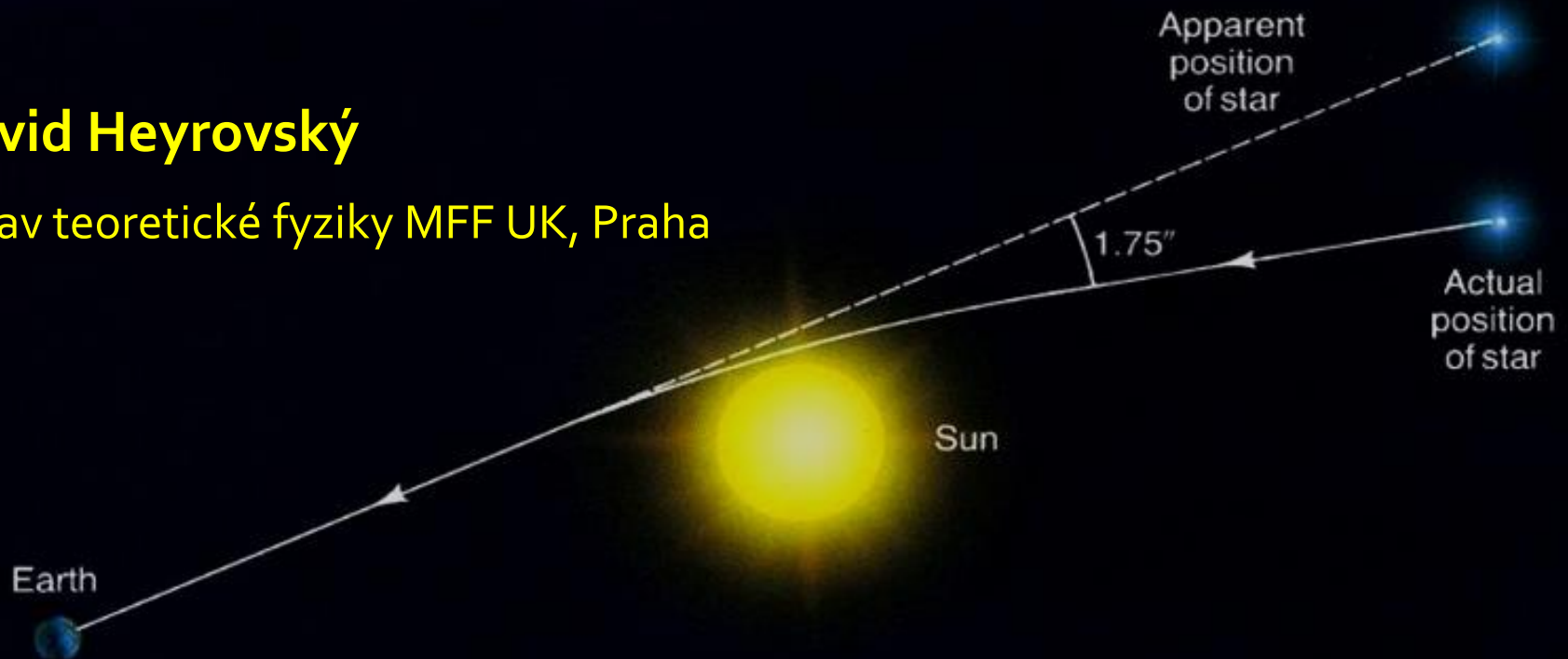


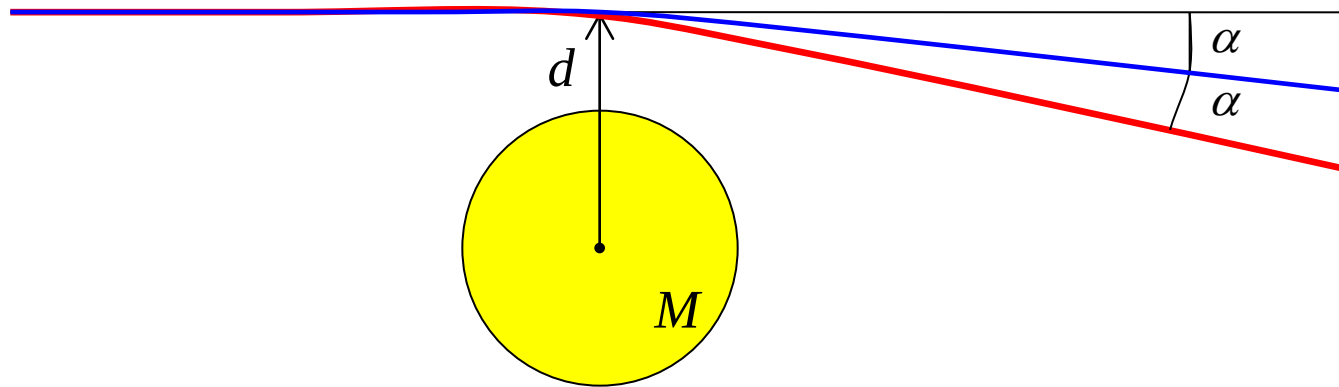
Gravitační ohyb světla a jeho využití v astronomii

David Heyrovský

Ústav teoretické fyziky MFF UK, Praha



Průchod světla gravitačním polem



Newtonovská gravitace + nehmotné fotony: $\alpha = 0$

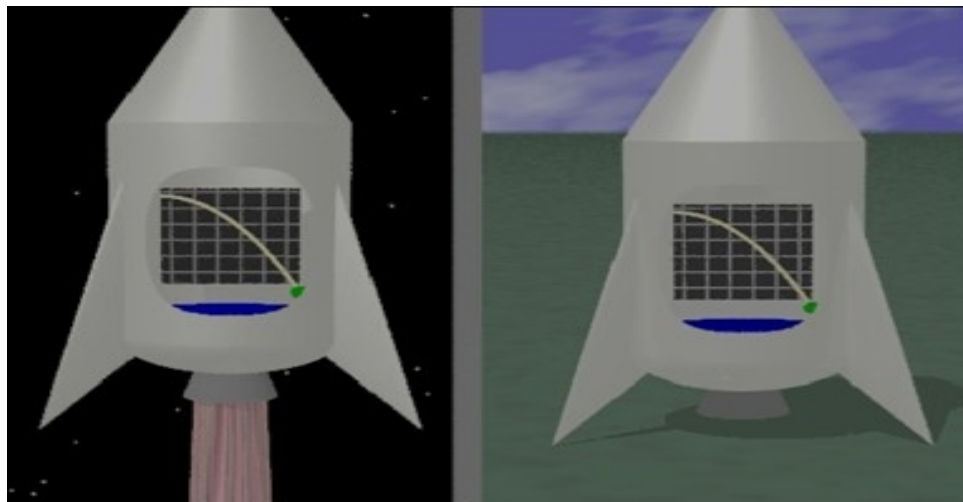
Newtonovská gravitace + hmotné fotony: $\alpha = \frac{2GM}{c^2 d}$

Obečná teorie relativity: $\alpha = \frac{4GM}{c^2 d}$

(Pre)historie ohybu světla v gravitačním poli

1801 – **Soldner**: newtonovský ohyb světla v gravitačním poli

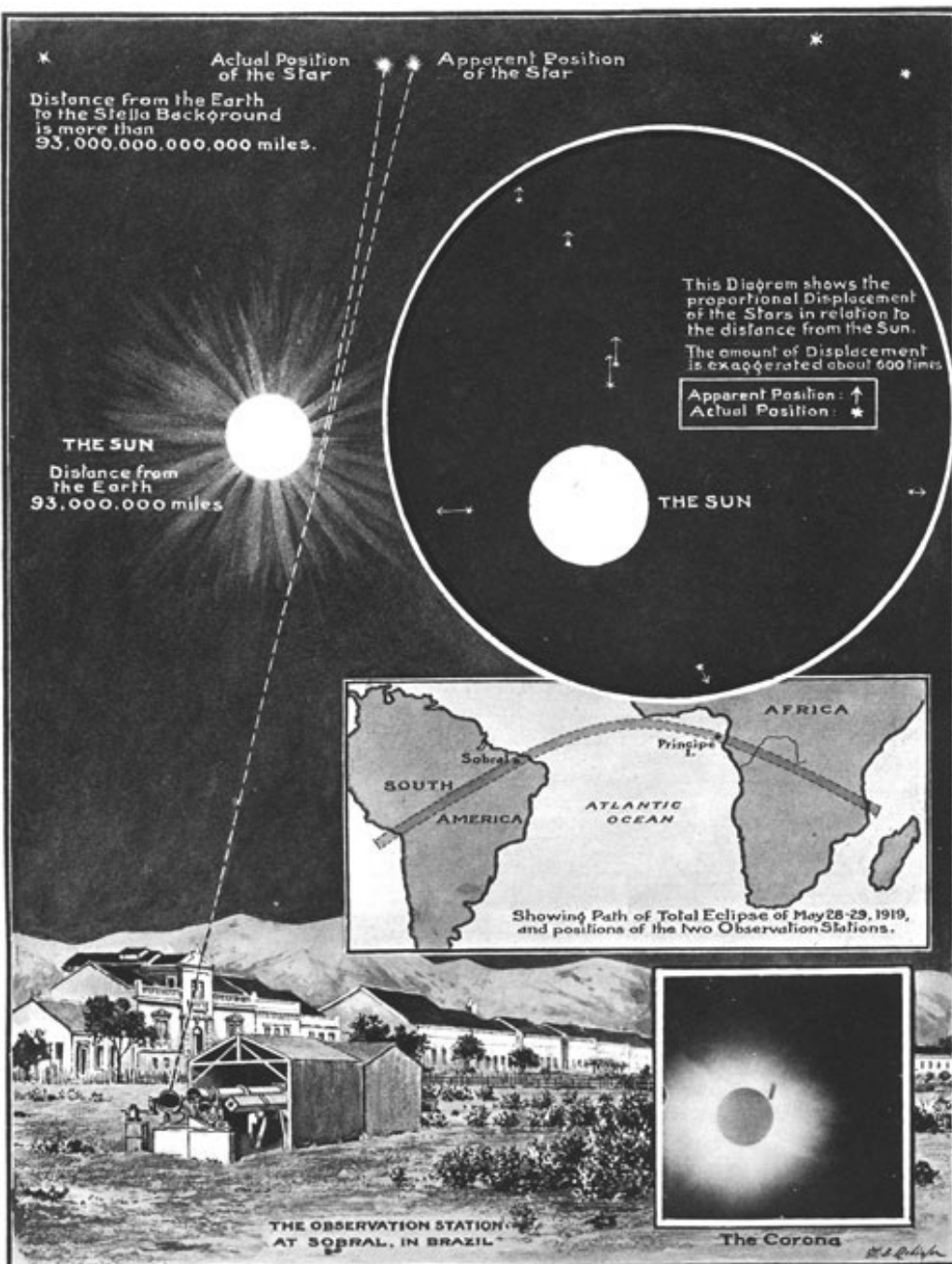
1911 – **Einstein**: ohyb paprsků z principu ekvivalence (stejně velký)



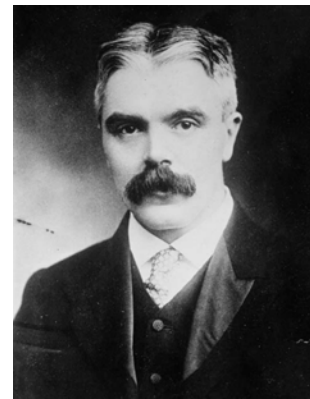
1914 – **Freundlich**: pokus o naměření - neúspěšný

1915 – **Einstein**: obecná teorie relativity (ohyb 2× větší)

1919 – **Eddington**: experimentální ověření



Illustrated London News 22.11.1919



**Frank Watson
Dyson**



**Arthur Stanley
Eddington**

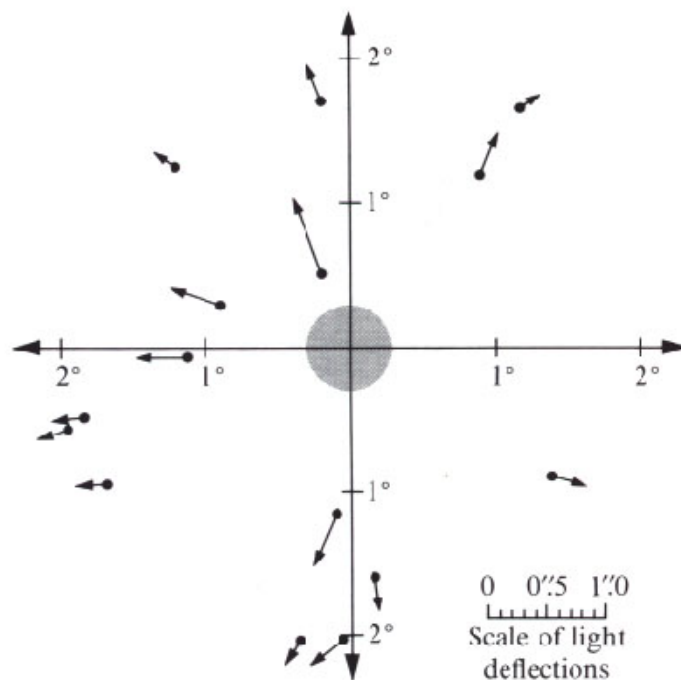
LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

**Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.**

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

**Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.**

Ohyb světla v gravitačním poli Slunce (Eddington 1919)



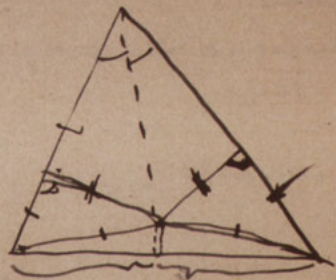
Průchod gravitačním polem jiných astrofyzikálních objektů?

dílčí poznatky: **Eddington** 1920, **Chwolson** 1924, **Link** 1936

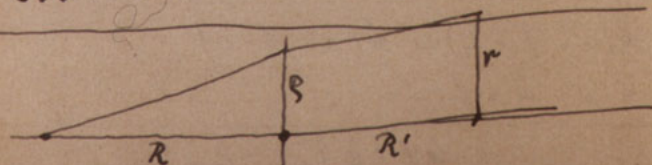
1936 – Einstein: odvození hlavních vlastností gravitační čočky

Einsteinův zápisník 1912 (Renn, Sauer & Stachel 1997)

Alle Dreiecke sind gleichschenkelig.



Heidelberg
Berlin-Hulensee,
Kochin Friedrichsh. 33.



$$r = \varrho \frac{R+R'}{R} - \frac{R'\alpha}{\varrho} \quad \left| \begin{array}{l} \text{r nach unten} \\ \text{negativ. Dann soll} \\ \text{auch für stark abgelenkte} \\ \text{Strahlen.} \end{array} \right.$$

$$r_0 = \varrho_0 - \frac{1}{\varrho_0} \quad \dots (1)$$

$$\varrho_0^2 = \varrho^2 \frac{R+R'}{R R' \alpha}$$

$$\begin{aligned} \text{Erdegl. } r &= - \frac{R\alpha}{\varrho} = - \frac{R\alpha}{\varrho_0} \sqrt{\frac{R+R'}{R R' \alpha}} \\ &= - \frac{1}{\varrho_0} \sqrt{\frac{R}{R'} (R+R') \alpha} \end{aligned}$$

≠

$$\left. \begin{aligned} r_0 &= r \sqrt{\frac{R R' \alpha}{R(R+R') \alpha}} \\ \varrho_0 &= \varrho \sqrt{\frac{R+R'}{R R' \alpha}} \end{aligned} \right\} (2)$$

1) gibt zwei Wurzeln für ϱ_0

Von hier an Index weggelassen.

$$2 + r^2 = \varrho^2 + \frac{1}{\varrho^2}$$

$$f = \varphi + \frac{\pi^2}{\varphi}$$

$$df = \left(1 - \frac{\pi^2}{\varphi^2}\right) d\varphi = \left(1 - \frac{1}{\varrho^2}\right) d\varphi$$

$$R df = \pm H d\varphi$$

$$R = \pm \frac{H}{1 - \frac{1}{\varrho^2}}$$

$$R_{\text{tot}} = H \left\{ \frac{1}{1 - \frac{1}{\varrho_1^2}} + \frac{1}{\frac{1}{\varrho_2^2} - 1} \right\} \dots (3)$$

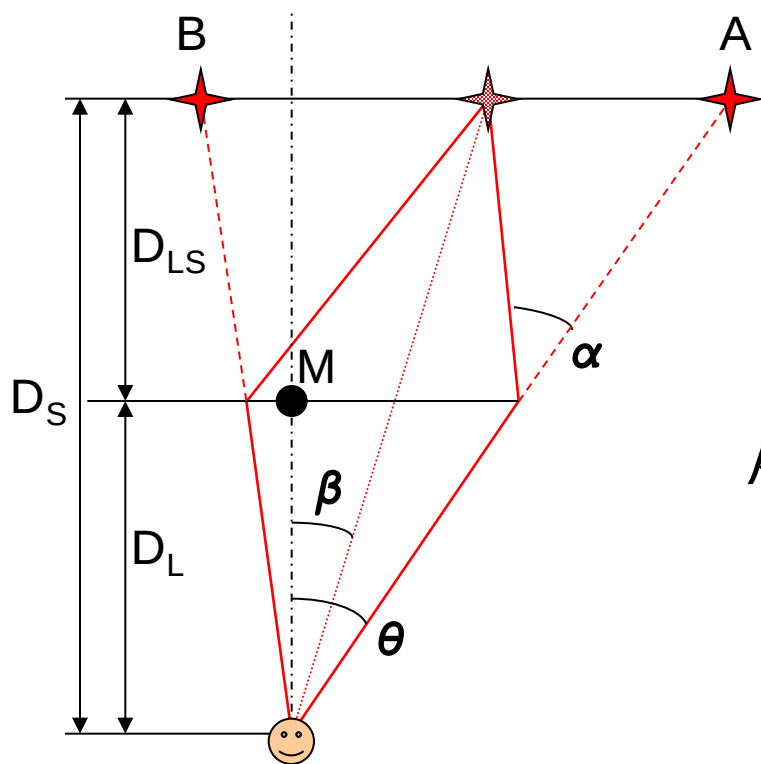
Klammer gibt relative Helligkeit.
(im $\infty = 1$)

$$\frac{\varrho_1^4}{\varrho_2^4}$$

$$r = \frac{1}{x} - x$$

$$\left\{ \right\} = \frac{1}{1 - x_1^4} + \frac{1}{x_2^4 - 1}$$

Gravitační čočka



čočková rovnice

$$\beta = \theta - \frac{D_{LS}}{D_S} \alpha(\theta)$$

jednoduchá čočka: $\alpha(\theta) = \frac{4GM}{c^2 D_L \theta}$

$$\beta \theta = \theta^2 - \theta_E^2$$

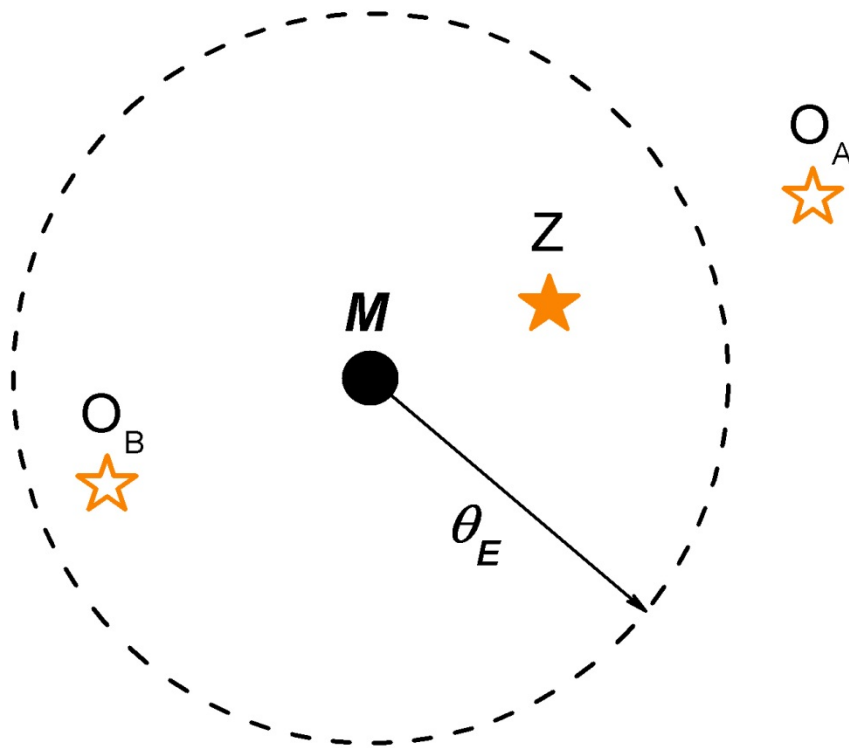
$$\theta_E \equiv \sqrt{\frac{4GM D_{LS}}{c^2 D_L D_S}} \quad \text{Einsteinův poloměr}$$

poloha obrazů pro

$$\beta = 0 \dots |\theta| = \theta_E$$

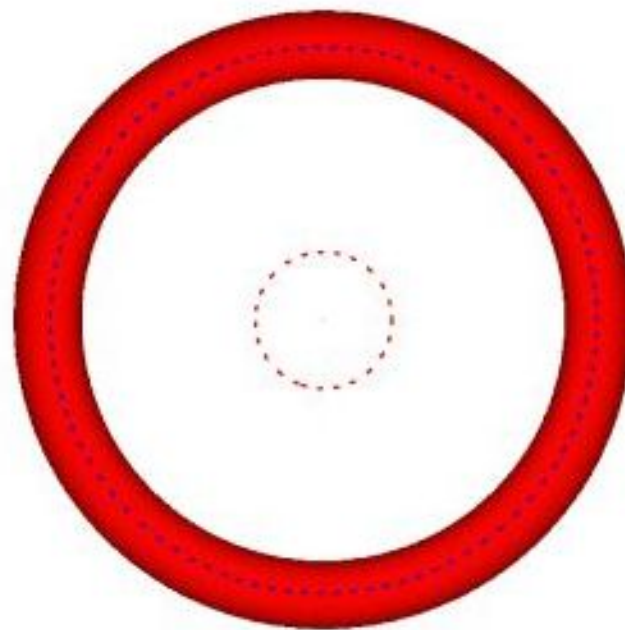
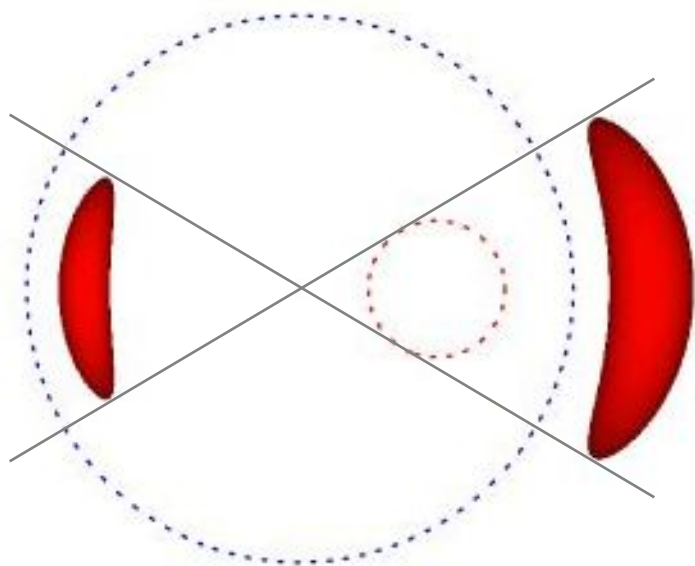
$$\beta \neq 0 \dots \theta_{A,B} = \left(\frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{\theta_E^2}{\beta^2}} \right) \beta$$

viděno na nebi



Zobrazení nebodového zdroje světla

každý bod zdroje světla v pozadí zobrazen nezávisle



Einsteinův prstenec

úhlové zvětšení obrazů -> zjasnění světelného toku





A. Einstein (1936, Science 84, 506):

*“Some time ago, **R. W. Mandl** paid me a visit and asked me to publish the results of a little calculation, which I had made at his request.”*

“there is no great chance of observing this phenomenon”

Průvodní dopis editorovi:

*“Ich danke Ihnen noch sehr für Ihr Entgegenkommen bei der kleinen Publikation, die **Herr Mandl** aus mir herauspresste. Sie ist wenig wert, aber diese arme Kerl hat seine Freude davon.”*

PHYSICS-ASTRONOMY

Attic Genius Wins Einstein's Approval for Relativity Test

Great Mathematician Helps Obscure Czechoslovakian
To Present Ideas on Astronomical Test of Theory

C
he
Prin
know
meet
fath
hour
with
case
appe
stein
tion

PHYSICS-ASTRONOMY

Attic Genius Wins Einstein's Approval for Relativity Test

C
he
Prin
know
meet
fath
hour

ScienceNews
MAGAZINE OF THE SOCIETY FOR SCIENCE & THE PUBLIC

Current Issue |

iPad

Edition

Subscribe | Advertise



Search Science News...

