

# Zrychlující expanze vesmíru



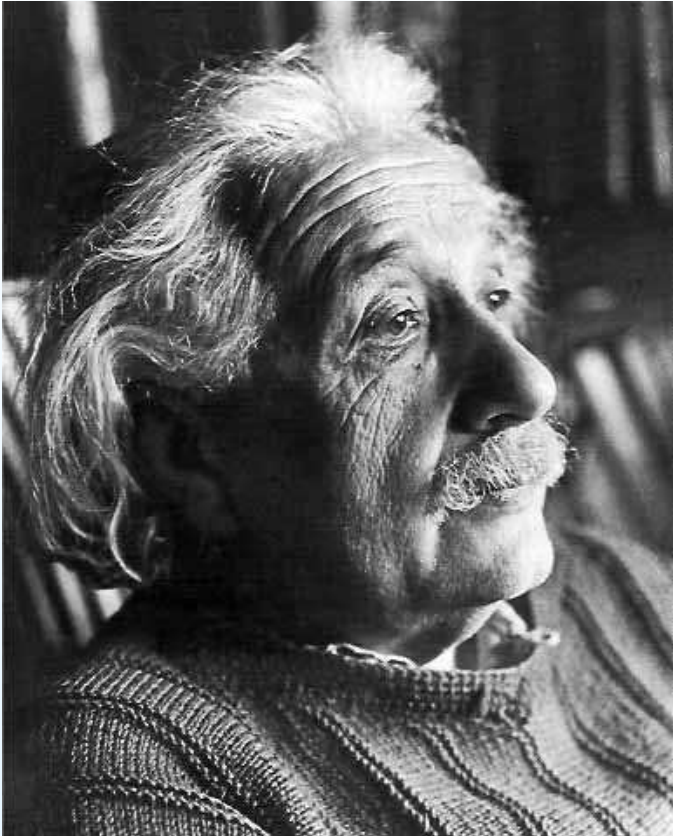
Nobelovy ceny za fyziku 2011 a 2006

Jiří Podolský  
Ústav teoretické fyziky  
Matematicko-fyzikální fakulta  
Univerzita Karlova v Praze

PMF, Praha

11. 10. 2012

# kosmologie se opírá o Einsteinovou teorii gravitace



Albert Einstein

11/1907: Bern – Praha – Curych – Berlín: 11/1915

4/1911 – 7/1912 – 3/1914

## gravitace je deformace prostoročasu

Einsteinovy rovnice gravitačního pole:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

↑  
metrika

geometrie

↑  
tenzor energie-hybnosti

hmota

- geometrie prostoročasu určena hmotným obsahem
- hmota se pohybuje v neeuklidovské geometrii

# Einstein v Praze: 1. 4. 1911 – 25. 7. 1912

řádný profesor teoretické fyziky

na německé části Karlo–Ferdinandovy univerzity

doporučení Max Planck, souhlas s povoláním dal císař František Josef  
přednášel 2 semestry (mechanika, molekulová fyzika, termodynamika)

- bydlel na Smíchově (dnes Lesnická č. 7)
- oblíbený host salonu Bertý Fantové:

filozoficko-literární kroužek židovských intelektuálů:

Max Brod, Franz Werfel, Hugo Bergmann, Philipp Frank, Franz Kafka ...



pracovna v Ústavu pro teoretickou fyziku ve Viničné ulici (dnes Přírodovědecká fakulta UK na Karlově)



příhodné místo pro práci (výhled do hezkého parku blázince)

- publikoval 12 článků, z toho 7 z relativity
- zúčastnil se první Solvayovy konference (Planck, Lorentz, Madame Curie, Poincaré)
- studoval důsledky principu ekvivalence (ohyb světelných paprsků, rudý posuv v gravitačním poli)
- načrtnul hlavní rysy nové teorie gravitace (geodetiky, nelinearita rovnic pole)

inspirace: profesor matematiky Georg Pick

# matematická struktura obecné teorie relativity

- geometrie protoročasu popsána **metrickým tenzorem**

- v souřadnicích je to **symetrická matice**  $g_{\mu\nu}$  dimenze 4

$\mu = 0, 1, 2, 3$  čísluje řádky,  $\nu = 0, 1, 2, 3$  čísluje sloupce  
z  $4 \times 4 = 16$  jenom **10 nezávislých složek** protože  $g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$

- obecně jsou složky metriky **funkce souřadnic**:  $g_{\mu\nu}(x^\alpha)$

$$x^\alpha \equiv (x^0, x^1, x^2, x^3)$$

↑ časová    tři prostorové

- metrika určuje **skalární součin** a **velikost vektoru**:

$$\vec{A} \cdot \vec{B} \equiv \sum_{\mu, \nu=0}^3 g_{\mu\nu} A^\mu B^\nu, \quad |\vec{A}|^2 \equiv \sum_{\mu, \nu=0}^3 g_{\mu\nu} A^\mu A^\nu$$

výsledek nezávisí na použitých souřadnicích

- speciálně: **polohový vektor spojující 2 blízké události**

o souřadnicích  $(x^0, x^1, x^2, x^3)$  a  $(\bar{x}^0, \bar{x}^1, \bar{x}^2, \bar{x}^3)$ :

**prostorový časový interval**  $ds^2 = \sum_{\mu, \nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \quad dx^\mu \equiv \bar{x}^\mu - x^\mu$  je rozdíl souřadnic



Massimiliano Fuksas, 2005  
(Nový veletržní areál, Milán, Itálie)

# Einsteinovy rovnice gravitačního pole $g_{\mu\nu}$

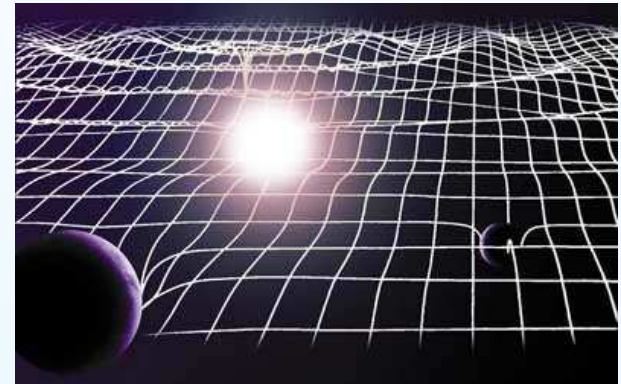
prostorčasový interval  $ds^2 = \sum_{\mu,\nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$  je zobecněním Pythagorovy věty:

pro současné události je  $dx^0 = 0$  a v euklidovském prostoru je  $g_{11} = g_{22} = g_{33} = 1$

invariantní vzdálenost je tedy  $dl^2 = (dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2$

metriku popisující geometrii prostoročasu získáme řešením Einsteinových rovnic:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



- **pravá strana: zdroj zakřivení** (hmota popsaná  $T_{\mu\nu}$ )
- **levá strana: komplikovaná kombinace složek metriky  $g_{\mu\nu}$  a jejích 1. a 2. derivací:**

Ricciho tenzor  $R_{\mu\nu} = \sum_{\alpha=0}^3 R^\alpha_{\mu\alpha\nu}$ , Ricciho skalár  $R = \sum_{\alpha,\beta=0}^3 g^{\alpha\beta} R_{\alpha\beta}$ , kosmologická konstanta  $\Lambda$ ,

Riemannův tenzor křivosti  $R^\kappa_{\lambda\mu\nu} = \frac{\partial \Gamma^\kappa_{\lambda\nu}}{\partial x^\mu} - \frac{\partial \Gamma^\kappa_{\lambda\mu}}{\partial x^\nu} + \sum_{\alpha=0}^3 \Gamma^\alpha_{\lambda\nu} \Gamma^\kappa_{\alpha\mu} - \sum_{\alpha=0}^3 \Gamma^\alpha_{\lambda\mu} \Gamma^\kappa_{\alpha\nu}$ ,

konexe  $\Gamma^\kappa_{\mu\nu} = \frac{1}{2} \sum_{\alpha=0}^3 g^{\kappa\alpha} \left( \frac{\partial g_{\mu\alpha}}{\partial x^\nu} + \frac{\partial g_{\nu\alpha}}{\partial x^\mu} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^\alpha} \right)$ ,

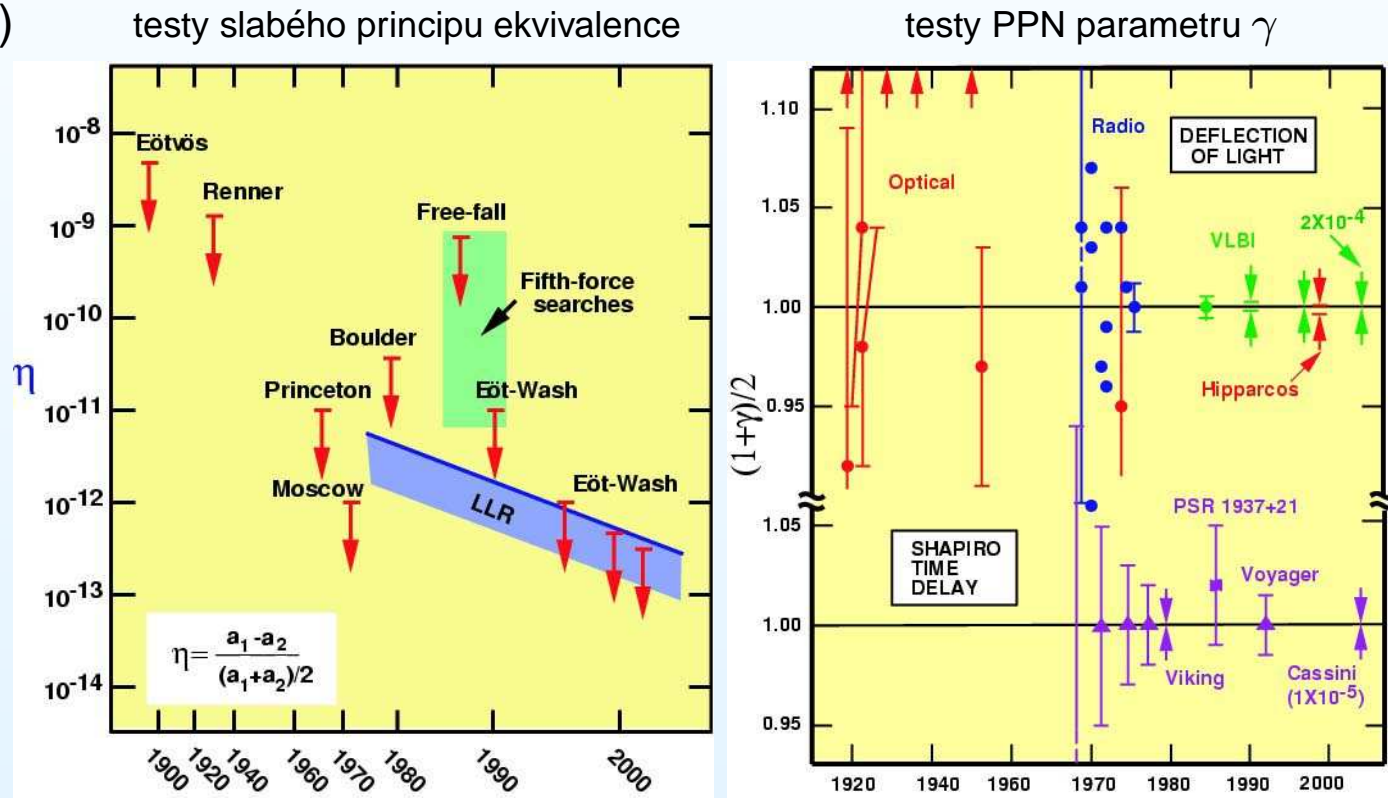
**složitá soustava nelineárních parciálních diferenciálních rovnic 2. řádu pro  $g_{\mu\nu}$**

# testy obecné teorie relativity

klasické testy:

dodnes stovky dalších precizních ověření, například:

- ohyb paprsků (1,75'')
- stáčení orbit (43'')
- rudý posuv



zdroj: Clifford M. Will, *Living Rev. Relativity*, **9** (2006) 3

## binární pulsary

významné testy obecné relativity v silných gravitačních polích:  
systém dvou neutronových hvězd obíhajících velmi blízko sebe



PSR B1913+16 (1974)

PSR J0737+3039 (2003)

stáčení dráhy:

4,2° za rok

16,9° za rok

přibližování po spirále:

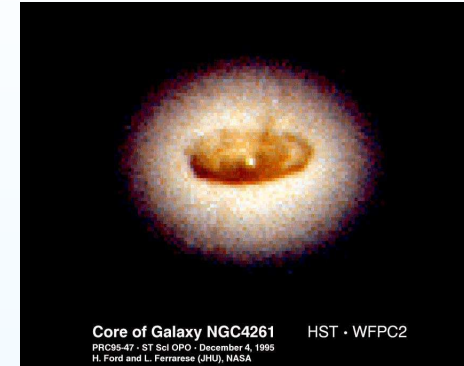
3,5 m za rok

2,6 m za rok

# hlavní aplikace obecné teorie relativity

- **černé díry:** relativistická astrofyzika

supernovy, akreční disky  
obří černé díry v centrech galaxií  
gravitační čočky



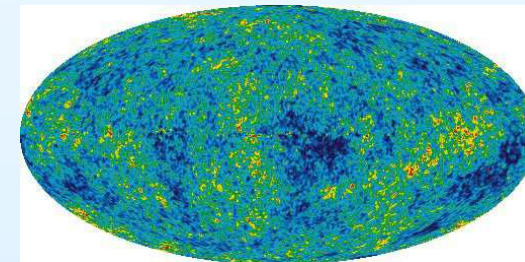
- **gravitační vlny:** astrofyzikální i kosmologické

rozvlnění prostoročasové geometrie  
vzniklé při explozích, kolapsech a srážkách



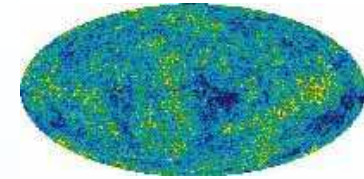
- **kosmologie:** globální modely vesmíru

studium struktury a evoluce kosmu





# Einstein a kosmologie



fundamentální příspěvek z února 1917:

- formulace studia vesmíru jako celku v kontextu obecné teorie relativity
- model statického uzavřeného vesmíru s rovnoměrným rozložením hmoty
- zavedení kosmologické konstanty  $\Lambda$

142 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 8. Februar 1917

## Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie.

