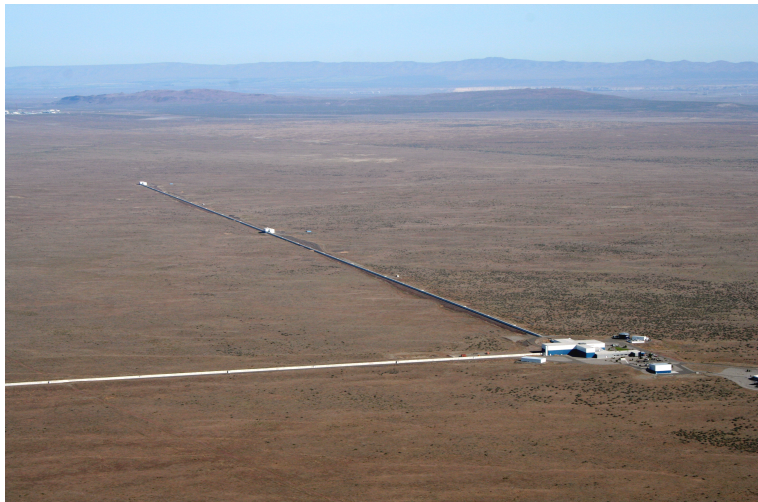
Zlatý věk astronomie, astrofyziky a kosmologie

Detekce elektromagnetické záření ...



Objev gravitačních vln v roce 2015

LIGO, VIRGO, KAGRA,..., LISA, TAIJI, TIANQIN



Experimentální pilíře moderního kosmologického modelu

- Expanze Vesmíru (okolo 1930, E. Hubble)
- Poměr lehkých prvků ve Vesmíru (okolo 1940, G. Gamow)
- Kosmické mikrovlnné záření (1965, A. Penzias a R. Wilson)

Rudý posuv ve spektrech galaxií



Základní vzorec kosmologie

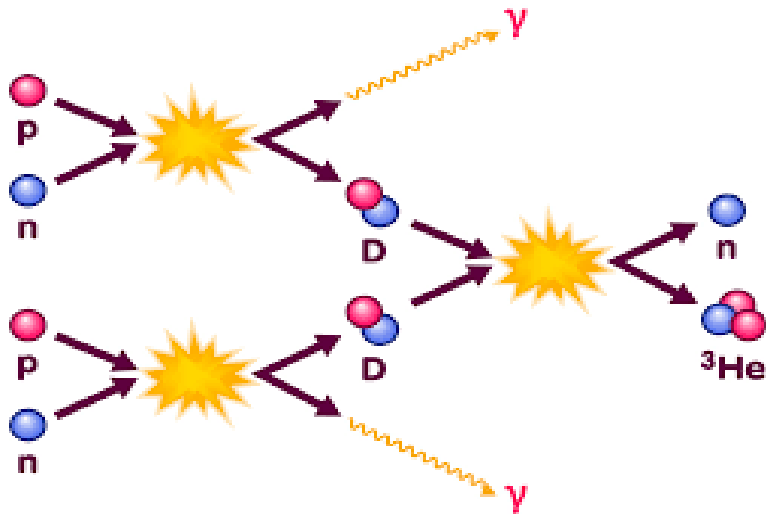
$$\vec{r} = a(t)\vec{x},$$

kde $\vec{r}$ značí polohový vektor, $a(t)$ škálovací faktor a $\vec{x}$ souřadnicový vektor. V kosmologii sledujeme časový průběh funkce $a(t)$. Zjistilo se, že se Vesmír rozpíná. Tedy $a = a(t)$ je rostoucí funkcí času.

