

Галаксије и њихова јата као гравитациона сочива



ПРЕДРАГ ЈОВАНОВИЋ

**АСТРОНОМСКА ОПСЕРВАТОРИЈА
БЕОГРАД**

Преглед предавања

1. Гравитација и хијерархијска организација видљивог свемира

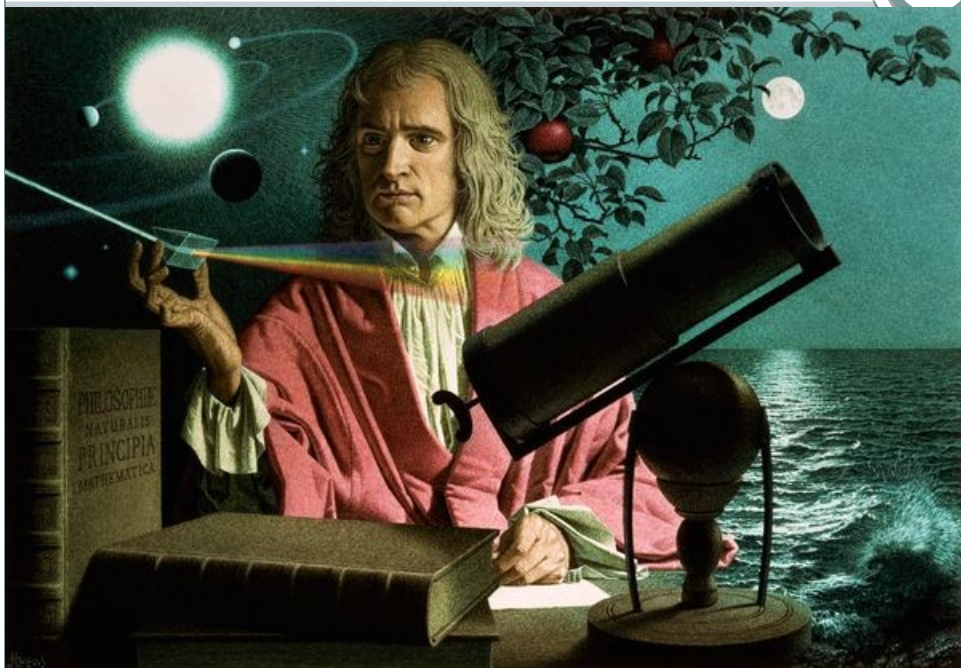
- Галаксије и њихова класификација
- Космолошки црвени помак
- Равне ротационе криве спиралних галаксија и тамна материја

2. Савијање зрака светлости у гравитационом пољу и **гравитациона сочива:**

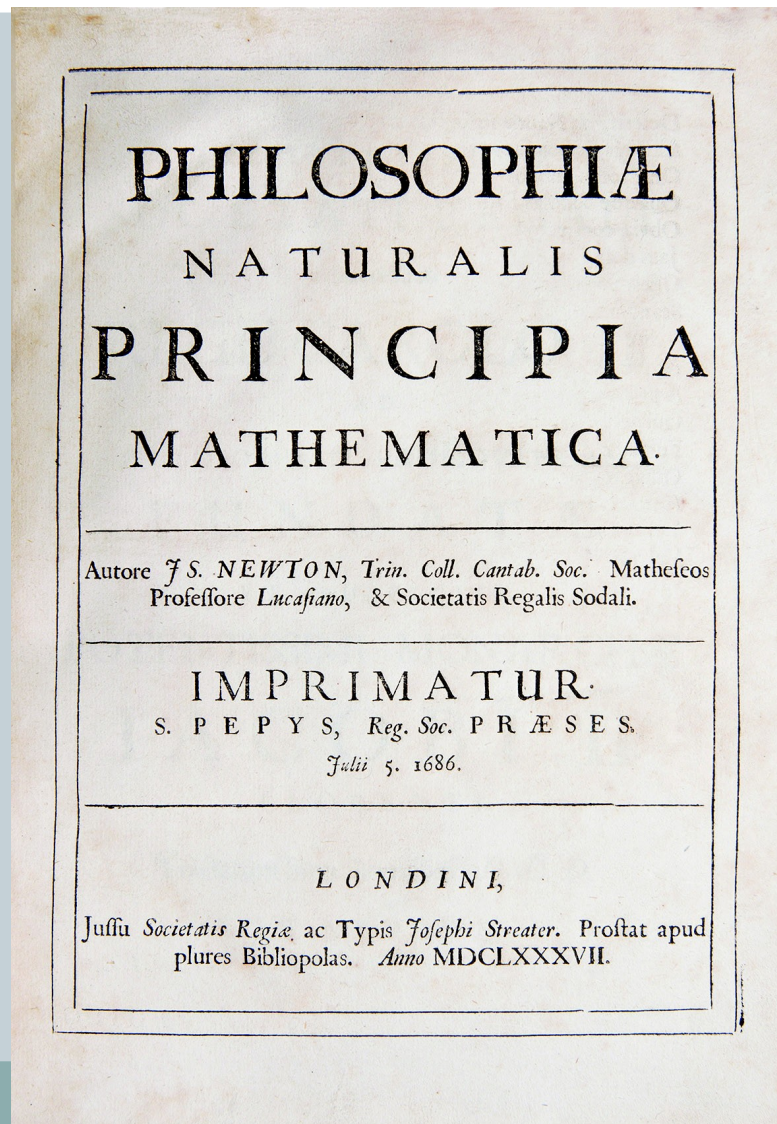
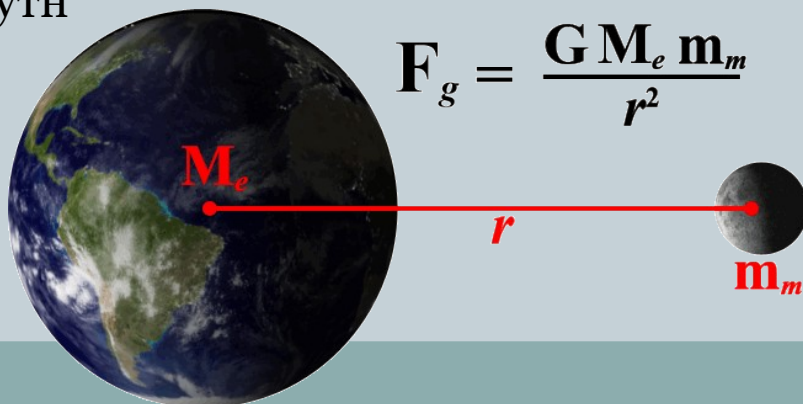
- Микросочива - појачање сјаја удаљених извора:
 - Откривање екстрасоларних планета
 - Изучавање физике и геометрије у близини централних супермасивних црних рупа галаксија и квазара
- Макросочива - вишеструки ликови удаљених извора:
 - Одређивање космолошких параметара
 - Откривање удаљених галаксија
- Слаба гравитациона сочива
 - Детекција тамне материје

3. Закључци

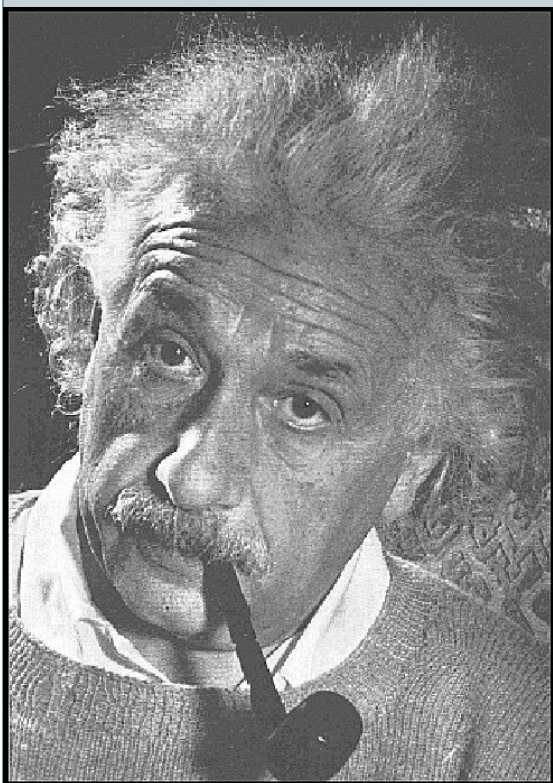
Гравитација - сила која управља материјом у космосу



Исак Њутн



Општа теорија релативности - модерна теорија гравитације



Алберт Ајнштајн



- једначине поља ОТР:

