

Soczewkowanie grawitacyjne 6

- Soczewkowanie a efekt selekcji
- Mikrosoczewkowanie QSO
- Technika: “backward ray shooting”
- Ograniczenia modeli źródeł
- Jasne łuki w gromadach galaktyk

Grawitacyjne wzmocnienie: wpływ na selekcję

Gdyby wszystko wzmocnić A razy...

$$\mathcal{N}_{mult}(> F) = \frac{P_{mult}}{A} \mathcal{N}\left(> \frac{F}{A}\right)$$

Wzmocnienie/powiększenie zwiększa strumień energii i zmniejsza liczbę obiektów w kącie bryłowym...

Uwzględniając prawdopodobieństwo wzmocnienia:

$$\mathcal{N}_{mult}(> F) = P_{mult} \int dA \frac{p(A)}{A} \mathcal{N}\left(> \frac{F}{A}\right)$$

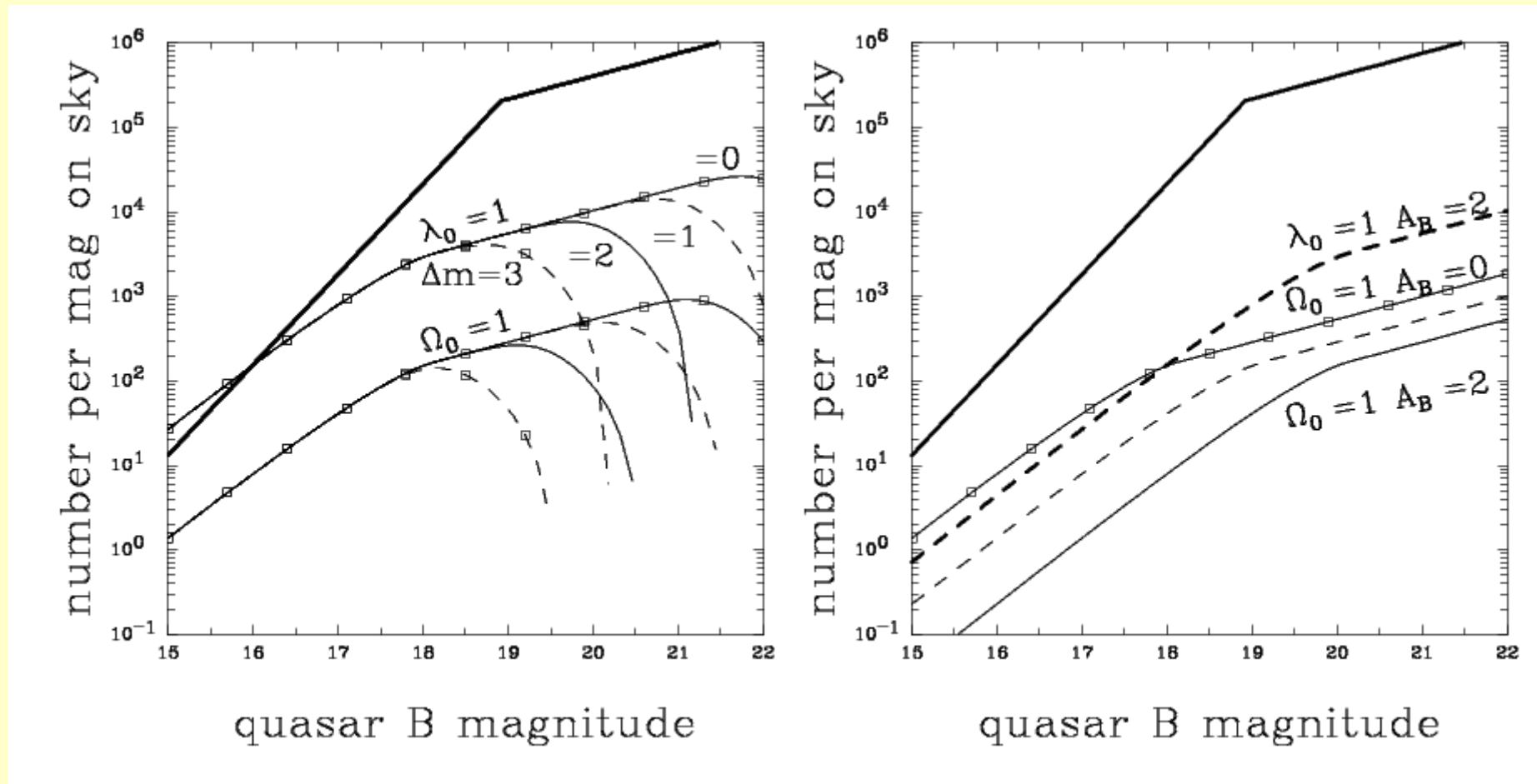
$$B(F) \stackrel{def}{=} \frac{1}{\mathcal{N}(> F)} \int dA \frac{p(A)}{A} \mathcal{N}\left(> \frac{F}{A}\right)$$

$$\mathcal{N}(> F) \sim F^{-\alpha} \quad p(A) = \left(\frac{2}{A}\right)^3 \Rightarrow B(F) = \frac{2^\alpha}{3 - \alpha}$$

Czynnik obciążenia

<---dla SIS

Grawitacyjne wzmocnienie: wpływ na selekcję



Gruba linia: f-ja świecenia QSO. Cieńsze: QSO o wielokrotnych obrazach, „przesunięte” w kierunku jaśniejszych obiektów. (zaznaczono też wpływ ekstynkcji w soczewce).

“Einstein Cross”: Q 2237+0305

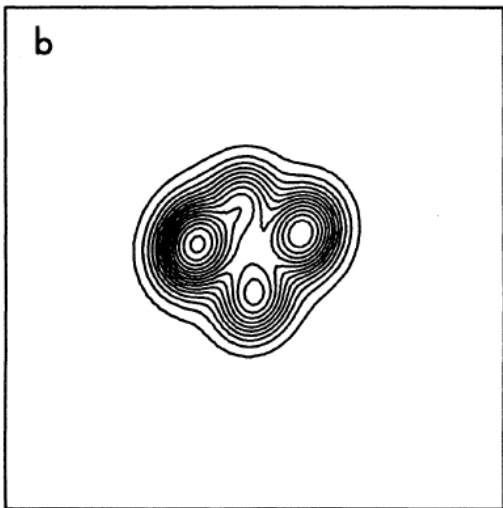
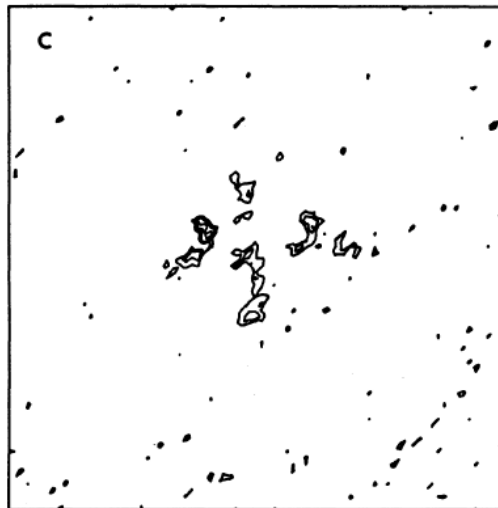
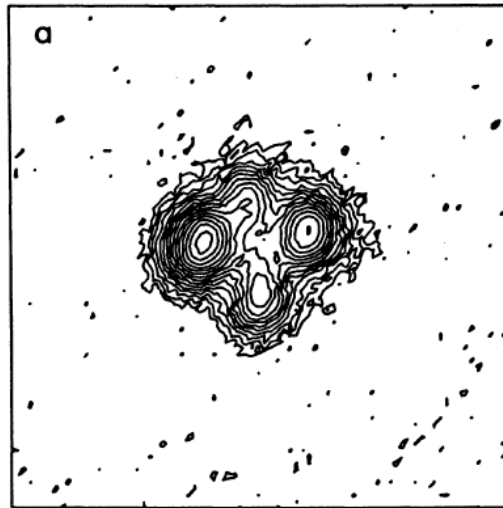


FIG. 2. Contour maps of the central 8×8 arcsec region of the CFHT R frame. The orientation is the same as in Fig. 1: (a) four lensed quasar images (+ nucleus) after removing the remainder of the galaxy. Component A is to the left, B to the right, C at the bottom, and D at the top of the picture. A is significantly brighter than B; (b) five component PSF model fit of the central region; (c) difference map obtained by subtracting (b) from (a). The small amount of residual structure is ~ 5 mag fainter than the individual quasar components and is almost certainly caused by imperfect modeling of the central region. There is no evidence for any further resolved lens components.