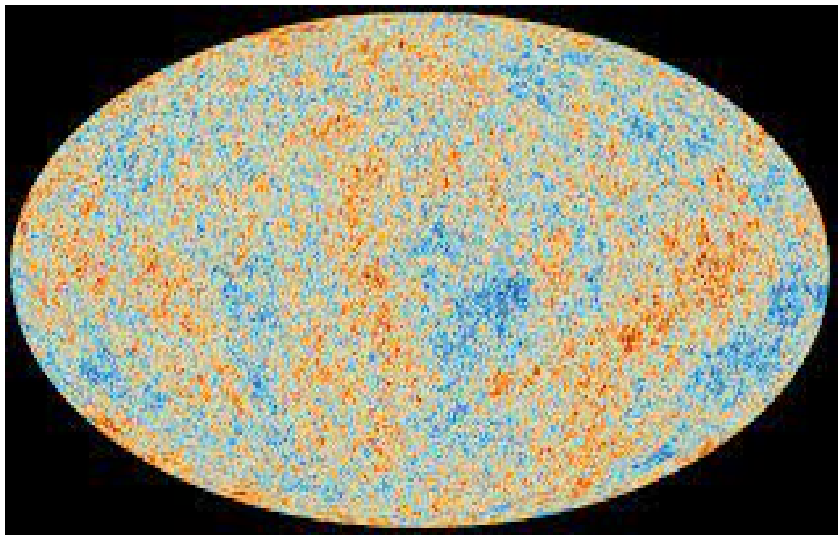
Doppleruv jev



Nukleosyntéza ve Velkém třesku

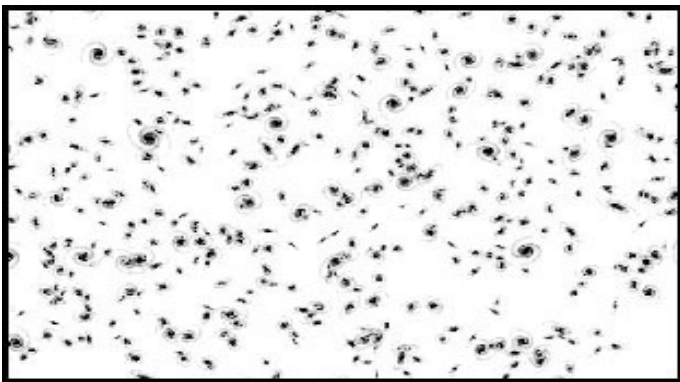


Kosmické mikrovlnné záření

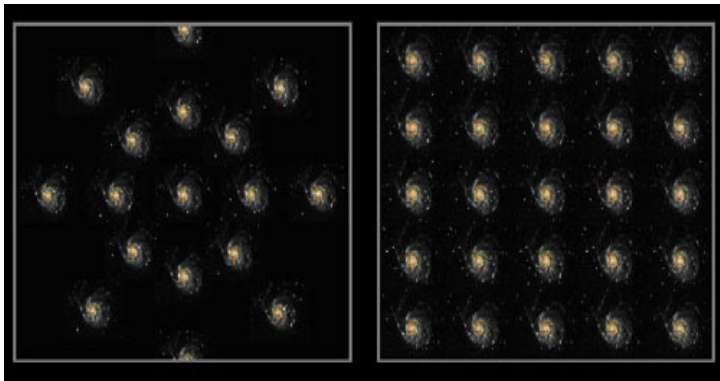


Kosmologický princip

Galaxie tvoří skupiny, kupy, nadkupy, vlákna, stěny, bubliny a kosmický tok. Největší struktury dosahují velikosti 50 - 80 Mpc (1 pc je roven přibližně 3.3 světelného roku). Vypadá to, že žádné větší struktury už ve Vesmíru nejsou...



Izotropie a homogenita



Friedmannovy rovnice

$$H^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2},$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + 3\frac{p}{c^2}\right),$$

kde $H = \frac{\dot{a}}{a}$ označuje Hubblův parametr. a slouží jako funkce, která popisuje změnu $a = a(t)$. (Analogicky $\ddot{a}$ používáme jako značení pro funkci ukazující, jak se mění $\dot{a}$.) Dále ρ značí hustotu a p je tlak. k určuje křivost, kterou můžeme upravit tak, že nabývá hodnot -1 , 0 a 1 .

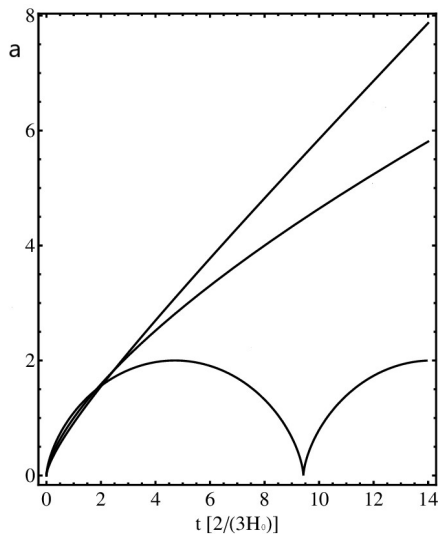
Rovnice kontinuity

Ke dvěma Friedmannovým rovnicím přidáme ještě rovnici kontinuity:

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + \frac{p}{c^2}) = 0$$

Dané tři rovnice nyní nejsou nezávislé, protože úpravami Friedmannových rovnic lze odvodit tuto rovnici třetí.

