

Гравитациона сочива и посматрачка космологија



ПРЕДРАГ ЈОВАНОВИЋ

**АСТРОНОМСКА ОПСЕРВАТОРИЈА
БЕОГРАД**

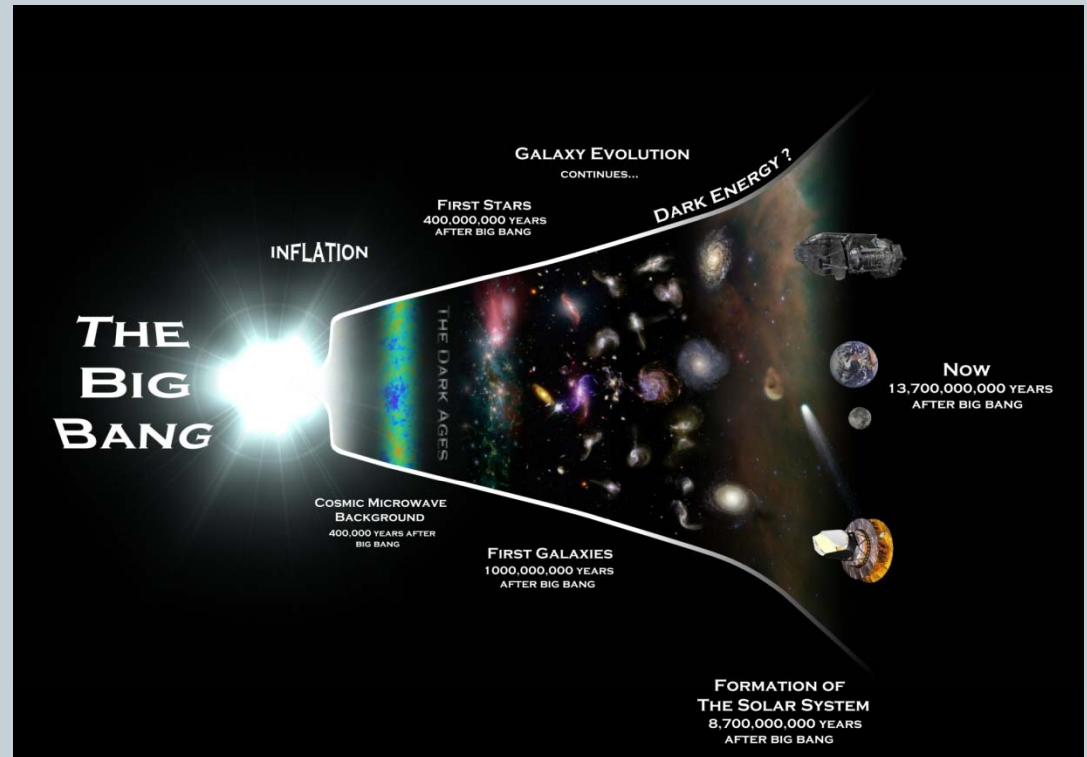
Преглед предавања



- Λ CDM космолошки модел: полазне претпоставке, FLRW метрика, Хаблов закон, Фридманове једначине, једначина стања, параметри
- Космолошке мере за растојање
- **Посматрачка космологија**
 - тестови за одређивање космолошких параметара:
 1. Супернове типа Ia (SN Ia)
 2. Космичко микроталасно позадинско зрачење (CMBR)
 3. **Гравитациона сочива:**
 - ✦ Јака: одређивање H_0 из временског кашњења сигнала и детекција галаксија на великом црвеном помаку (природни телескопи)
 - ✦ Слаба: детекција тамне материје
 - ✦ Статистика: одређивање густинских космолошких параметара
 - ✦ могући узроци неслагања са другим методама и будући посматрачки пројекти који треба да дају решење
- Закључци

Космолошки модели

- **Предмет космологије:**
настанак, еволуција и структура космоса на великим скалама
- космолошки модели описују космос у неком периоду његове еволуције
- од Великог праска до краја инфлаторне фазе: космолошки модели које изучава квантна космологија
- од краја инфлаторне фазе па надаље: космолошки модели засновани на општој теорији релативности (ОТР)
- стандардни (Λ CDM) космолошки модел



Стандардни Λ CDM космолошки модел



- описује космос након завршетка његове инфлаторне фазе
- најједноставнији модел који је у сагласности са посматрањима структура на великим скалама, CMBR и SN Ia
- FLRW метрика + Фридманове једначине + једначина стања

- **Полазне претпоставке:**

1. интеракцију геометрије простор-времена и материје описују

једначине поља ОТР:

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

2. важи **космолошки принцип**, тј. на великим скалама космос је:

- **хомоген:** исти на свим местима (не постоји специјално место - центар)
- **изотропан:** исти у свим правцима (не постоји специјалан правац - оса)

- **Фридман-Леметр-Робертсон-Вокер-ова (FLRW) метрика:**

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 (d\vartheta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right],$$

- r, φ, ϑ - координатни систем везан за посматрача који се креће заједно са ширењем свемира (енг. “comoving coordinates”); $a(t)$ – бездимензиони фактор скалирања (“величина свемира”); k – параметар просторне кривине

Хаблов закон

- $a(t)$ – фактор пропорционалности између растојања у различитим епохама космолошког времена:

$$D(t) = \frac{a(t)}{a(t_0)} D(t_0)$$

- **Хаблов параметар (константа) и параметар успорења:**

$$H(t) := \frac{\dot{a}}{a}, \quad H_0 = H(t_0)$$

($H > 0$ – ширење;
 $H < 0$ – скупљање)

$$q = -\frac{\ddot{a}}{aH^2}$$

($q > 0$ – успорење;
 $q < 0$ – убрзање)

- **Хаблово време и радијус:** $t_H := 1/H_0$; $r_H := c/H_0$

- **Хаблов закон:**

$$V_r = \dot{D} = \frac{\dot{a}}{a_0} D_0 = \frac{\dot{a}}{a} D = H \cdot D$$

(Lemaître, 1927, ASSB, 47, 49)

- **Космолошки црвени помак:**

$$1 + z = \frac{a(t_0)}{a(t_e)} = \frac{\lambda_0}{\lambda_e} = 1 + \frac{\overbrace{\lambda_0 - \lambda_e}^{\Delta\lambda}}{\lambda_e}$$

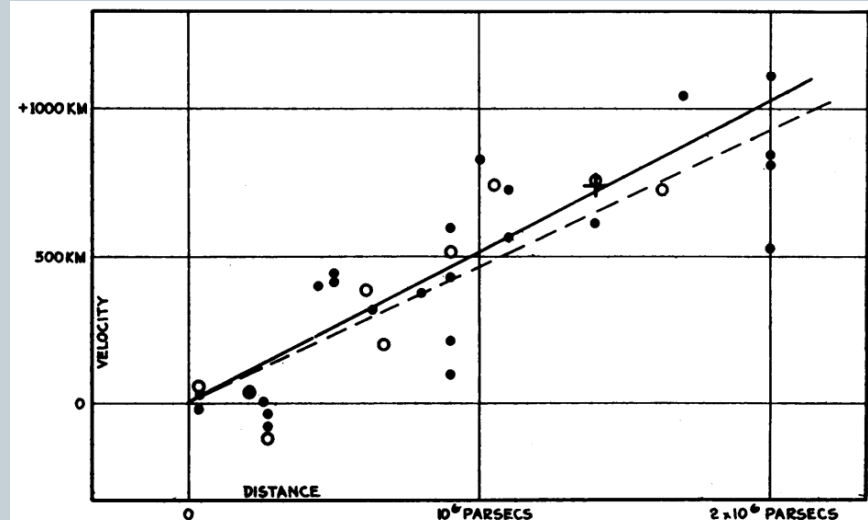


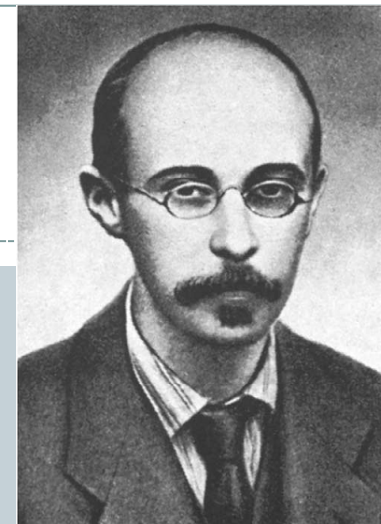
FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

- Космос се убрзано шири: **Велики прасак**

(Hubble, 1929, PNAS, 15, 168)

Фридманове једначине и једначина стања



3. Материја у космосу се моделује помоћу **идеалног флуида**:

- изотропан у свом систему мировања
- не проводи топлоту и нема вискозност
- потпуно карактерисан притиском $p(t)$ и густином $\rho(t)$

- за FLRW метрику и идеални флуид са густином ρ и притиском p , једначине поља ОТО се свODE на **Фридманове једначине**:

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

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

● **Једначина стања за идеални флуид**:

- бездимензиони параметар w такав да је: $p = w\rho c^2 \Rightarrow \rho = \rho_0 a^{-3(1+w)}$
- Фридманове једначине: еволуција космоса функција само од ρ
- нерелативистичка материја (барионска материја, CDM): $w = 0$
- релативистичка материја (зрачење, материја у раном космосу): $w = 1/3$
- тамна енергија: $w = -1$

Параметри космошког модела

- **Критична густина космоса:**

1. Фридманова једначина \Rightarrow
 $k=0$
 $\Lambda=0$

$$\rho_{cr} = \frac{3H^2}{8\pi G} \Rightarrow \rho_{cr0} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

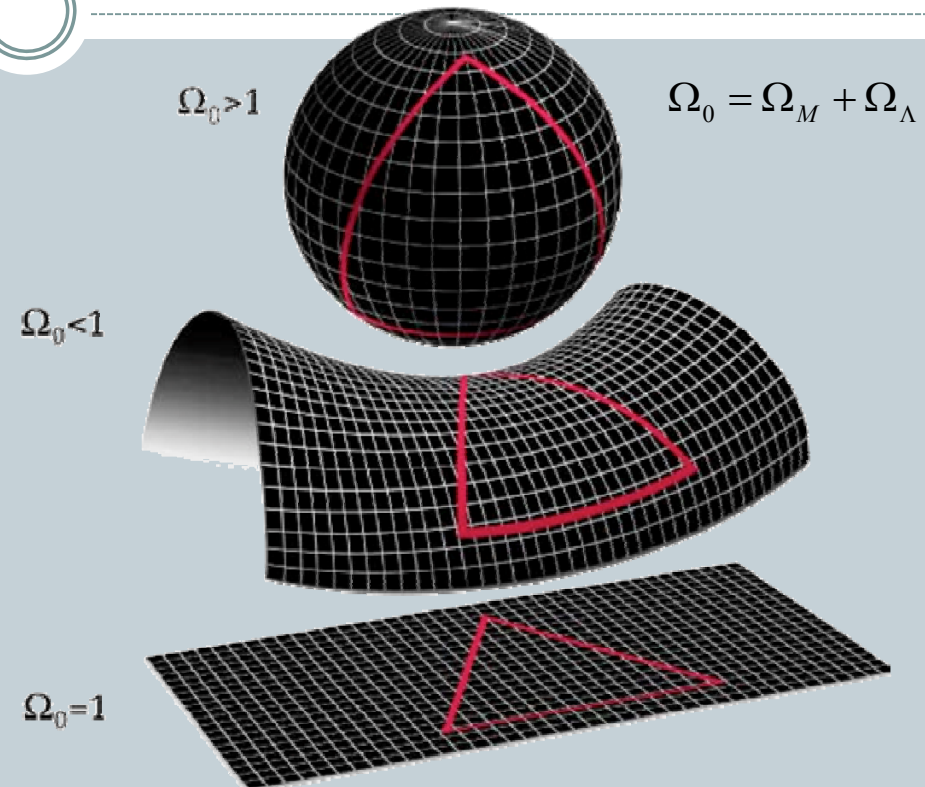
- **Густињски параметри:**

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_{cr}} \Rightarrow \Omega_M = \frac{\rho_0}{\rho_{cr0}} = \frac{8\pi G \rho_0}{3H_0^2}$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2} \quad \Omega_k = -\frac{kc^2}{a_0^2 H_0^2}$$

- 1. Фридманова једначина \Rightarrow

$$\Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1$$



- **Раздвојени доприноси:** $\Omega_M = \Omega_m + \Omega_r$
 једначина стања \Rightarrow

$$\rho = \begin{cases} \rho_m = \rho_{m0} a^{-3}, w = 0 \\ \rho_r = \rho_{r0} a^{-4}, w = 1/3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Omega_m = \rho_m / \rho_{cr} \\ \Omega_r = \rho_r / \rho_{cr} \end{cases}$$

Космолошке мере за растојање I



- формула за претварање космолошког црвеног помака z у растојање D
- у космосу који се шири, D се дефинише у зависности од примене

1. Растојање на основу Хабловог закона (енг. “comoving distance”):

$$D_C = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_M (1+z')^3 + \Omega_k (1+z')^2 + \Omega_\Lambda}}$$

- користи се код Хаблових дијаграма
- остала космолошка растојања се могу изразити преко D_C (њихове дефиниције биће дате само за најједноставнији случај: $\Omega_k = 0$)

2. Растојање за угаони пречник (енг. “angular diameter distance”):

- мери се помоћу **стандардних космолошких лењира**: објекти чији се линеарни дијаметар d не мења са космолошким временом: $D_A = d / \theta$, где је θ посматрани угаони дијаметар
- користи се код СМВР и гравитационих сочива

$$D_A = \frac{D_C}{1+z}$$

Космолошке мере за растојање II

3. Растојање за луминозност (енг. “luminosity distance”):

- мери се помоћу **стандардних космолошких свећа**:

објекти чија се луминозност L

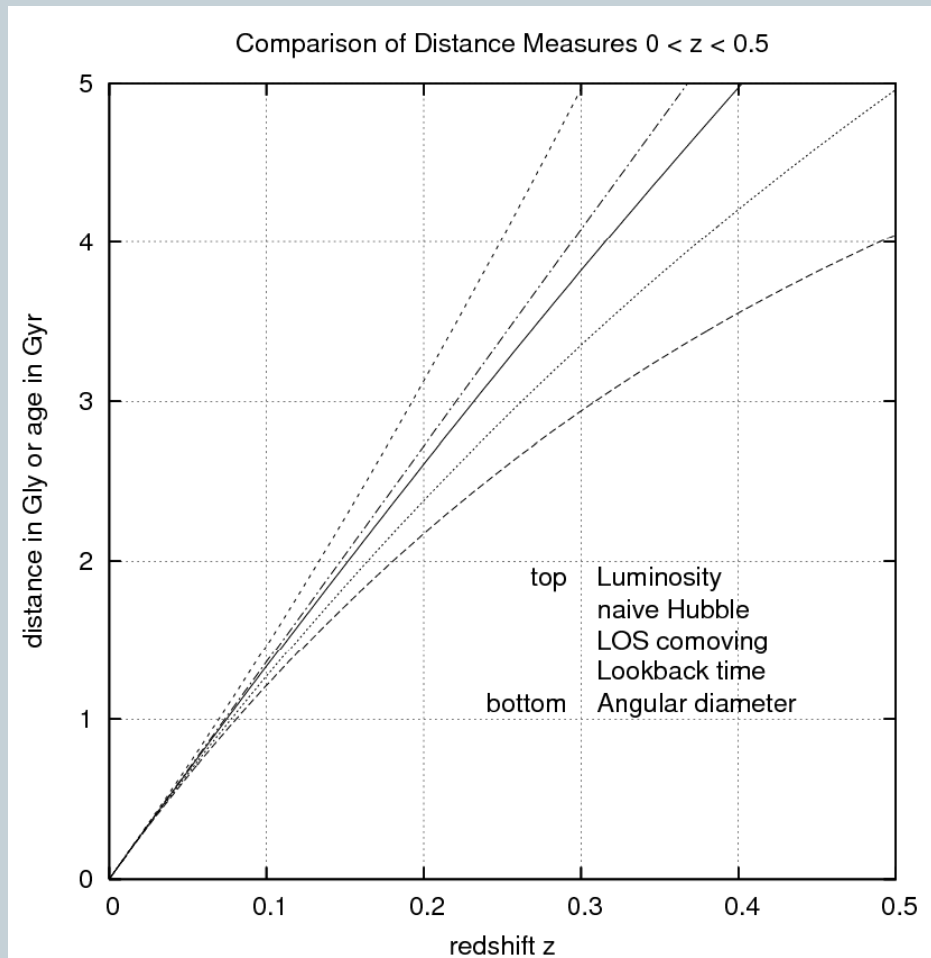
не мења са космолошким

временом: $D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$,

где је F измерени флуks

$$D_L = (1+z)D_C = (1+z)^2 D_A$$

- користи се за растојања до SN Ia
- постоје и друге дефиниције за космолошка растојања
- коришћење неодговарајућег D узрокује грешке које расту са z



$$H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}, \Omega_M = 0.27, \Omega_\Lambda = 0.73$$

Посматрачка космологија



- **Циљ:** изучавање настанка, еволуције и структуре космоса на великим скалама користећи одговарајућа астрономска посматрања (космолошке тестове)
- своди се на одређивање космолошких параметара
- **Тестови за одређивање космолошких параметара:**
 1. помоћу D_L : SN Ia, цефеиде у другим галаксијама, Тали-ФишEROVA и Фабер-Џексонова релација
 2. помоћу D_A : CMBR, BAO, гравитациона сочива
 3. помоћу статистике удаљених објеката: број галаксија веома слабог сјаја у функцији њиховог флуksа и црвеног помака, статистика грав. сочива

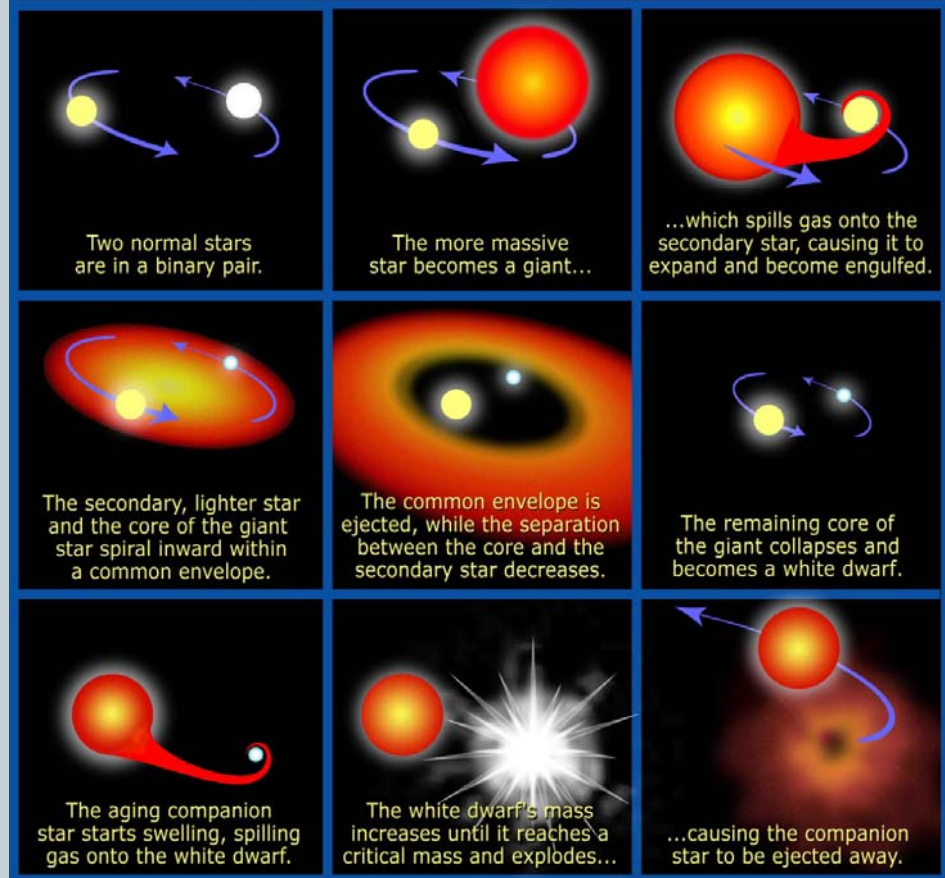
Супернове типа Ia

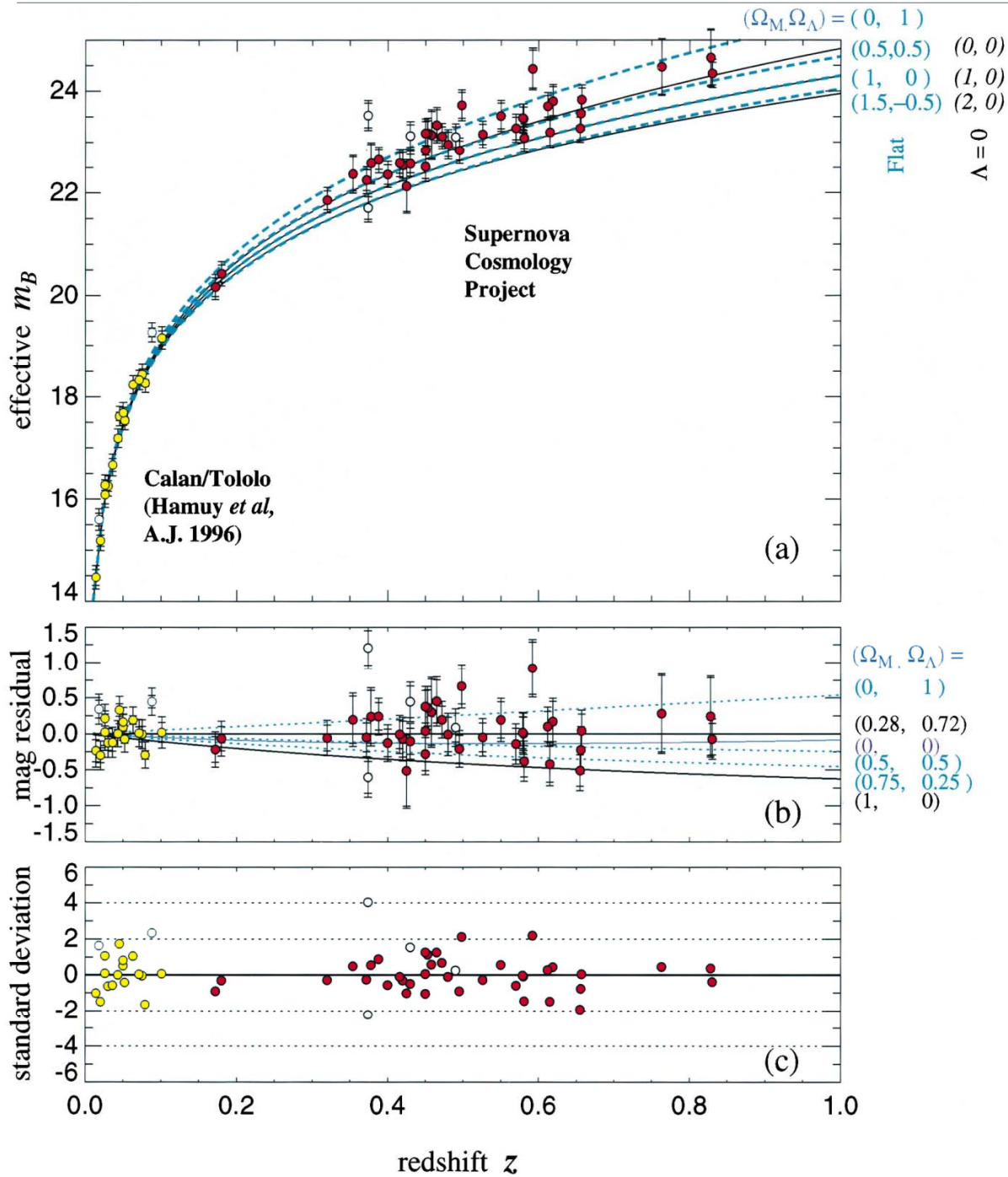
- настају у блиским двојним системима
- стандардне свеће јер имају исту апсолутну величину M која је позната ($\approx -19^m.5$)
- привидна величина m се мери
- z се мери спектроскопски
- космолошки параметри се одређују из (Perlmutter et al. ApJ, 1997, 483, 565):

$$m(z) = M + 5 \log D_L(z; \Omega_M, \Omega_\Lambda, H_0) + 25$$

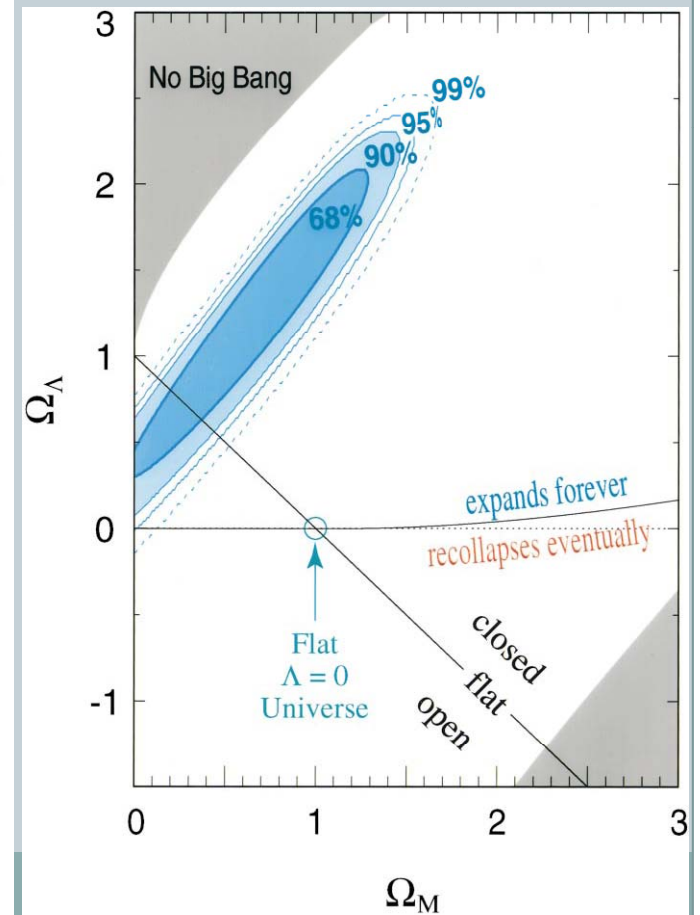
- “Supernova Cosmology Project”
- “High-Z SN Search”