$z_{\text{QSO}}=1.69$
 $z_{\text{gal}}=0.039$

[Irwin et al. (1989) AJ, 98, 1989]

Q 2237+0305 (zmienność)

[Corrigan et al. (1991)
+Ostensen et al. (1996)]

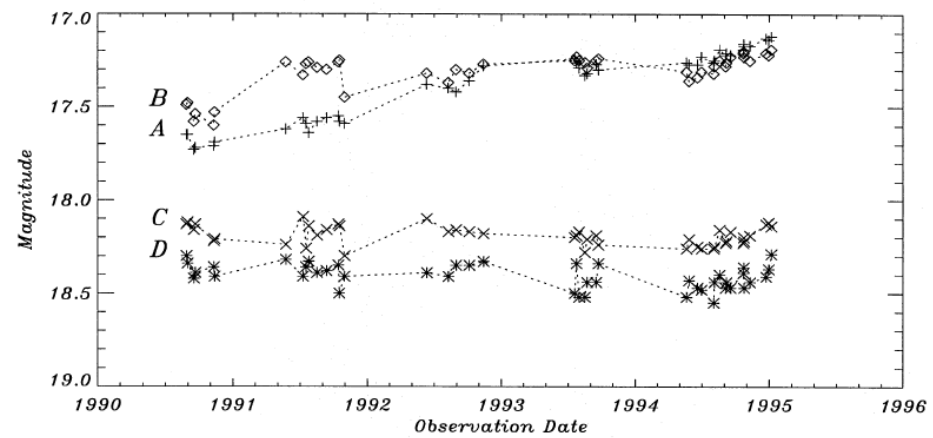
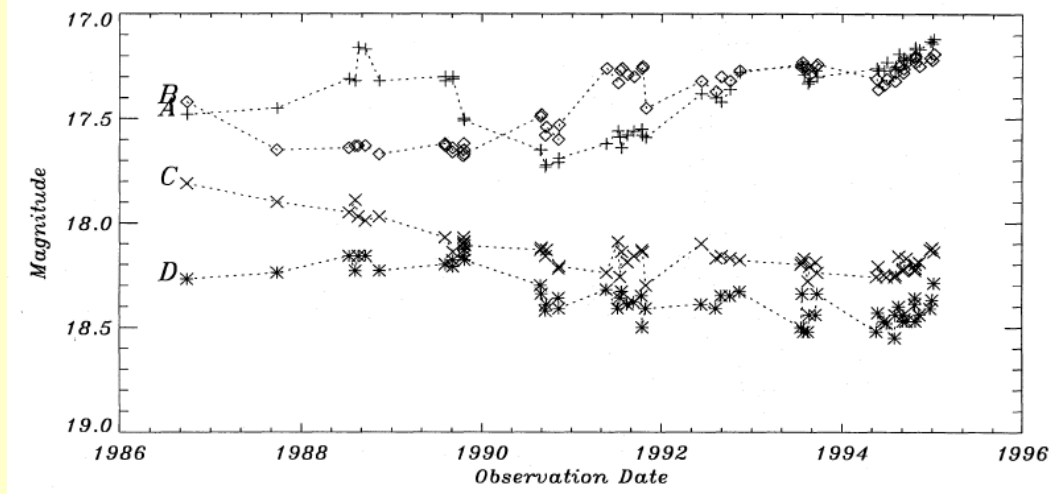
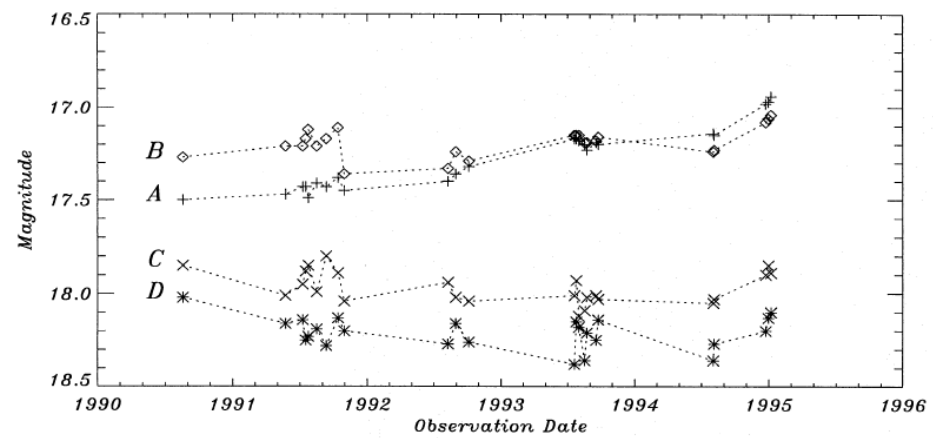


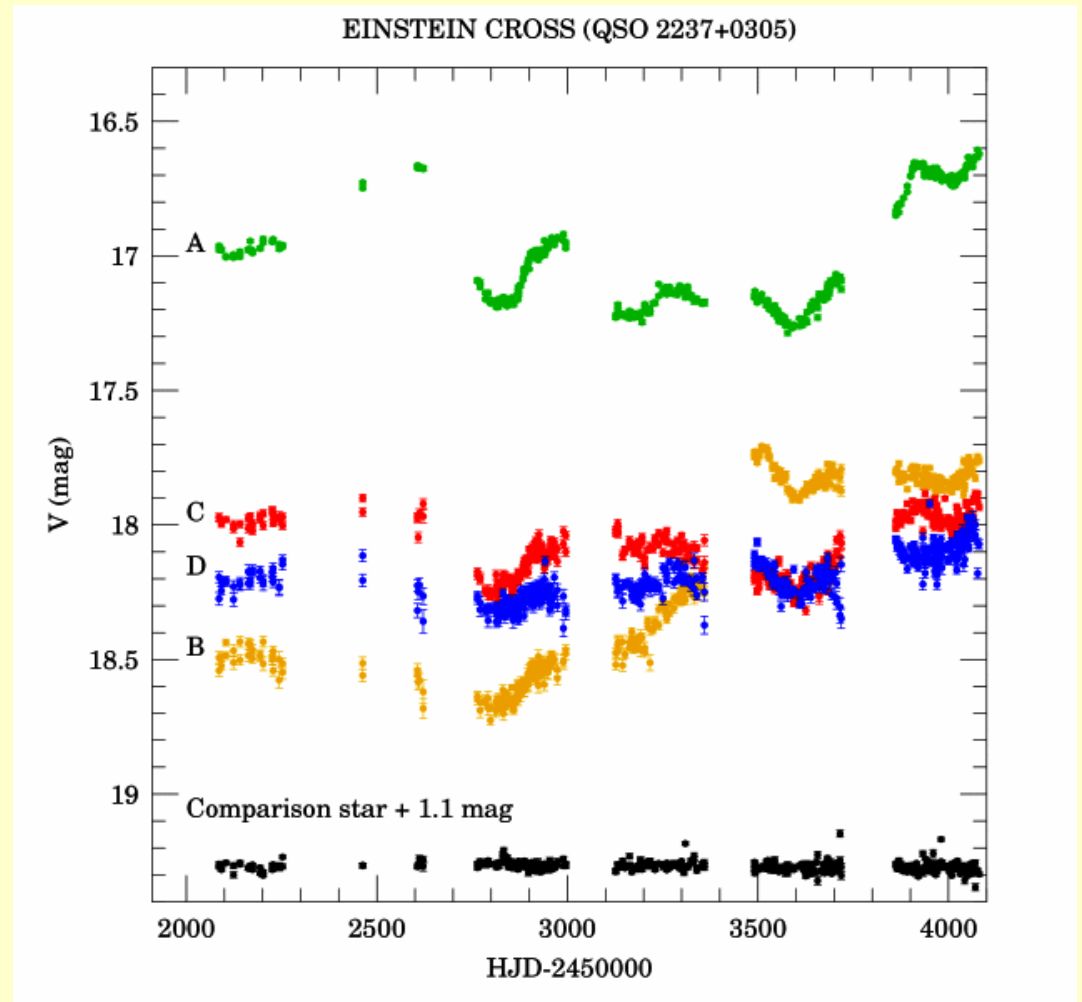
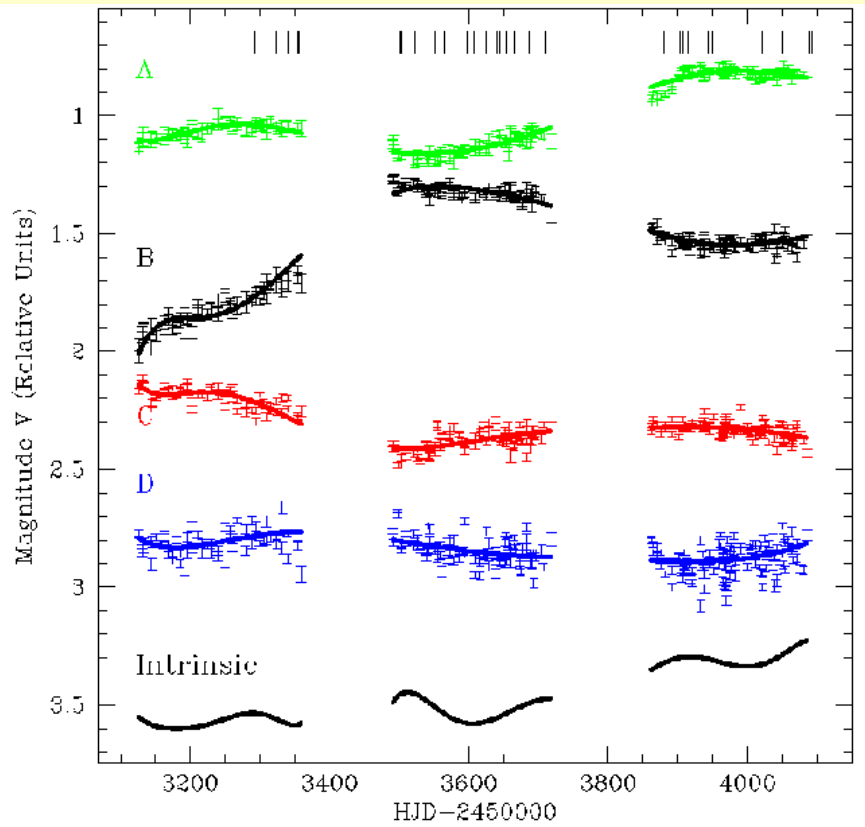
Fig. 2. R-band lightcurve for the four components of the Einstein Cross