VON A. EINSTEIN.

Es ist wohlbekannt, daß die Poissonsche Differentialgleichung

$$\Delta\phi = 4\pi K\rho \quad (1)$$

in Verbindung mit der Bewegungsgleichung des materiellen Punktes die Newtonsche Fernwirkungstheorie noch nicht vollständig ersetzt. Es muß noch die Bedingung hinzutreten, daß im räumlich Unendlichen das Potential  $\phi$  einem festen Grenzwerte zustrebt. Analog verhält es sich bei der Gravitationstheorie der allgemeinen Relativität; auch hier müssen zu den Differentialgleichungen Grenzbedingungen hinzutreten für das räumlich Unendliche, falls man die Welt wirklich als räumlich unendlich ausgedehnt anzusehen hat.

EINSTEIN: Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie 151

müßten wir wohl schließen, daß die Relativitätstheorie die Hypothese von einer räumlichen Geschlossenheit der Welt nicht zulasse.

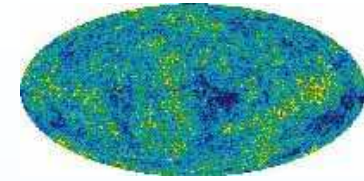
Das Gleichungssystem (14) erlaubt jedoch eine naheliegende, mit dem Relativitätspostulat vereinbare Erweiterung, welche der durch Gleichung (2) gegebenen Erweiterung der Poissonschen Gleichung vollkommen analog ist. Wir können nämlich auf der linken Seite der Feldgleichung (13) den mit einer vorläufig unbekanntem universellen Konstante  $-\lambda$  multiplizierten Fundamentaltensor  $g_{\mu\nu}$  hinzufügen, ohne daß dadurch die allgemeine Kovarianz zerstört wird; wir setzen an die Stelle der Feldgleichung (13)

$$G_{\mu\nu} - \lambda g_{\mu\nu} = -\kappa \left( T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right). \quad (13a)$$

Auch diese Feldgleichung ist bei genügend kleinem  $\lambda$  mit den am Sonnensystem erlangten Erfahrungstatsachen jedenfalls vereinbar. Sie befriedigt auch Erhaltungssätze des Impulses und der Energie, denn man gelangt zu (13a) an Stelle von (13), wenn man statt des Skalars des RIEMANNschen Tensors diesen Skalar, vermehrt um eine universelle Konstante, in das HAMILTONsche Prinzip einführt, welches Prinzip ja die Giltigkeit von Erhaltungssätzen gewährleistet. Daß die Feldgleichung (13a) mit unseren Ansätzen über Feld und Materie vereinbar ist, wird im folgenden gezeigt.

A. Einstein, *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, (1917) 142–152

# kosmologie 20. století: stručné dějiny



## první modely a pozorování (1917-1929)

- **Einstein** (1917): model statického vesmíru – zavedení  $\Lambda$  jako “antigravitace”
- **de Sitter** (1917): rozpínající se prázdňý vesmír s  $\Lambda$
- **Friedmann** (1922): model rozpínajícího se vesmíru s hmotou
- **Lemaître** (1927): “prvotní atom” - zrod teorie velkého třesku
- **Hubble a Humason** (1929): rudý posuv spekter galaxií → vesmír se rozpíná

## souboj teorií velkého třesku a stacionárního vesmíru (1949-1965)

**Gamow, Alpher, Herman** versus **Hoyle, Gold, Bondi**

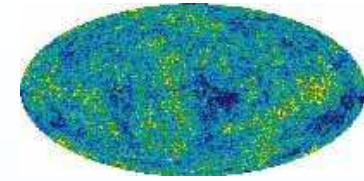
- pochopení nukleosyntézy prvků: (30.-50. léta)
- zpřesnění stáří vesmíru: **Baade** (1952), **Sandage** (1958)
- prokázání evoluce vesmíru: rádiové galaxie **Ryle** (1961), kvasary **Schmidt** (1963)
- objev reliktního mikrovlnného záření: **Penzias a Wilson** (1965)

## triumf teorie velkého třesku a obecné teorie relativity (od 1965)

souhlasí s řadou nezávislých přesných pozorování

struktura a stáří kosmu, zastoupení prvků, reliktní záření: COBE (1989), WMAP (2001)

# reliktní mikrovlnné záření



vesmír vyplňuje reliktní mikrovlnné záření, které přichází rovnoměrně z celé oblohy

- teoretická předpověď [Alpher, Gamow, Herman](#) (1948), pak Dicke, Peebles, Wilkinson: “ozvěna” horkého velkého třesku má mít Planckovo spektrum “absolutně černého tělesa” s teplotou několika kelvinů

- poprvé je pozorovali [Penzias, Wilson](#) (1965)  
záření je velmi izotropní, opravdu planckovské a má teplotu

$$T = 2,728 K$$

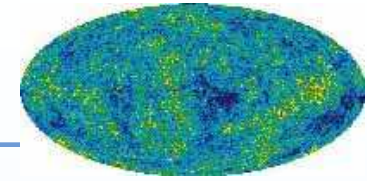


Nobelova cena 1978

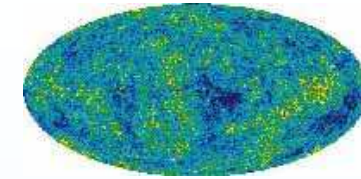


Arno R. Penzias a Robert Wilson

anténa je od roku 1989 národním památkem US



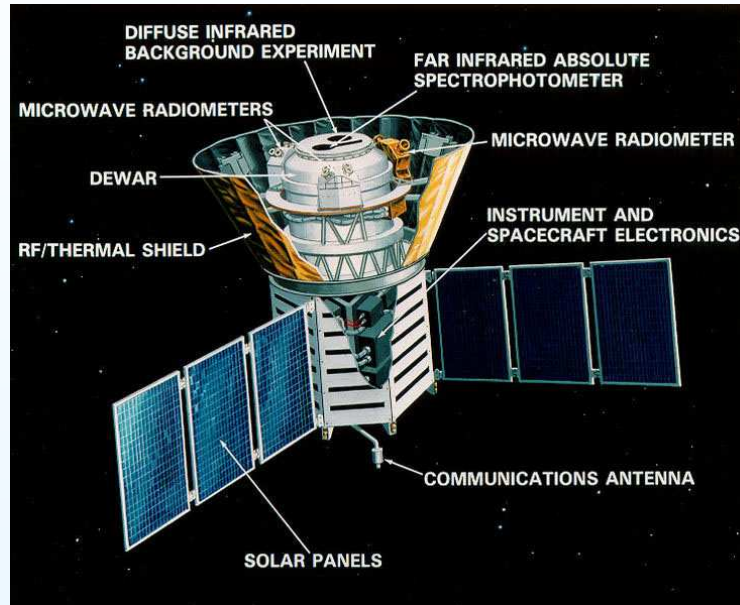
# objev nepatrných anizotropií reliktního záření



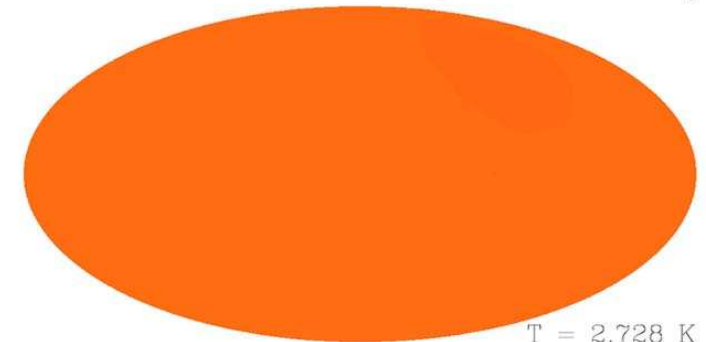
U-2



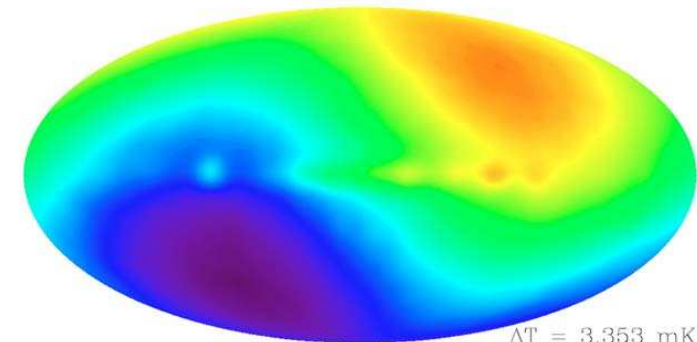
COBE



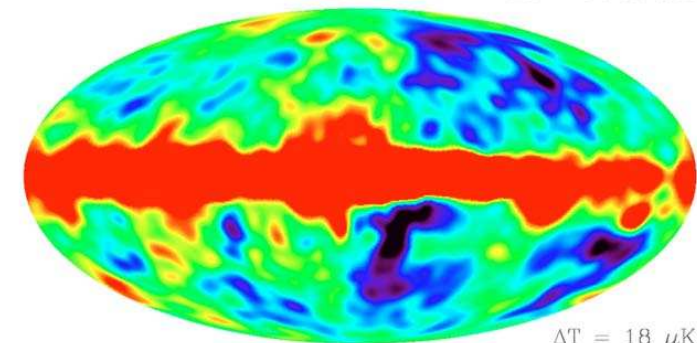
DMR 53 GHz Maps



$T = 2.728 \text{ K}$



$\Delta T = 3.353 \text{ mK}$



$\Delta T = 18 \text{ } \mu\text{K}$

- dipólová anizotropie (1976): špionážní letadlo U-2:

$$\Delta T \sim 3 \text{ mK}$$

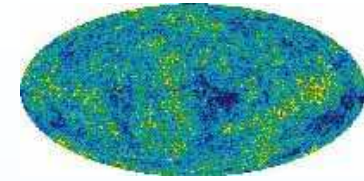
způsobena pohybem Země 300 km/s a Dopplerovým jevem

- družice COBE (start 18.11.1989): odchylky teploty

$$\Delta T \sim 20 \text{ } \mu\text{K}$$

řádu  $10^{-5}$ : zárodky struktur, které vedly ke vzniku hvězd a galaxií

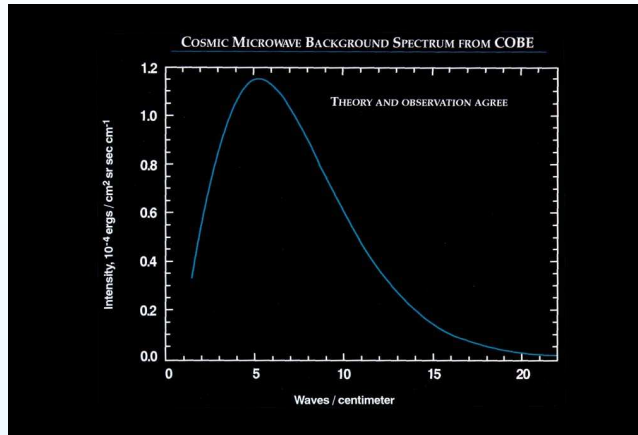
# hlavní výsledky družice COBE



- reliktní záření má dokonale planckovské spektrum

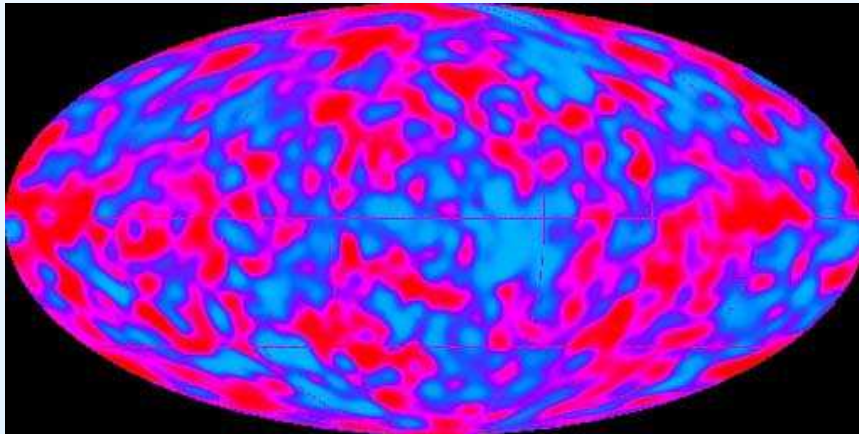


Max Planck

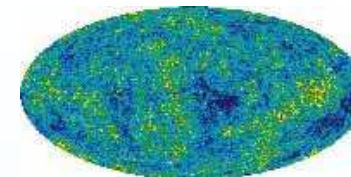


křivka záření absolutně černého tělesa

- vykazuje drobné anizotropie řádu  $10^{-5}$ : zárodky struktur



# Nobelova cena za fyziku 2006



The Nobel Prize in Physics 2006  
John C. Mather, George F. Smoot

The Nobel Prize in Physics 2006

Nobel Prize Award Ceremony

John C. Mather

George F. Smoot



Photo: P. Izzo

John C. Mather



Photo: J. Bauer

George F. Smoot

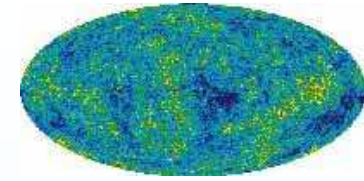
The Nobel Prize in Physics 2006 was awarded jointly to John C. Mather and George F. Smoot *"for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"*