The progenitor of a Type Ia supernova



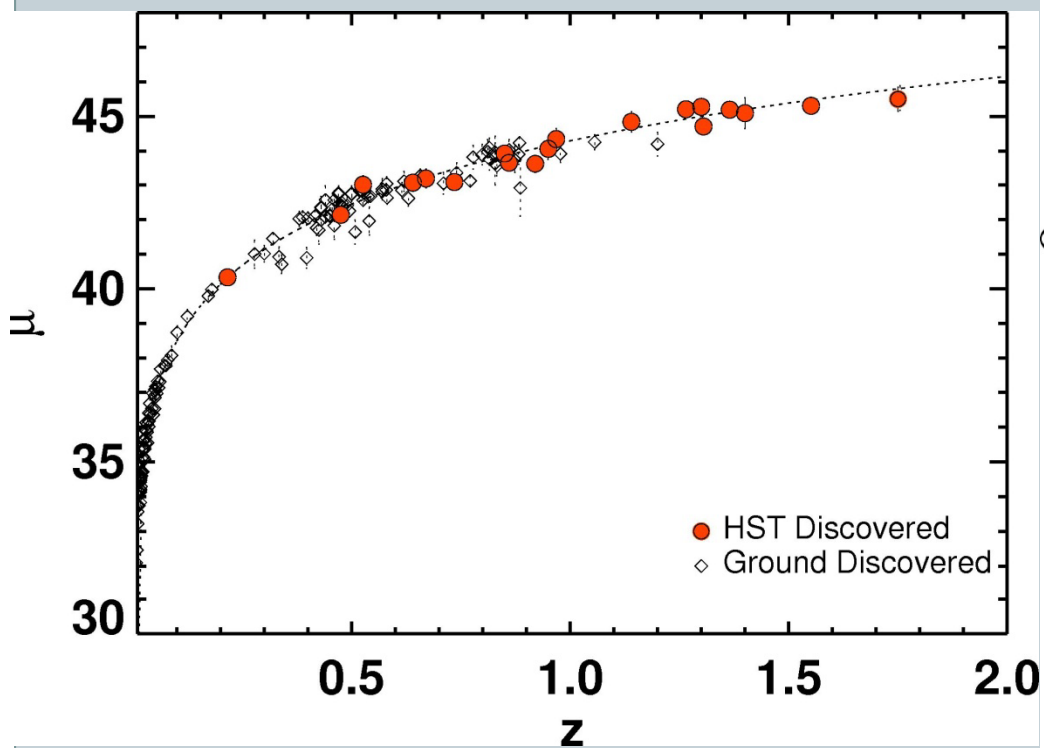


(Perlmutter et al. ApJ, 1999, 517, 565):

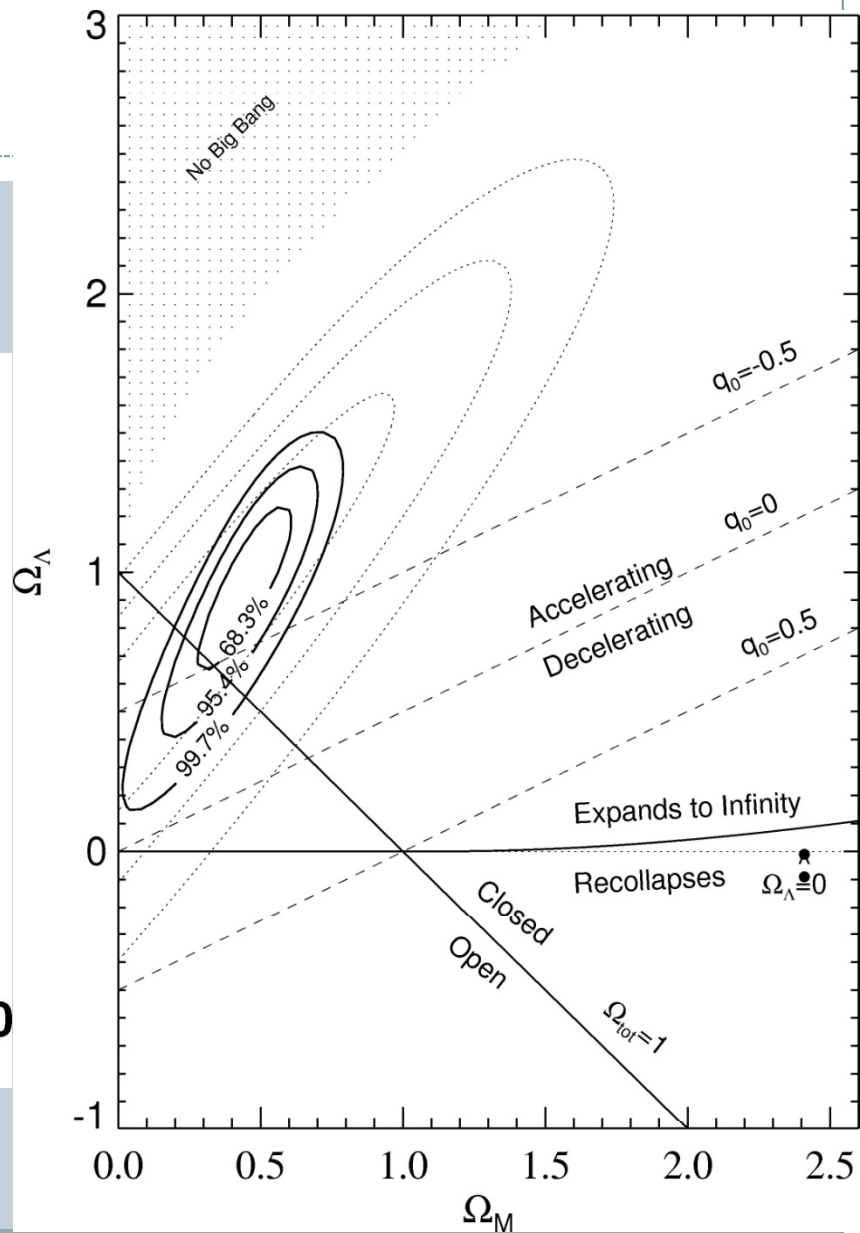




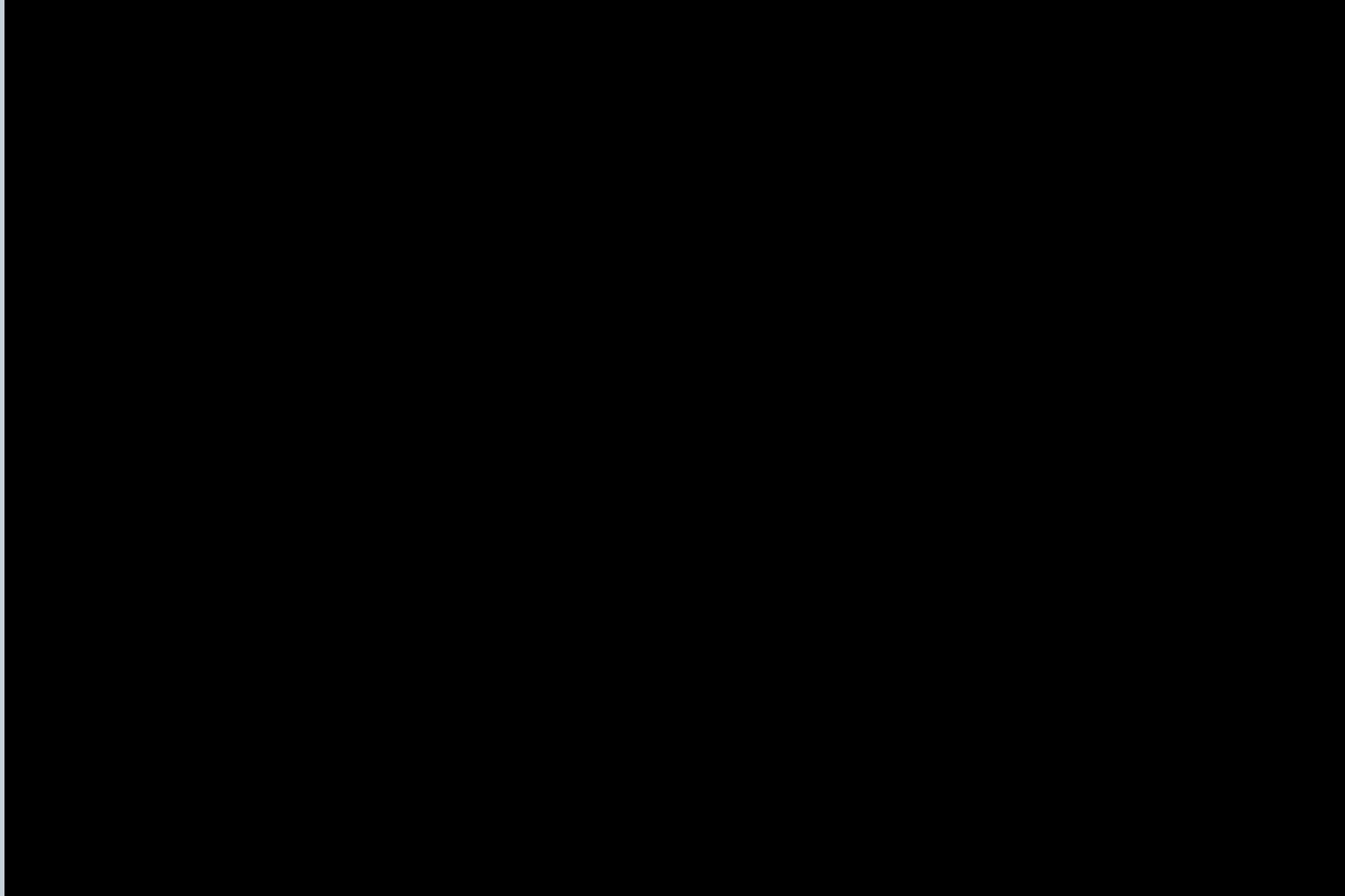
$$\Omega_M = 0.29, \Omega_\Lambda = 0.71, \Omega_k = 0$$



Riess et al. 2004, ApJ, 607, 665



Утицај тамне енергије на коначну судбину космоса: убрзано ширење



Тамна енергија: Нобелова награда из физике за 2011.

- Убрзано ширење космоса откривено помоћу посматрања удаљених супернових



Saul Perlmutter



Brian P. Schmidt



Adam G. Riess

- Ширење космоса услед тамне енергије

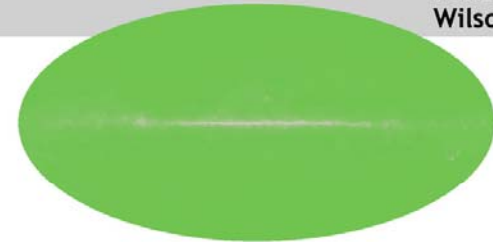
Космичко микроталасно позадинско зрачење (СМВР)

- Реликтно зрачење из периода рекомбинације, око 380.000 година после Великог праска ($z \approx 1000 - 1100$)
- Услед ширења космоса плазма се охладила на око 3000 К што је омогућило рекомбинацију протона и електрона у неутрални водоник
- Фотони ретко интерагују са неутралном материјом па је тада космос постао прозиран за њих (раздвајање фотона од барионске материје)
- Температура СМВР коју ми сада детектујемо је $T = 2.725$ К, што је за око 1100 пута мање од T из доба рекомбинације (због z)

1965



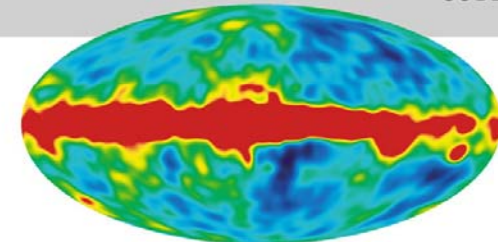
Penzias and Wilson



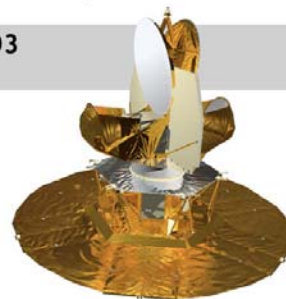
1992



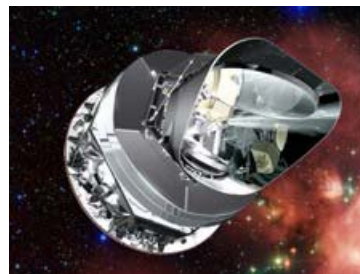
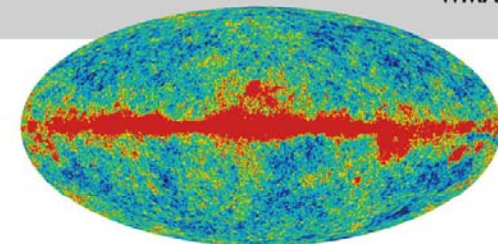
COBE



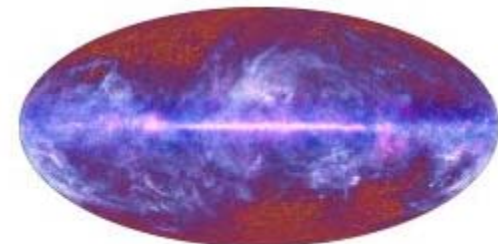
2003



WMAP



Planck, 2009



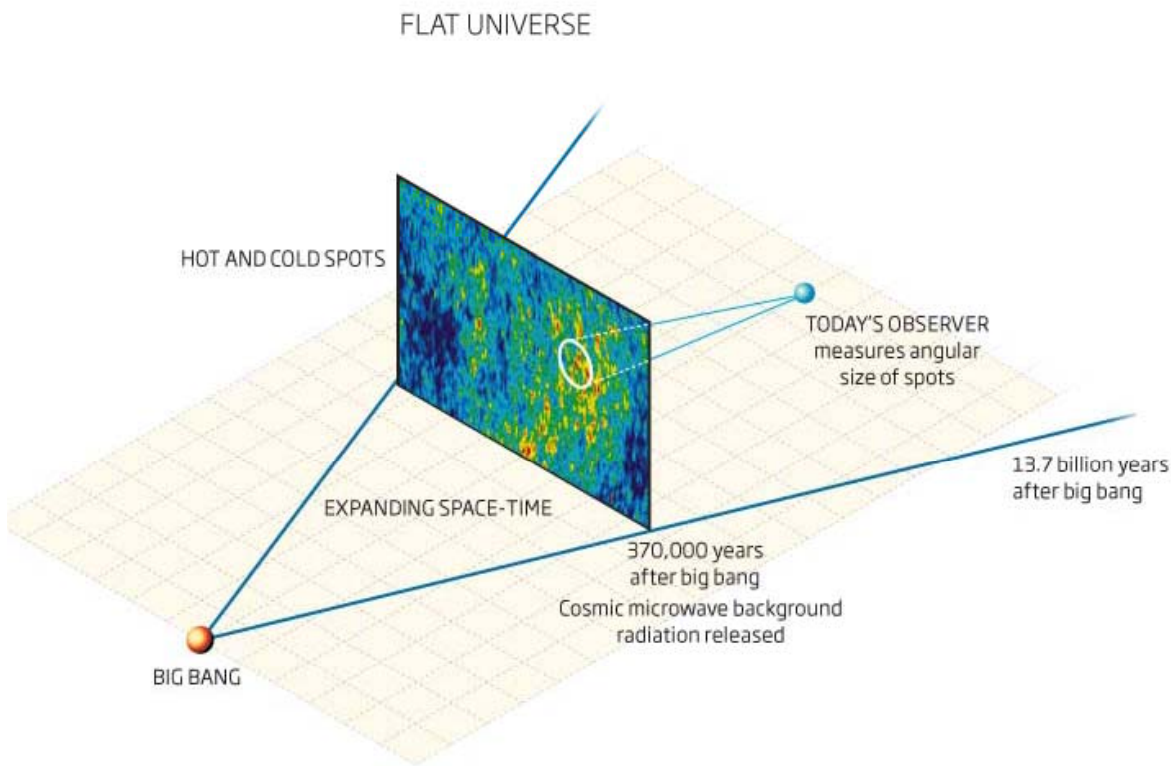
СМВР као потврда Великог праска



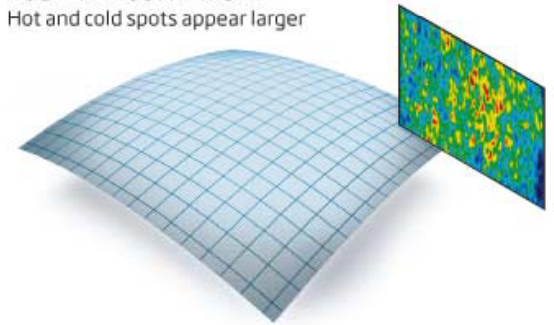
The shape of the universe

©NewScientist

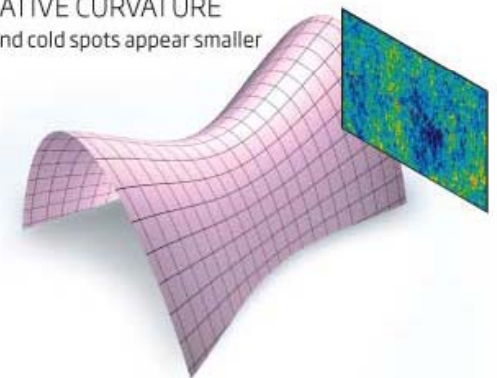
The cosmic microwave background radiation has hot and cold spots whose apparent size depends on the geometry of space-time and how far light has travelled since the radiation was released



POSITIVE CURVATURE
Hot and cold spots appear larger



NEGATIVE CURVATURE
Hot and cold spots appear smaller



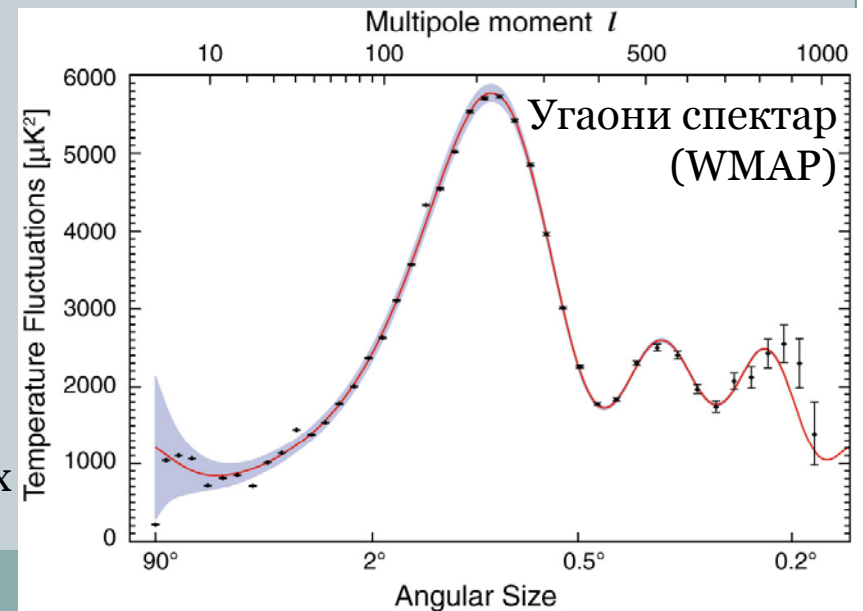
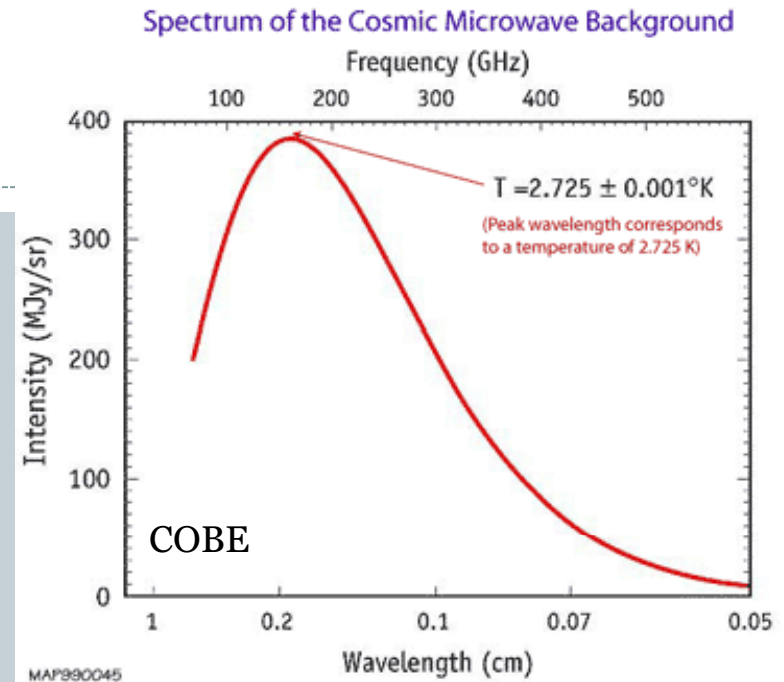
COBE & WMAP