(4m teleskopy w różnych krajach)



[Ostensen et al. (1996) A&A, 309, 59]

Q 2237+0305



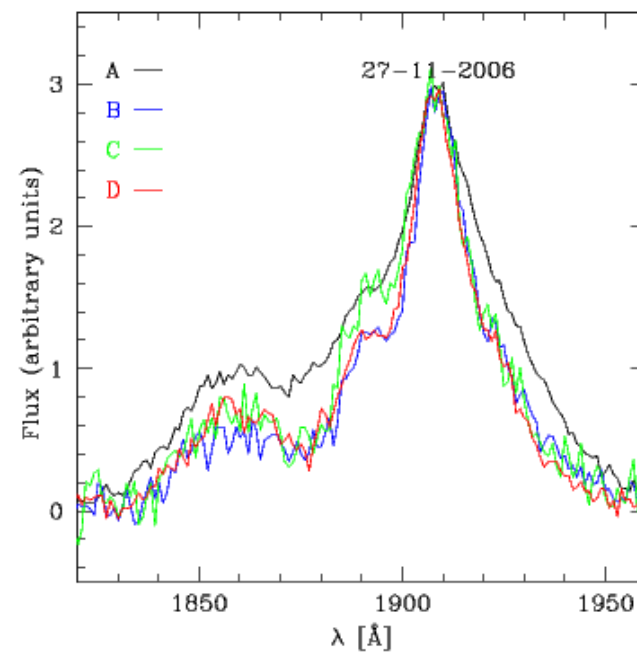
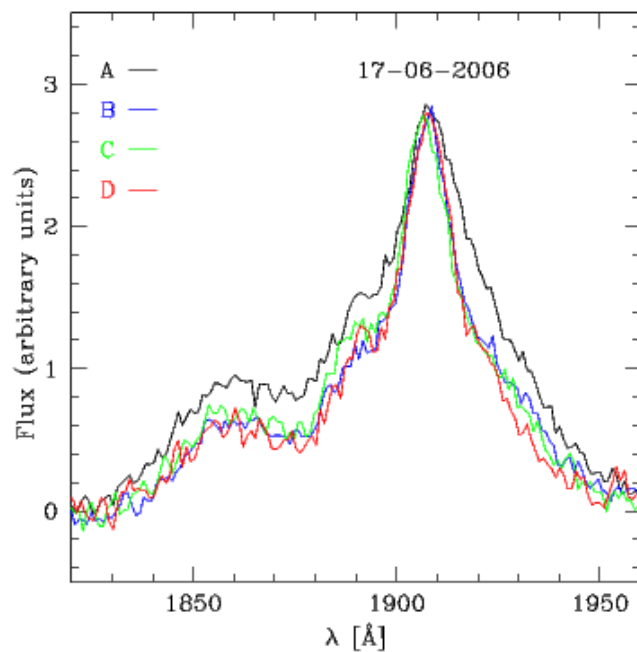
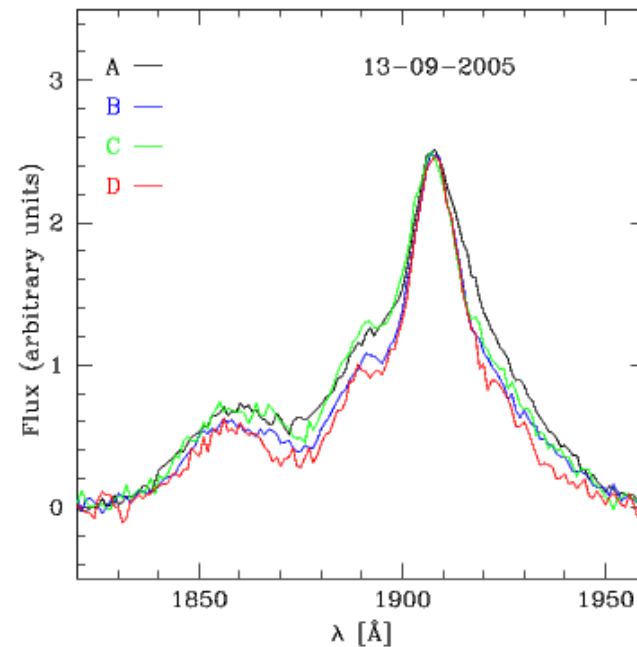
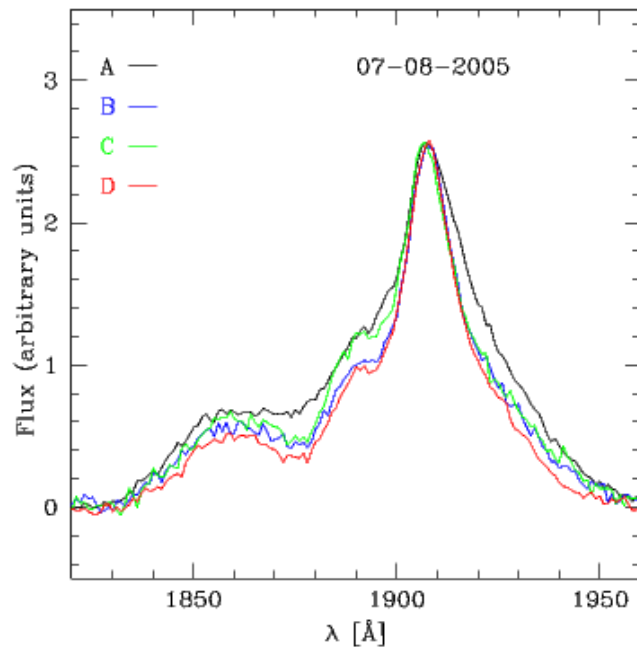
**Dekompozycja: zmienność
wewnętrzna +
mikrosoczewkowanie**

(1,3m warszawski teleskop w Chile)

[OGLE III, 2001 - 2007]