Photos: Copyright © The Nobel Foundation

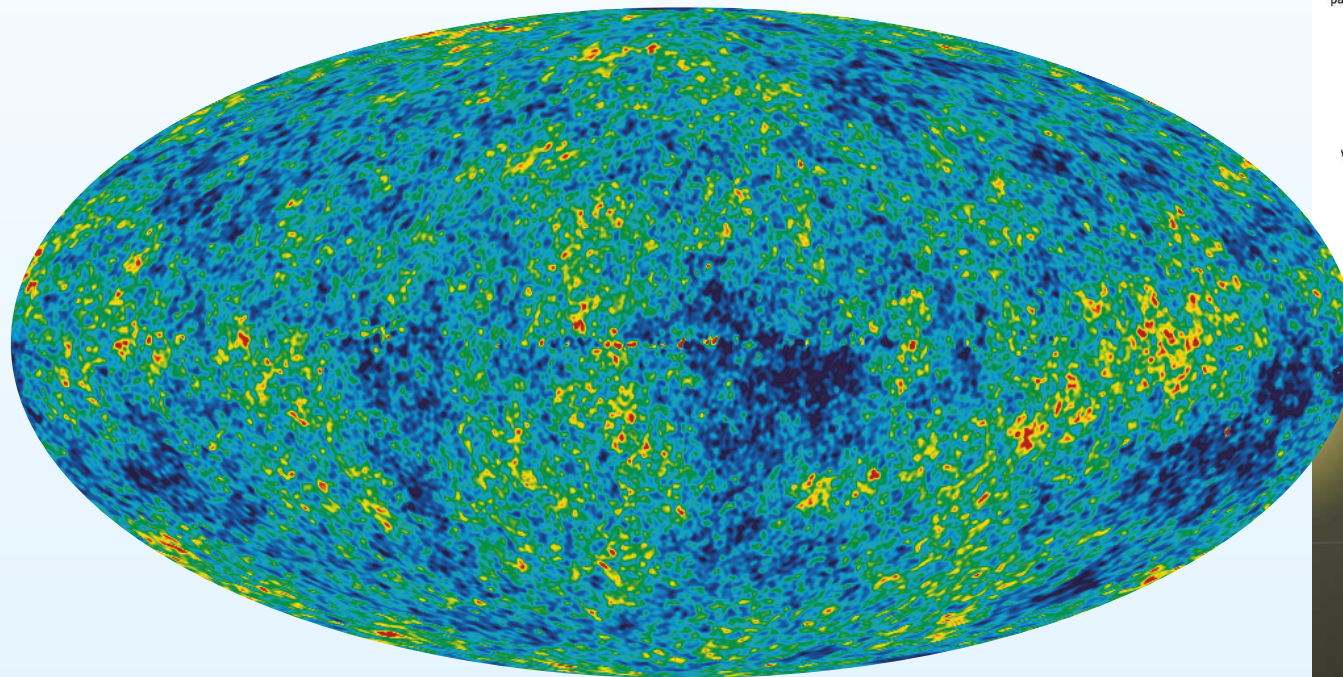
John C. Mather a George F. Smoot

za objev planckovského charakteru  
a anizotropie reliktního záření  
kosmického mikrovlnného pozadí

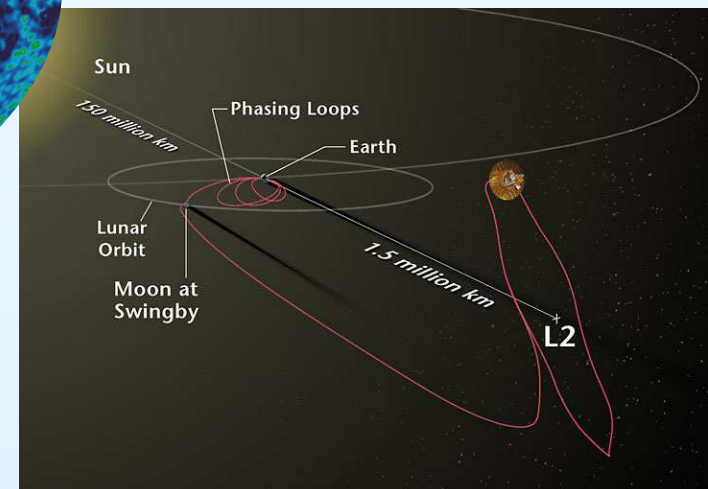
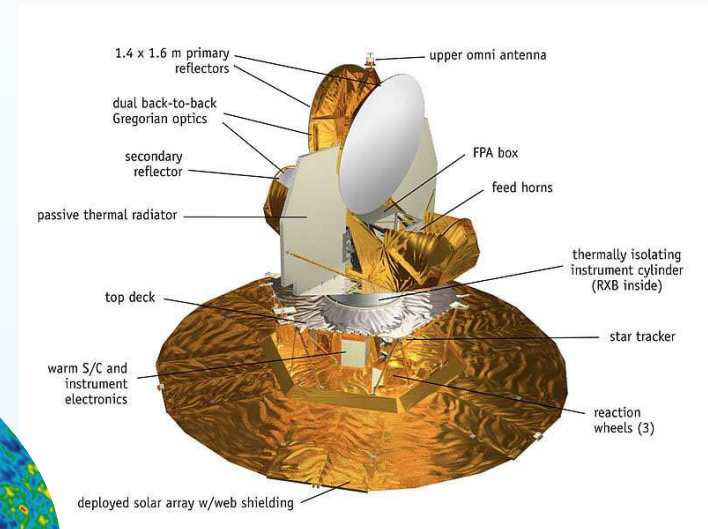
# družice WMAP



výsledky COBE byly potvrzeny a skvěle upřesněny **družicí WMAP** (start 30.6.2001):

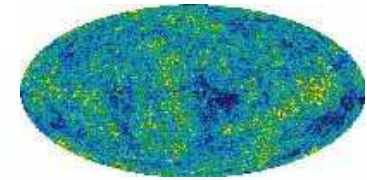




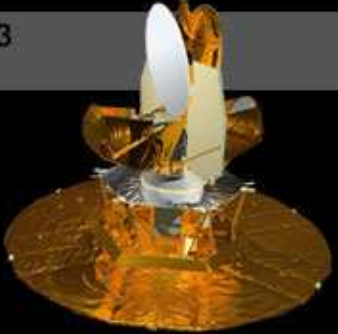
-200 T( $\mu$ K) +200 WMAP 5-year

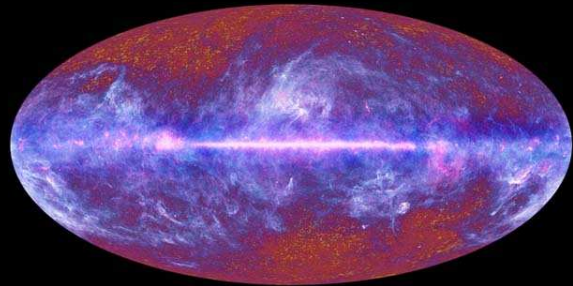
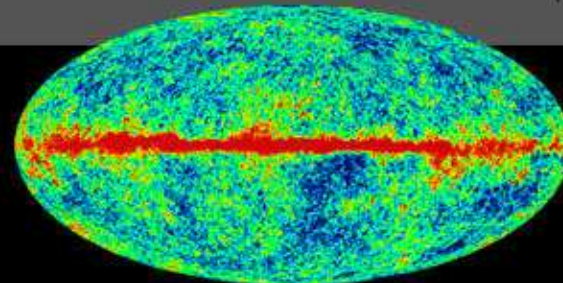
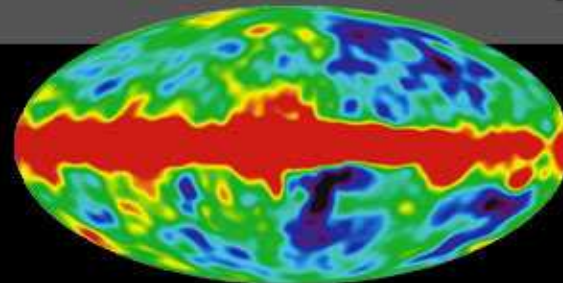
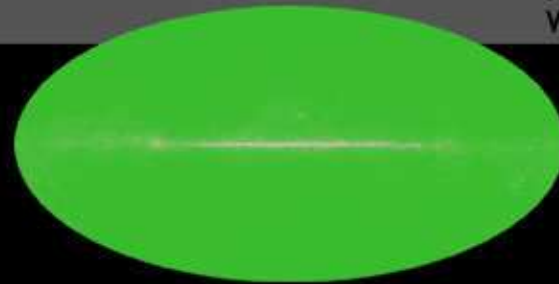





# porovnání rozlišení



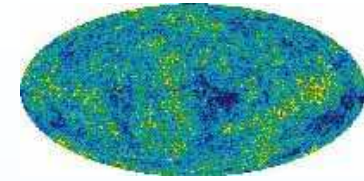
1965		Penzias and Wilson
1992		COBE
2003		WMAP



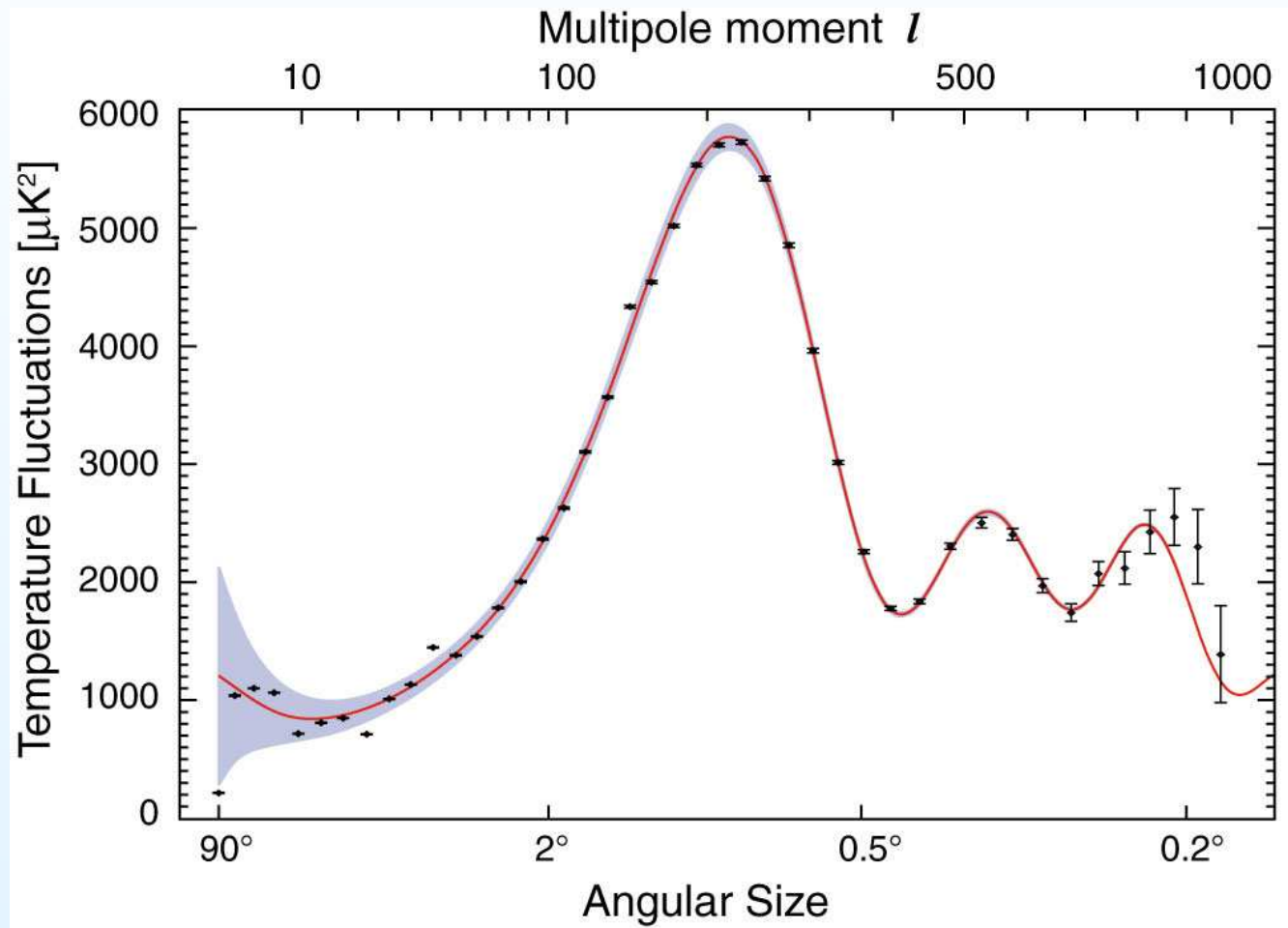
The Planck one-year all-sky survey  (c) ESA, ICFI and LFI consortia, July 2010