1. Cosmic Background Explorer (COBE):

- CMBR има планковски спектар (најсавршенији спектар зрачења црног тела у природи)
- Анизотропија (угаоне варијације) у температури CMBR услед кретања фотона кроз нехомогене области космоса
- Нехомогености настале услед тзв. акустичних осцилација
- Густинске пертурбације у раном космосу изазиване супротстављеним дејством гравитације и притиска, које се понашају као акустични таласи
- Варијације у температури: пеге на слици CMBR

2. Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP):

- анизотропија CMBR реда величине 10^{-5} K
- космологија као прецизна посматрачка наука
- **угаони спектар:** зависност амплитуда температурских флукуација пеге од њихових угаоних величина, добијен помоћу хармонијске анализе

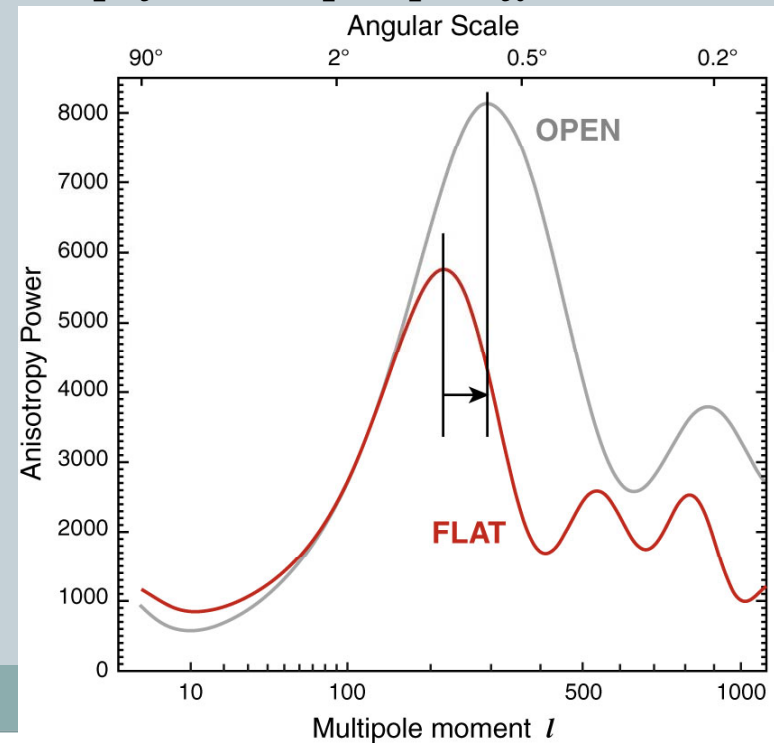
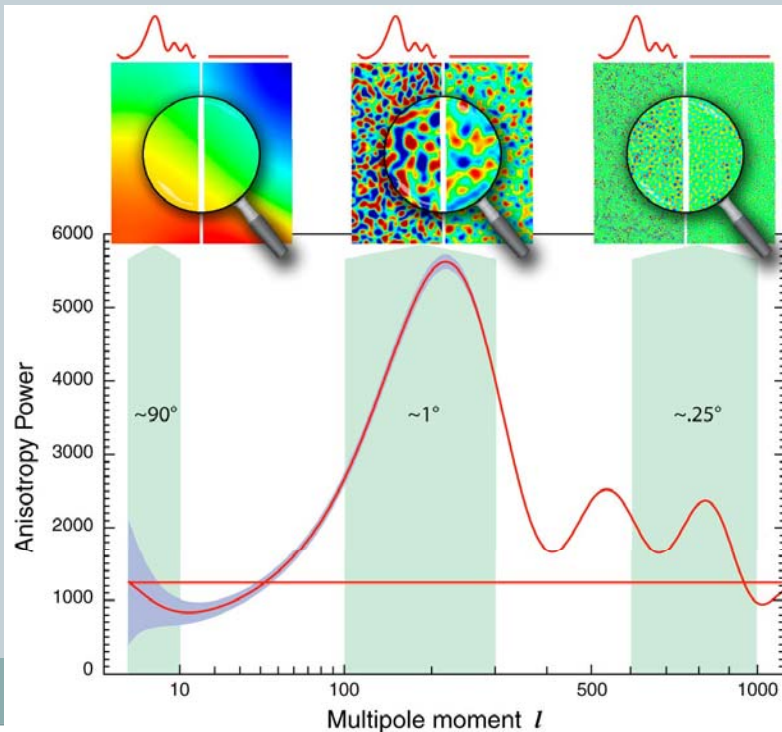


Одређивање космолошких параметара из угаоног спектра СМВР

- одређују се из угаоних величина пега, тј. из положаја пикова на угаоном спектру

- Page et al. 2003, ApJ, 148,233:
$$\Delta T_l^2 = \frac{l(l+1)C_l}{2\pi}, \quad l = \frac{\pi}{\theta} = \frac{\pi D_A(z)}{r_s(z)}$$

- l – индекс хармоника (мултипол); C_l – спектрална густина; θ – угаона величина пега
- r_s – радијус звучног хоризонта, тј. радијус густинске пертурбације (звучног таласа) на којем су се фотони раздвојили од барионске материје (линеарни радијуси пега)



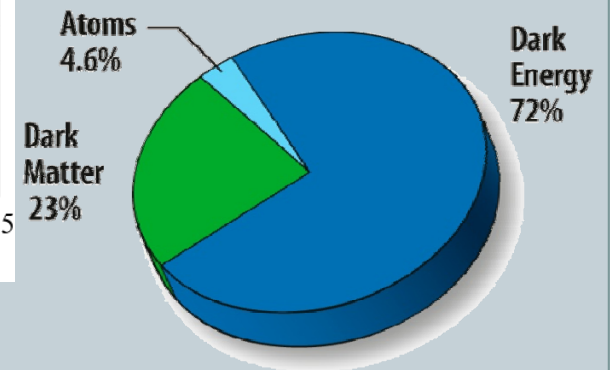
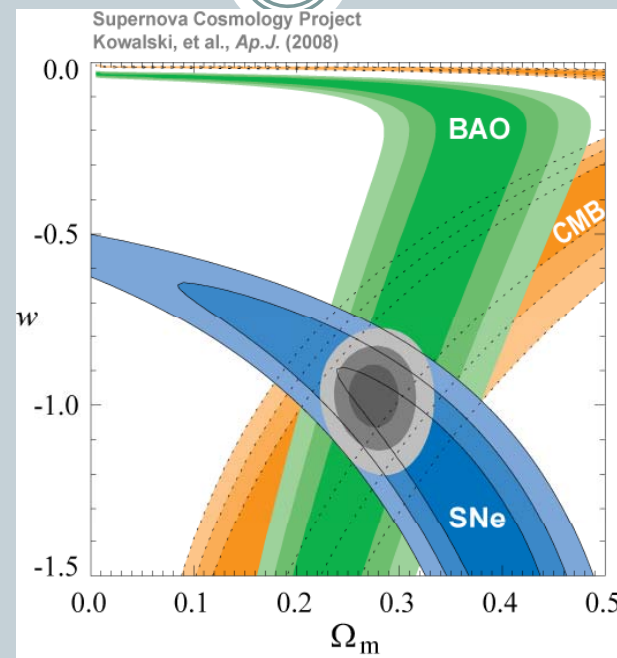
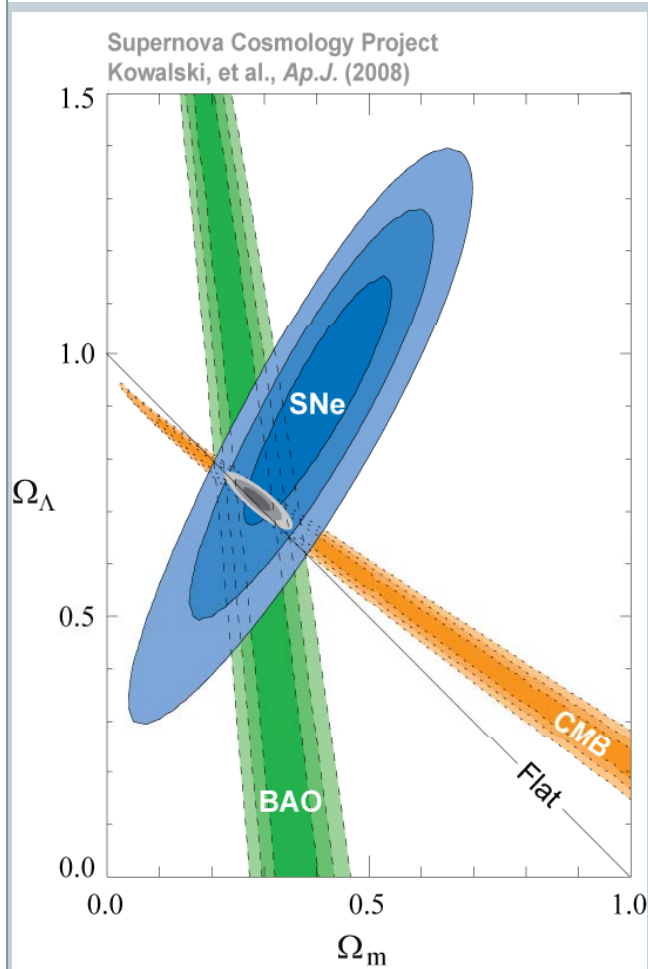
Вредности космолошких параметара

WMAP Seven-year Cosmological Parameter Summary

Description	Symbol	WMAP-only	WMAP+BAO+ H_0
Parameters for the Standard Λ CDM Model ^a			
Age of universe	t_0	13.75 ± 0.13 Gyr	13.75 ± 0.11 Gyr
Hubble constant	H_0	71.0 ± 2.5 km s ⁻¹ Mpc ⁻¹	$70.4^{+1.3}_{-1.4}$ km s ⁻¹ Mpc ⁻¹
Baryon density	Ω_b	0.0449 ± 0.0028	0.0456 ± 0.0016
Physical baryon density	$\Omega_b h^2$	$0.02258^{+0.00057}_{-0.00056}$	0.02260 ± 0.00053
Dark matter density	Ω_c	0.222 ± 0.026	0.227 ± 0.014
Physical dark matter density	$\Omega_c h^2$	0.1109 ± 0.0056	0.1123 ± 0.0035
Dark energy density	Ω_Λ	0.734 ± 0.029	$0.728^{+0.015}_{-0.016}$
Curvature fluctuation amplitude, $k_0 = 0.002$ Mpc ^{-1b}	$\Delta_{\mathcal{R}}^2$	$(2.43 \pm 0.11) \times 10^{-9}$	$(2.441^{+0.088}_{-0.092}) \times 10^{-9}$
Fluctuation amplitude at $8h^{-1}$ Mpc	σ_8	0.801 ± 0.030	0.809 ± 0.024
Scalar spectral index	n_s	0.963 ± 0.014	0.963 ± 0.012
Redshift of matter–radiation equality	z_{eq}	3196^{+134}_{-133}	3232 ± 87
Angular diameter distance to matter–radiation eq. ^c	$d_A(z_{\text{eq}})$	14281^{+158}_{-161} Mpc	14238^{+128}_{-129} Mpc
Redshift of decoupling	z_*	$1090.79^{+0.94}_{-0.92}$	$1090.89^{+0.68}_{-0.69}$
Age at decoupling	t_*	379164^{+5187}_{-5243} yr	377730^{+3205}_{-3200} yr
Angular diameter distance to decoupling ^{c,d}	$d_A(z_*)$	14116^{+160}_{-163} Mpc	14073^{+129}_{-130} Mpc
Sound horizon at decoupling ^d	$r_s(z_*)$	$146.6^{+1.5}_{-1.6}$ Mpc	146.2 ± 1.1 Mpc
Acoustic scale at decoupling ^d	$l_A(z_*)$	302.44 ± 0.80	302.40 ± 0.73
Reionization optical depth	τ	0.088 ± 0.015	0.087 ± 0.014
Redshift of reionization	z_{reion}	10.5 ± 1.2	10.4 ± 1.2

(Jarosik et al. 2011, ApJS, 192, 14)

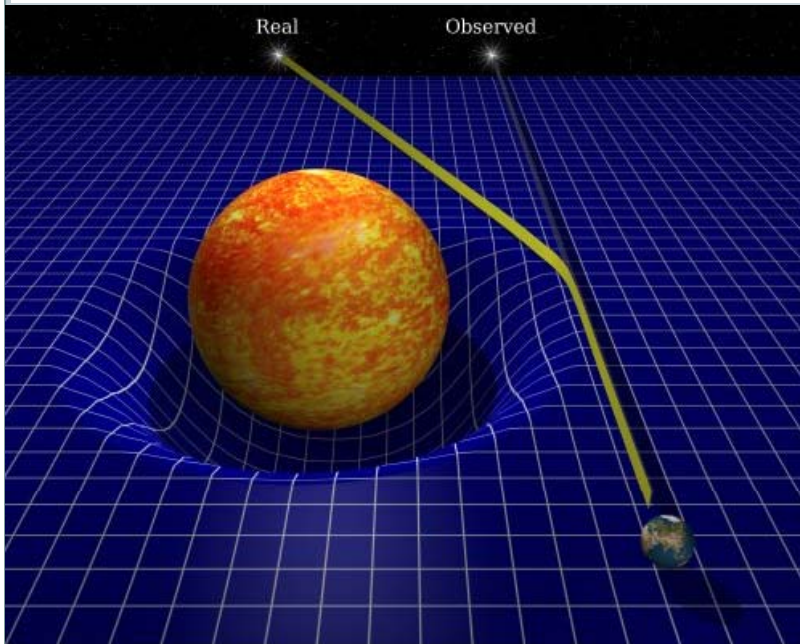
Усаглашени параметри космолошког модела и састав космоса у садашњој епохи



- Најважнији резултат стандардног Λ CDM космолошког модела: више од 95% садашњег састава космоса има непознату природу

Гравитациона сочива

- угао савијања светлости у гравитационом пољу:



1. Johann Georg von Soldner (1804):

$$\Theta = \frac{2GM}{c^2 R}$$

2. Albert Einstein (1915):

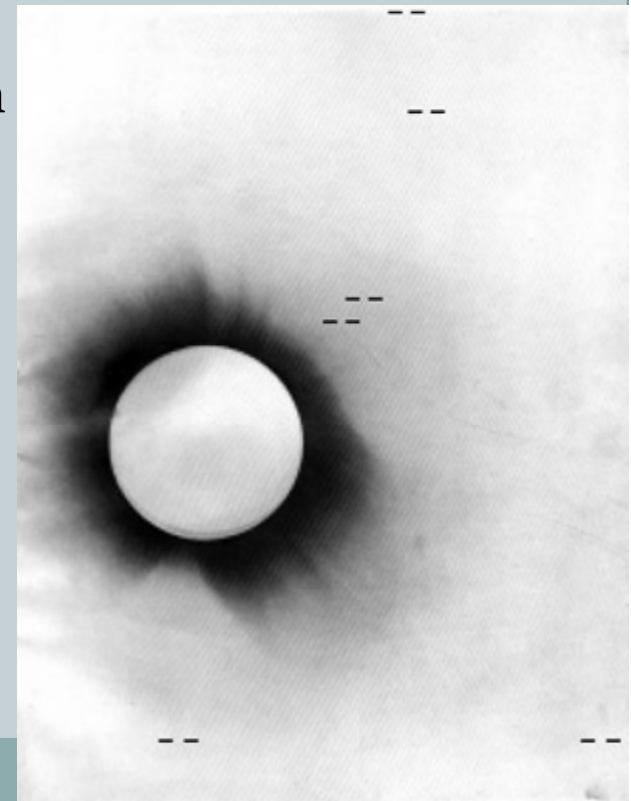
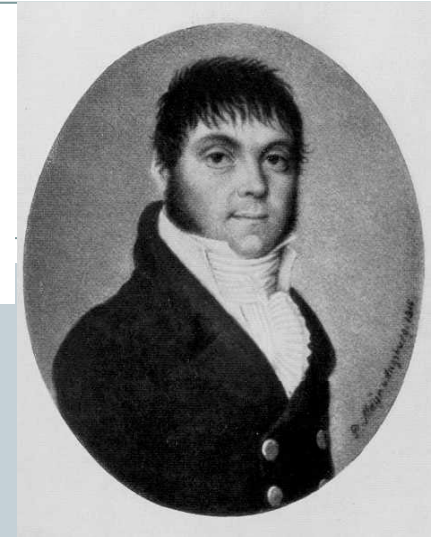
$$\Theta = \frac{4GM}{c^2 R}$$

- Потпуно помрачење Сунца 1919:

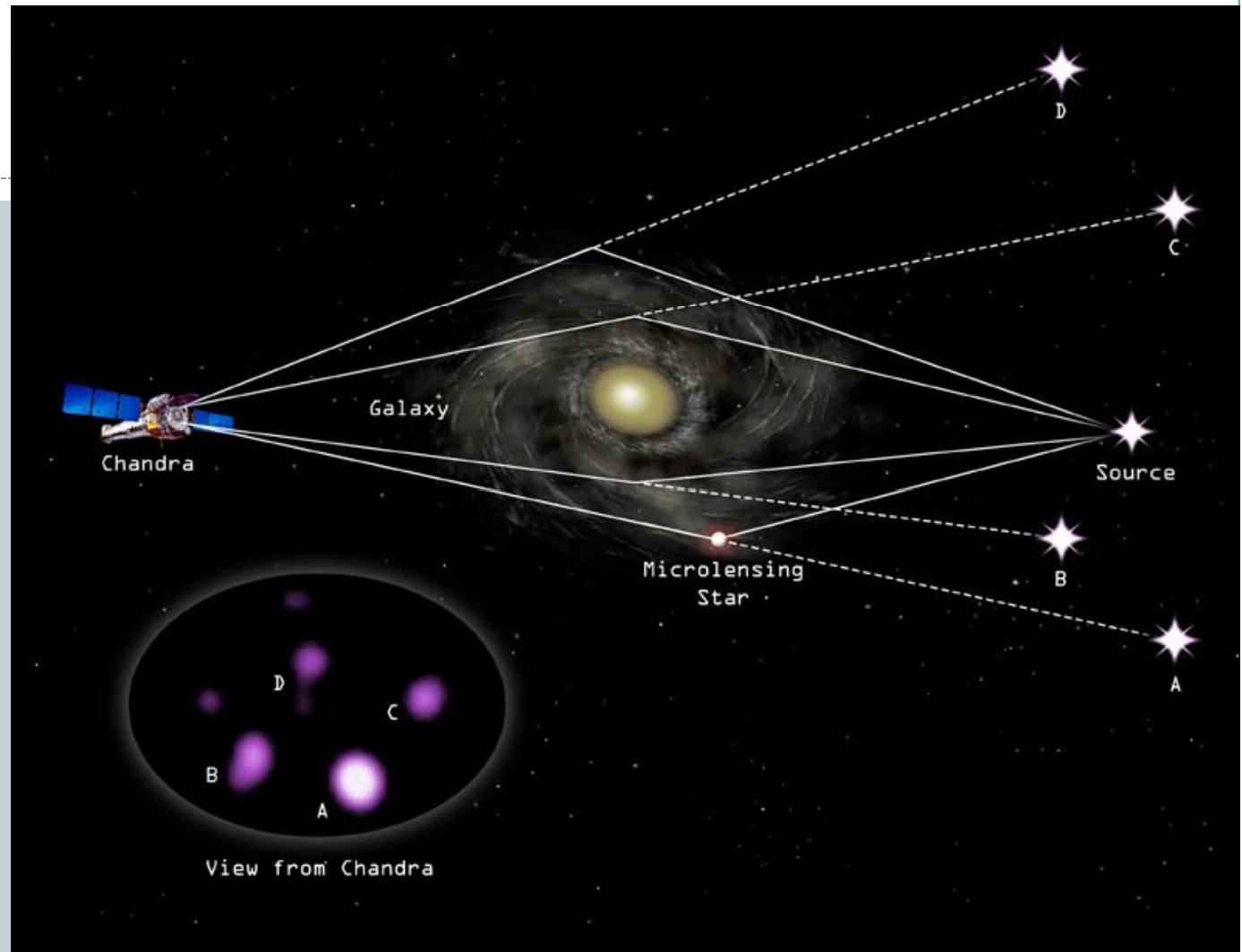
1. Нема савијања: $\Theta = 0''$
2. Њутнова механика: $\Theta = 0''.87$
3. ОТР: $\Theta = 1''.75$

- Потврда Ајнштајнових предвиђања:

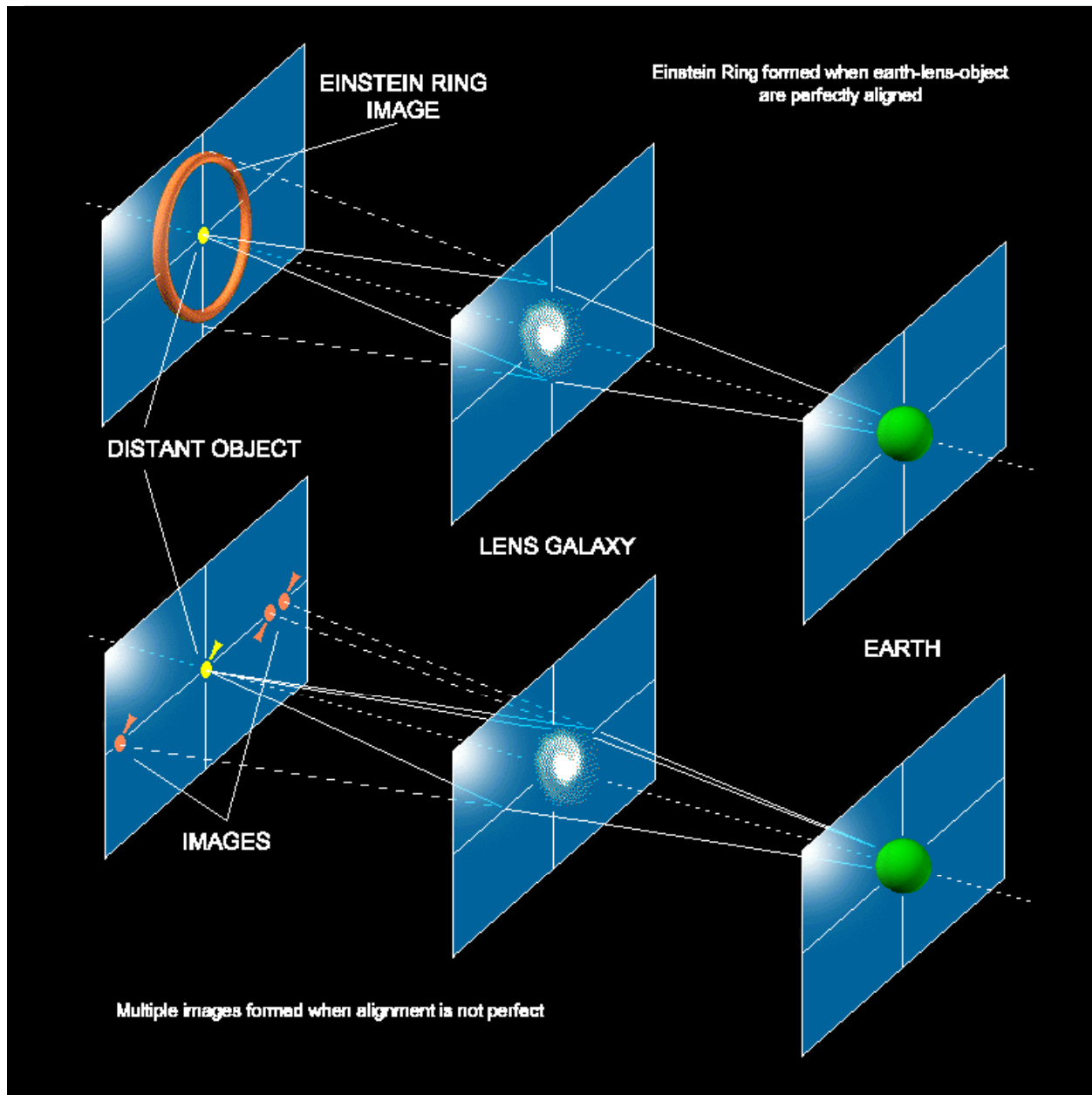
$$\Theta = 1''.98 \pm 0''.12 \quad \Theta = 1''.61 \pm 0''.30$$



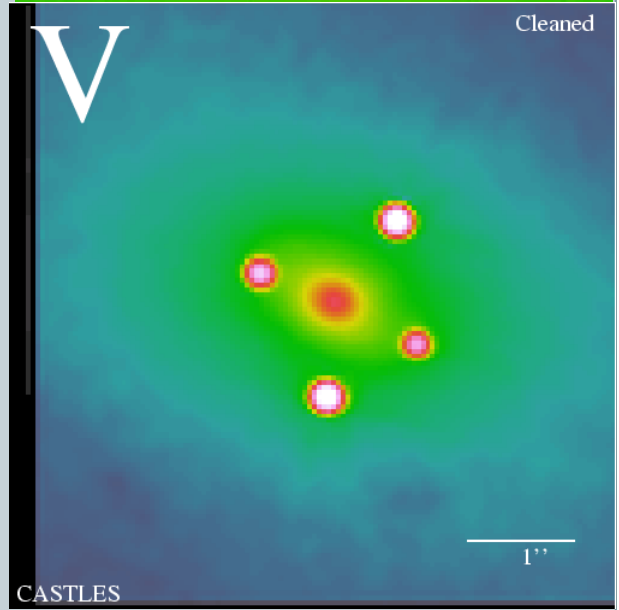
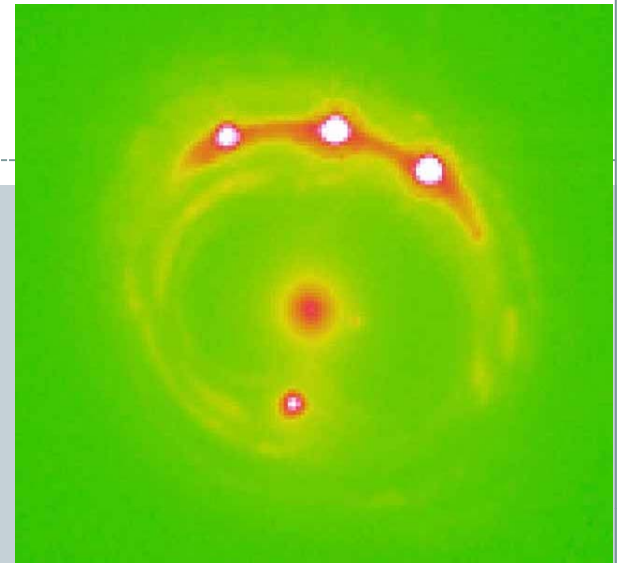
- Dennis Walsh, Bob Carswell, Ray Weymann 1979. открили двојни квазар QSO 0957+561 и потврдили да се ради о гравитационом сочиву



- Једначина гравитационог сочива: $\vec{\eta} = \frac{D_{os}}{D_{od}} \vec{\xi} - D_{ds} \vec{\alpha}(\vec{\xi}), \quad \vec{\alpha}(\vec{x}) = \nabla \psi(\vec{x})$



Квазар RXJ1131-1231



Квазар Q2237+030 на $z=1.695$ (Ајнштајнов крст)
и галаксија-сочиво ZW2237+030 на $z=0.0394$

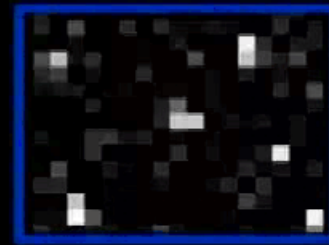
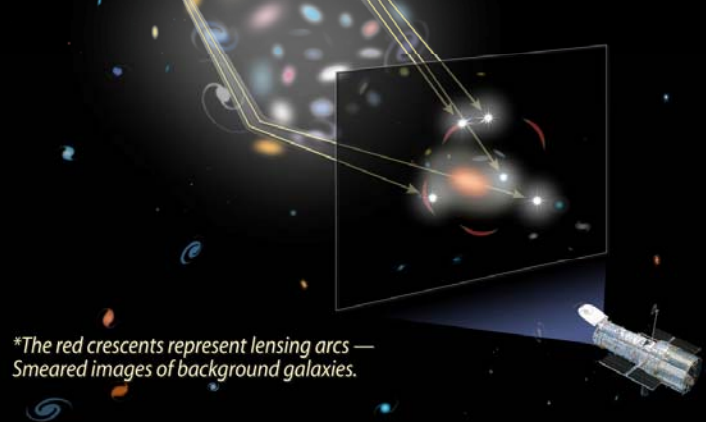
Lensing Galaxy



Gravitational Lensing Splits Quasar Light into Five Images

Distant quasar with host galaxy

Light emitted from quasar bends around intervening galaxy cluster, producing lensed images*



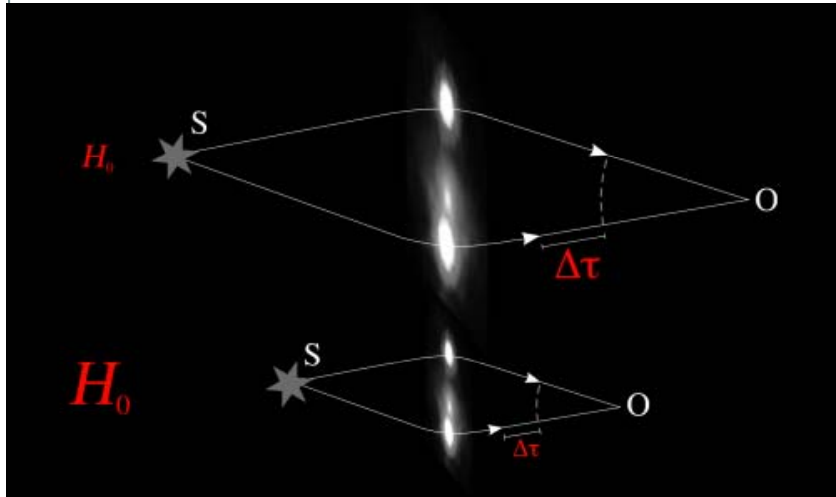
Planet

Lens Star

Source Star

Observer

Одређивање H_0 из временског кашњења светлости појединачних ликова



- Kochanek & Schechter, 2003, astro-ph/0306040:

$$\Delta t_{SIS} = \tau_B - \tau_A = \frac{1+z_d}{2c} \frac{D_A(0, z_d) D_A(0, z_s)}{D_A(z_d, z_s)} (R_A^2 - R_B^2)$$

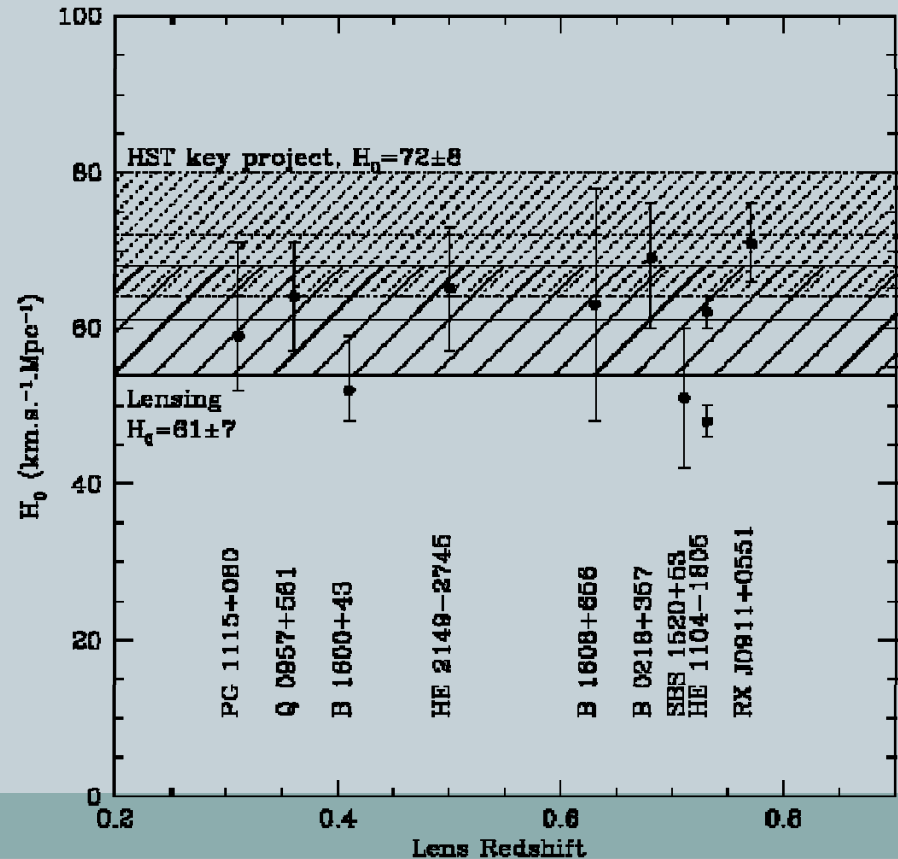
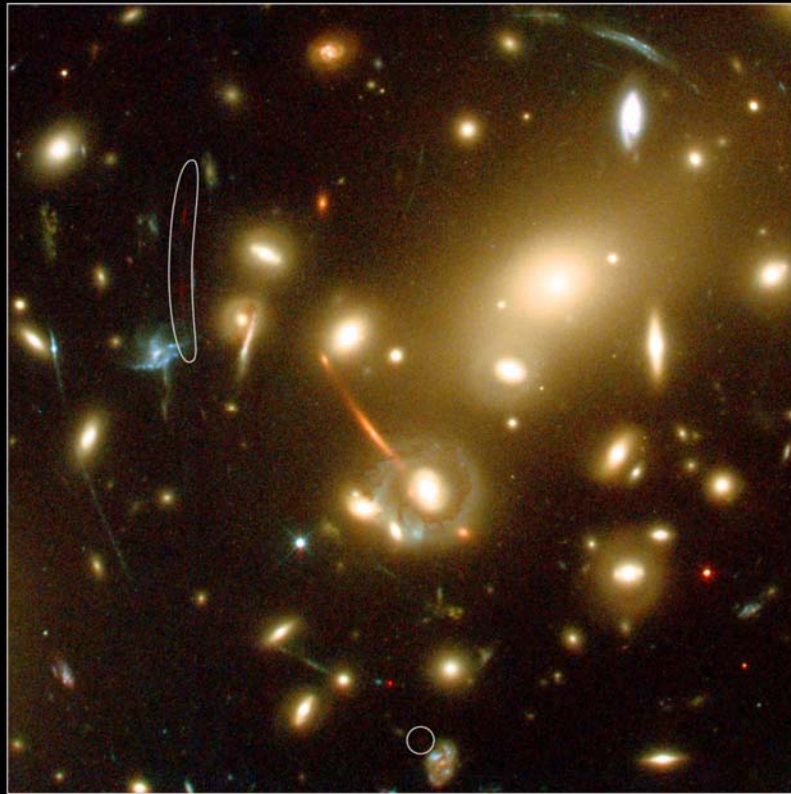


Table 1.1. Time Delay Measurements

System	N_{img}	Δt (days)
HE1104-1805	2	161 ± 7
PG1115+080	4	25 ± 2
SBS1520+530	2	130 ± 3
B1600+434	2	51 ± 2
HE2149-2745	2	103 ± 12
RXJ0911+0551	4	146 ± 4
Q0957+561	2	417 ± 3
B1608+656	4	77 ± 2
B0218+357	2	10.5 ± 0.2
PKS1830-211	2	26 ± 4
B1422+231	4	(8 ± 3)

- Два или више различитих геодезика који спајају извор и посматрача
- По сваком од њих светлост стиже до посматрача у различитим тренуцима

Откривање удаљених галаксија



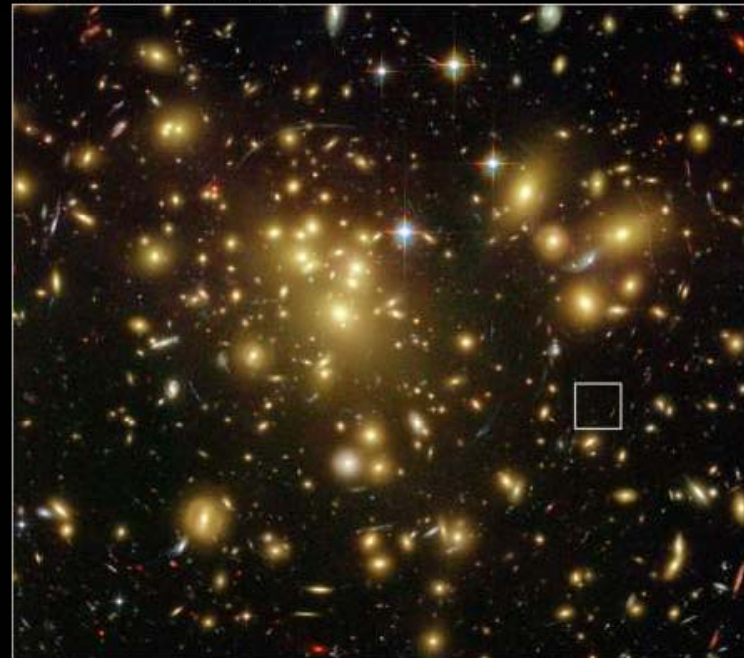
Distant Galaxy Lensed by Cluster Abell 2218
Hubble Space Telescope • WFPC2 • ACS

ESA, NASA, J.-P. Kneib (Caltech/Observatoire Midi-Pyrénées) and R. Ellis (Caltech) STScI-PRC04-08

Црвени лук и тачка: најдаља позната галаксија до 2004. на $z \sim 7$ што одговара 13×10^9 св. година

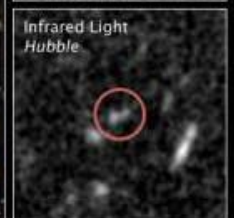


Distant Gravitationally Lensed Galaxy
Galaxy Cluster Abell 1689



NASA, ESA, and L. Bradley (JHU), R. Bouwens (UCSC), H. Ford (JHU), and G. Illingworth (UCSC)

Hubble Space Telescope
ACS/WFC NICMOS



STScI-PRC08-08a

Најдаља позната галаксија до 2008. на $z \sim 7.6$ што одговара 13×10^9 св. година

A PROBABLE $z \sim 7$ GALAXY STRONGLY LENSED BY THE RICH CLUSTER
A2218: EXPLORING THE DARK AGES¹

JEAN-PAUL KNEIB,^{2,3} RICHARD S. ELLIS,³ MICHAEL R. SANTOS,^{3,4} AND JOHAN RICHARD^{2,3}

Received 2004 January 7; accepted 2004 February 17

Submitted to The Astrophysical Journal

Discovery of a Very Bright Strongly-Lensed Galaxy Candidate at
 $z \approx 7.6$ ¹

L.D. Bradley², R.J. Bouwens³, H.C. Ford², G.D. Illingworth³, M.J. Jee⁴, N. Benítez⁵,
T.J. Broadhurst⁶, M. Franx⁷, B.L. Frye⁸, L. Infante⁹, V. Motta¹⁰, P. Rosati¹¹,
R.L. White¹², W. Zheng²

A&A 416, L35–L40 (2004)

DOI: 10.1051/0004-6361:20040065

© ESO 2004

**Astronomy
&
Astrophysics**

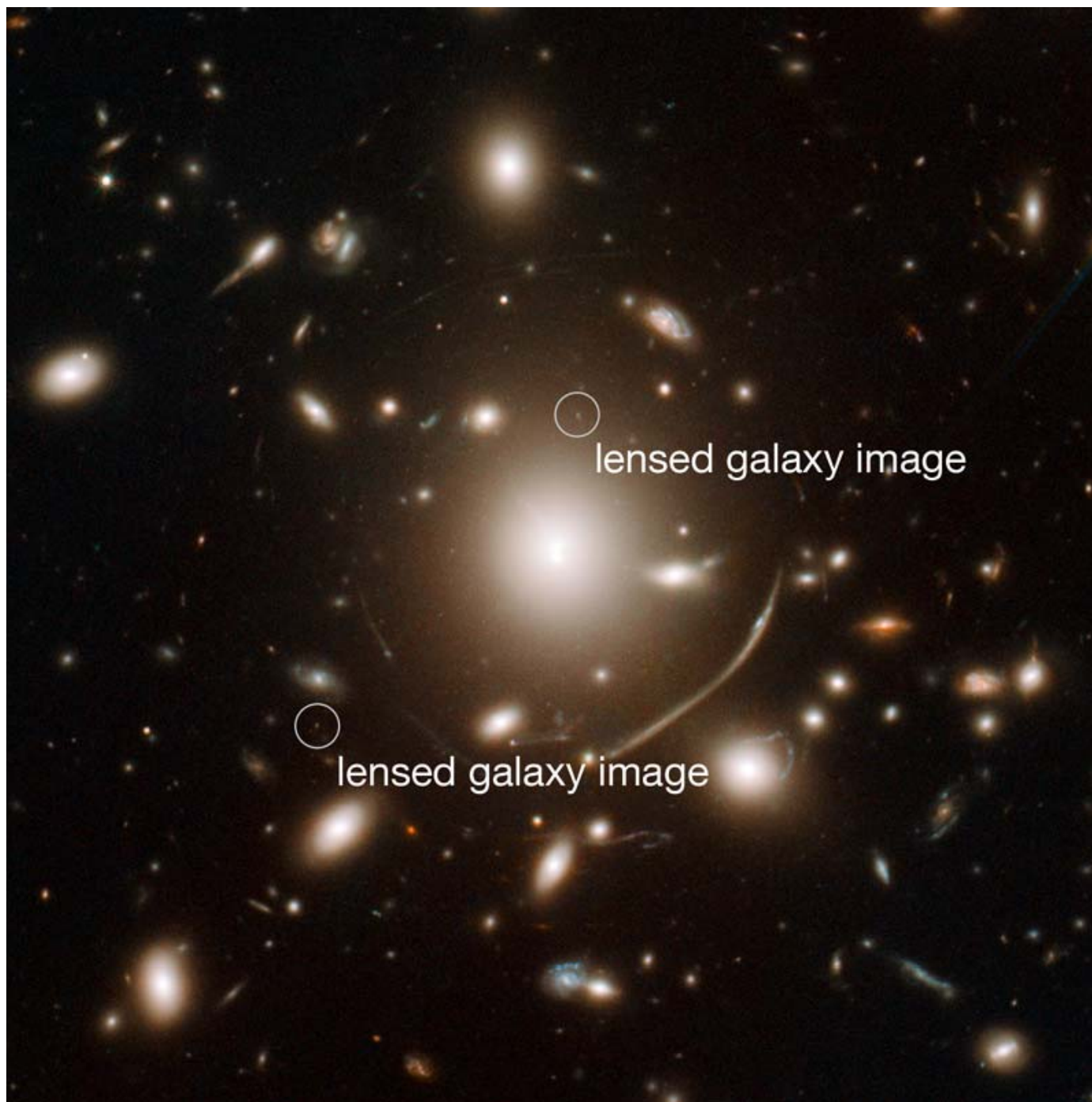
ISAAC/VLT observations of a lensed galaxy at $z = 10.0$ [★]

R. Pelló¹, D. Schaerer^{2,1}, J. Richard¹, J.-F. Le Borgne¹, and J.-P. Kneib^{3,1}

A KECK SURVEY FOR GRAVITATIONALLY LENSED Ly α EMITTERS IN THE REDSHIFT RANGE
 $8.5 < z < 10.4$: NEW CONSTRAINTS ON THE CONTRIBUTION OF LOW-LUMINOSITY
SOURCES TO COSMIC REIONIZATION

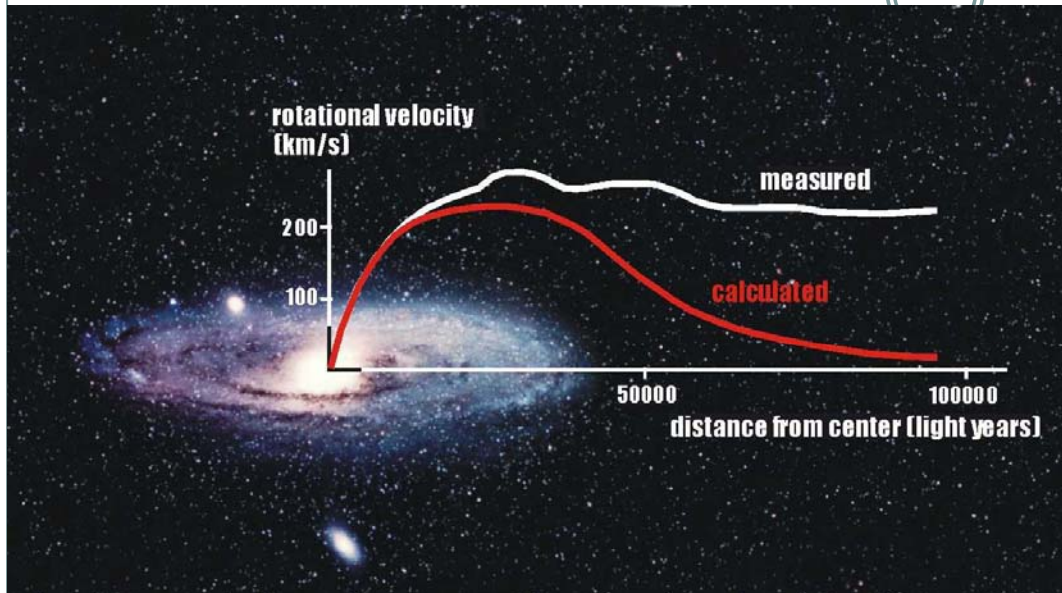
DANIEL P. STARK,¹ RICHARD S. ELLIS,¹ JOHAN RICHARD,¹ JEAN-PAUL KNEIB,^{1,2}
GRAHAM P. SMITH,^{1,3} AND MICHAEL R. SANTOS⁴

Received 2006 October 12; accepted 2007 February 20



Најдаља позната галаксија до 2011, настала пре 13.5 милијарди година, откривена је помоћу ефекта гр. сочива од стране галактичког јата Abell 383

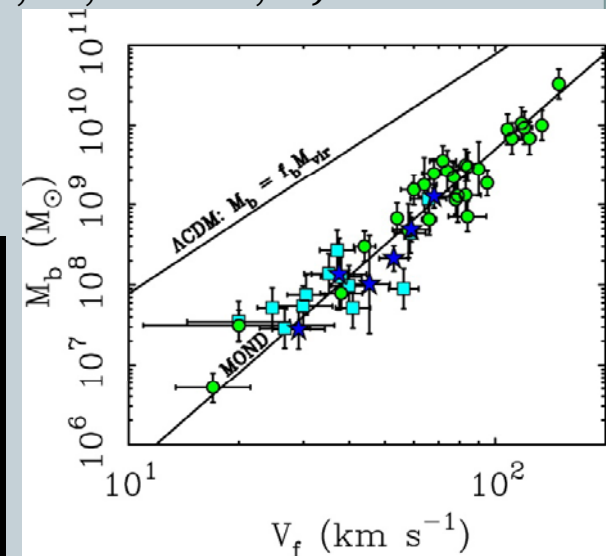
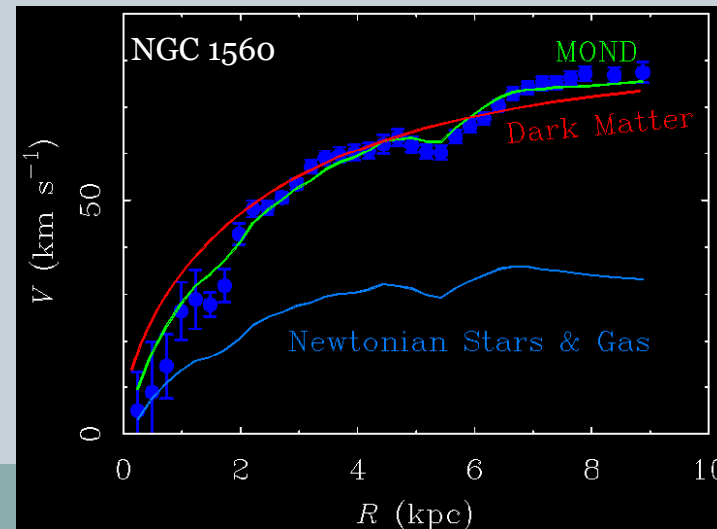
Равне ротационе криве код спиралних галаксија: тамна материја?



