

# Co všechno (ne)víme o temné hmotě a energii

**Petr Dvořák**

*[petr.dvorak@ceitec.vutbr.cz](mailto:petr.dvorak@ceitec.vutbr.cz)*

# Reference:

Dark Matter: The evidence from astronomy, astrophysics and cosmology

Matts Roos  
Department of Physics, FI-00014 University of Helsinki, Finland

## Cosmology and dark matter

V.A. Rubakov  
Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences.

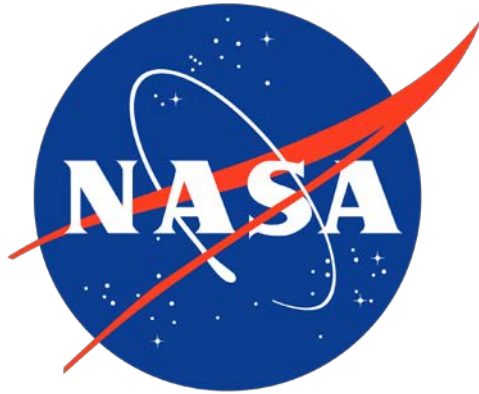
## How dark matter came to matter

J. G. de Swart<sup>1,2,3\*</sup>, G. Bertone<sup>1,3</sup> and J. van Dongen<sup>1,2</sup>

## TECHNICAL REVIEWS

Cosmological simulations of galaxy formation

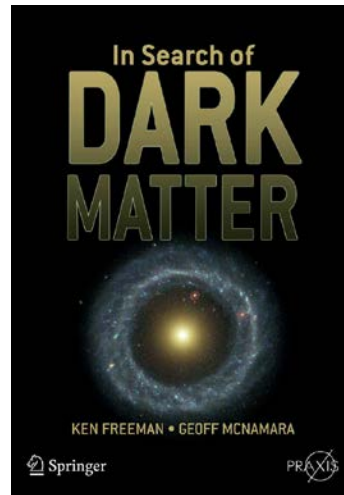
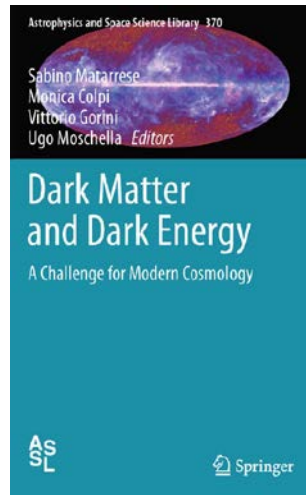
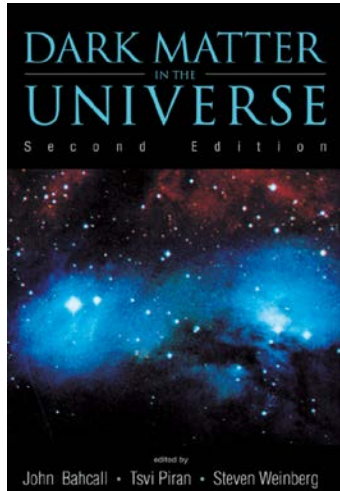
Mark Vogelsberger<sup>1\*</sup>, Federico Marinacci<sup>2</sup>, Paul Torrey<sup>3</sup> and Ewald Puchwein<sup>4</sup>



European Space Agency



Cornell University  
Library

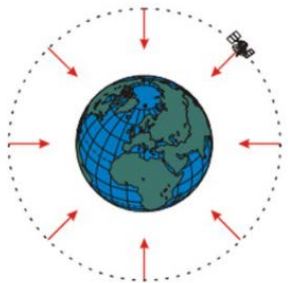


WIKIPEDIA  
The Free Encyclopedia

## Obsah

- Slovníček a úvod do (některých) astrofyzikálních jevů
- Měření hmotnosti galaxií a kup galaxií (první objev **Temné hmoty**)
- Kosmologický model  $\Lambda$ -CDM a reliktní záření
- Měření světelných křivek supernov typu Ia (první objev **Temné energie**)
- Baryonové akustické oscilace a tvorba struktur ve Vesmíru
- Rozložení Temné hmoty pomocí mikročkování a numerických simulací
- Srážky nadkup galaxií a rentgenová spektroskopie
- Kandidáti na Temnou hmotu a Temnou energii

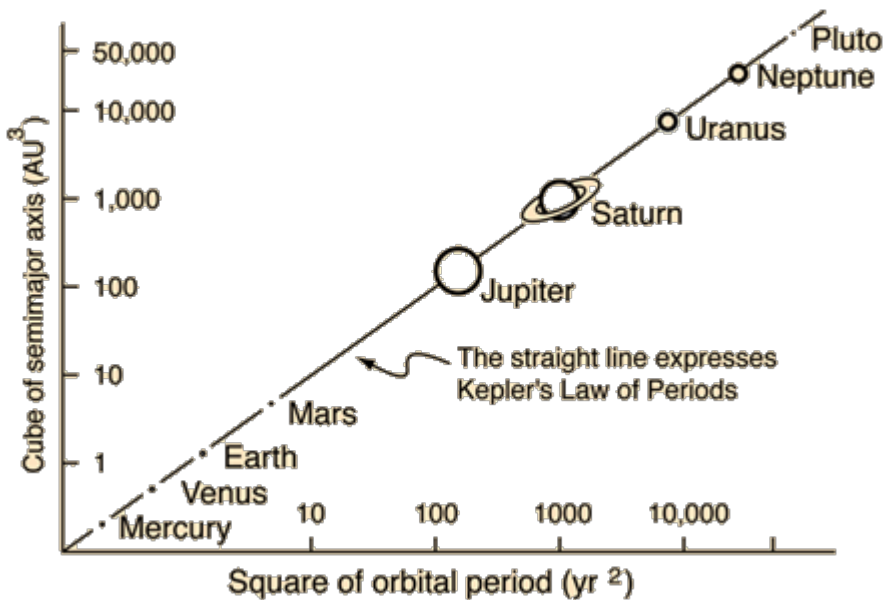
## Keplerův zákon (Isaac Newton)



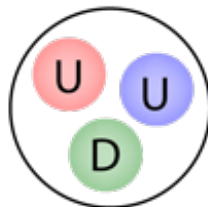
$$m \frac{v^2}{r} = G \frac{mM}{r^2}$$

$$v = GM \frac{1}{\sqrt{r}} \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$$

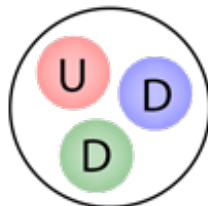
Obvodová rychlost klesá se vzdáleností!



$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G(M+m)}{4\pi^2} \approx \frac{GM}{4\pi^2} \approx 7.496 \cdot 10^{-6} \left( \frac{\text{AU}^3}{\text{days}^2} \right)$$



Proton



Neutron

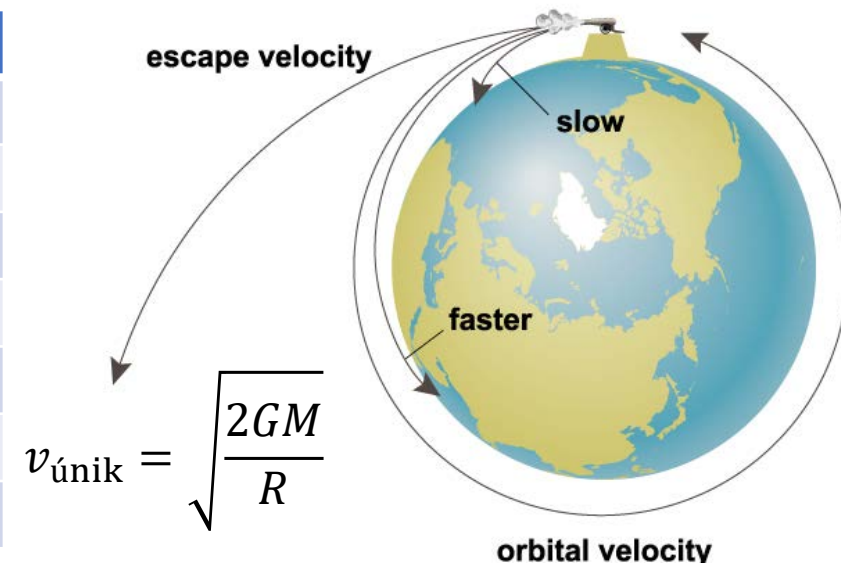
## Baryon a baryonová hmota

- částice složená z lichého počtu kvarků
- nejznámější baryony jsou **protony** a **neutrony**
- nukleony** a **izotopy** prvků

atomová hmotnostní jednotka <sup>d</sup>	u	1,66 · 10 <sup>-27</sup> kg
hmotnost elektronu	m <sub>e</sub>	9,11 · 10 <sup>-31</sup> kg
		5,49 · 10 <sup>-4</sup> u
hmotnost protonu	m <sub>p</sub>	1,67 · 10 <sup>-27</sup> kg
		1,0073 u
poměr hmotností protonu a elektronu	m <sub>p</sub> /m <sub>e</sub>	1840
měrný náboj elektronu	e/m <sub>e</sub>	1,76 · 10 <sup>11</sup> C · kg <sup>-1</sup>
hmotnost neutronu	m <sub>n</sub>	1,67 · 10 <sup>-27</sup> kg
		1,0087 u

## Úniková rychlost

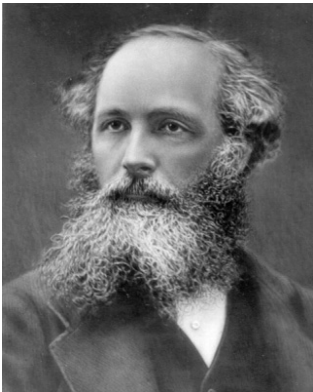
Planeta	Úniková rychlost (km/s)
Země	11,18
Slunce	620
Měsíc	2,40
Jupiter	59,55
Venuše	10,36
Mars	5,03
Saturn	35,51



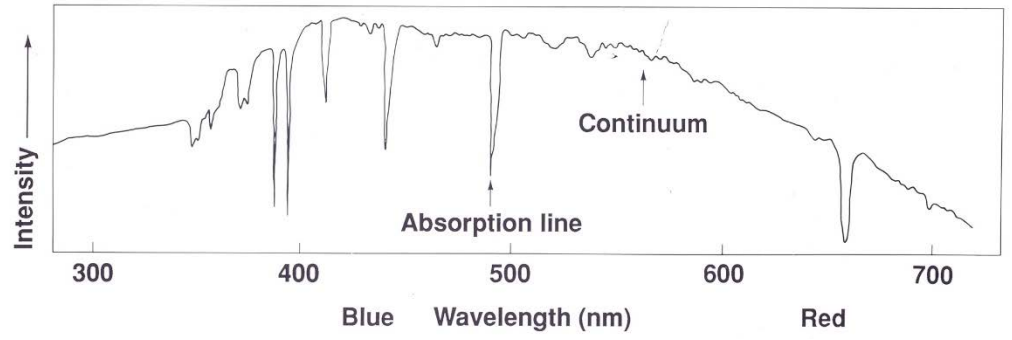
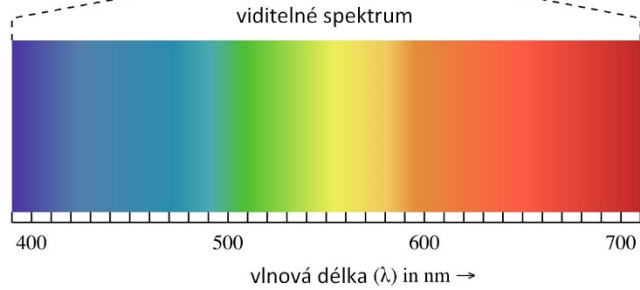
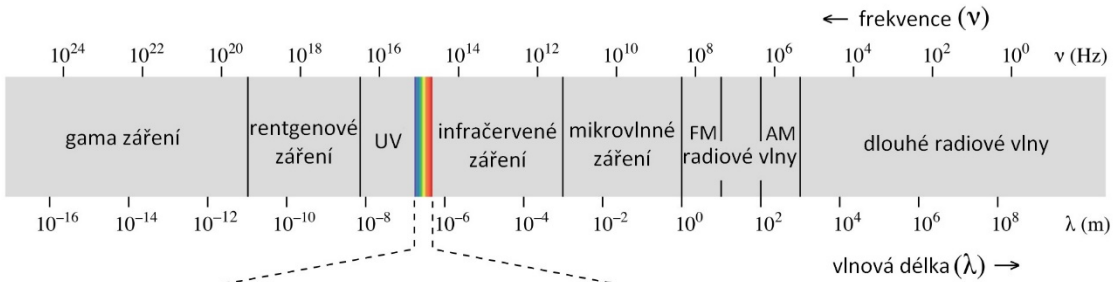
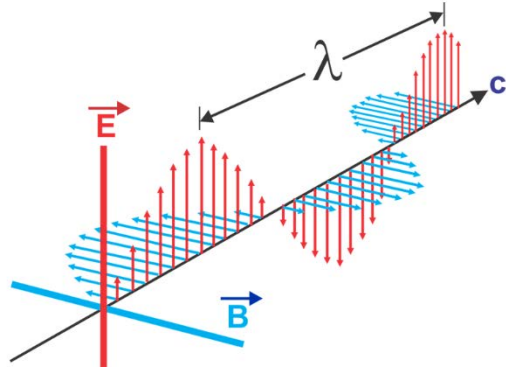
$$v_{\text{únik}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$



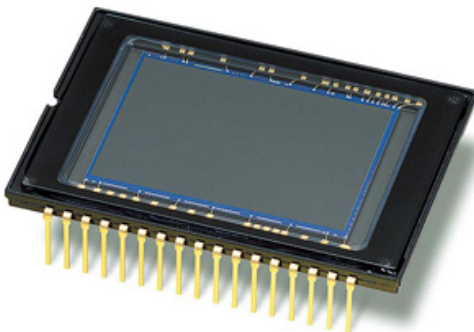
# Elektromagnetické spektrum (1865)



J. C. Maxwell (1831 – 1879)

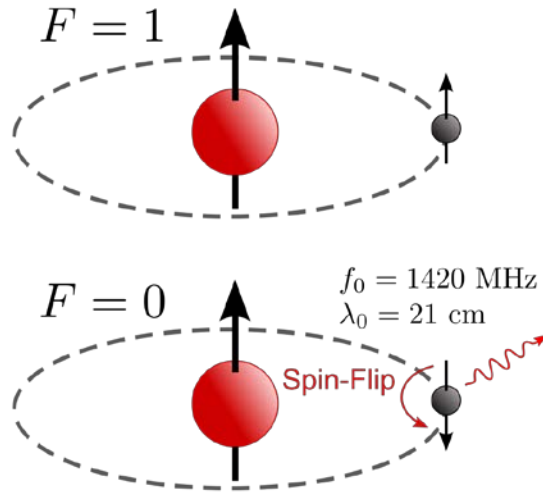


Chandra X-ray Observatory

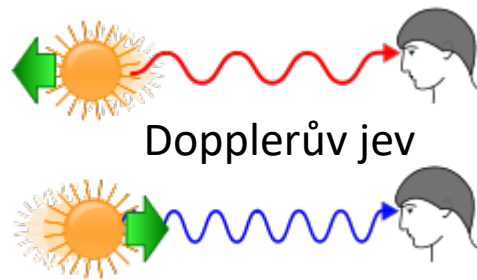


Hartmann, *The Cosmic Journey*, Wadsworth, (1991)