2010 evropská družice Planck (start 14.5.2009):

# rozbor dat z družice WMAP



poloha, výška a šířka akustických píků závisí na fyzikálních podmínkách



poloha 1.píku: křivost  $\Omega_k$   
výška 1.píku:  $\Omega_b + \Omega_{dm}$   
podíly lichých a sudých  
píků:  $\Omega_b$   
atd.

z odchylek reliktního záření na různých úhlových škálách lze určit parametry vesmíru:

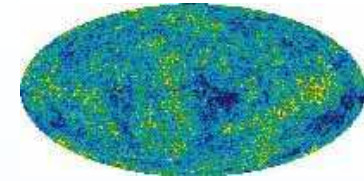
# stáří, rychlost rozpínání, geometrie a složení vesmíru

- **základní parametry vesmíru** (výsledky sedmiletého měření WMAP+BAO+SN):
  - velký třesk se odehrál před  $13,75 \pm 0,11$  miliardami let
  - Hubbleova konstanta  $H$  je dnes  $70,4 \pm 1,3$  km/s/Mpc
  - celková hustota vesmíru je  $1,002 \pm 0,005$
  - rudý posuv oddělení reliktního záření od hmoty je  $z = 1091 \pm 1$
  - oddělení (rekombinace) nastalo  $376 \pm 3$  tisíce let po velkém třesku
  - čas reionizace (zážeh hvězd) je  $432 \pm 90$  milionů let po velkém třesku
- **ve vesmíru je kromě obvyklé hmoty také “temná hmota” a “temná energie”:**
  - **atomy a částice: 5 %**  $4,6 \pm 0,1$  %
  - **temná hmota: 23 %**  $22,7 \pm 0,2$  %
  - **temná energie: 72 %**  $72,7 \pm 1,5$  %

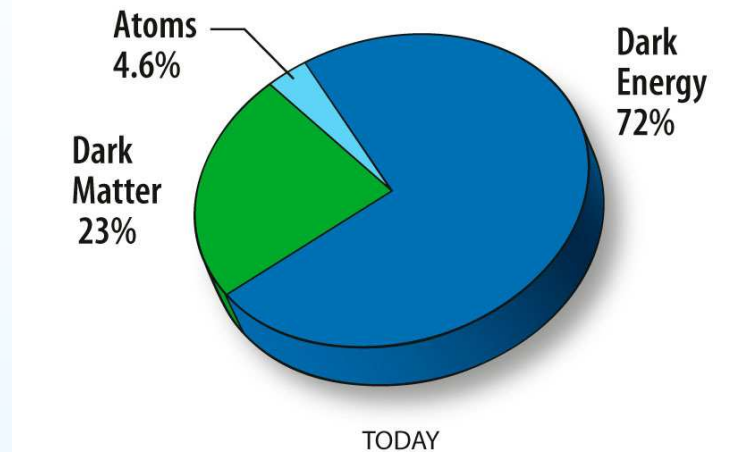
obvyklá hmota tedy tvoří jen nepatrnou součást celého vesmíru!

stavová rovnice temné energie je  $p = w\rho$ , kde  $w = -0,99 \pm 0,06$ ,  
přičemž  $w = -1$  odpovídá kosmologické konstantě  $\Lambda$
- díky “temné energii” alias kosmologické konstantě **vesmír zrychluje rozpínání**

# hmotný obsah vesmíru

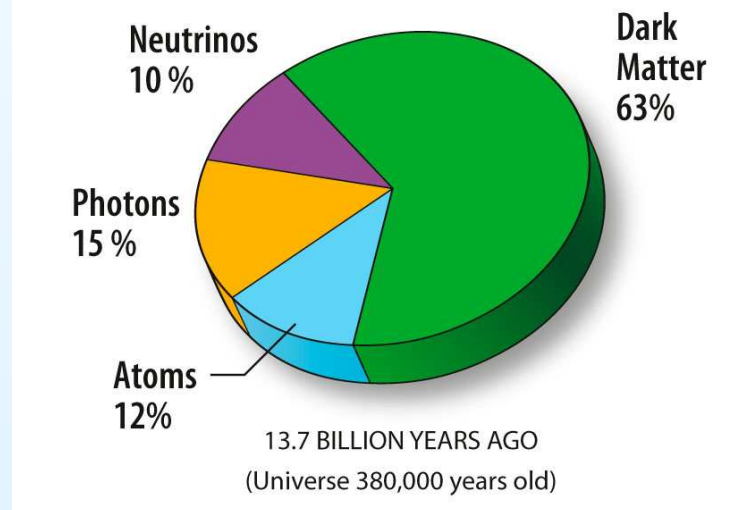


- dnes: atomy  
temná hmota



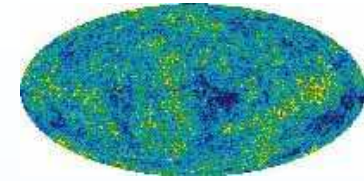
temná energie

- kdysi: neutrina  
fotony  
atomy



temná hmota

# kosmologické FLRW modely



Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker a další (20. léta):

**prostor je homogenní a izotropní** (má 6 symetrií)  $\Rightarrow$  konstantní křivost

$$ds^2 = - dt^2 + R^2(t) \left( \frac{dr^2}{1 - k r^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right)$$

$k = 0, +1, -1$  odpovídá geometrii  $E^3, S^3, H^3$

**expanze vesmíru** popsána funkcí  $R(t)$ , jež řeší rovnici

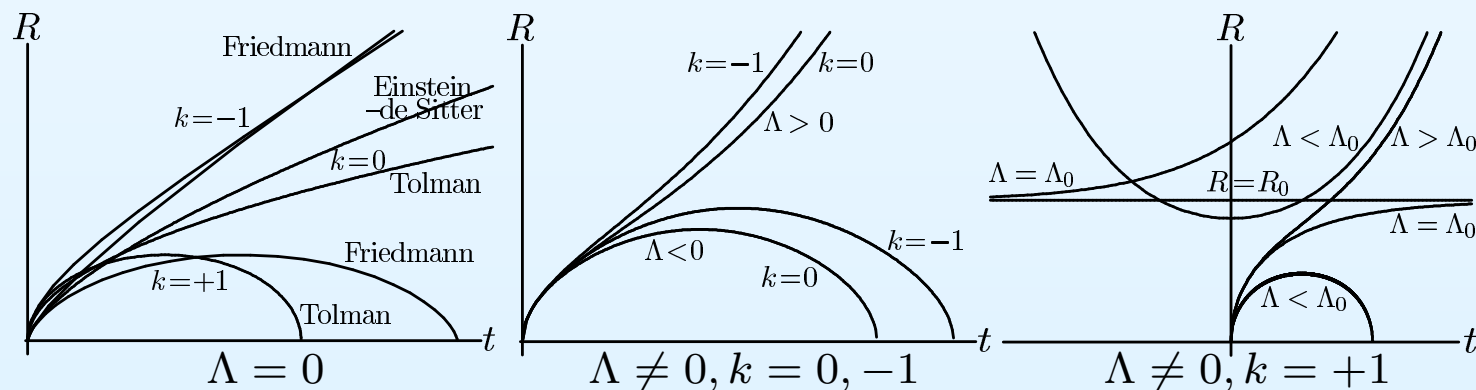
$$\left( \frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{\Lambda}{3} - \frac{k}{R^2} + \frac{8\pi}{3} \left( \frac{\text{prach}}{R^3} + \frac{\text{záření}}{R^4} \right)$$

↑  
kosmologická  
konstanta

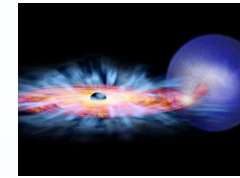
↑  
křivost  
prostoru

↑  
hustota hmoty

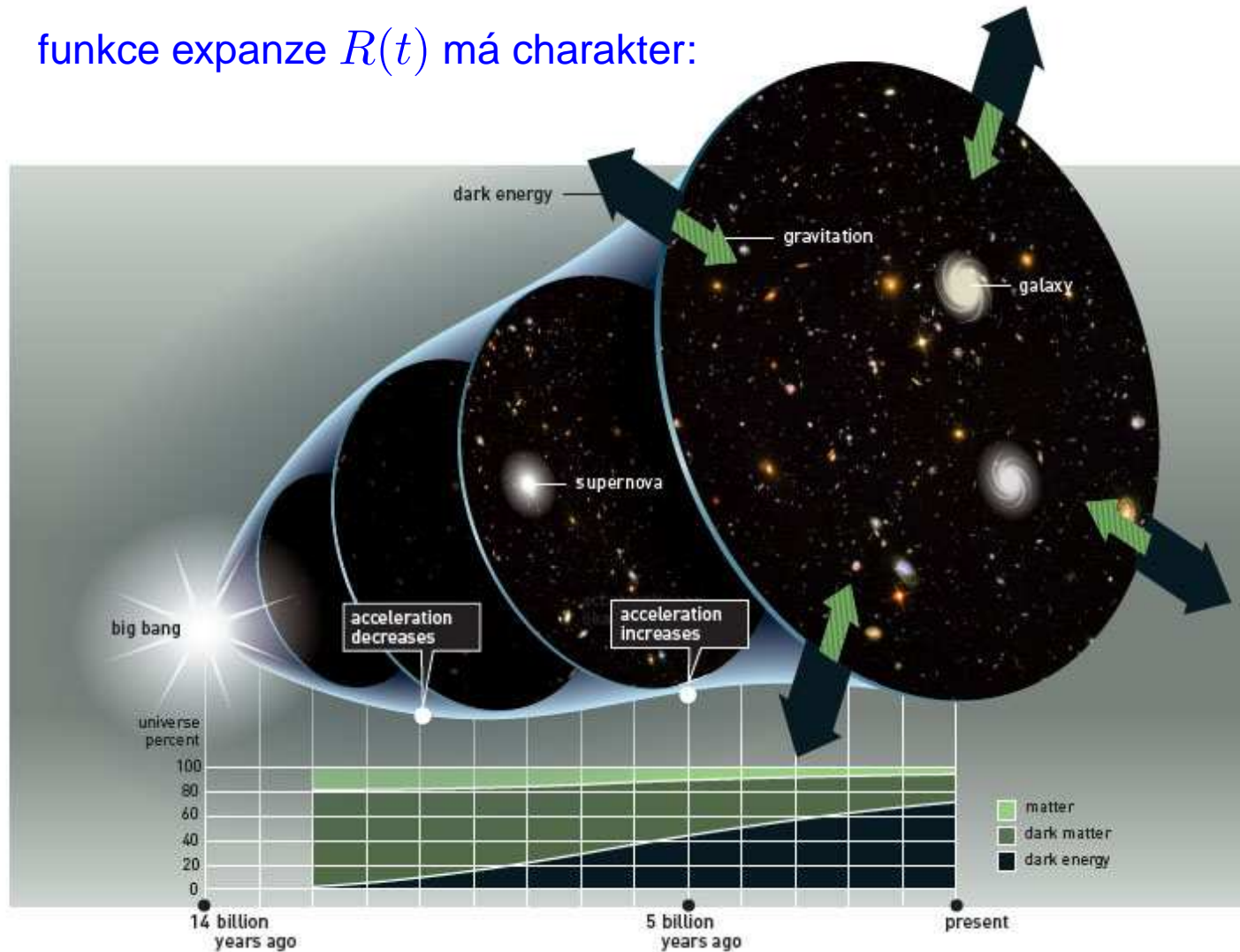
**typická řešení:** expanze z velkého třesku v  $R = 0$  (singularita),  $R(t \rightarrow \infty) \sim \exp\left(\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} t\right)$



# vesmír zrychluje své rozpínání

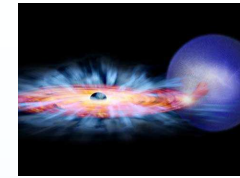


funkce expanze  $R(t)$  má charakter:



poprvé prokázáno v roce 1998 pozorováním vzdálených supernov: **Nobelova cena 2011**

# Nobelova cena za fyziku 2011



The Nobel Prize in Physics 2011  
Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess

## The Nobel Prize in Physics 2011

Nobel Prize Award Ceremony

Saul Perlmutter

Brian P. Schmidt

Adam G. Riess



Photo: U. Montan

Saul Perlmutter



Photo: U. Montan

Brian P. Schmidt



Photo: U. Montan

Adam G. Riess

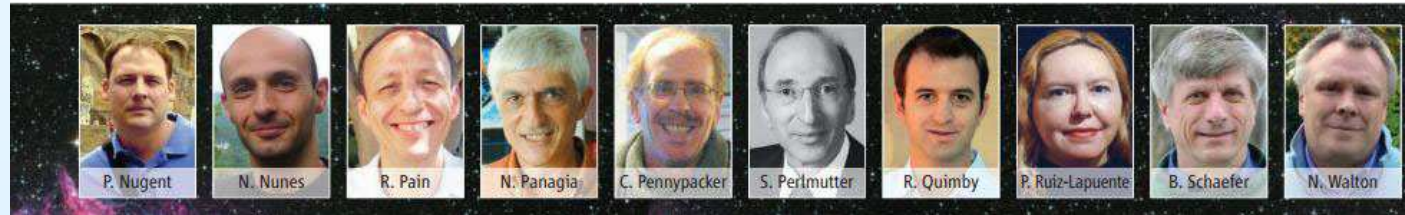
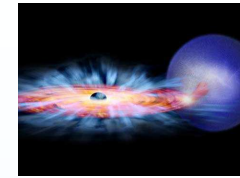
The Nobel Prize in Physics 2011 was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess *"for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"*.