Explore ▾

LATEST

MOST VIEWED

HOW BIZARRE

Parasite gives a man cancer

BY TINA HESMAN SAEY

NOVEMBER 04, 2015

EDITOR'S NOTE

Scientists find the intrigue in Earth's dullest times

BY EVA EMERSON

NOVEMBER 04, 2015

LETTERS TO THE EDITOR

Quantum spookiness, magnetic mysteries and more feedback

Context

SCIENCE PAST AND PRESENT

TOM SIEGFRIED



CONTEXT HISTORY OF SCIENCE, GENERAL RELATIVITY AT 100

The amateur who helped Einstein see the light

Eccentric engineer played crucial role in theory of gravitational lensing

BY TOM SIEGFRIED 6:00AM, OCTOBER 1, 2015

Eccentric engineer played crucial role in theory of gravitational lensing

BY TOM SIEGFRIED 6:00AM, OCTOBER 1, 2015

Rudi Welt Mandl (30.1.1894 Vsetín - 31.12.1948 Los Angeles)



Rudi Welt Mandl (30.1.1894 Vsetín - 31.12.1948 Los Angeles)

- vzdělání ve Vídni, 1. Světová válka východní fronta (zajetí Sibiř, útěk 1918)
- 1919 - vystudoval elektrické inženýrství ve Vídni
- Jižní Amerika, Německo, USA - Washington D.C., mytí nádobí v restauracích
- znalosti elektřiny, optiky, zájem o relativitu, náruživý čtenář odborného tisku
- přesvědčen o možnosti čočkování hvězdy hvězdou, kontaktování vědců



Rudi Welt Mandl (30.1.1894 Vsetín - 31.12.1948 Los Angeles)

You see, the light from a distant star will be bent as it passes the nearer star and the effect will be a great brightening that anyone can see with a small telescope.

- jaro 1936 - návštěva redakce Science News Letter v Washingtonu
- 17.4.1936 návštěva Einsteina v Princetonu, následná korespondence
- dotaz přes redakci Science News Letter 16.9.1936 přiměl Einsteina k publikaci



Rudi Welt Mandl (30.1.1894 Vsetín - 31.12.1948 Los Angeles)

- vzdělání ve Vídni, 1. Světová válka východní fronta (zajetí Sibiř, útěk 1918)
- 1919 - vystudoval elektrické inženýrství ve Vídni
- Jižní Amerika, Německo, USA - Washington D.C., mytí nádobí v restauracích
- znalosti elektřiny, optiky, zájem o relativitu, náruživý čtenář odborného tisku
- přesvědčen o možnosti čočkování hvězdy hvězdou, kontaktování vědců
- jaro 1936 - návštěva redakce Science News Letter v Washingtonu
- 17.4.1936 návštěva Einsteina v Princetonu, následná korespondence
- dotaz přes redakci Science News Letter 16.9.1936 přiměl Einsteina k publikaci
- New York (kotelník, práce ve strojařské dílně), Florida (rozvod), Kalifornie
- vynálezy: snaha o patentování hlavolamu, rámu na obrazy, vrtačky
- 1948 - nabízí baseballovým týmům stroj na počasí



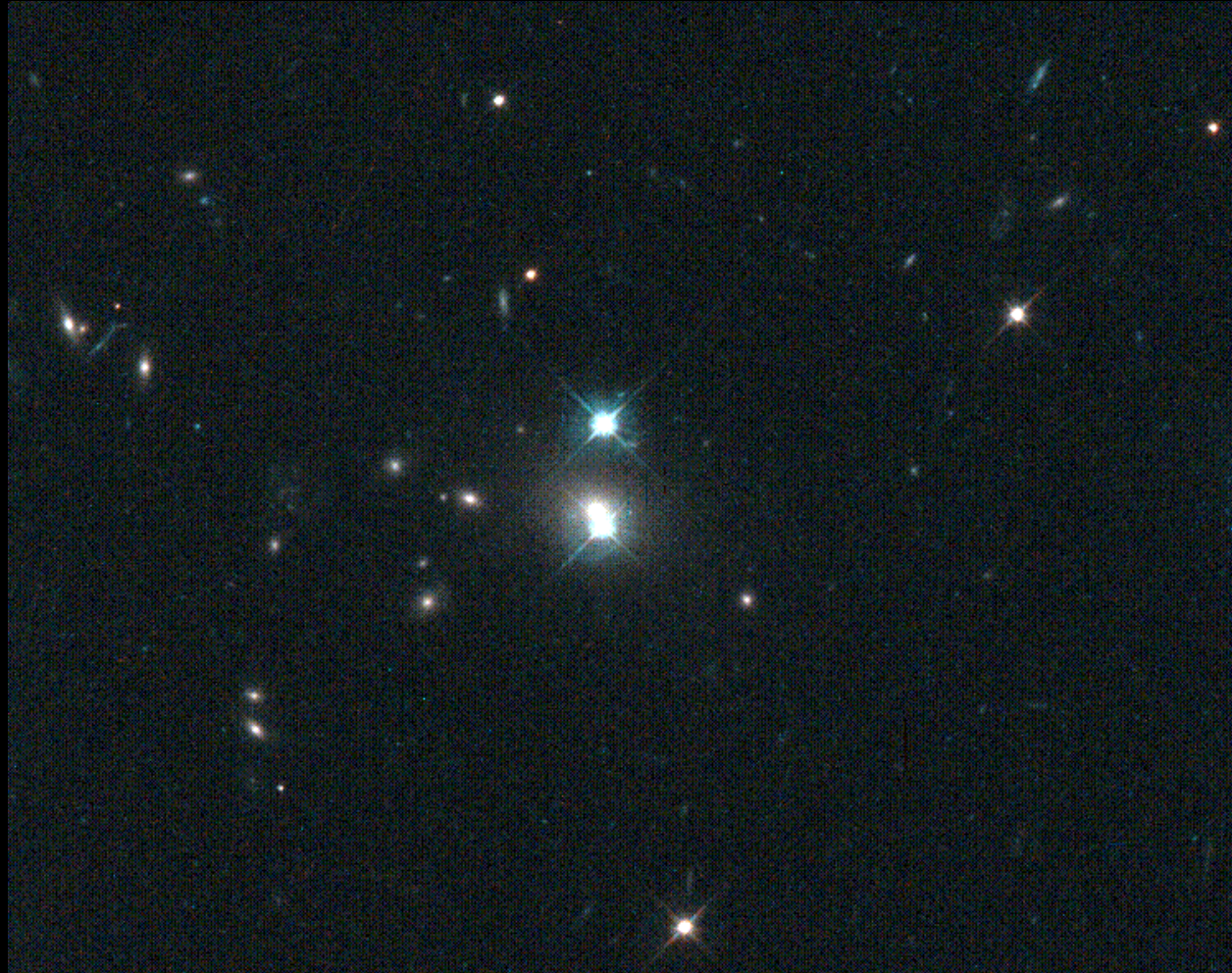
F. Zwicky (1937, Physical Review 51, 290):

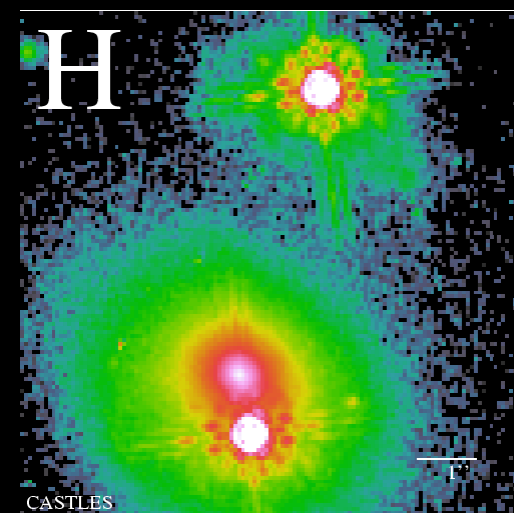
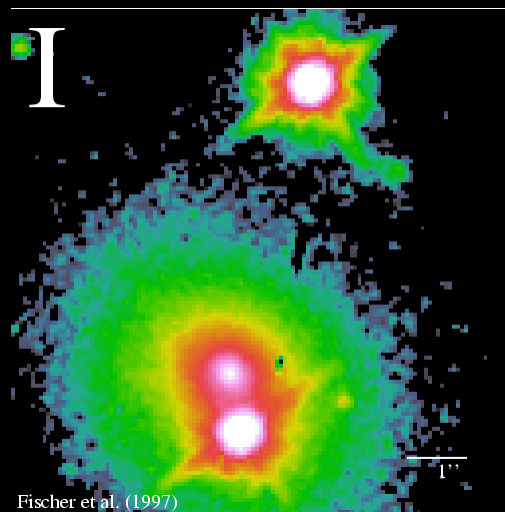
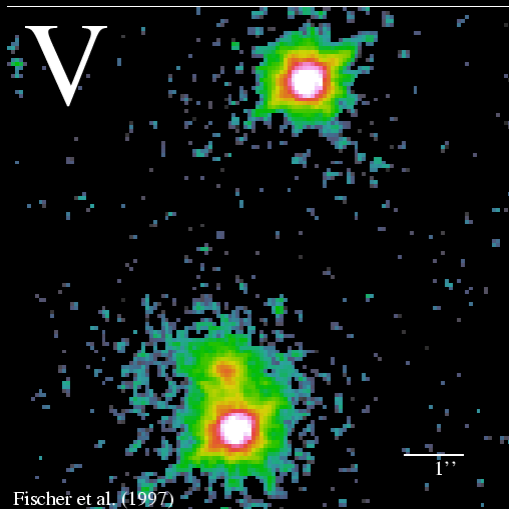
*“Last summer Dr. V. K. Zworykin (to whom the same idea had been suggested by **Mr. Mandl**) mentioned to me the possibility of an image formation through the action of gravitational fields.”*

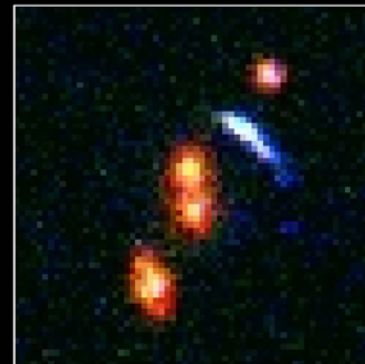
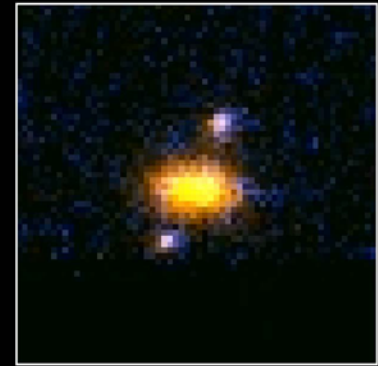
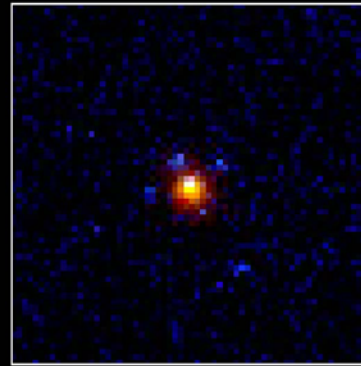
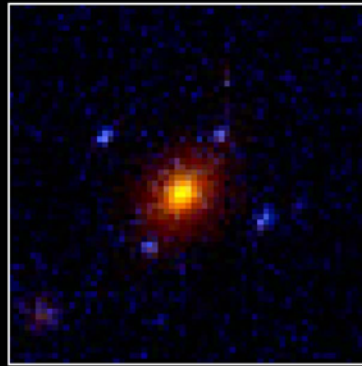
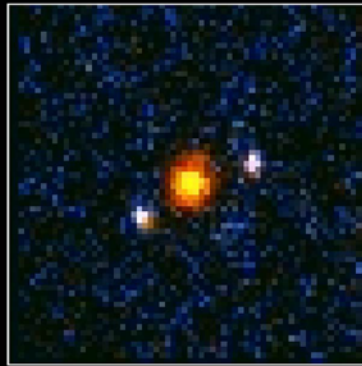
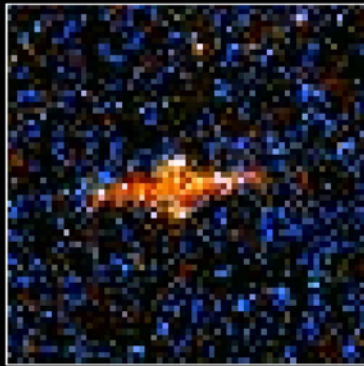
*“**extragalactic nebulae** offer a much better chance than stars for the observation of gravitational lens effects”*

První gravitační čočka: dva obrazy kvasaru 0957+561

(Walsh, Carswell, Weymann 1979)