# Detekce neutrálního vodíku



přesněji: 1 420 405 751,7667 Hz

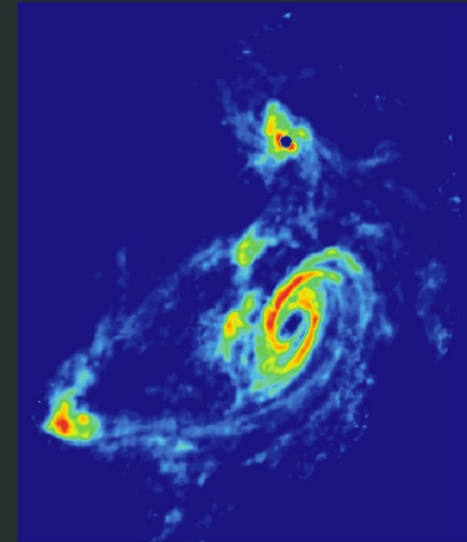


## TIDAL INTERACTIONS IN M81 GROUP

Stellar Light Distribution



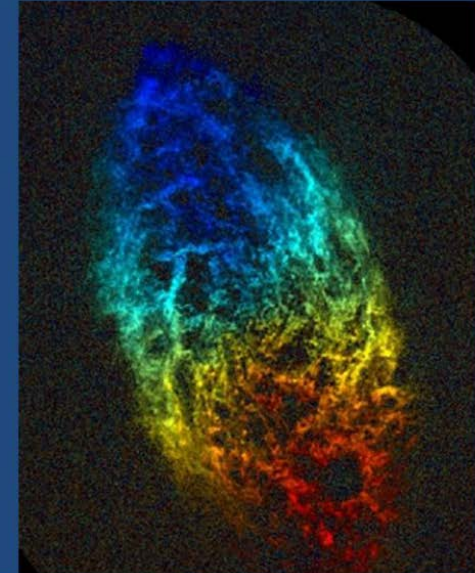
21 cm HI Distribution



Messier 33 – optical

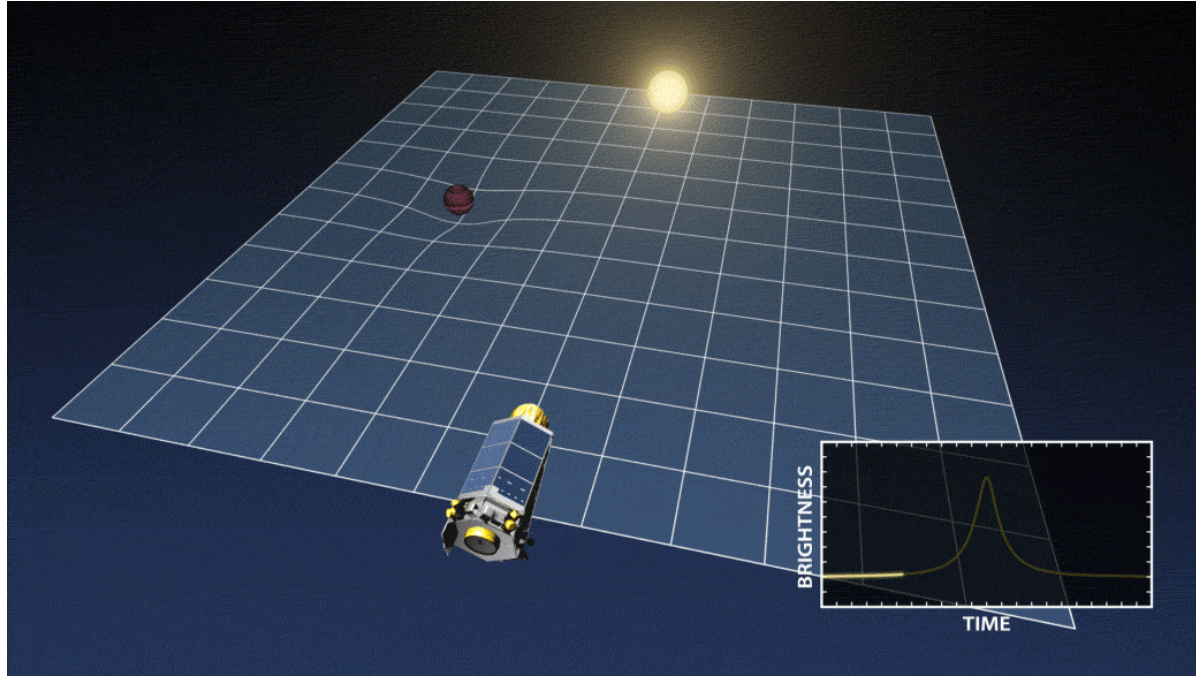


Messier 33 – 21-cm emission  
color-coded by Doppler shift

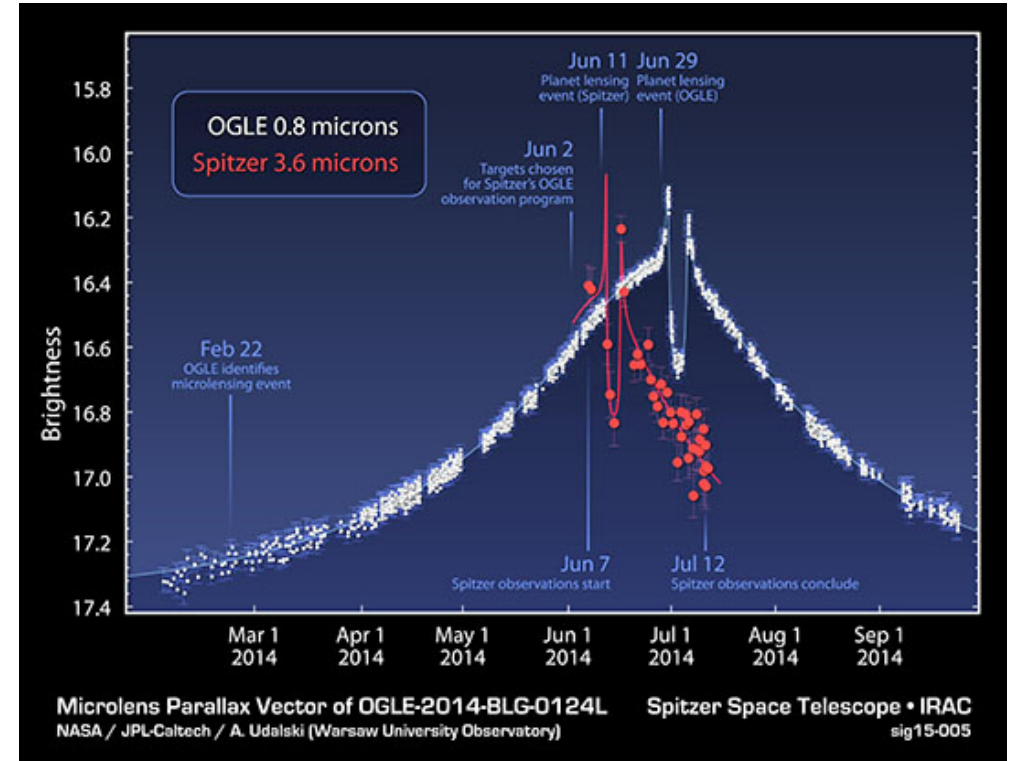
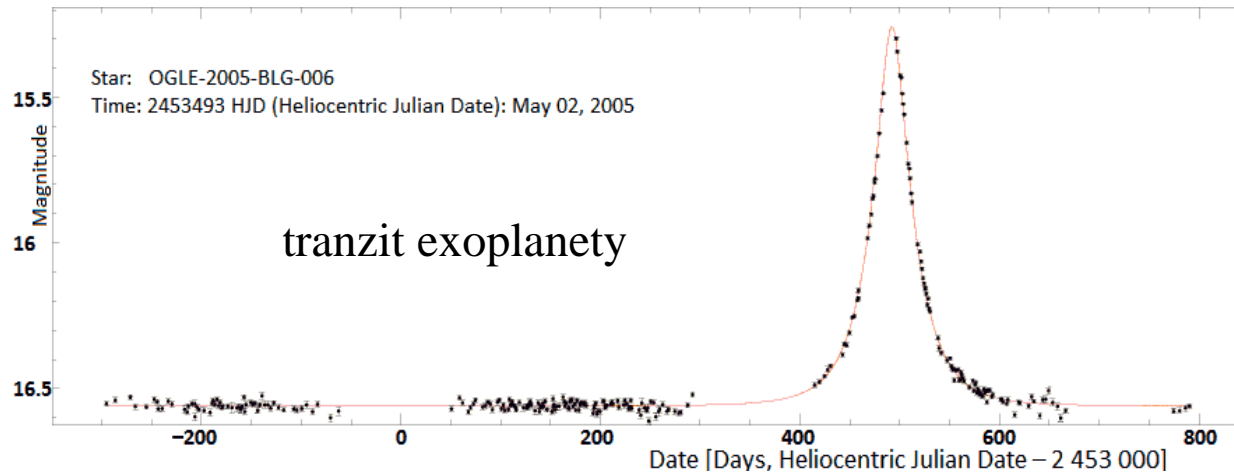
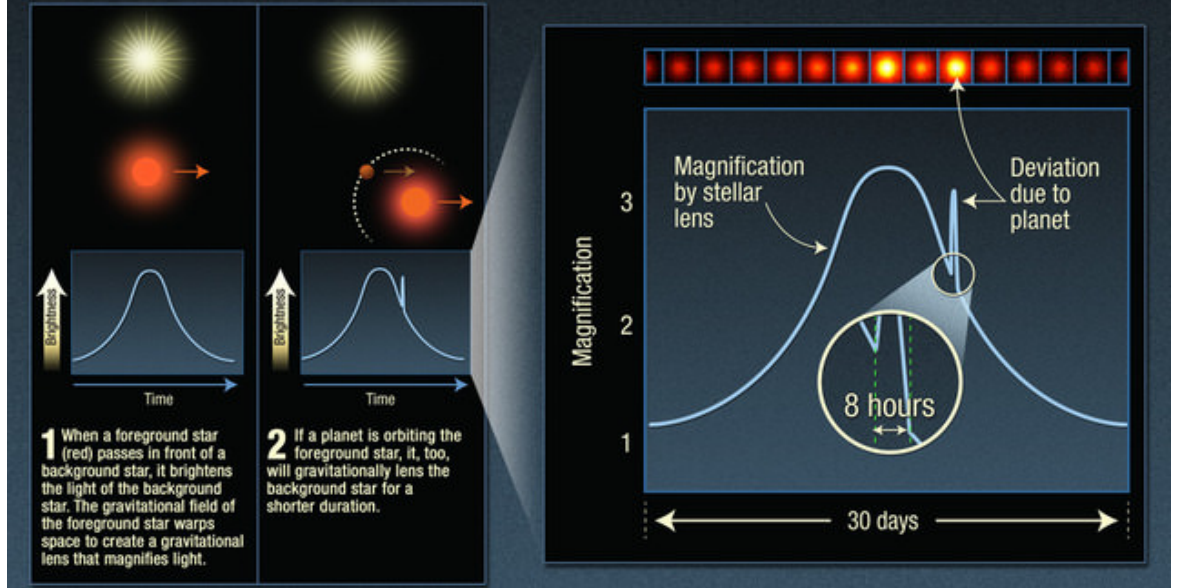




# Gravitační čočka a mikročočkování



# Extrasolar planet detected by gravitational microlensing



# Historie

- lord Kelvin, Henri Poincaré, Jacobus Kepteyn, Jan Oort, ...

## THE ASTROPHYSICAL JOURNAL

AN INTERNATIONAL REVIEW OF SPECTROSCOPY AND  
ASTRONOMICAL PHYSICS

VOLUME 86

OCTOBER 1937

NUMBER 3

### ON THE MASSES OF NEBULAE AND OF CLUSTERS OF NEBULAE

F. ZWICKY

$$M = \frac{5R\bar{v}^2}{3\Gamma}$$

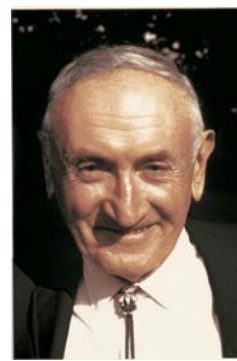
$$\bar{v}_s^2 = 5 \times 10^{15} \text{cm}^2 \text{sec}^{-2}$$

We apply this relation to the Coma cluster of nebulae whose radius is of the order of  $2 \times 10^6$  light-years. From the observational data

$$M > 9 \times 10^{46} \text{gr} \quad (1 \text{ gr} = 64,8 \text{ mg})$$

The Coma cluster contains about one thousand nebulae. The average mass of one of these nebulae is therefore

$$\bar{M} > 9 \times 10^{43} \text{gr} = 4.5 \times 10^{10} M_{\odot}. \quad (36)$$



Fritz Zwicky

## Viriálová věta a určování hmotnosti

$$\langle T \rangle = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \langle \mathbf{F}_k \cdot \mathbf{r}_k \rangle$$

$$\frac{3}{5} \frac{GM}{R} = \frac{3}{2} \frac{k_B T}{m_p} = \frac{1}{2} v^2$$

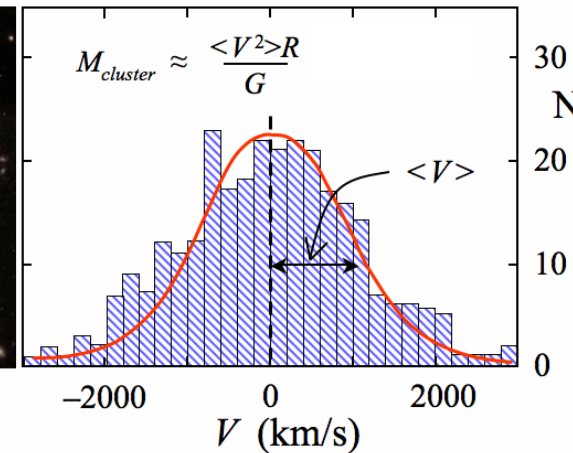
Velikost lze  
dobře změřit

Lze určit ze  
spekter



Abell 1656

Coma cluster (central part)



### Coma cluster (dnes):

- $R = 5,2 \times 10^5 \text{ pc} = 1,7 \times 10^6 \text{ ly}$  (1 pc = 3,26 ly)
- střední rychlost vzhledem ke středu hmotnosti 900 km/s
- viriálová hmotnost kupy galaxií  $M = 2,1 \times 10^{15} M_{\odot}$
- průměrná hmotnost galaxie  $M = 2100 \times 10^9 M_{\odot}$
- Galaxie mají typicky 200 mld. hvězd (dle svítivosti)!
- (Slunce je střední hvězda)

90 % hmotnosti není vidět



LICK OBSERVATORY BULLETIN

NUMBER 498

1939

THE ROTATION OF THE ANDROMEDA NEBULA\*

BY  
HORACE W. BABCOCK



J. H. Oort

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL

AN INTERNATIONAL REVIEW OF SPECTROSCOPY AND  
ASTRONOMICAL PHYSICS

VOLUME 91

APRIL 1940

NUMBER 3

SOME PROBLEMS CONCERNING THE STRUCTURE  
AND DYNAMICS OF THE GALACTIC SYSTEM AND  
THE ELLIPTICAL NEBULAE NGC 3115 AND 4494†

J. H. OORT

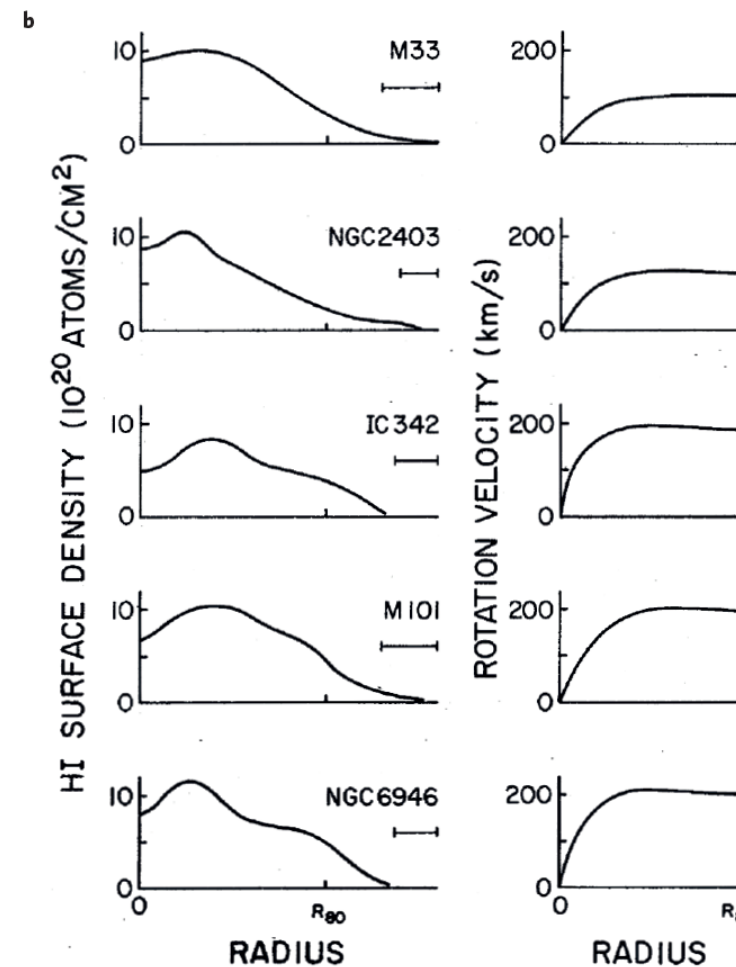
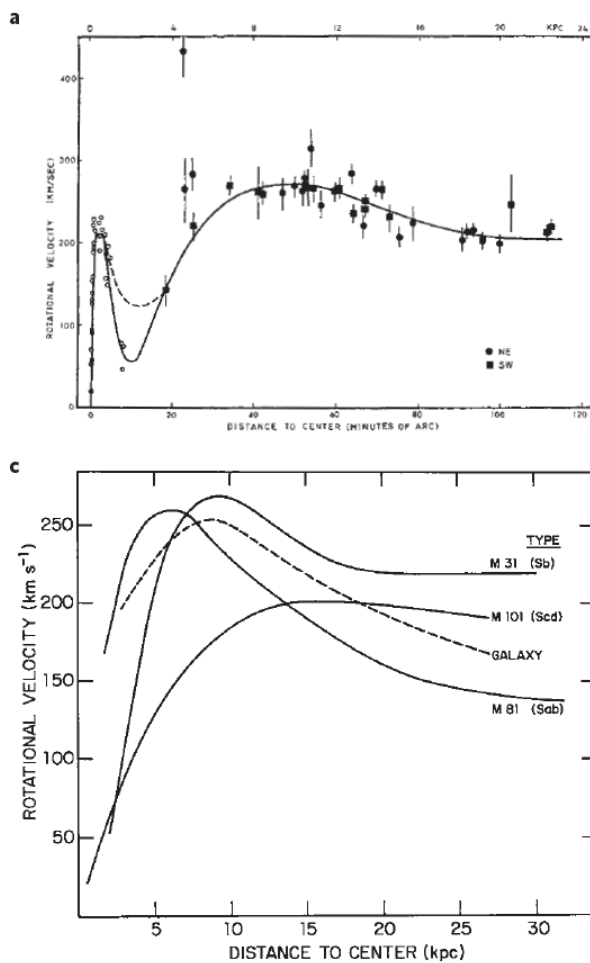


Vera Rubin a William Kent Ford

1970 pojem **Temná hmota**



Ken Freeman



**Figure 1 |** Indications of flat rotation curves in the early 1970s. **a**, Optically studied rotation of ionized hydrogen in M31 by Rubin and Ford (1970). **b**, Five rotation curves of neutral hydrogen in different galaxies by Rogstad and Shostak (1972); R<sub>80</sub> indicates the radius within which 80% of the neutral hydrogen mass is contained. **c**, Rotation curves of three galaxies and the Milky Way by Roberts and Rots (1973). Reproduced from ref. 48, AAS/IOP (a); ref. 51, AAS/IOP (b); and ref. 49, EDP Sciences (c).