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

- Шварцшилдов радијус: $R_S = \frac{2GM}{c^2}$

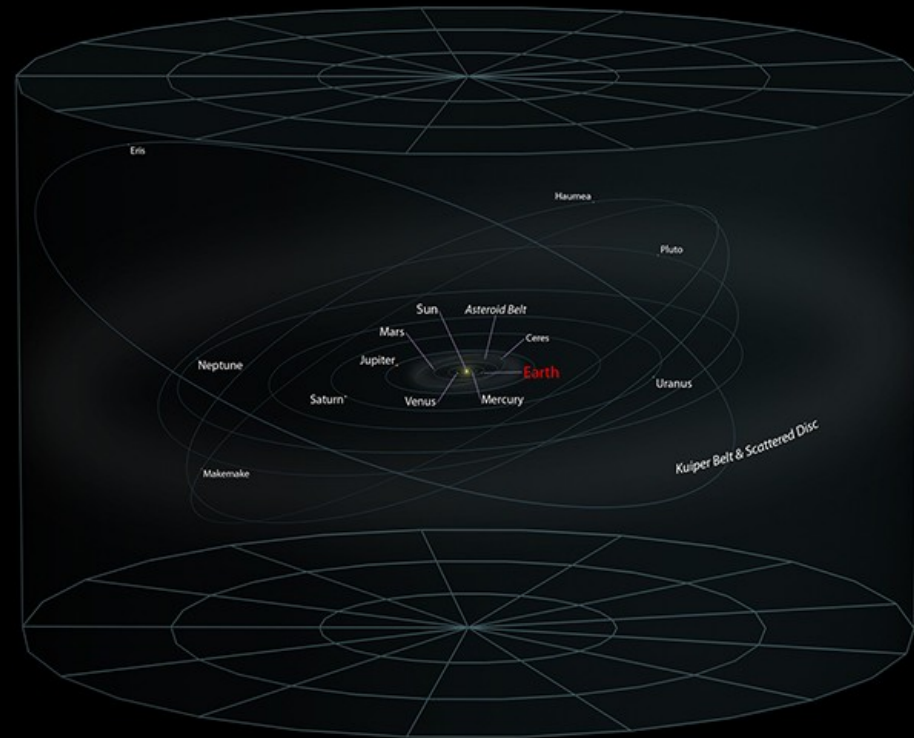
Хијерархија видљивог свемира I



Earth



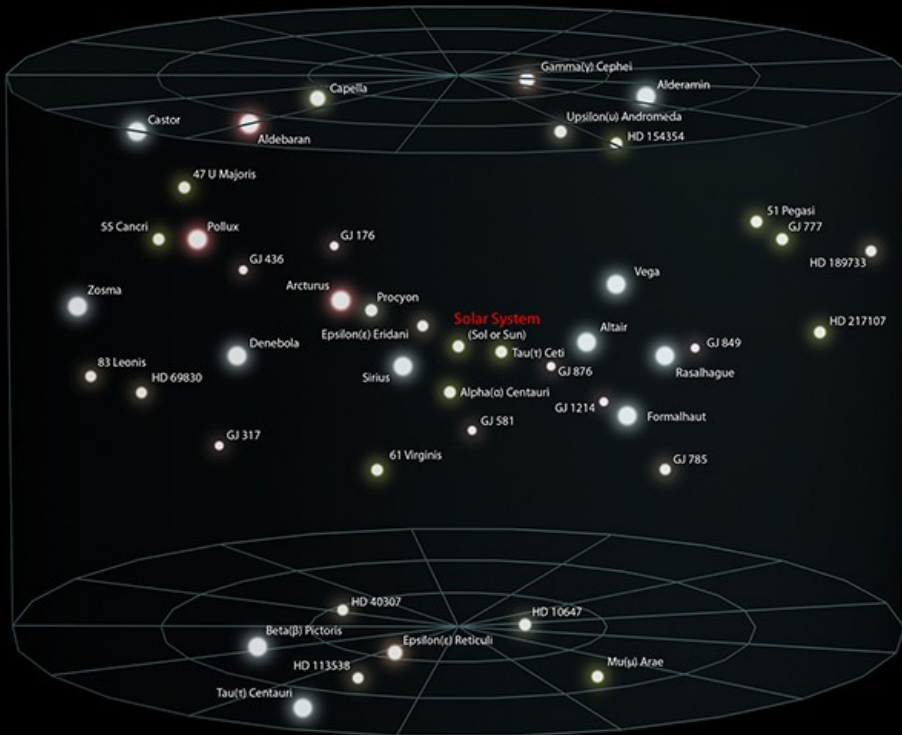
Solar System



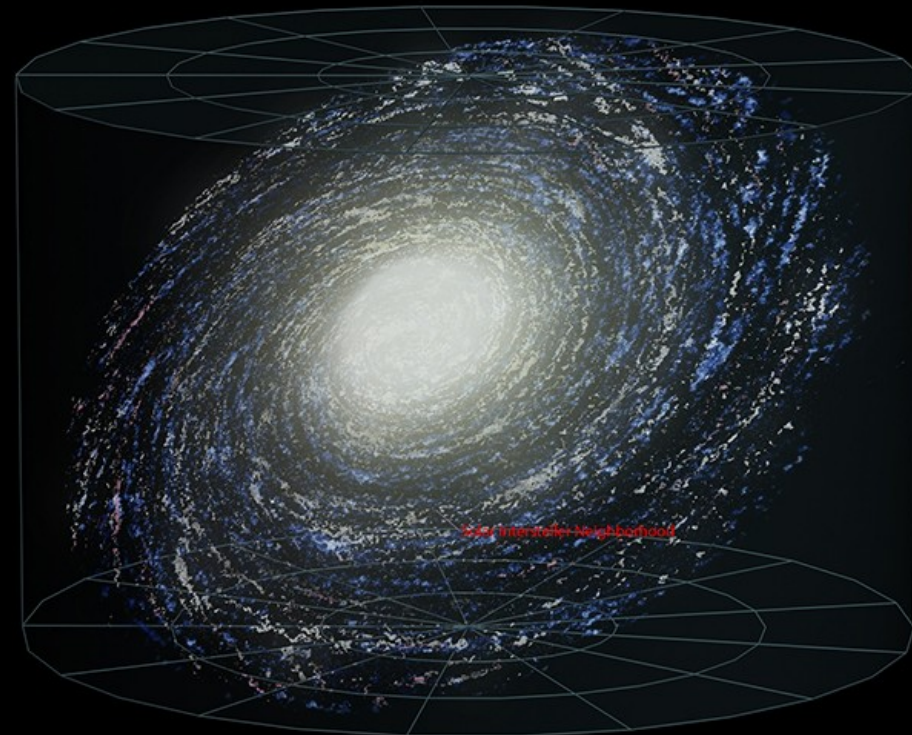
Хијерархија видљивог свемира II



Solar Interstellar Neighborhood



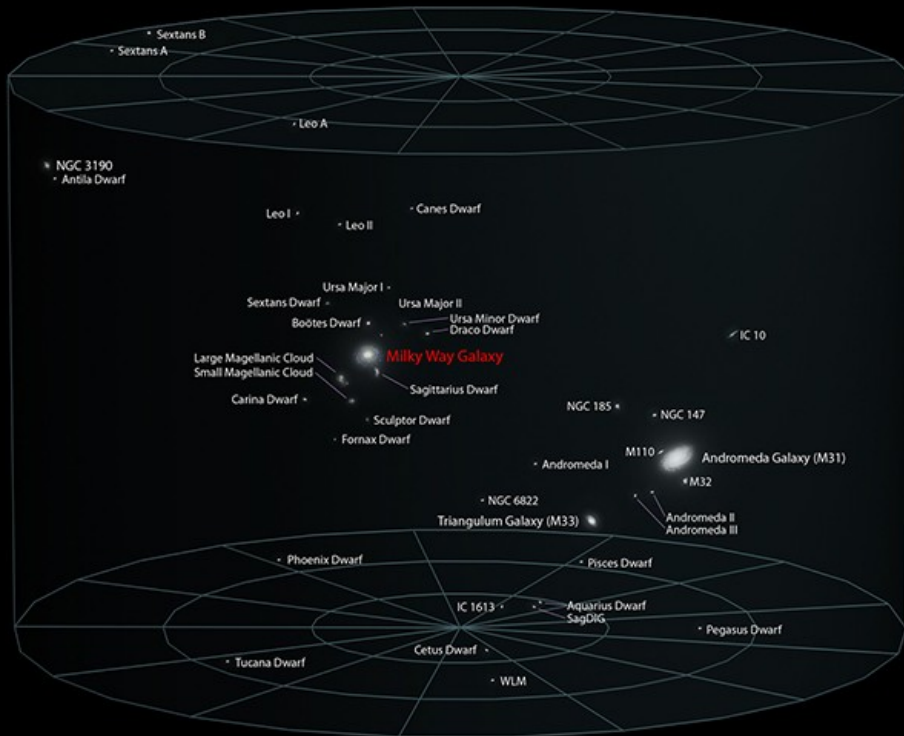
Milky Way Galaxy



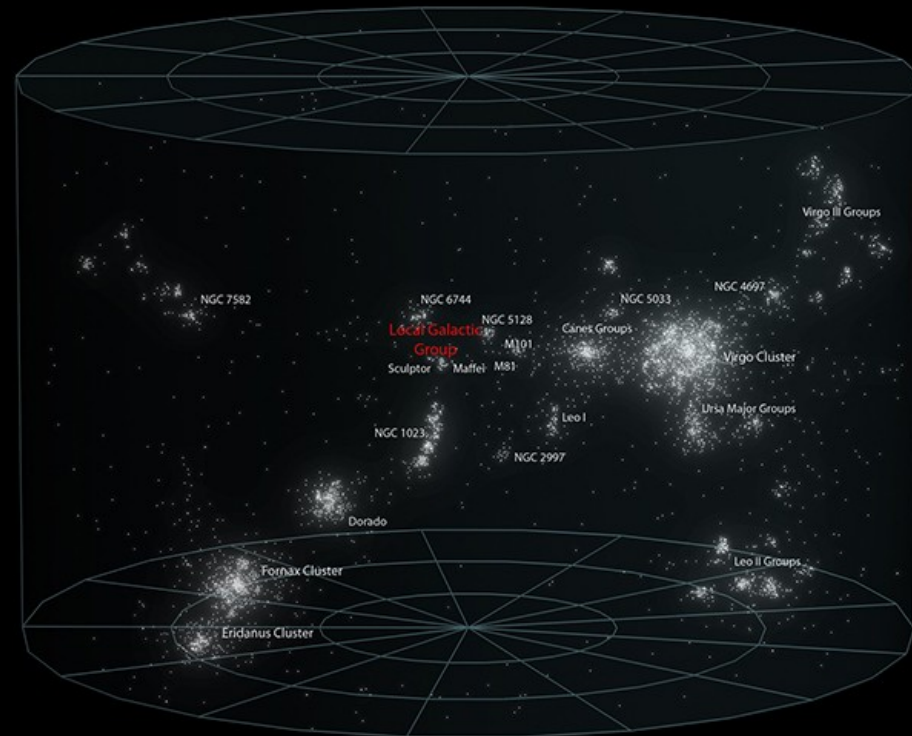
Хијерархија видљивог свемира III



Local Galactic Group



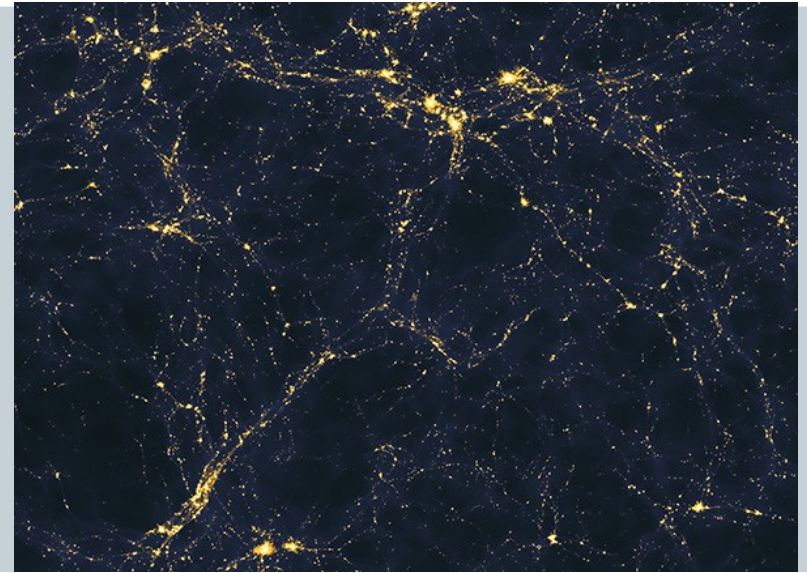
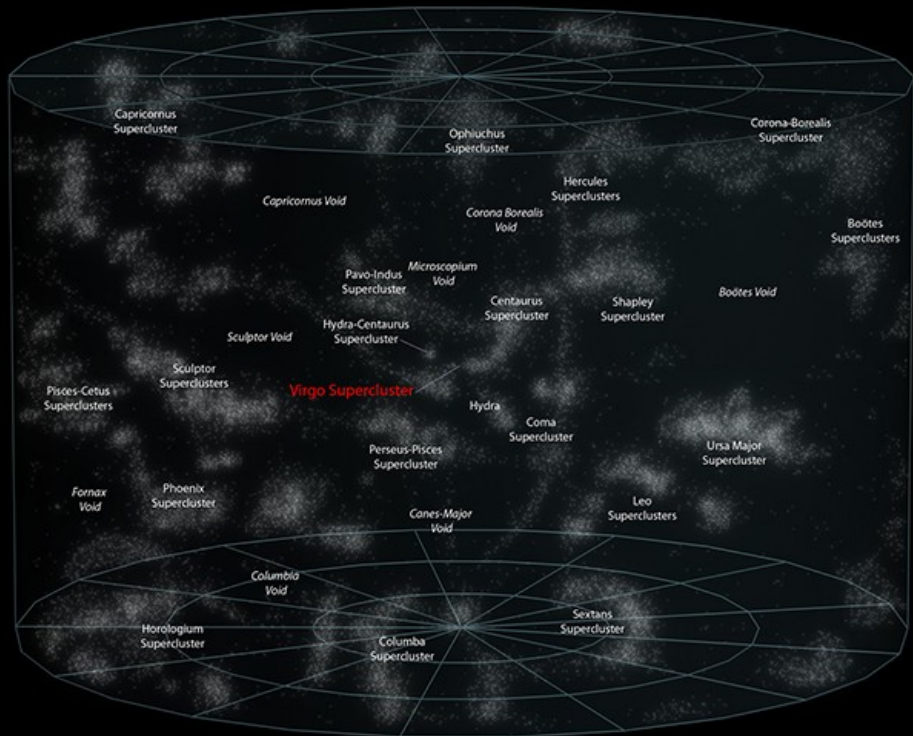
Virgo Supercluster



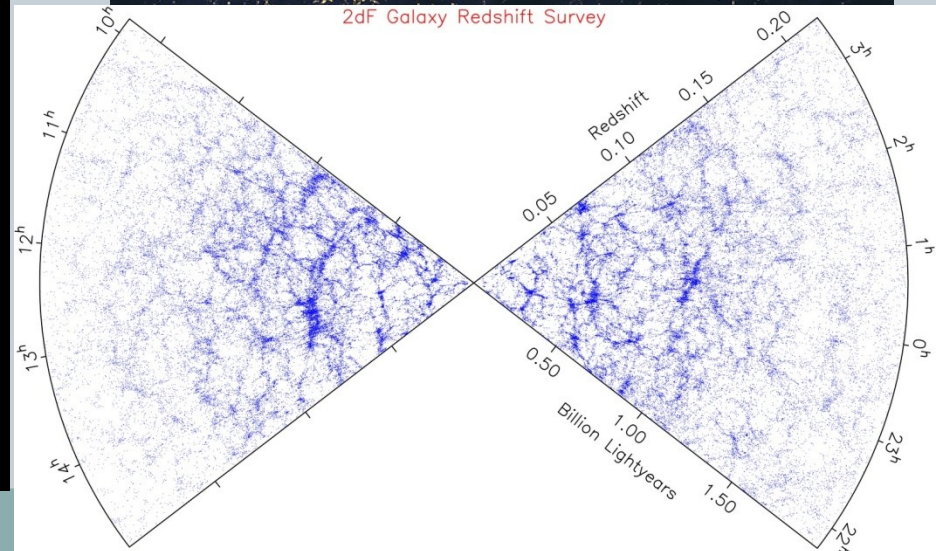
Хијерархија видљивог свемира IV



Local Superclusters



2dF Galaxy Redshift Survey



Космолошки црвени помак



- $a(t)$ - величина свемира (параметар скалирања)
- z - космолошки црвени помак:

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



400nm 500nm 600nm 700nm

A red shift of about 100 Å (10 nm) corresponds to a recessional velocity of about 24,000 km/hour, or about 15,000 mi/hour.

About a 100 Å shift



400nm 500nm 600nm 700nm

A larger red shift, here about 760 Å (76 nm) corresponds to a recessional velocity of about 135,000 km/hour, or about 84,000 mi/hour.