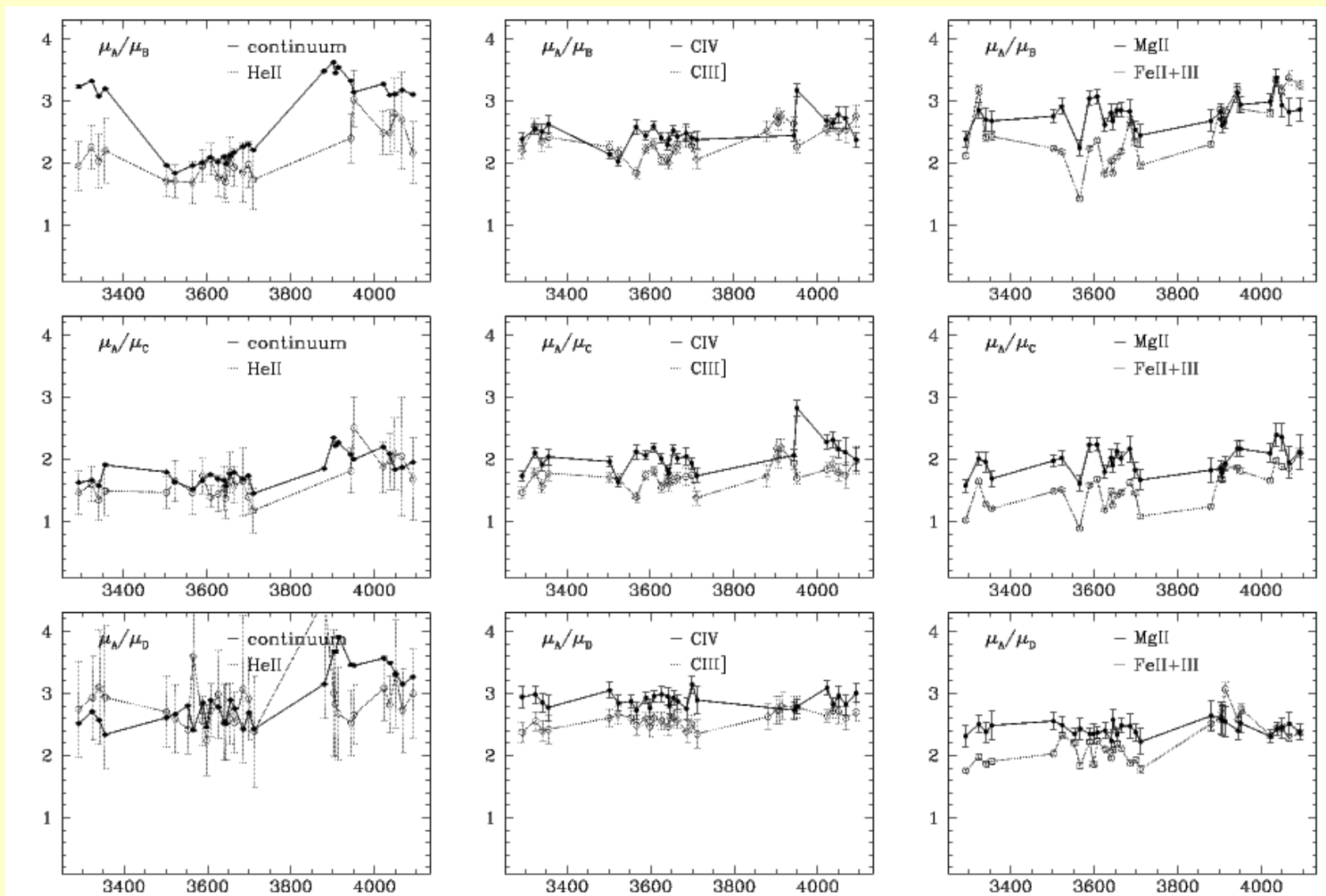
Q 2237+0305

(VLT – też w Chile:
porównanie profili linii
CIV] dla poszczególnych
obrazów w różnych
epokach)



[Eigenbrod et al. (2007) astro-ph/0709.2828]

Q 2237+0305



(Porównanie zmienności
w różnych zakresach)

[Eigenbrod et al. (2007) astro-ph/0709.2828]

Q 2237+0305

- **Zmienności 4 obrazów nie są skorelowane (w tym przypadku różnice czasu propagacji pomiędzy obrazami są rzędu dni)**
- **Zmieniają się też kształty i natężenie linii widmowych**

Mikrosoczewkowanie?

$$\Sigma_{crit} \stackrel{def}{=} \frac{c^2}{4\pi G D} \quad D = \frac{d_{OL} d_{OS}}{d_{OS}}$$

$$P = \frac{N \cdot \pi r_E^2}{S} = \frac{N \pi \frac{4Gm}{c^2} D}{S} = \frac{Nm}{S} \cdot \frac{4\pi G D}{c^2} \equiv \frac{\langle \Sigma \rangle}{\Sigma_{crit}}$$

$$\frac{10^{11} M_{\odot}}{(10 \text{ kpc})^2} = 10^3 \frac{M_{\odot}}{\text{pc}^2} = 0.2 \frac{g}{\text{cm}^2}$$

$$\frac{10^{10} M_{\odot}}{(1 \text{ kpc})^2} = 10^4 \frac{M_{\odot}}{\text{pc}^2} = 2 \frac{g}{\text{cm}^2}$$

$$D = 1 \text{ kpc} \Rightarrow \Sigma_{crit} = 3 \times 10^5 \frac{g}{\text{cm}^2}$$

$$D = 100 \text{ Mpc} \Rightarrow \Sigma_{crit} = 3 \frac{g}{\text{cm}^2}$$

N punktowych mas m na powierzchni S prowadzi do soczewkowania z prawdopodobieństwem zależnym od stosunku średniej gęstości powierzchniowej do gęstości krytycznej.

Gwiazdy typowej galaktyki powodują zjawiska mikrosoczewkowania z b. niskim prawdopodobieństwem, jeśli źródło i obserwator leżą wewnątrz niej, ale zjawiska takie stają się prawdopodobne, gdy galaktyka leży na drodze promieni z odległego QSO.