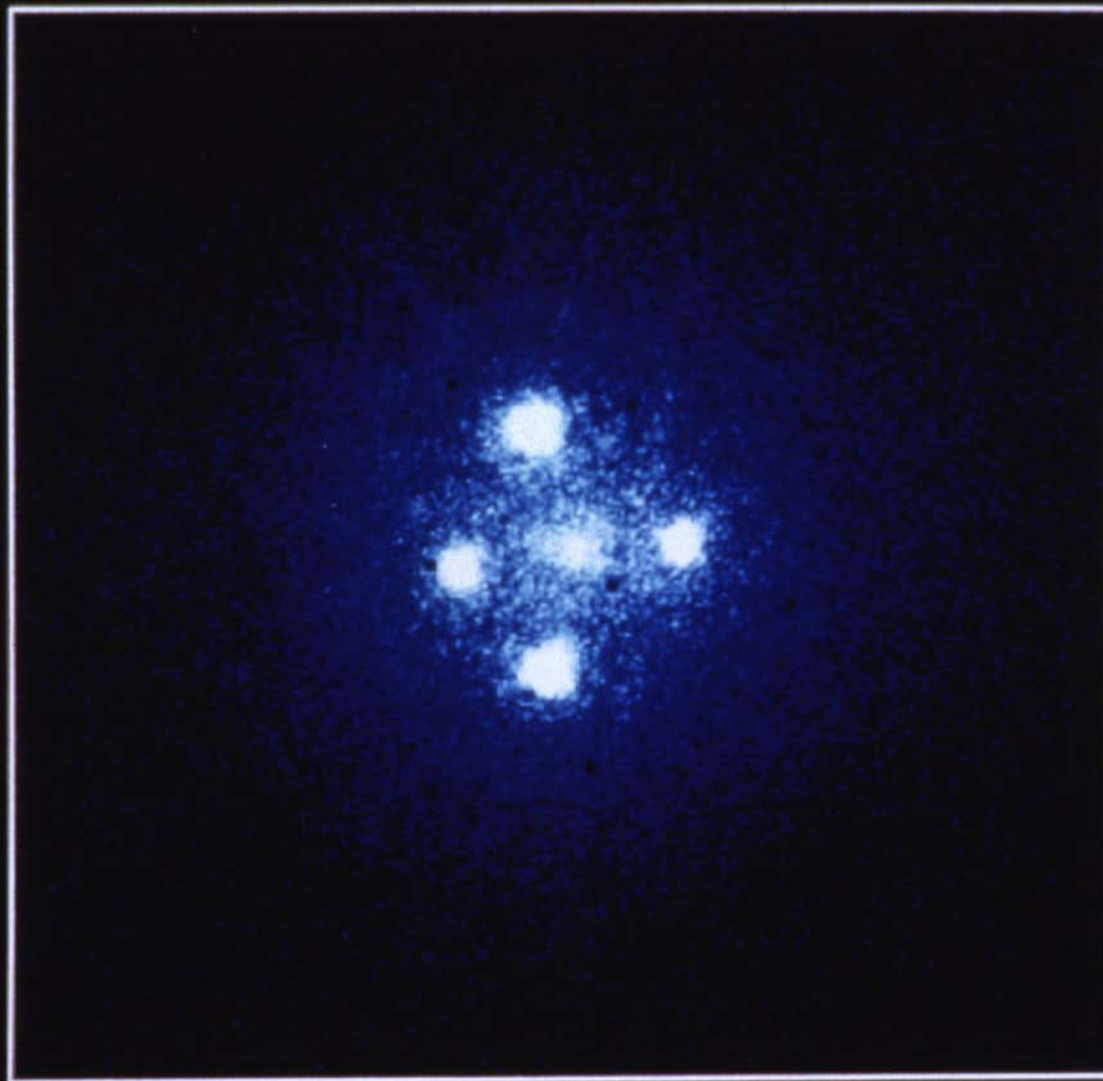






Gallery of Gravitational Lenses

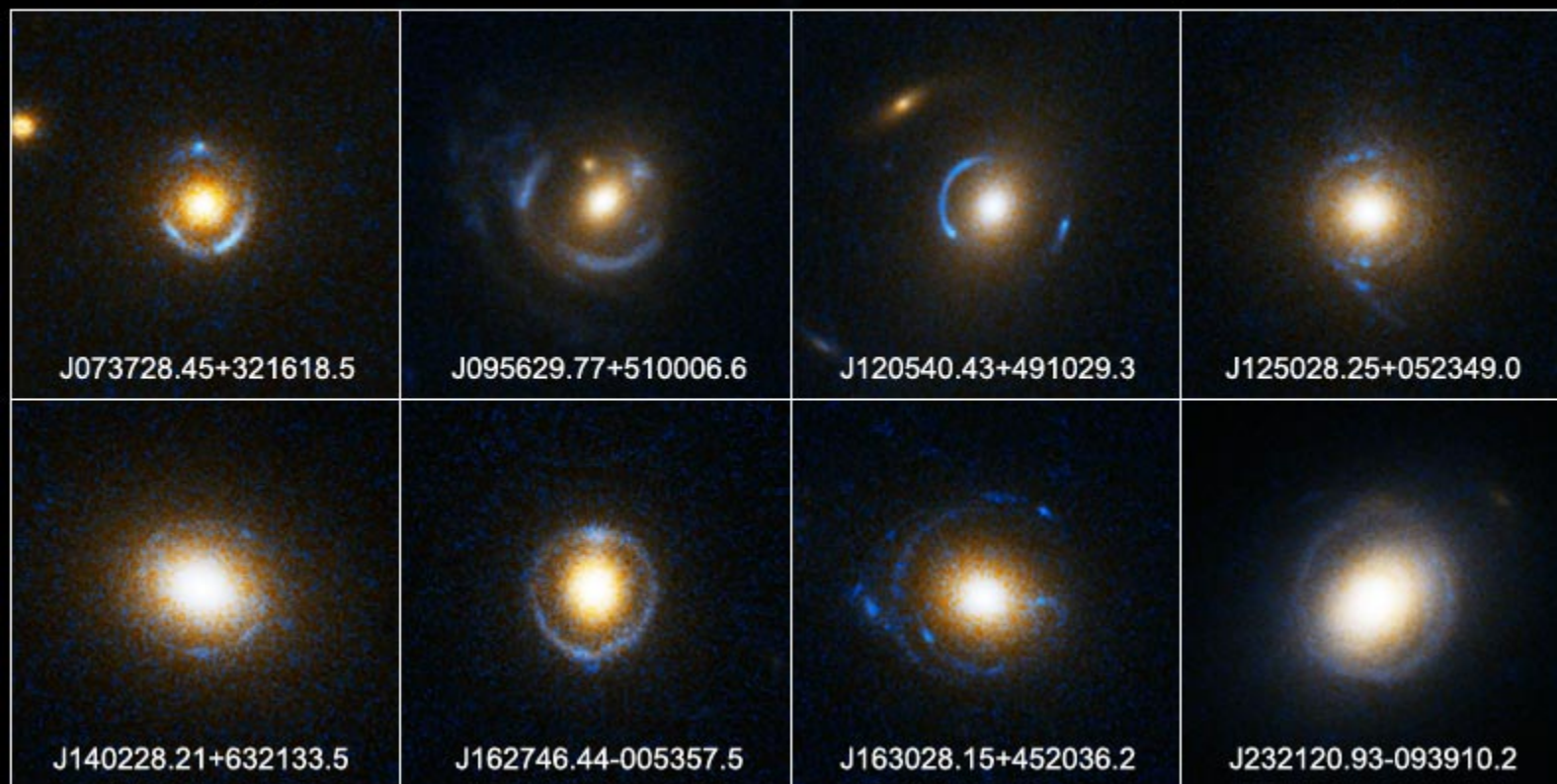
Hubble Space Telescope • WFPC2



Gravitational Lens G2237+0305

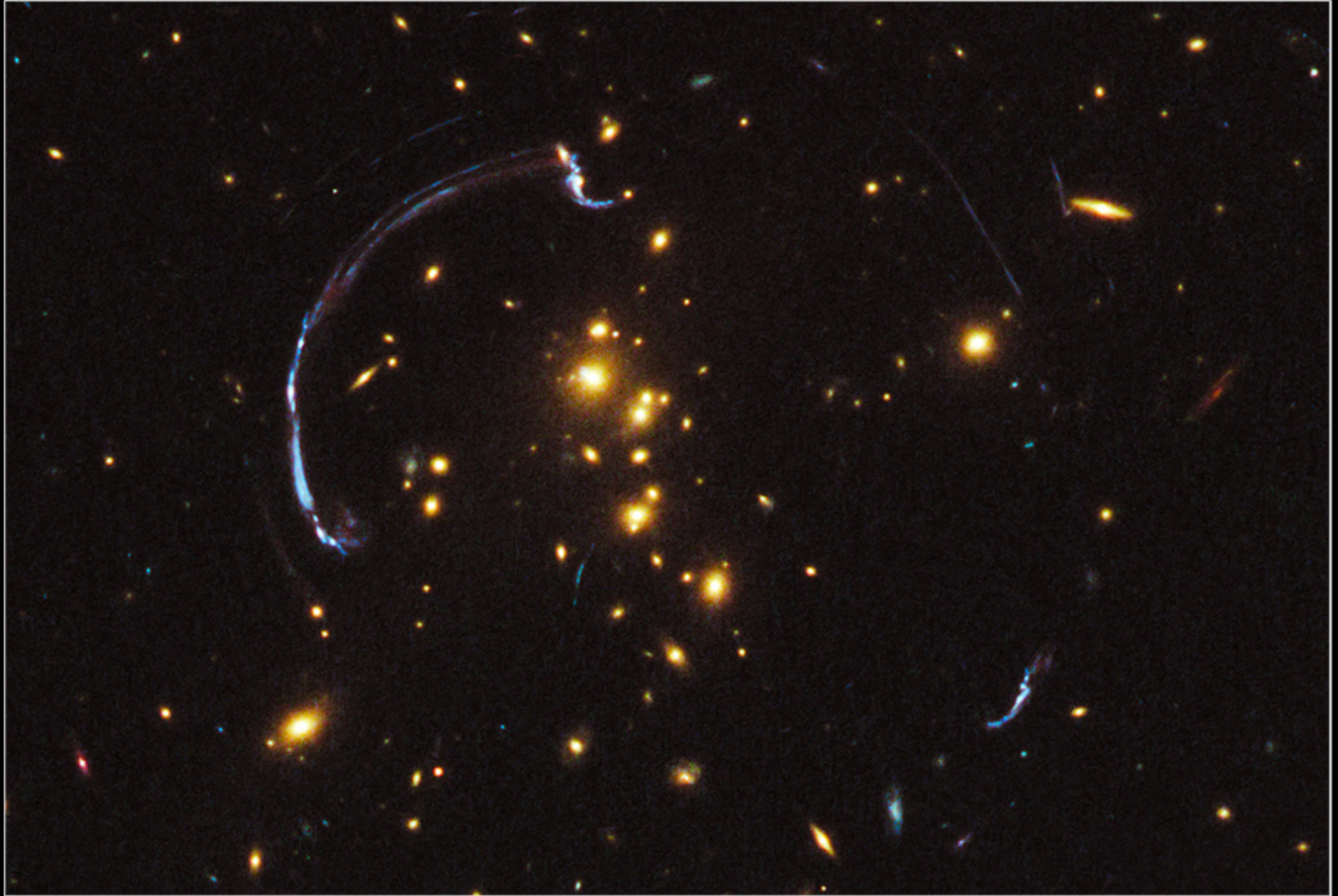
Einstein Ring Gravitational Lenses

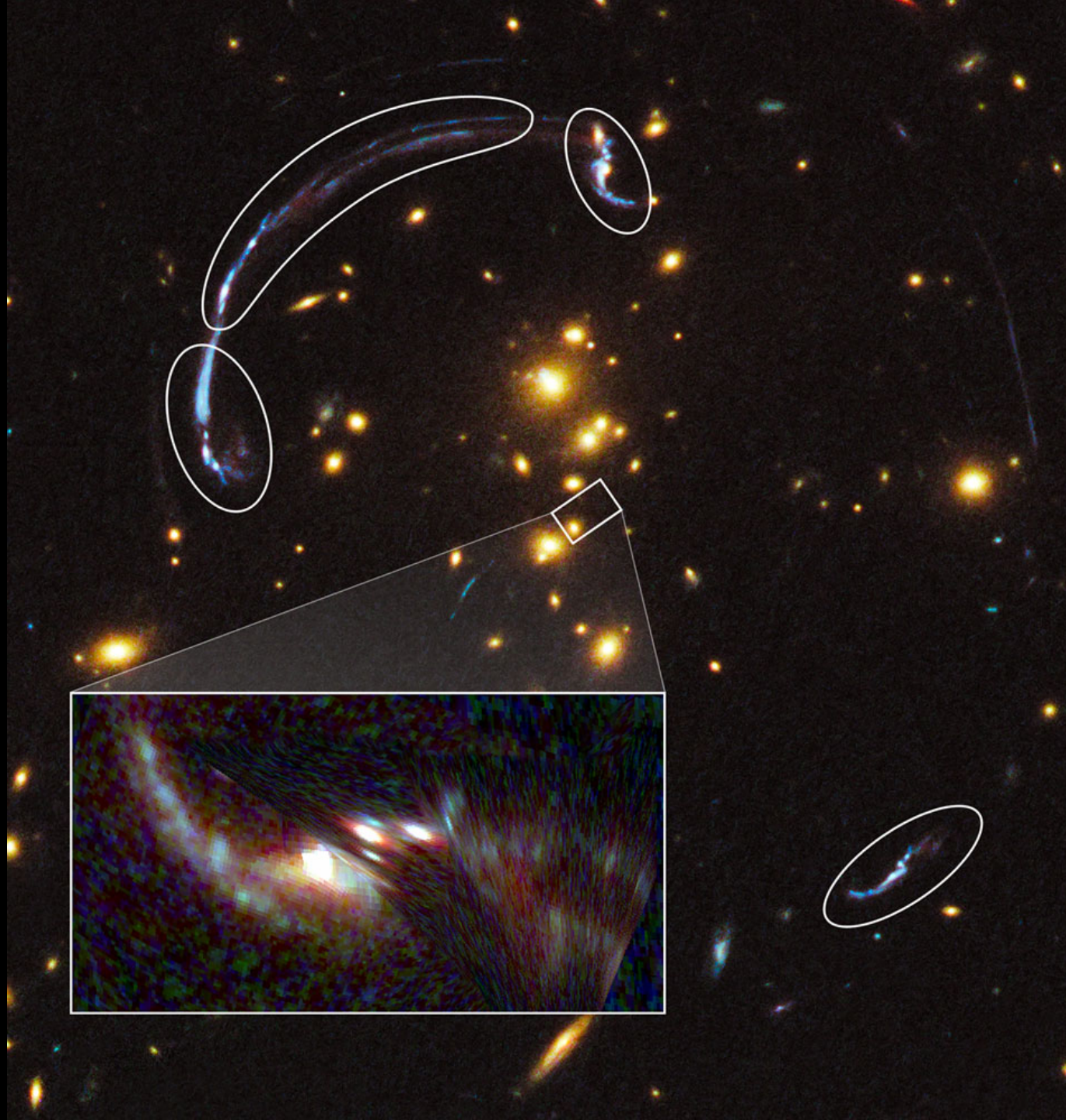
Hubble Space Telescope ■ ACS

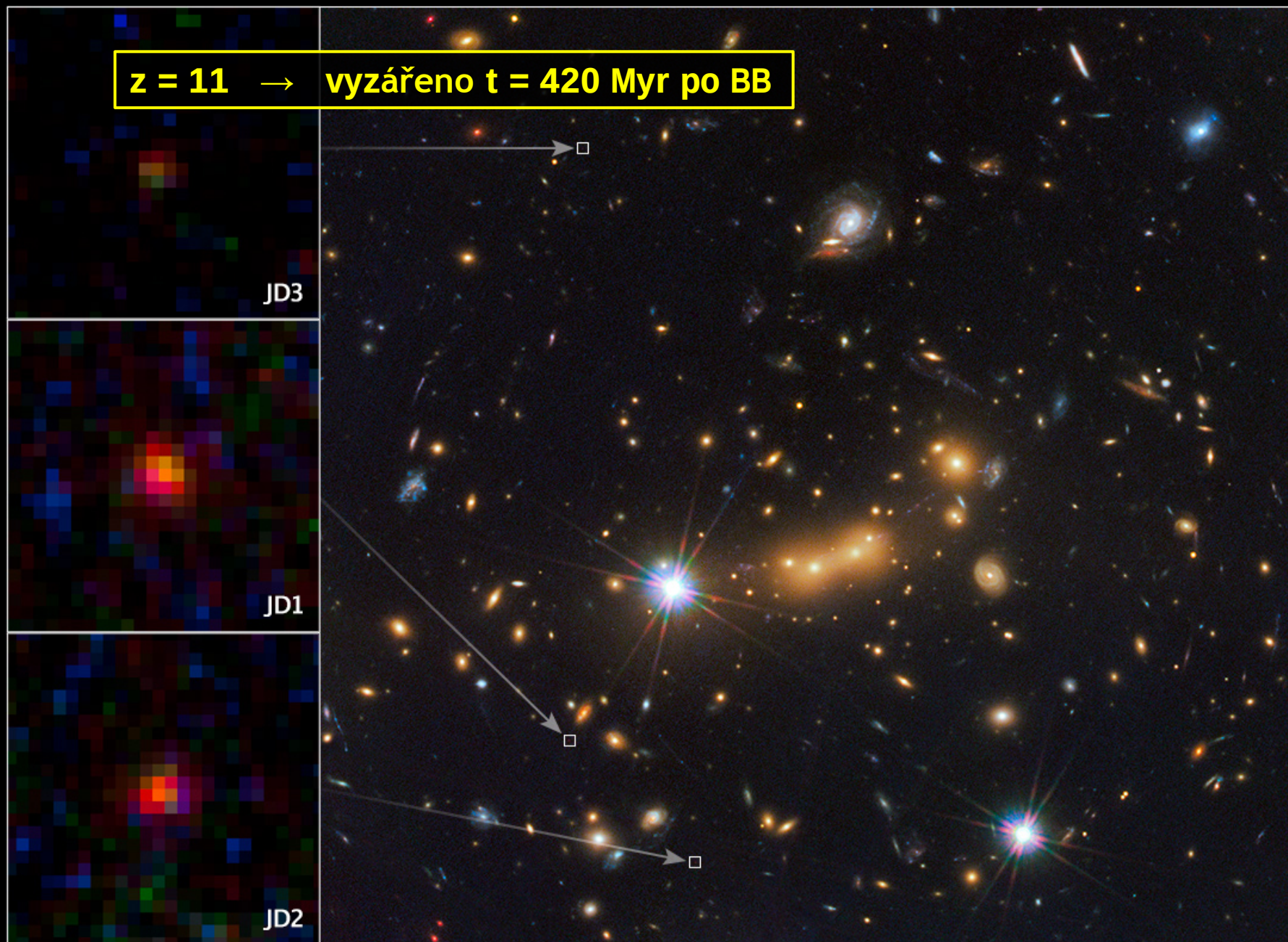


NASA, ESA, A. Bolton (Harvard-Smithsonian CfA), and the SLACS Team

STScI-PRC05-32







Režimy gravitačního čočkování

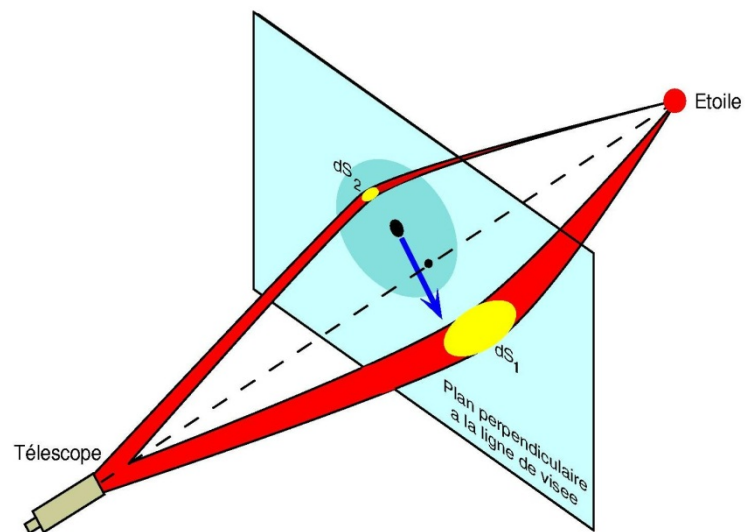
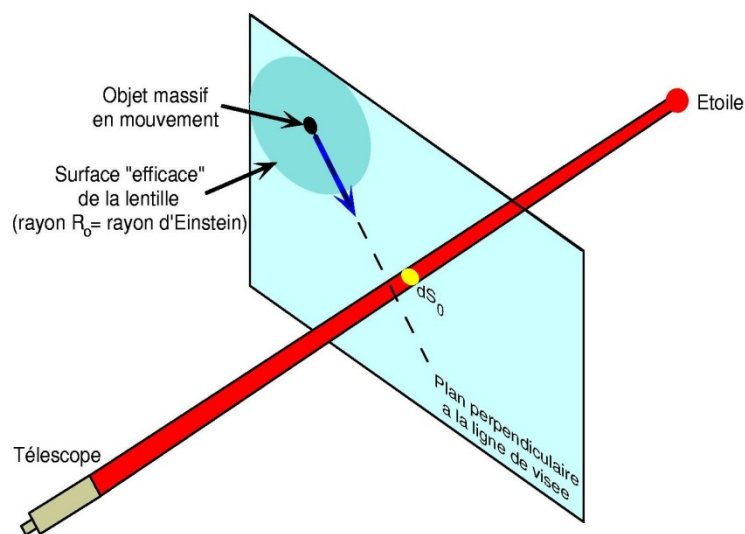
silné čočkování – pozorování násobných obrazů zdroje
(Čočka: galaxie, kupa galaxií; Zdroj: kvasar, galaxie)

slabé čočkování – měření deformace hlavního obrazu zdroje
(Č : kupa galaxií, větší struktury; Z: galaxie)

mikročočkování – pozorování časově proměnného zjasnění
(Č : hvězda, hvězdná soustava; Z: hvězda, kvasar)

Gravitační mikročočkování

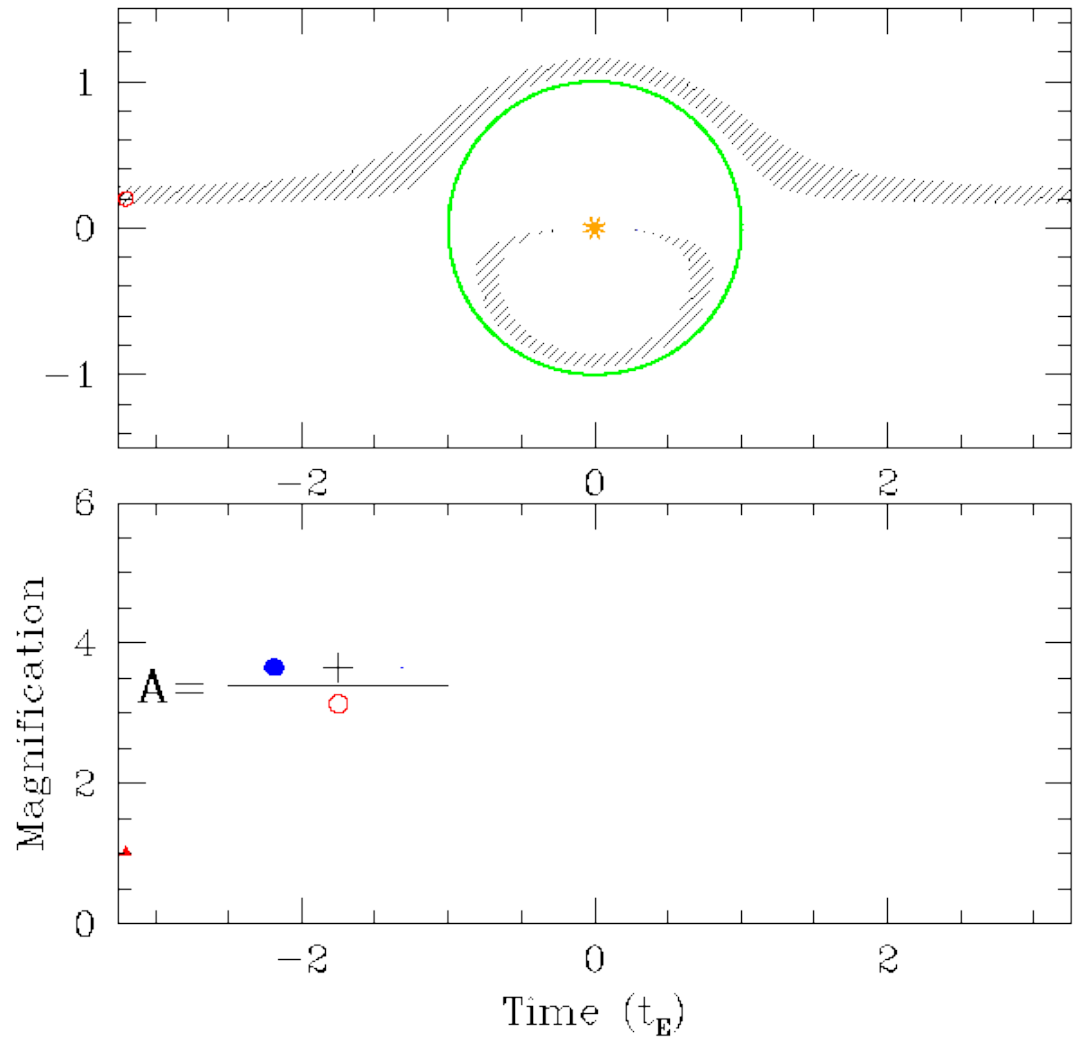
- čočky ~ hvězdných hmotností
- obrazy nerozlišitelné, **změna zjasnění zdroje** pozorovatelná



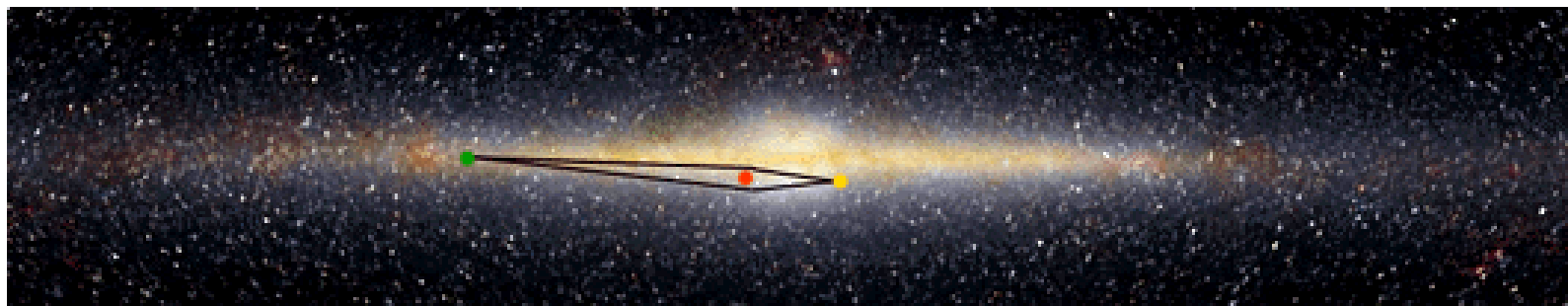
EROS

Zjasnění světelného toku

$$A_0(\beta) = \frac{\beta^2 + 2\theta_E^2}{|\beta| \sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2}}$$

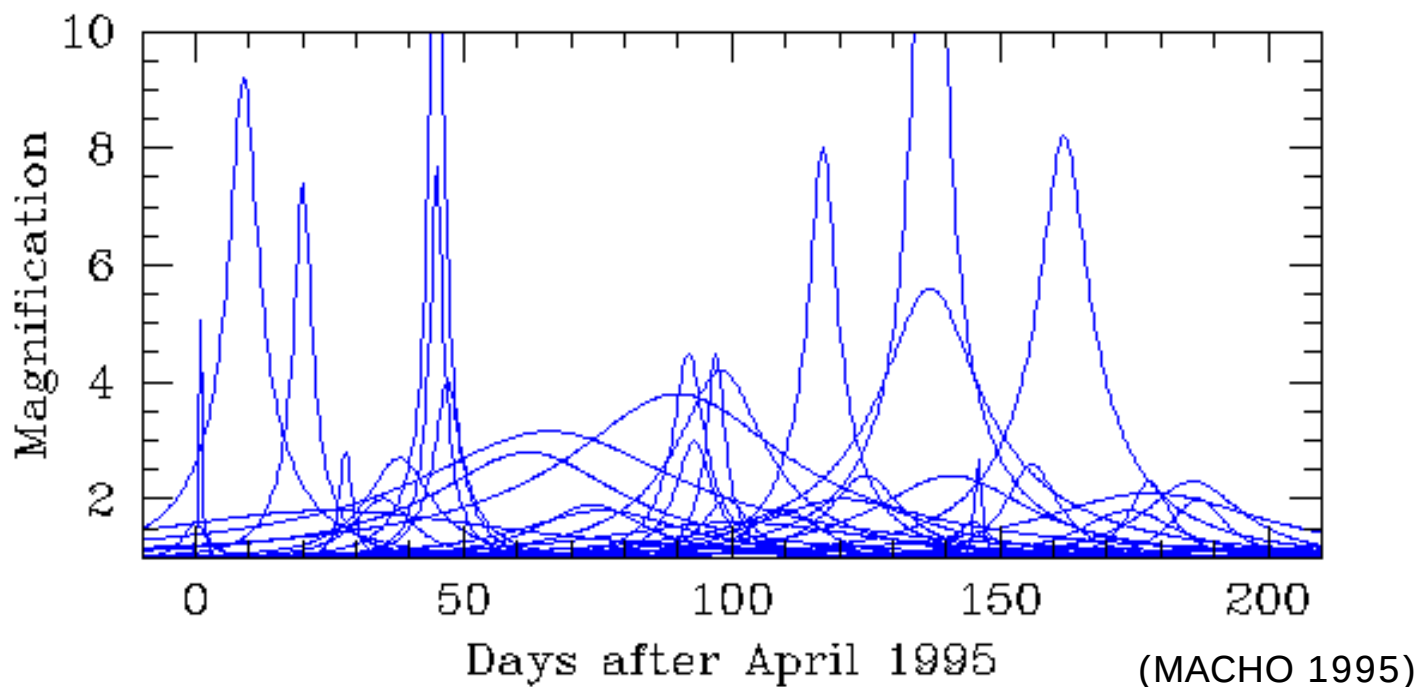


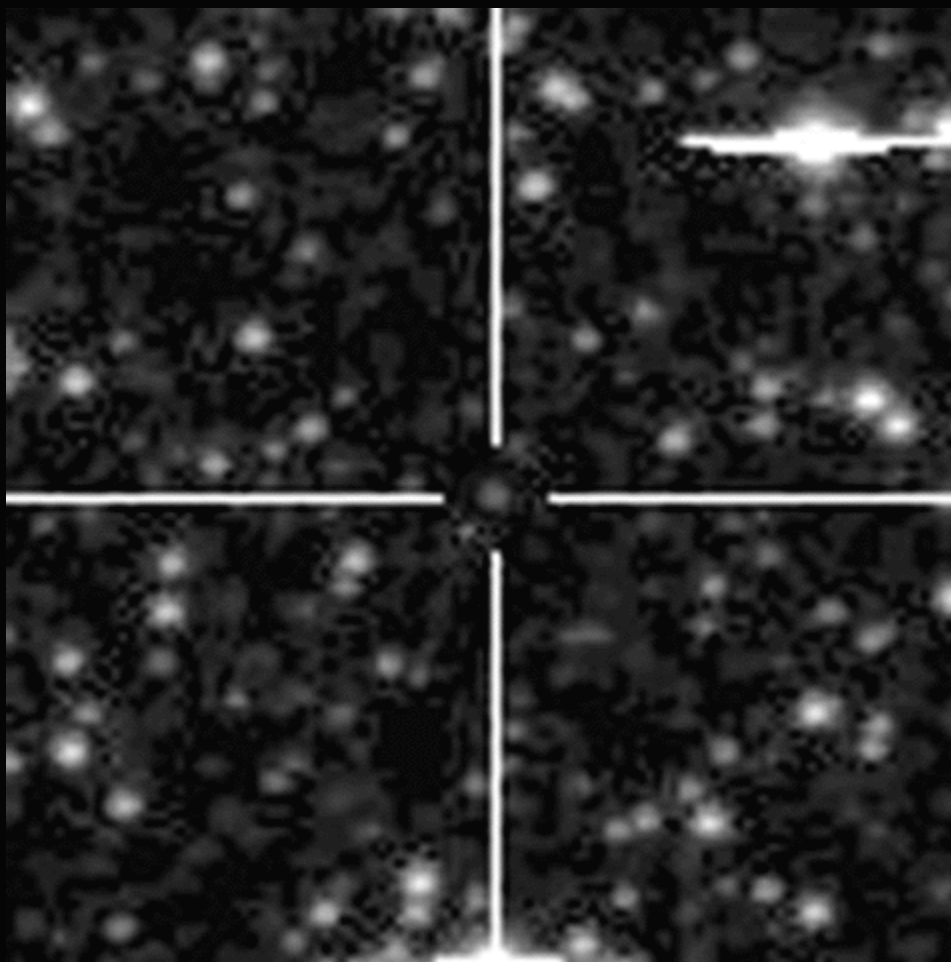
Pozorování: monitorovací projekty (MACHO, EROS, OGLE, MOA)