About a 760 Å shift

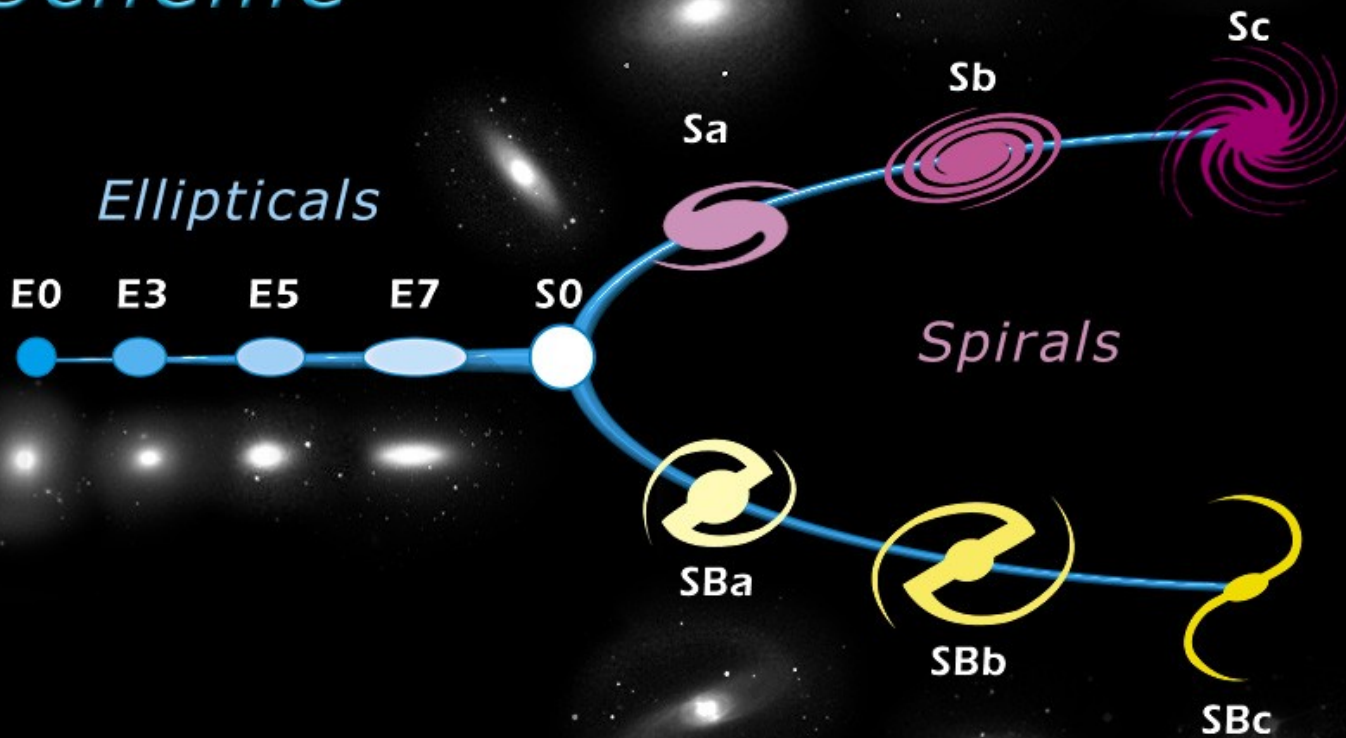


400nm 500nm 600nm 700nm

H α

Морфолошка класификација галаксија

Edwin Hubble's Classification Scheme



Супермасивне црне рупе у центрима галаксија и њихова активност

Лево: NGC 5548
(активна галаксија)

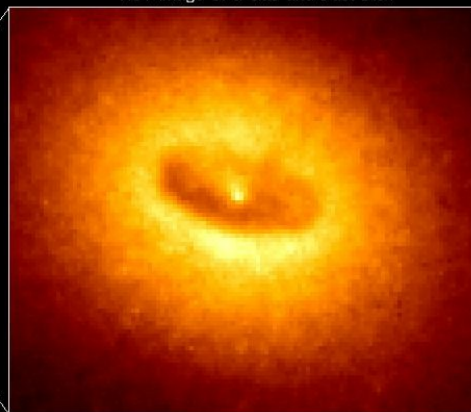
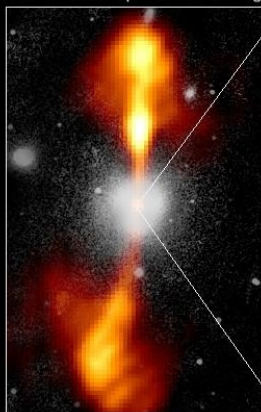
Десно: NGC 3277
(нормална галаксија)

Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope
Wide Field / Planetary Camera