Photos: Copyright © The Nobel Foundation

Saul Perlmutter,  
Brian P. Schmidt a Adam G. Riess

za objev zrychlující expanze vesmíru  
pozorováním vzdálených supernov

# reprezentují dva konkurenční týmy:

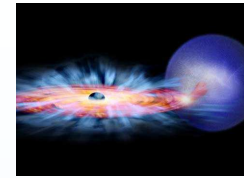


**HZT**  
High-z  
Supernova Search  
Team

**SCP**  
Supernova  
Cosmology  
Project



# zánik hvězd

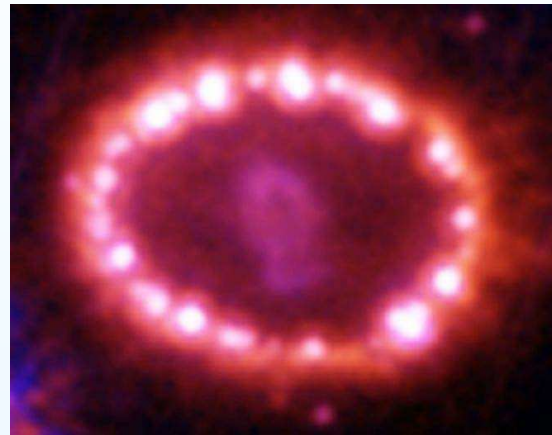


bílý trpaslík



planetární mlhovina Helix

neutronová hvězda



supernova 1987A

černá díra

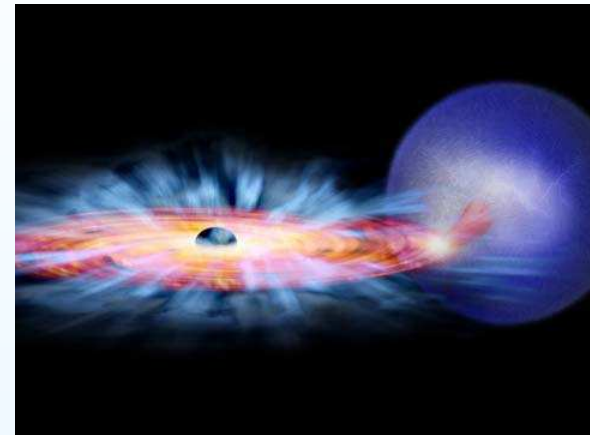
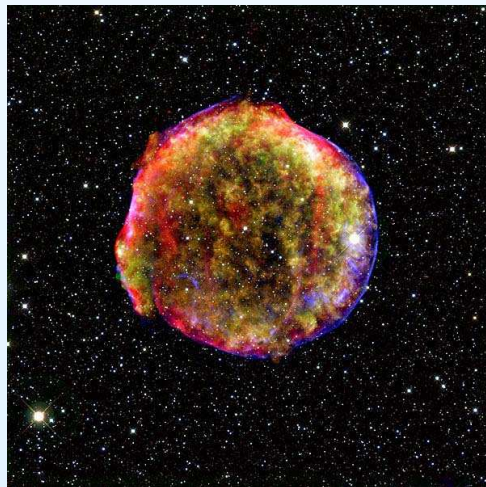
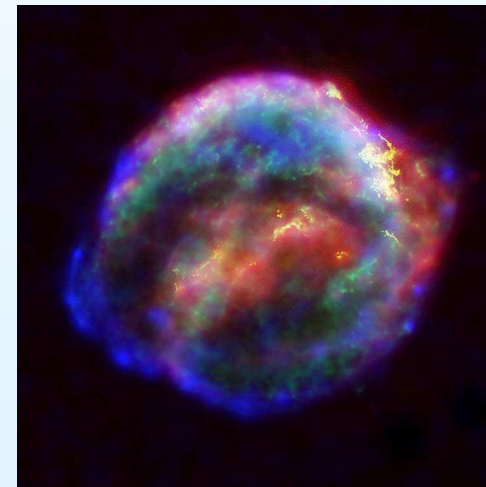


schéma binární soustavy

výbuch supernovy

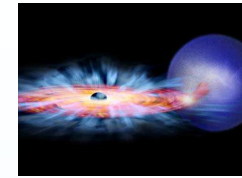


Tychonova supernova (1572)

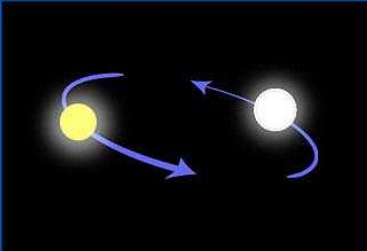
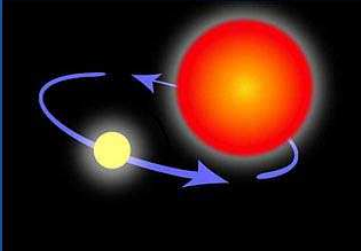
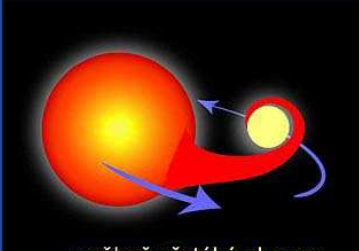
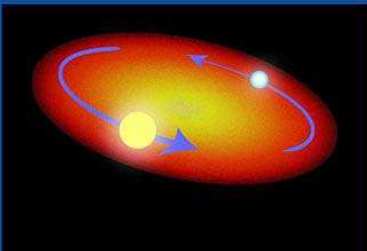

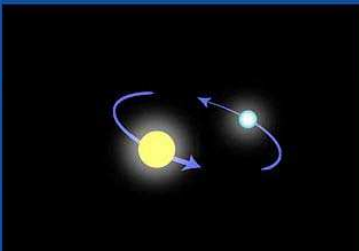

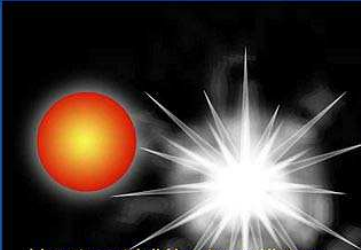
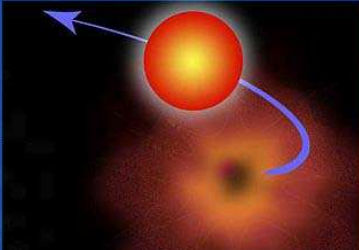


Keplerova supernova (1604)

# supernovy typu Ia (např. Tychonova)



## Vznik supernovy typu Ia

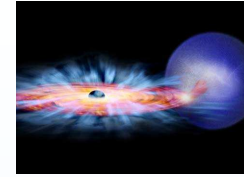
 <p>Dvě hvězdy hlavní posloupnosti tvoří složky dvojhvězdy.</p>	 <p>Hmotnější hvězda se stává rudým obrem...</p>	 <p>...z něhož přetéká plyn na druhou hvězdu, která expanduje a je plynem zcela obklopena.</p>
 <p>Druhá, jasnější hvězda a jádro rudého obra se pohybují po spirále ve společné obálce.</p>	 <p>Společná obálka je odmrštěna, zatímco vzájemná vzdálenost mezi druhou hvězdou a jádrem se zmenší.</p>	 <p>Zbylé jádro obra se zhroutí a stane bílým trpaslíkem.</p>
 <p>Stárnoucí hvězdný průvodce se začíná rozpínat, plyn přetéká na bílého trpaslíka.</p>	 <p>Hmotnost bílého trpaslíka se zvětšuje, až nakonec dosáhne kritické meze a exploduje...</p>	 <p>...a odmrští svého hvězdného průvodce pryč.</p>

dají se dobře použít jako "standardní svíčky" k určení kosmických vzdáleností



když hmota přetékající z druhé hvězdy překročí kritickou mez  $1,4 M_{\odot}$  (blízkou Chandrasekharově mezi) bílý trpaslík vybuchne jako supernova  
všechny ostatní typy: kolaps jádra hvězdy

# pozorování supernov ve vzdálených galaxiích

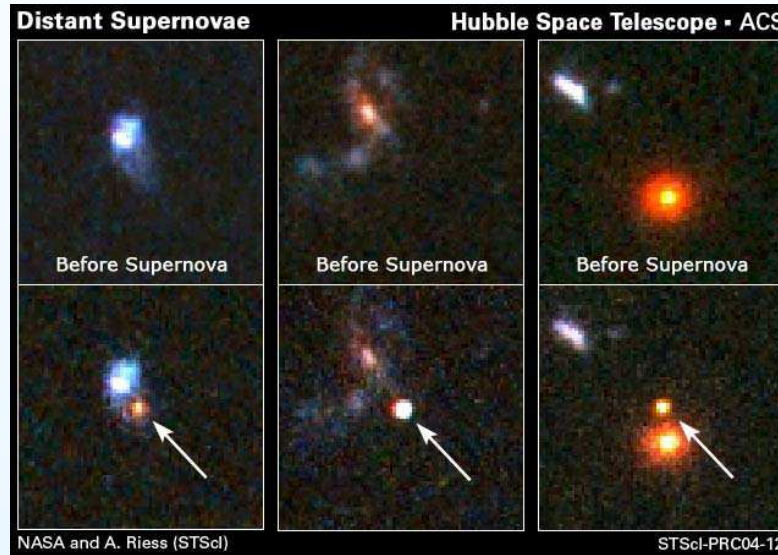


oba týmy používají největší teleskopy a CCD detektory

Keckův  $\varnothing$  10 m (Havaj), Cerro Tololo  $\varnothing$  4 m, ESO  $\varnothing$  3,6 m (Chile), Hubbleův kosmický atd.

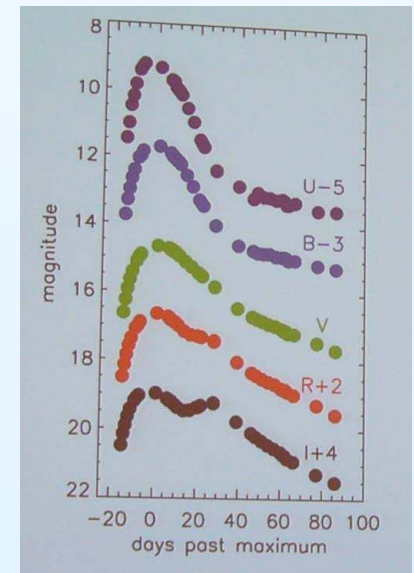


supernova SN1994D v NGC 4526



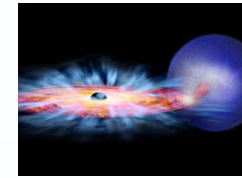
ukázky supernov pozorovaných z HST

po objevu nutno měřit jejich spektra a změny zářivosti v několika oborech



světelné křivky: rozpad  $^{56}\text{Ni}$

# revoluční článek týmu HZT: září 1998



THE ASTRONOMICAL JOURNAL, 116:1009–1038, 1998 September

© 1998. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

## OBSERVATIONAL EVIDENCE FROM SUPERNOVAE FOR AN ACCELERATING UNIVERSE AND A COSMOLOGICAL CONSTANT

ADAM G. RIESS,<sup>1</sup> ALEXEI V. FILIPPENKO,<sup>1</sup> PETER CHALLIS,<sup>2</sup> ALEJANDRO CLOCCHIATTI,<sup>3</sup> ALAN DIERCKS,<sup>4</sup>  
PETER M. GARNAVICH,<sup>2</sup> RON L. GILLILAND,<sup>5</sup> CRAIG J. HOGAN,<sup>4</sup> SAURABH JHA,<sup>2</sup> ROBERT P. KIRSHNER,<sup>2</sup>  
B. LEIBUNDGUT,<sup>6</sup> M. M. PHILLIPS,<sup>7</sup> DAVID REISS,<sup>4</sup> BRIAN P. SCHMIDT,<sup>8,9</sup> ROBERT A. SCHOMMER,<sup>7</sup>  
R. CHRIS SMITH,<sup>7,10</sup> J. SPYROMILIO,<sup>6</sup> CHRISTOPHER STUBBS,<sup>4</sup>  
NICHOLAS B. SUNTZEFF,<sup>7</sup> AND JOHN TONRY<sup>11</sup>