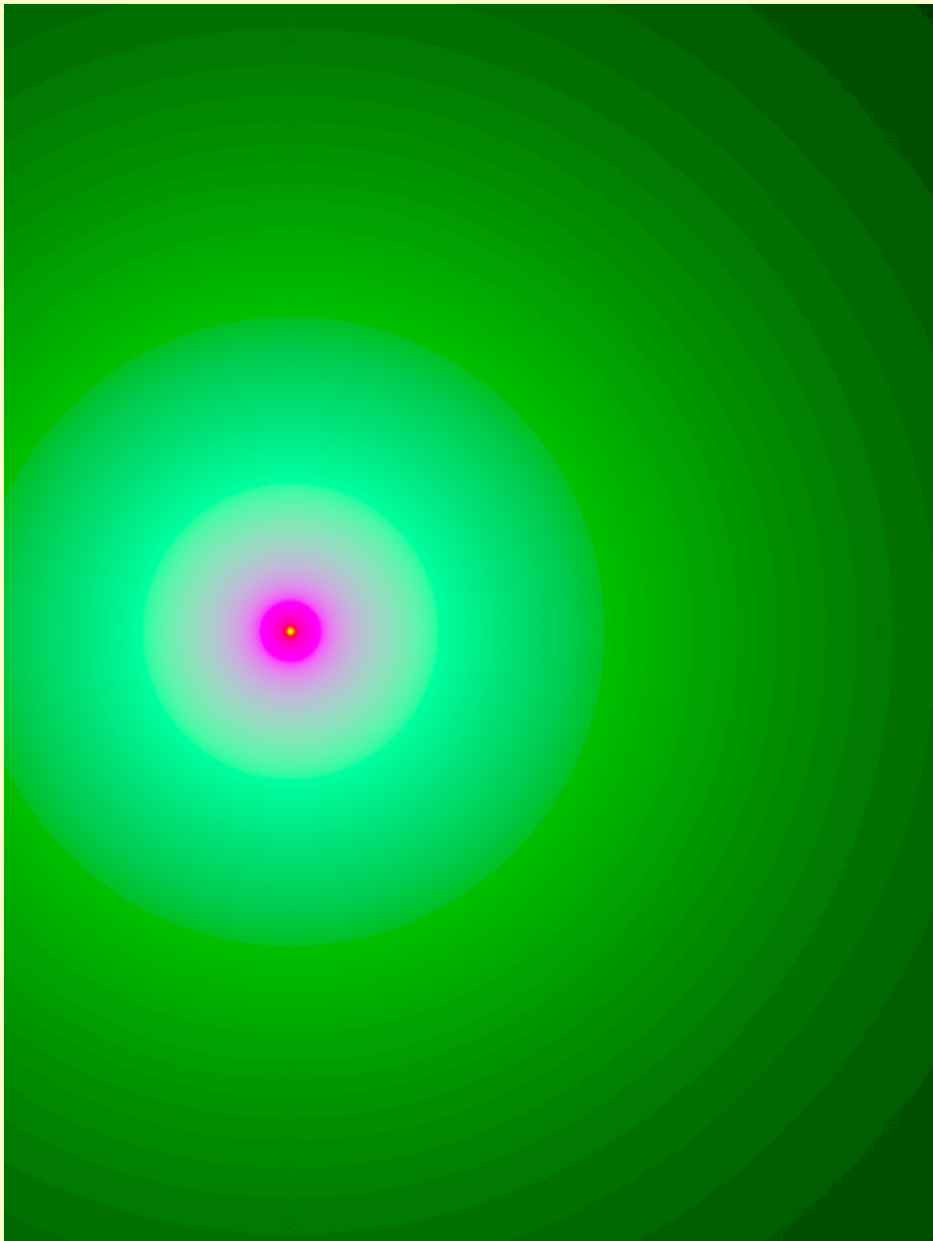
Ray shooting: poszukiwanie obrazów

- Interesujący obszar możliwych położen obrazów [np prostokąt] dzielimy na [kwadratowe] **komórki**. Każdej komórce przypisujemy element dwuwymiarowej tablicy i nadajemy mu wartość **zero**. Ustalamy położenie **rozciągłego** źródła.
- Rozważamy promienie docierające do obserwatora ze środków komórek.
- Używając równania soczewki sprawdzamy, w jakich punktach promienie przecinają płaszczyznę źródła. Jeśli jakiś punkt należy do źródła, element tablicy przypisany promieniowi otrzymuje wartość **jeden**. (Albo kolor, jasność powierzchniową, kierunek polaryzacji – jakąkolwiek cechę źródła w miejscu trafienia).
- **Niezerowe** elementy tablicy tworzą obrazy źródła. Cała tablica: mapę [fragmentu] nieba.
- [Sprawdzamy tylko obecność obrazów w **ograniczonym** obszarze i ze **skończoną** rozdzielczością!]

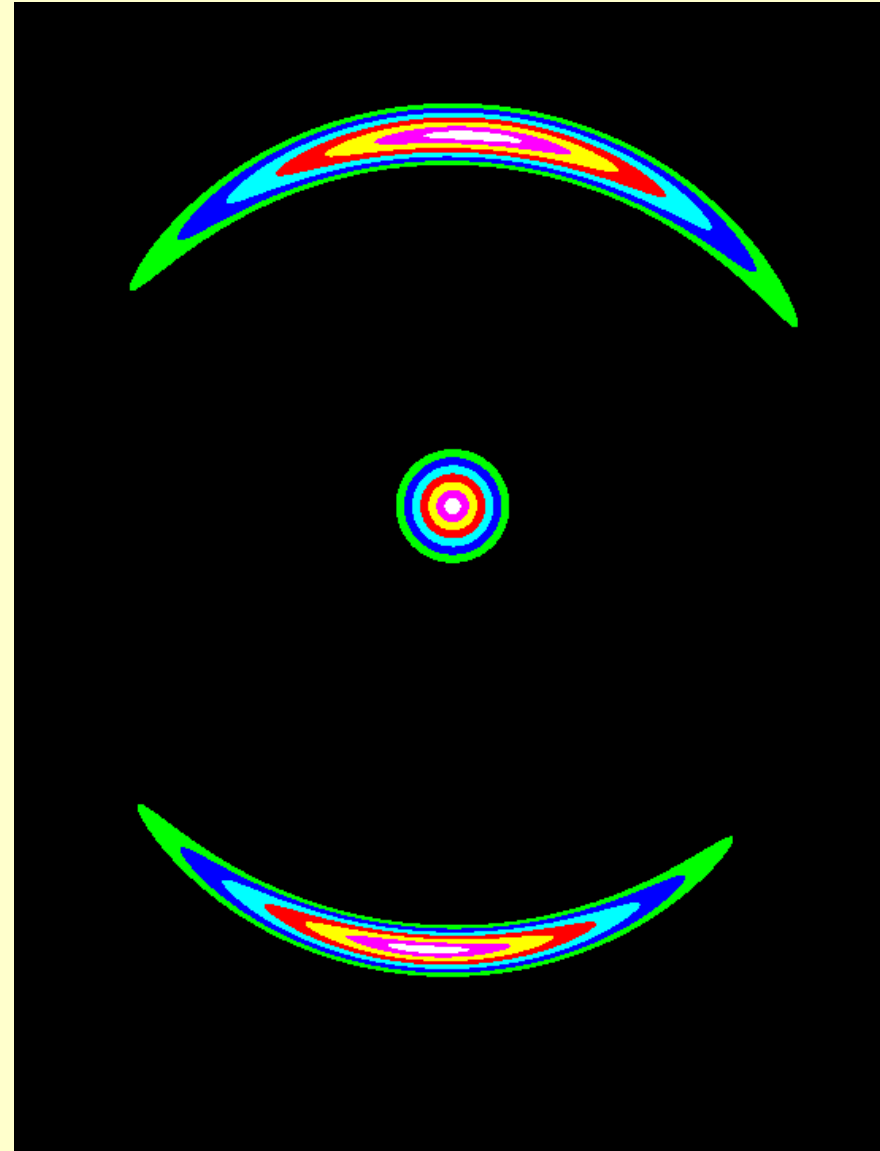
Ray shooting: mapa wzmocnienia

- Interesujący obszar możliwych położzeń źródła [np prostokąt] dzielimy na [kwadratowe] **komórki**. Każdej komórce przypisujemy element dwuwymiarowej tablicy i nadajemy mu wartość **0**.
- Rozważamy wielką liczbę promieni docierających do obserwatora z fragmentu sfery niebieskiej, w którym spodziewamy się obrazów źródła. Promienie powinny pokrywać ten fragment sfery jednorodnie.
- Używając równania soczewki sprawdzamy, jakim położeniom źródeł odpowiadają promienie; jeśli wypada to w którejś z **komórek** dodajemy **1** do właściwego elementu tablicy.
- Jeśli każdą z **komórek** uważać za niewielkie źródło o ustalonym położeniu, to wartość odpowiadającego jej elementu tablicy jest proporcjonalna do obserwowanego strumienia energii od takiego źródła.
- Normalizacja (...) pozwala przekształcić tablicę w **mapę wzmocnienia**.