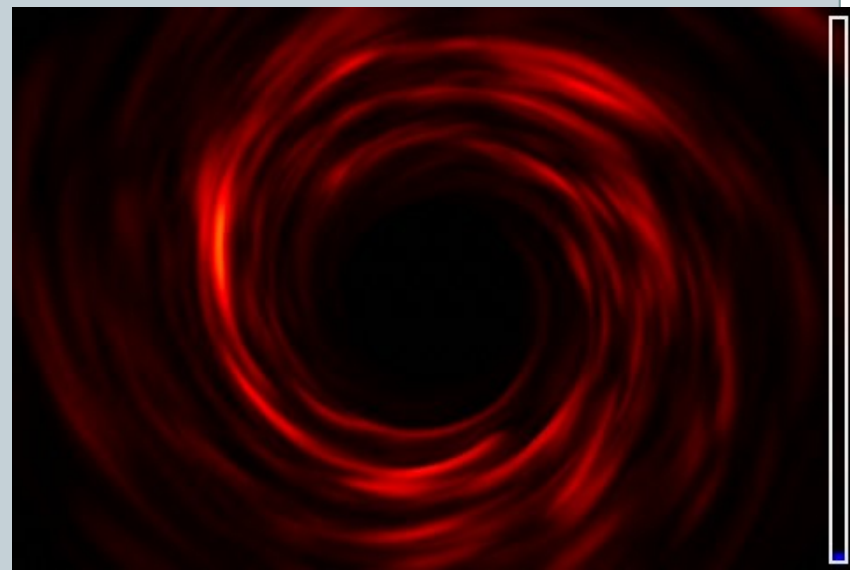
Ground-Based Optical/Radio Image

HST Image of a Gas and Dust Disk



380 Arc Seconds
88,000 LIGHTYEARS

17 Arc Seconds
400 LIGHTYEARS

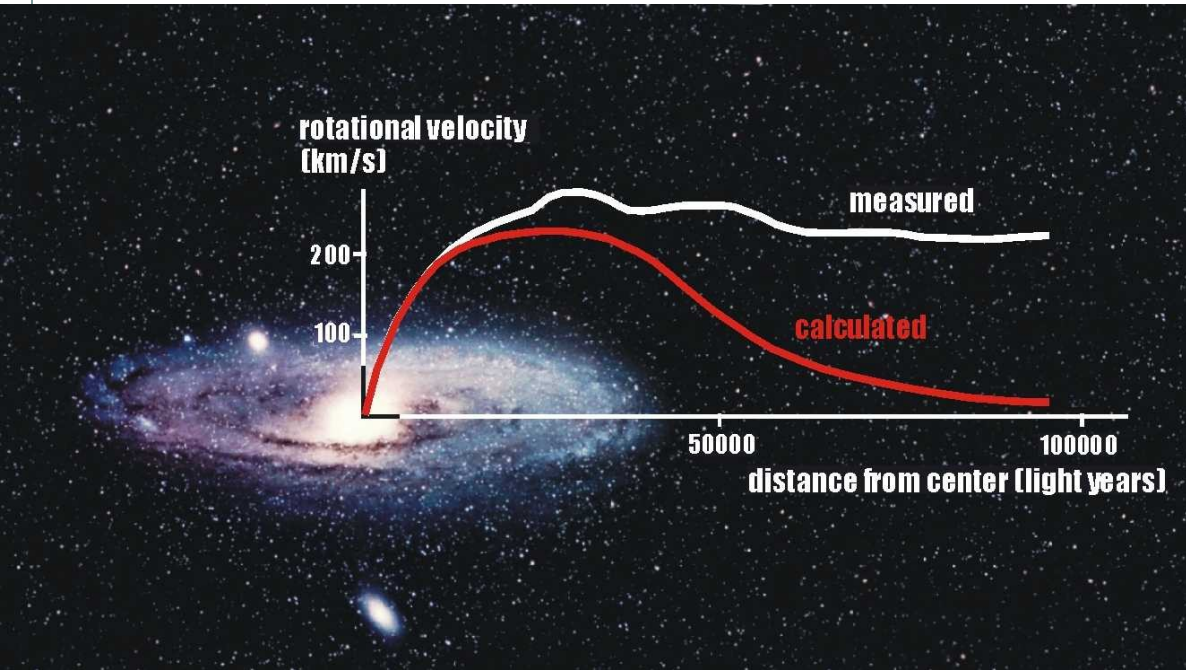


Релативистички акрециони диск
око супермасивне црне рупе

Судары галаксија: настанак двојних система супермасивних црних рупа



Равне ротационе криве - тамна материја

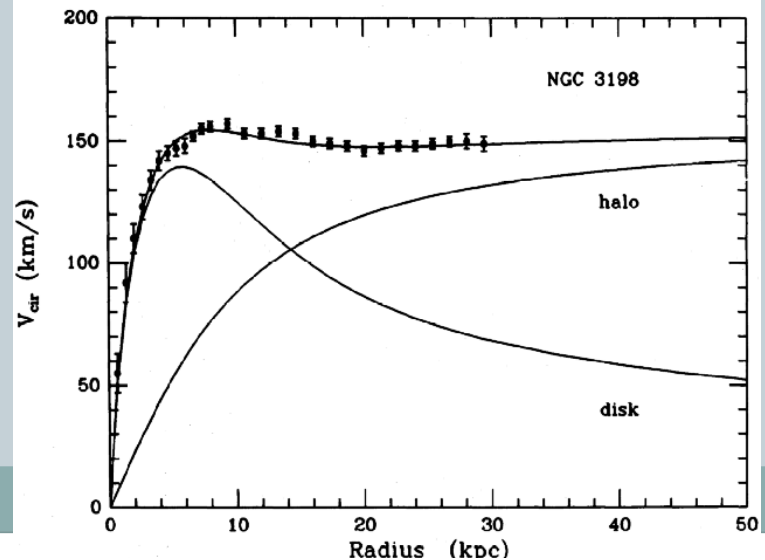


Хало тамне материје

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



DISTRIBUTION OF DARK MATTER IN NGC 3198



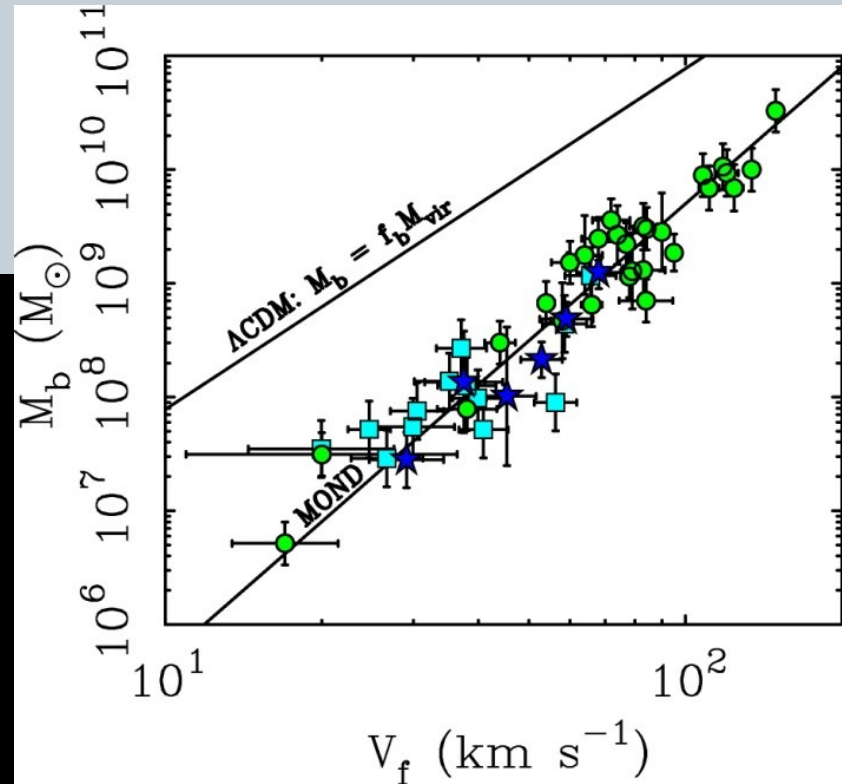
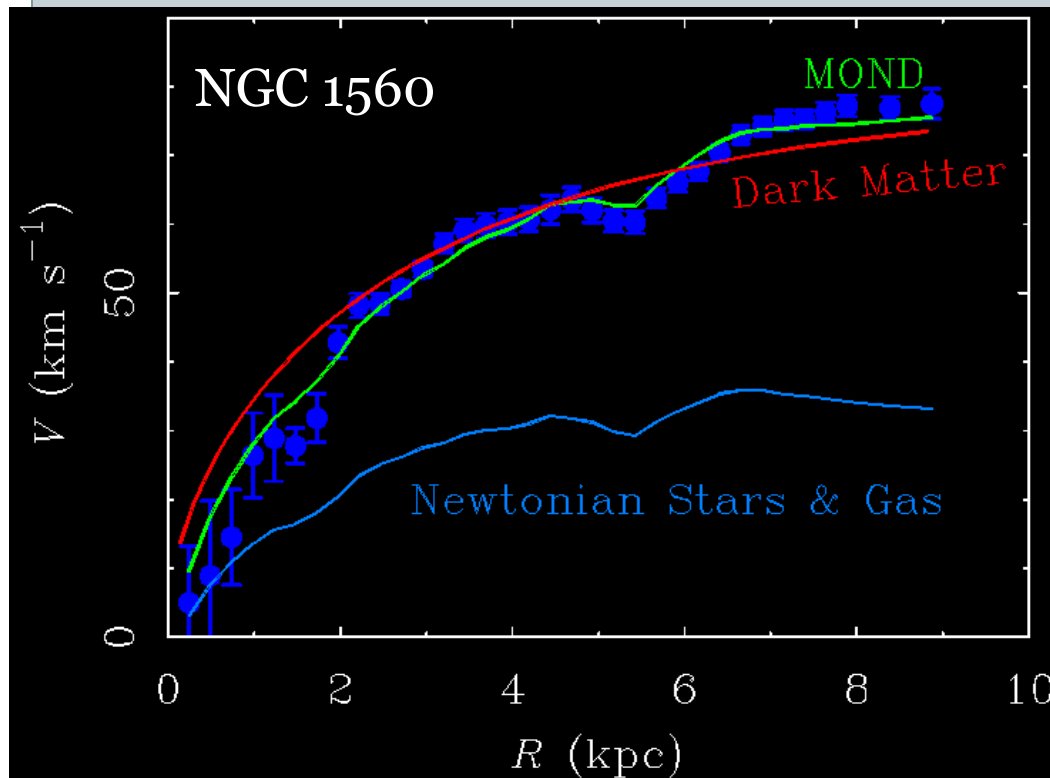
Модификовани закони гравитације и динамике као алтернативе тамној материји

- Модификована Њутнова динамика (МОНД):

$$\vec{F} = m \cdot \mu\left(\frac{a}{a_0}\right) \vec{a}$$

$$\mu(x) = 1 \text{ if } |x| \gg 1$$

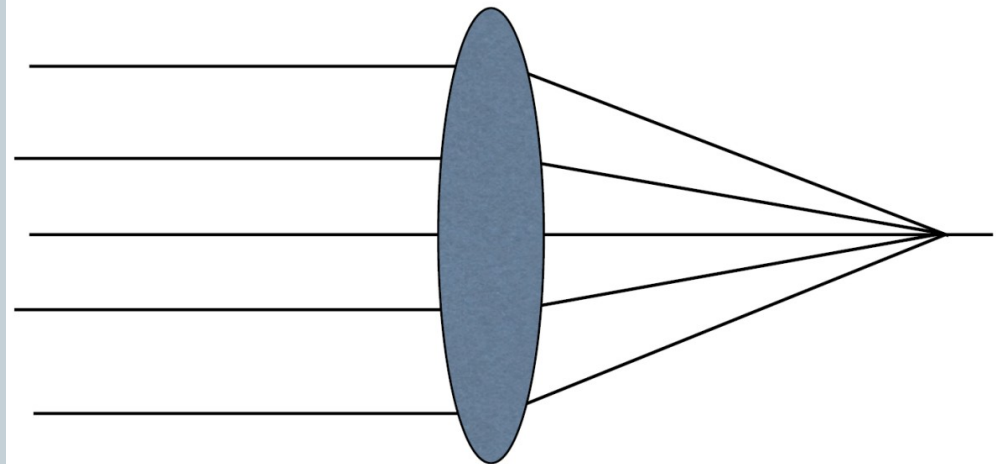
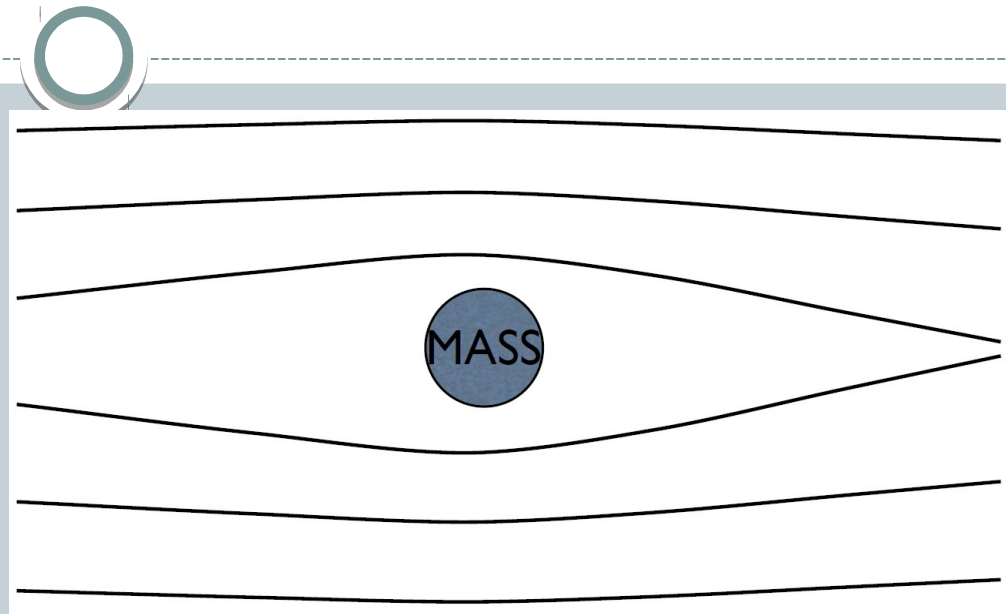
$$\mu(x) = x \text{ if } |x| \ll 1$$



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

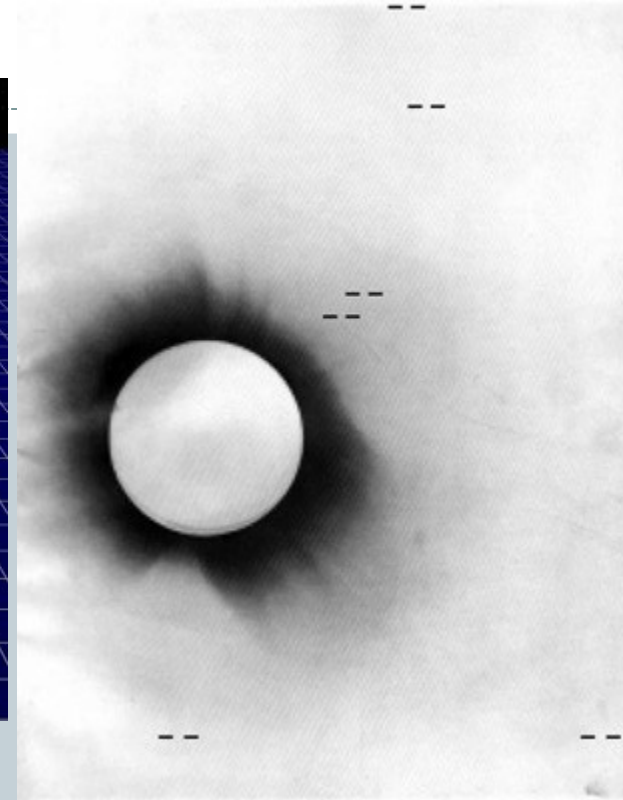
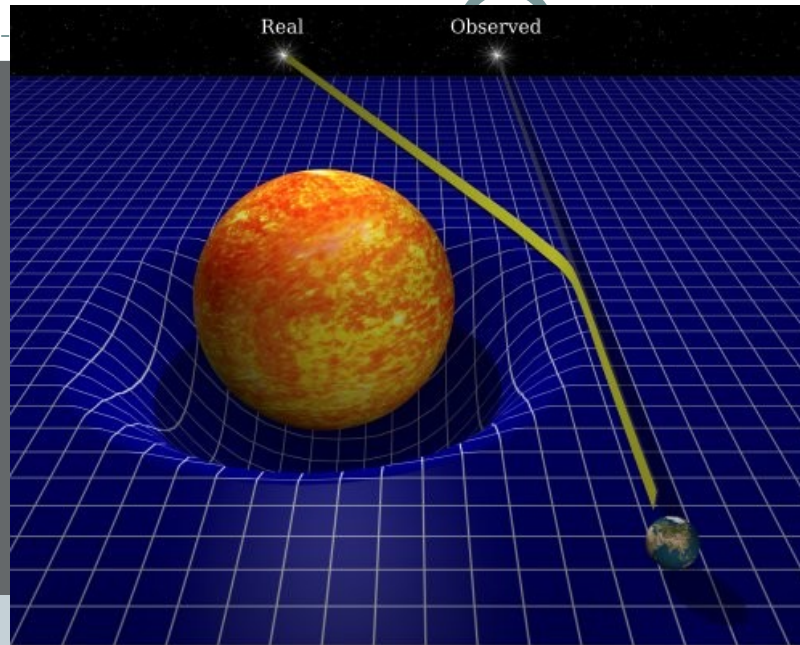
Савијање зрака светлости у гравитационом пољу

- светлост “пада” под утицајем гравитације
- Њутн: гравитационо савијање путања “корпускула” (честице од којих се светлост састоји)
- Општа релативност: светлост прати геодезике
- сабирна сочива у оптици:
 1. савијање је веће даље од осе
 2. фокусирање у тачку
- гравитациона сочива:
 1. савијање је веће ближе осе
 2. фокусирање на линију



Гравитационо (горе) према оптичком сочиву (доле)

Угао савијања зрака светлости у гравитационом пољу



1. Јохан Георг фон Золднер (1804) – путања честице брзине c :

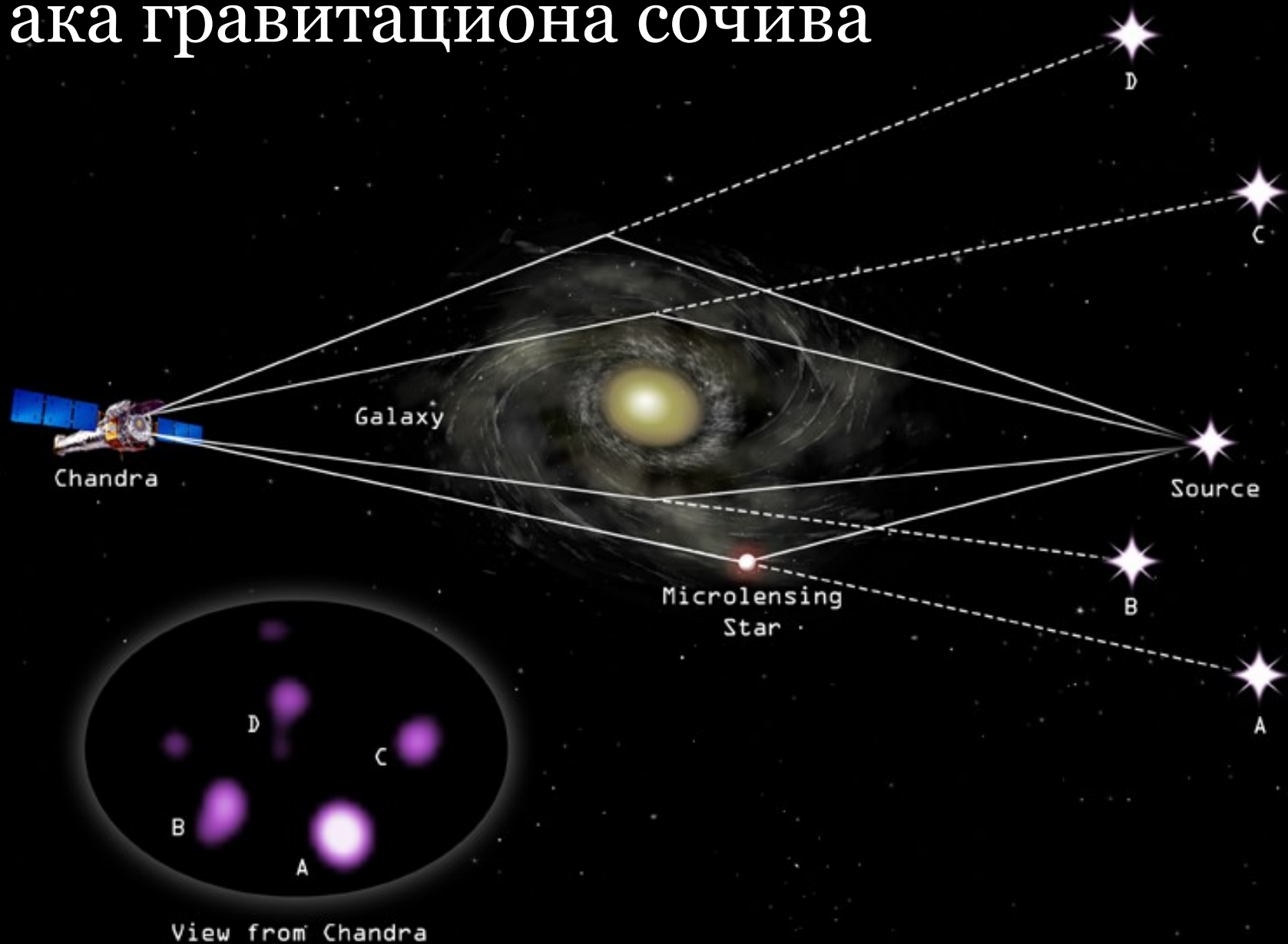
$$\alpha = \frac{2GM}{c^2 \xi}$$

2. Алберт Ајнштајн (1915) – Општа релативност:

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 \xi}$$

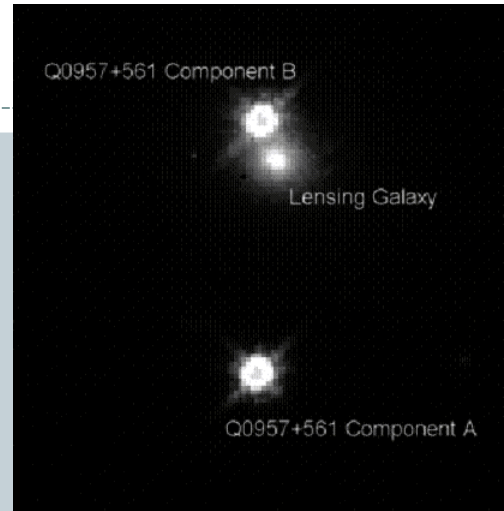
- Потпуно помрачење сунца 1919:
 1. нема савијања светлости: $\alpha = 0''$
 2. Њутнова механика: $\alpha = 0''.87$
 3. ОТР: $\alpha = 1''.75$
- □ Потврда Ајнштајновох предвиђања:
 $\alpha_1 = 1''.98 \pm 0''.12$ $\alpha_2 = 1''.61 \pm 0''.30$

Јака гравитациона сочива

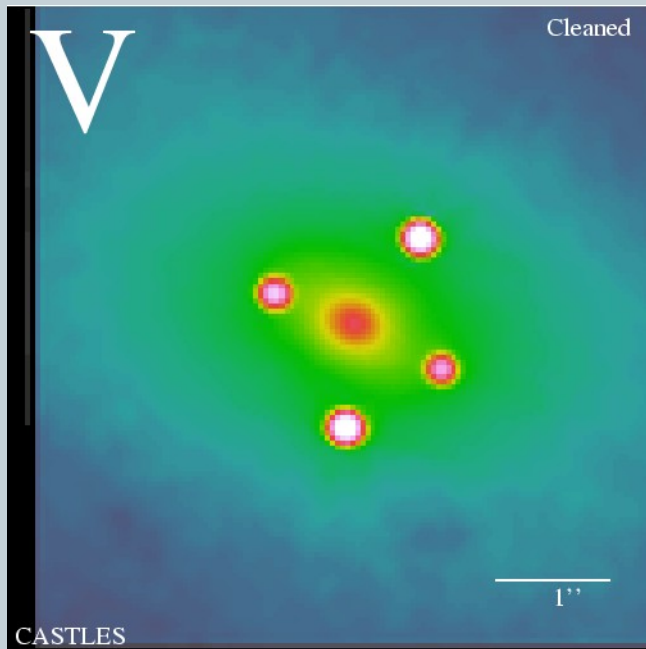
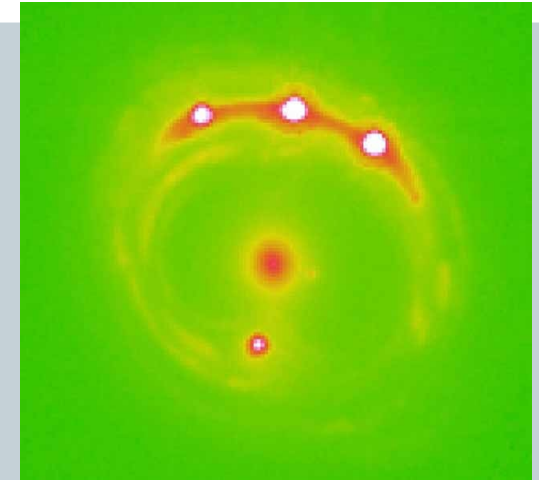


Примери посматраних грав. сочива

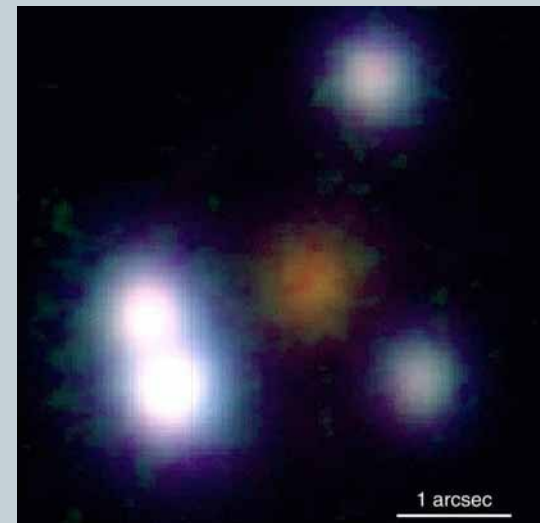
- Dennis Walsh, Bob Carswell, Ray Weymann 1979. открили двојни квазар QSO 0957+561 и потврдили да се ради о гравитационом сочиву



Квазар RXJ1131-1231



Квазар Q2237+030 ($z=1.695$), познатији као “Ајнштајнов крст” и галаксија-сочиво ZW2237+030 ($z=0.0394$)



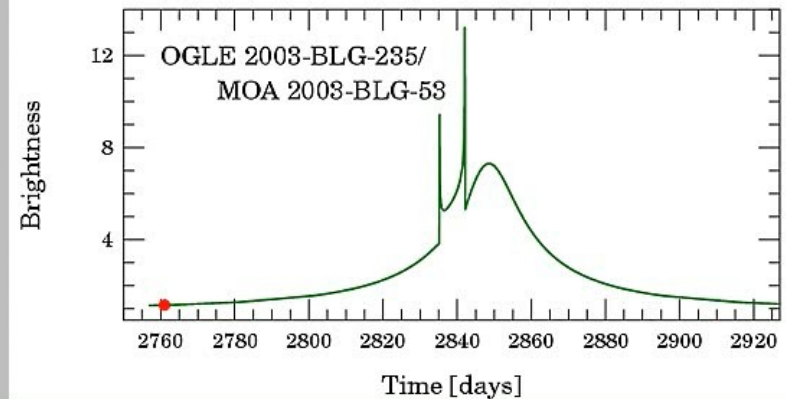
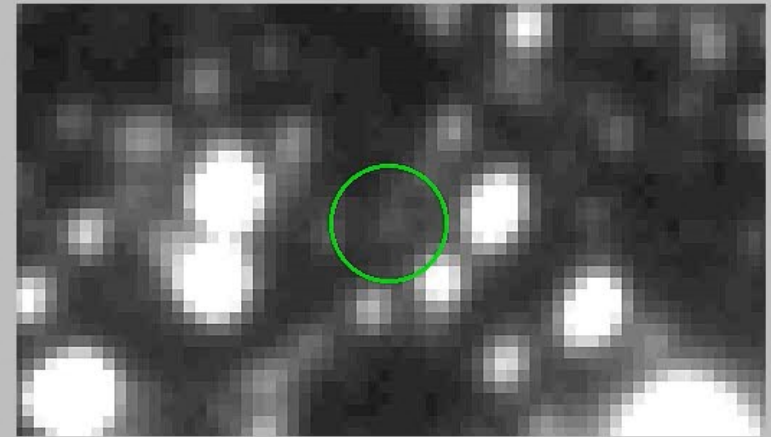
Квазар PG 1115+080

Звезде као микросочива - појачање позадинских извора



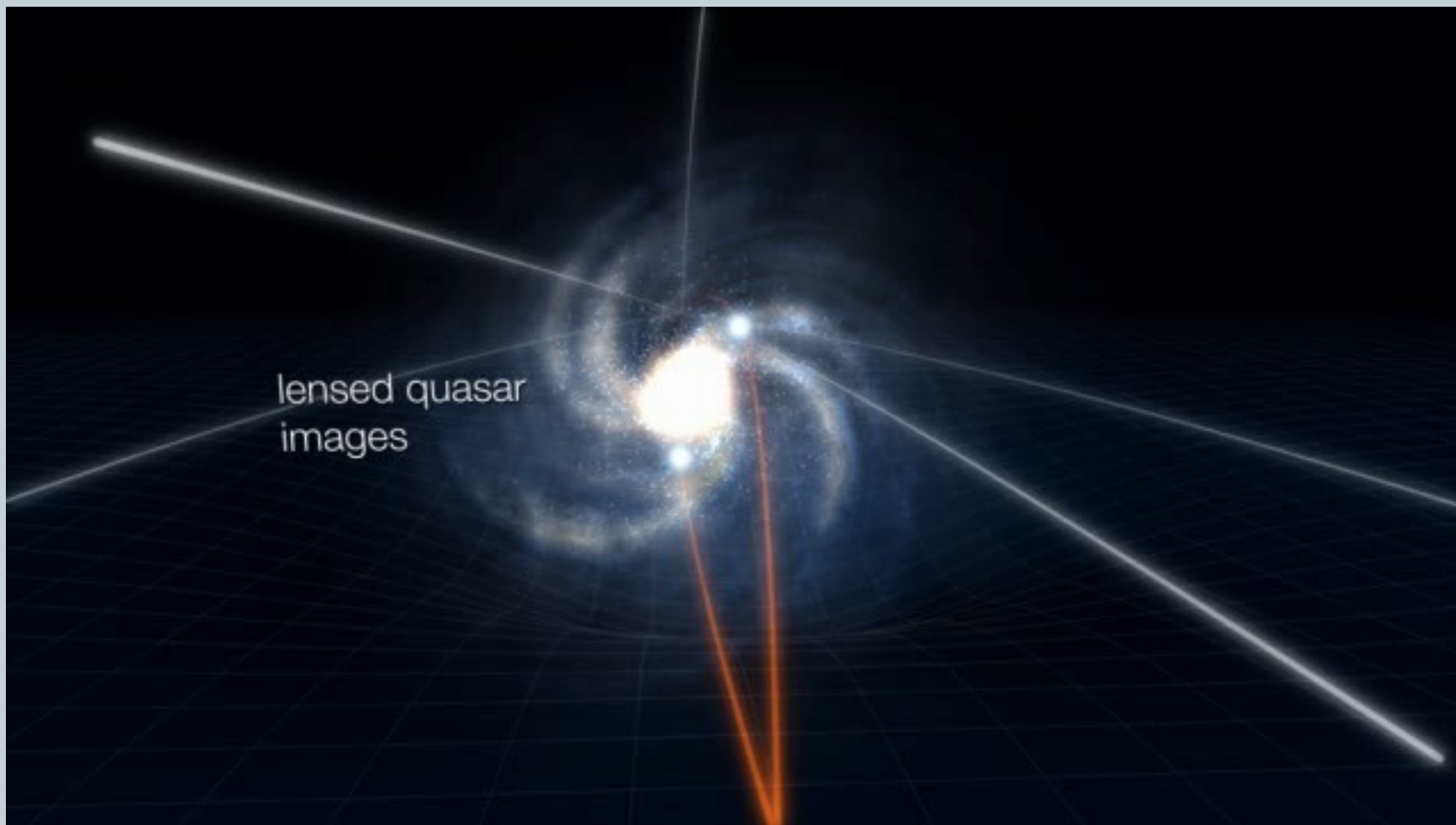
Source
Star

Observer



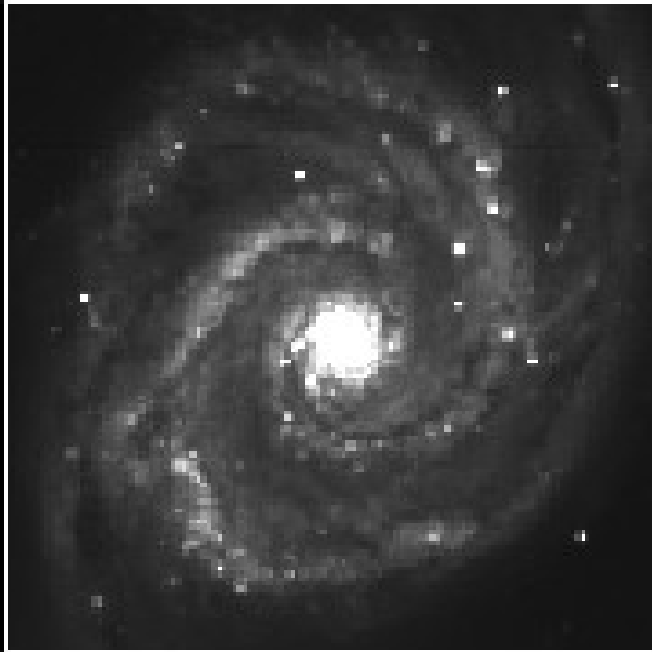
- детекција екстрасоларних планета
- проучавање унутрашњих делова активних галаксија око њихових централних супермасивних црних рупа

Изучавање геометрије и физике у непосредној околини супермасивних црних рупа помоћу гравитационих микросочива



Галаксије као макросочива - вишеструки ликови позадинских извора

Lensing Galaxy



- Ајнштајнов радијус: $\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{ds}}{D_d D_s}}$

Задатак



Израчунати масу галаксије-сочива у случају Ајнштајновог крста (Q2237+030), знајући да је његов Ајнштајновог радијус $\theta_E = 0''.89$, а растојање између посматрача и сочива $D_d = 161.1$ Мрс, посматрача и извора $D_s = 1764.8$ Мрс и сочива и извора $D_{ds} = 1702.5$ Мрс.