1. Хало тамне материје

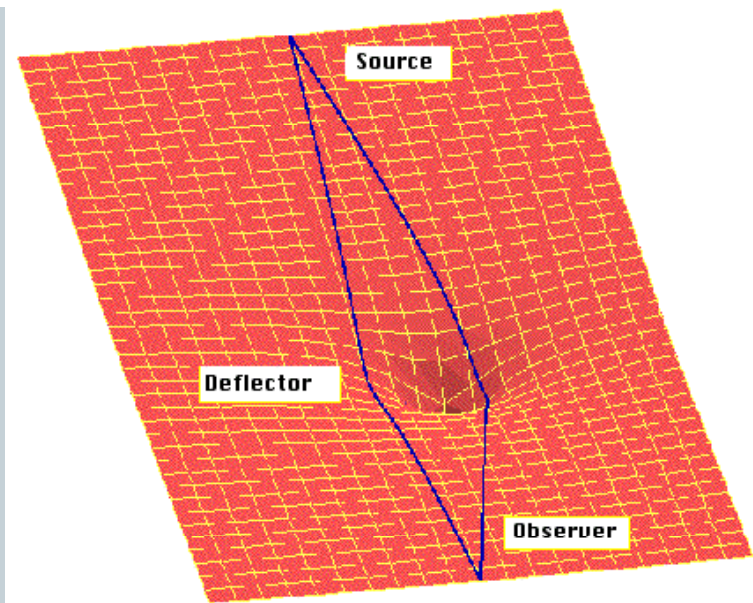
- слабо интерагујуће масивне честице које се крећу само под утицајем гравитације: детекција само помоћу гравитационих сочива

2. Модификована гравитација: (MOND, R^n , Yukawa, ...)



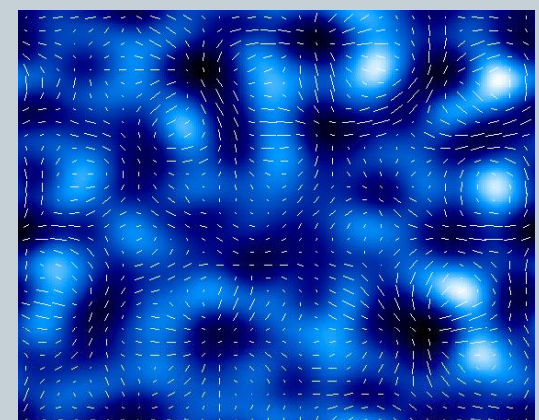
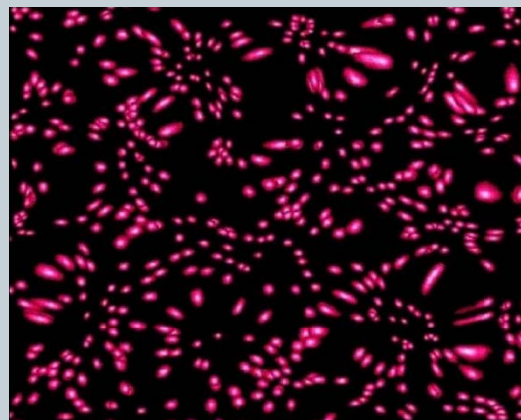
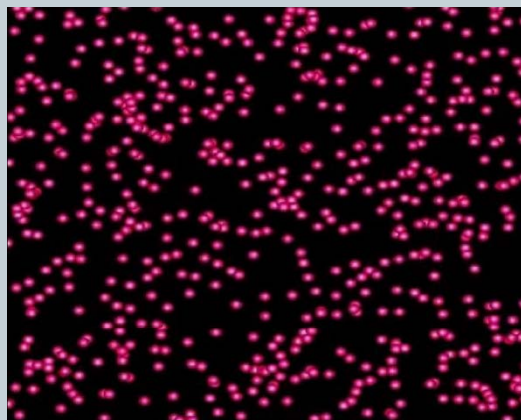
Барионска Тали-Фишерова релација за галаксије богате гасом (McGaugh 2011, PRL, 106, 121303)

Детекција тамне материје помоћу гравитационих сочива



	< 0	> 0
κ		
$\text{Re}[\gamma]$		
$\text{Im}[\gamma]$		

Деформације које изазивају грав. сочива

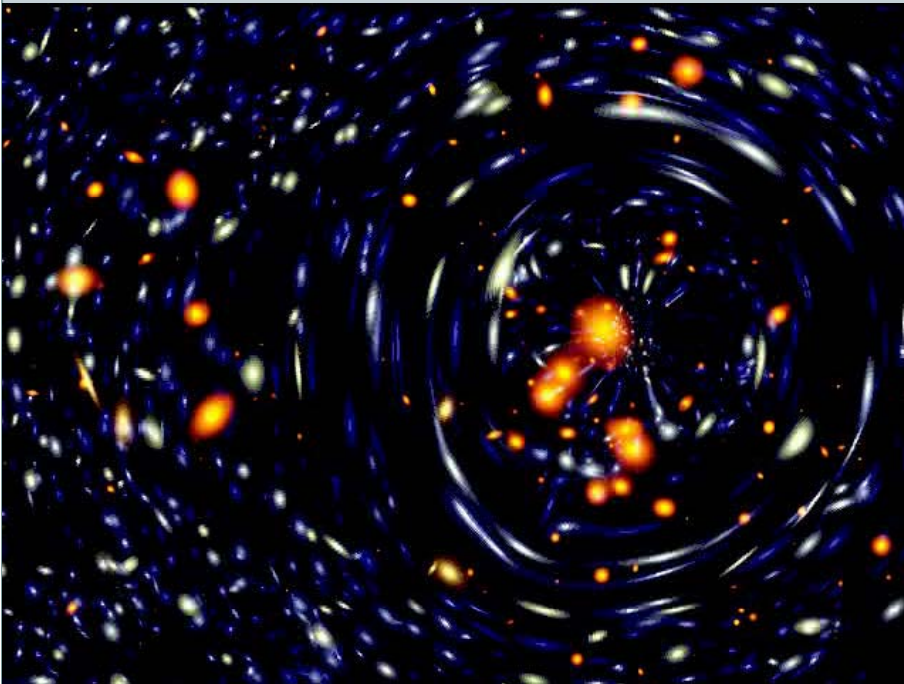


Без утицаја слабих г. с.

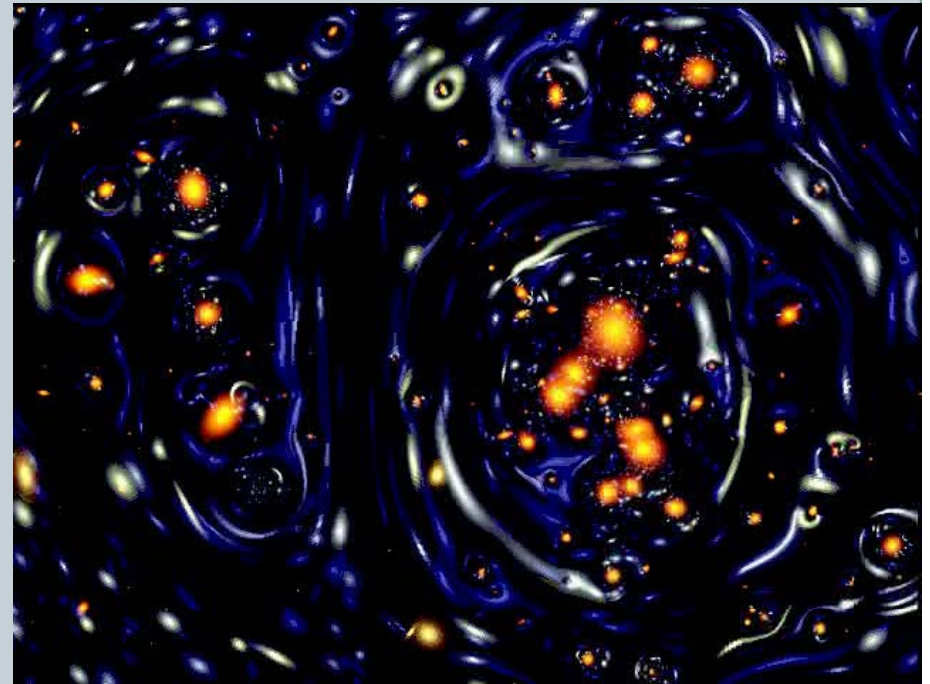
Са утицајем слабих г. с.

Пројектована маса и “shear”

Тамна материја као гравитационо сочиво



Тамна материја груписана
око јата галаксија



Тамна материја равномерно
распоређена по јату галаксија

Галактичко јато 1E 0657-558 (“Bullet cluster”): први директан доказ постојања тамне материје

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 604:596–603, 2004 April 1
© 2004. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

WEAK-LENSING MASS RECONSTRUCTION OF THE INTERACTING CLUSTER 1E 0657–558: DIRECT EVIDENCE FOR THE EXISTENCE OF DARK MATTER¹

DOUGLAS CLOWE²

Institut für Astrophysik und Extraterrestrische Forschung der Universität Bonn, Auf dem Hügel 71, 53121 Bonn, Germany; dclowe@as.arizona.edu

ANTHONY GONZALEZ

Department of Astronomy, University of Florida, 211 Bryant Space Science Center, Gainesville, FL 32611-2055

AND

MAXIM MARKEVITCH

Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden Street, Cambridge, MA 02138

Received 2003 October 28; accepted 2003 December 11

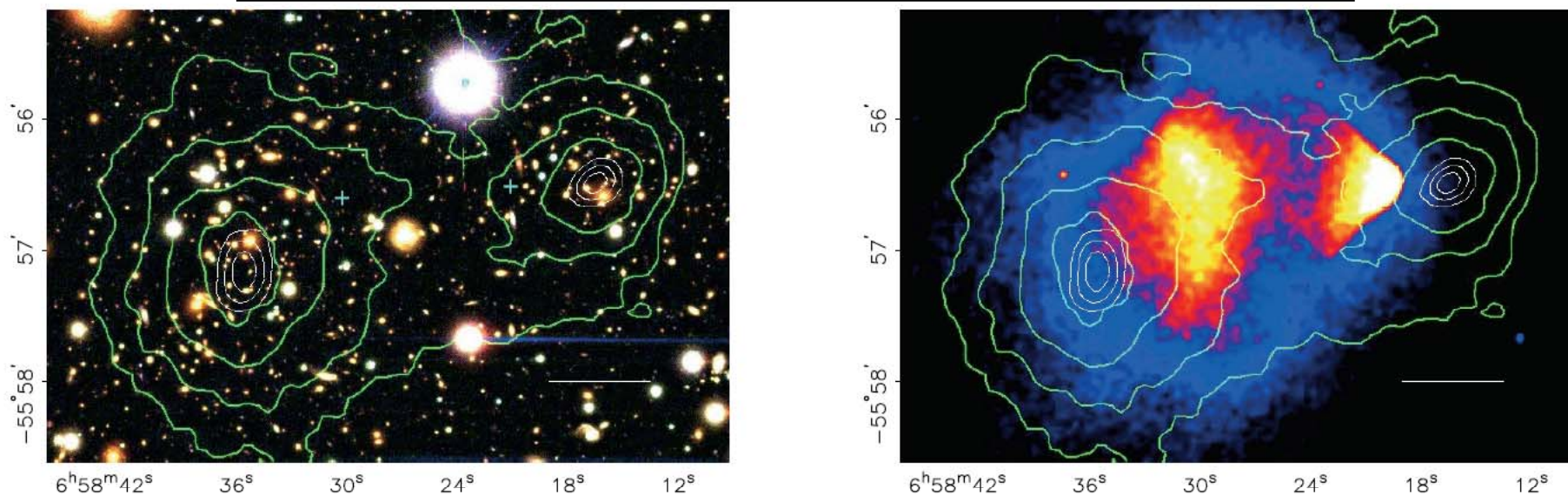
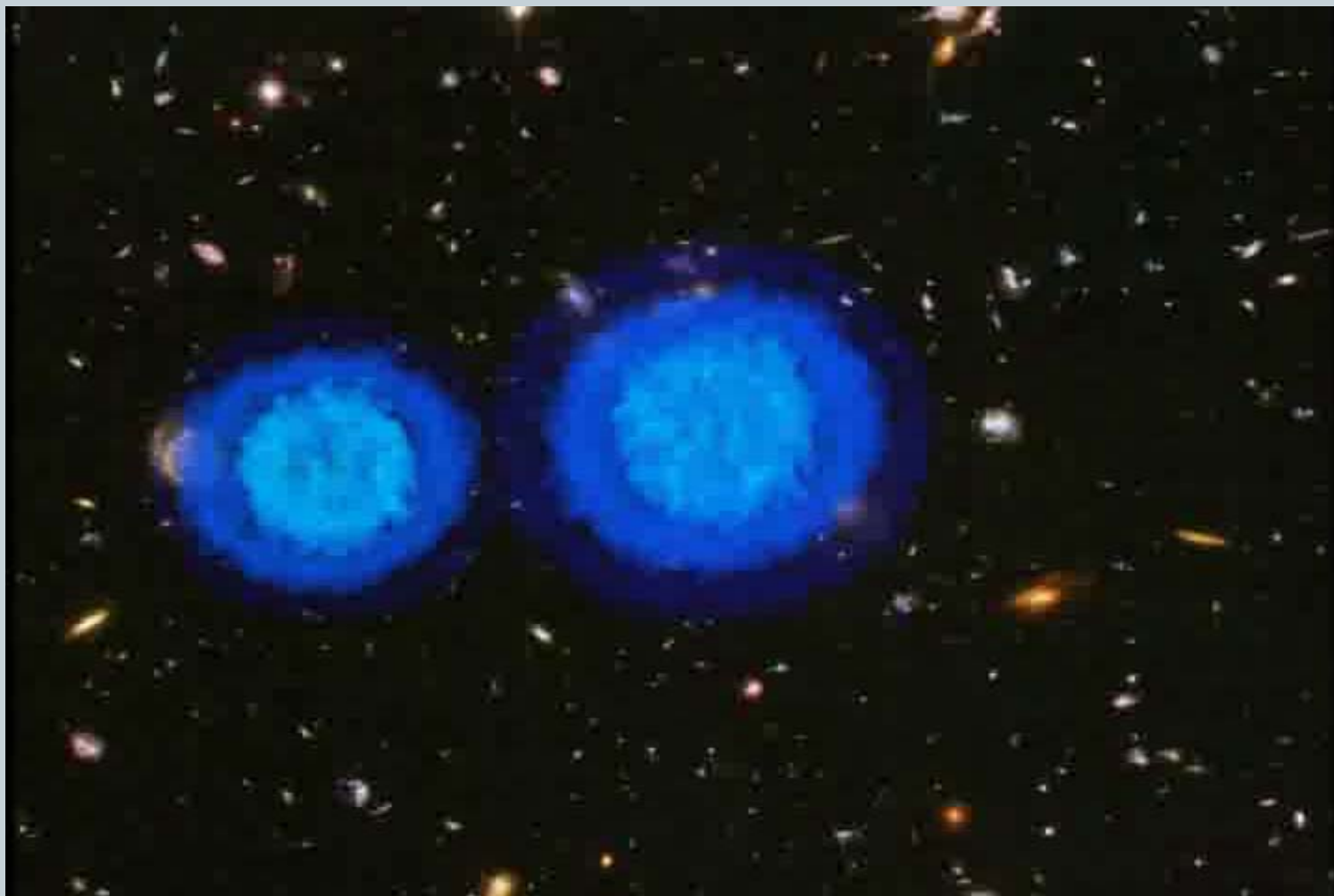
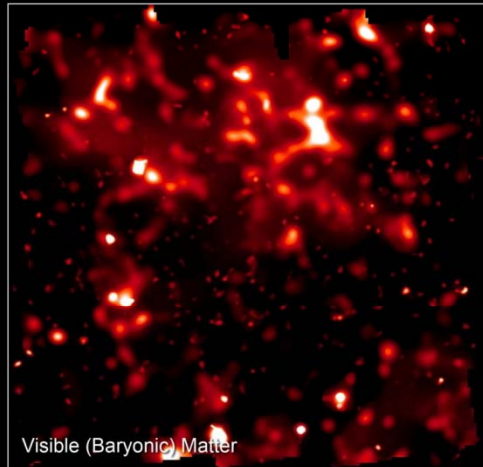


FIG. 1.—*Left panel*: Color image from the Magellan images of the merging cluster 1E 0657–558, with the white bar indicating 200 kpc at the distance of the cluster. *Right panel*: 500 ks *Chandra* image of the cluster. Shown in green contours in both panels are the weak-lensing κ reconstructions, with the outer contour levels at $\kappa = 0.16$ and increasing in steps of 0.07. The white contours show the errors on the positions of the κ peaks and correspond to 68.3%, 95.5%, and 99.7% confidence levels. The blue plus signs show the locations of the centers used to measure the masses of the plasma clouds in Table 2.