Základní Friedmannovy modely



Jak starý náš Vesmír je?

Tři zmíněné objevy vědeckou komunitu přesvědčily, že ta správná paradigmata jsou dynamická. Podle nich má Vesmír konečný věk. Z experimentálního měření **Hubbleova parametru** vyplývá hodnota

$$H_0 = 74.0 \pm 1.4 \frac{\text{km}}{\text{s.MPC}}$$

(ve skutečnosti se vedou velké diskuse, jaká by měla být jeho současná hodnota, protože námi uvedené číslo odpovídá měření ze supernov $SNeI_a$ s kalibrací pomocí Cepheid; jiná hodnota ale pochází z měření kosmického mikrovlnného záření družicí Planck, $H_0 = 67.4 \pm 0.5 \frac{\text{km}}{\text{s.MPC}}$).

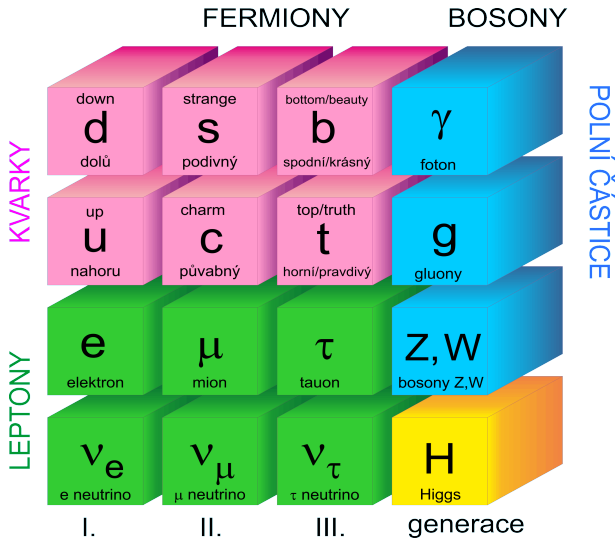
Teplota kosmického mikrovlnného záření

Existuje nějaký proces, který by nám udával věk Vesmíru?

Jedním z jeho indikátorů je už zmíněné kosmické mikrovlnné záření, protože jemu přiřazená **teplota** klesá v rozpínajícím se Vesmíru. Pokud bychom chtěli naznačit proč, musíme si uvědomit, že vlnová délka záření narůstá kvůli expanzi a poněvadž $T \sim \frac{1}{a}$, tak dochází k poklesu teploty při rostoucím $a = a(t)$.

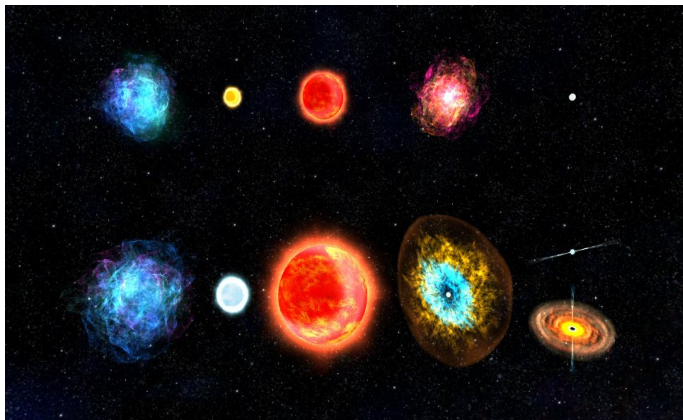
Co se nachází ve Vesmíru za hmotu?

Elementární částice...