# Problém určení hmotností galaxií a kup galaxií

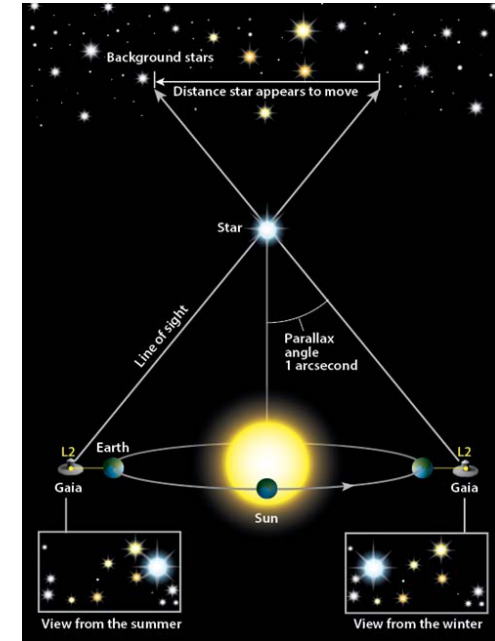
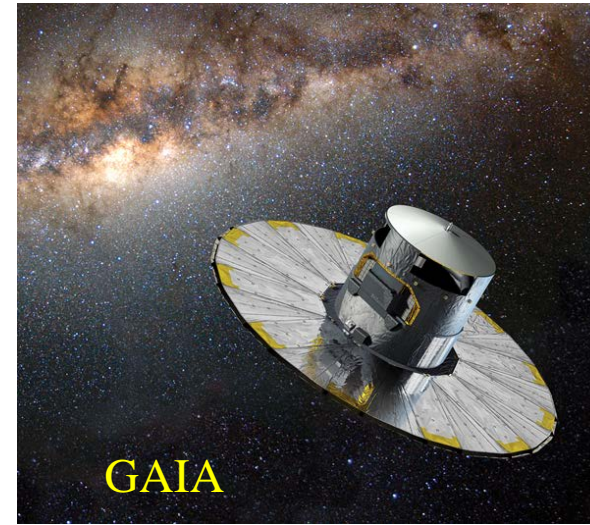
(1) Viriálová hmotnost z rotačních křivek

(2) Ze svítivosti (jednoduché ale nepřesné)

$$L \sim M^{0.73}$$

(3) Z únikové rychlosti horkého plynu

- Mezigalaktické médium (ICM) je hmotnější než samotná hvězdná hmota (10 – 20 % z celkové hmotnosti)
- Teplota  $10^5$  až  $10^8$  K, hustota 1 – 10 částic v  $m^3$

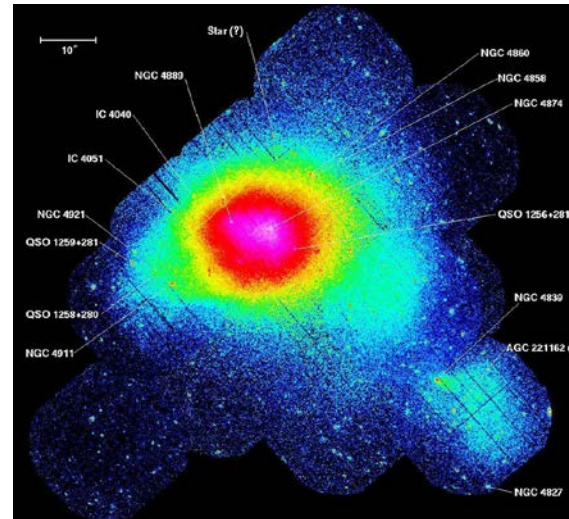
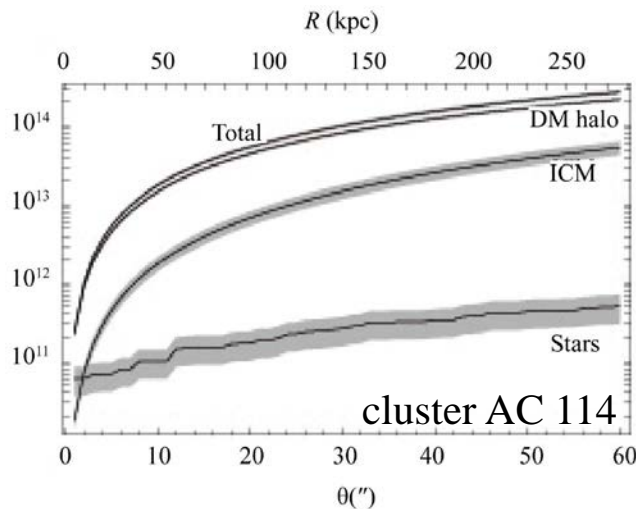


(4) Z pohybu vyvrstěných hvězd na okraji galaxií

(5) Z pohybu kulových hvězdokup nebo trpasličích galaxií

Hmotnost Galaxie (Mléčná dráha) – GAIA a HST

- Celková:  $1,5 \times 10^{12} M_{\odot}$
- Hvězdná hmotnost:  $0,2 \times 10^{12} M_{\odot}$
- **Temná hmota (DM)** 85 % celkové hmotnosti
- Průměr: 129 000 ly



Coma cluster



## Může to být plyn?

- **Horký?**
- Teplota až  $10^7$  K  $\Rightarrow$  rentgenové záření (0,5 až 4,5 keV)
- V galaxiích nepozorujeme tak velké hmotnosti
- **Studený?**
- neutrální: 21-cm oblast, nepozorujeme tak velké hmotnosti
- ionizovaný: svítil by od UV po IR, nepozorujeme tak velké hmotnosti

## Může to být prach?

- Nebylo by vidět dobře okolí  $\Rightarrow$  nemožné

## Černé díry?

- Není vyloučeno zcela, ale...
- Pozorovali bychom ve hvězdách větší množství těžkých prvků (Fe, Ni)
- Mikročočkování proti blízkým galaxiím statisticky vylučuje tuto možnost
- Výzkum gravitačních vln

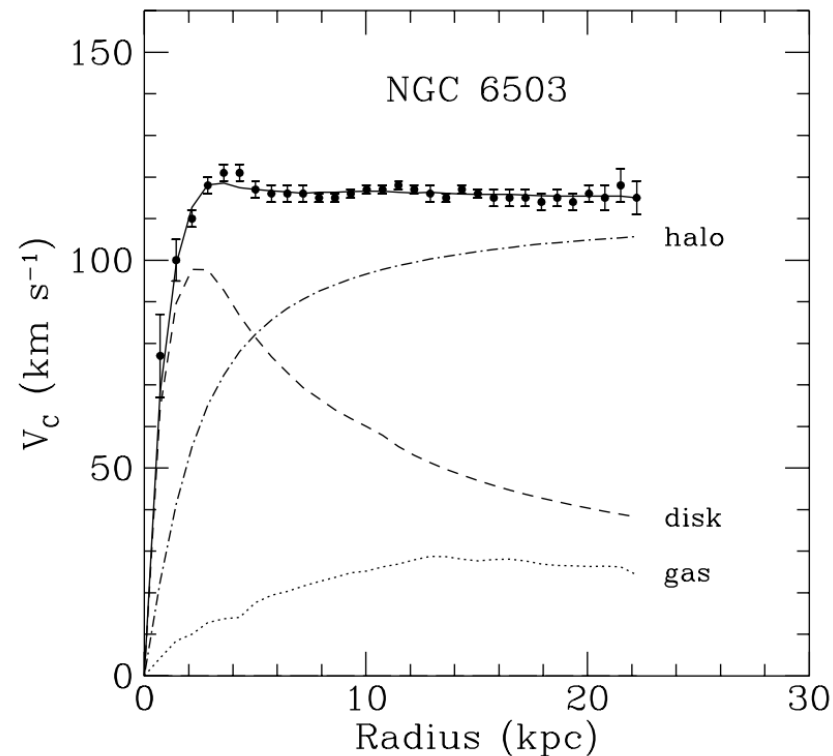
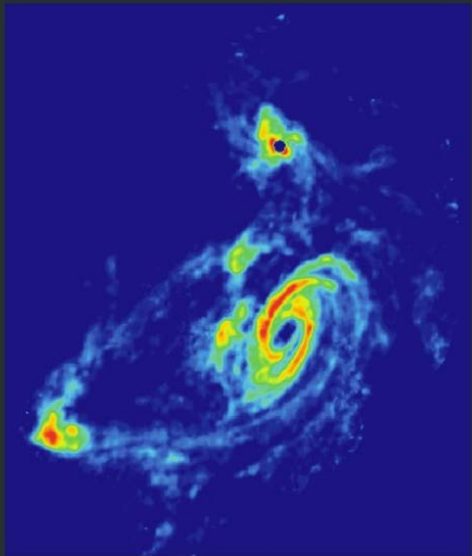
## MACHO objekty?

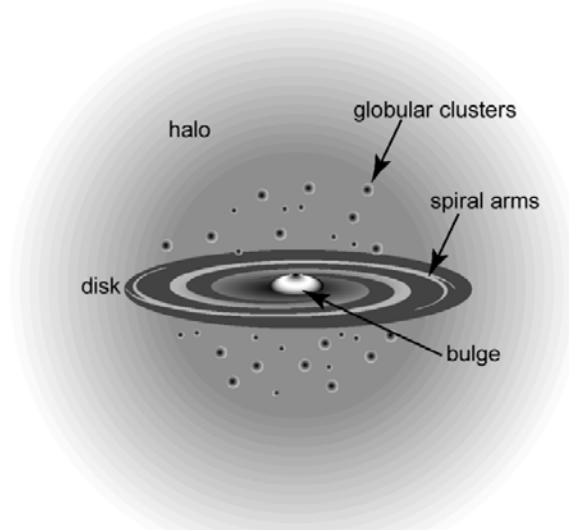
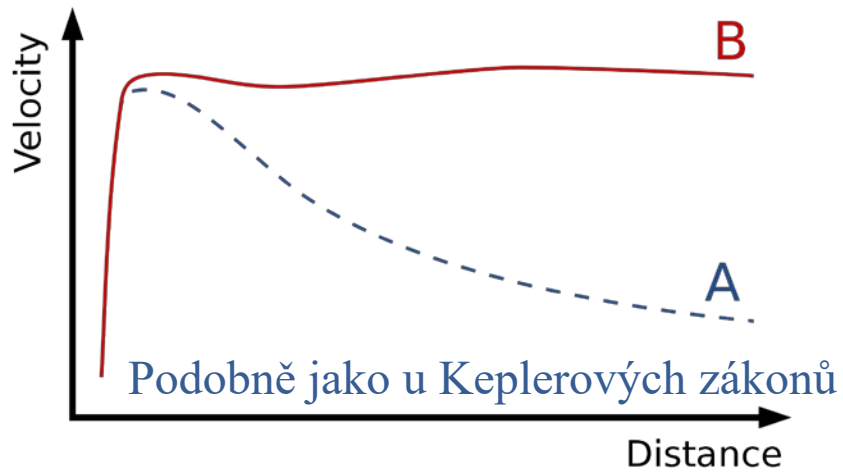
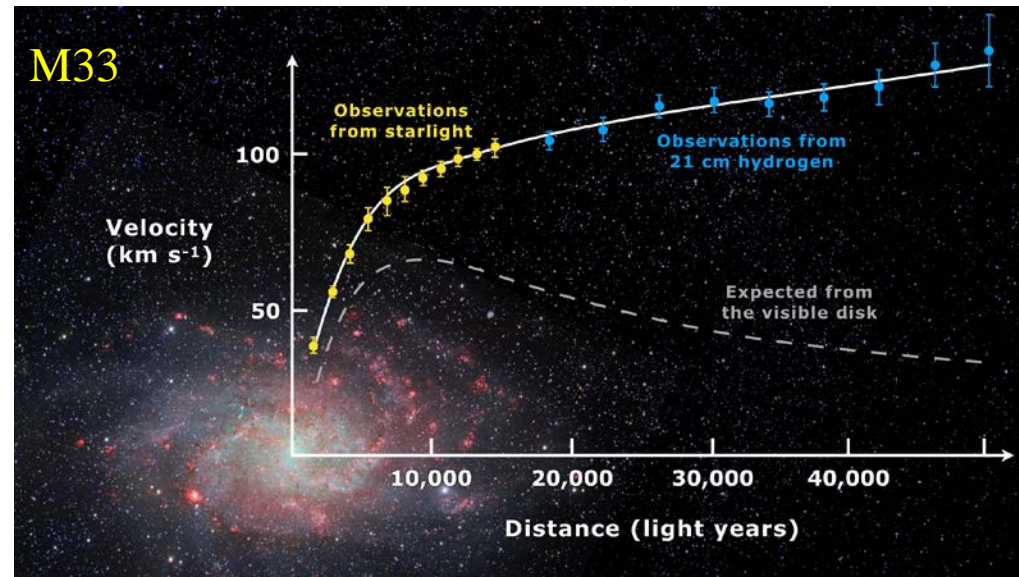
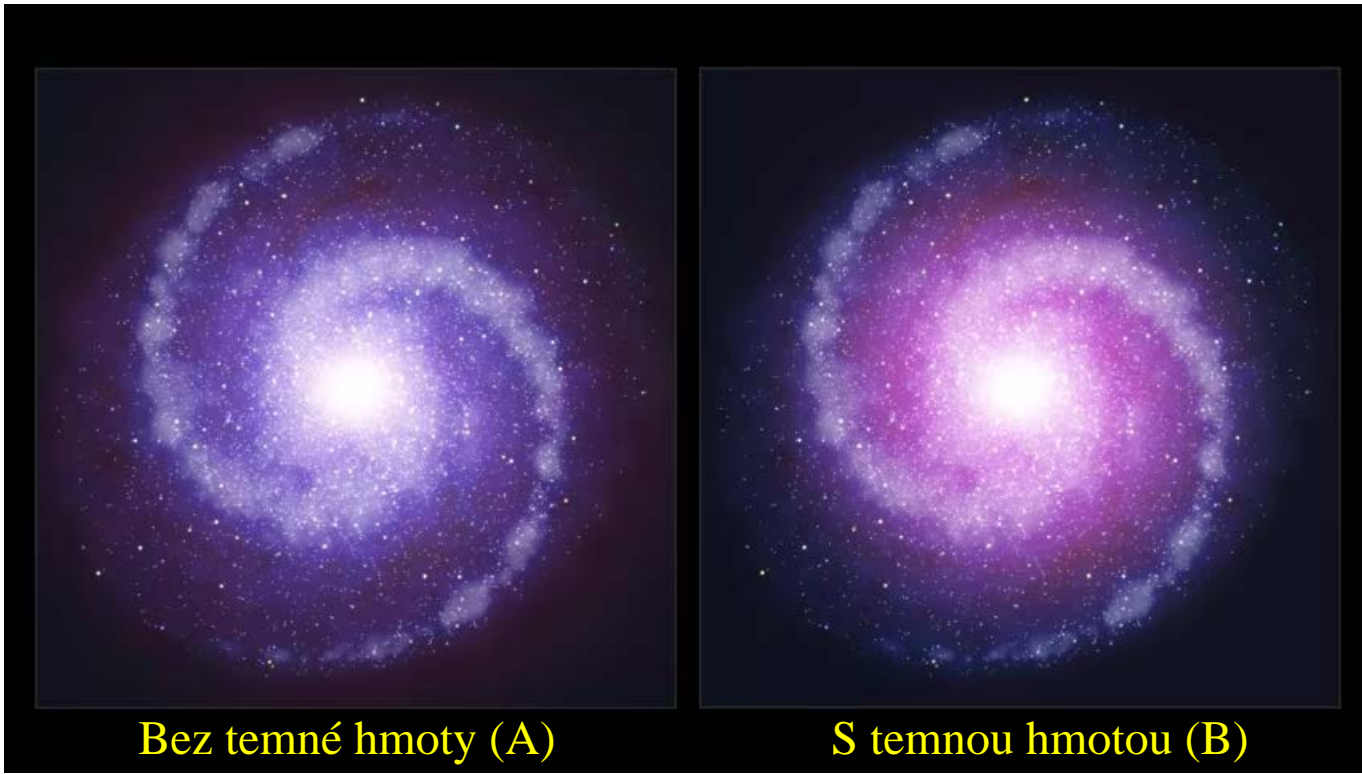
### Massive Compact Halo Objects

- Černé díry, neutronové hvězdy, hnědí trpaslíci, nepřidružené planety, bílý trpaslíci, ...
- Mikročočkování vyloučilo většinu kandidátů (výzkum černých děr pokračuje)
- Největší podíl hmotnosti mají bílý trpaslíci

## Modifikace gravitační teorie?

21 cm HI Distribution





Haló temné hmoty

### HOW DOES DARK MATTER INTERACT?

**ELECTROMAGNETISM**

**STRONG FORCE**

**WEAK FORCE**

**GRAVITY**

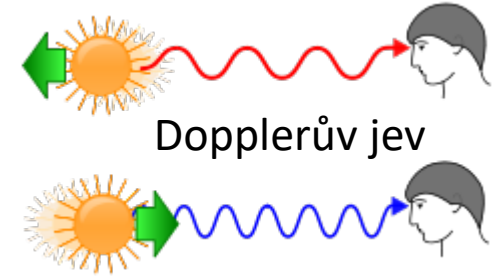
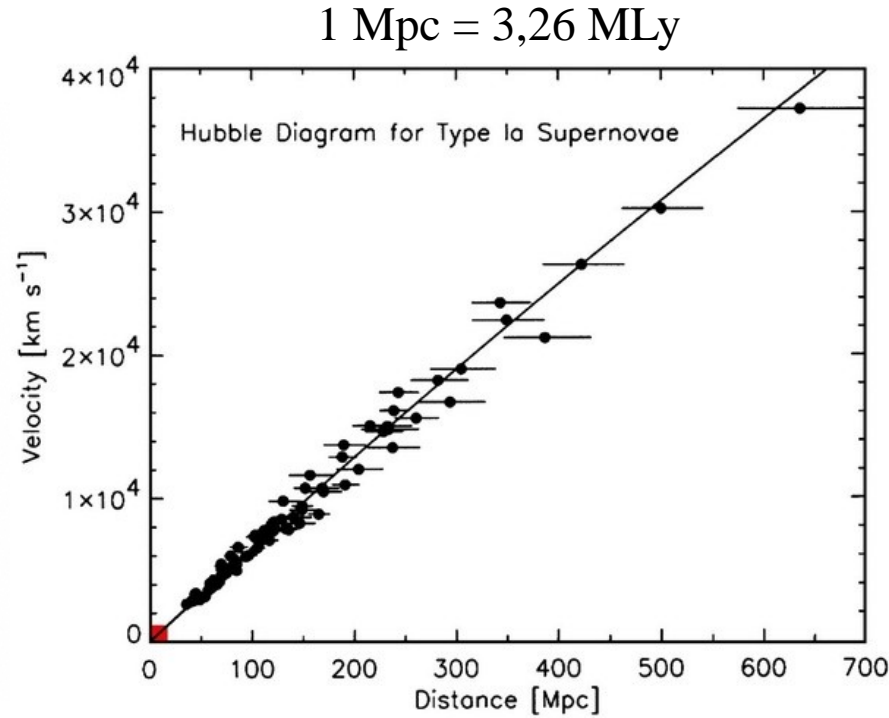
## Obsah