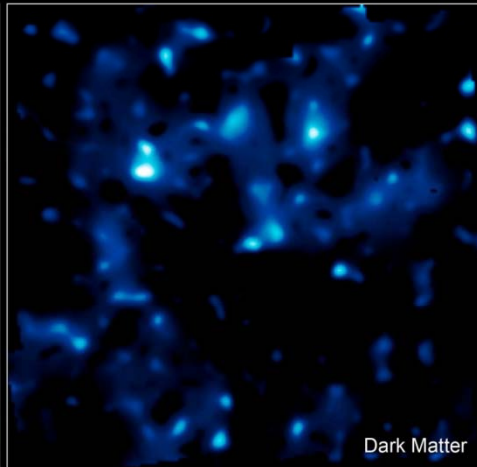
Тамна материја и настанак јата галаксија 1E 0657-558



Просторна расподела тамне материје



Visible (Baryonic) Matter



Dark Matter

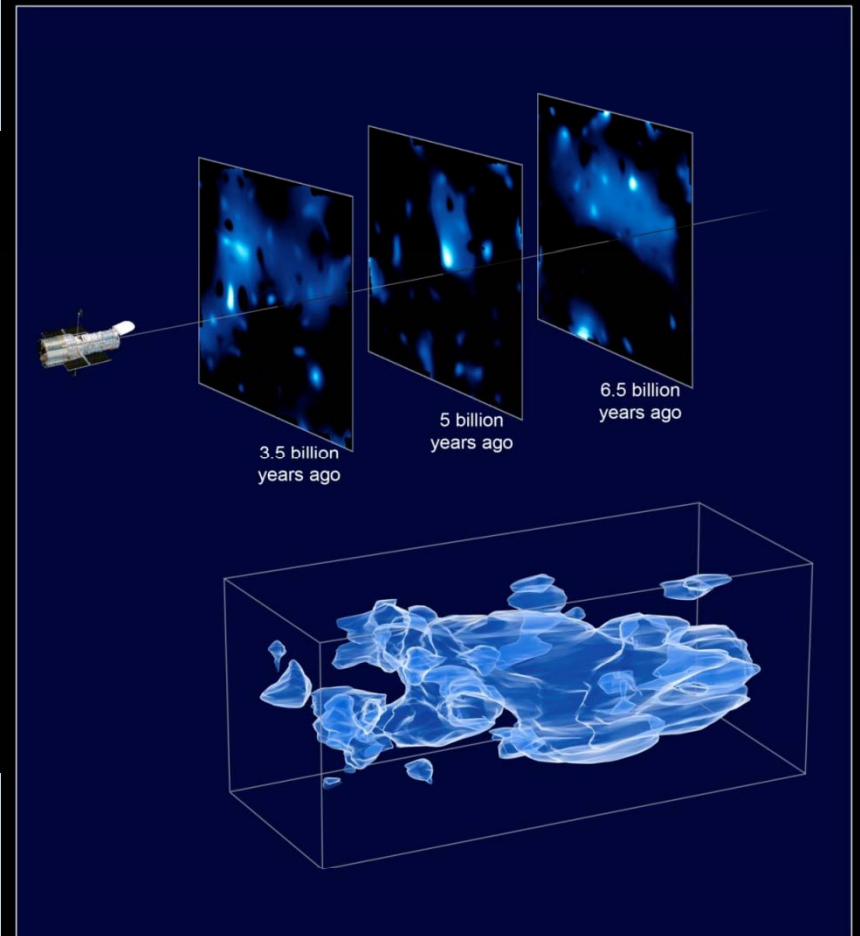
Distribution of Visible and Dark Matter • Cosmic Evolution Survey
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, ESA, and R. Massey (California Institute of Technology)

STScI-PRC07-01b

Distribution of Dark Matter

HST • ACS/WFC

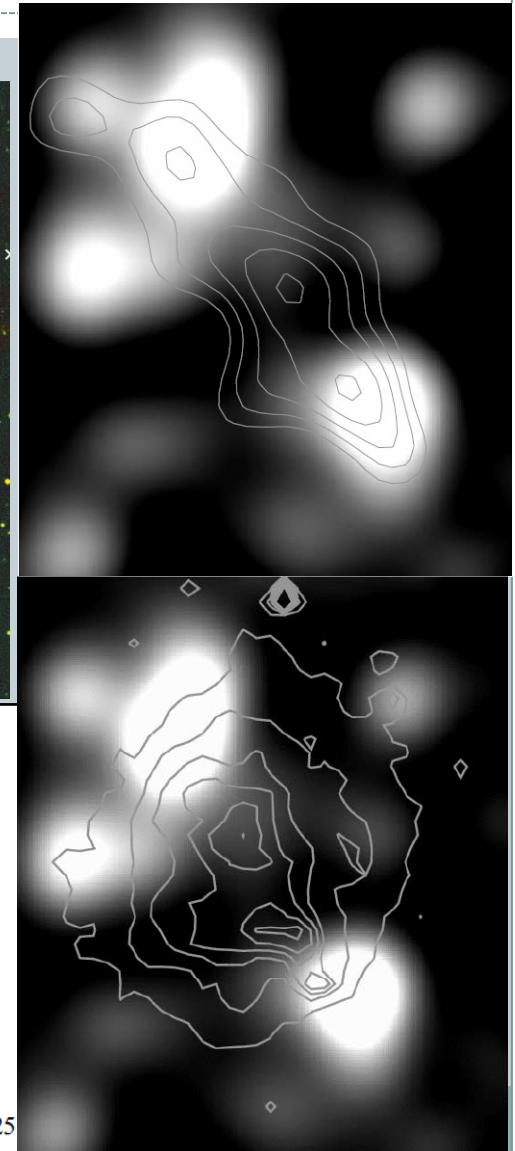
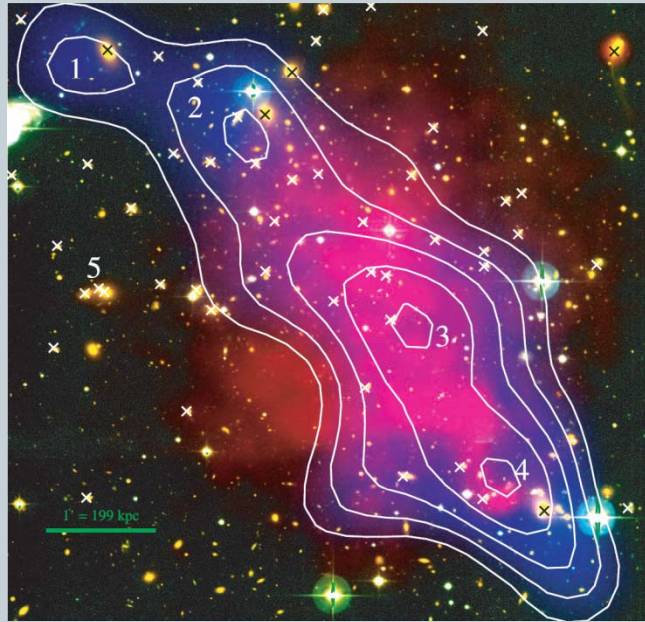


NASA, ESA, and R. Massey (California Institute of Technology)

STScI-PRC07-01a

Супротан пример: галактичко јато Abell 520

- Такође судар галактичких јата али се, за разлику од 1E 0657-558, центар масе тамне материје поклапа са центром масе барионске материје



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 668:806–814, 2007 October 20

© 2007. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

A DARK CORE IN ABELL 520¹

ANDISHEH MAHDAVI, HENK HOEKSTRA, ARIF BABUL, AND DAVID D. BALAM
Department of Physics and Astronomy, University of Victoria, Victoria, BC V8W 3P6, Canada

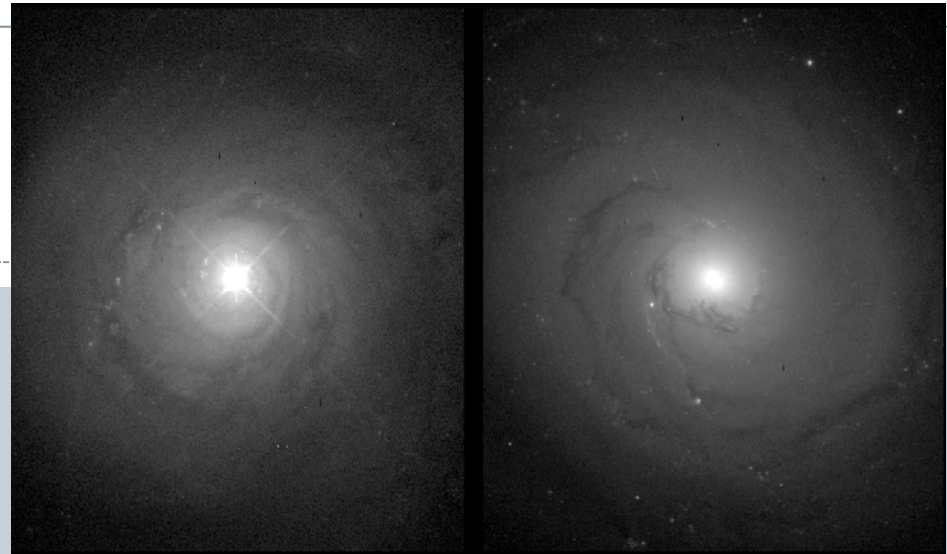
AND

PETER L. CAPAK

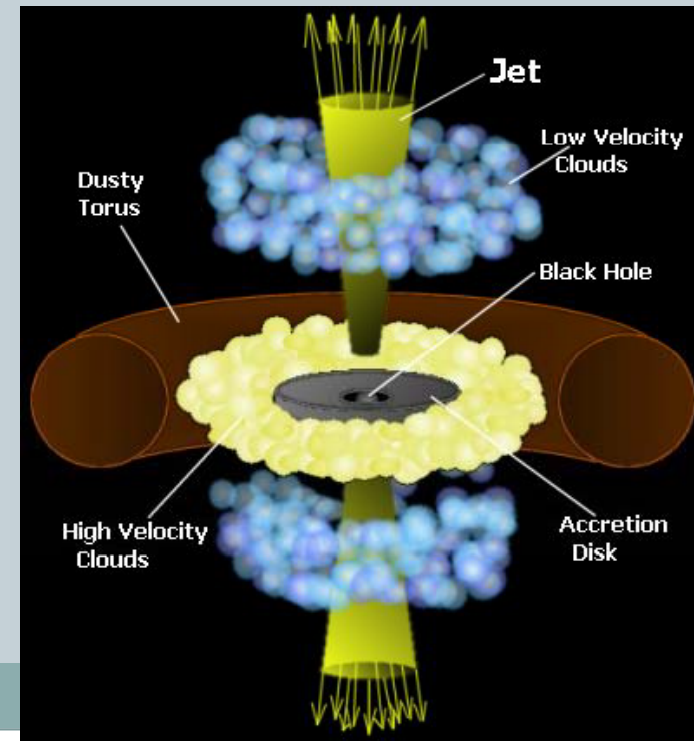
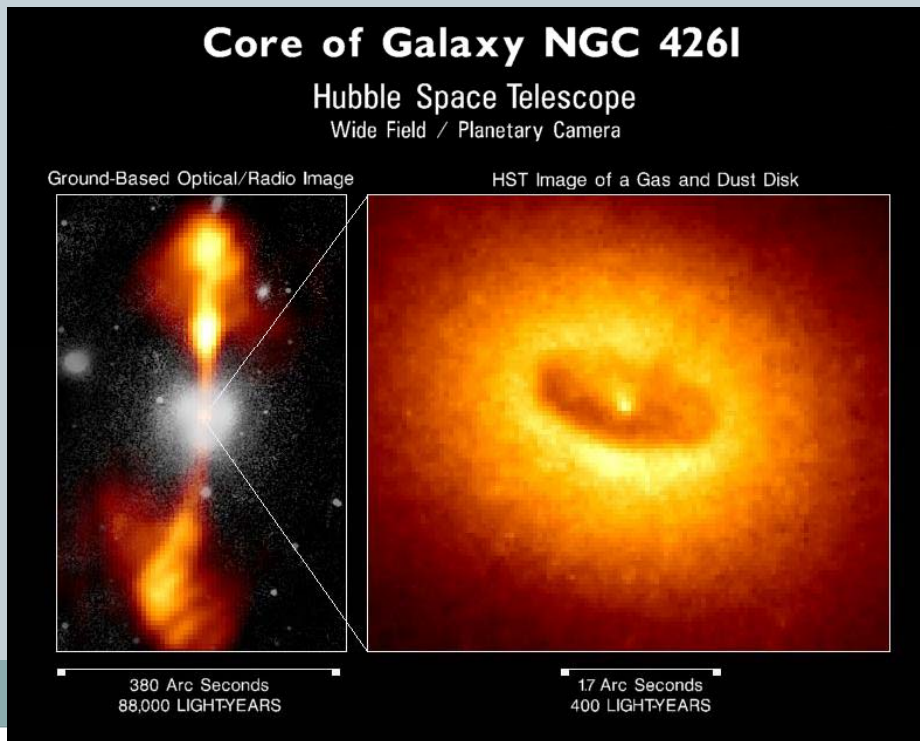
California Institute of Technology, MC 105-24, 1200 East California Boulevard, Pasadena, CA 91125

Received 2007 February 10; accepted 2007 June 18

Супер-масивне црне рупе у центрима активних галаксија I



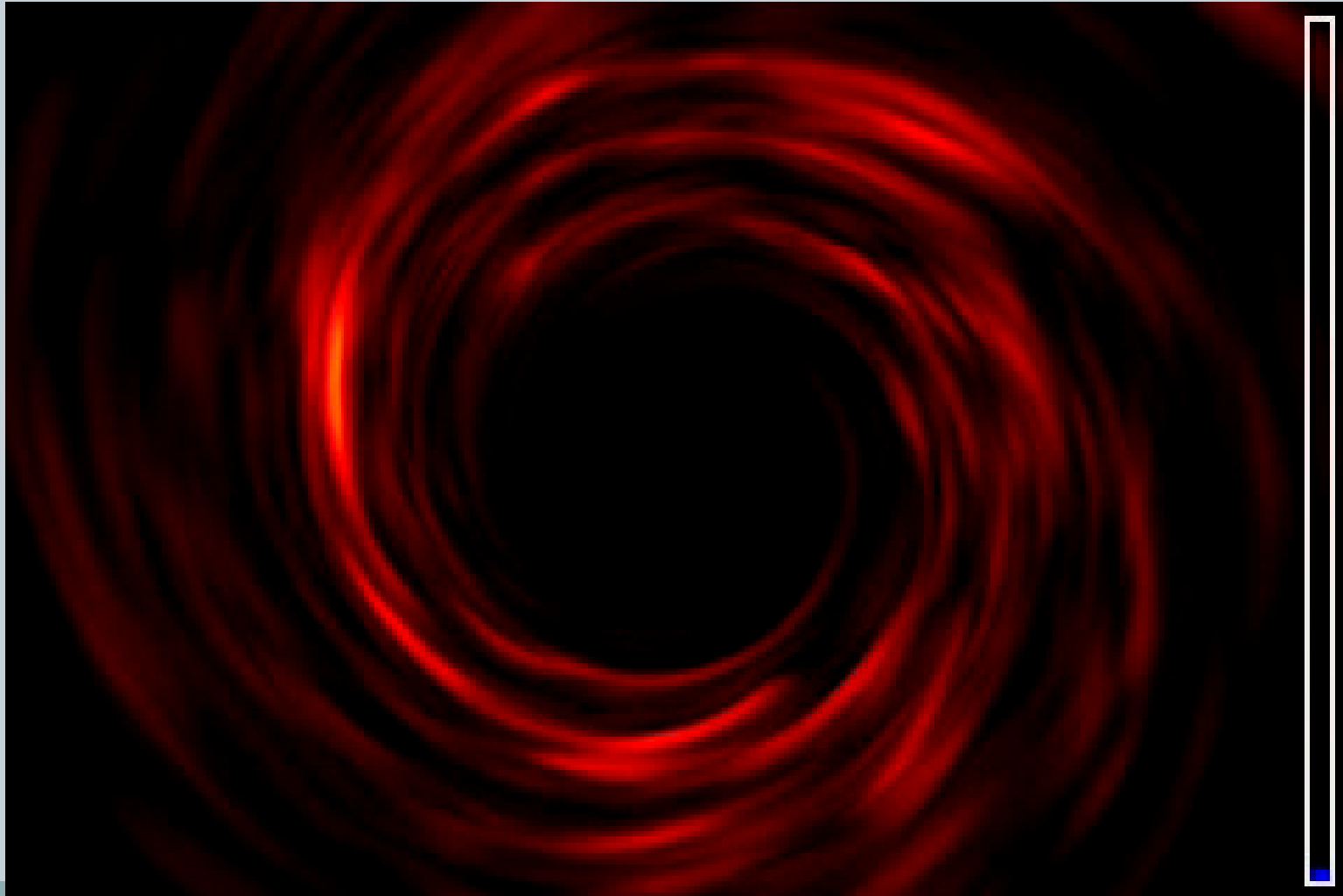
Лево: NGC 5548 - Сејфертова (активна) галаксија
Десно: NGC 3277 - нормална галаксија



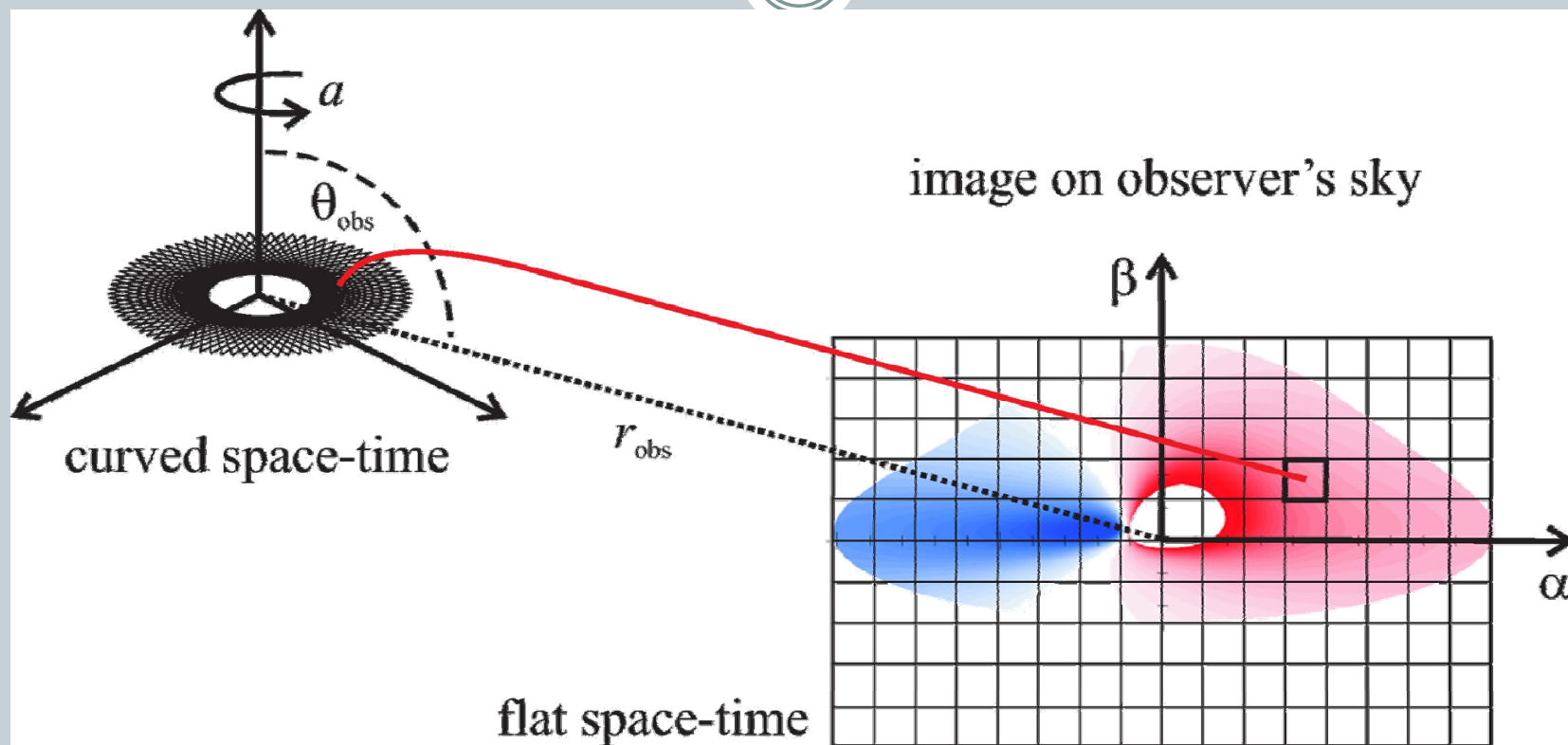
Супер-масивне црне рупе у центрима активних галаксија II



Релативистички акрециони диск око супер-масивне црне рупе

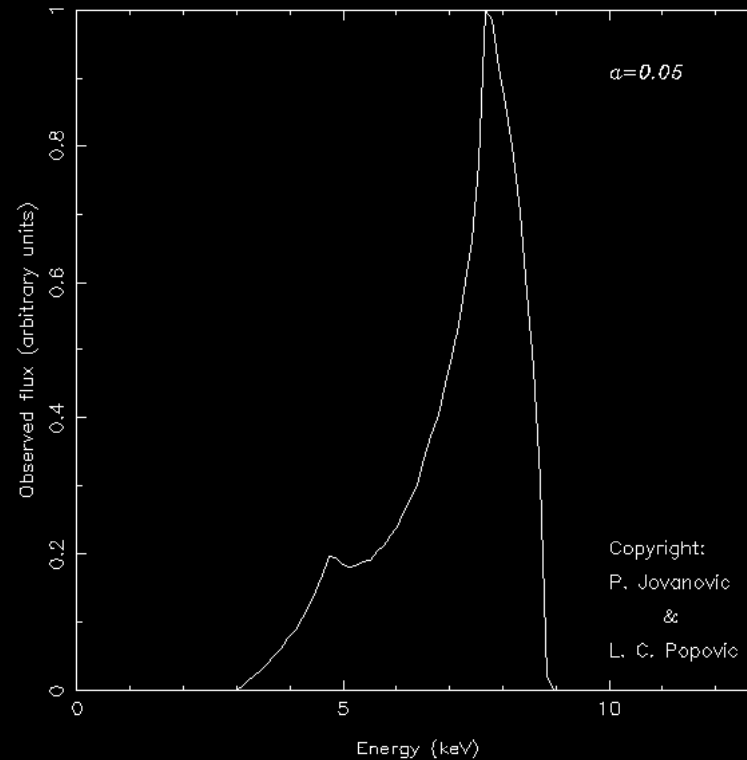
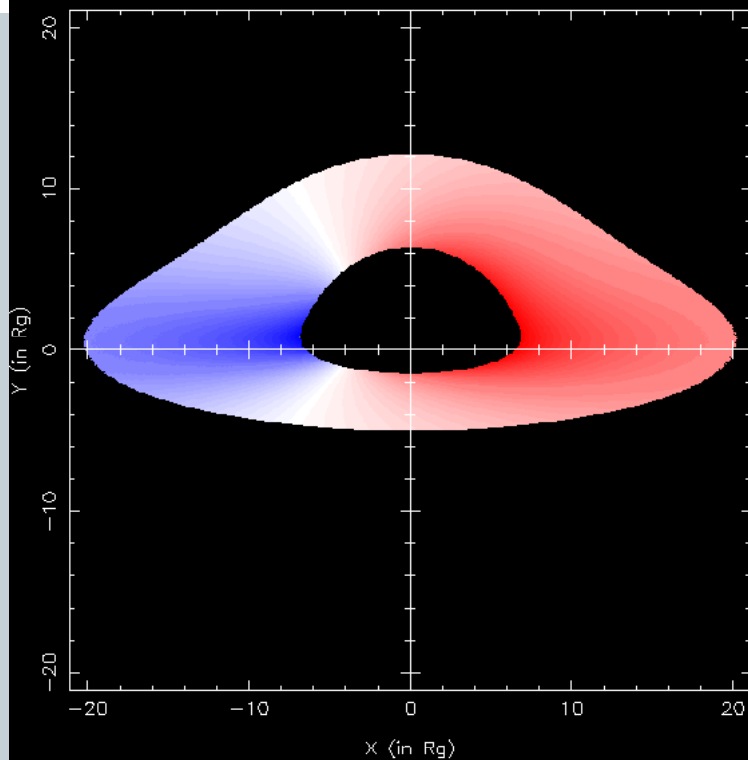