Ray shooting: 1 punktowa masa

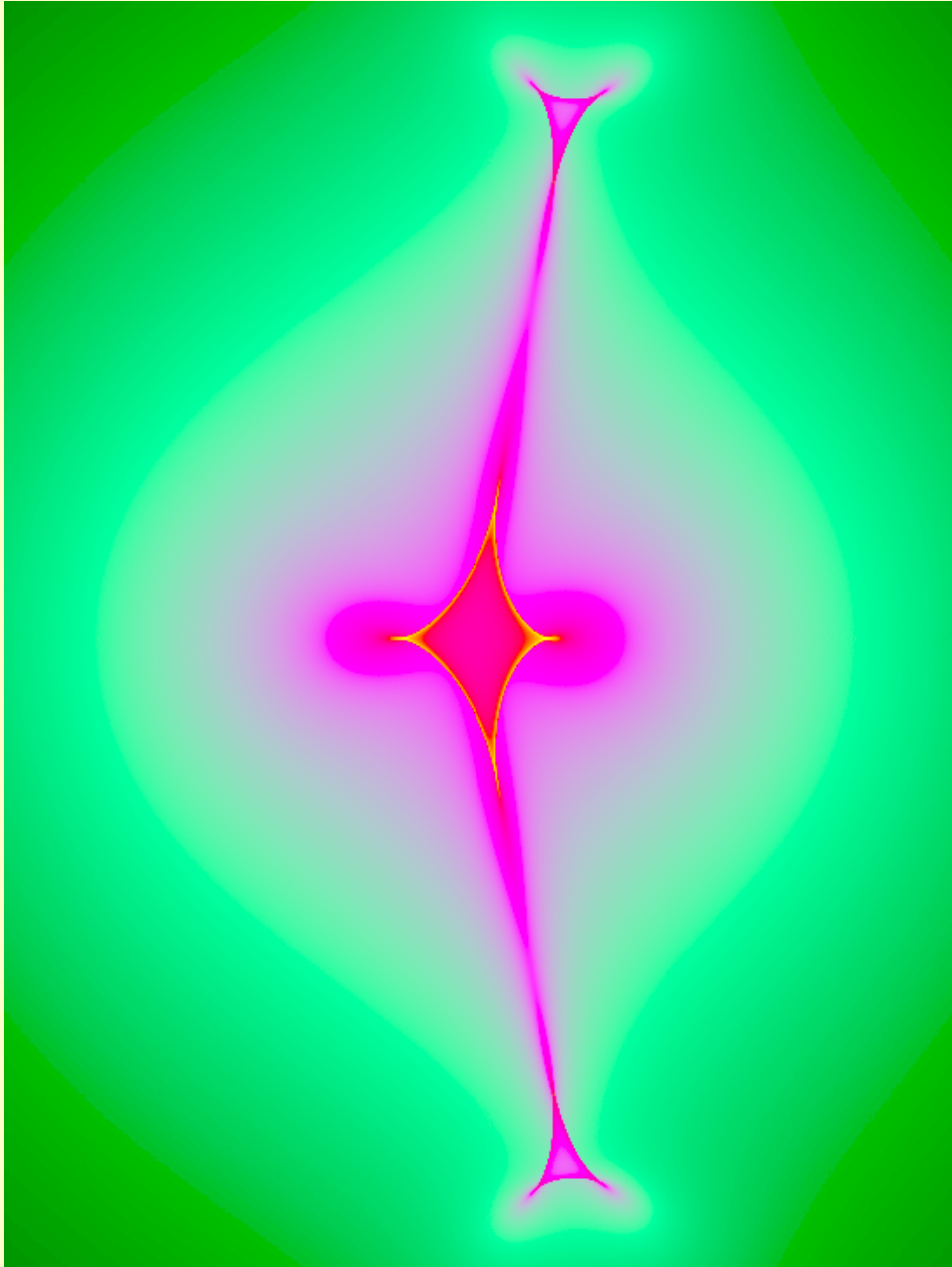


Mapa wzmocnienia

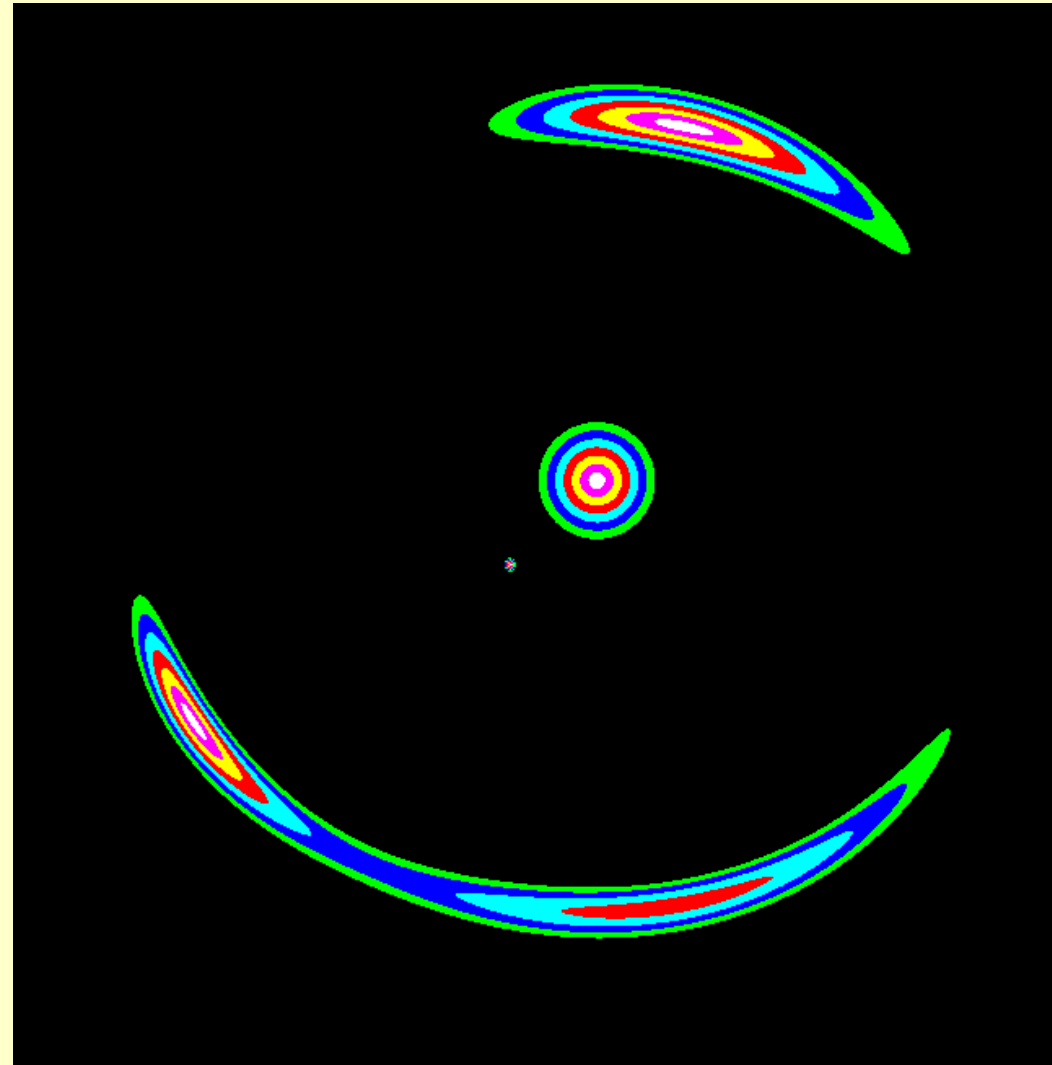


Źródło (koła) i jego obrazy.