- Slovníček a úvod do (některých) astrofyzikálních jevů
- Měření hmotnosti galaxií a kup galaxií (první objev **Temné hmoty**)
- Kosmologický model  $\Lambda$ -CDM a reliktní záření
- Měření světelných křivek supernov typu Ia (první objev **Temné energie**)
- Baryonové akustické oscilace a tvorba struktur ve Vesmíru
- Rozložení Temné hmoty pomocí mikročkování a numerických simulací
- Srážky nadkup galaxií a rentgenová spektroskopie
- Kandidáti na Temnou hmotu a Temnou energii

# Kosmologické modely



E. Hubble (1889 – 1953)



Hubblova konstanta:

$$v = Ha(t)$$

$$H(t) \equiv \frac{\dot{a}}{a}$$

## Teorie gravitace (A. Einstein)

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

Ricciho tenzor

Skalární křivost

Metrický tenzor

Kosmologická konstanta

Tenzor energie-hybnosti

## Expanze Vesmíru

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

Hmota   Křivost   Temná energie

$$\frac{H^2}{H_0^2} = \Omega_{0,R}a^{-4} + \Omega_{0,M}a^{-3} + \Omega_{0,k}a^{-2} + \Omega_{0,\Lambda}$$

Záření + Baryony + Temná hmota

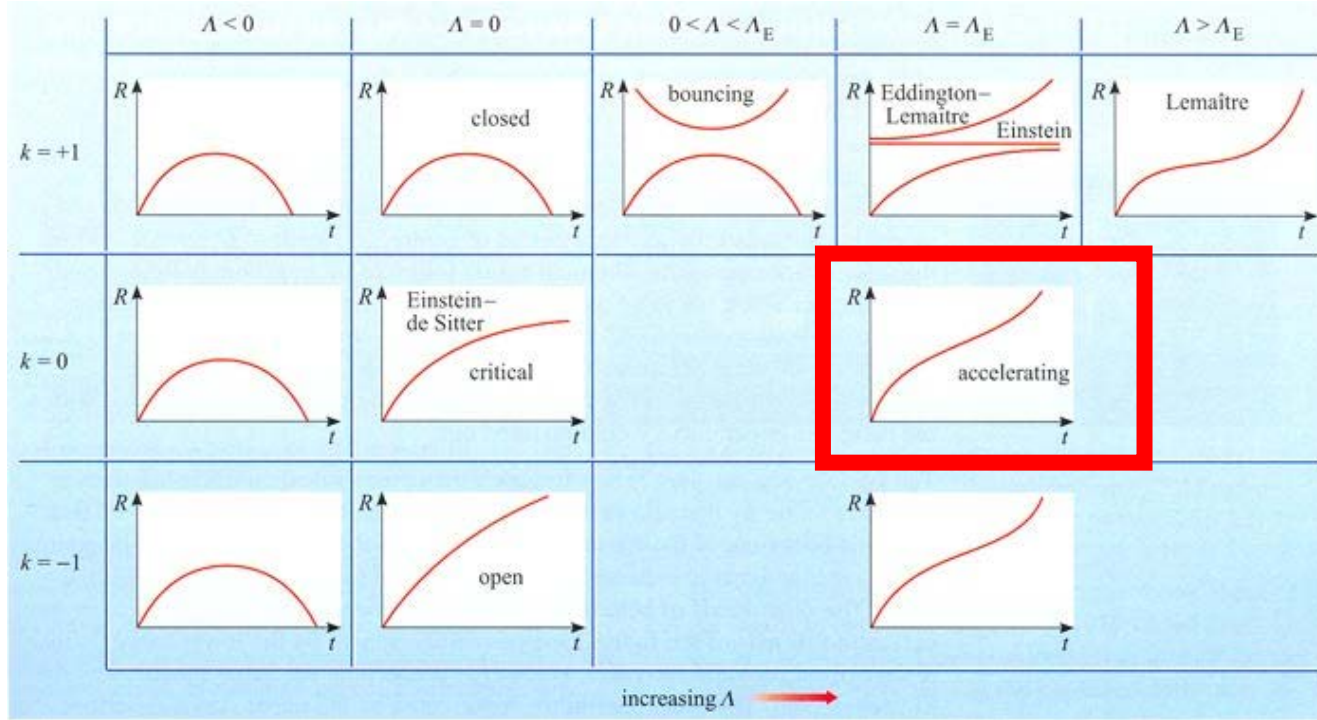


# Kosmologické modely

Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker (FLRW modely)



A. A. Friedmann  
(1888 – 1925)



$$\Omega_x \equiv \frac{\rho_x(t = t_0)}{\rho_{\text{crit}}}$$

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

$$\rho_c = 8,5 \times 10^{-27} \text{ kg / m}^3$$

## Teorie gravitace (A. Einstein)

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

Ricciho tenzor      Skalární křivost      Metrický tenzor      Kosmologická konstanta      Tenzor energie-hybnosti

## Expanze Vesmíru

$$H^2 = \left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

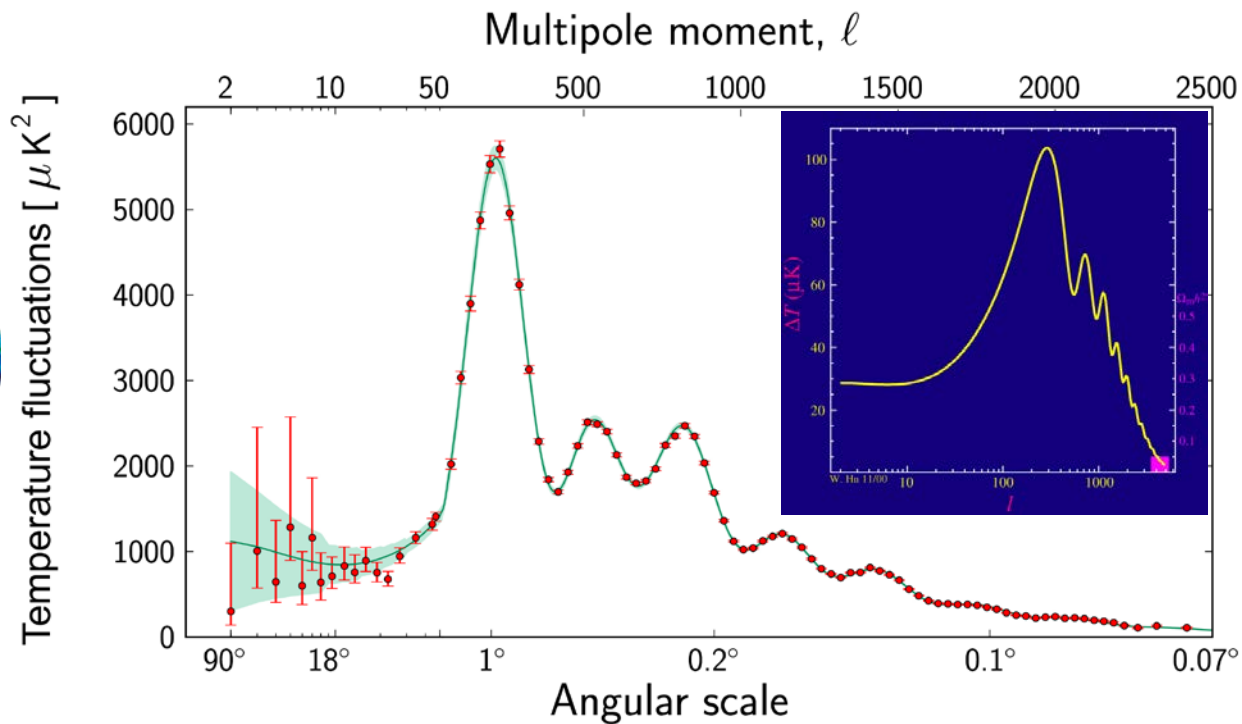
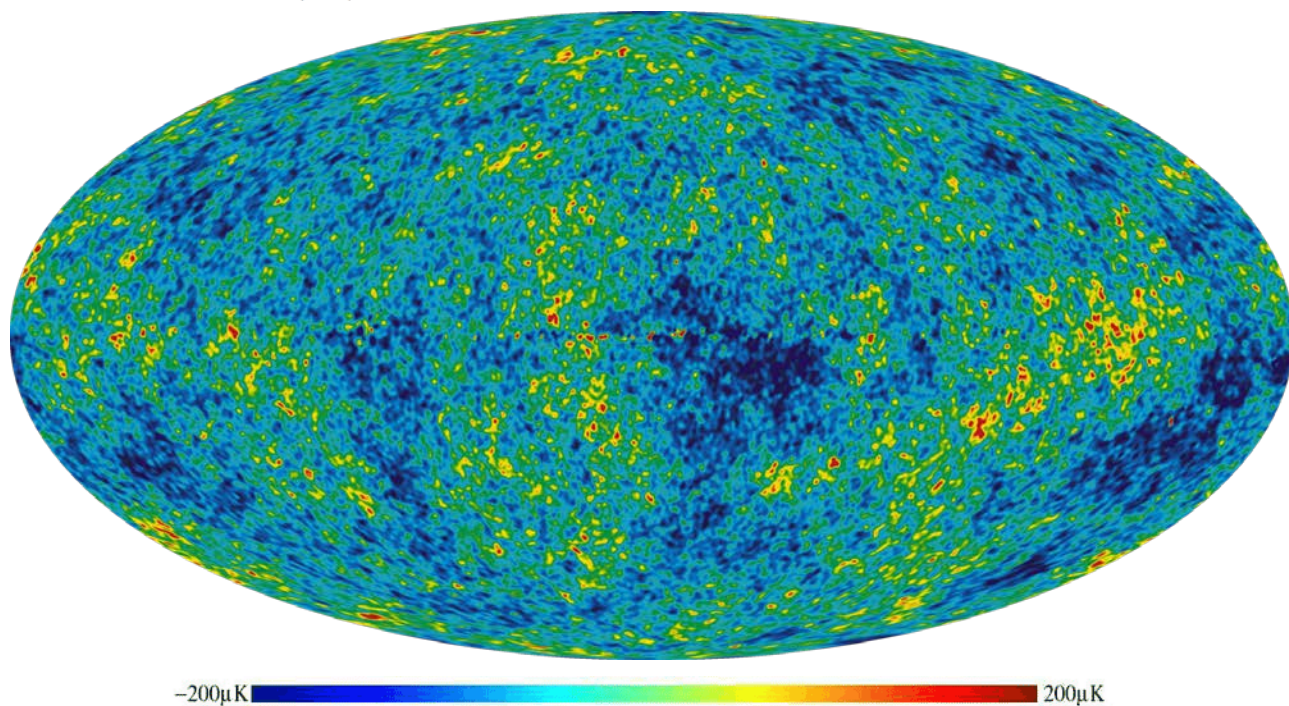
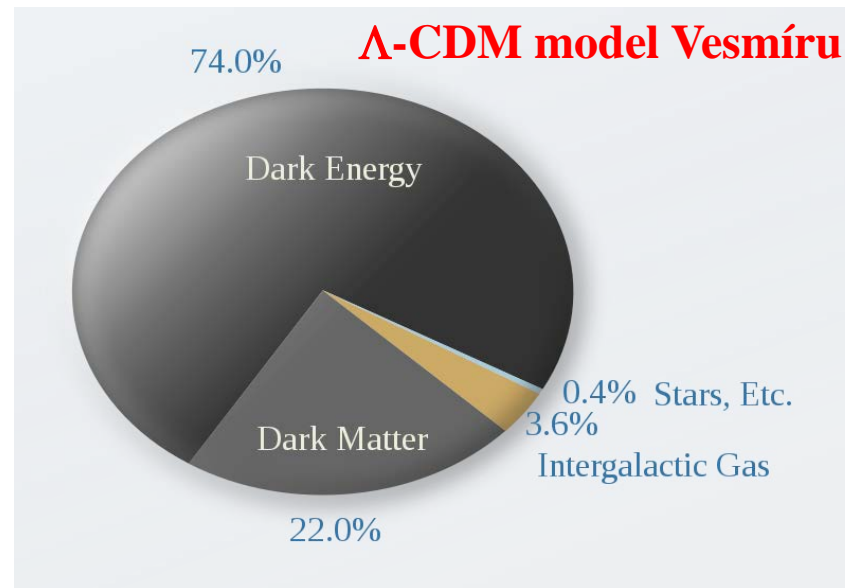
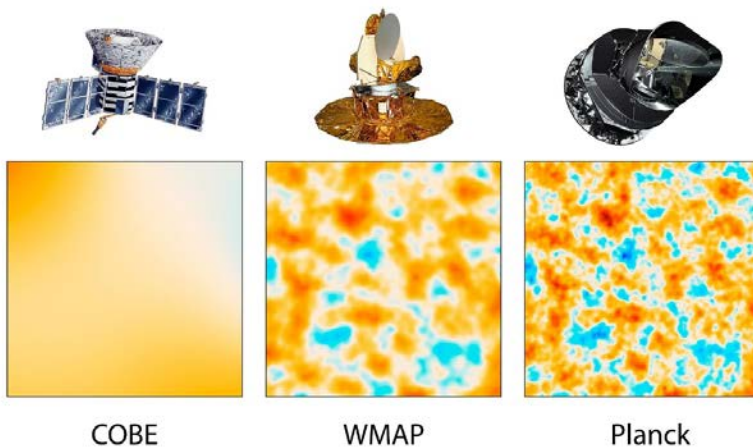
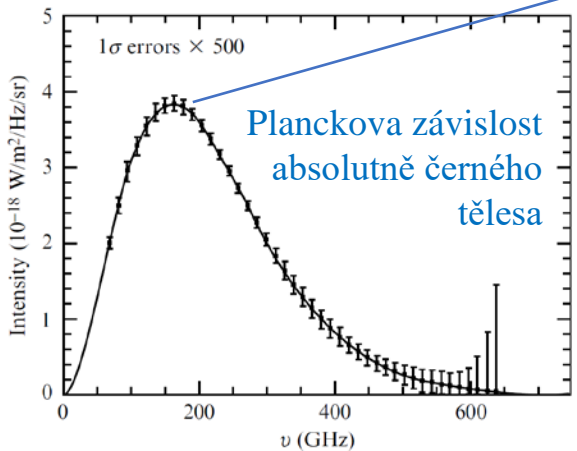
Hmota    Křivost    Temná energie

$$\frac{H^2}{H_0^2} = \Omega_{0,R} a^{-4} + \Omega_{0,M} a^{-3} + \Omega_{0,k} a^{-2} + \Omega_{0,\Lambda}$$

Záření + Baryony + Temná hmota

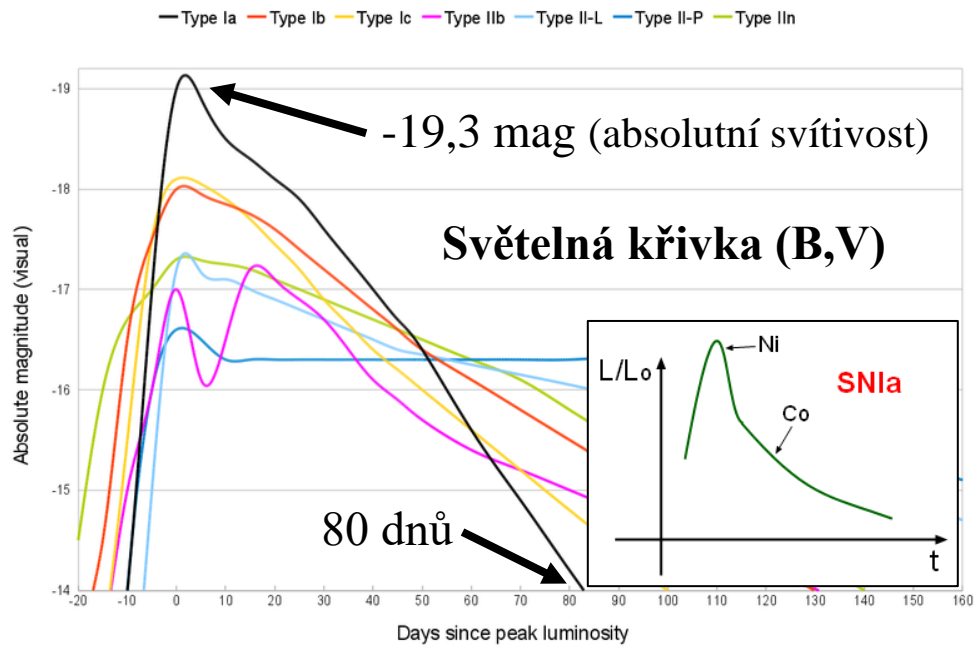
# Reliktní záření (G. Gamov, R. A. Alpher, R. C. Hermann)