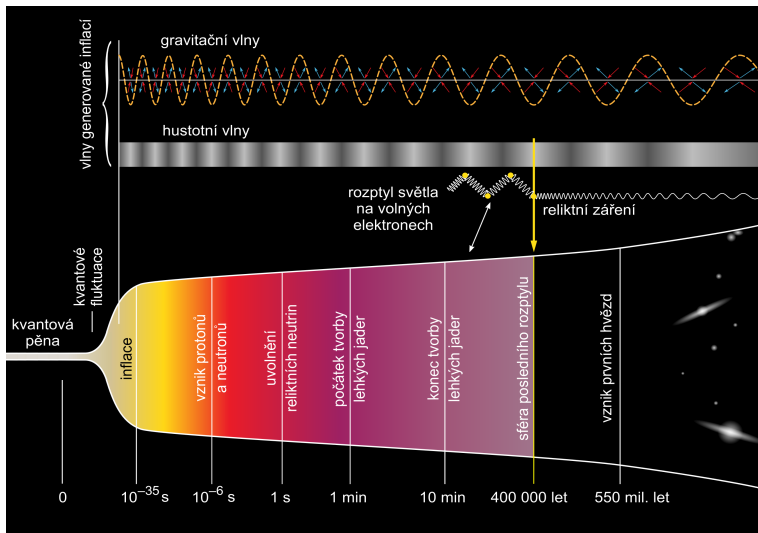


Co se nachází ve Vesmíru za hmotu?

Různá skupenství hmoty ve hvězdách ... (plazma, degenerovaný plyn,...)



Model horkého Velkého třesku



Zrychlující se expanze Vesmíru

Velké překvapení přišlo na konci 20. století, když bylo zjištěno ze spekter vzdálených supernov, že se Vesmír **rozpíná se zrychlením**. Tato epocha trvá zhruba 5 miliard let. Friedmannovými rovnicemi popíšeme prosté rozpínání Vesmíru. K tomu, abychom zahrnuli i zrychlení, je potřeba přidat korekční člen. Jednou z možností je uvažovat kosmologickou konstantu Λ . Upravené rovnice mají potom tento tvar:

$$H^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3},$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + 3\frac{p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

Horký Velký třesk

- 1 miliarda let po Velkém třesku skončilo období reionizace
- 380 tisíc let po VT se vytvořilo kosmické mikrovlnné záření
- hustota hmoty byla takřka rovna hustotě záření zhruba 50 tisíc let po VT
- jaderné reakce začaly být účinné přibližně po 200 - 300 sekundách
- typická energie 1 sekundu po VT byla řádově rovna klidové hmotnosti elektronu, což odpovídá teplotě zhruba $10^{10} K$, četné elektron-pozitronové páry začaly anihilovat, jakmile teplota poklesla pod tuto mez

Horký Velký třesk

- informaci o stavu Vesmíru před jednou sekundou po Velkém třesku nám mohou přinést jedině primordiální gravitační vlny nebo reliktní neutrina
- určité procesy závislé na slabých interakcích přestaly být v rovnováze přibližně 0.2 sekundy po VT
- před časem 10^{-4} sekundy ve Vesmíru existovala kvark-gluonová plazma
- naši cestu do minulosti Vesmíru končíme v čase 10^{-36} sekundy, který odpovídá energetické škále Velkého sjednocení

Těsně před Velkým třeskem

V tomto okamžiku panovaly ve Vesmíru podmínky extrémních hustot a energií. Nyní musíme už používat kvantovou mechaniku i obecnou teorii relativity. Přesněji, měli bychom aplikovat rovnice **kvantové gravitace** (teorie, jak se pokusit vytvořit jednotnou teorii z kvantové mechaniky a obecné teorie relativity). Zkoumá se více kandidátů: teorie strun, smyčková kvantová gravitace, teorie kauzálních množin,... Ptáme se především, v jakém čase začnou být její efekty patrné:

$$t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 10^{-43} \text{ s}$$

Problémy modelu horkého Velkého třesku

Jak vypadá formule pro kritickou hustotu Vesmíru? Abychom ji našli, položíme v první Friedmannově rovnici člen s křivostí a kosmologickou konstantou rovny nule. Dostaneme výraz

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}.$$

Existuje jenom přibližný odhad, jaká je současná hodnota Hubblova parametru. Když dosadíme hodnotu $H_0 = 74.03 \text{ km}/(\text{s.Mpc})$ jako výsledek jednoho z měření do této formulky, dostaneme asi $10^{-26} \text{ kg}/\text{m}^3$. To je zhruba 6 vodíkových atomů v metru krychlovém. Pokračuje další experimentální výzkum, který by nám měl určit, jaká je hustota ve Vesmíru. Ale vše nasvědčuje tomu, že je velmi blízká té kritické.