Ray shooting: 2 punktowe masy

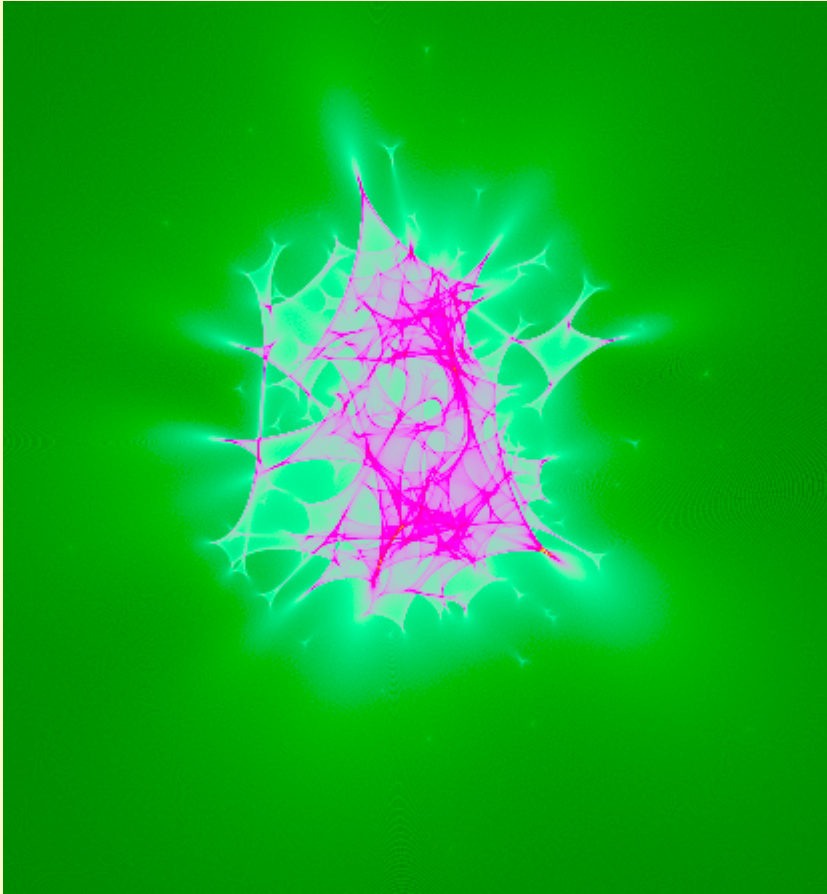


Mapa wzmacnienia

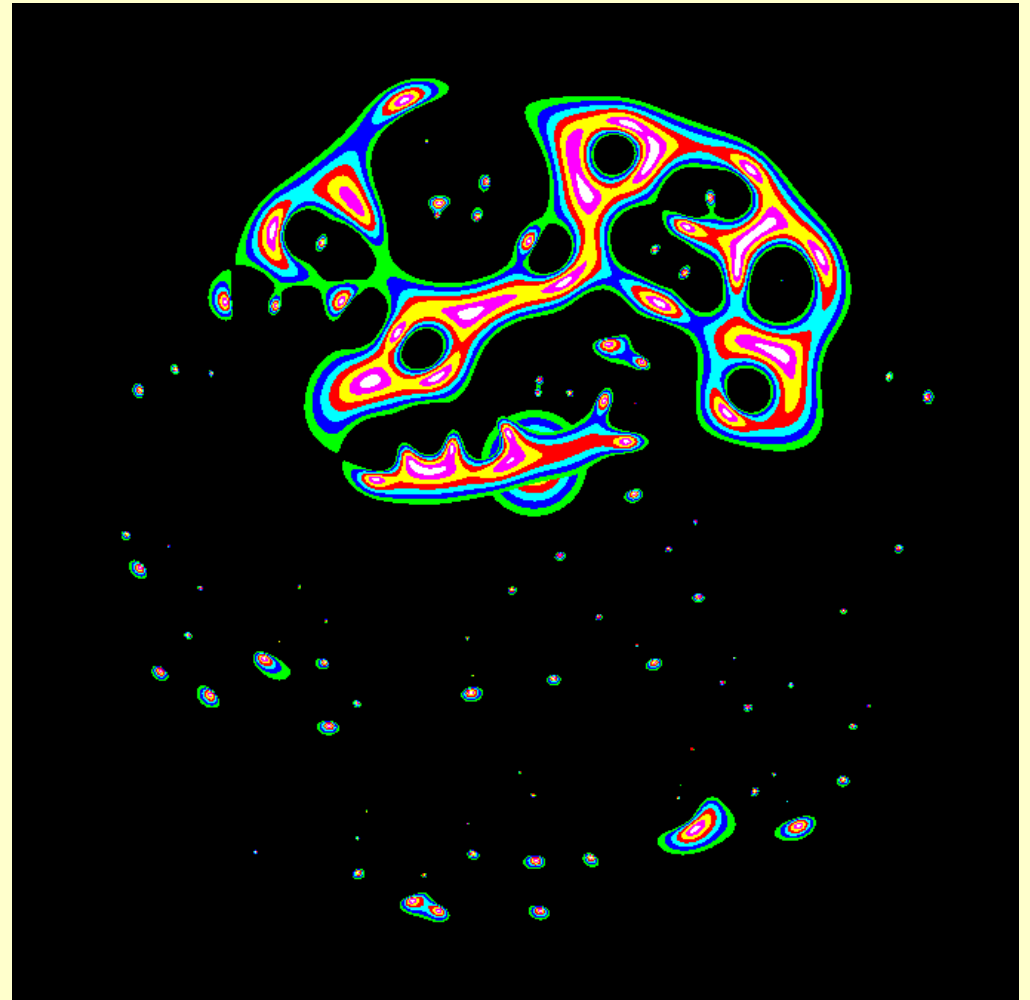


Źródło (koła) i jego obrazy.

Ray shooting: 100 punktowych mas



Mapa wzmocnienia



Źródło (koła) i jego obrazy

(100 jednakowych mass rozrzuconych losowo w kole o promieniu $1.1 \cdot r_E$ \leftrightarrow średnia gęstość masy 0.82 krytycznej)

Ray shooting: mikrosoczewkowanie QSO

$$\vec{b}_0 = A \cdot \vec{b} + \sum_i m_i \frac{\vec{b}_i - \vec{b}}{(\vec{b}_i - \vec{b})^2}$$

$$\|A_{ij}\| = \left\| \begin{array}{cc} 1 - \kappa - \gamma & 0 \\ 0 & 1 - \kappa + \gamma \end{array} \right\|$$

$$m_i = \frac{M_i}{\langle M \rangle} \quad r_E = \sqrt{\frac{4G \langle M \rangle}{c^2}} D$$

Jednostki: promień Einsteina

Kappa: bezwymiarowa gęstość powierzchniowa składowej rozproszonej

Gamma: ścinanie pochodzące od „całej” soczewki

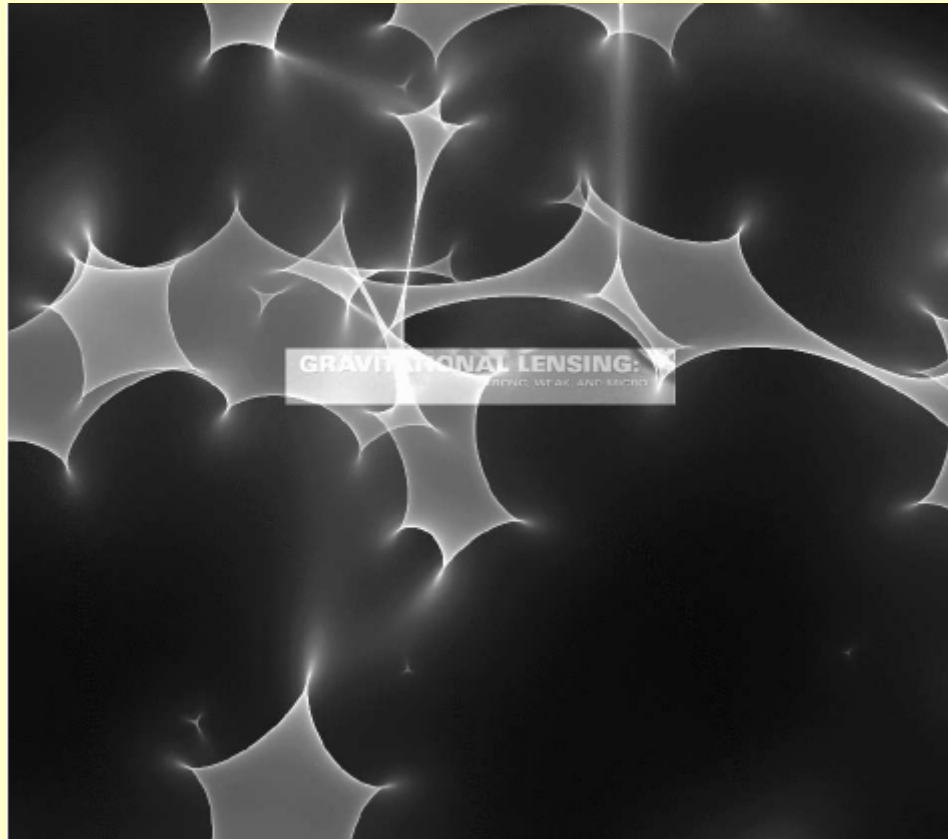
Układy współrzędnych: początki w środku *makroobrazu* i źródła. Osie wzdłuż głównych kierunków ścinania.

Dla otrzymania *dużej* mapy może być konieczne uwzględnienie wpływu *tysięcy* gwiazd na bieg promieni. To może wymagać nietrywialnych metod numerycznych...

Ray shooting: mikrosoczewkowanie QSO

- Mapa wzmocnień jest tylko jedną z wielu możliwych realizacji metody Monte Carlo
- Tylko statystyczne właściwości wygenerowanych w wielu realizacjach Monte Carlo syntetycznych krzywych zmian blasku można „porównywać” ze statystycznymi właściwościami obserwowanych krzywych. (Np.: prawdopodobieństwo, że w czasie 1 roku nastąpi zmiana jasności obrazu o $>1\text{mag}$)
- Można szukać parametrów soczewki/mikrosoczewek, które dają najlepszą zgodność statystycznych cech krzywych obu rodzajów.

Ray shooting: przykład



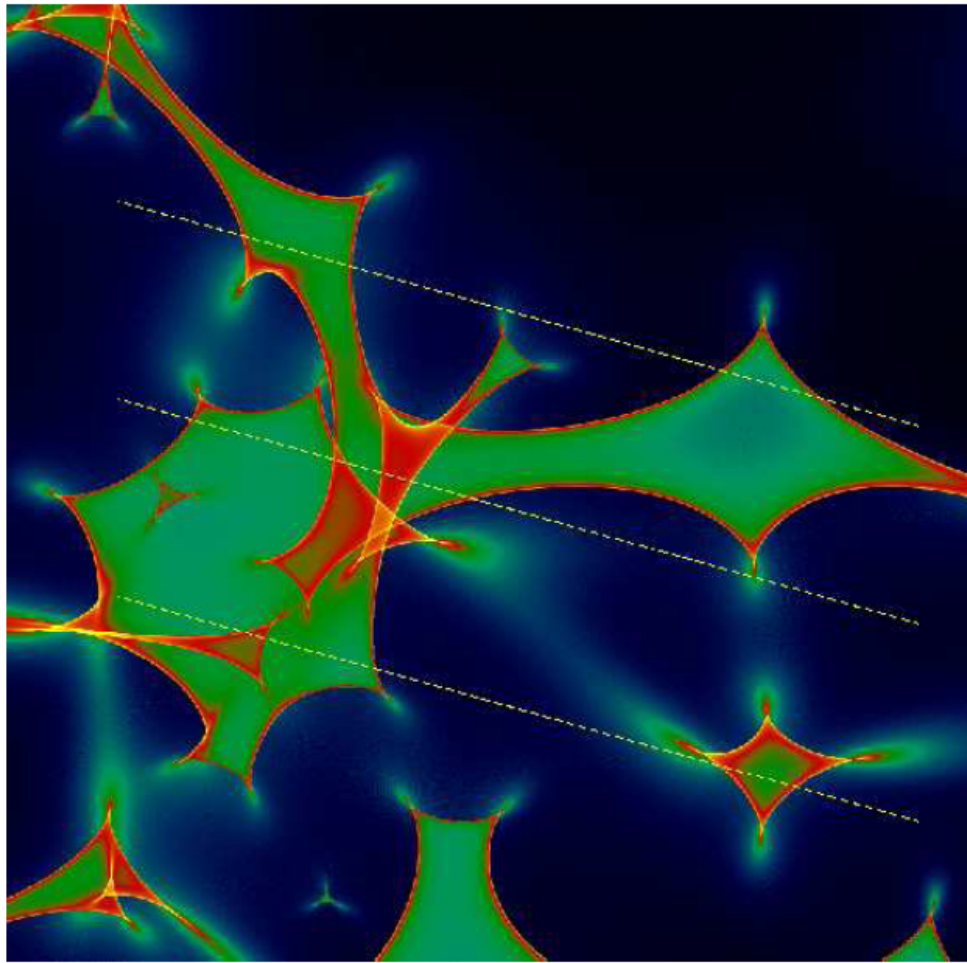
Mapa wzmocnienia (fragment) + „źródło”