- 1965 objev A. A. Penzias a R. W. Wilson
- 18. 11. 1989 změřena teplota **2,725 K**





# Zrychlující Vesmír

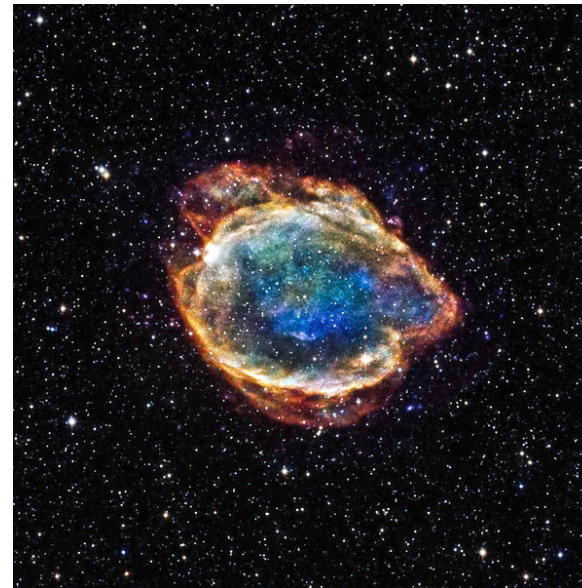
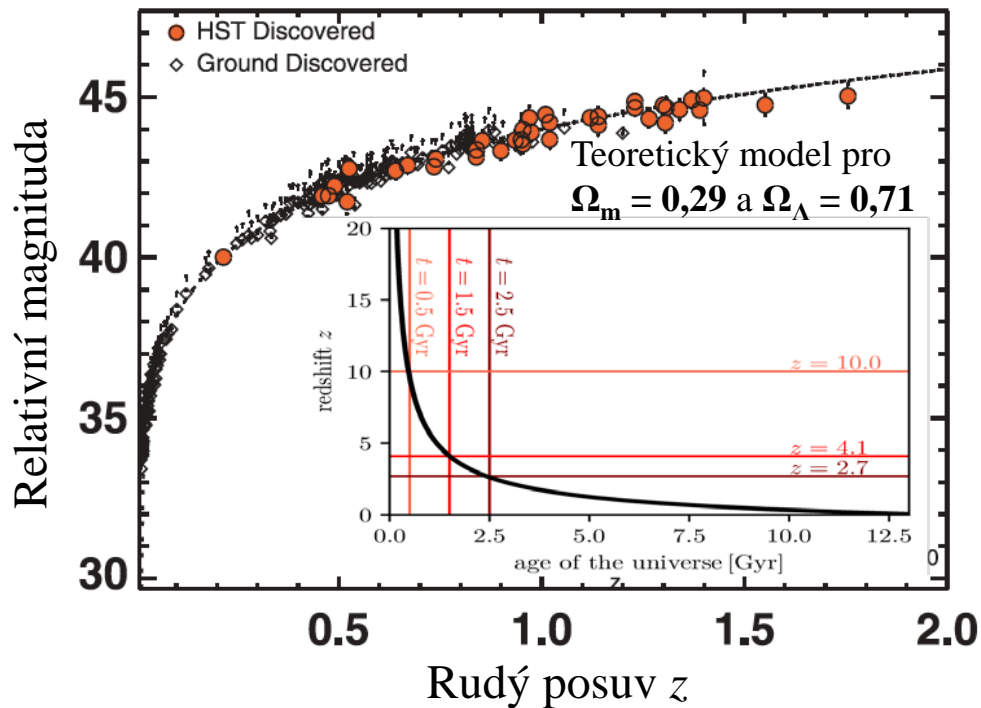
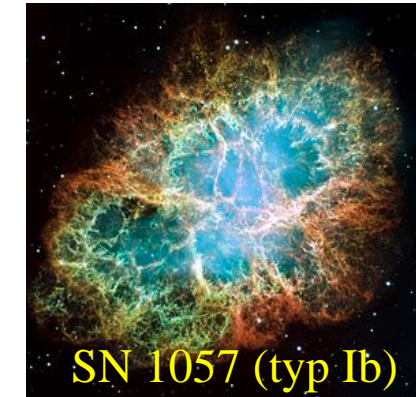
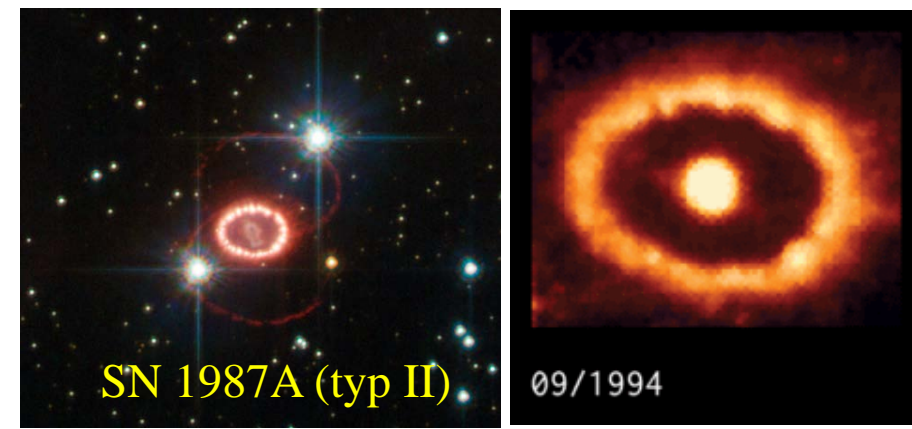


Nobelova cena 2011

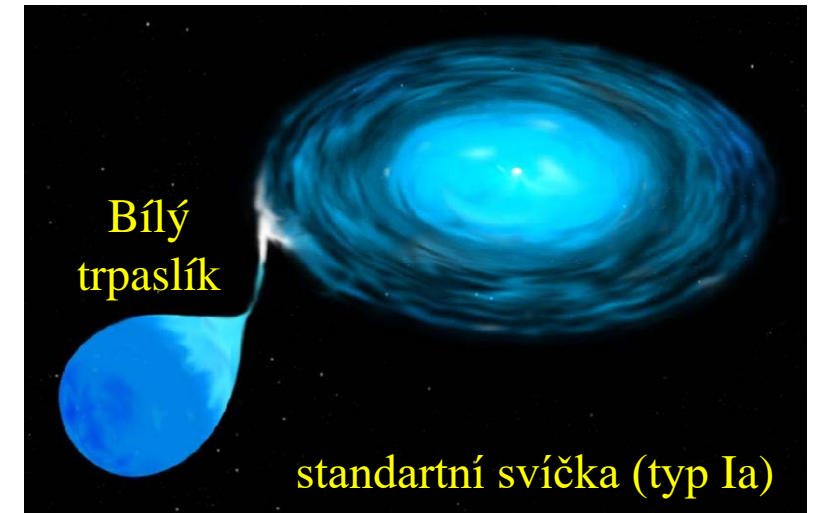


S. Perlmutter B. P. Schmidt A. G. Riess

$$d = 10^{(m-M+5)/5}$$

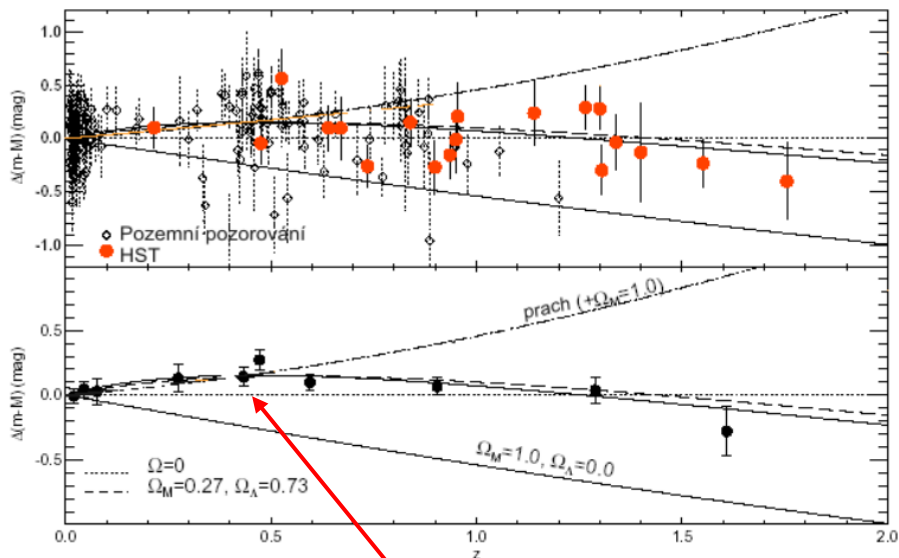


G299 (typu Ia)

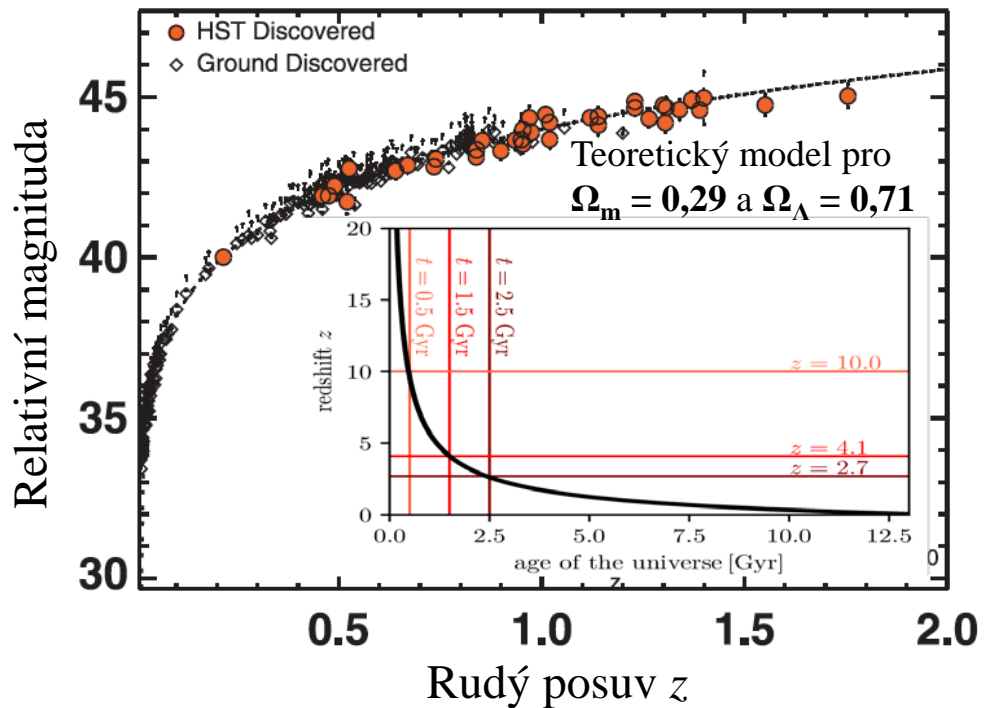


# Zrychlující Vesmír

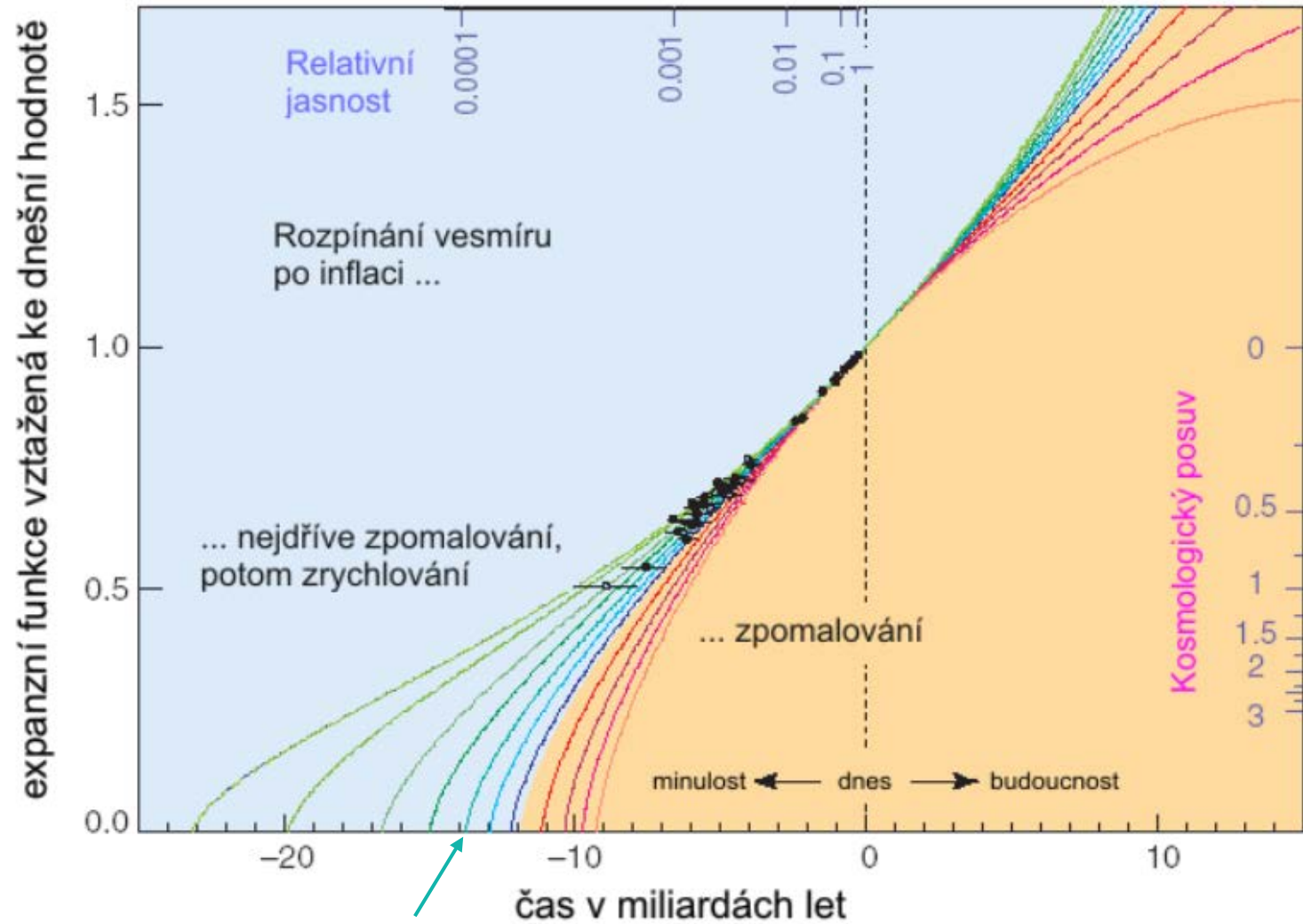
stavová rovnice:  $p = w\rho$   $\rho \sim \frac{1}{a}$  pro  $w = -1$  odpovídá **Temná energie** kosmologické konstantě  $\Lambda$