Problém plochosti

Uvažujeme nyní situaci, kdy ve Vesmíru převažovalo záření a hmota (to není současný stav, kdy ve Vesmíru je hlavní složkou něco, co odpovídá kosmologické konstantě). Položíme $\Omega(t) \equiv \frac{\rho}{\rho_c}$. Jako celkovou hustotu označíme $\Omega_{tot} = \Omega_0 + \Omega_\Lambda$, kde Ω_0 je současná hustota (dělená kritickou hustotou) a Ω_Λ je hustota pocházející z kosmologické konstanty v modifikované Friedmannově rovnici, $\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H^2}$.

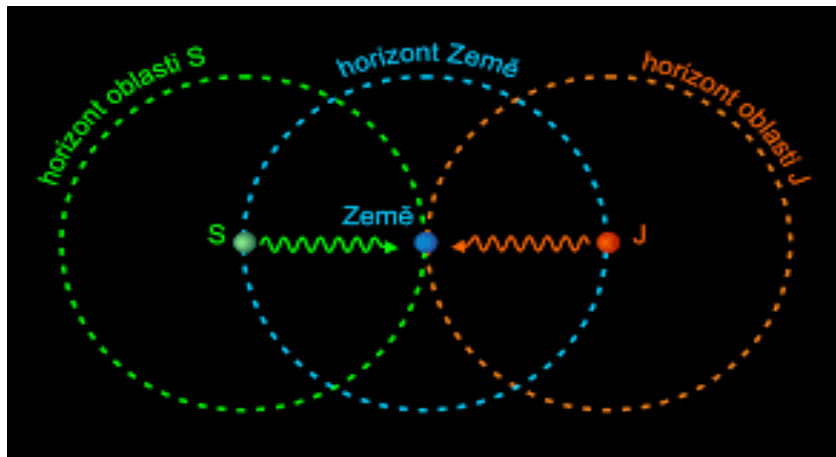
$$|\Omega_{tot}(t) - 1| = \frac{|k|}{a^2 H^2}$$

$|\Omega_{tot} - 1| \sim t$ pro záření a $|\Omega_{tot} - 1| \sim t^{2/3}$ pro hmotu.

Problém horizontů

Souvisí s **komunikací mezi různými regiony** ve Vesmíru. Klíčový fakt je jeho konečný věk. Tedy, když světlo cestuje Vesmírem, může uletět jenom konečnou vzdálenost za tento konečný čas. Ale mikrovlnné záření, které měříme, přichází ze všech stran takřka izotropně. Jak je to možné, když spolu vzdálené oblasti během jeho vývoje nestihly vůbec komunikovat? Z toho plyne, že nemohlo dojít k vyrovnání teploty.

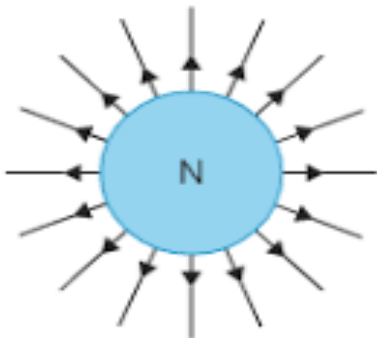
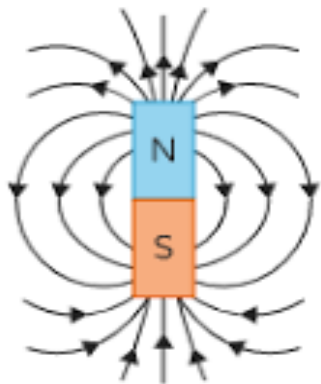
Problém horizontů



Problém magnetických monopolů

Jeden z podstatných ingredientů Maxwellových rovnic, které popisují elektromagnetické jevy, je absence **magnetických monopolů**. Avšak podle teorií Velkého sjednocení by magnetické monopóly existovat měly, protože se objevují jako řešení rovnic pohybu. Nicméně, nikdy nebyly experimentálně pozorovány. To znamená, že buď neexistují, nebo se vyskytují vzácně. Pokud se tedy v raném Vesmíru vytvořily, muselo nějakým mechanismem ve vesmírné tekutině dojít k jejich vymizení.