Нумеричке симулације Х-зрачења из акреционог диска

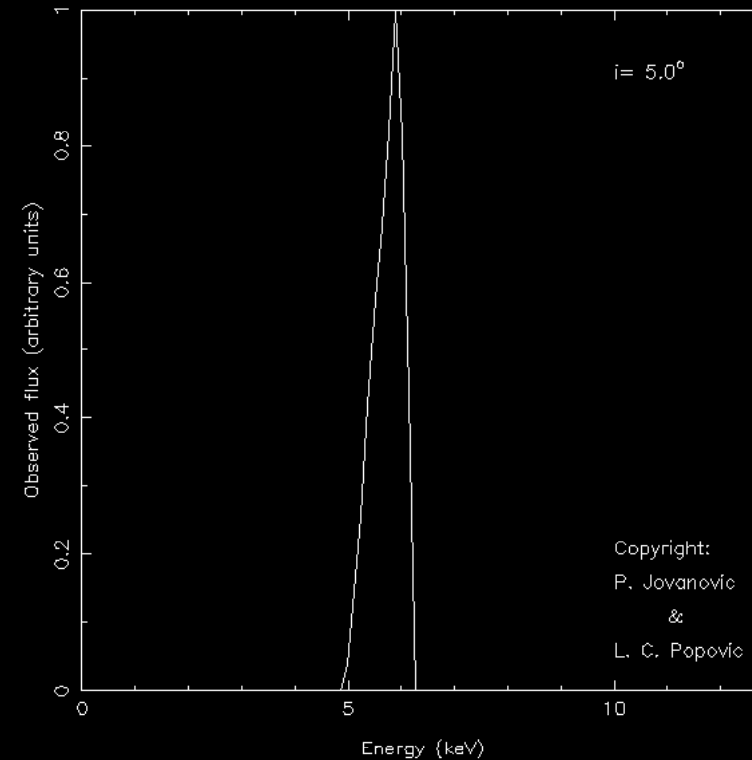
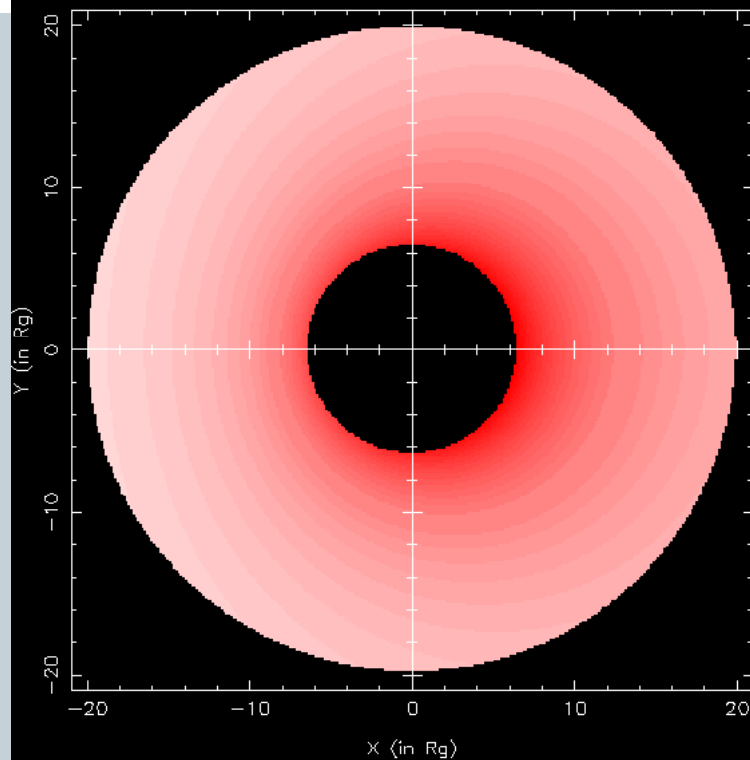


Jovanović & Popović 2009. "X-ray Emission From Accretion Disks of AGN: Signatures of Supermassive Black Holes", поглавље у књизи "Black Holes and Galaxy Formation", 249-294, Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA, ISBN: 978-1-60741-703-3

- **Први резултати: 2000 – 2001.**



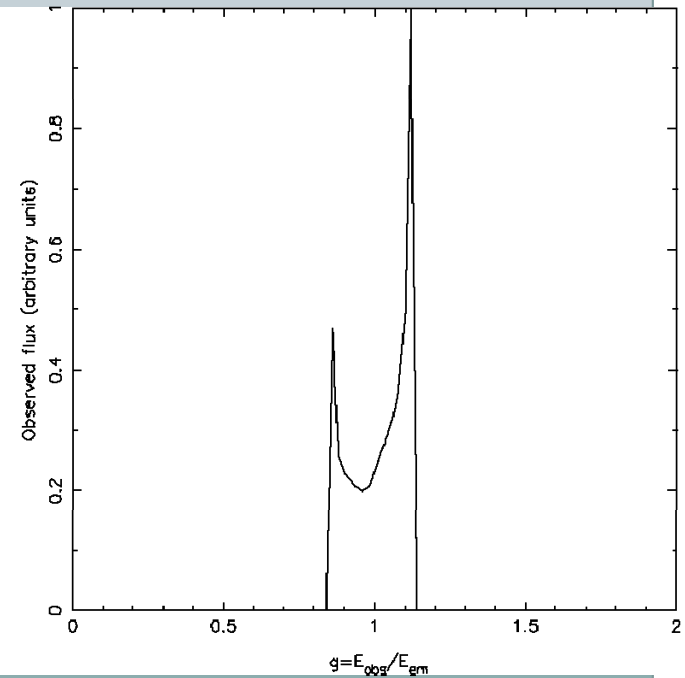
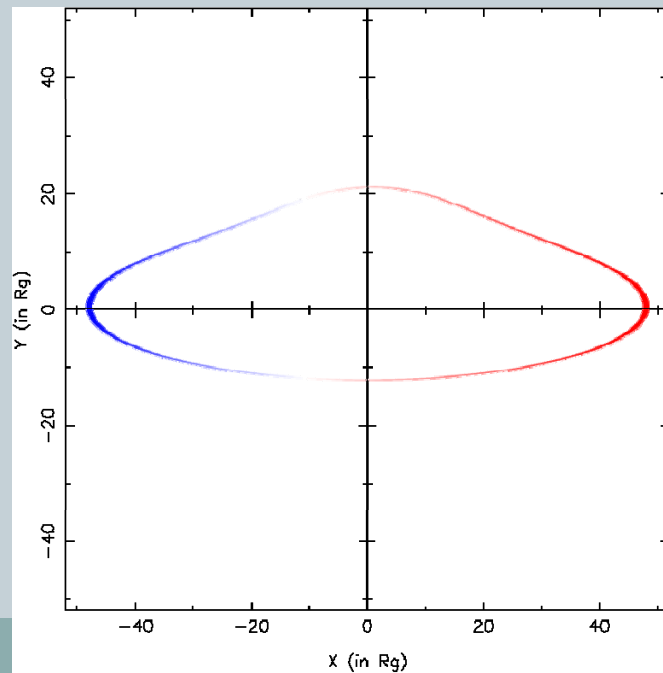
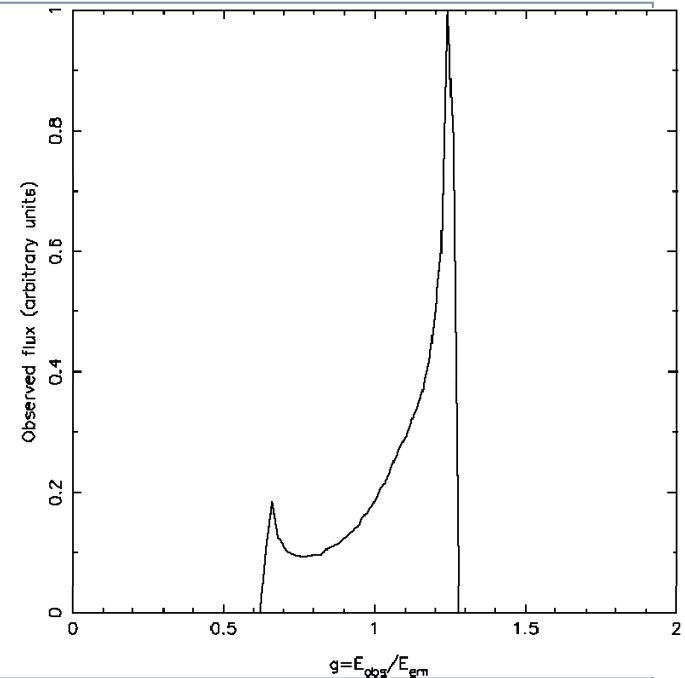
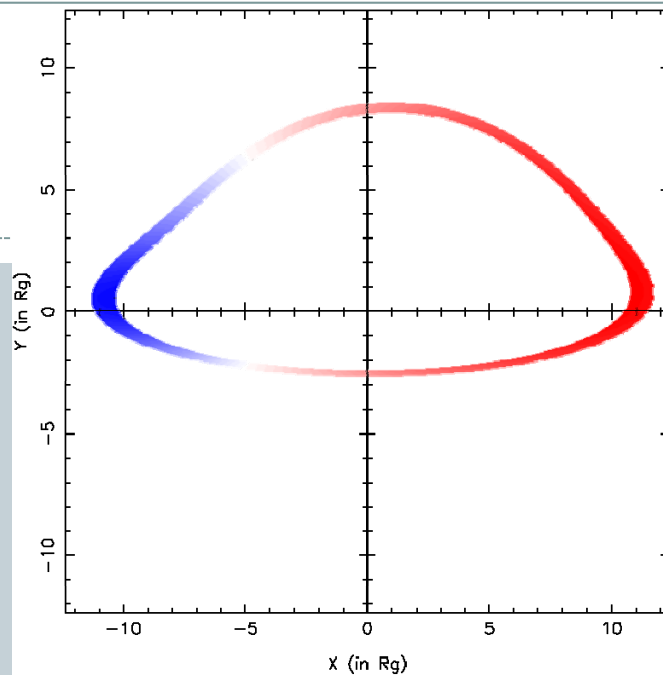
Нумеричке симулације акреционог диска са великом инклинацијом ($i=75^\circ$) око ротирајуће црне рупе (Кер метрика) за различите вредности угаоног момента (лево) и одговарајући профили линије гвожђа Fe K α (десно)



Нумеричке симулације акреционог диска у Шварцшилдовој метрици за различите вредности инклинације диска (лево) и одговарајући профили линије гвожђа Fe Ka (десно)

Облик линије Fe K α
емитоване из танког
прстена акреционог
диска

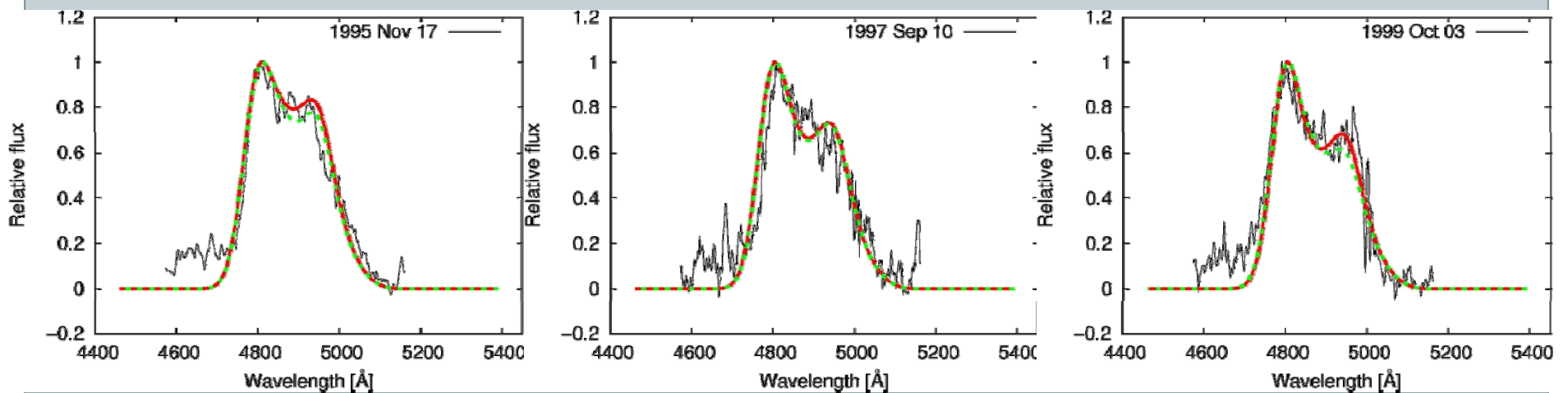
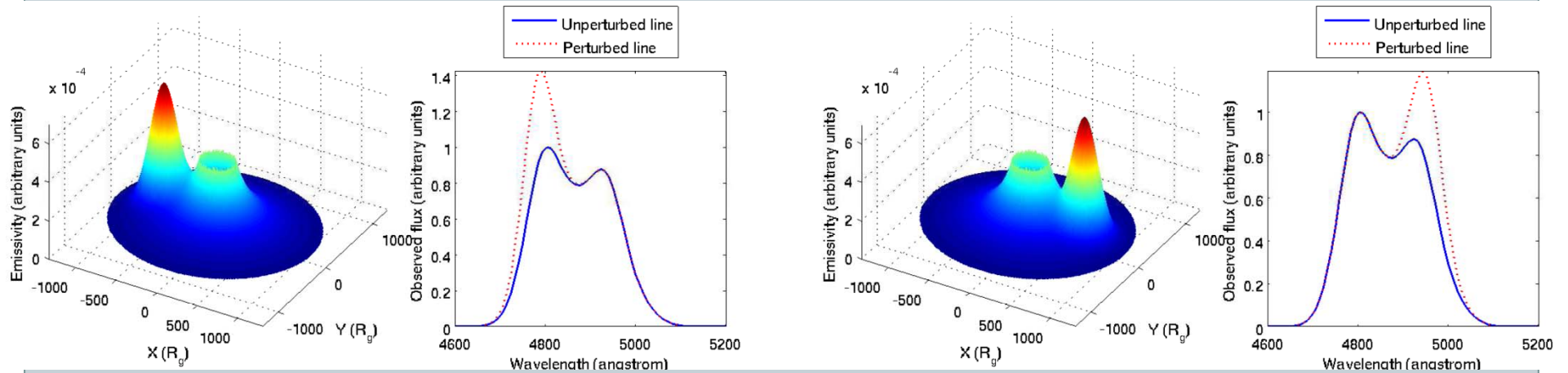
Jovanović & Popović,
2008, *Fortschr. Phys.*
56, No. 4 – 5, 456



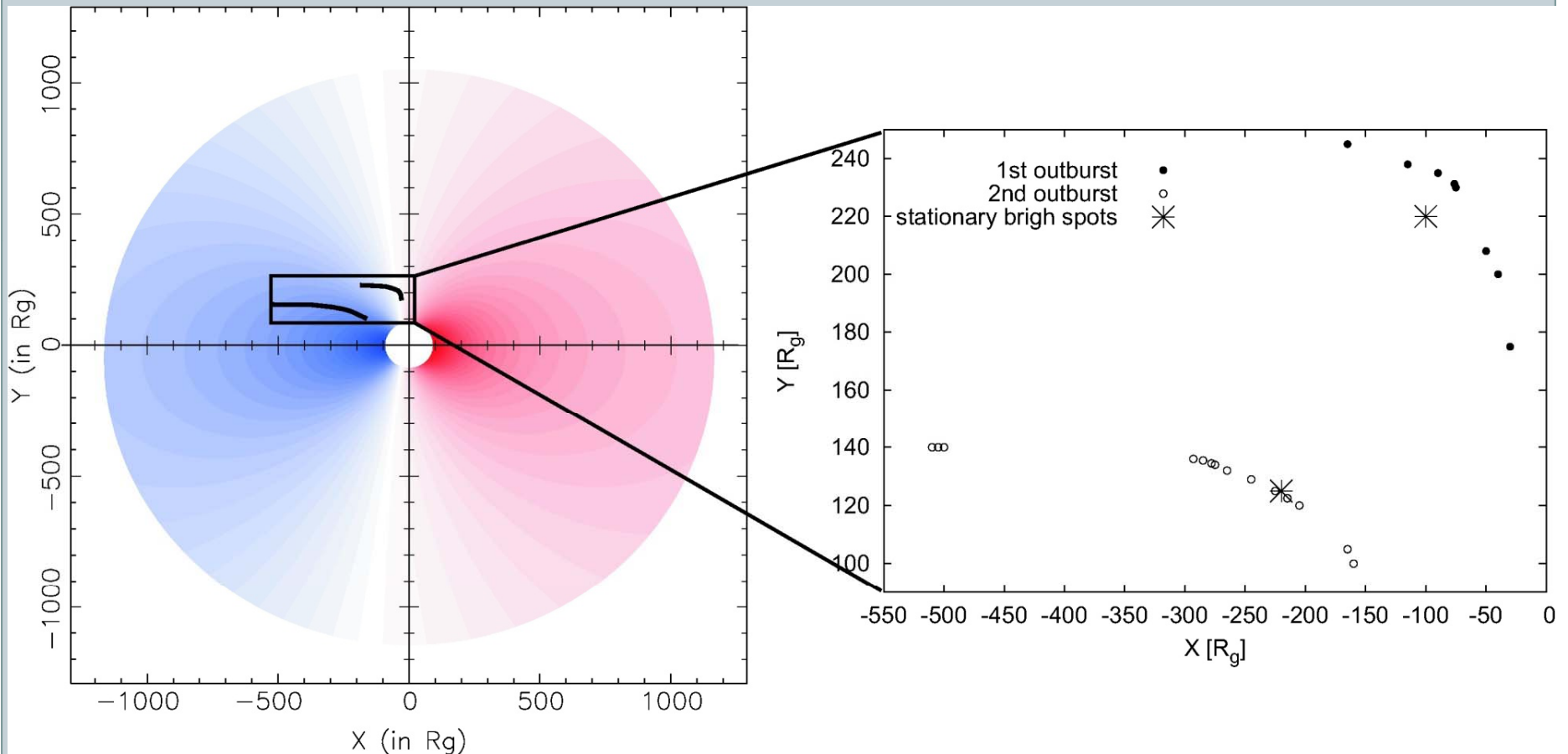
Промене линије Н β код квазара 3C390.3



- Претпоставка да те промене изазива пертурбација у акреционом диску

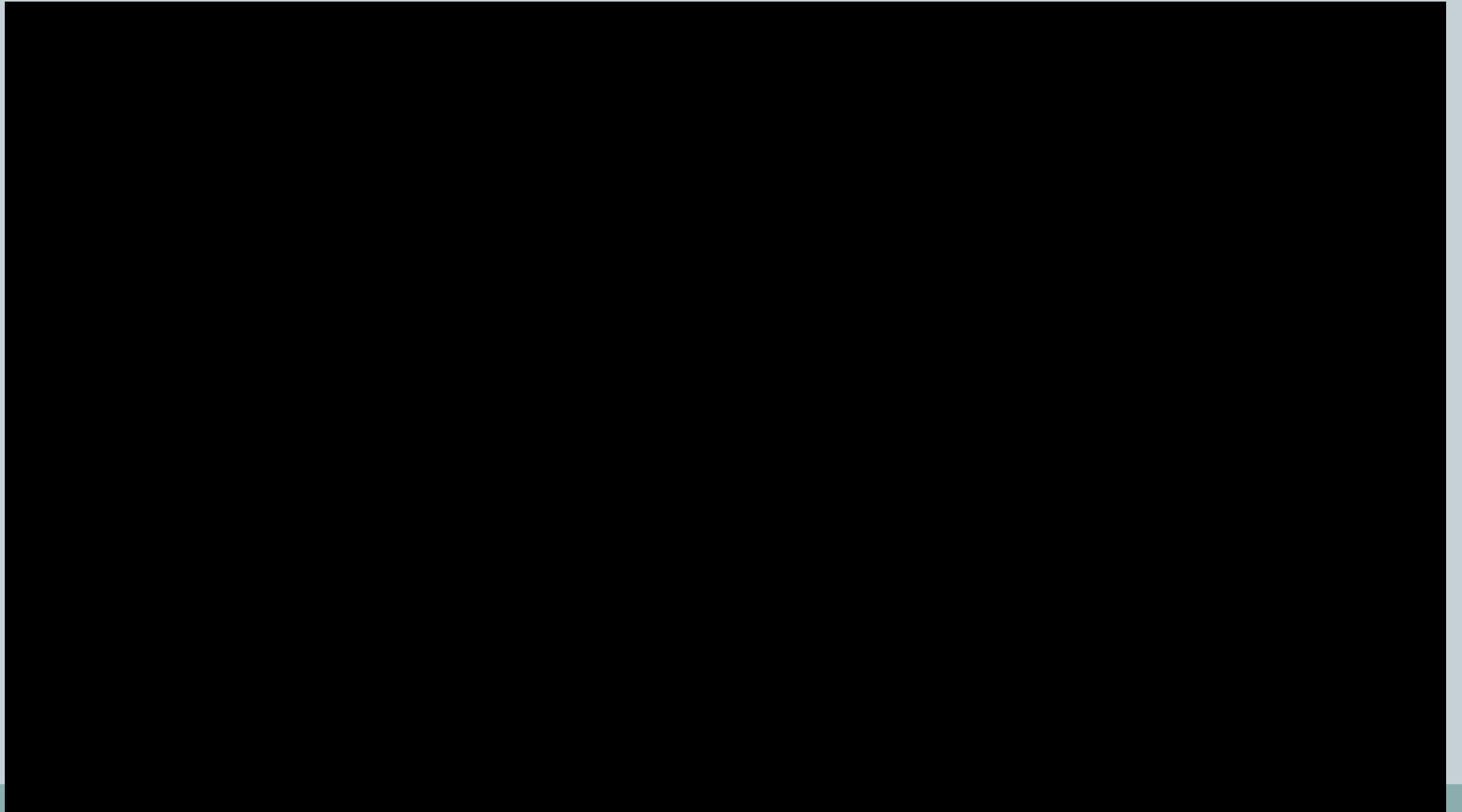


Положаји пертурбационе области у акреционом диску квазара 3C390.3

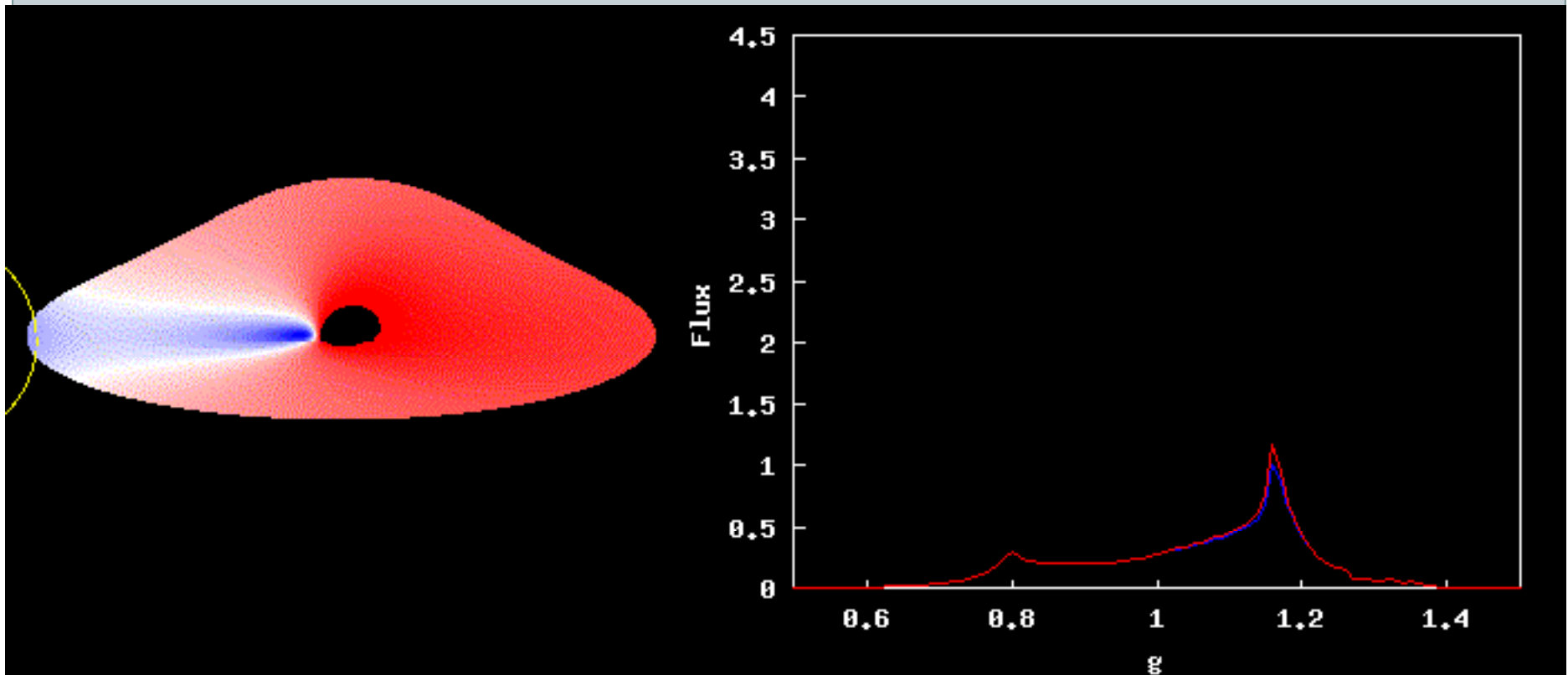


Jovanović et al. 2010, ApJ, 718, 168

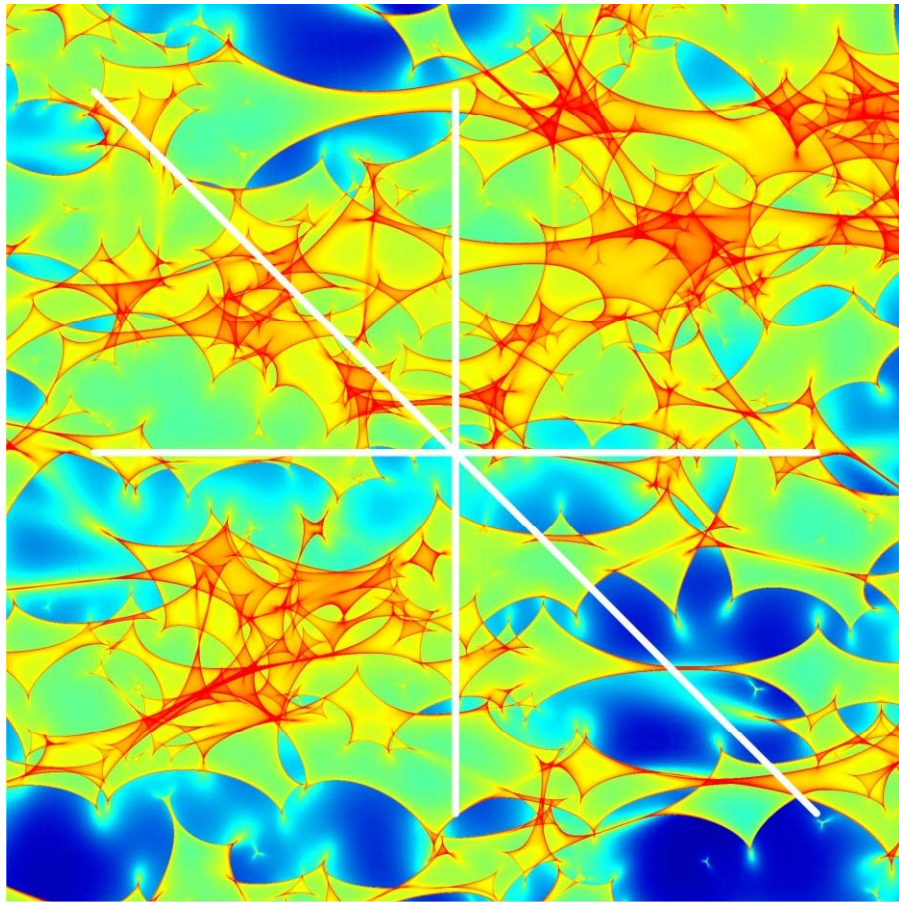
Утицај гравитационих микросочива на зрачење из акреционог диска