Константе:

$$G \approx 4.302 \times 10^{-3} \frac{\text{pc}}{M_e} \frac{\text{km}^2}{\text{s}^2}, \quad c = 3 \times 10^5 \frac{\text{km}}{\text{s}},$$

$$1 \text{ rad} = (180 \cdot 60 \cdot 60 / \pi)'' \approx 206265''$$

Решење:

$$\theta_E = (0.89 / 206265) \text{ rad} = 4.315 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

$$\text{Ефективно растојање: } D = \frac{D_d D_s}{D_{ds}} = 167 \text{ Мрс} = 167 \times 10^6 \text{ pc}$$

$$M = \frac{c^2 D \theta_E^2}{4G} = 1.6 \times 10^{10} M_e$$

Напомена: у случају

космолошких растојања: $D_{ds} \neq D_s - D_d$

Одређивање Хаблове константе из временског кашњења светлости појединачних ликова

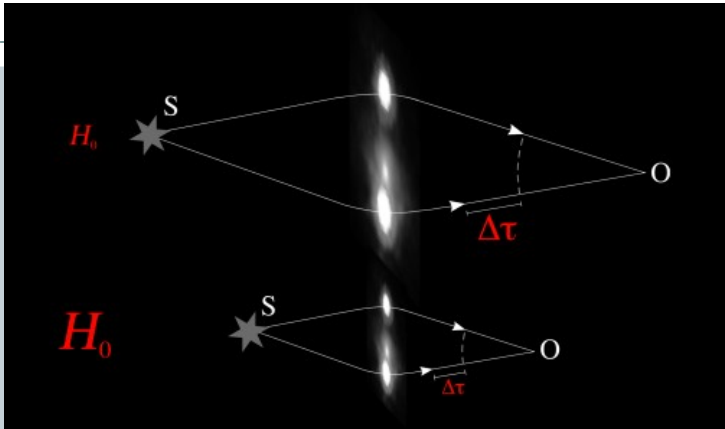
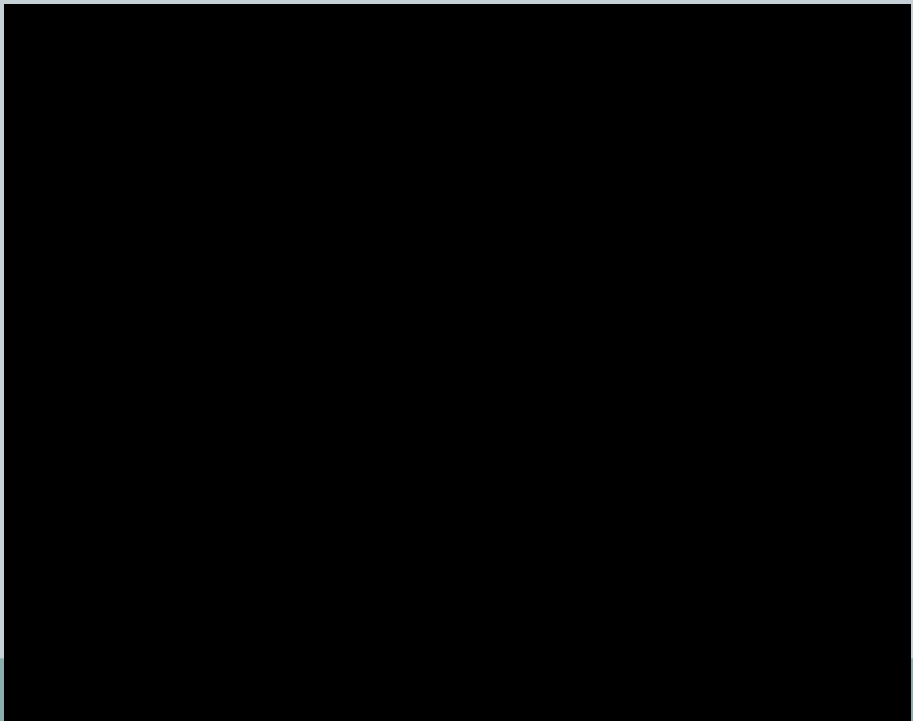
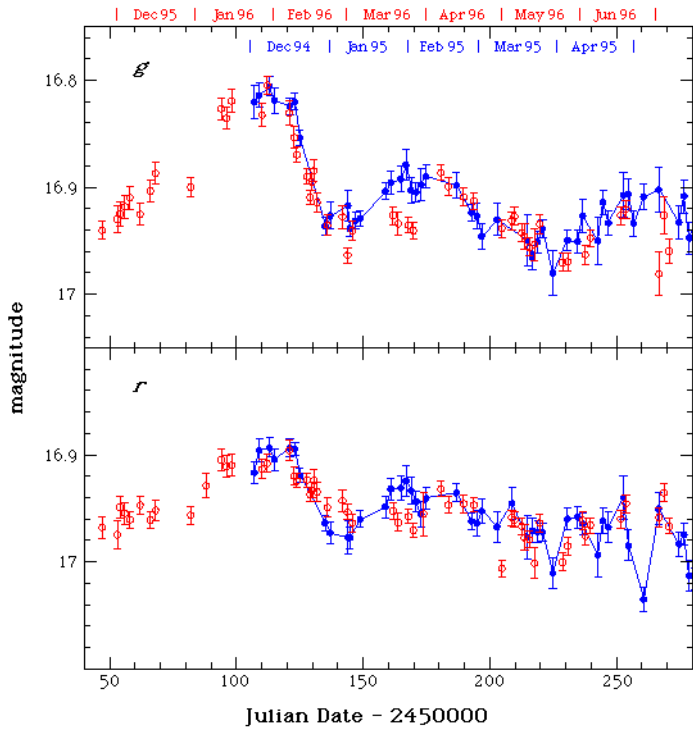


Table 1.1. *Time Delay Measurements*

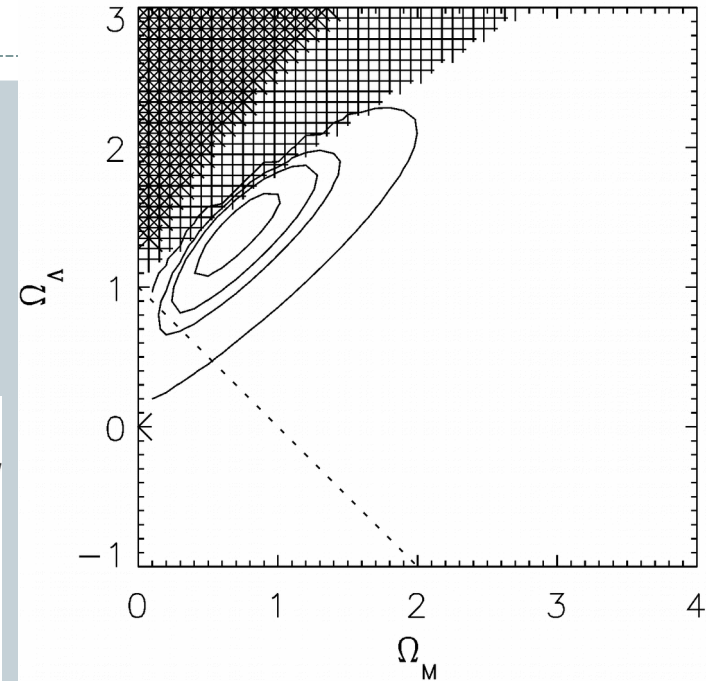
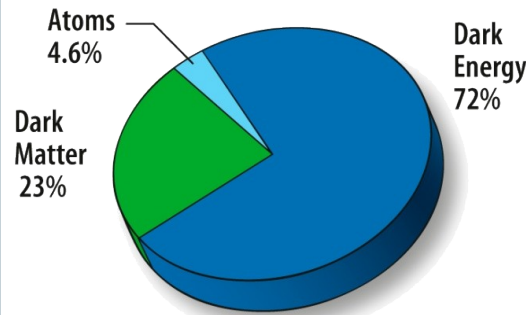
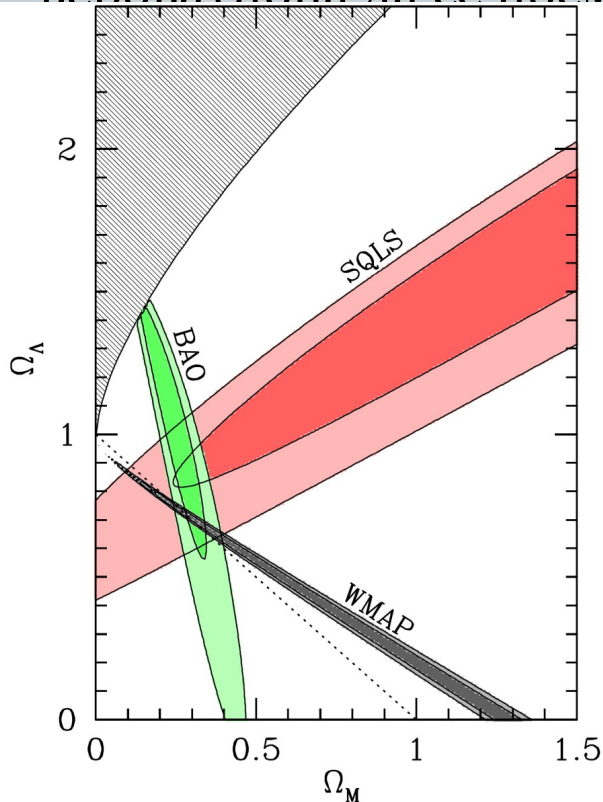
System	N_{im}	Δt (days)
RXJ0911+0551	4	146 ± 4
Q0957+561	2	417 ± 3
HE1104–1805	2	161 ± 7
PG1115+080	4	25 ± 2
SBS1520+530	2	130 ± 3
B1600+434	2	51 ± 2
HE2149–2745	2	103 ± 12
B1608+656	4	77 ± 2
B0218+357	2	10.5 ± 0.2
PKS1830–211	2	26 ± 4
B1422+231	4	(8 ± 3)



Одређивање космолошких параметара помоћу статистике јаких сочива

- Космолошки параметри: Ω_M - количина материје, Ω_Λ - количина тамне енергије, Ω_K - кривина простора: $\Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_K = 1$