Problém magnetických monopolů



Kosmologická inflace

Kosmologická inflace může být popsána jako období vývoje vesmíru, kdy platilo

$$\ddot{a} > 0$$

(změna změny škálovacího faktoru je kladná). Je to tedy epocha zrychlující se expanze. Na rozdíl od zrychlujícího se rozpínání v posledních 5 miliardách let ale probíhá podstatně rychleji.

Spouštěcí mechanismus kosmologické inflace

Abychom našli, jaká látka stojí za jejím spouštěcím mechanismem, dosadíme do druhé Friedmannovy rovnice a zahrneme člen s kosmologickou konstantou do hustoty hmoty a záření. Uvažujme tedy druhou Friedmannovu rovnici. Protože platí $\ddot{a} > 0$, pravá strana musí být také kladná a z toho plyne, že

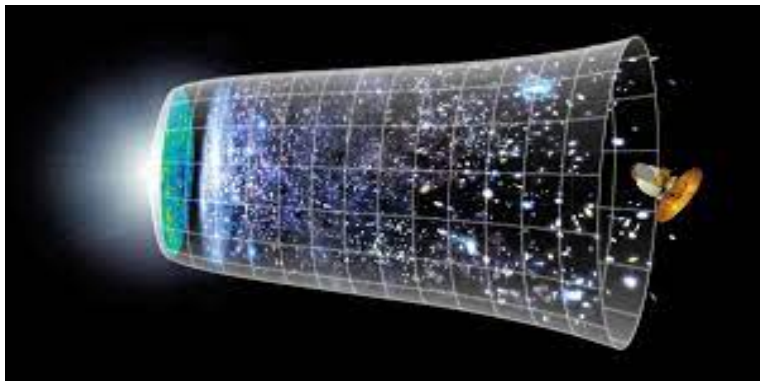
$$p < \frac{-\rho c^2}{3}.$$

To je velice zvláštní materiál se záporným tlakem. Jenom podotkneme, že kosmologická konstanta odpovídá $p = -\rho c^2$, takže tuto podmínku splňuje. Proto i prvopočáteční zrychlující se expanze by mohla být spouštěna něčím podobným kosmologické konstantě.

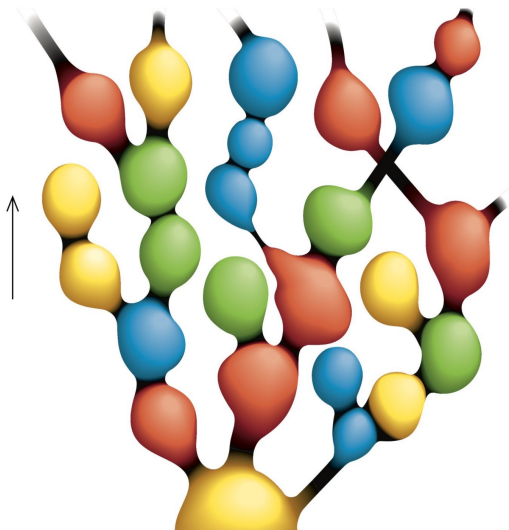
Kosmologická inflace

Hypotetické období vývoje Vesmíru v čase $10^{-43} - 10^{-32}$ s po VT...

$$a = a_i e^{H_i(t-t_i)}$$



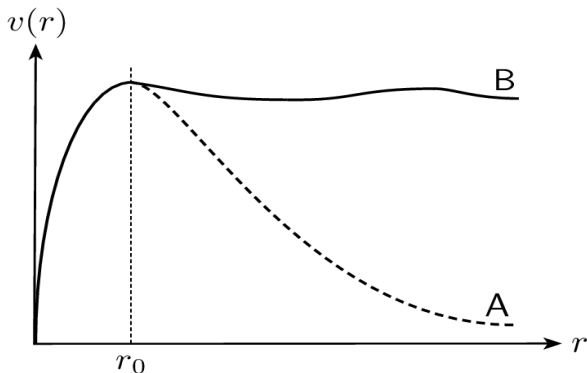
Multiverzum



Temná hmota a energie

Jsou ještě nějaké další důležité neřešené problémy v kosmologii? Víme, například, z čeho je Vesmír složen? Ve skutečnosti známe jenom 5% energetického obsahu Vesmíru. Zbytek tvoří **temná hmota** (26%) a **temná energie** (69%).