MOA

V období 1992 – III/2012 napozorováno ~ 10 000 mikročoček

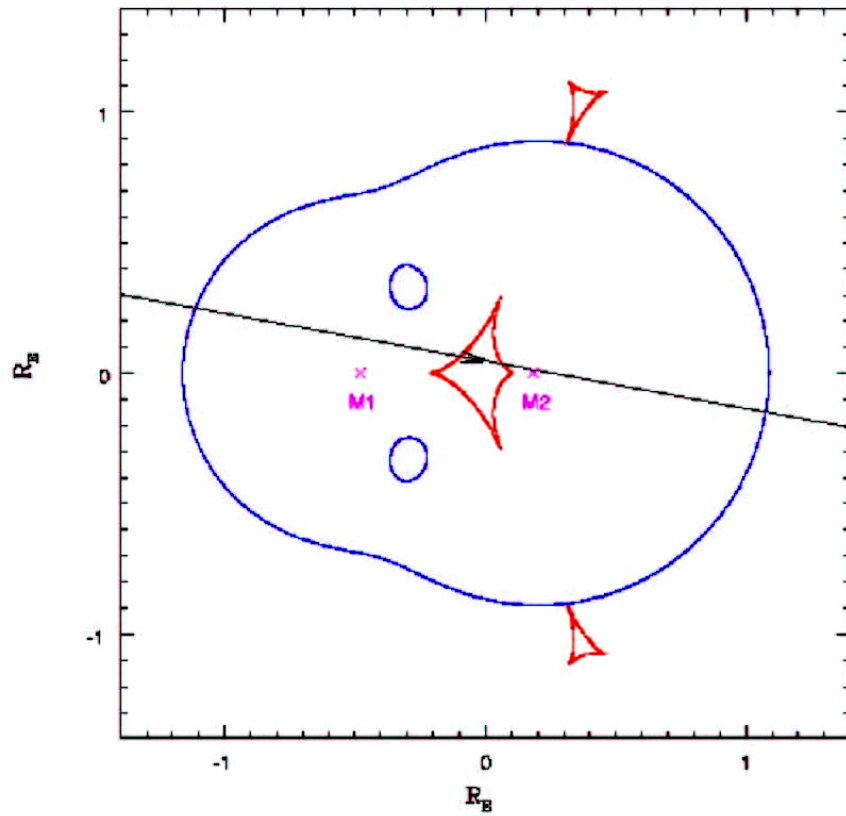




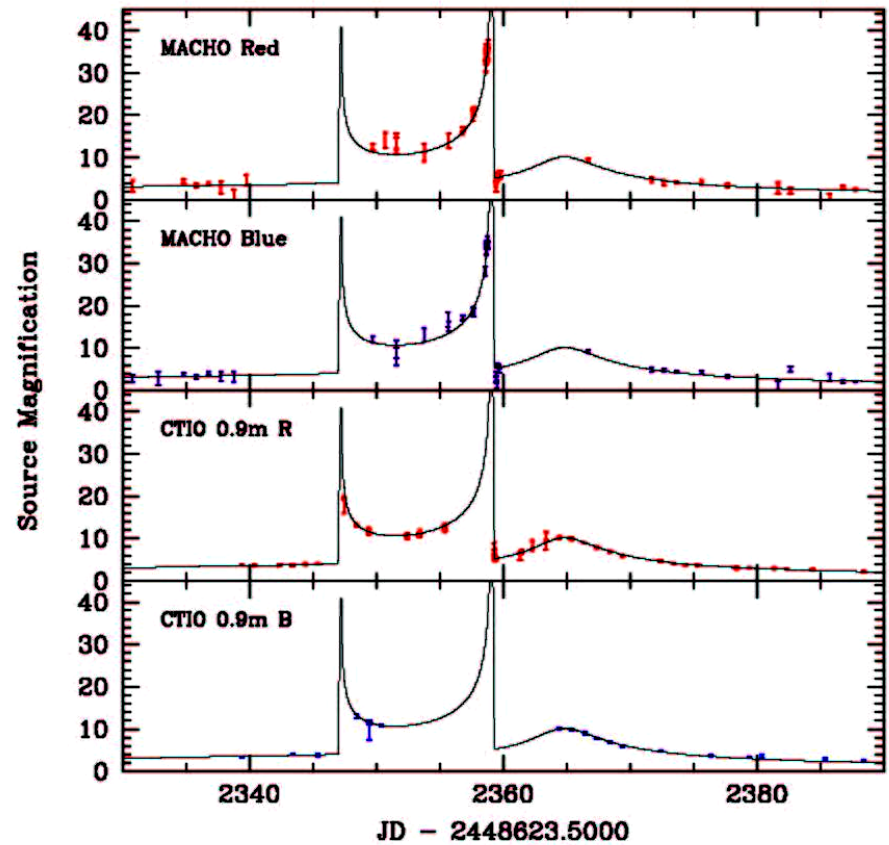
SuperMACHO

Dvojité mikročocky

MACHO Event 98-SMC-1

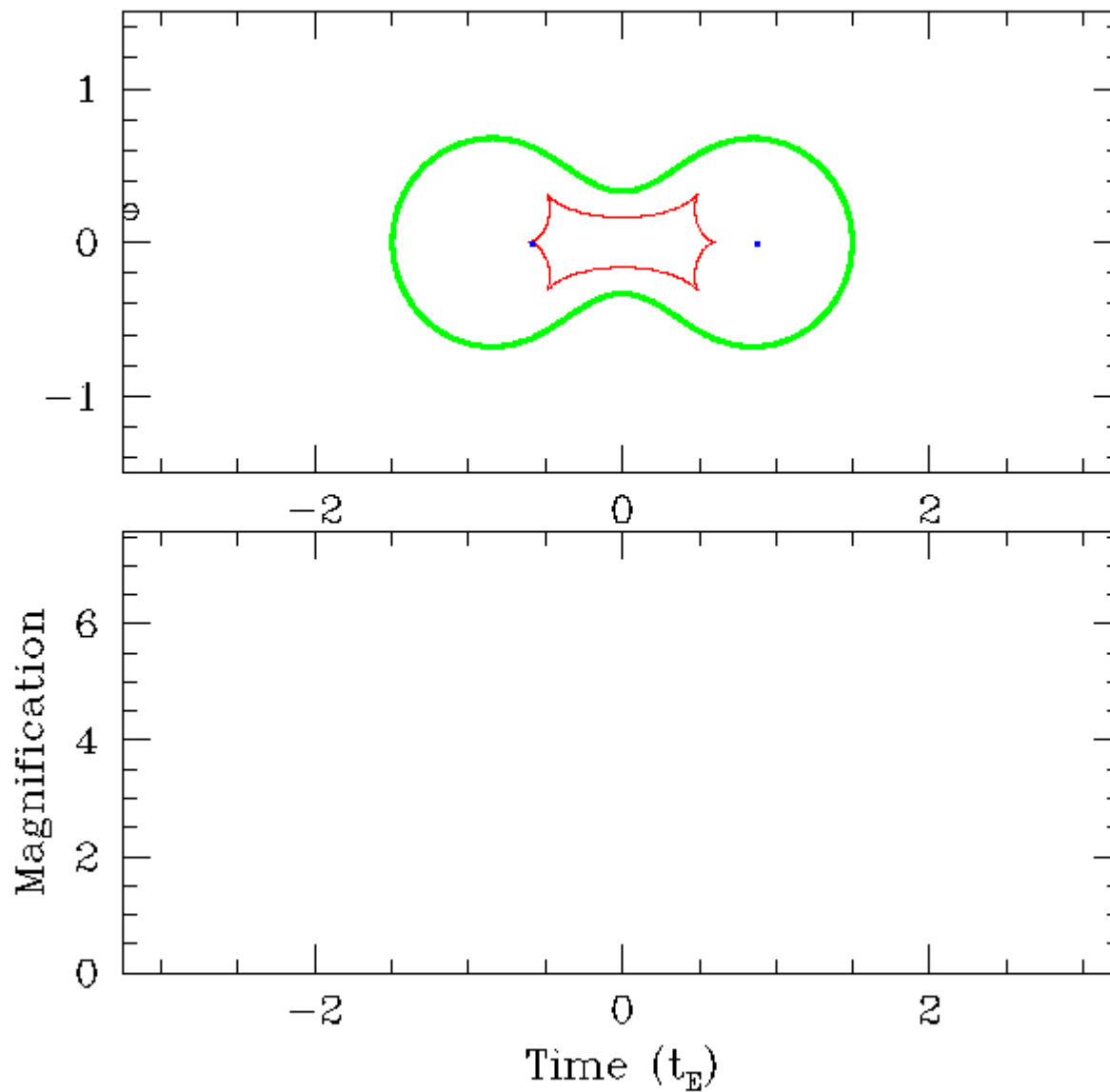


MACHO Event 98-SMC-1



Alcock et al. (2000)

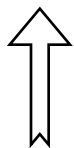
Polohy obrazů a světelná křivka



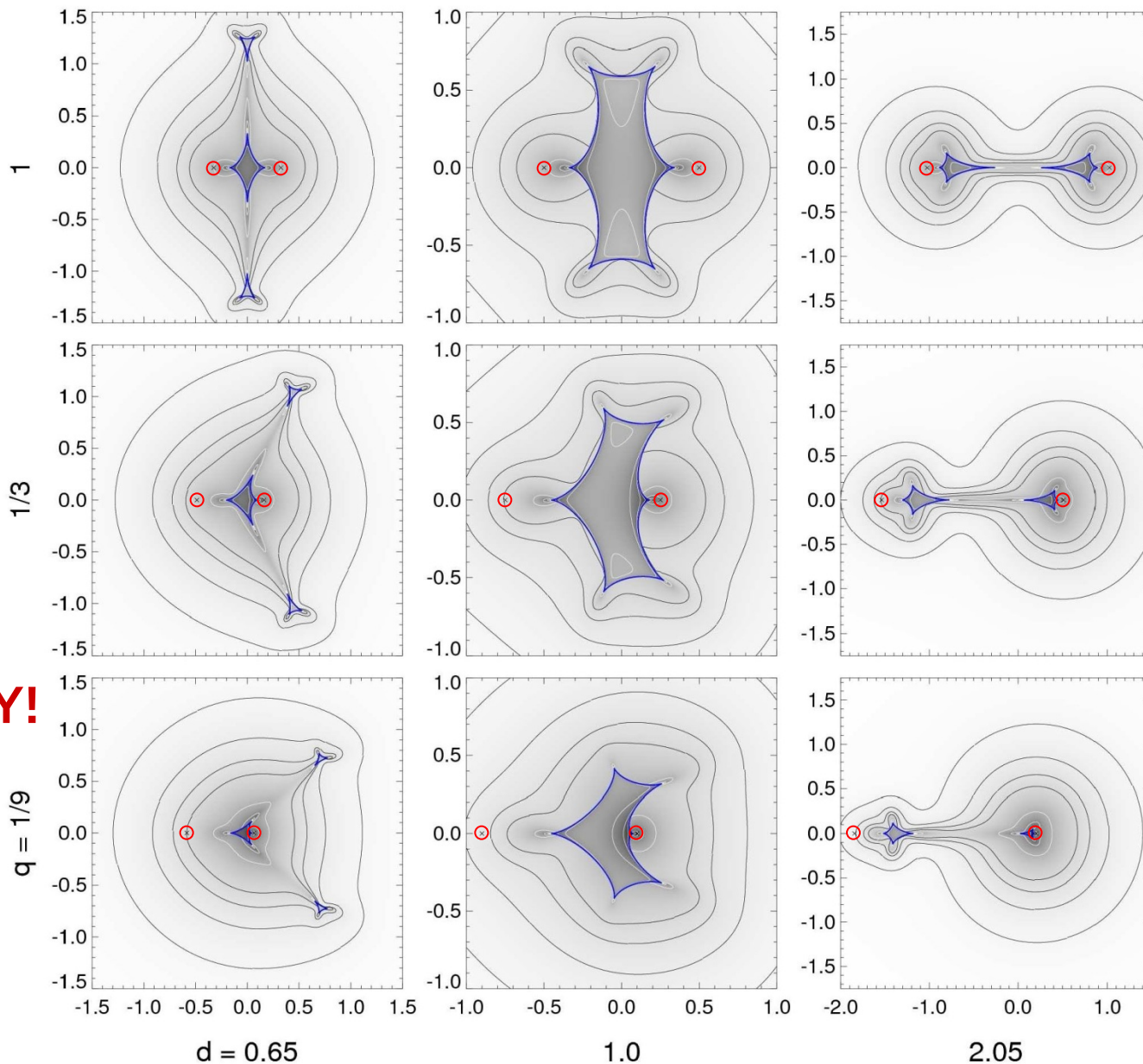
Zjasnění bodového zdroje dvojitou mikročočkou

Pejcha & Heyrovský (2009)

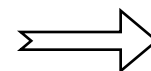
poměr hmotností



PLANETY!

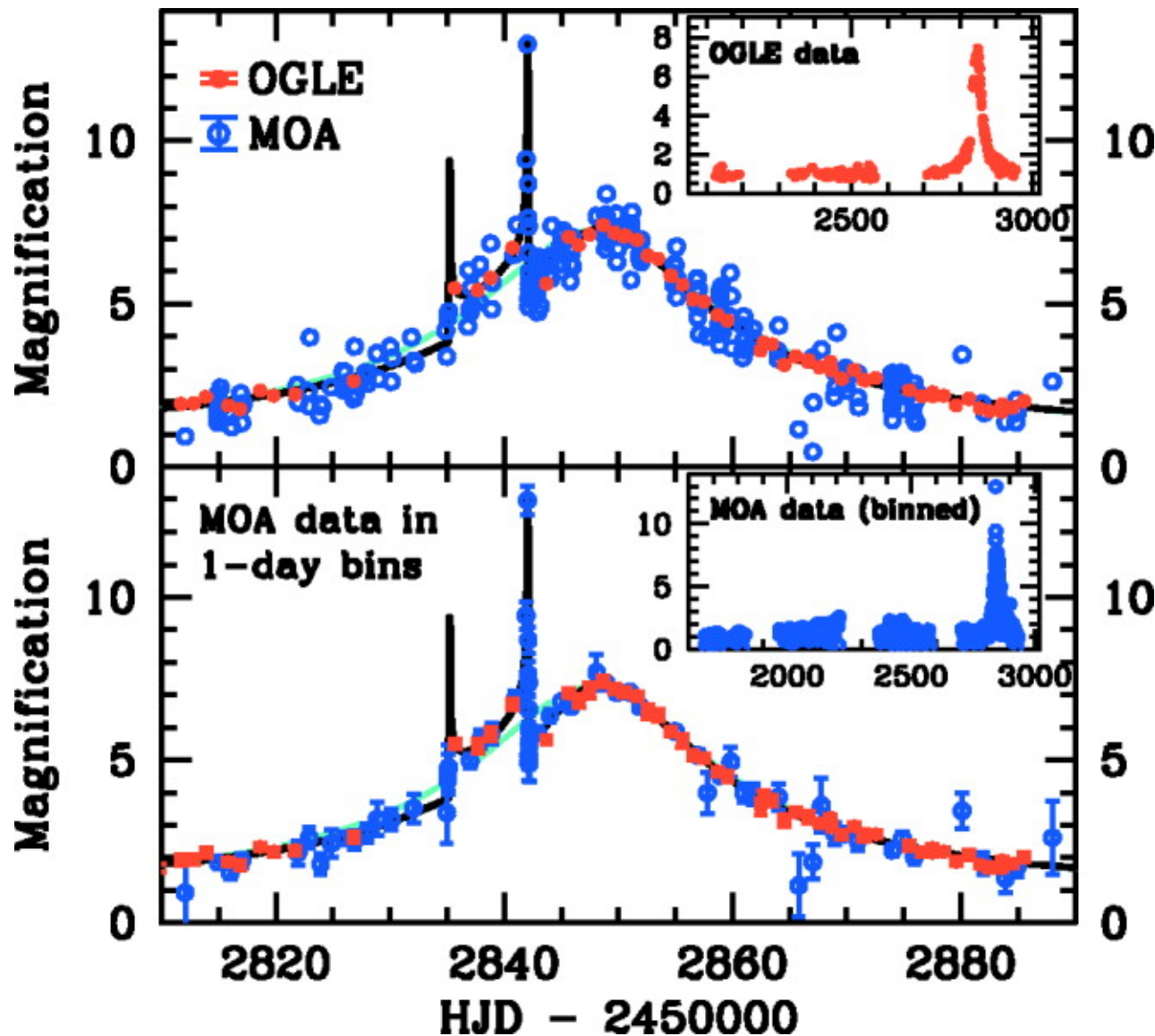


vzdálenost



OGLE 2003-BLG-235 / MOA 2003-BLG-53

Bond et al. (2004)



$$q = 0,0039^{+0,0011}_{-0,0007}$$

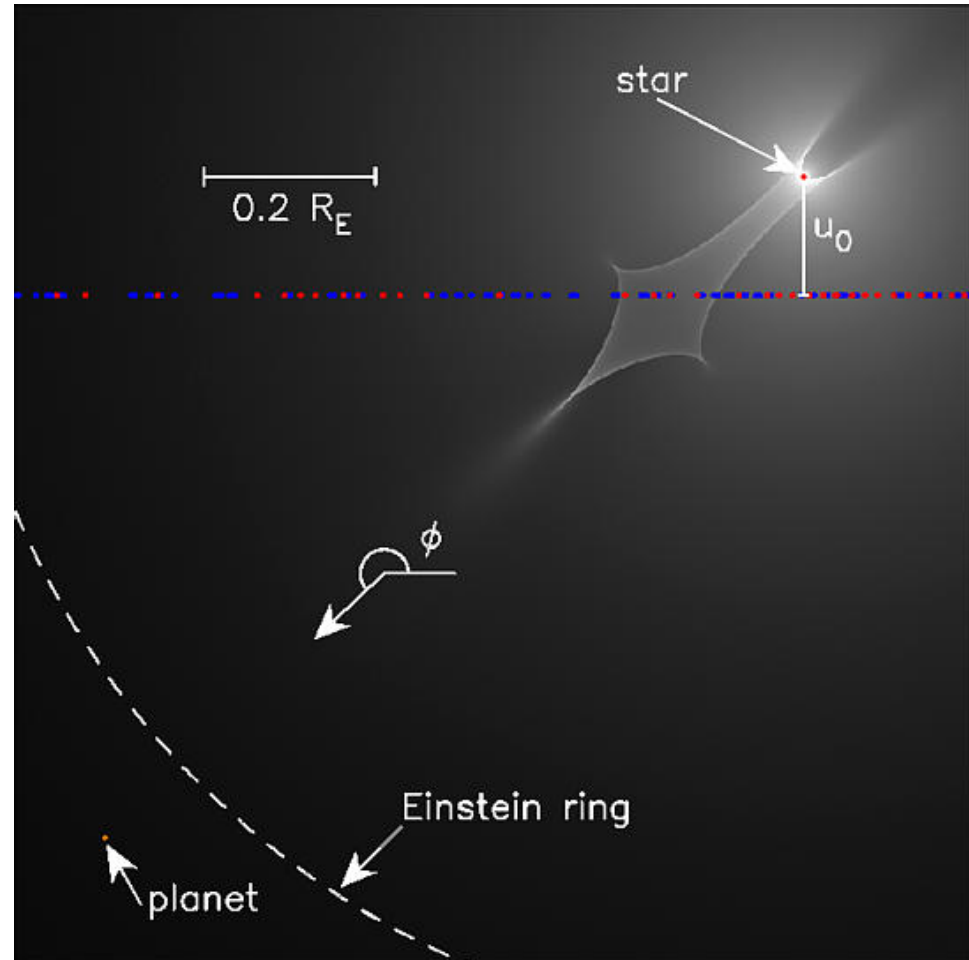
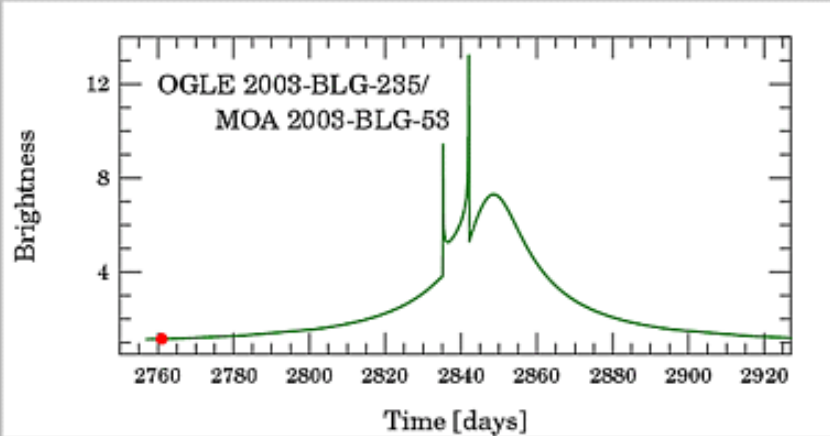
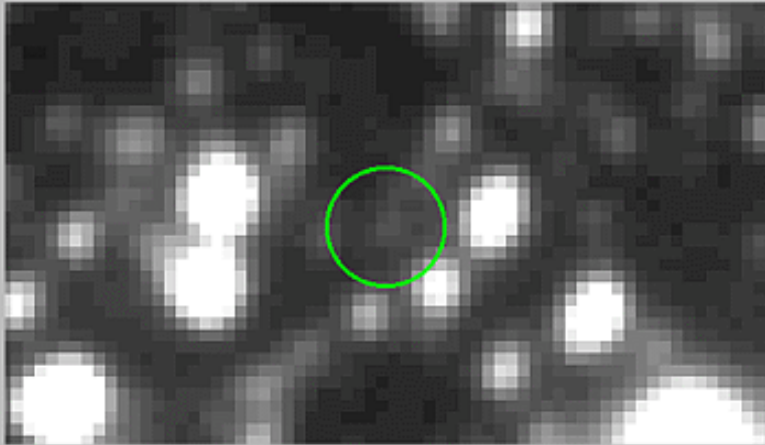
$$d = 1,120 \pm 0,007$$