- Оптичка дебљина сочива:** вероватноћа да се посматра ефекат сочива



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

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

Cao et al. 2012, *ApJ*, 755, 31; Oguri et al. 2012, *AJ*, 143, 120

Галактичка јата као макросочива - природни телескопи

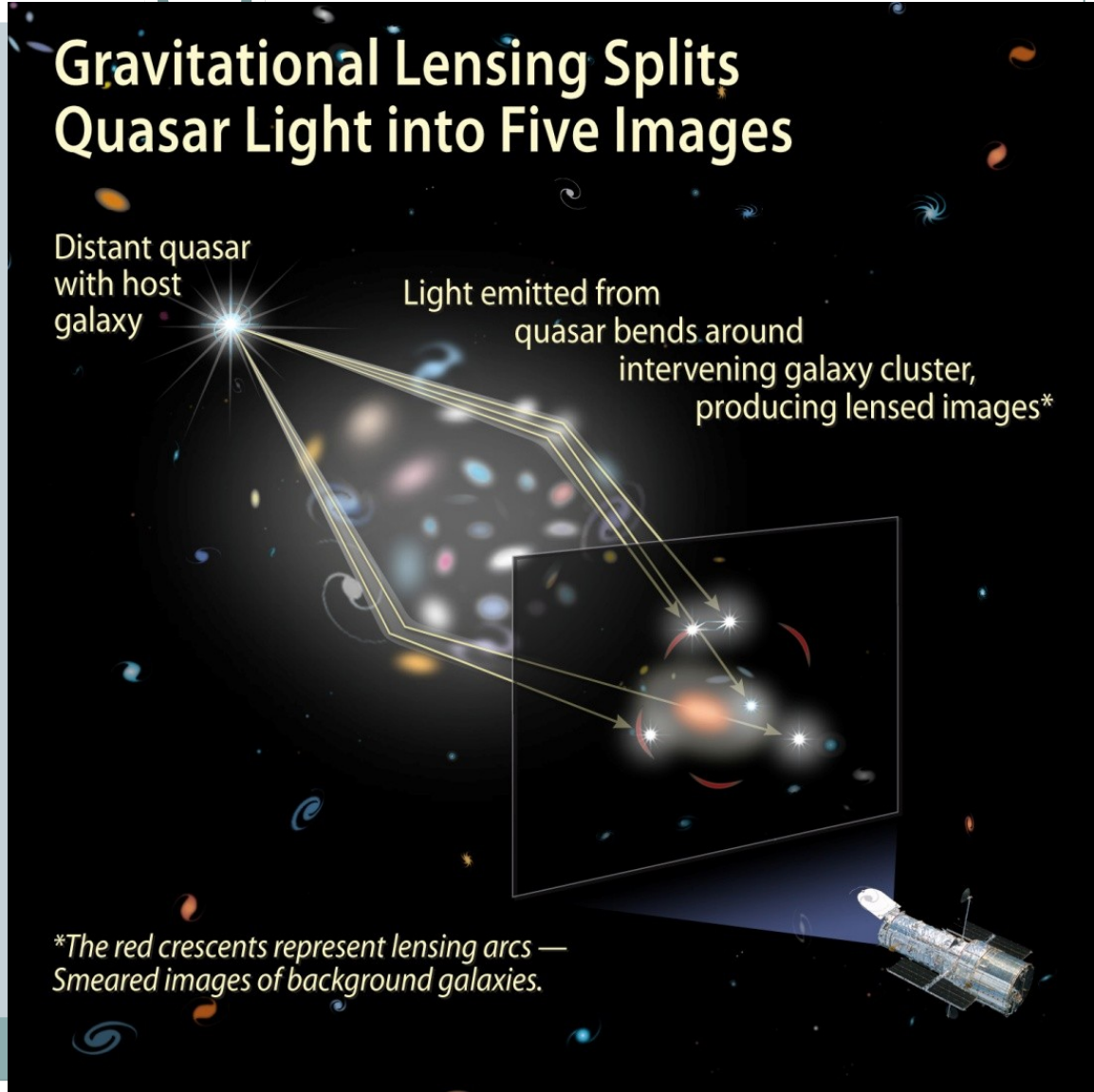
- огромни лукови као ликови удаљених позадинских галаксија
- налажење најудаљенијих галаксија у Космосу

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*

*The red crescents represent lensing arcs — Smeared images of background galaxies.



Откривање удаљених галаксија I



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 Galaxy Lensed by Cluster MACS J0647

HST ■ ACS ■ WFC3



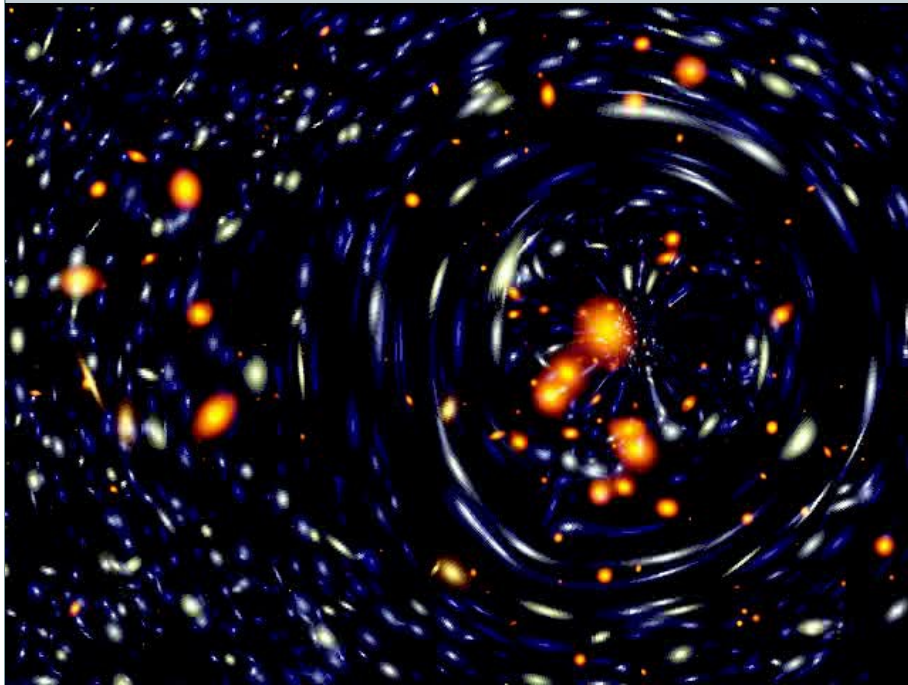
NASA and ESA

STScI-PRC12-36b

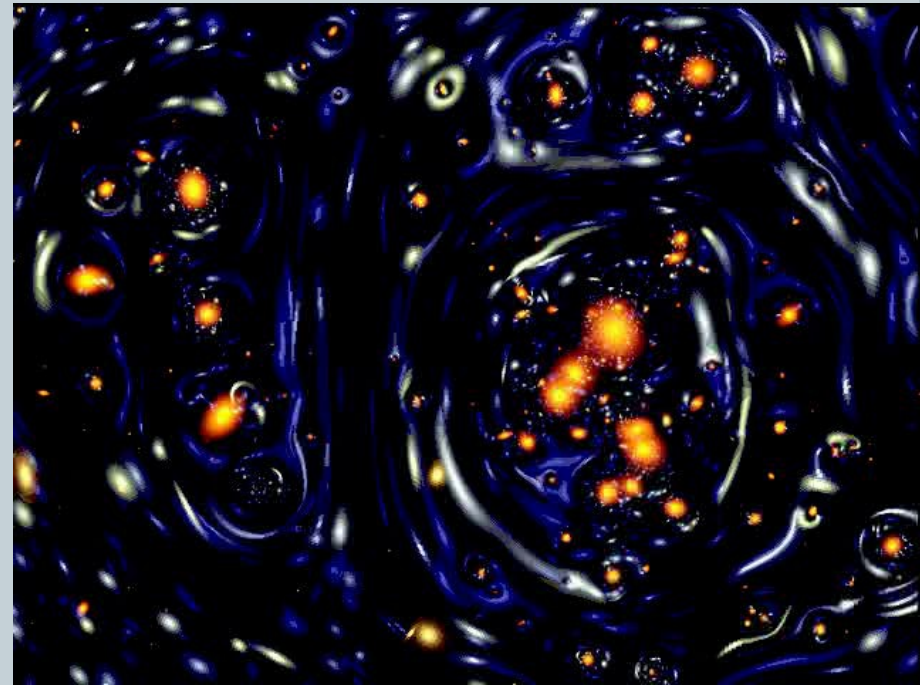
MACS0647-JD, најудаљенија галаксија откривена 2012: удаљеност до јата је 5.6 милијарди с. г. ($z = 0.591$), а до галаксије која је под утицајем сочива је 13.3 милијарди с. г. ($z = 10.7$)

Проширена расподела материје - слаба гравитациона сочива

- деформације облика позадинских извора
- проучавање расподеле видљиве и тамне материје у комосу
- једини директан начин за детекцију тамне материје