$z = 0,46 \pm 0,13$   
stáří Vesmíru 8–9 mld. let



Nejdřív vládne gravitační interakce, pak záporný tlak



13,8



# Vesmír stavěn zdola nahoru – malé fluktuace v raném Vesmíru jsou zdrojem velkých struktur dnes

1) Reliktní záření

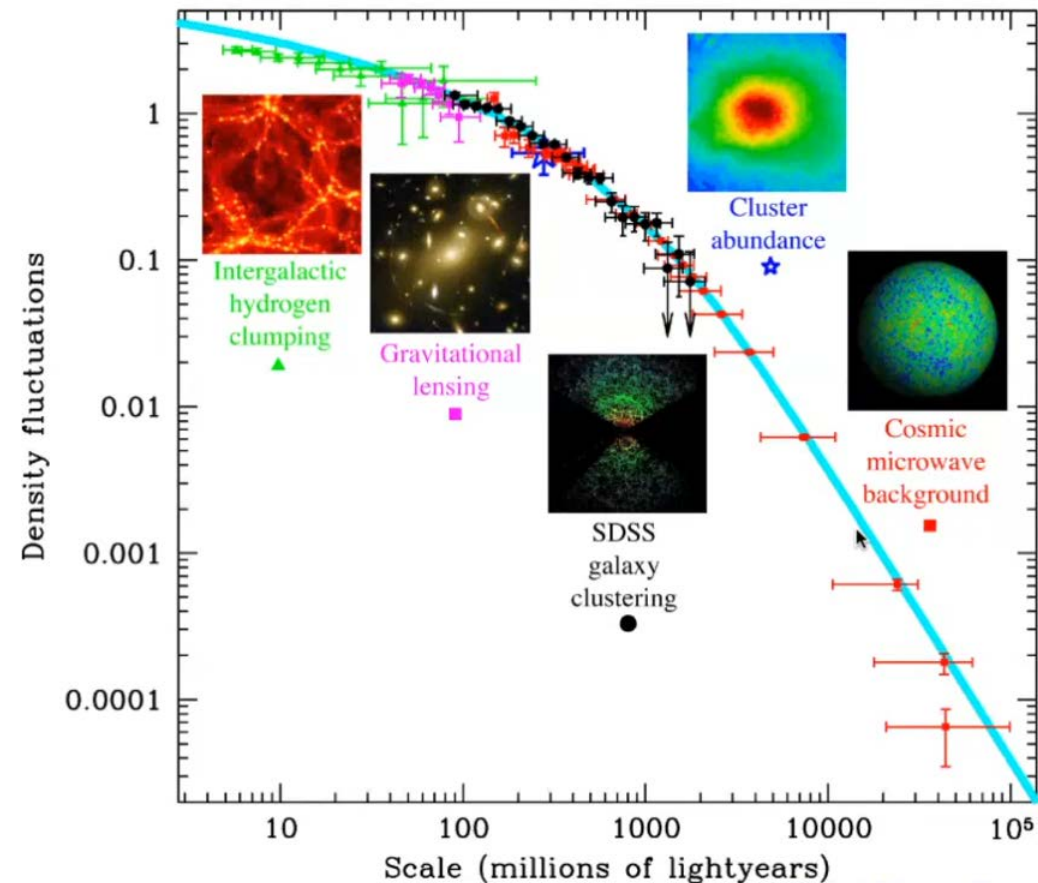
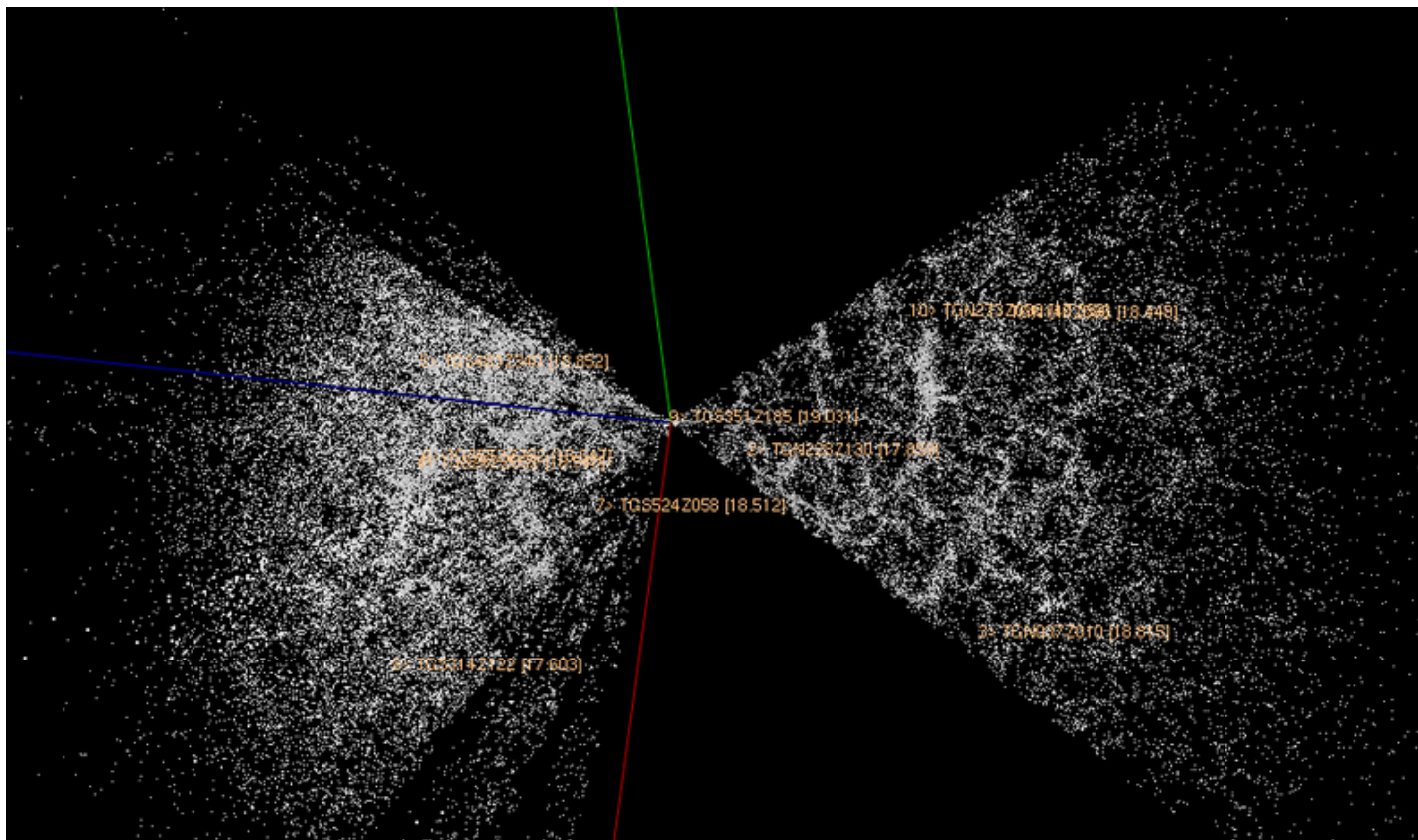
2) Supernovy typu Ia

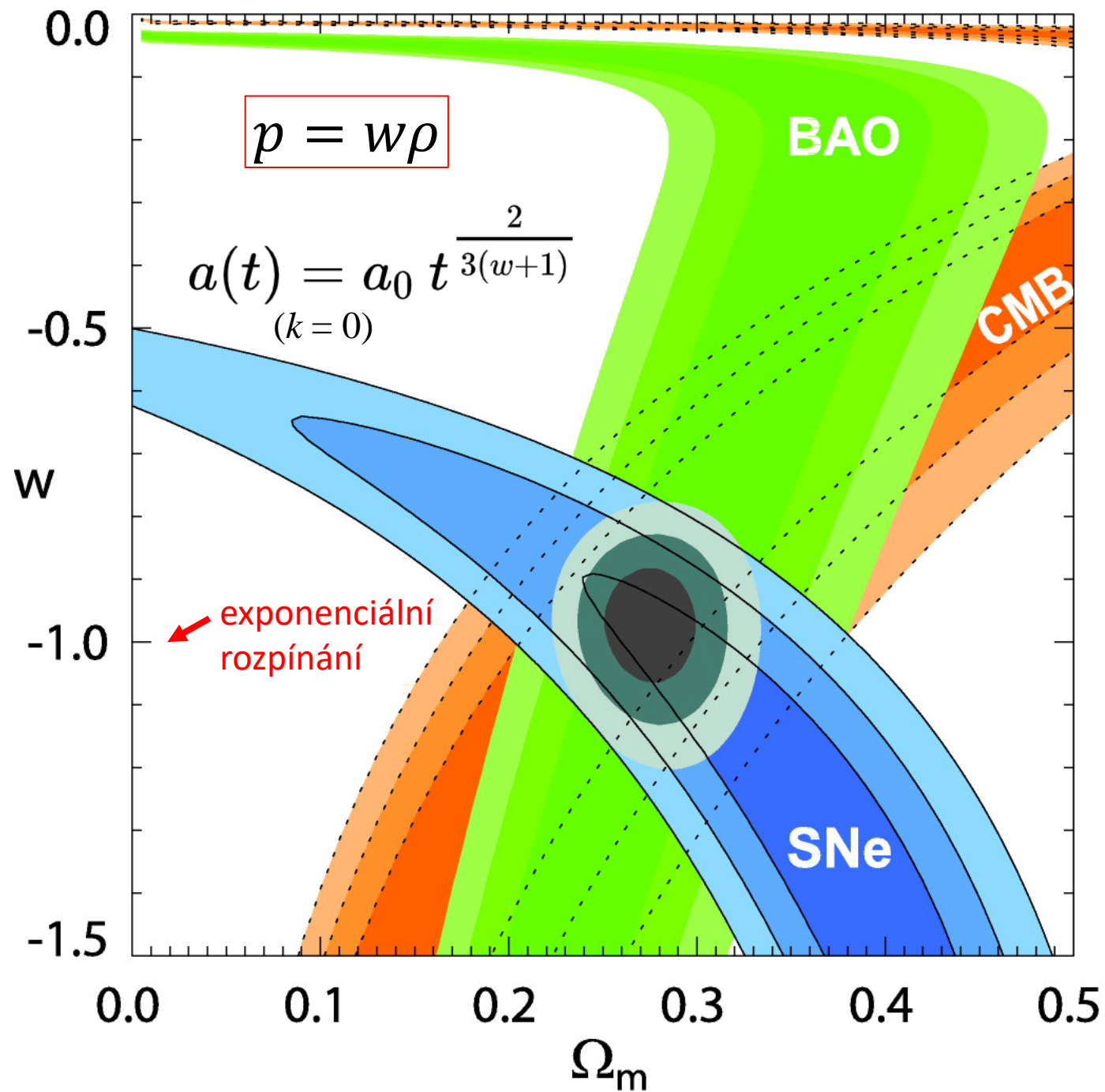
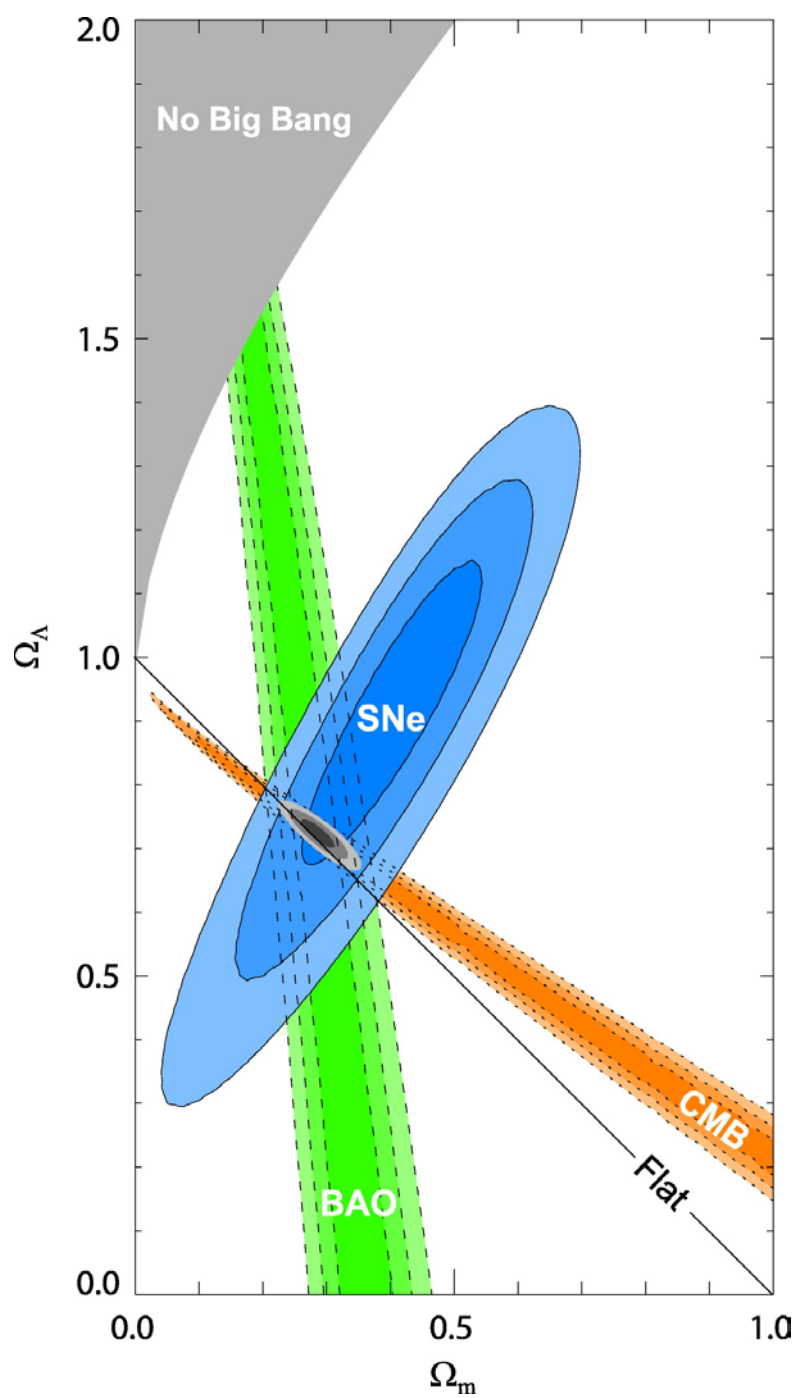
3) **Baryonové akustické oscilace**

4) Zastoupení lehkých prvků (byl by větší poměr deuterium-vodík)

Fotony by rozmetaly baryonovou hmotu a nebyly by galaxie => **temná hmota**

- Nerovnováha gravitačního tlaku vs. tlaku záření způsobují zvukové oscilace raného plazmatu
- Plazma obsahuje baryonovou hmotu, temnou hmotu a fotony
- Temná hmota neinteraguje elektromagneticky ale pouze gravitačně, BAO vznikají pouze do reliktního záření
- Dnes možné až 490 Mly velké struktury



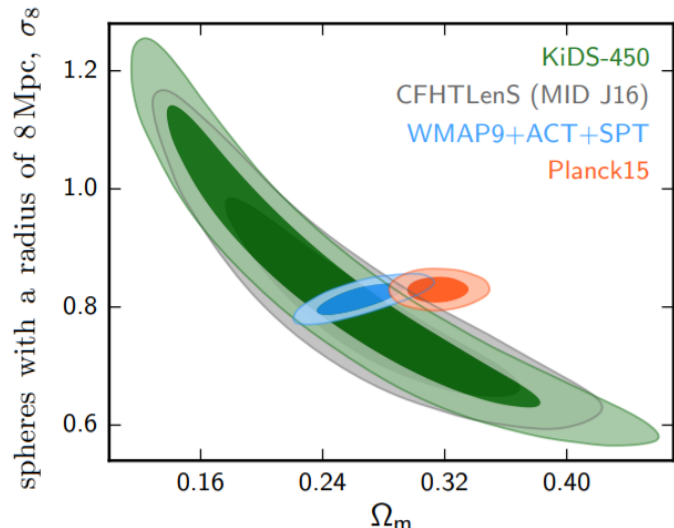
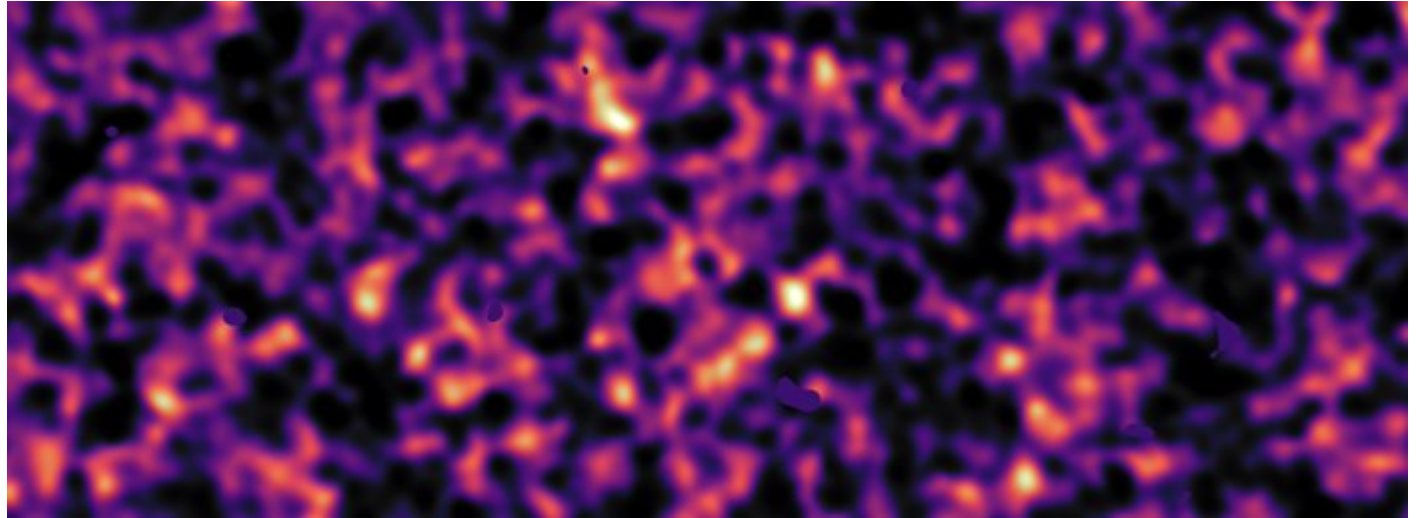
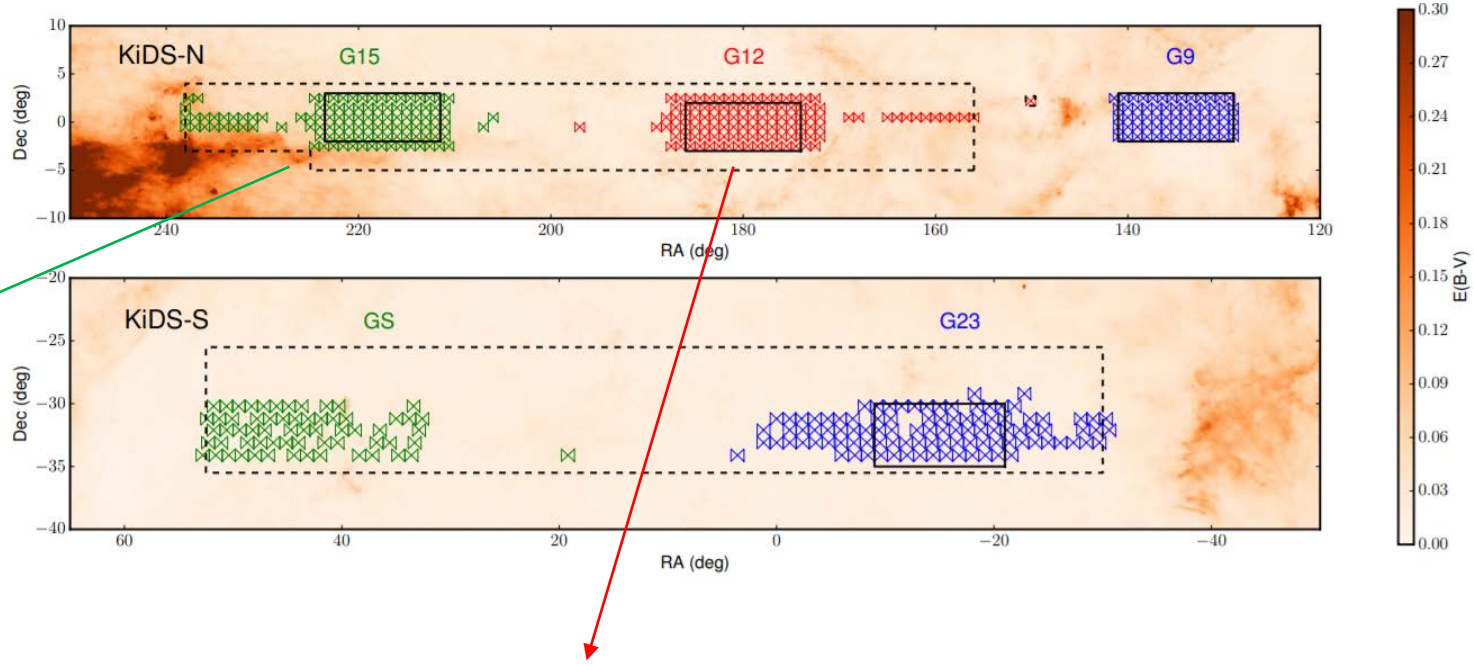
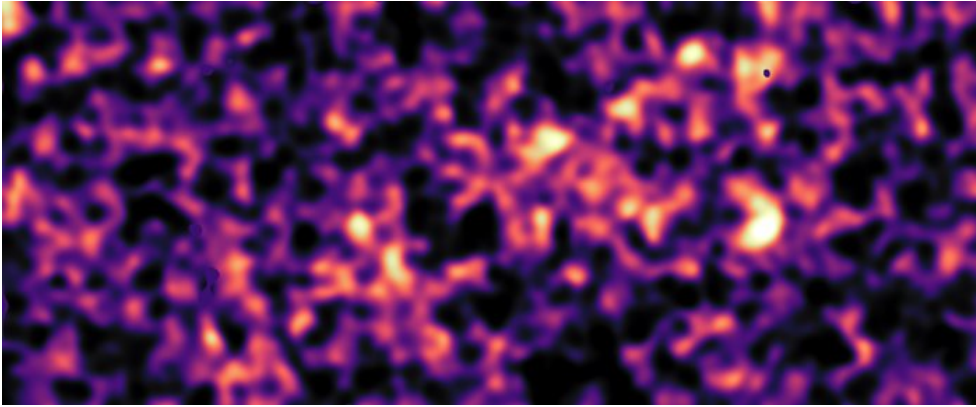
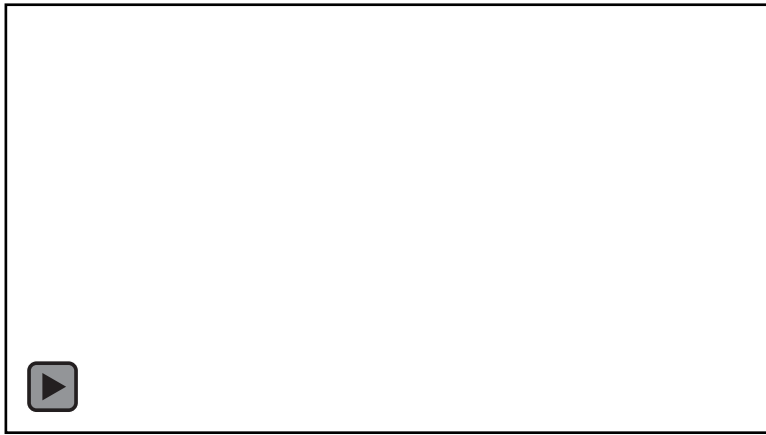