$$M_P = 1,5^{+0,1}_{-1,2} M_J$$

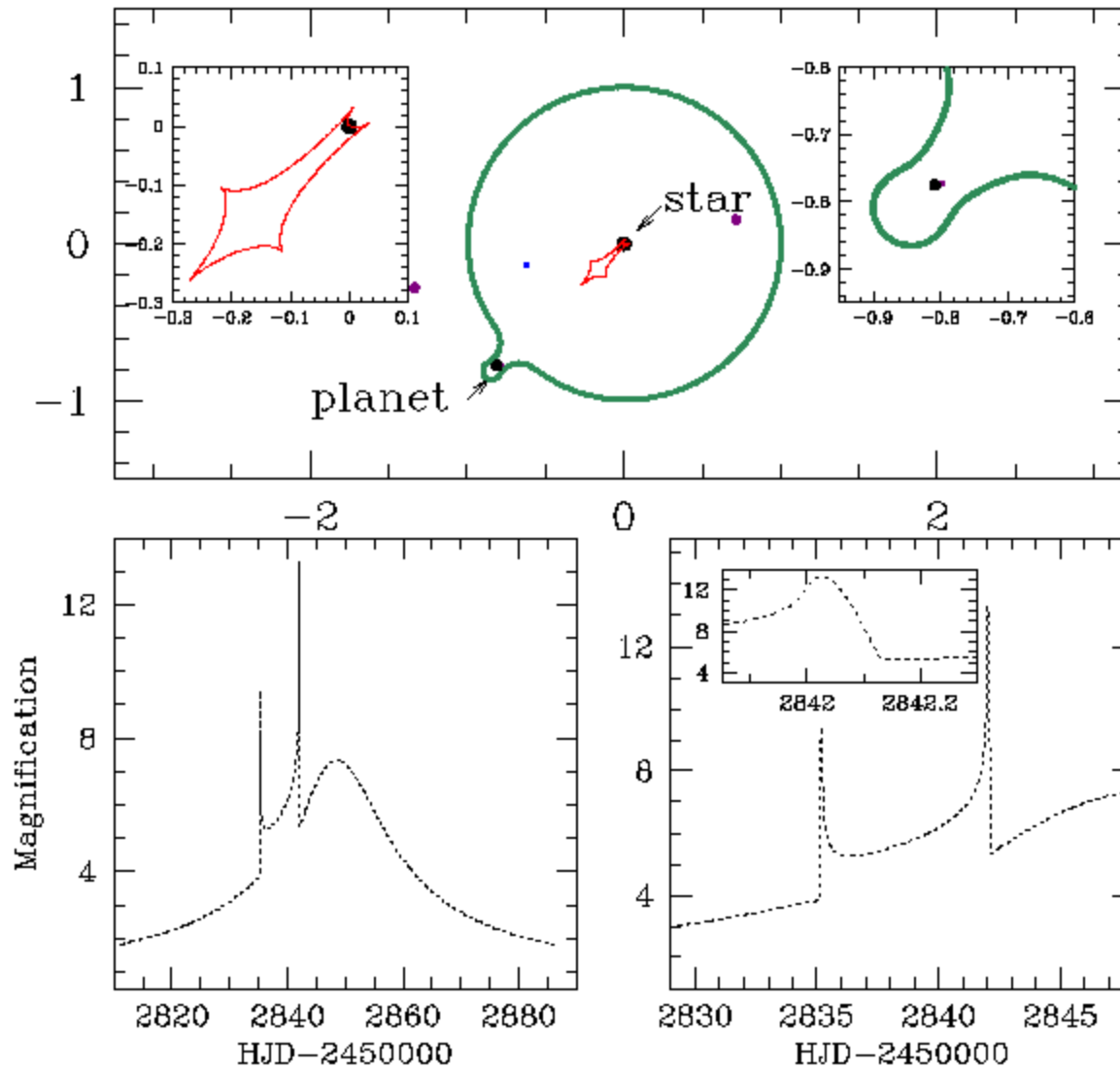
$$r_{\perp} = 3,0^{+0,1}_{-1,7} AU$$

$$M_* = 0,36^{+0,03}_{-0,28} M_{\odot}$$

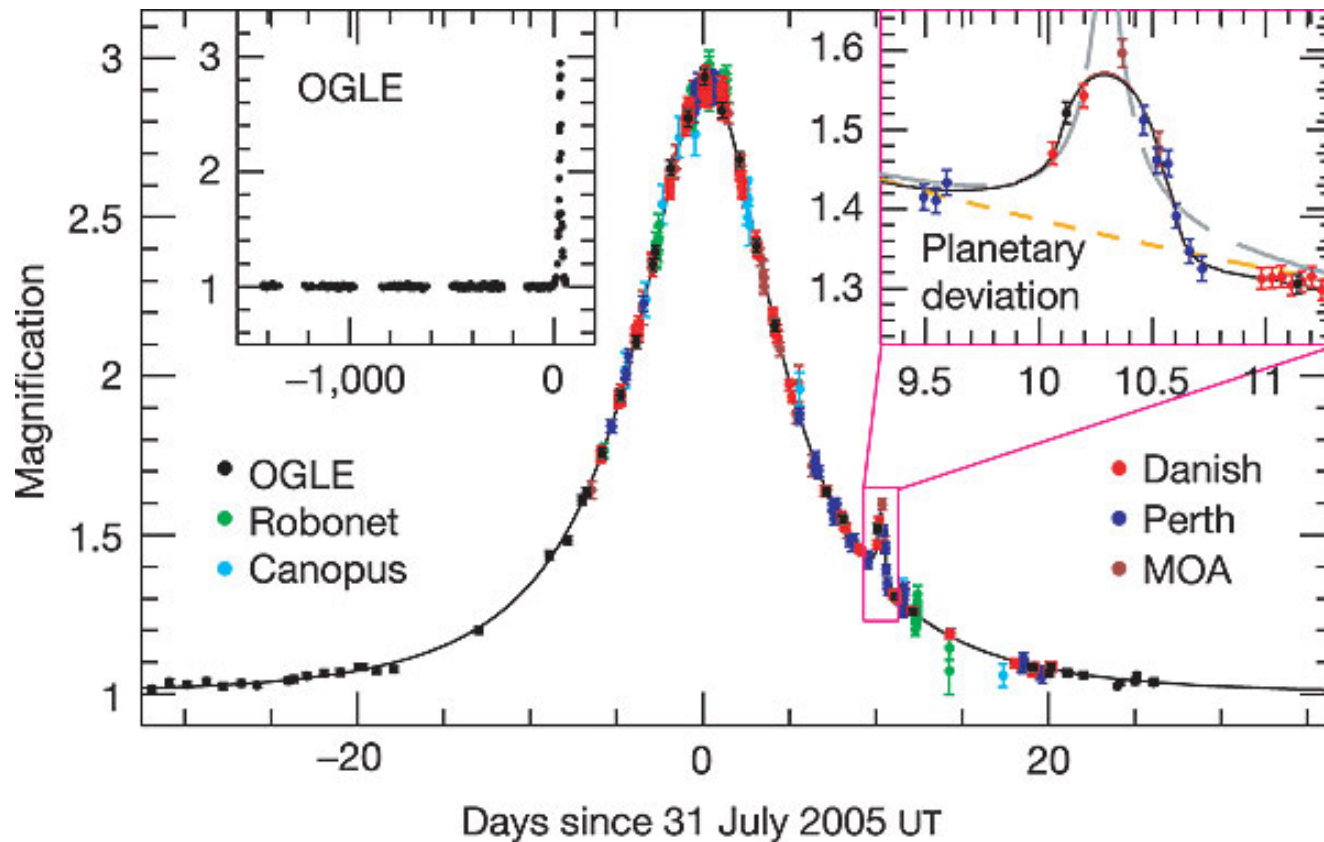
OGLE 2003-BLG-235 / MOA 2003-BLG-53



OGLE 2003-BLG-235 / MOA 2003-BLG-53



OGLE 2005-BLG-390 *Beaulieu et al. (2006)*



$$q = 7,6 \pm 0,7 \times 10^{-5}$$

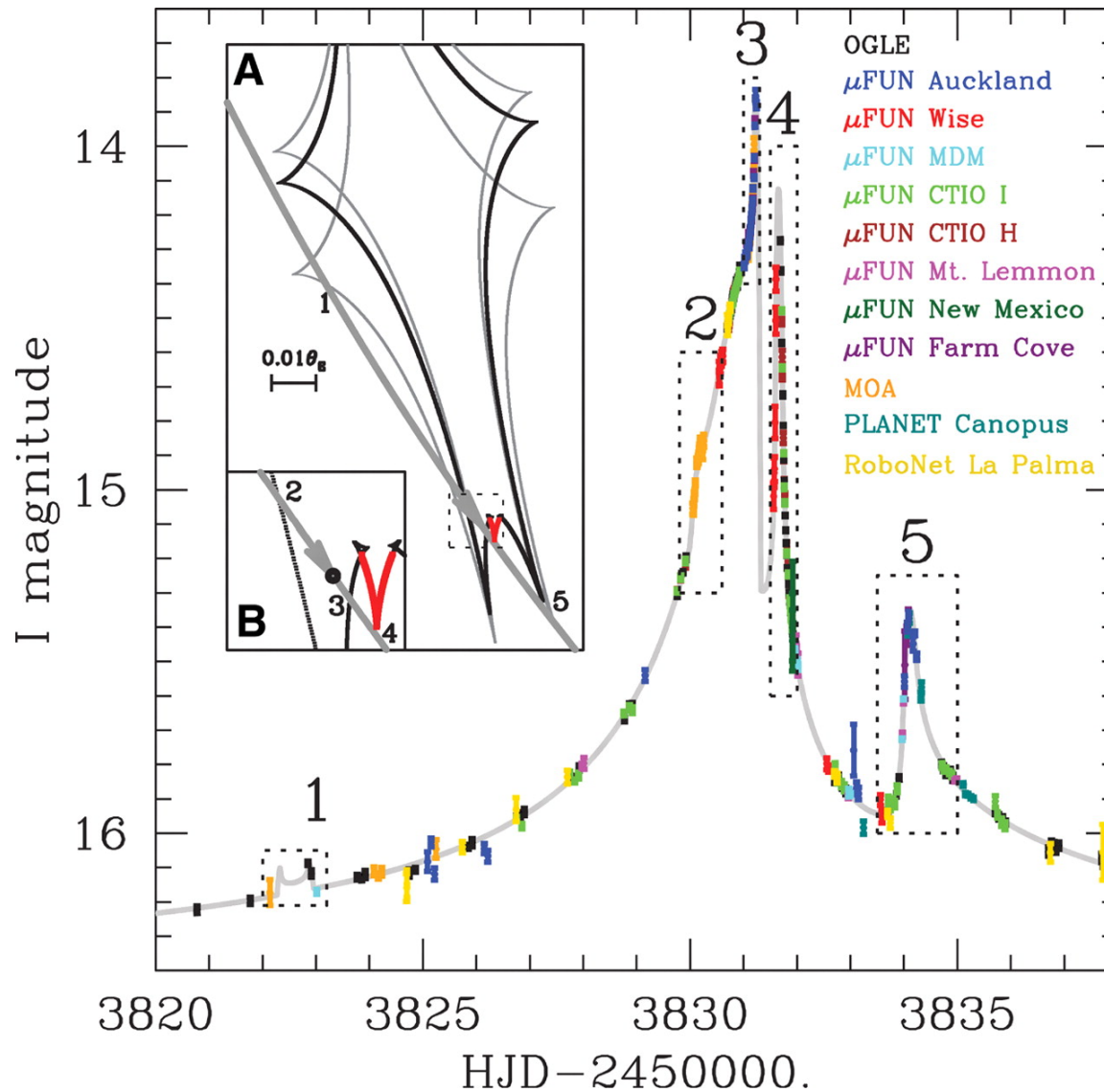
$$d = 1,610 \pm 0,008$$

$$M_P = 5,5^{+5,5}_{-2,7} M_{\oplus}$$

$$r_{\perp} = 2,6^{+1,5}_{-0,6} AU$$

$$M_* = 0,22^{+0,21}_{-0,11} M_{\odot}$$

OGLE 2006-BLG-109 *Gaudi et al. (2008)*



$$M_b = 0,71 \pm 0,08 M_J$$

$$a_b = 2,3 \pm 0,2 AU$$

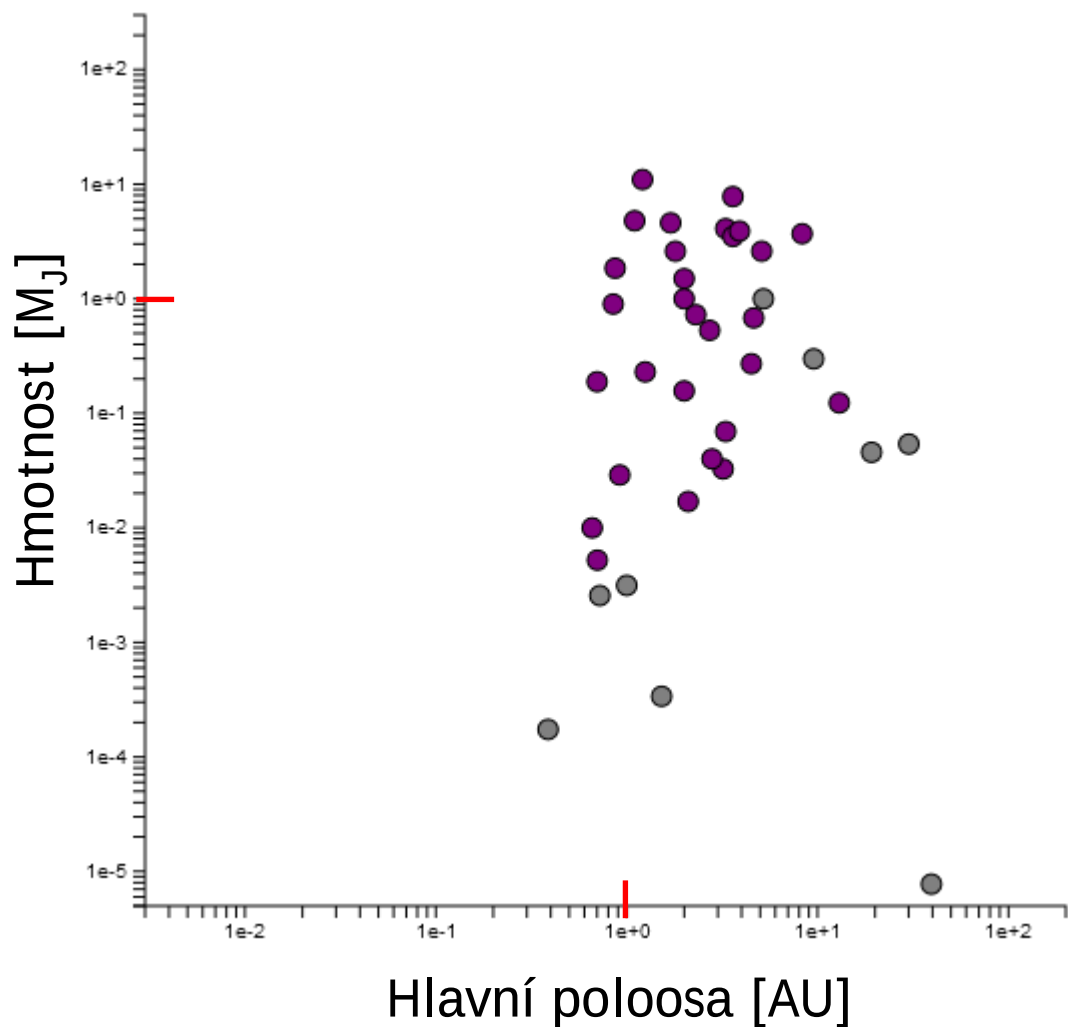
$$M_c = 0,27 \pm 0,03 M_J$$

$$a_c = 4,6 \pm 0,5 AU$$

$$M_* = 0,50 \pm 0,05 M_\odot$$

Exoplanety nalezené metodou mikročočkování (2014)

Počet: 33/1853



Celkový přehled nalezených exoplanet (2014)

Počet: **1853**

Tranzit

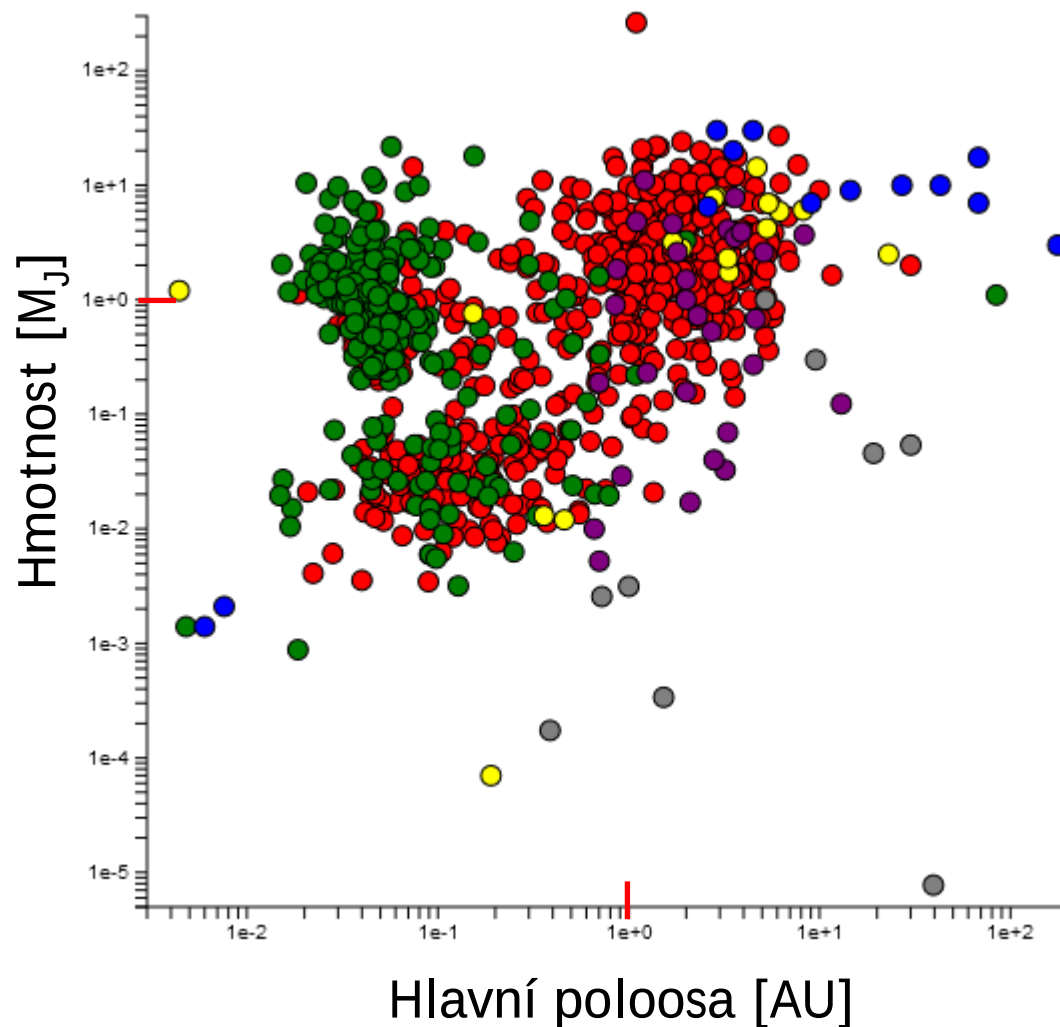
Radiální rychlost

Přímá detekce

Mikročočkování

Kolem pulzarů

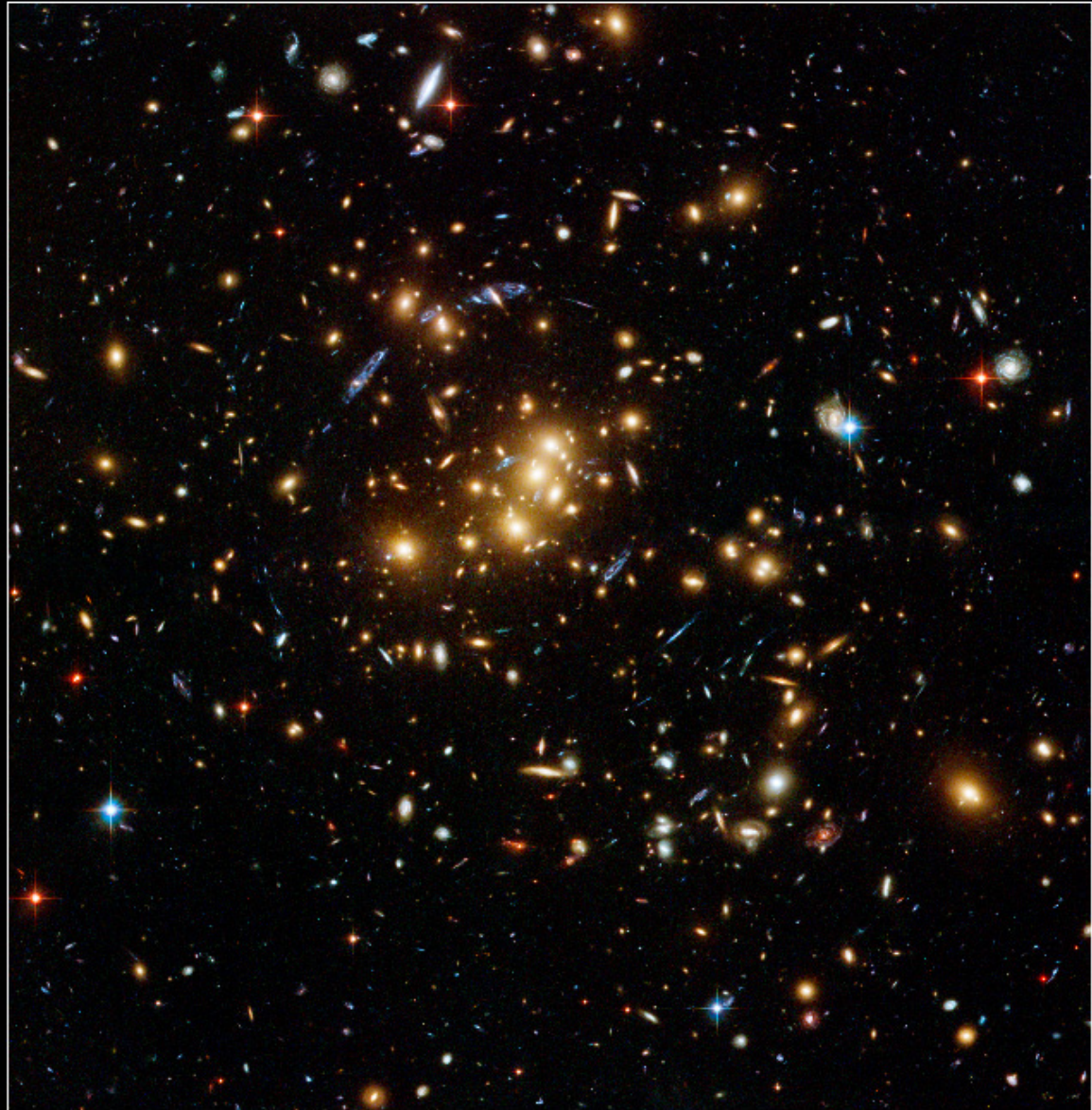
Planety sluneční
soustavy



Rozložení hmoty v kupách galaxií: slabé čočkování

Galaxy Cluster CI 0024+17 (ZwCI 0024+1652)

HST • ACS/WFC



NASA, ESA, and M.J. Jee (Johns Hopkins University)

STScI-PRC07-17b

Gravitační čočka se spojitě rozloženou hmotou

2-D gravitační potenciál daný plošnou hustotou Σ :

$$\psi(\vec{\theta}) = \frac{1}{\pi} \int \kappa(\vec{\theta}') \ln|\vec{\theta} - \vec{\theta}'| d^2\vec{\theta}'$$

$$\kappa(\vec{\theta}') = \frac{\Sigma(\vec{\theta}')}{\Sigma_{CR}} \quad \Sigma_{CR} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_S}{D_L D_{LS}}$$

úhel odklonu $\vec{\alpha}(\vec{\theta}) = \frac{D_S}{D_{LS}} \vec{\nabla} \psi(\vec{\theta})$

čočková rovnice: $\boxed{\vec{\beta} = \vec{\theta} - \vec{\nabla} \psi(\vec{\theta})}$

Lokální chování čočkové rovnice

zobrazený bod: $\vec{\beta}_0 = \vec{\theta}_0 - \vec{\nabla} \psi(\vec{\theta}_0)$

body v okolí:

$$\vec{\beta} - \vec{\beta}_0 = \begin{pmatrix} 1 - \kappa - \gamma \cos(2\phi) & -\gamma \sin(2\phi) \\ -\gamma \sin(2\phi) & 1 - \kappa + \gamma \cos(2\phi) \end{pmatrix} (\vec{\theta} - \vec{\theta}_0)$$

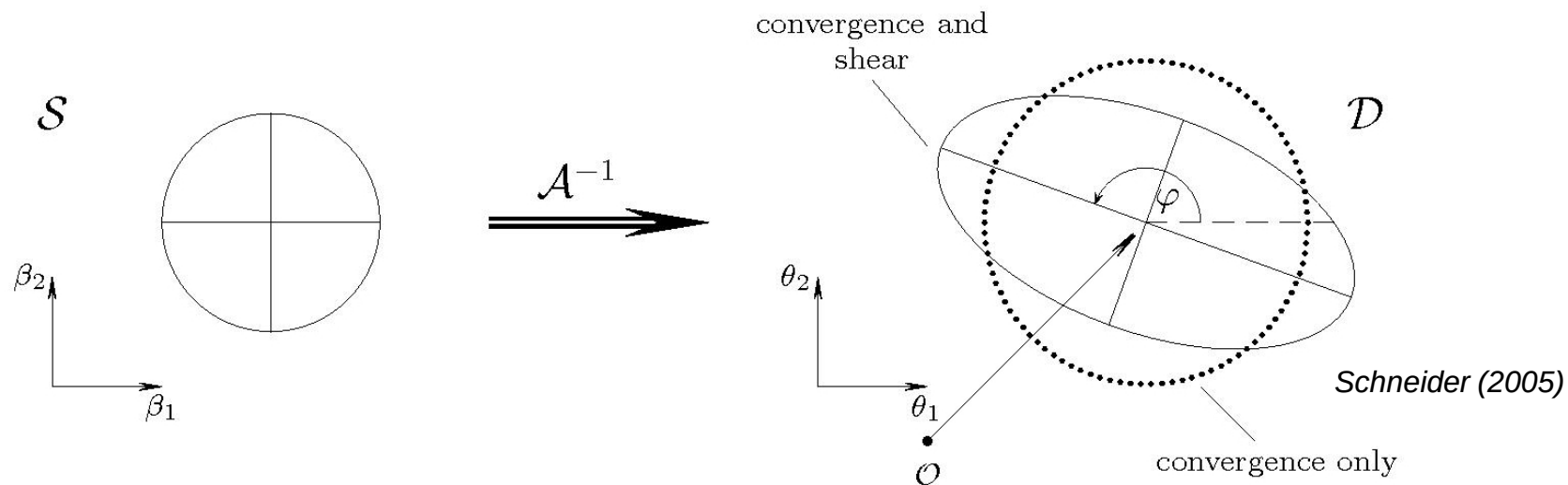
κ konvergence

γ shear

ϕ fáze

$$\kappa = \frac{1}{2}(\psi_{/11} + \psi_{/22}), \quad \gamma \cos(2\phi) = \frac{1}{2}(\psi_{/11} - \psi_{/22}), \quad \gamma \sin(2\phi) = \psi_{/12}$$