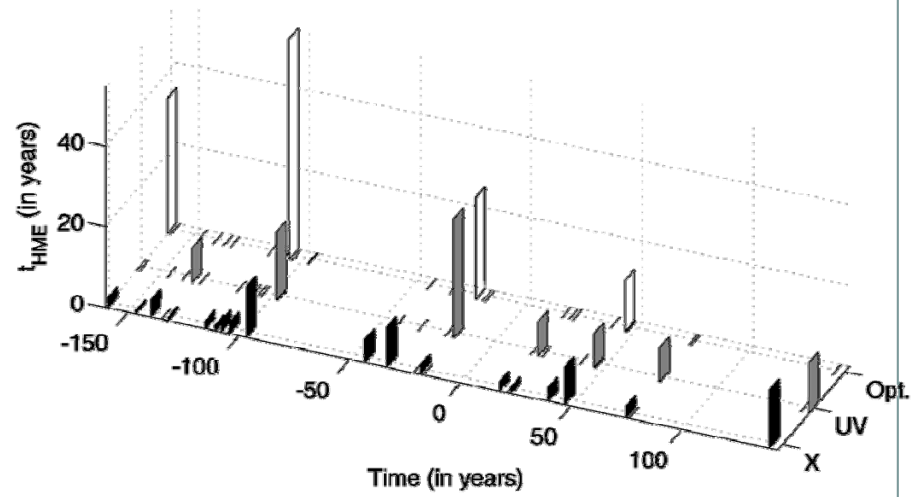
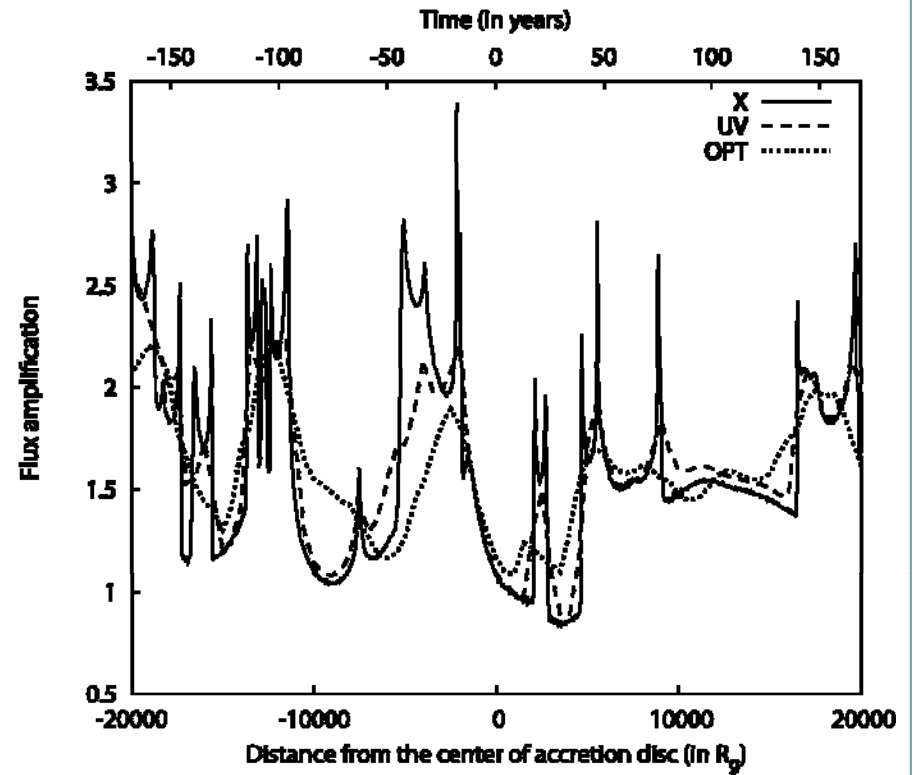
Утицај гравитационих микросочива на Х-зрачење из акреционог диска око супер-масивне црне рупе



Јовановић, 2006: *Утицај гравитационих сочива на спектре квазара*,
Библиотека Dissertatio, Задужбина Андрејевић, Београд



Мапа појачања за “типични” систем гравитационих сочива и одговарајуће криве сјаја за вертикалну путању акреционог диска
 Jovanović et al. 2008, *MNRAS*, **386**, 397



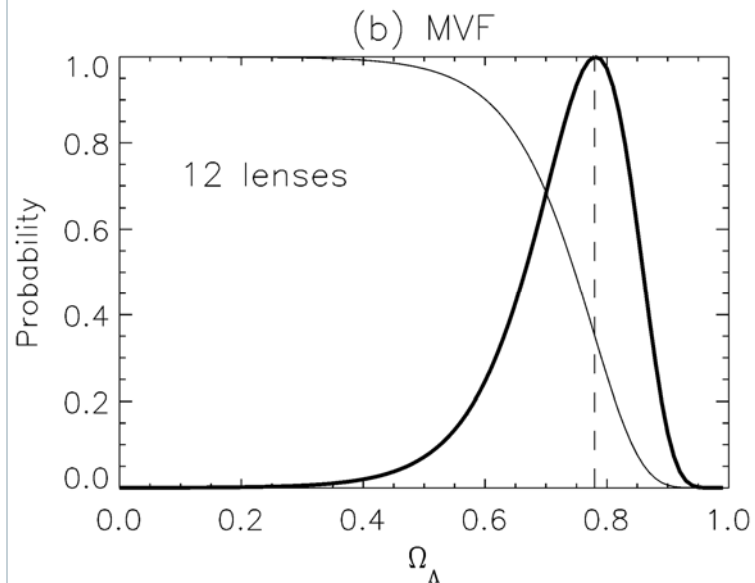
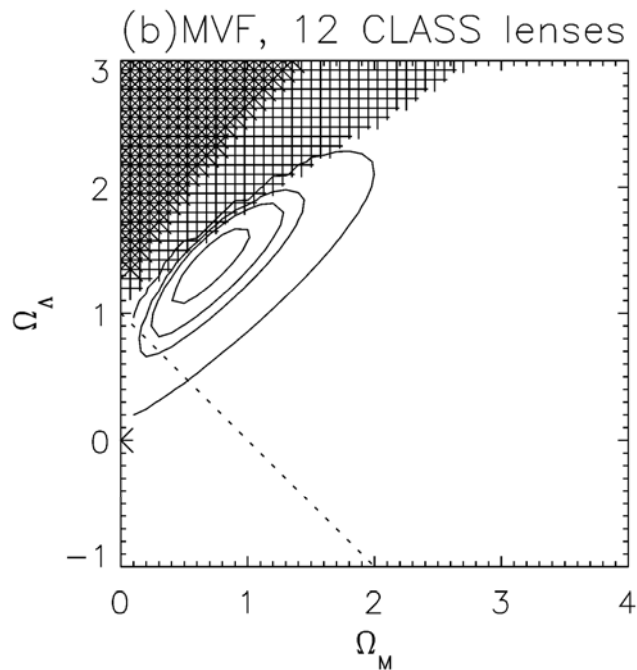
Статистика гравитационних сочива



- **Оптичка дебљина τ** – вероватноћа да се посматрају ефекти гравитационних сочива
- Одређује се из репрезентативног узорка гравитационог сочива
- Turner et al. 1984, *ApJ*, 284, 1; Turner, 1990, *ApJ*, 365, L43:

$$\tau(z_S, \Omega_m, \Omega_\Lambda) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{z_S} dV \int_0^\infty d\sigma \phi(\sigma; z_L) \times A(\sigma, \Omega_m, \Omega_\Lambda, z_L, z_S) B(S_v),$$

σ – дисперзија брзина, $\phi(\sigma; z_L)$ – функција брзине, A – пресек за појаву вишеструких ликова, B – биас за појачење



Диференцијална (дебела линија) и кумулативна (танка линија) вероватноћа у случају равног космолошког модела

(Mitchell et al. 2005, *ApJ*, 622, 81)

Оптичка дебљина за космолошки распоређена гравитациона микросочива



- Zakharov, Popović & Jovanović, 2004, A&A, 881:

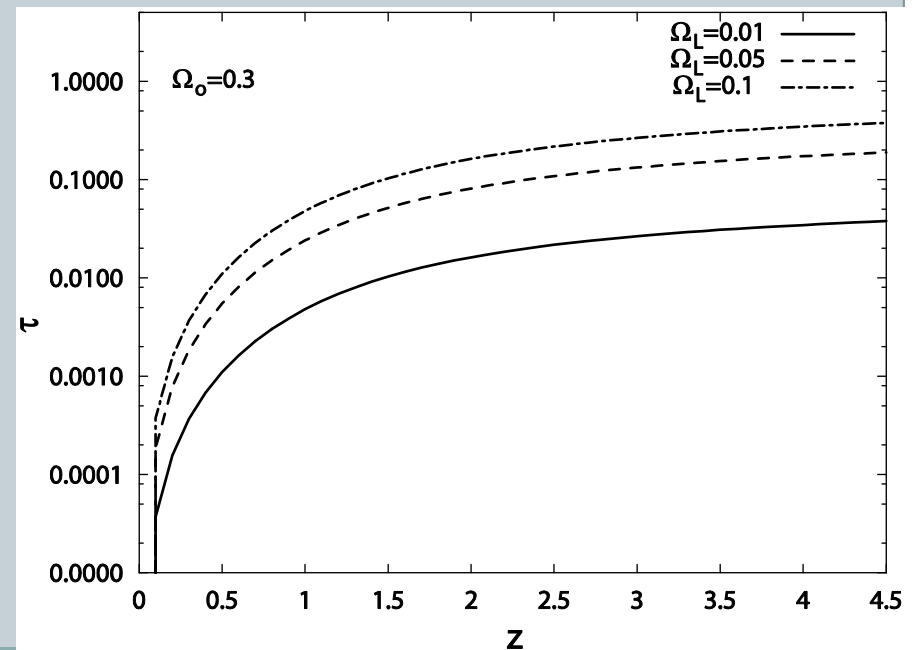
$$\tau_L^p = \frac{3}{2} \frac{\Omega_L}{\lambda(z)} \int_0^z d\omega \frac{(1+\omega)^3 [\lambda(z) - \lambda(\omega)] \lambda(\omega)}{\sqrt{\Omega_0 (1+\omega)^3 + \Omega_\Lambda}}, \quad \lambda(z) = \int_0^z \frac{d\omega}{(1+\omega)^2 \sqrt{\Omega_0 (1+\omega)^3 + \Omega_\Lambda}}$$

Ω_L - фракција материје у компактним сочивима

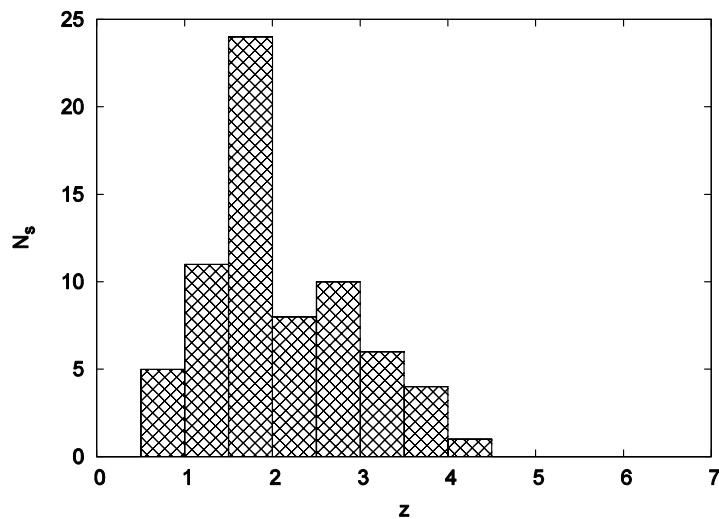
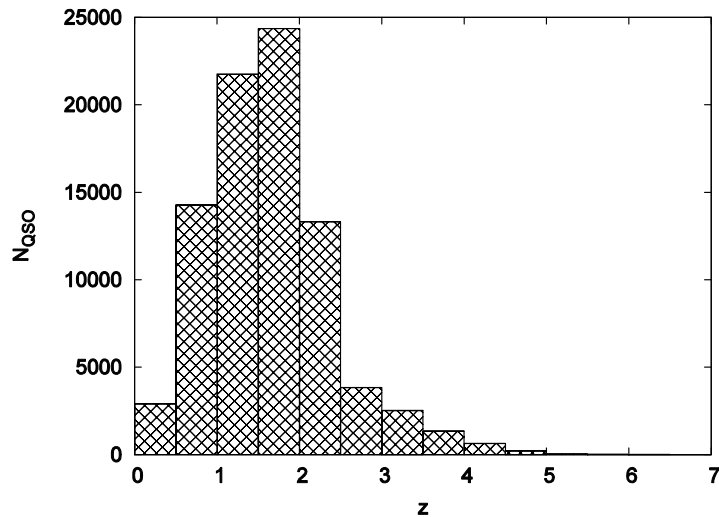
$\lambda(z)$ - афина удаљеност (у cH_0^{-1})

Table 1. The calculated optical depth as a function of redshift for different values of Ω_L and $\Omega_0 = 0.3$.

$z \backslash \Omega_L$	0.01	0.05	0.10
0.5	0.001100	0.005499	0.010998
1.0	0.004793	0.023967	0.047934
1.5	0.010310	0.051550	0.103100
2.0	0.016196	0.080980	0.161959
2.5	0.021667	0.108334	0.216669
3.0	0.026518	0.132590	0.265180
3.5	0.030770	0.153852	0.307703
4.0	0.034504	0.172521	0.345042
4.5	0.037804	0.189018	0.378037
5.0	0.040742	0.203712	0.407424

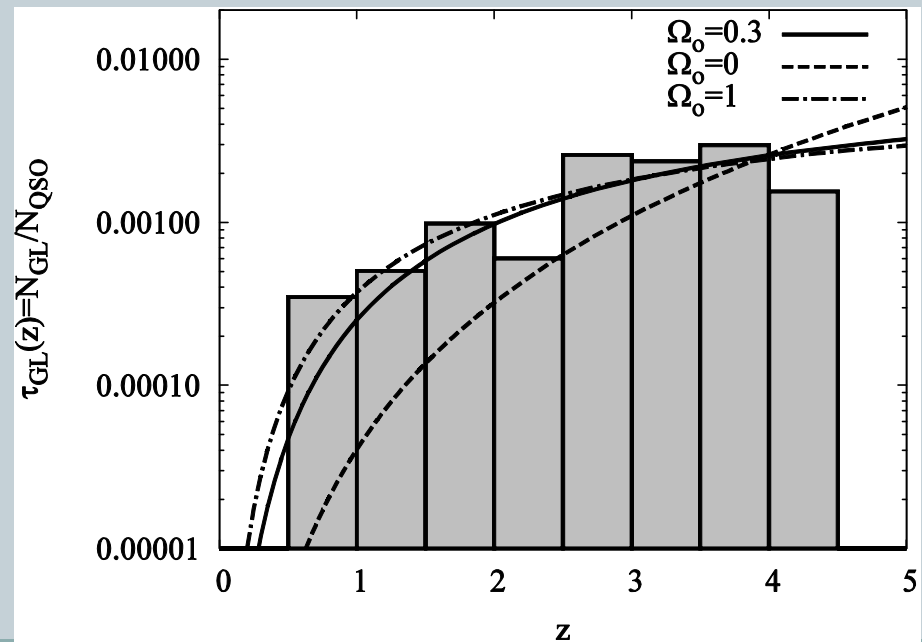


Оптичка дебљина за гравитациона макросочива



- Veron-Cetty & Veron, 2006, *A&A*, 455, 773: узорак од 85221 (N_{QSO}) квазара од којих је 69 (N_{GL}) са вишеструким ликовима (макросочива)
- Ефективна оптичка дебљина:

$$\tau_{GL}(z) = \frac{N_{GL}(z)}{N_{QSO}(z)}$$



Могући узроци неслагања грав. сочива са усаглашеним космолошким моделом



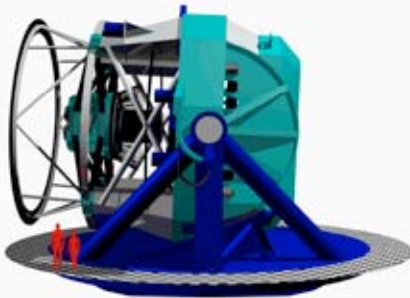
Impact of Gravitational Lensing on Cosmology
Proceedings IAU Symposium No. 225, 2004
Mellier, Y. & Meylan, G. eds.

© 2004 International Astronomical Union
doi:10.1017/S1743921305002231

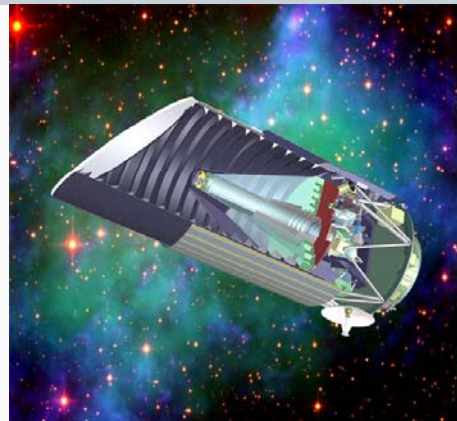
Quasar Lensing Statistics and Ω_Λ : What Went Wrong?

Dan Maoz

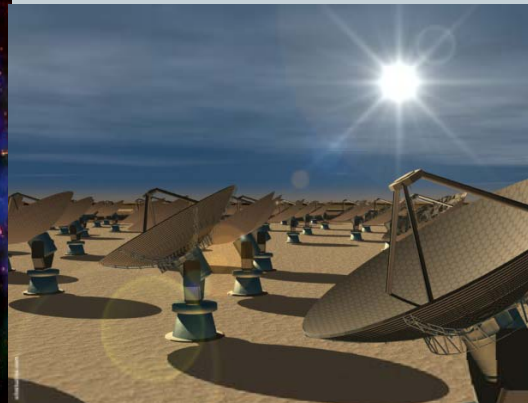
- Мали број до сада откривених гравитационих сочива (~100)
- Решење ће дати будући посматрачки пројекти:



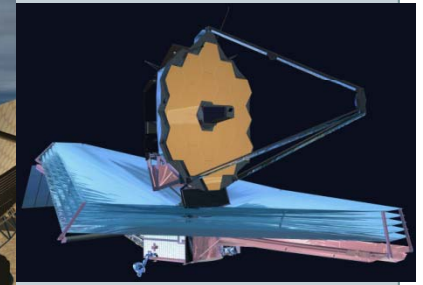
Large Synoptic Survey Telescope (LSST):
после 2020.



SuperNova/Acceleration Probe (SNAP):
лансирање до 2020.



Square Kilometre Array (SKA):
почетак изградње 2016.



James Webb Space Telescope (JWST):
лансирање 2018.

- Неправилно урачунати ефекти: екстинкција, еволуција галаксија, елиптичност
- Погрешна космологија

Закључци



1. временско кашњење светлости из појединачних ликова гравитационих сочива даје мање вредности за H_0 (тј. старији космос) у односу на друге методе
2. гравитациона сочива као природни телескопи: детектоване галаксије на већем црвеном помаку него што то предвиђа Λ CDM космолошки модел
3. слаба гравитациона сочива:
 - једини метод за директно детектовање тамне материје
 - тамна материја се у случају структура на великим скалама не понаша баш увек у складу са предвиђањима Λ CDM модела
4. гравитациона микросочива: моћан алат за изучавање особина супер-масивних црних рупа у центрима активних галаксија, као и геометрије простор-времена и физике плазме у њиховој околини
5. статистика грав. сочива даје резултате који су у сагласности са SN Ia, али нису сасвим у сагласности са средњим вредностима за Λ CDM модел
6. оптичка дебљина космолошки распоређених микросочива зависи од усвојених космолошких параметара
7. будући посматрачки пројекти ће значајно унапредити статистику г. с. и тиме повећати тежину космолошких параметара одређених помоћу њих

Хвала на пажњи!!!