## Obsah

- Slovníček a úvod do (některých) astrofyzikálních jevů
- Měření hmotnosti galaxií a kup galaxií (první objev **Temné hmoty**)
- Kosmologický model  $\Lambda$ -CDM a reliktní záření
- Měření světelných křivek supernov typu Ia (první objev **Temné energie**)
- Baryonové akustické oscilace a tvorba struktur ve Vesmíru
- Rozložení Temné hmoty pomocí mikročkování a numerických simulací
- Srážky nadkup galaxií a rentgenová spektroskopie
- Kandidáti na Temnou hmotu a Temnou energii



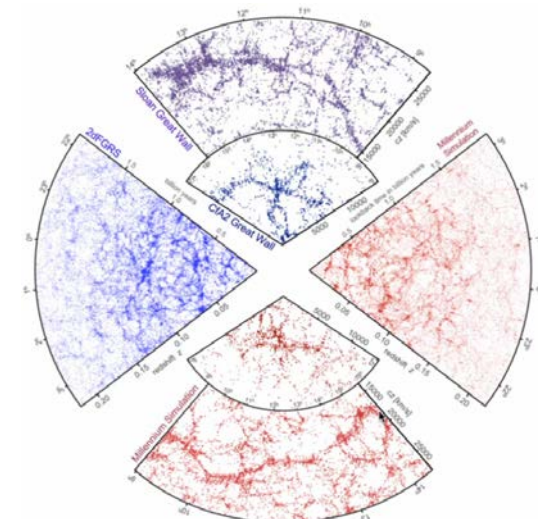
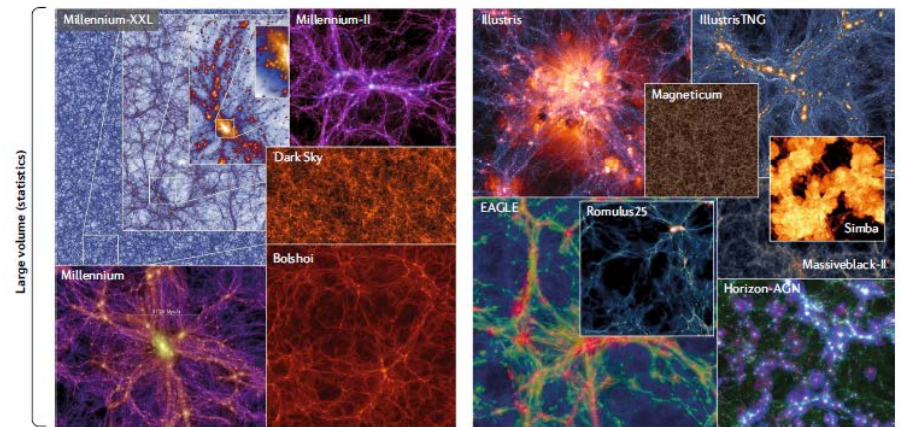
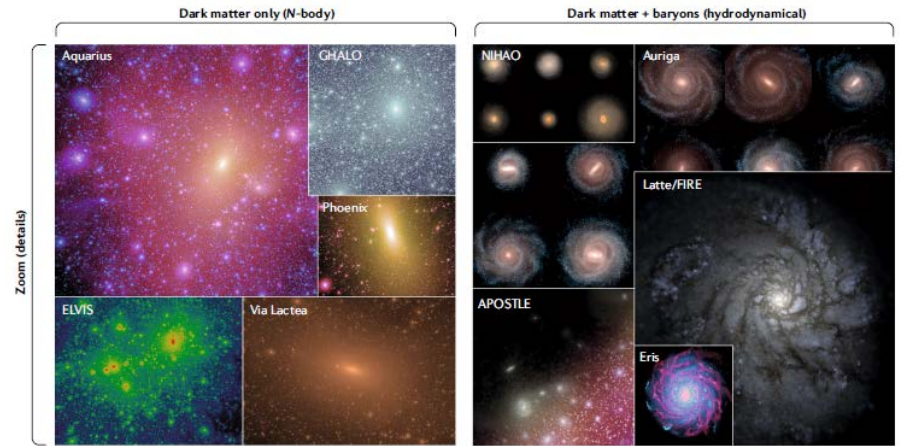
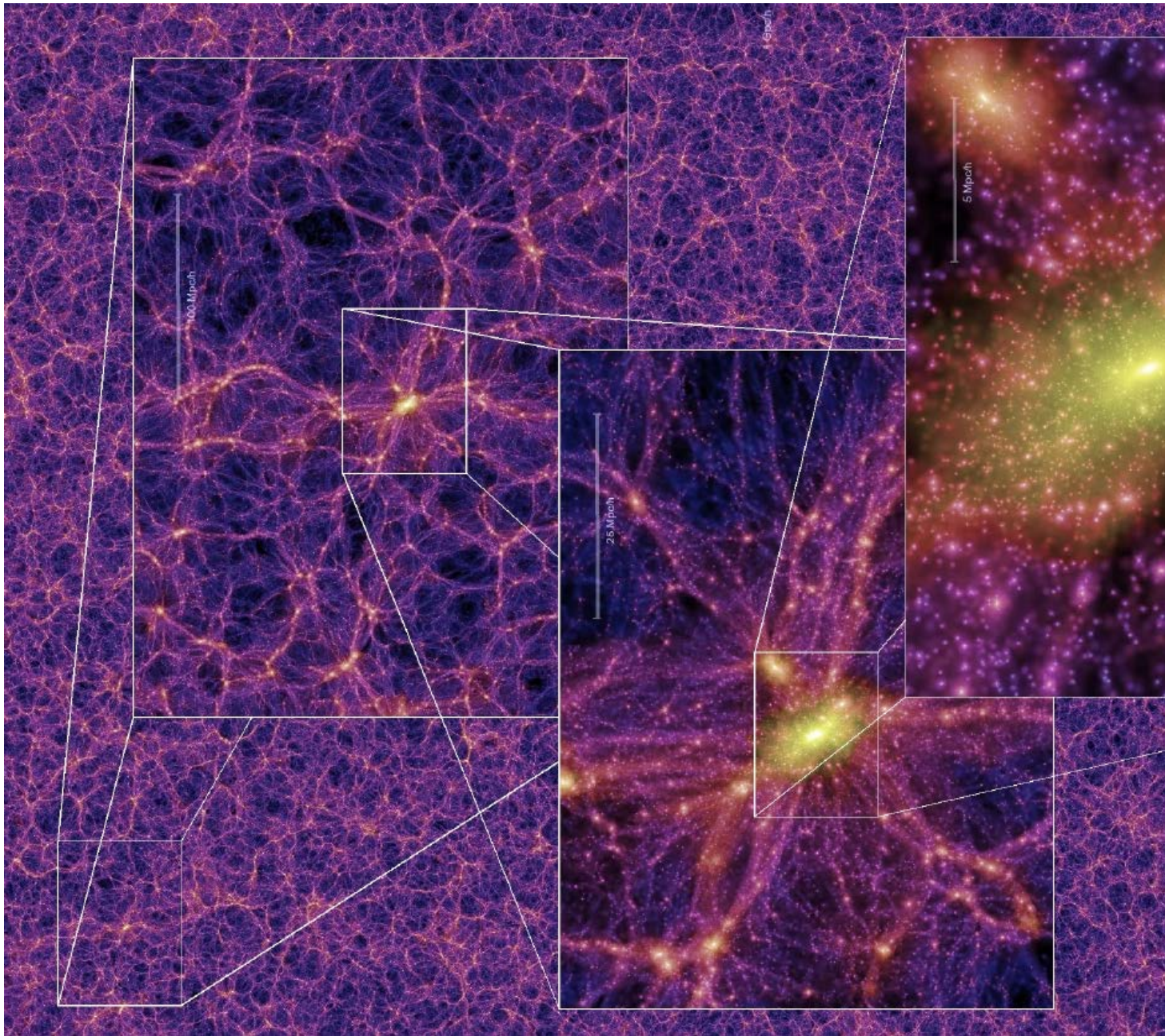
# Mikročockování a rozložení temné hmoty



Poměr 5 ku 1 ve prospěch temné hmoty



# Numerické simulace



Simulace  
vs.  
Experiment



## A DIRECT EMPIRICAL PROOF OF THE EXISTENCE OF DARK MATTER<sup>1</sup>

DOUGLAS CLOWE,<sup>2</sup> MARUŠA BRADAČ,<sup>3</sup> ANTHONY H. GONZALEZ,<sup>4</sup> MAXIM MARKEVITCH,<sup>5,6</sup>

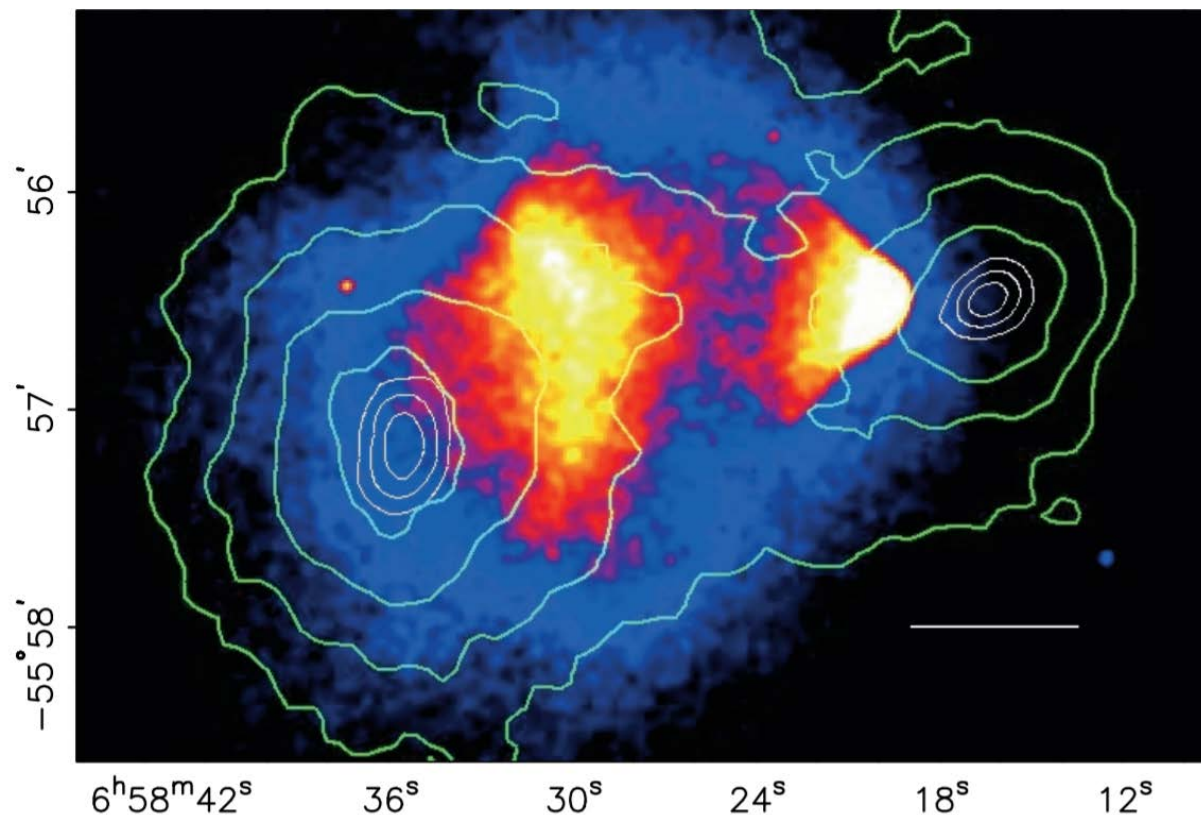
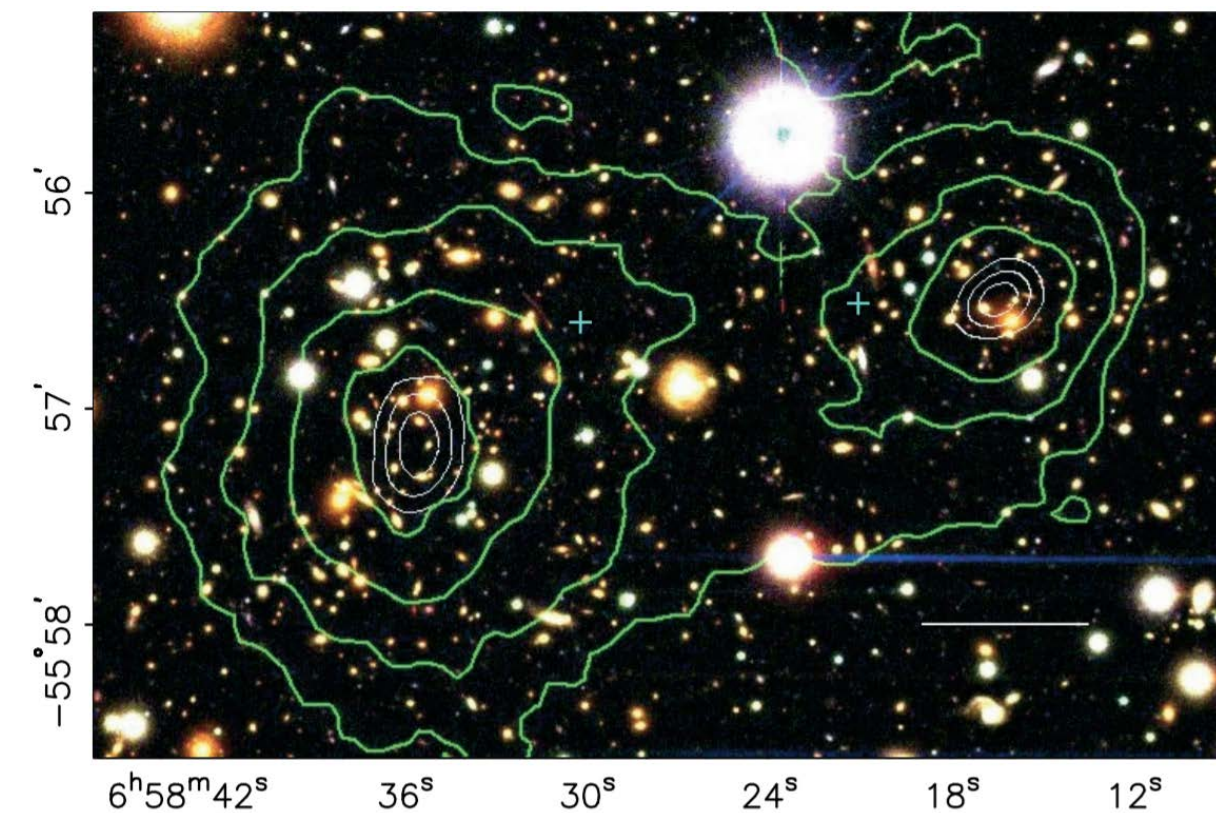
SCOTT W. RANDALL,<sup>5</sup> CHRISTINE JONES,<sup>5</sup> AND DENNIS ZARITSKY<sup>2</sup>

Received 2006 June 6; accepted 2006 August 3; published 2006 August 30

<sup>1</sup> Based on observations made with the NASA/ESA *Hubble Space Telescope* (*HST*), obtained at the Space Telescope Science Institute, which is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under NASA contract NAS 5-26555, under program 10200, with the 6.5 m Magellan telescopes located at Las Campanas Observatory, Chile, with the ESO telescopes at the Paranal Observatory under program IDs 72.A-0511, 60.A-9203, and 64.O-0332, and with the NASA *Chandra X-Ray Observatory*, operated by the Smithsonian Astrophysics Observatory under contract to NASA.