$\kappa, \gamma \ll 1 \Rightarrow$ **Slabé čočkování**



poloosy

$$a = (1 - \kappa - \gamma)^{-1}$$

$$b = (1 - \kappa + \gamma)^{-1}$$

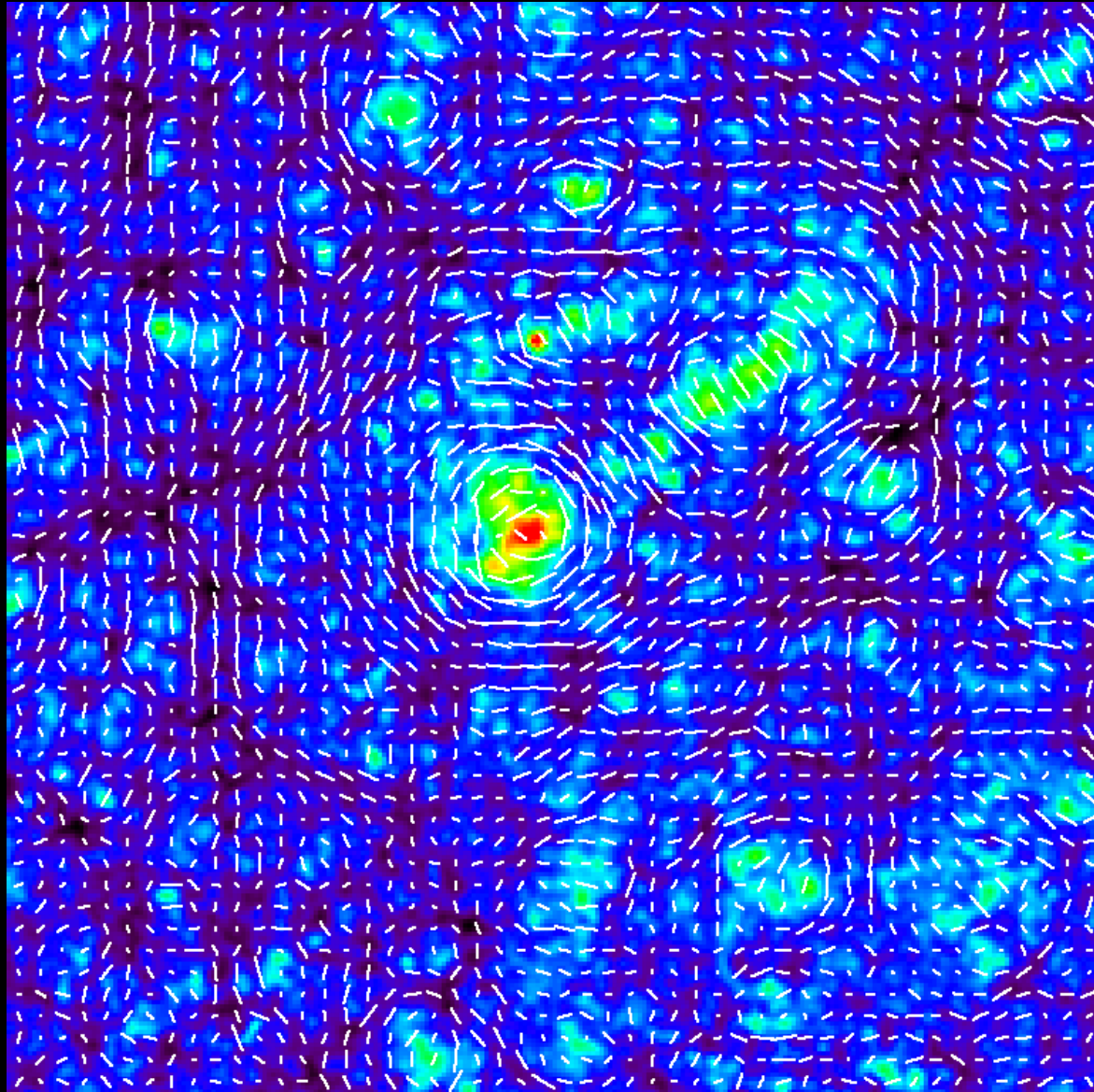
poměr

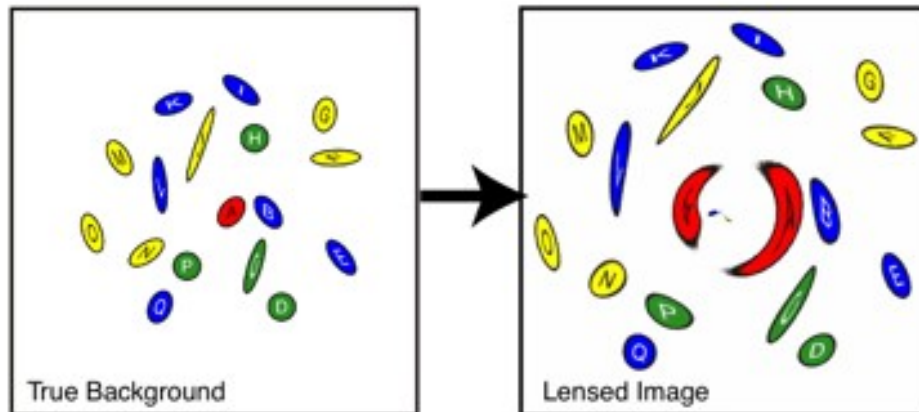
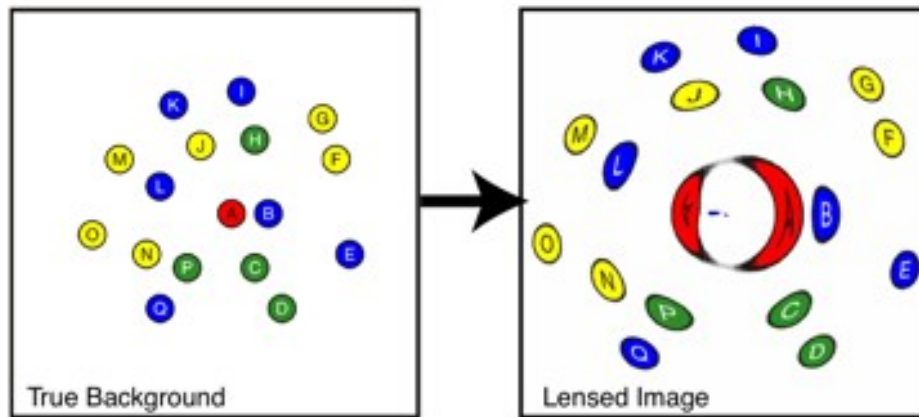
$$\frac{b}{a} = \frac{1 - \kappa - \gamma}{1 - \kappa + \gamma} \cong 1 - 2\gamma$$

Postup při mapování hmoty:

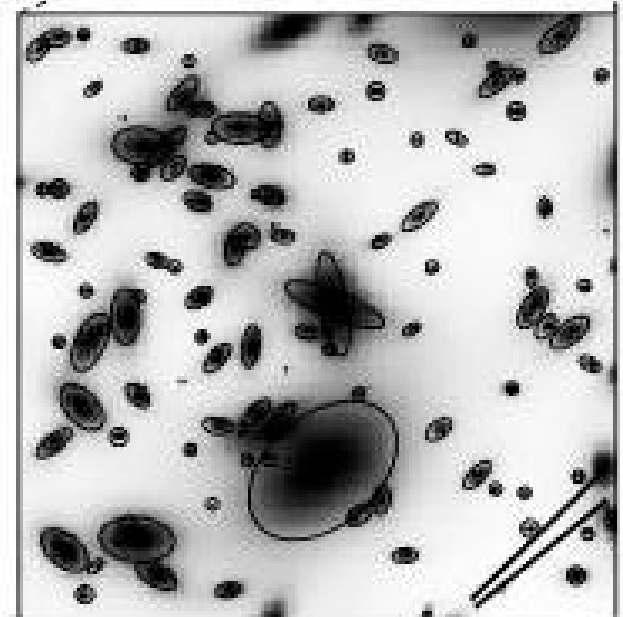
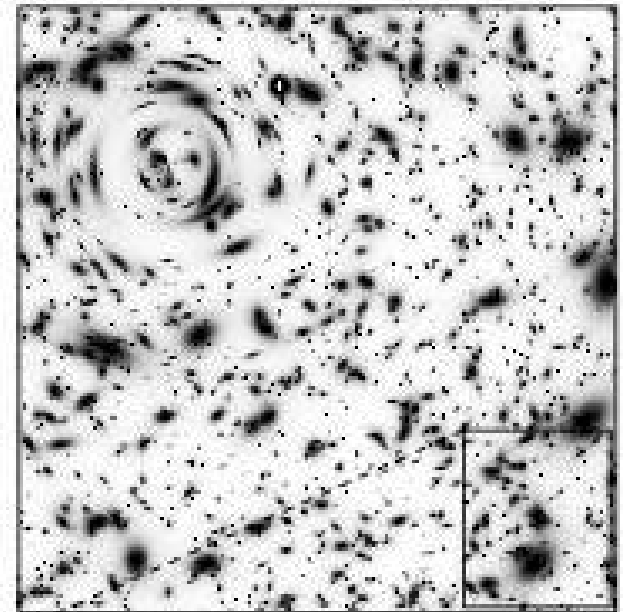
měření $\gamma \rightarrow$ výpočet $\psi \rightarrow$ výpočet $\kappa \rightarrow$ **získání plošné hustoty**

Simulace shearu generovaného rozložením hmoty

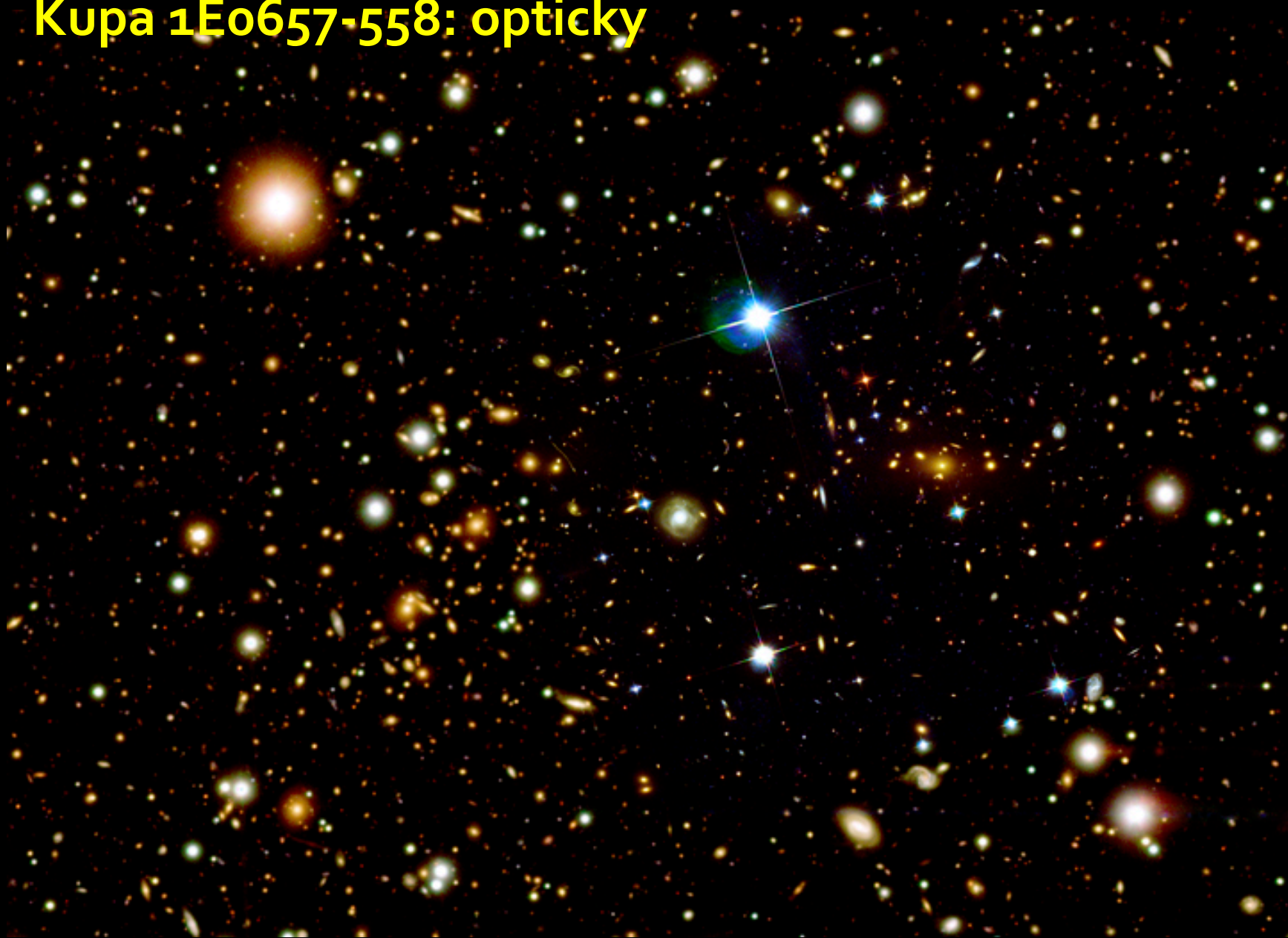




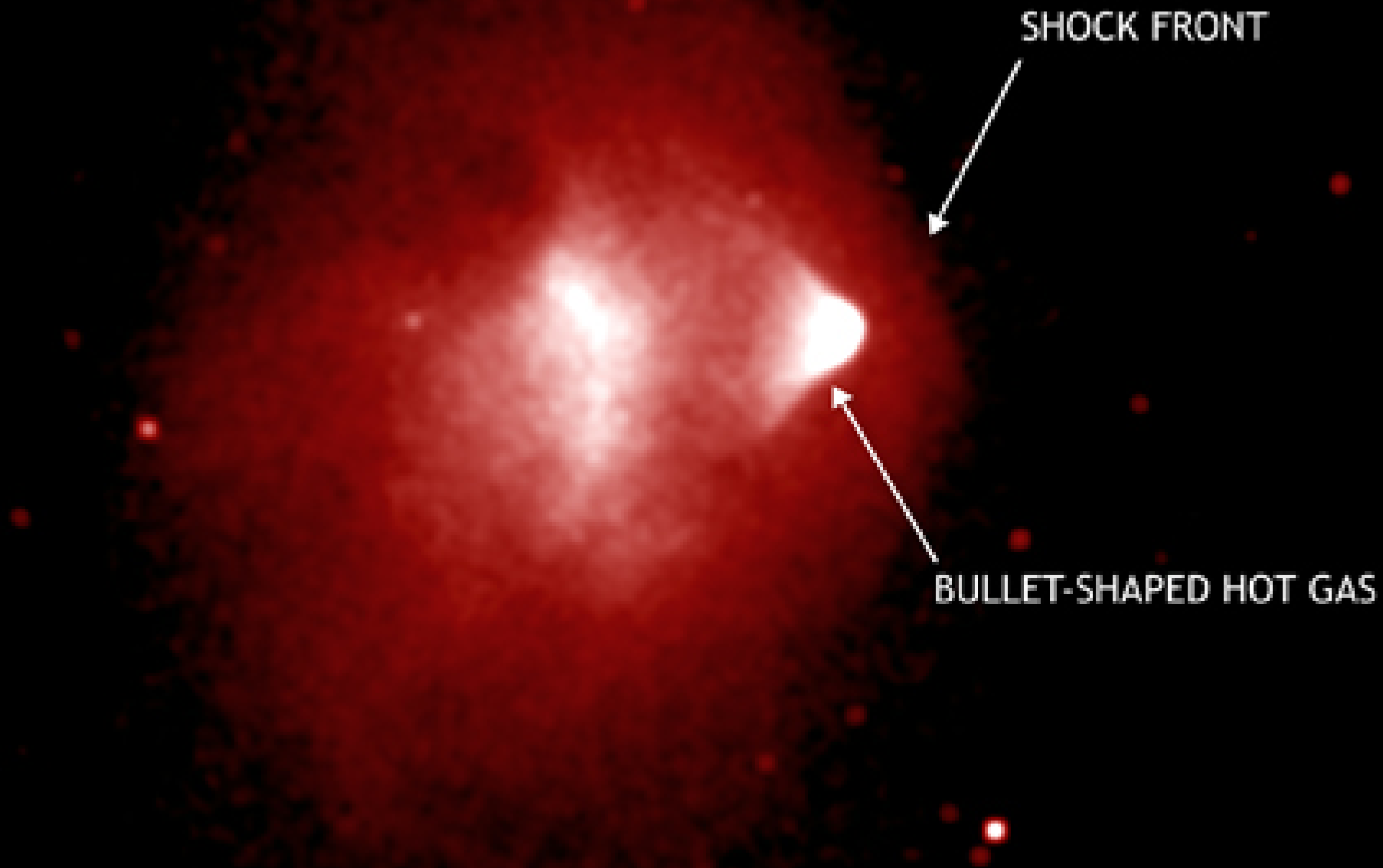
Williamson et al. (2008)



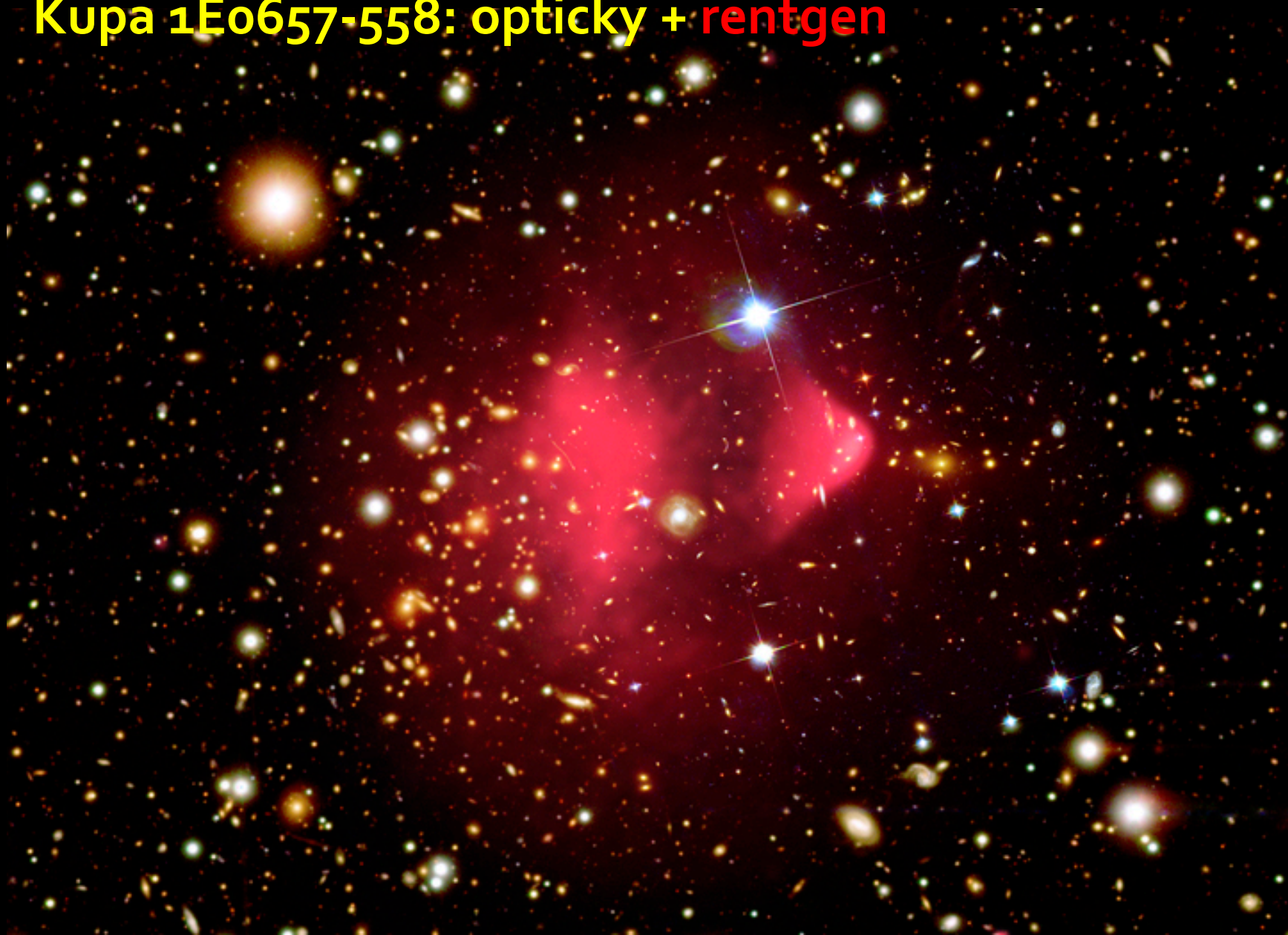
Kupa 1E0657-558: opticky



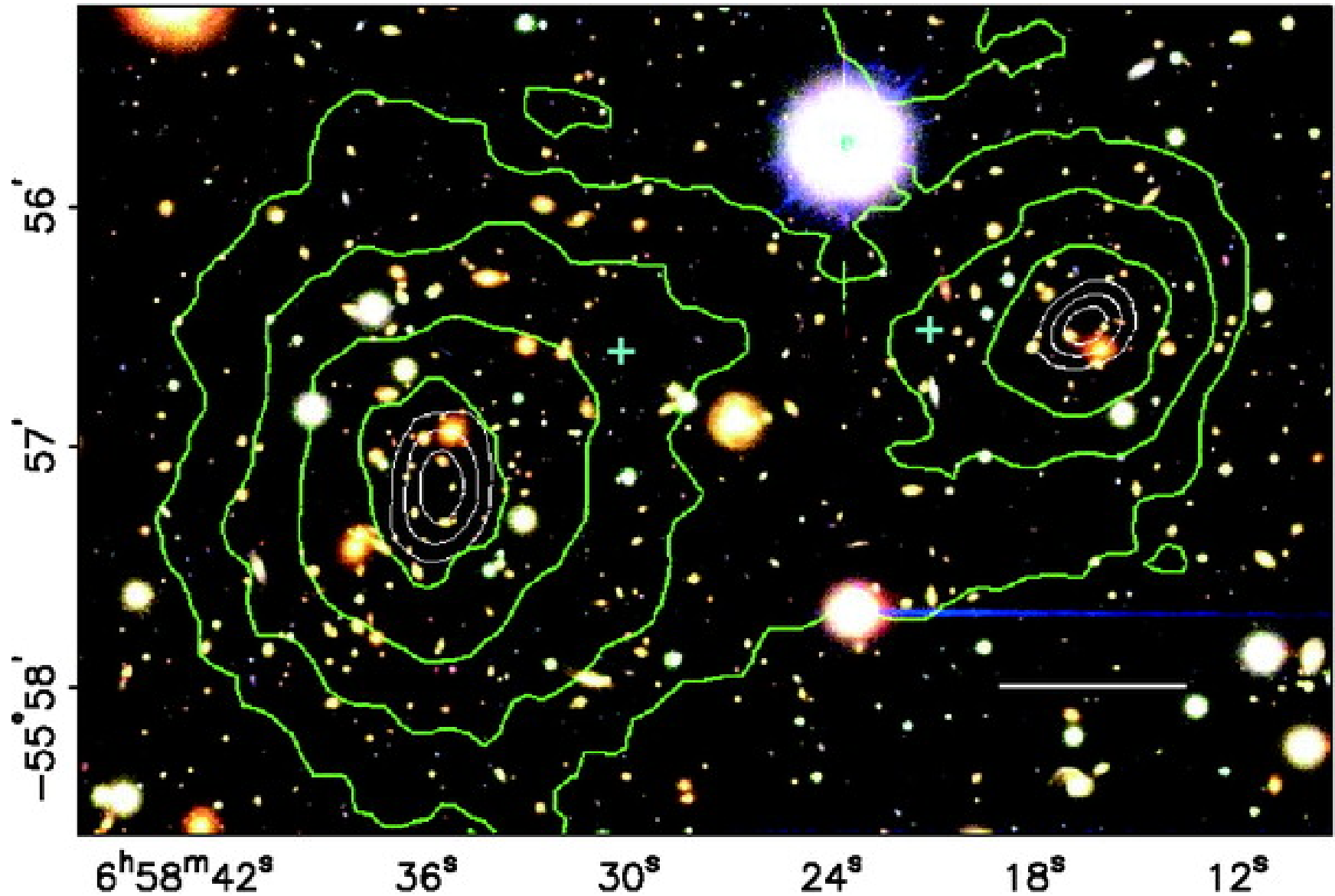
Kupa 1E0657-558: rentgen -> „Bullet cluster“