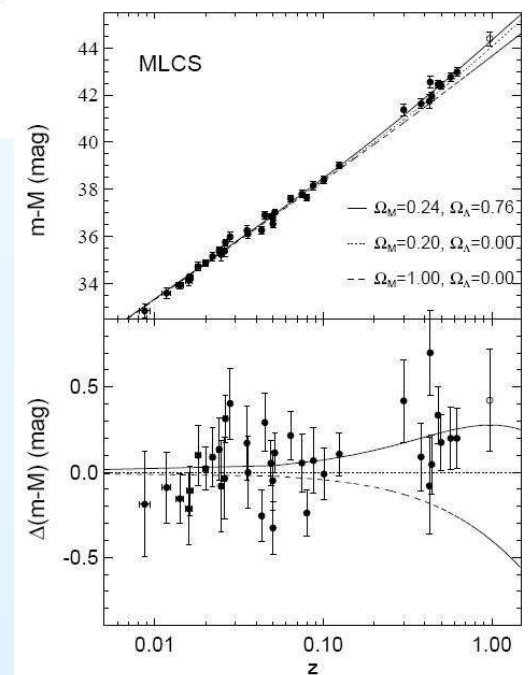
Received 1998 March 13; revised 1998 May 6

analýza 16+34 supernov až do  $z \approx 0,6$

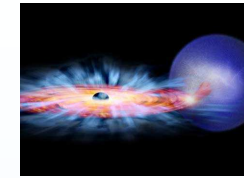
rudý posuv  $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$  kde  $\lambda$  je vlnová délka světla

přičemž  $z + 1 = \frac{R(t_0)}{R(t)}$

$z = 0,1 \approx 1$  mld světelných let,  $z = 1 \approx 8$  mld světelných let



# analogický článek týmu SCP: červen 1999



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 517:565–586, 1999 June 1  
© 1999. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

## MEASUREMENTS OF $\Omega$ AND $\Lambda$ FROM 42 HIGH-REDSHIFT SUPERNOVAE

S. PERLMUTTER,<sup>1</sup> G. ALDERING, G. GOLDBABER,<sup>1</sup> R. A. KNOP, P. NUGENT, P. G. CASTRO,<sup>2</sup> S. DEUSTUA, S. FABBRO,<sup>3</sup>  
A. GOOBAR,<sup>4</sup> D. E. GROOM, I. M. HOOK,<sup>5</sup> A. G. KIM,<sup>1,6</sup> M. Y. KIM, J. C. LEE,<sup>7</sup> N. J. NUNES,<sup>2</sup> R. PAIN,<sup>3</sup>  
C. R. PENNYPACKER,<sup>8</sup> AND R. QUIMBY

Institute for Nuclear and Particle Astrophysics, E. O. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720

C. LIDMAN

European Southern Observatory, La Silla, Chile

R. S. ELLIS, M. IRWIN, AND R. G. MCMAHON  
Institute of Astronomy, Cambridge, England, UK

P. RUIZ-LAPUENTE

Department of Astronomy, University of Barcelona, Barcelona, Spain

N. WALTON

Isaac Newton Group, La Palma, Spain

B. SCHAEFER

Department of Astronomy, Yale University, New Haven, CT

B. J. BOYLE

Anglo-Australian Observatory, Sydney, Australia

A. V. FILIPPENKO AND T. MATHESON

Department of Astronomy, University of California, Berkeley, CA

A. S. FRUCHTER AND N. PANAGIA<sup>9</sup>

Space Telescope Science Institute, Baltimore, MD

H. J. M. NEWBERG

Fermi National Laboratory, Batavia, IL

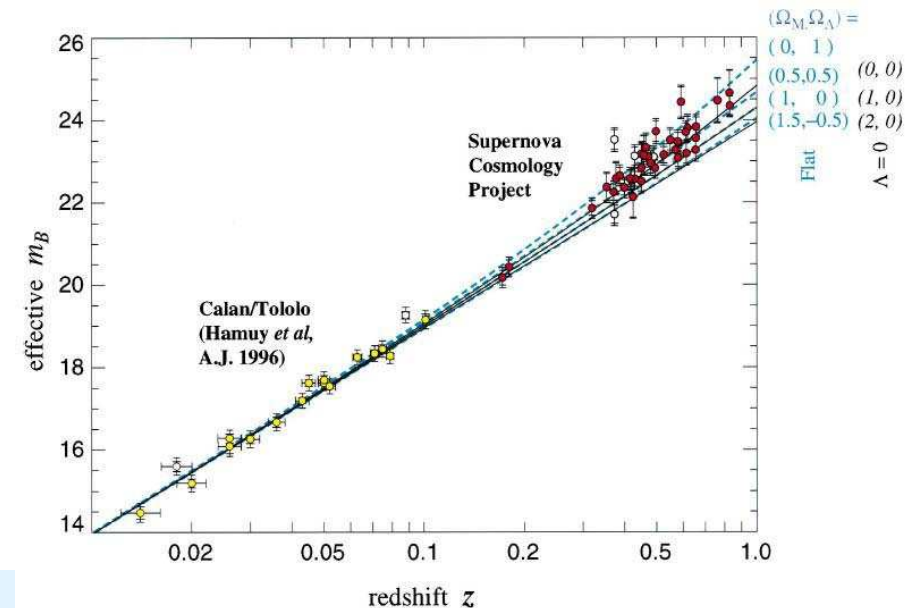
AND

W. J. COUCH

University of New South Wales, Sydney, Australia

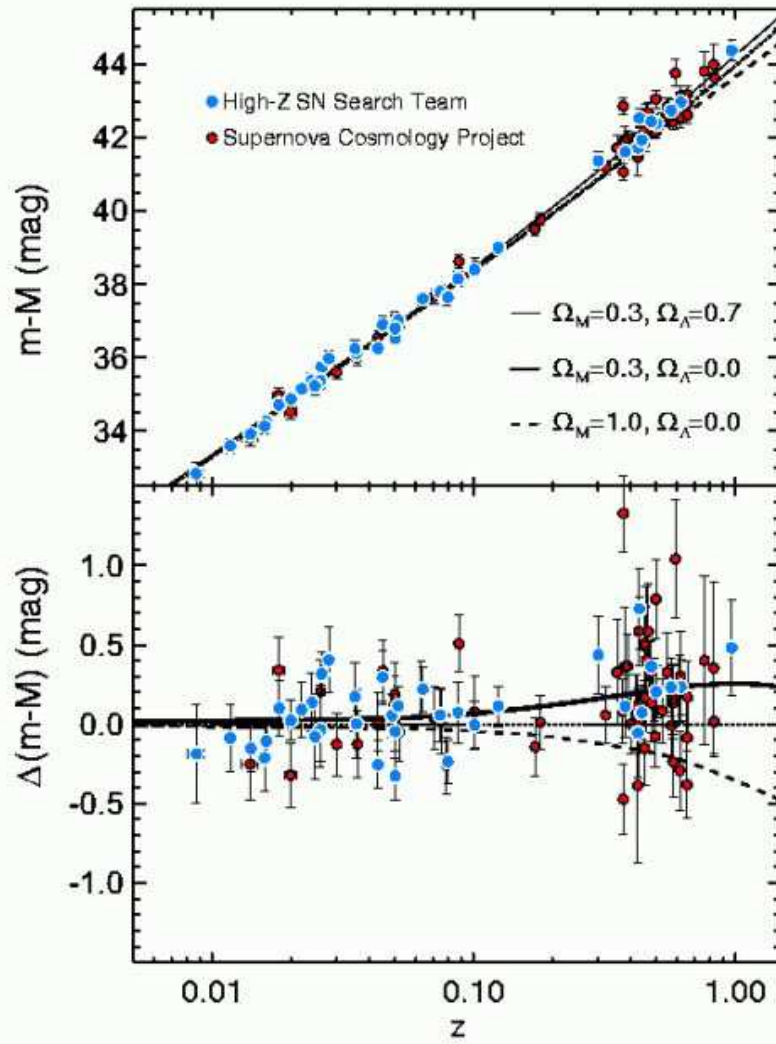
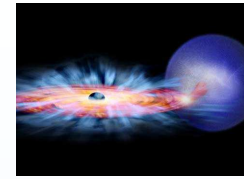
(THE SUPERNOVA COSMOLOGY PROJECT)

Received 1998 September 8; accepted 1998 December 17



analýza 42+18 supernov až do  $z \approx 0,8$

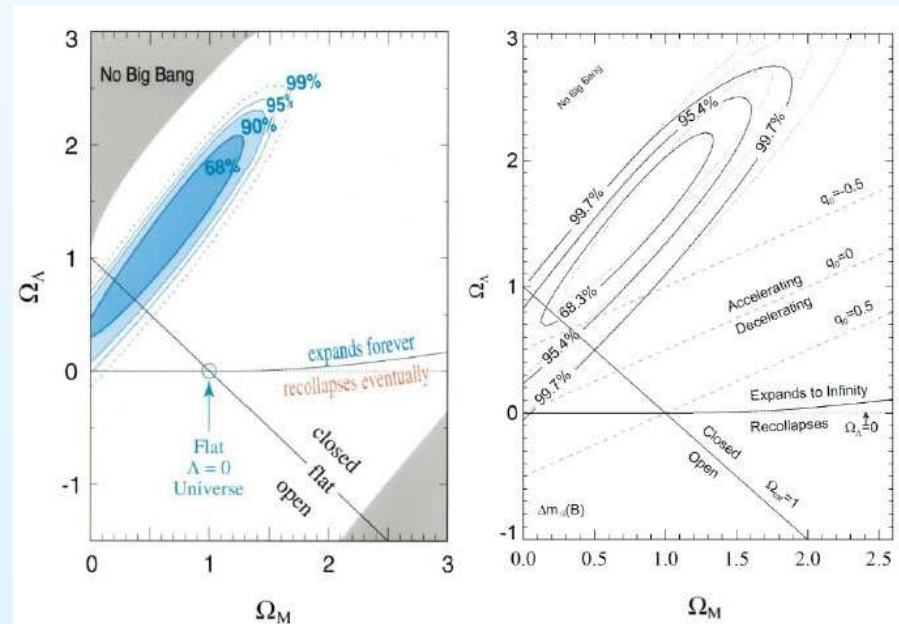
# výsledky obou článků dohromady



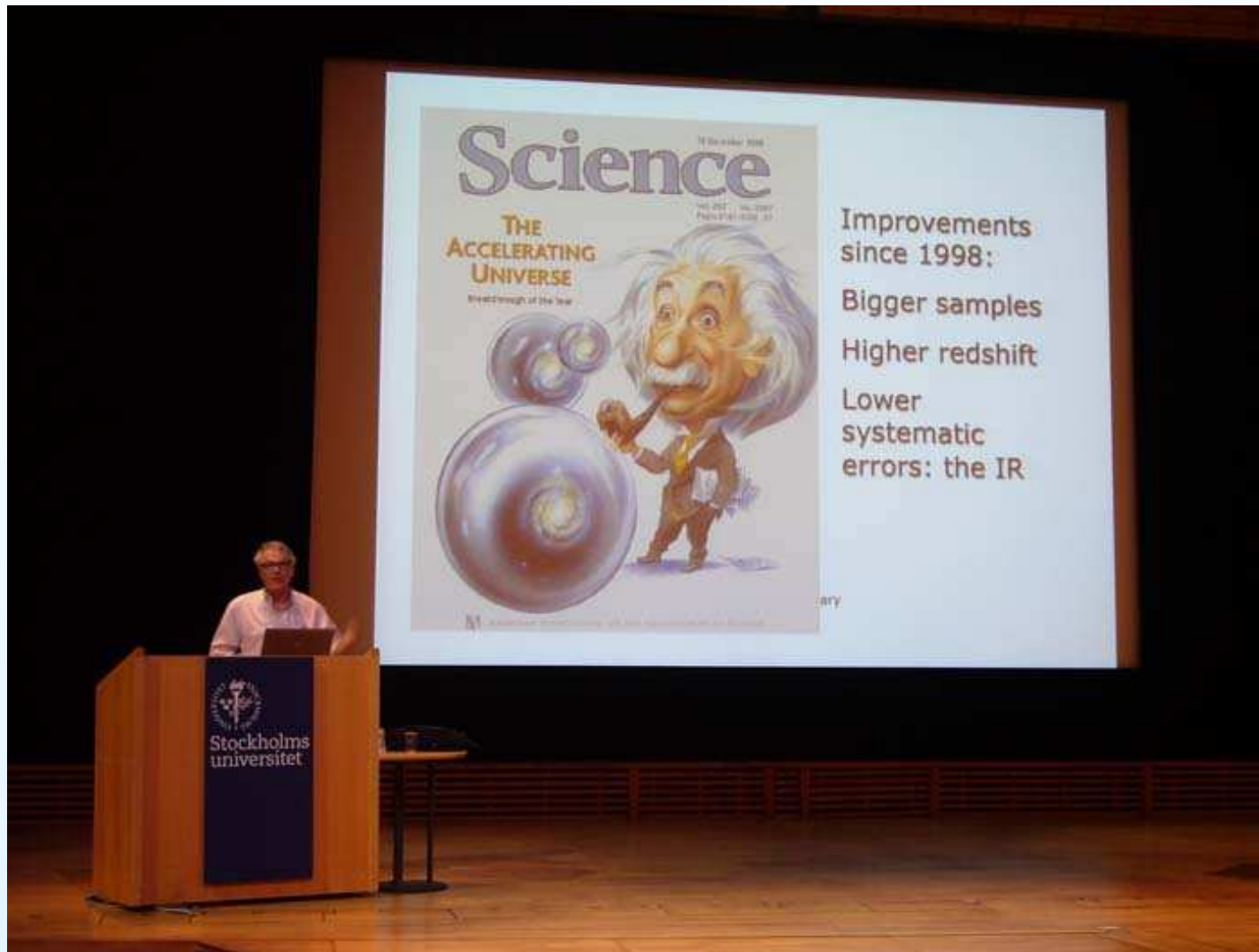
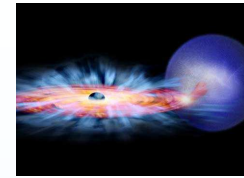
statistická analýza ukázala,  
že datům nejlépe vyhovuje  
kosmologický (plochý) FLRW model:

$\Omega_m = 0,3$  podíl hmoty

$\Omega_\Lambda = 0,7$  podíl kosmologické konstanty  $\Lambda$   
alias "temné energie"



# a co dnes?

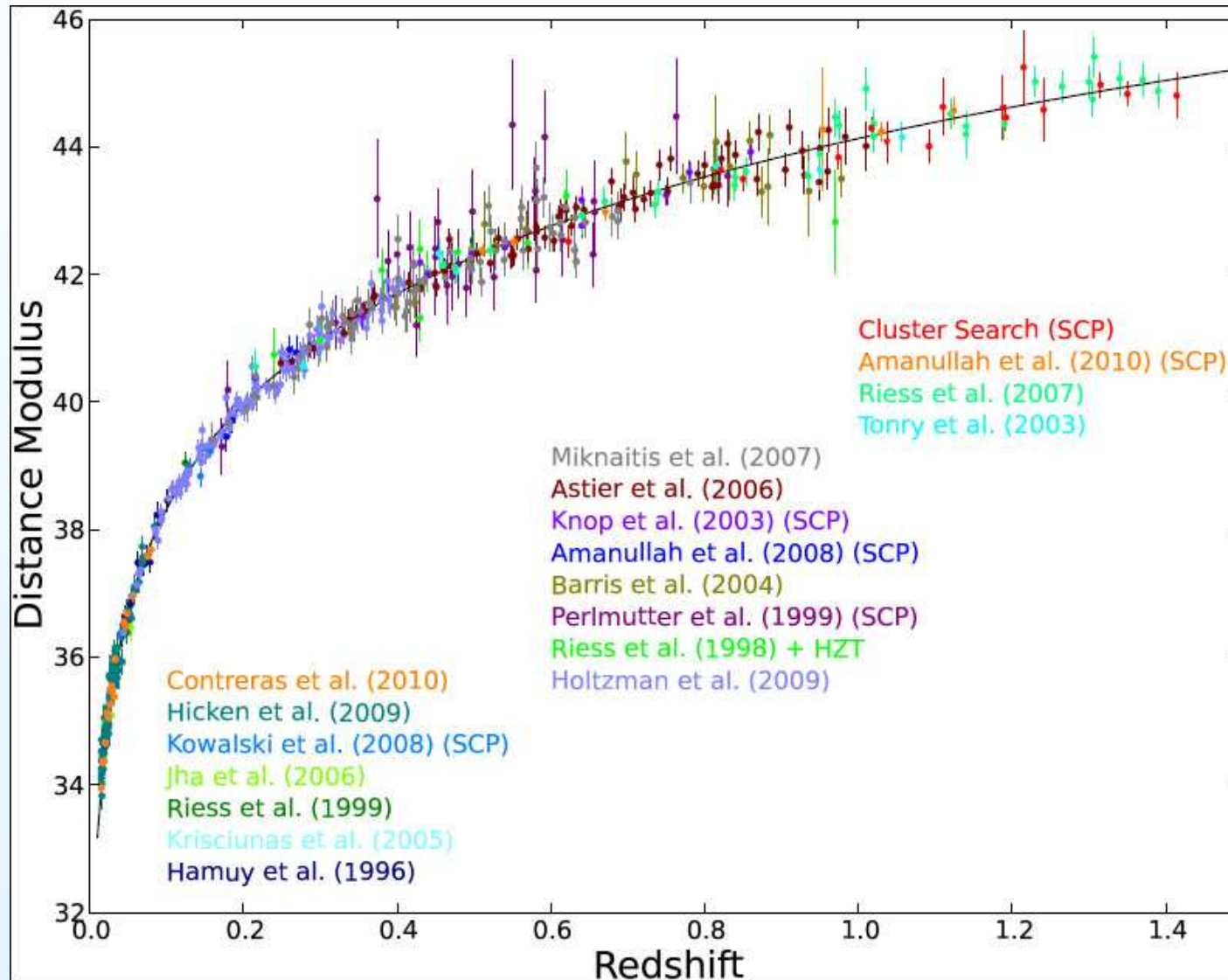
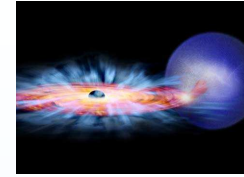


zlepšení od r. 1998:

- více supernov
- větší rudé posuvy
- menší chyby (IR)

Robert P. Kirshner, přednáška na MG13, Stockholm, červenec 2012

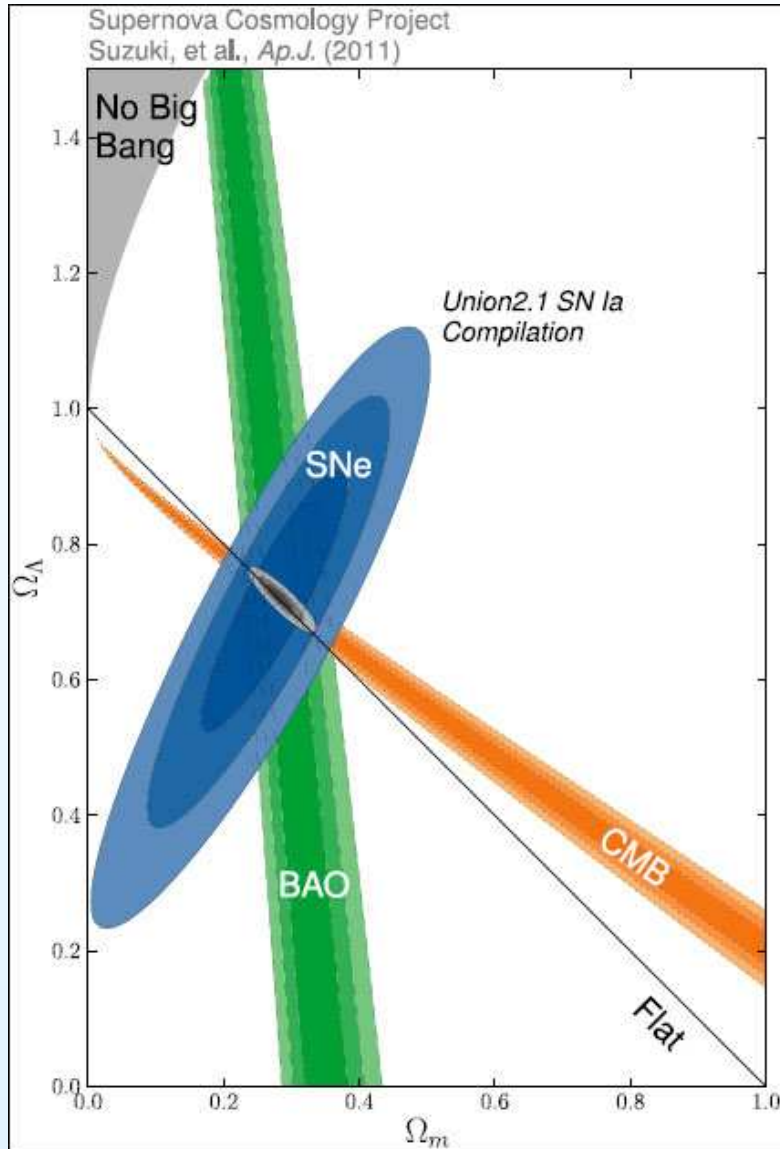
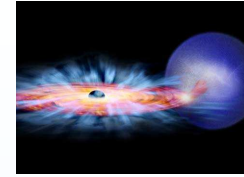
# dnešní stav



pozorováno  
 $\approx 500$  supernov  
až do  
 $z \approx 1,4$



# zcela nezávislé pozorovací metody souhlasí



**CMB** reliktní mikrovlnné záření

**SNe** vzdálné supernovy

**BAO** struktura galaxií a jejich kup

shodují se že:

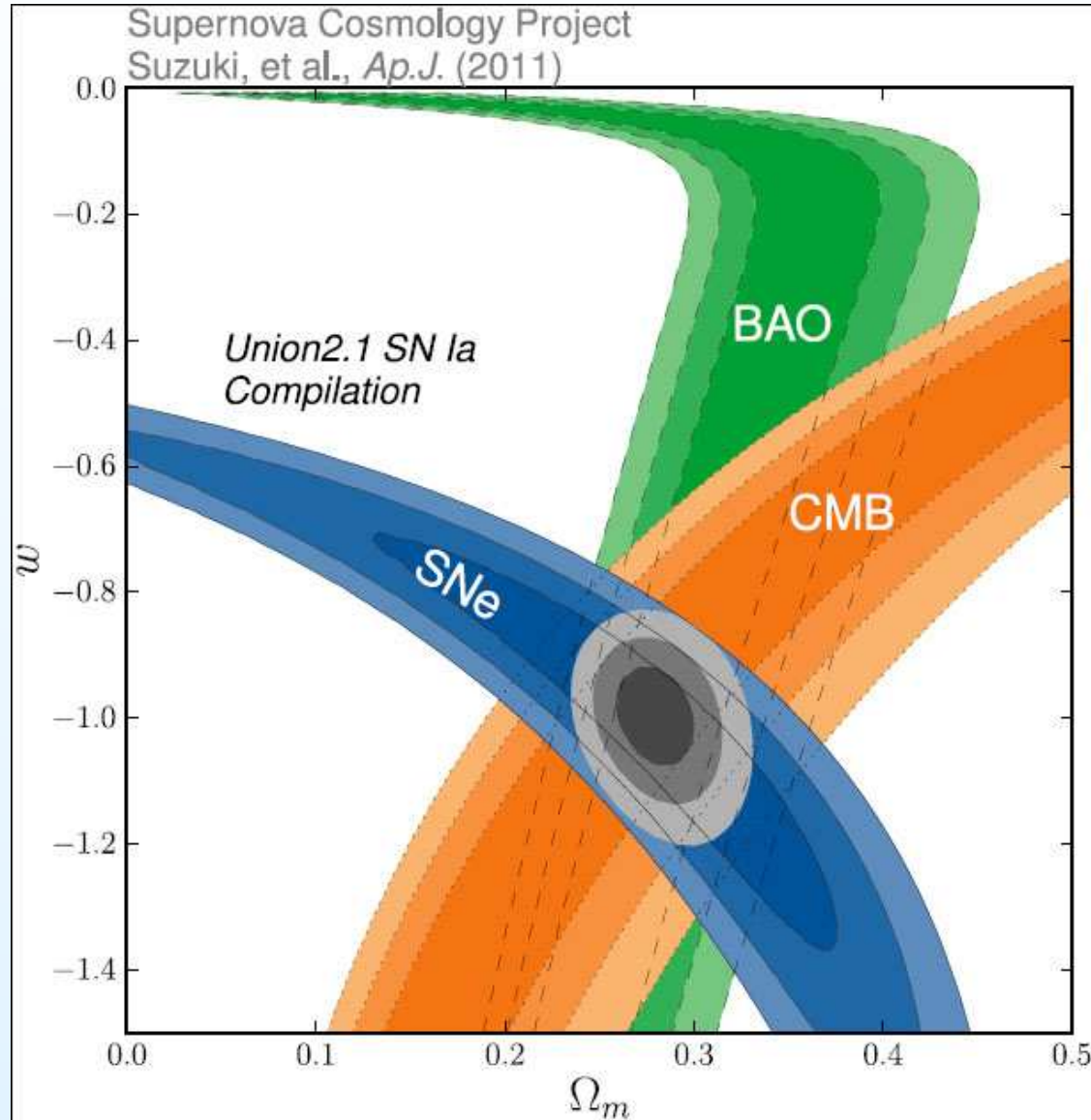
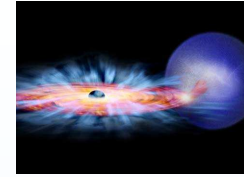
$\Omega_m = 0,28$  podíl hmoty