Rotační křivky galaxií



Dokazují existenci temné hmoty...Řada kandidátů: astrofyzikální objekty MACHO (černé díry, hnědí trpaslíci,...) nebo exotické částice jako axiony, supersymetrické částice, Kaluza-Kleinovy částice,...

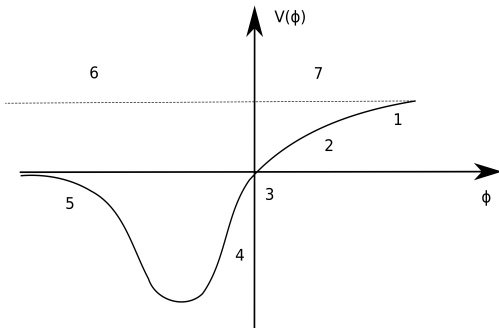
Problém temné energie

Používáme Λ CDM model ..., protože kosmologická konstanta nejlépe slouží pro popis zrychlující se expanze. Alternativní přístupy:

- ① skalární pole
- ② modifikace klasické teorie gravitace:
 - můžeme pozměnit Lagrangián, pomocí kterého se polní rovnice odvozují (Lagrangián je funkce, která se používá v teoretické mechanice a zkonstruuje se jako rozdíl kinetické a potenciální energie.)
 - extra-dimenzionální modely

Cyklické modely vesmíru

Jak už jejich název napovídá, vesmír podle nich prochází cyklem zhruba trilionu let a klíčovou roli v nich sehrává skalární pole.



$$\rho_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)$$

a

$$p_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi)$$

Tedy první Friedmannova rovnice bude

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}(\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi))$$

a druhá

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{8\pi G}{3}(\dot{\phi}^2 - V(\phi)).$$

Nyní se podíváme, co se děje s kinetickou a potenciální energií skalárního pole během fází cyklu.

Problém temné energie - aktivní oblast výzkumu

Graviton as a phonon and dark energy problem

Jan Novák¹

¹Faculty of mechanical engineering, Czech Technical University in
Prague, Technická 4, 166 07, Praha 6, Czech republic

September 26, 2022

Abstract

One of the biggest open problems in cosmology is to find a model of the accelerated expansion of the Universe in the last 5 billion years. There were trials to investigate it classically with adding some other fluid, modifying the field equations of general relativity or using the extra-dimensional models. But one can also utilize quantum gravity. We formulated a new approach to the quantization of gravity, which we call ring paradigm. Graviton is not a true particle, but it emerges as a vibration of a grid of rings, that are new phenomenological objects. This has an immediate consequence for the resolution of the dark energy problem and we obtain a new model of the accelerated expansion. A solution to the old problem of the cosmological constant is presented. As a further application, the black hole information paradox is solved and we show that the space curvature of the Universe must be positive. The theory has a connection with a very interesting problematics of the planar graphs in algebraic geometry and links in algebraic topology.

Introduction

How to construct a theory of quantum gravity (QG) belongs to fascinating tasks in theoretical physics. We have many canonical approaches, such as string theory (ST), [1, 2, 3], loop quantum gravity (LQG), [4, 5, 6], causal set approach (CSA), [7, 8, 9], causal dynamical triangulations, [10], asymptotic safety (AS), [11], non-commutative geometry, [12], and others. Logically, all of them cannot be correct. For example, if ST is a theory describing Nature, then CSA will be definitely wrong, [9]. And vice versa. When the resulting QG is built on a similar idea of how we work with discretization of spacetime in CSA, ST would be just an interesting construction, that has influenced research in algebraic geometry and relating mathematical subjects.

The important goal is to find true QG in this enormous amount of possible paradigms. There are two basic conditions, that QG should fulfill. We all know

¹jan.novak@fd.cvut.cz

Kniha Dvě tváře Johnyho Newmana

- 3 popularizační články: Dobrodružství moderní kosmologie, Dobrodružství kvantové gravitace, Jsme sami?
- příběh amerického teoretického fyzika Johnyho Newmana a americké pianistky Kate Goldberg

Děkuji za pozornost ! (Některé obrázky v prezentaci byly
stažené z internetu.)

johnynewman.com

jan.novak@johnynewman.com