Kupa 1E0657-558: opticky + rentgen

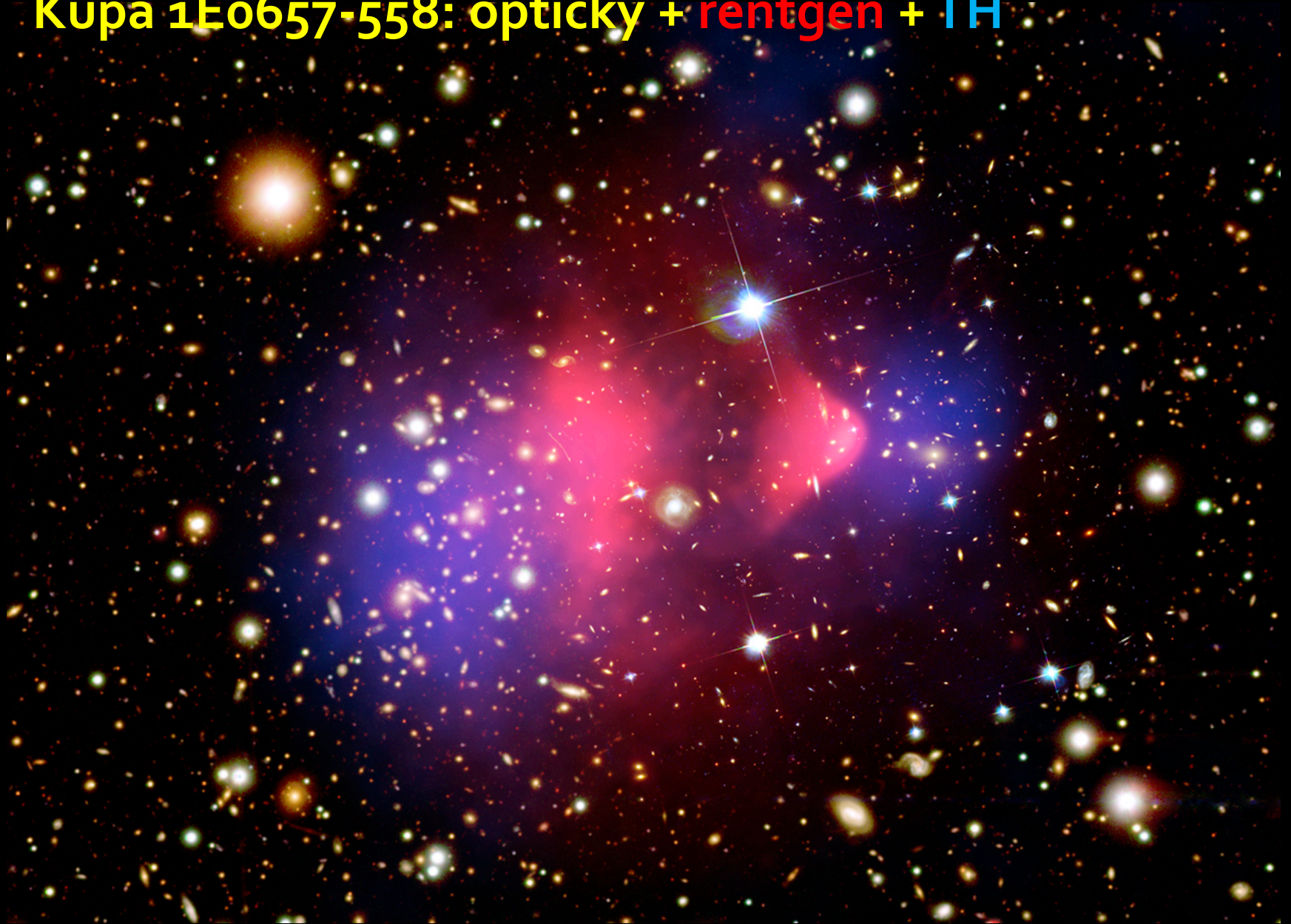


Kupa 1E0657-558: Temná Hmota

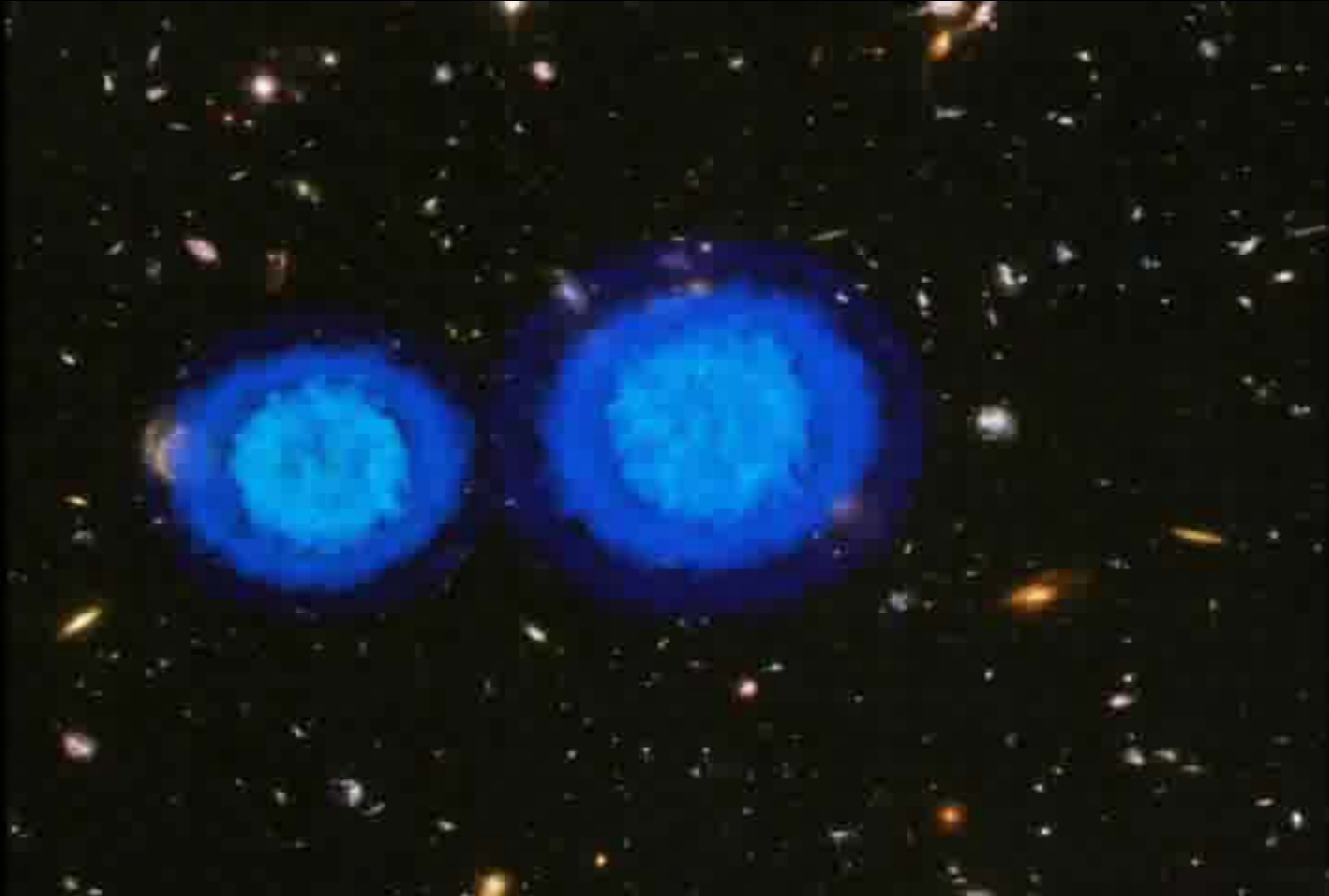


Clowe et al. (2006)

Kupa 1E0657-558: optický + rentgen + TH



Kupa 1E0657-558: srážka

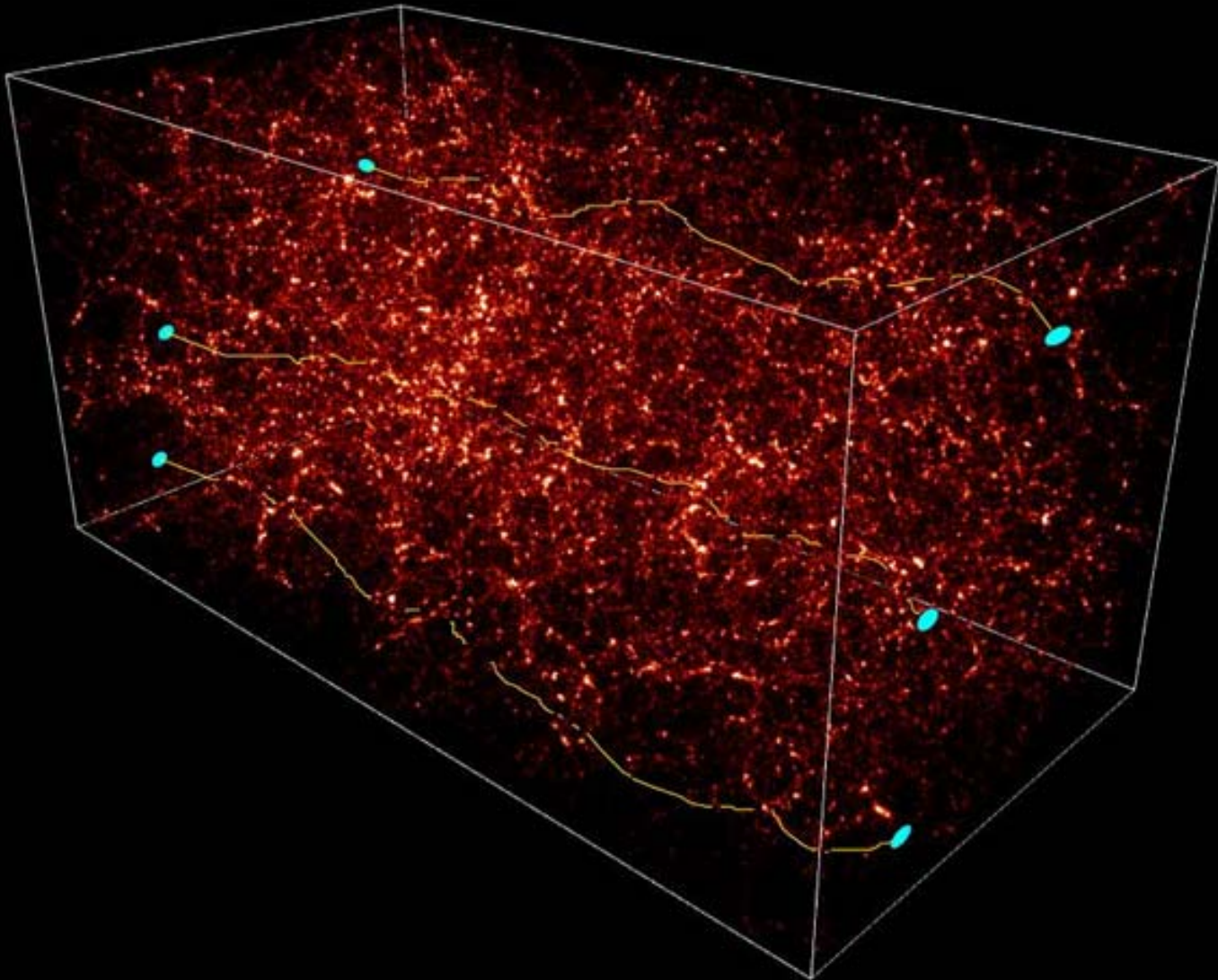


$$\sigma/m < 0,7 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

Randall et al. (2008)

Efekt na kosmologická škále: Cosmic shear

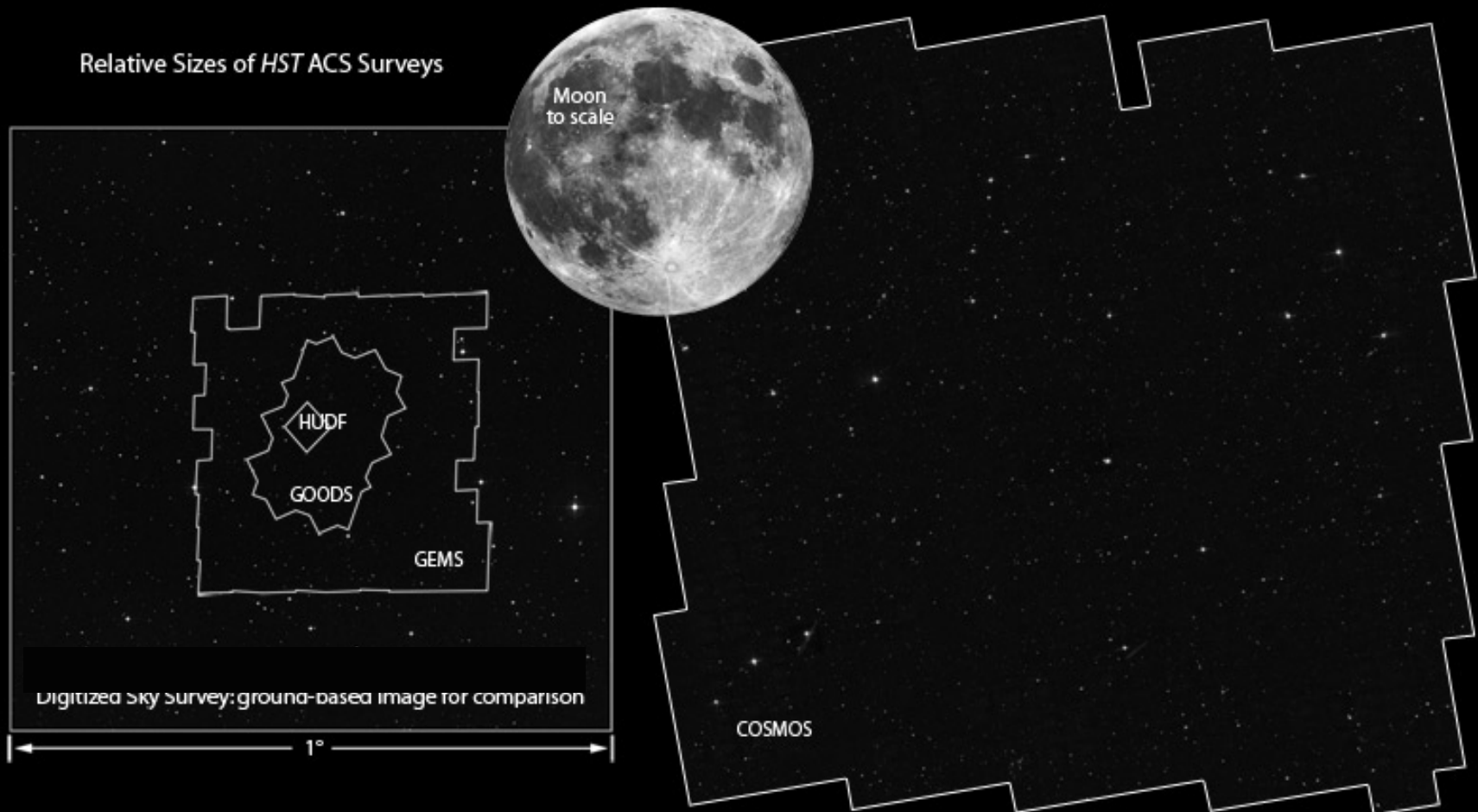
= slabé čočkování kosmologickým rozložením (temné) hmoty



COSMOS (Massey et al. 2007)

Slabé čočkování + fotometrické redshifty = 3-D mapování hmoty

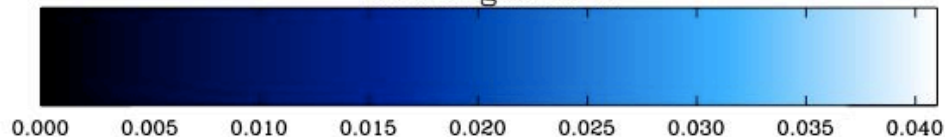
HST: 1.6 deg² , 2 milióny galaxií



Rozložení temné hmoty (HST vs. Země)

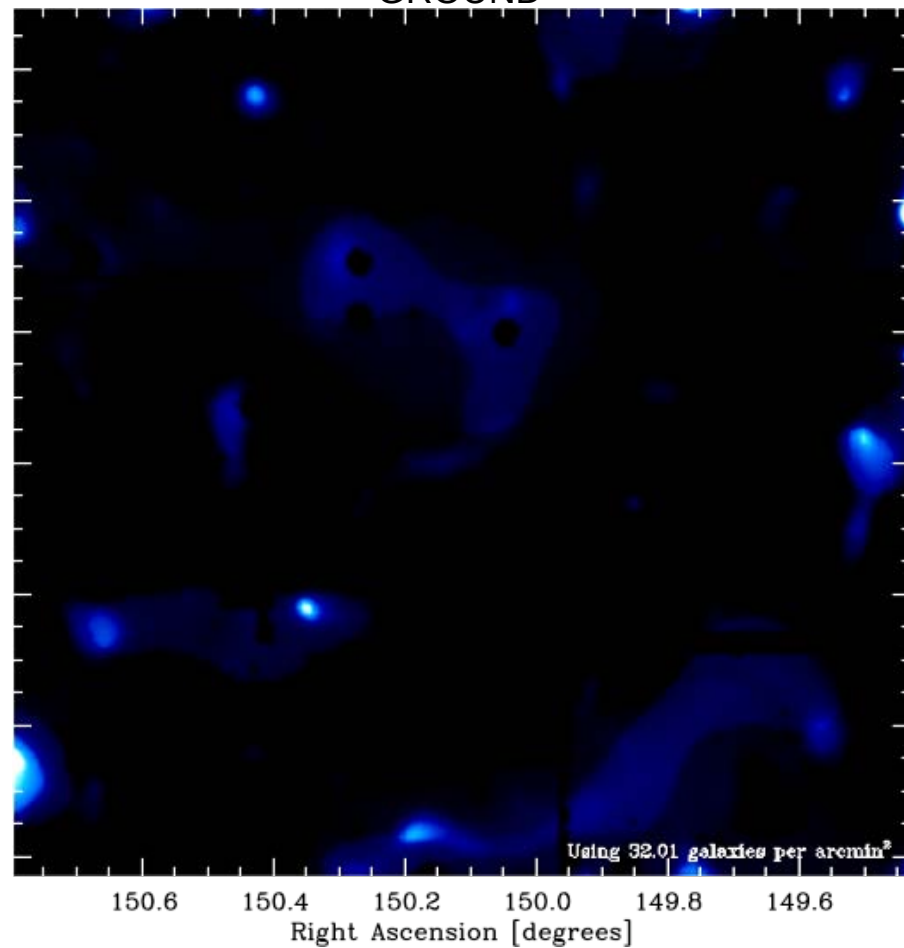
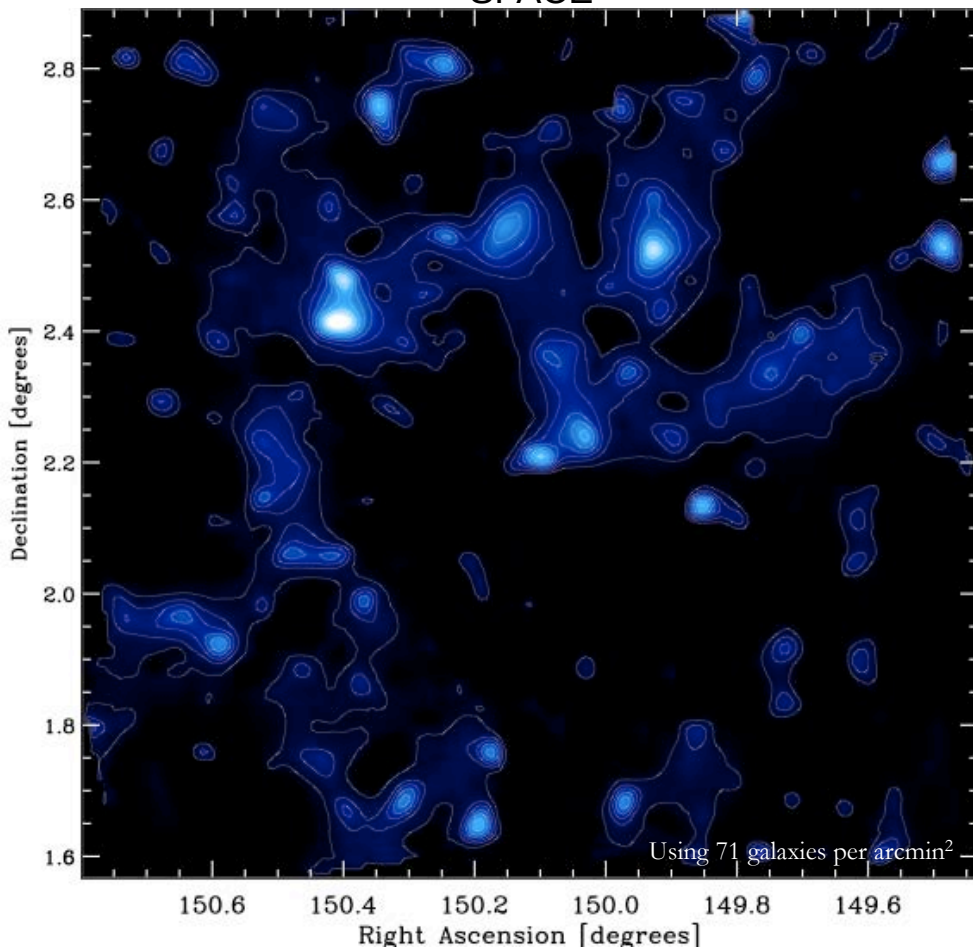
R. Massey et al. (Nature 2007), M. Kasliwal et al. (Proc. AAS 2007)