$\Omega_\Lambda = 0,72$  podíl kosmologické konstanty  $\Lambda$

celková hustota energie je  $\Omega_{celk} = 1$

tedy prostor má plochou geometrii

# temná energie je kosmologická konstanta



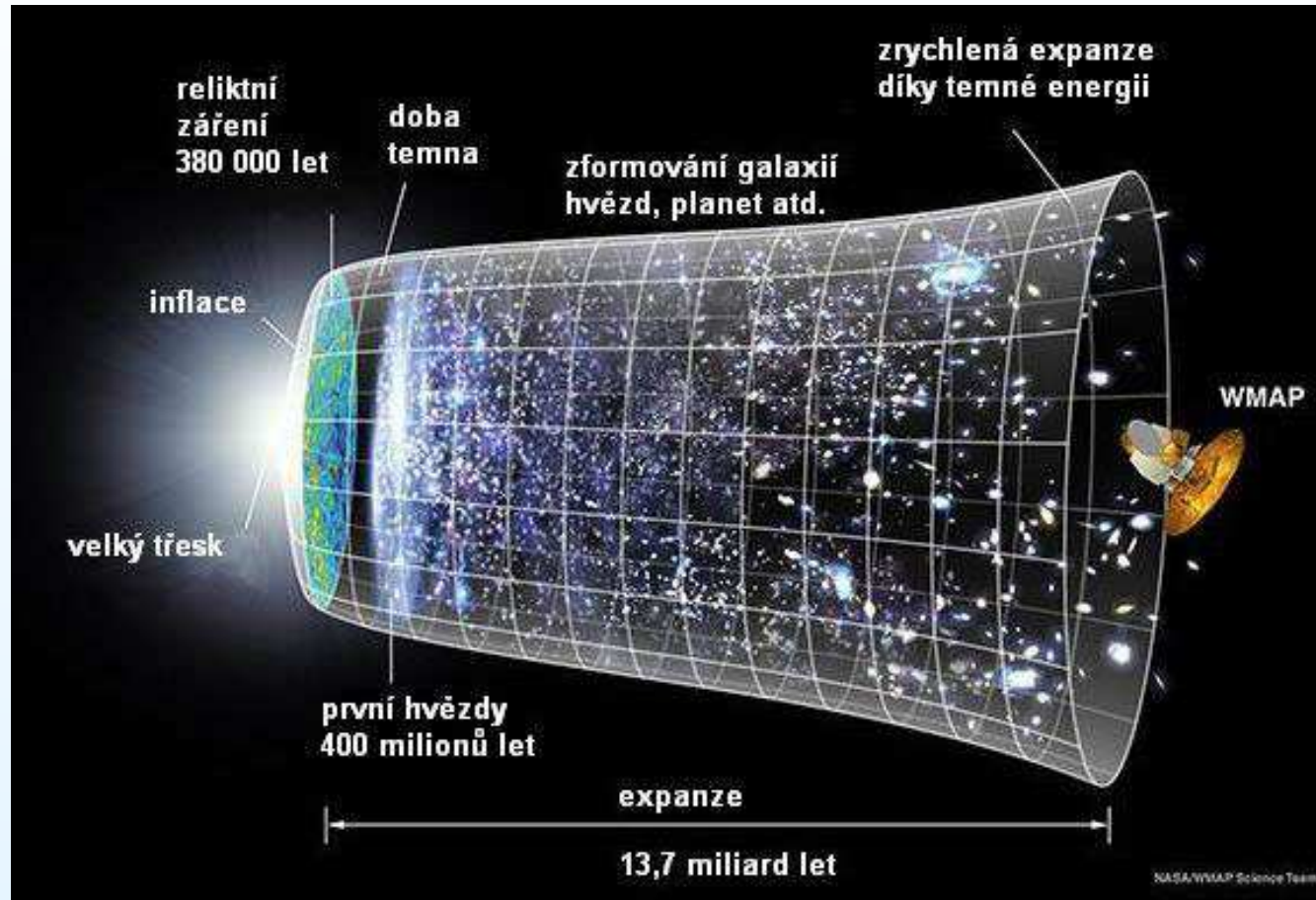
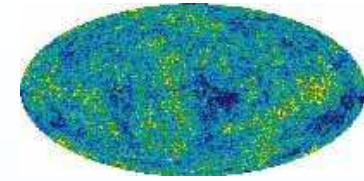
stavová rovnice temné energie je

$$p = w \rho$$

$$w = -0,99 \pm 0,06$$

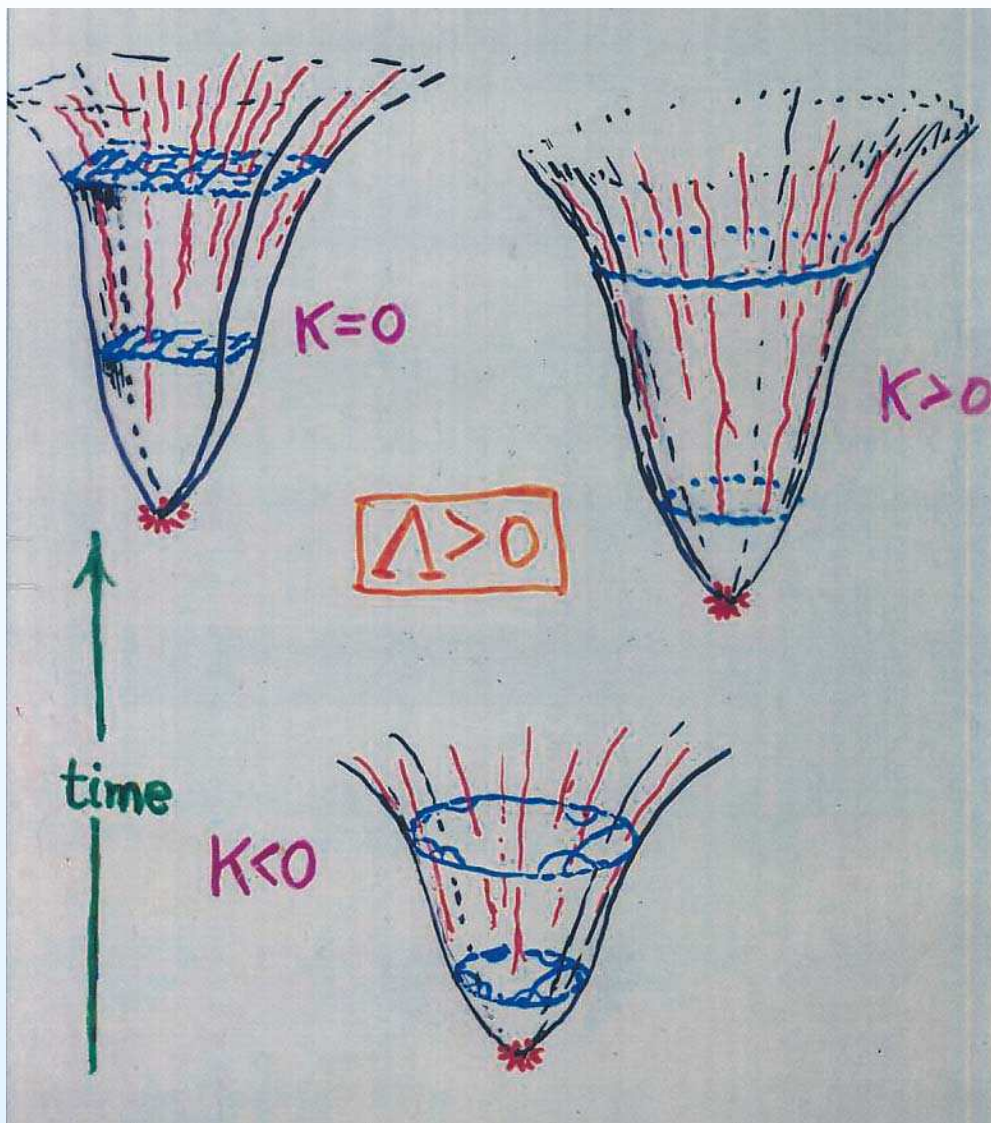
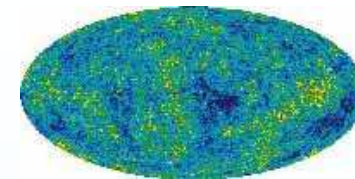
přičemž  $w \equiv -1$  pro  
kosmologickou konstantu  $\Lambda$

# shrnutí dnešního modelu vesmíru: FLRW $\Lambda$ CDM



- globálně homogenní a izotropní prostor expandující 13,7 mld let z velkého třesku
- dnes dominantní kosmologická konstanta (72 %) a nebaryonová temná hmota (23 %)

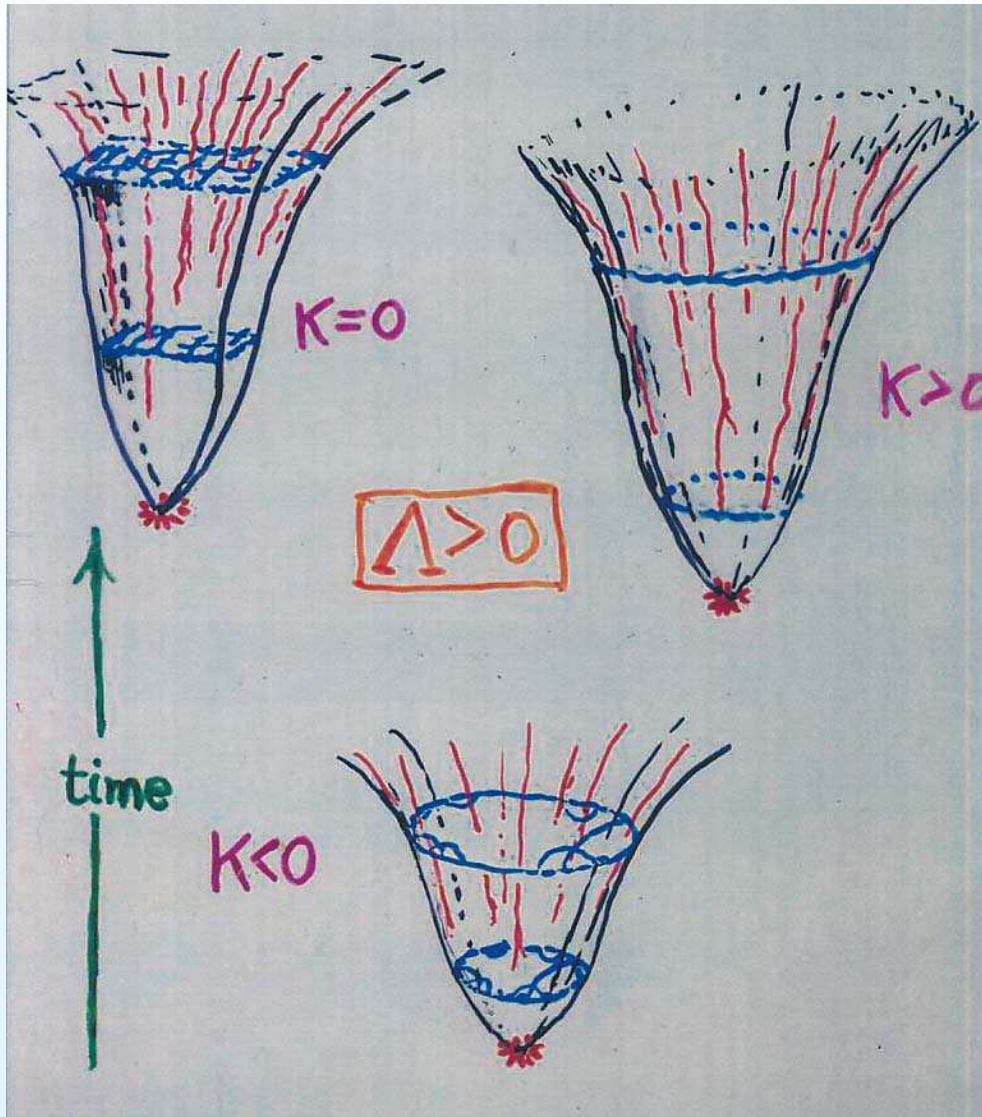
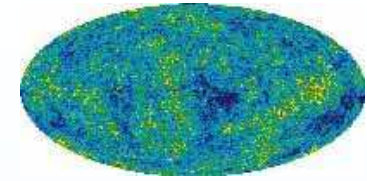
# a budoucnost kosmu?



věčná expanze,  
pusto, mráz a tma ...

tři standardní scénáře dle křivosti prostoru  $K$  (Roger Penrose)

# a budoucnost kosmu?



věčná expanze,  
pusto, mráz a tma ...

užívejme si vesmíru,  
dokud je v něm  
spousta krásných struktur!

tři standardní scénáře dle křivosti prostoru  $K$  (Roger Penrose)

## doporučená literatura

---

- Robert P. Kirshner:  
*Výstřední vesmír: Explodující hvězdy, temná energie a zrychlování kosmu*  
(Paseka, edice Fénix, Praha a Litomyšl, 2005)
  
- Simon Singh:  
*Velký třesk: Nejdůležitější vědecký objev všech dob a proč o něm musíte vědět* (Argo / Dokořán, edice Zip, Praha, 2007)