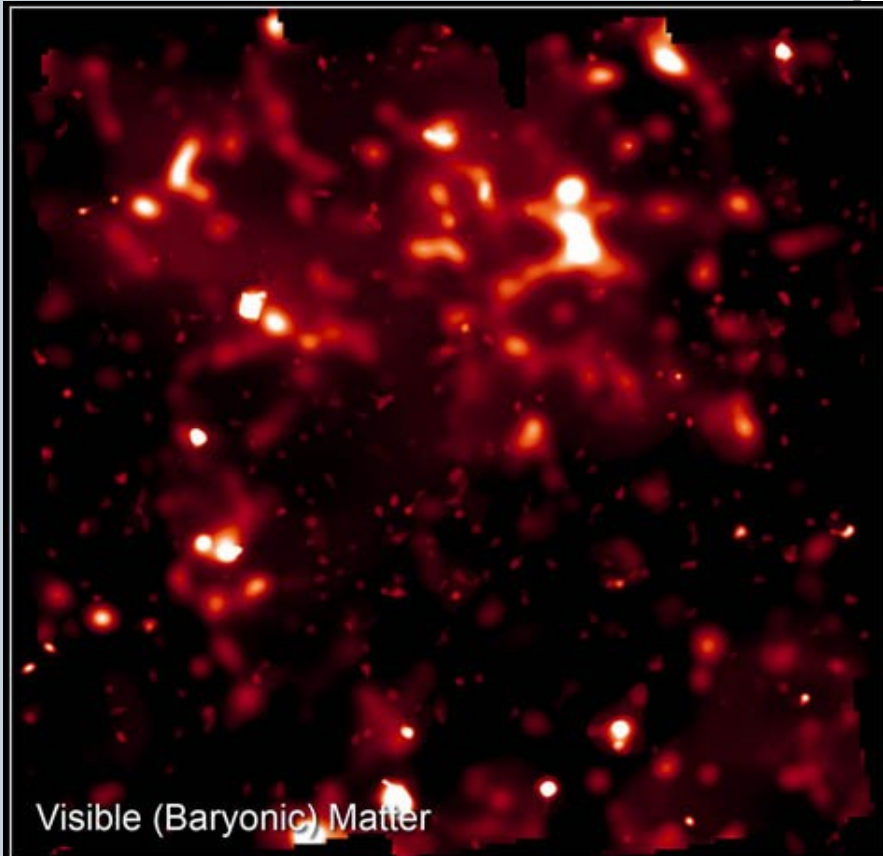


Тамна материја груписана
око јата галаксија

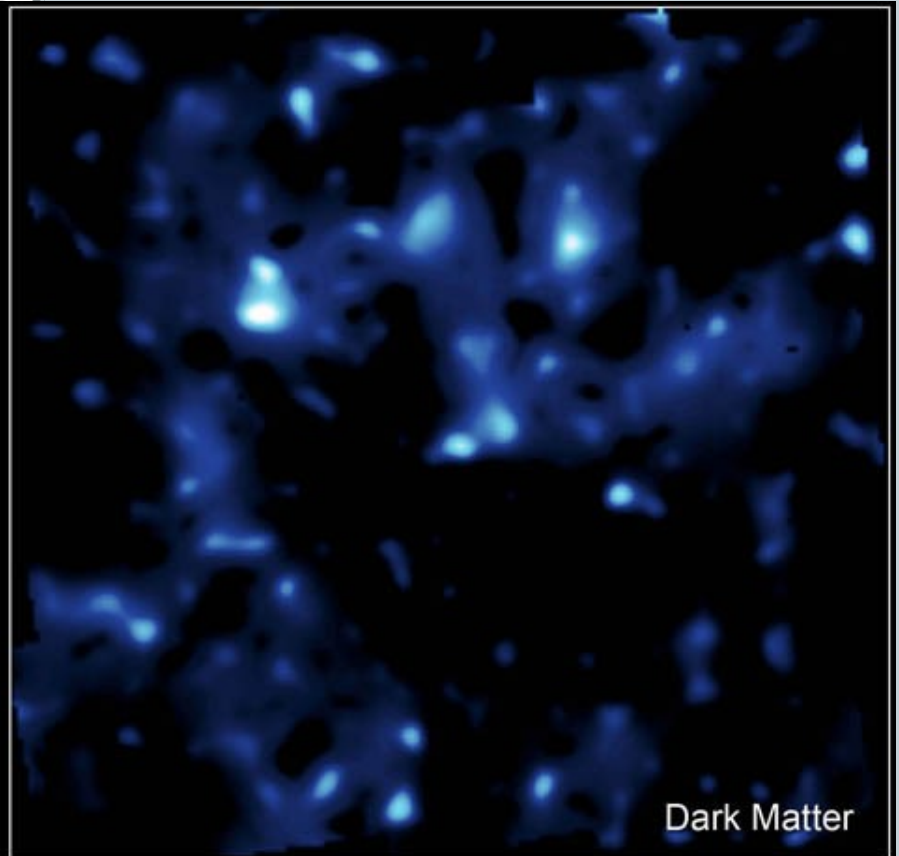


Тамна материја равномерно
распоређена по јату галаксија

Просторна расподела видљиве и тамне материје



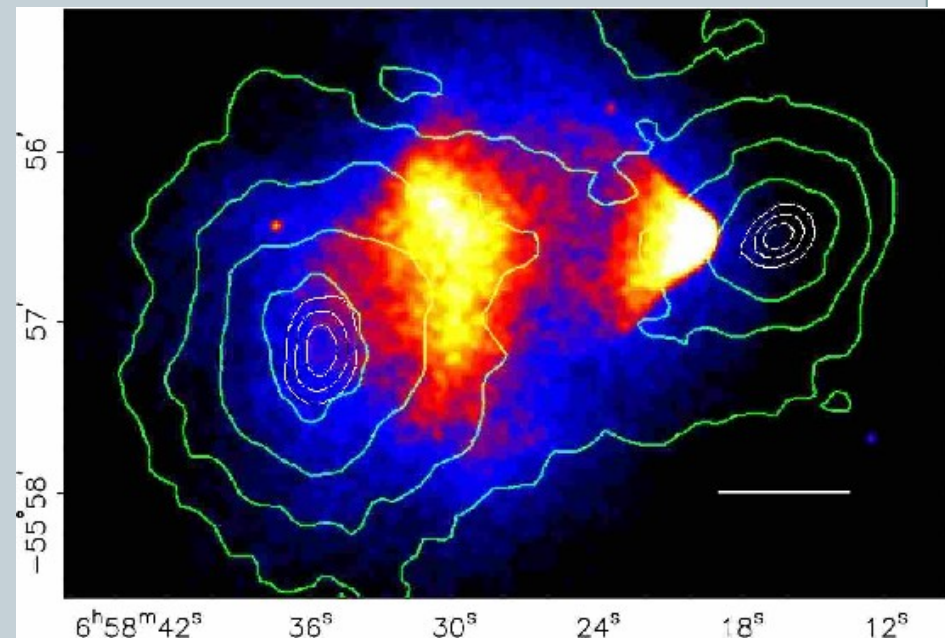
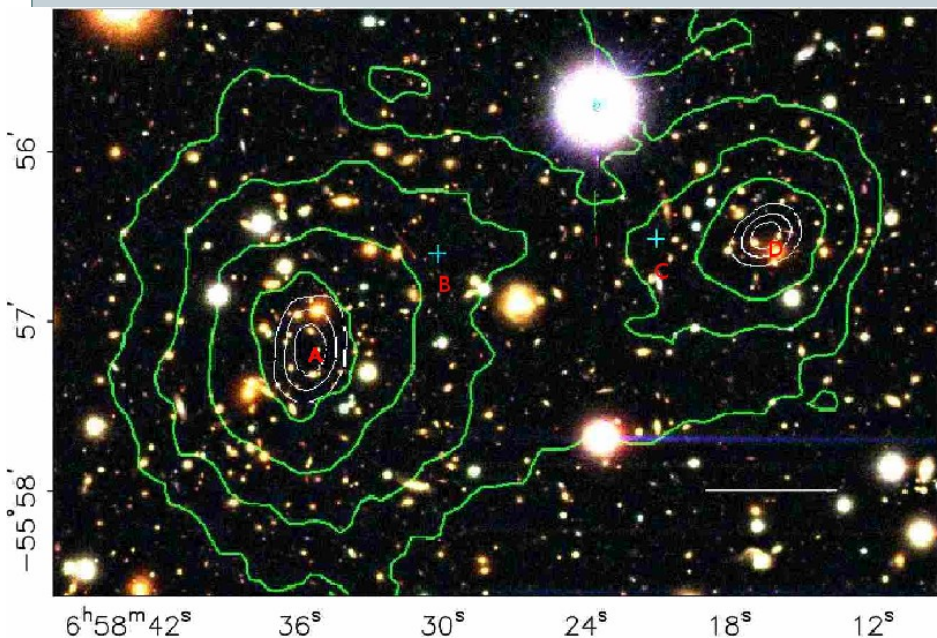
Visible (Baryonic) Matter



Dark Matter

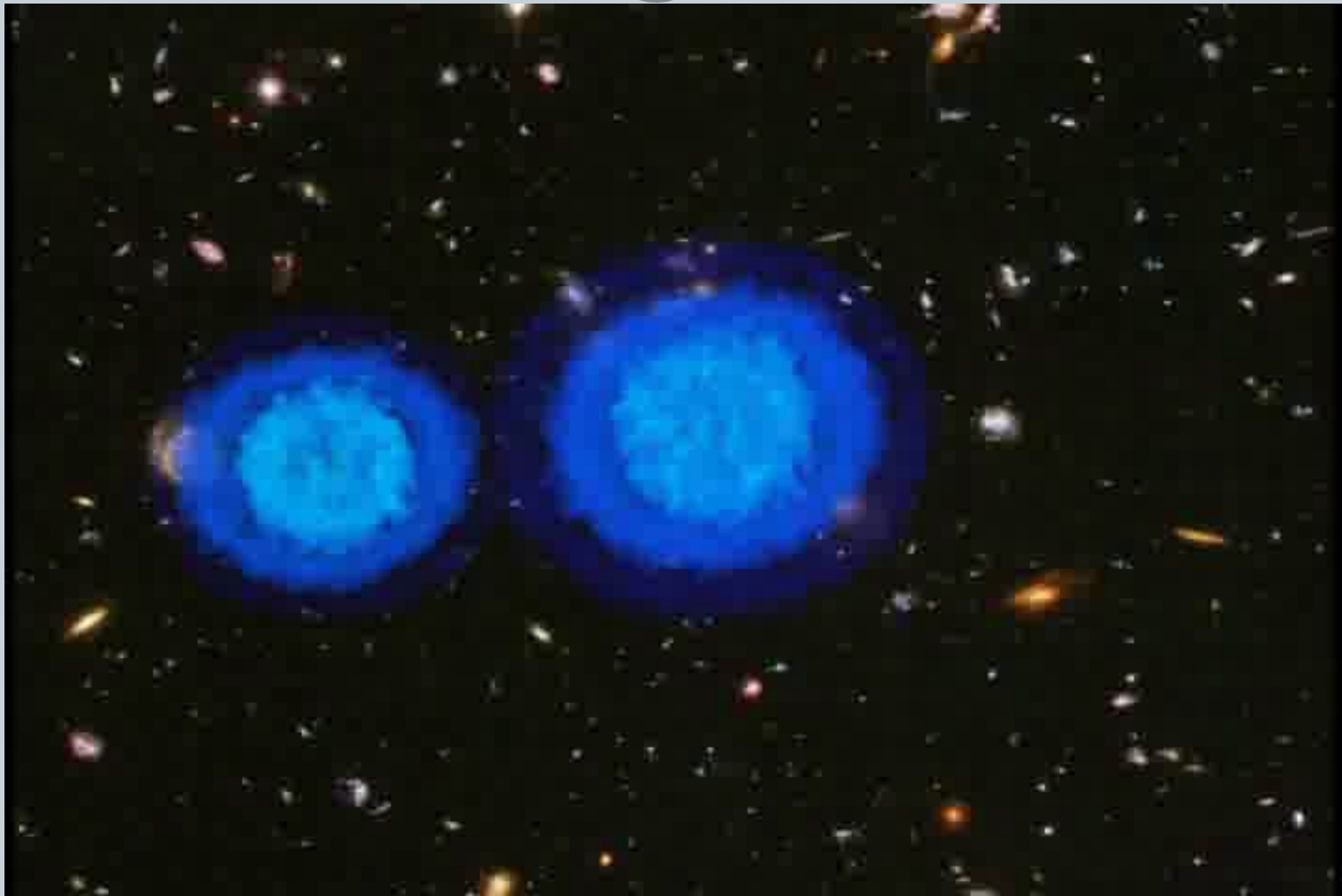
Distribution of Visible and Dark Matter • Cosmic Evolution Survey
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

Детекција тамне материје: јато галаксија “Метак” (1Е 0657-558)



Clowe et al. 2004, ApJ, 604, 596)

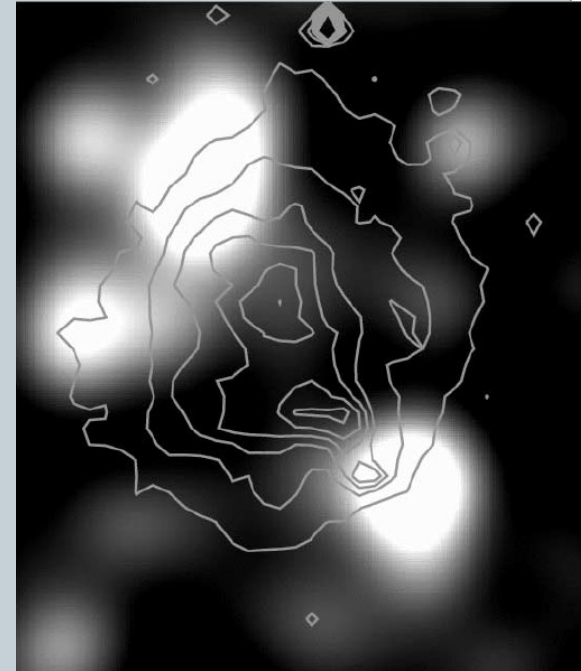
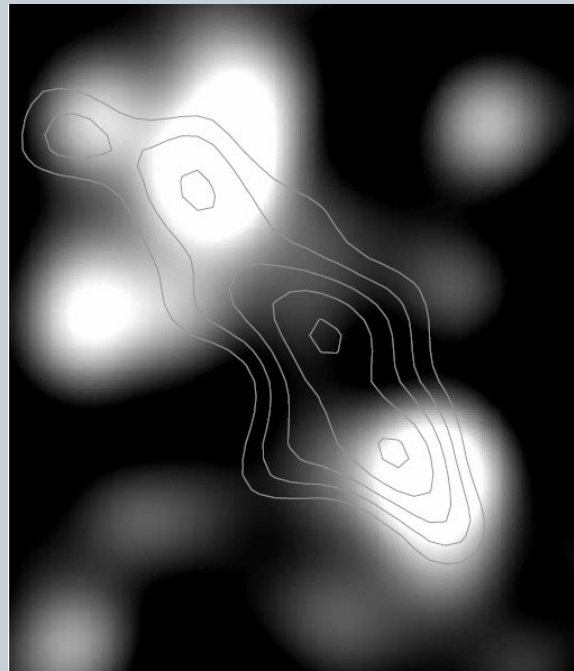
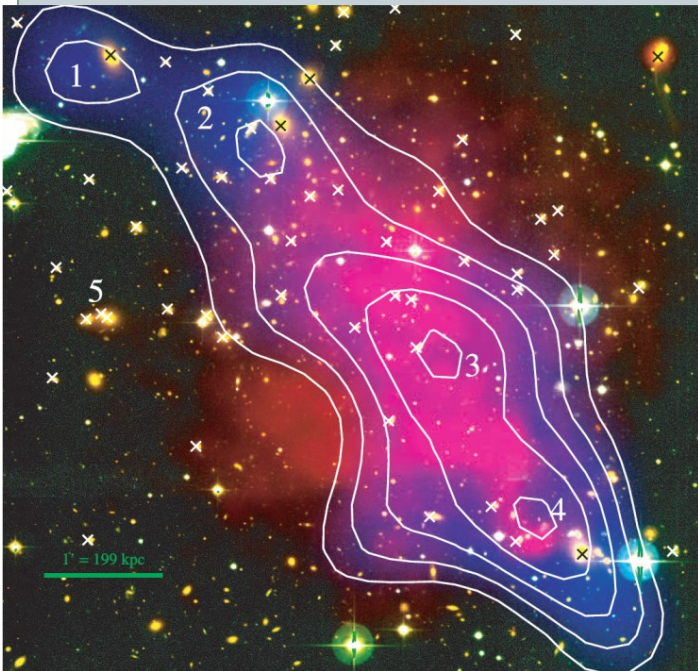
Тамна материја и настанак јата галаксија 1E 0657-558



Супротан пример - Абел 520



- Такође галактичко јато у судару али, за разлику од 1Е 0657-558, реконструкција материје помоћу слабих сочива показује да је тамна материја сконцентрисана у језгру јата
- Контрадикција са хипотезом о халоу тамне материје



Закључци



1. Гравитација има фундаменталну улогу у настанку, еволуцији и хијерархијској организацији великих космичких структура
2. Јака и слаба гравитациона сочива представљају моћан алат у вангалактичкој астрофизици и посматрачкој космологији са широким распоном примена, као што су:
 - откривање екстрасоларних планета,
 - изучавање физике и геометрије у најдубљим областима галаксија и квазара, близу њихових централних супермасивних црних рупа,
 - одређивање космолошких параметара,
 - откривање удаљених галаксија и квазара (природни телескопи),
 - детекција тамне материје и изучавање њене расподеле

Хвала на пажњи!!!