**Vylučuje velké množství hypotetických teorií s gravitační modifikací!**

Co se ukazovalo jako moc složité řešení (Temná hmota), vypadá nakonec jako to nejjednodušší řešení!





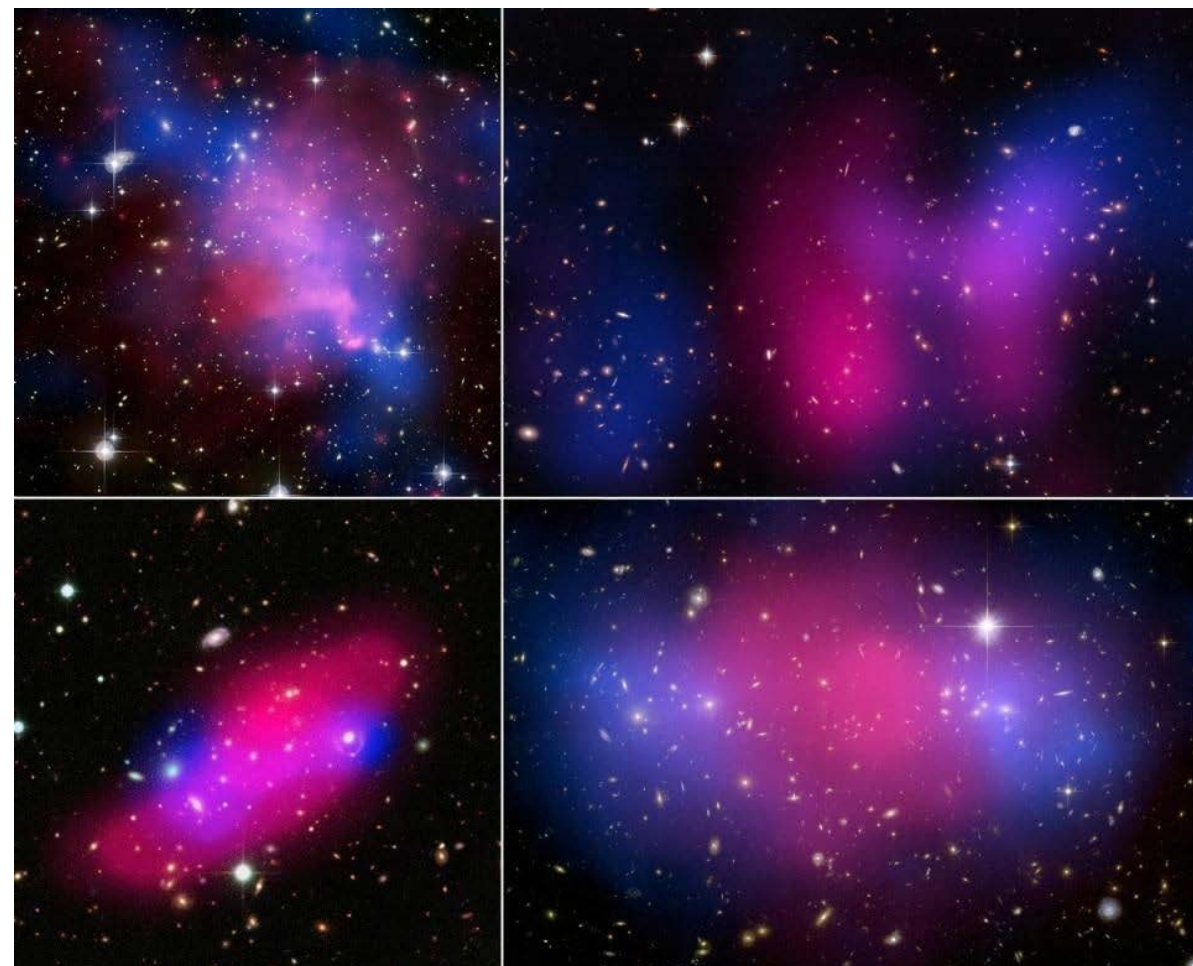
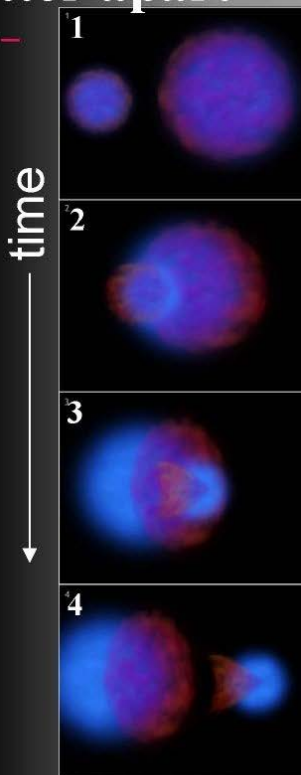
# Cosmic Collision of 2 Galaxy Clusters splitting normal matter and dark matter apart

– Another Clear Evidence of Dark Matter –  
(8/21/06)

Ordinary Matter  
(NASA's Chandra X  
Observatory)

Dark Matter  
(Gravitational Lensing)

Approximately  
the same size as  
the Milky Way

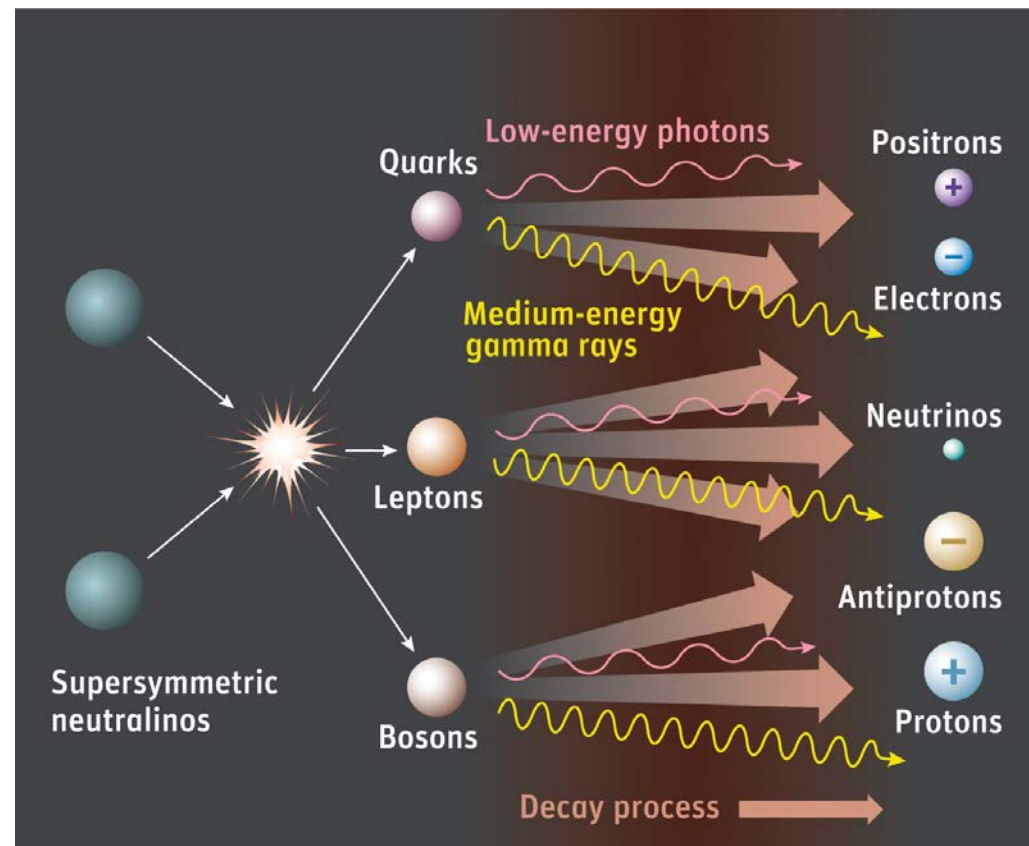


gravitační mikročočkování



rentgenové záření horkého plynu

# Weakly interacting massive particles (WIMPs)





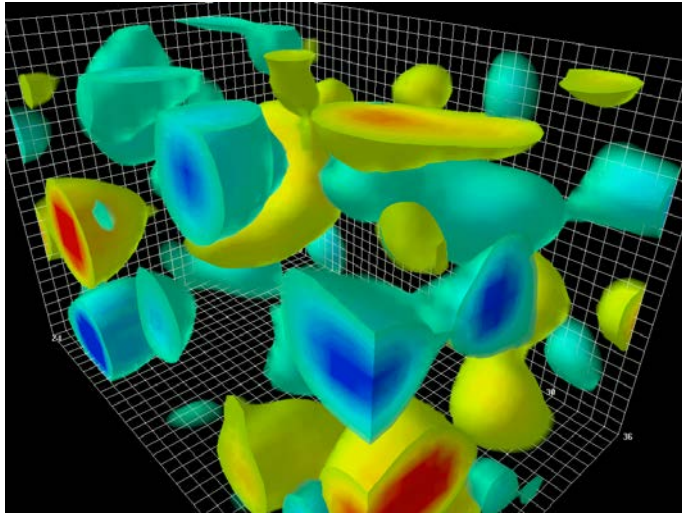
Hustota **Temné energie** dle Standardního modelu:  $10^{108} \text{ eV}^4$

Experimentální hodnota hustoty energie vakua:  $10^{-12} \text{ eV}^4$

Více-dimenzionální prostory nebo  
fluktuační super-symetrických částic

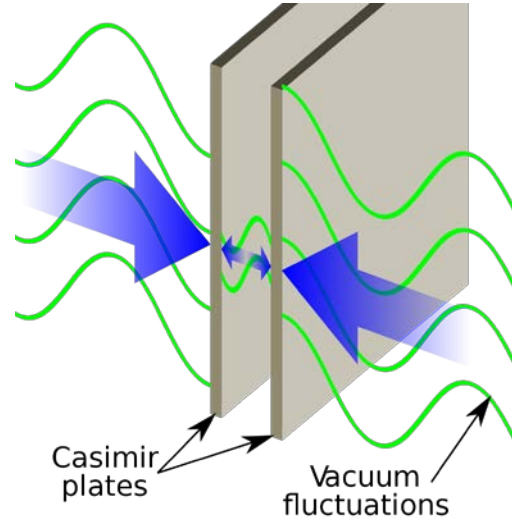
Fluktuační vakua

Heisenbergova relace neurčitosti

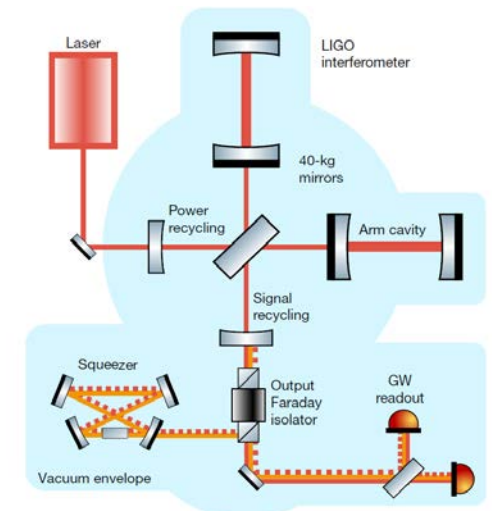
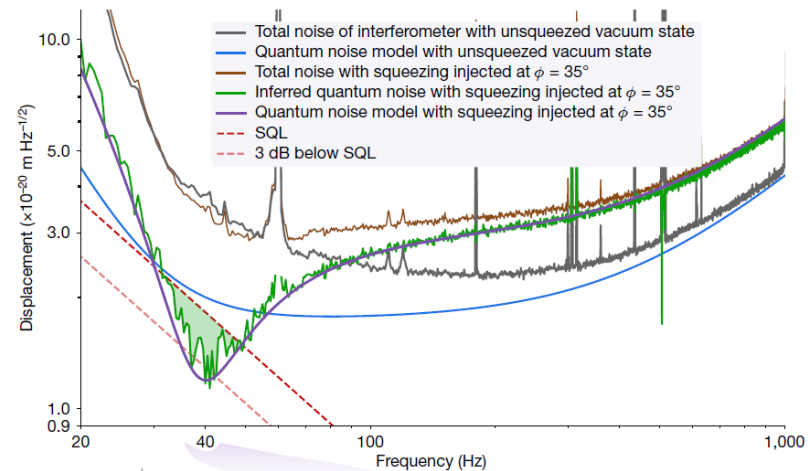
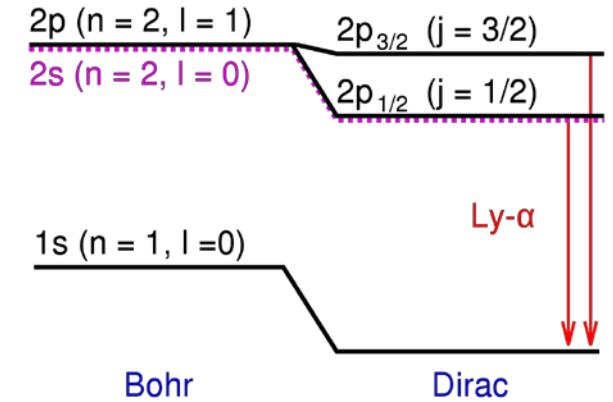


$$\Delta E \Delta t \geq \frac{1}{2} \hbar$$

**Casimirův jev**



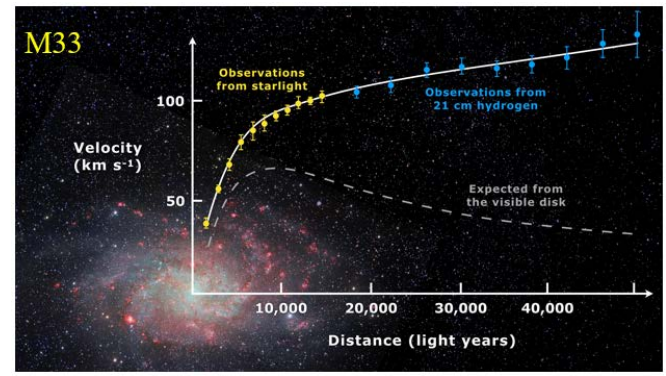
**Lambův spektrální posuv**



# Závěr

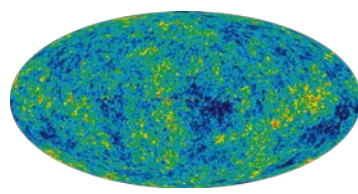
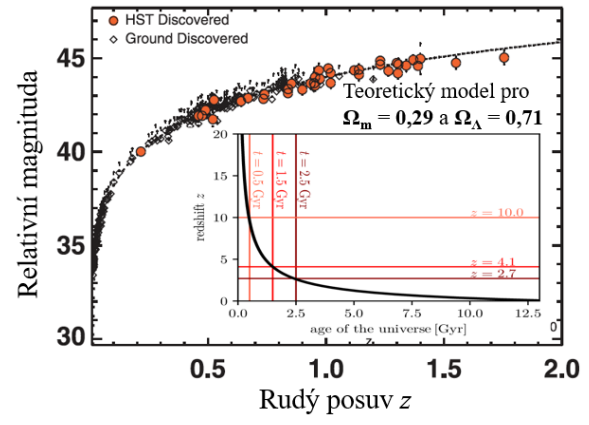
## První objev a důkazy

### Temná hmota

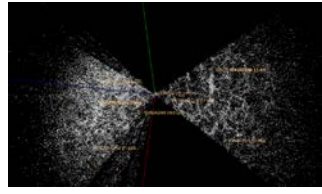


Rotační křivky galaxií a kup galaxií

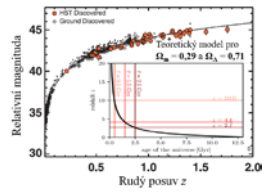
### Temná energie



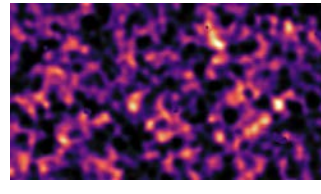
Reliktní záření



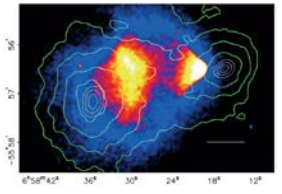
Barionové akus. oscilace



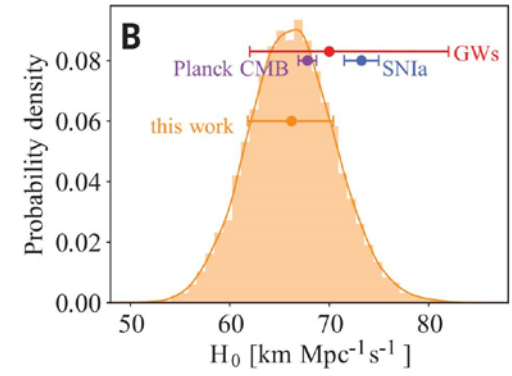
Supernovy Ia



Mikročočkování



Srážky nadkup



Gravitační vlny?

## Kandidáti