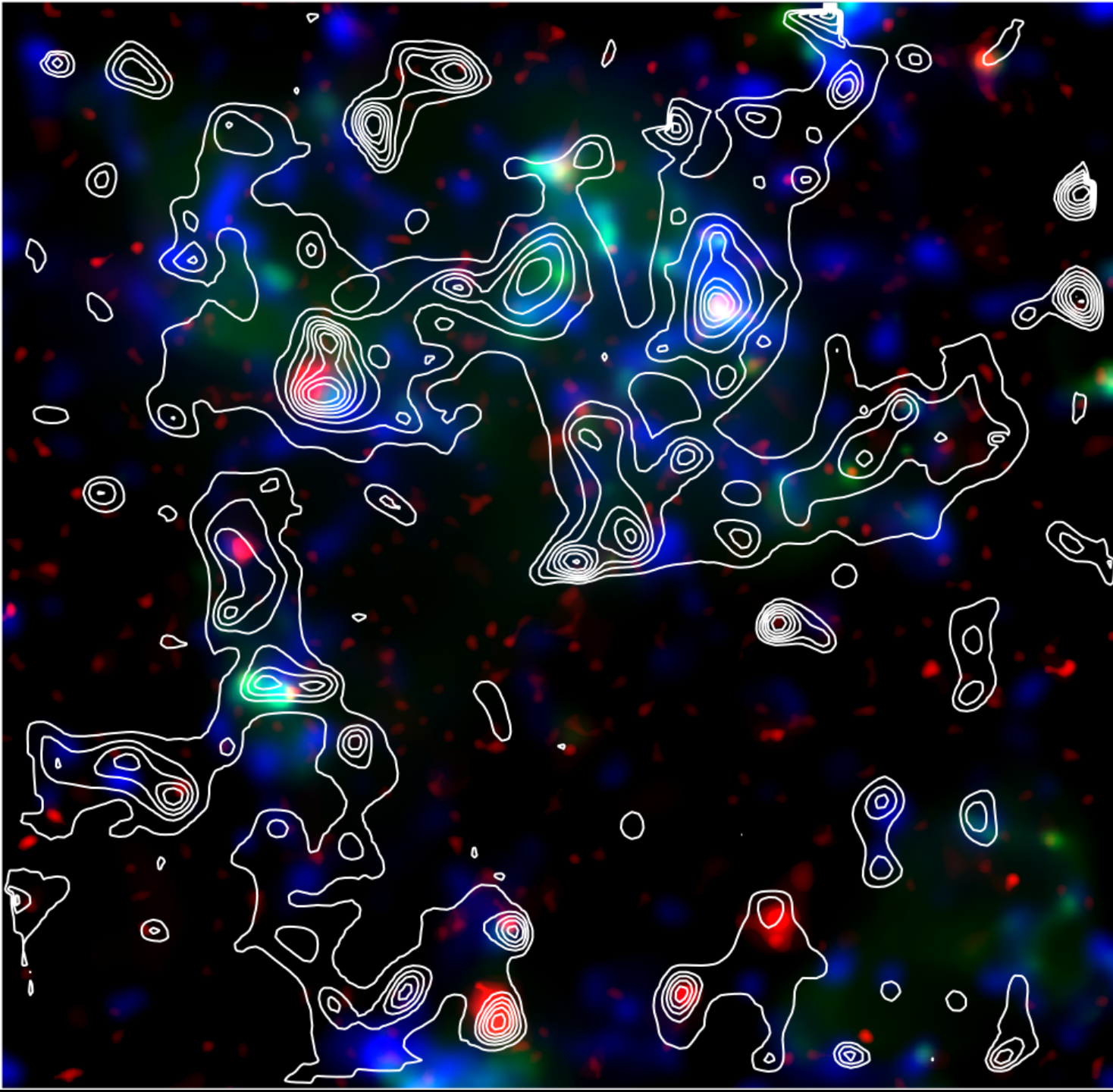
Convergence κ



SPACE

GROUND





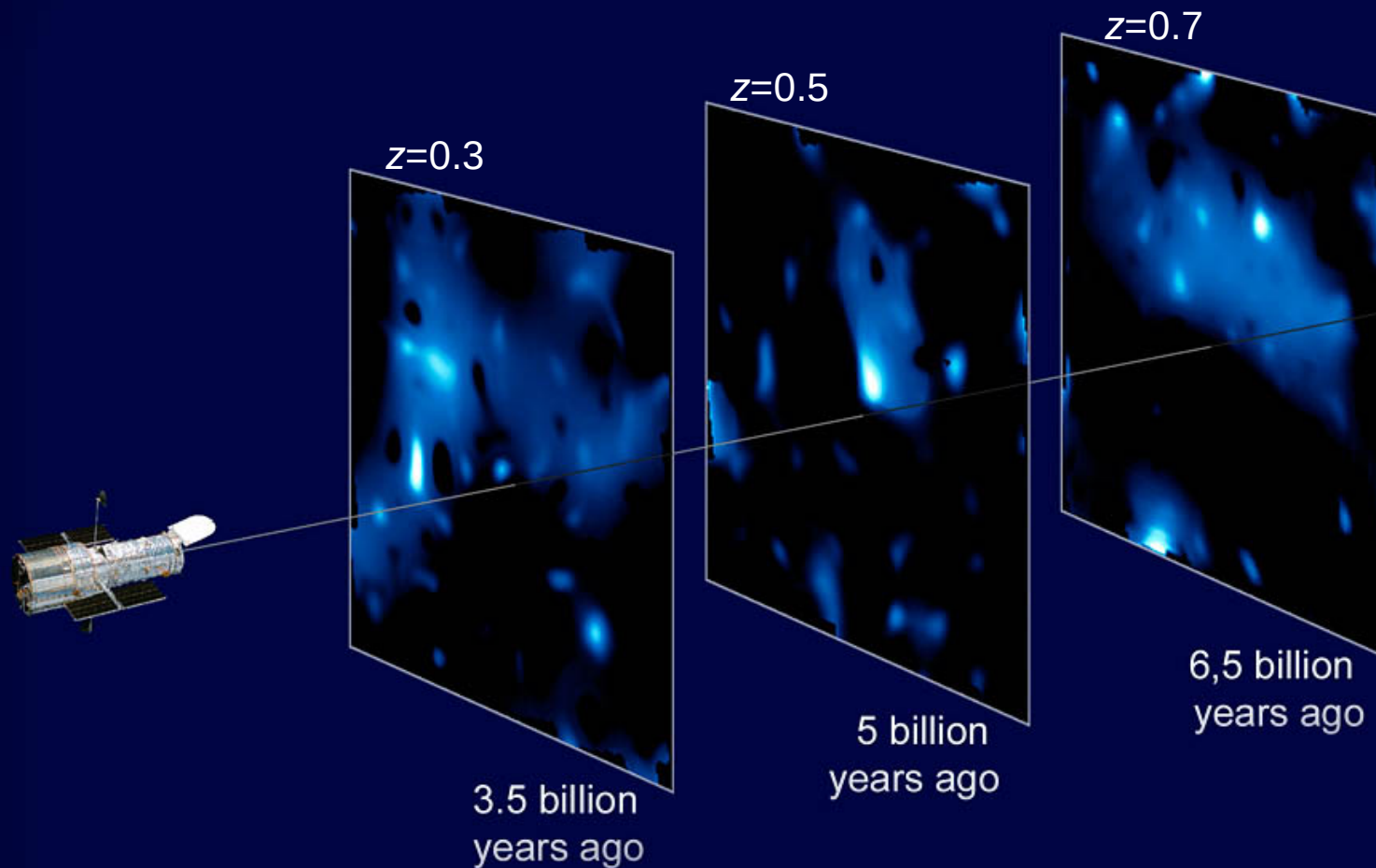
Rozložení hmoty
(HST)

Rentgenové
vyzařování
(XMM-Newton)

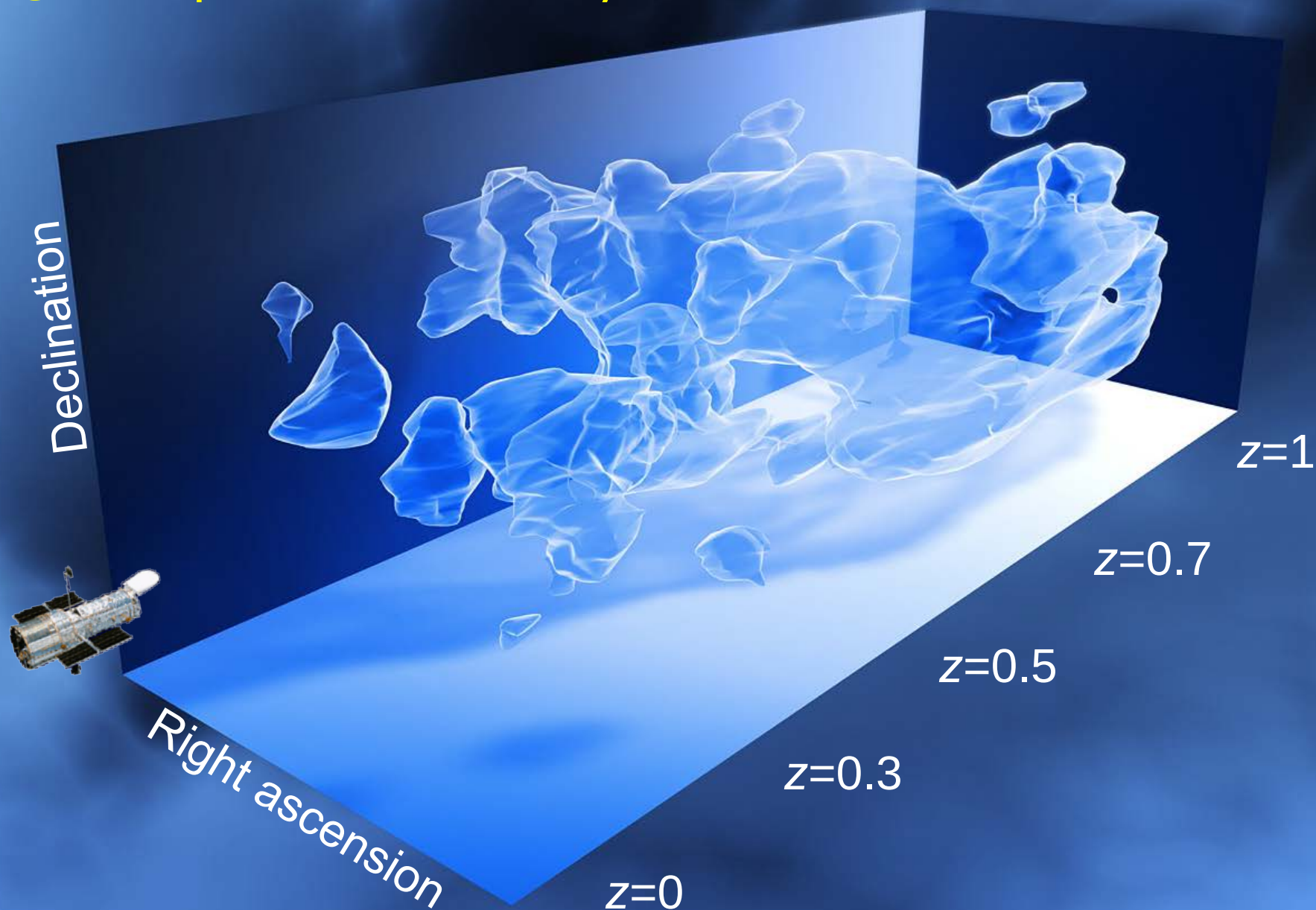
Počet galaxií
(Subaru/CFHT)

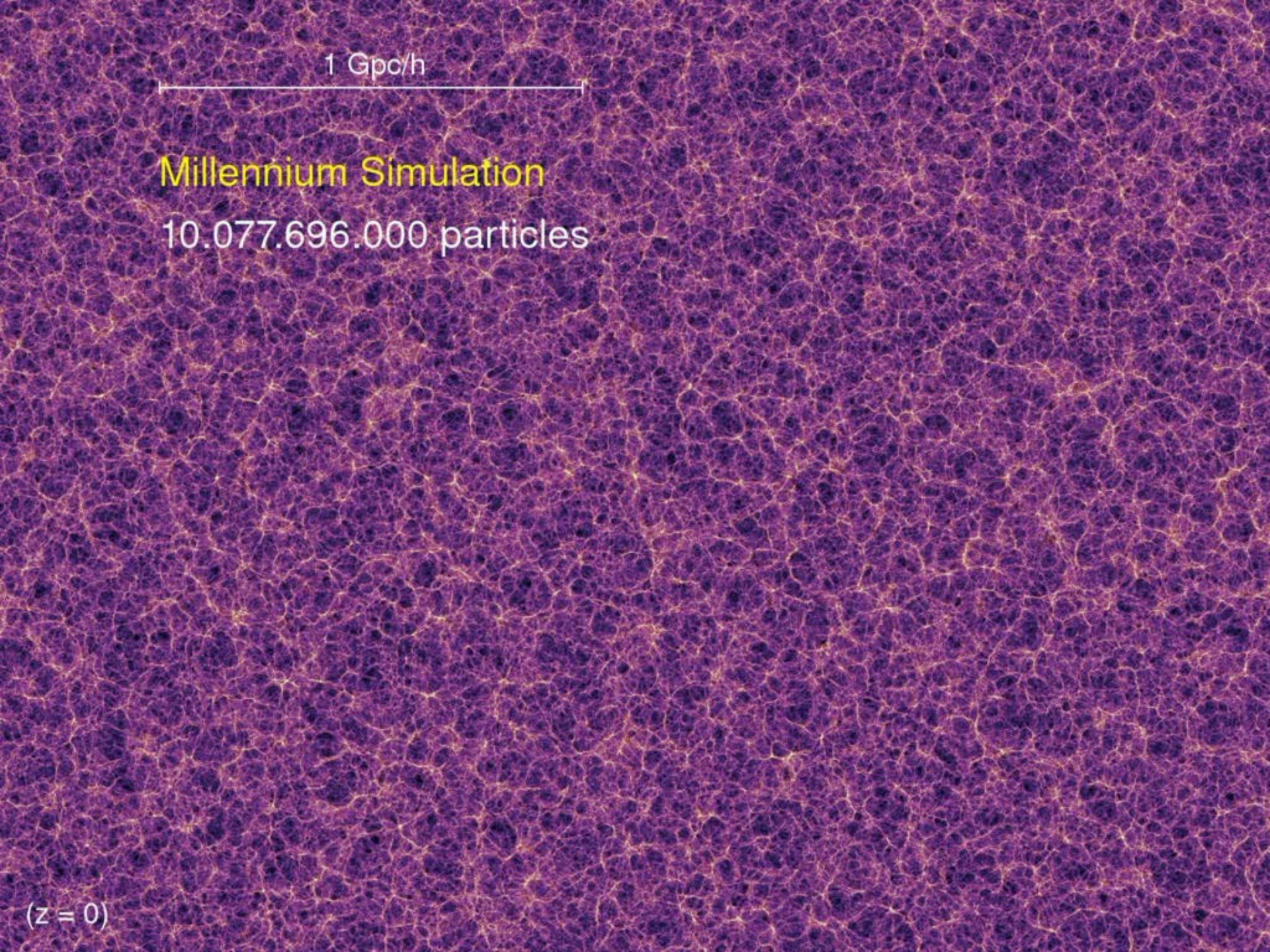
Hmota ve
hvězdách
(Subaru/CFHT)

Tomografické řezy podle vzdálenosti galaxií



3D mapa temné hmoty





A visualization of the cosmic web from the Millennium Simulation. The image shows a dense network of dark purple and blue filaments and nodes, representing the distribution of matter in the universe. The filaments are interconnected, forming a complex, web-like structure. The background is a lighter shade of purple, with the filaments appearing as darker, more concentrated regions. The overall effect is a detailed, high-resolution map of the universe's large-scale structure.

1 Gpc/h

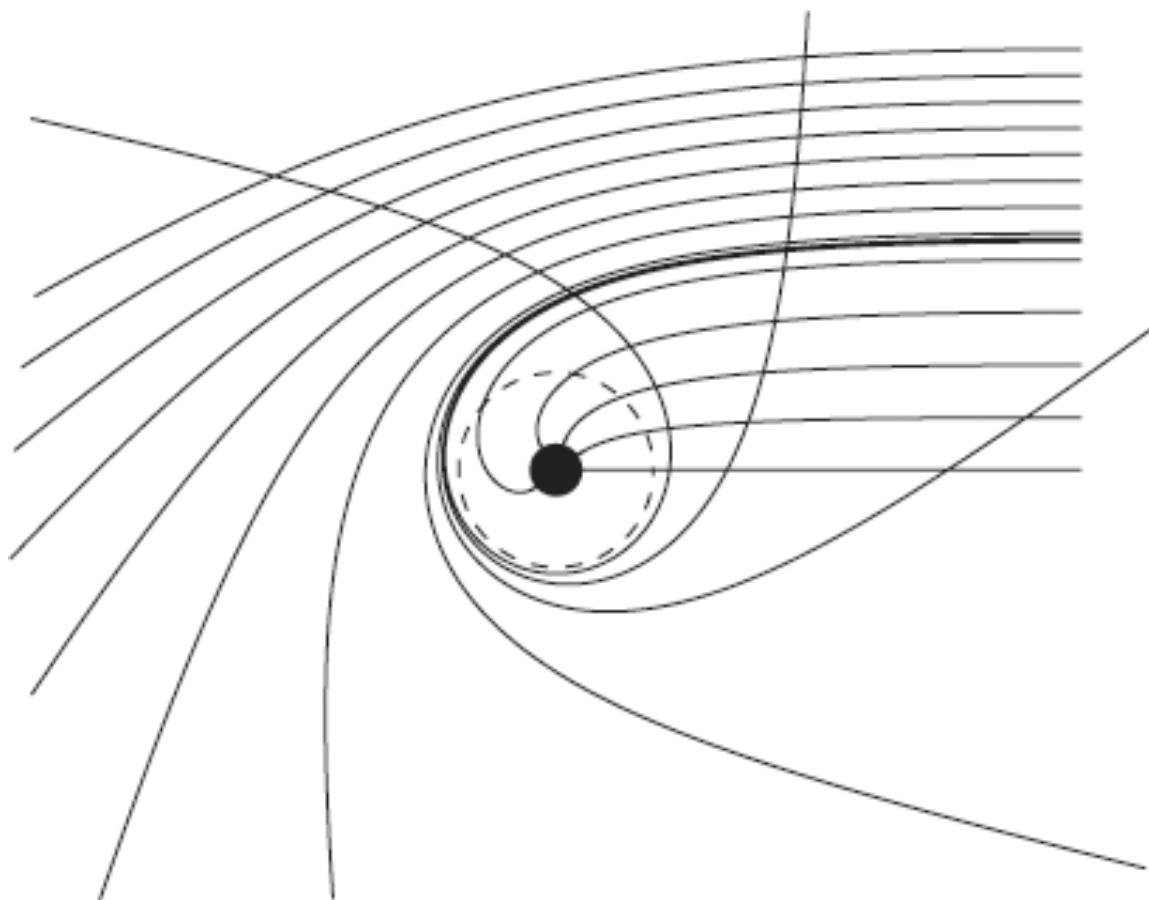
Millennium Simulation

10.077.696.000 particles

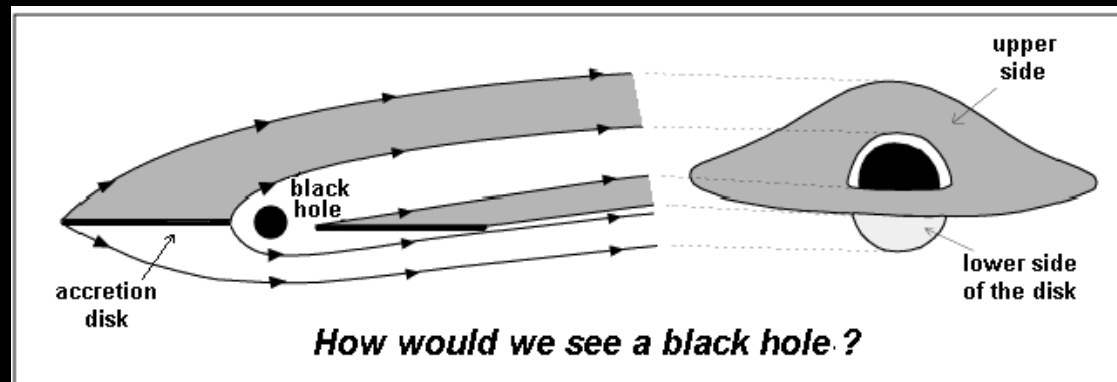
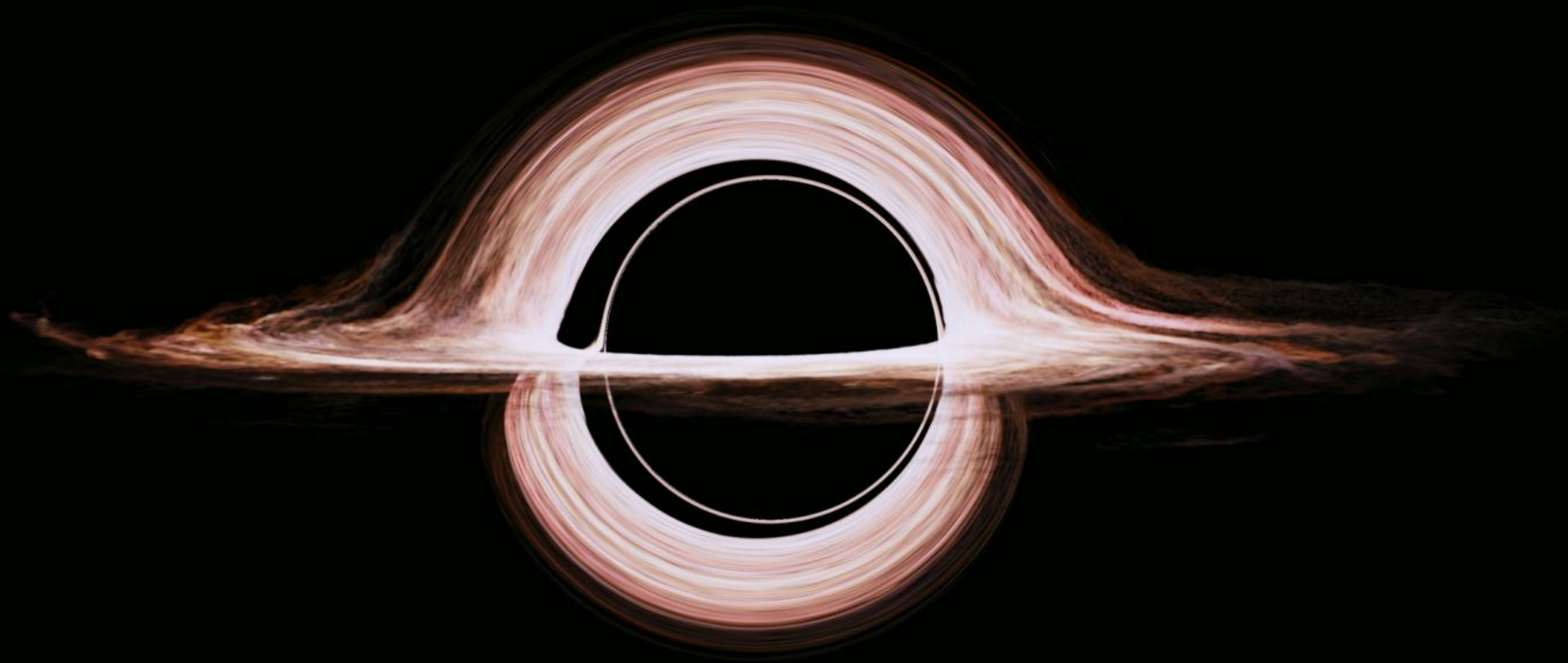
($z = 0$)

Ohyb světla v silném gravitačním poli

– neutronové hvězdy, černé díry



Ohyb světla z akrečního disku kolem černé díry



Gravitační ohyb světla je nástrojem pro

- o experimentální ověření OTR
- o pozorování nejvzdálenějších objektů
- o mapování rozložení hmoty ve vesmíru
- o hledání planet
- o studium povrchů hvězd, kvasarů
- o atd.