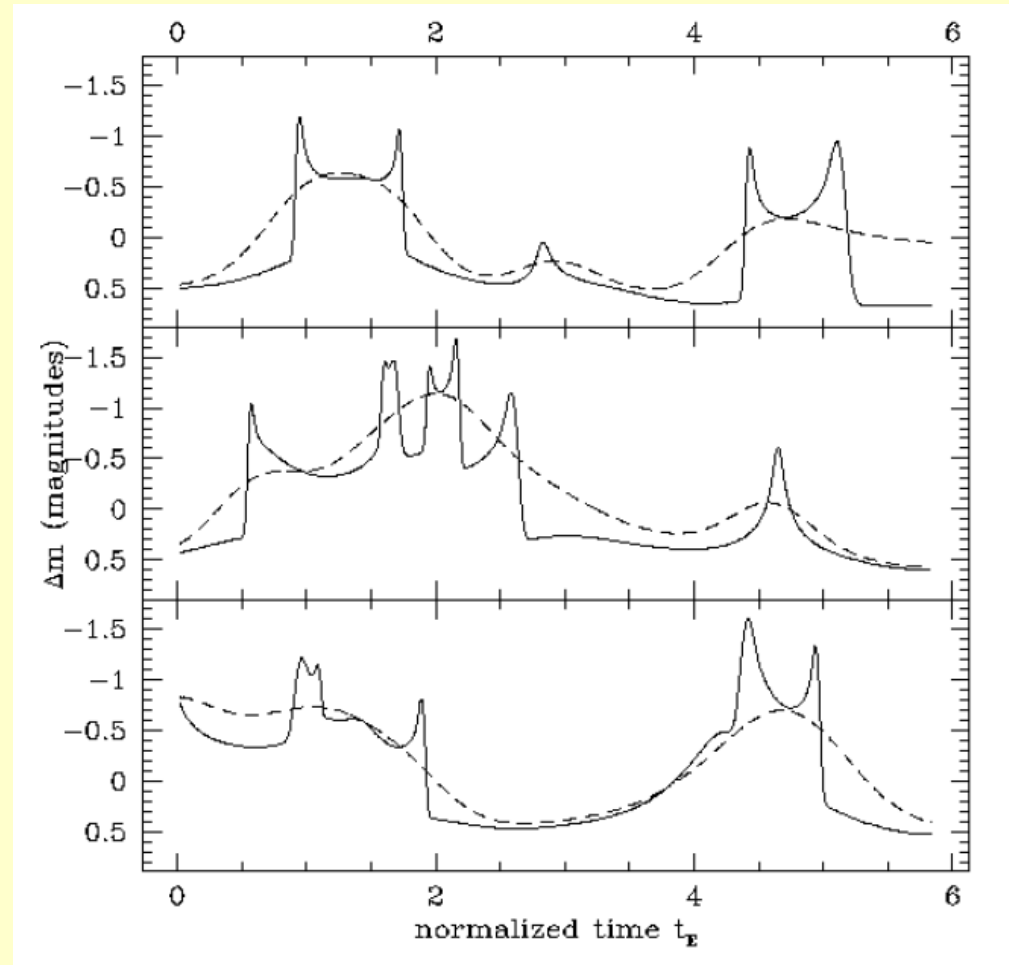
Obraz „źródła” po lewej

[Wambsganss (2006) Saas-Fee Lectures, Springer-Verlag: Berlin, pp 457.]

Ray shooting: realistyczne zastosowanie

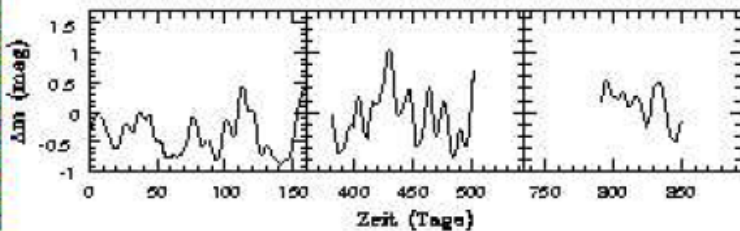
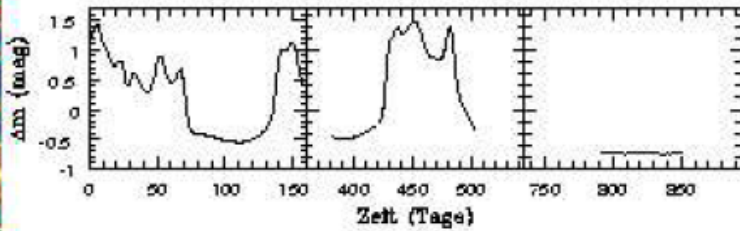
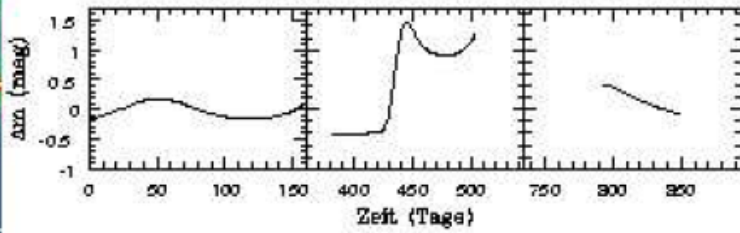
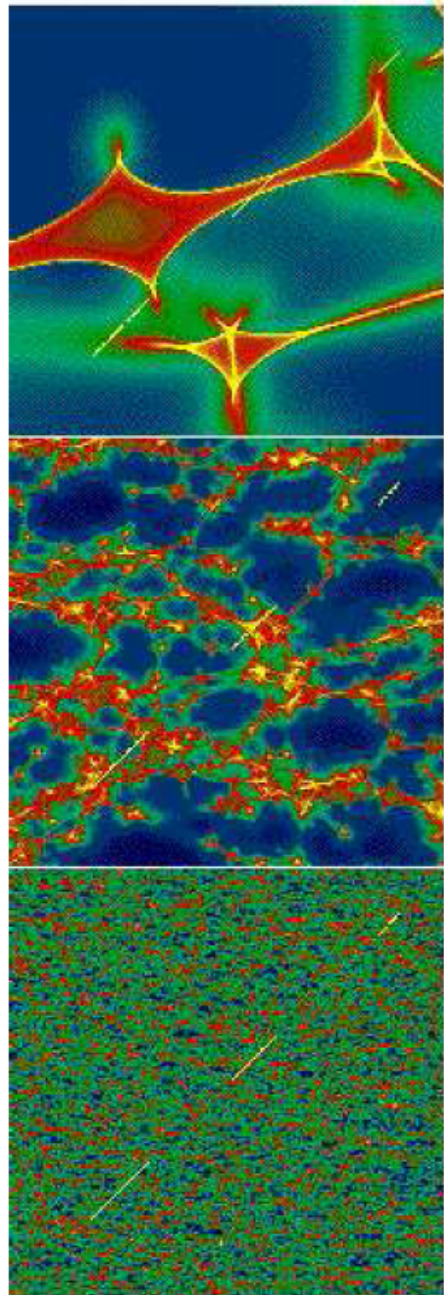


Mapa wzmacnienia (fragment). Wiele gwiazd o różnych masach, zewnętrzne ścinanie



Krzywe zmian blasku (małe źródło – linia ciągła 10x większe - przerywana)

Ray shooting: realistyczne zastosowanie



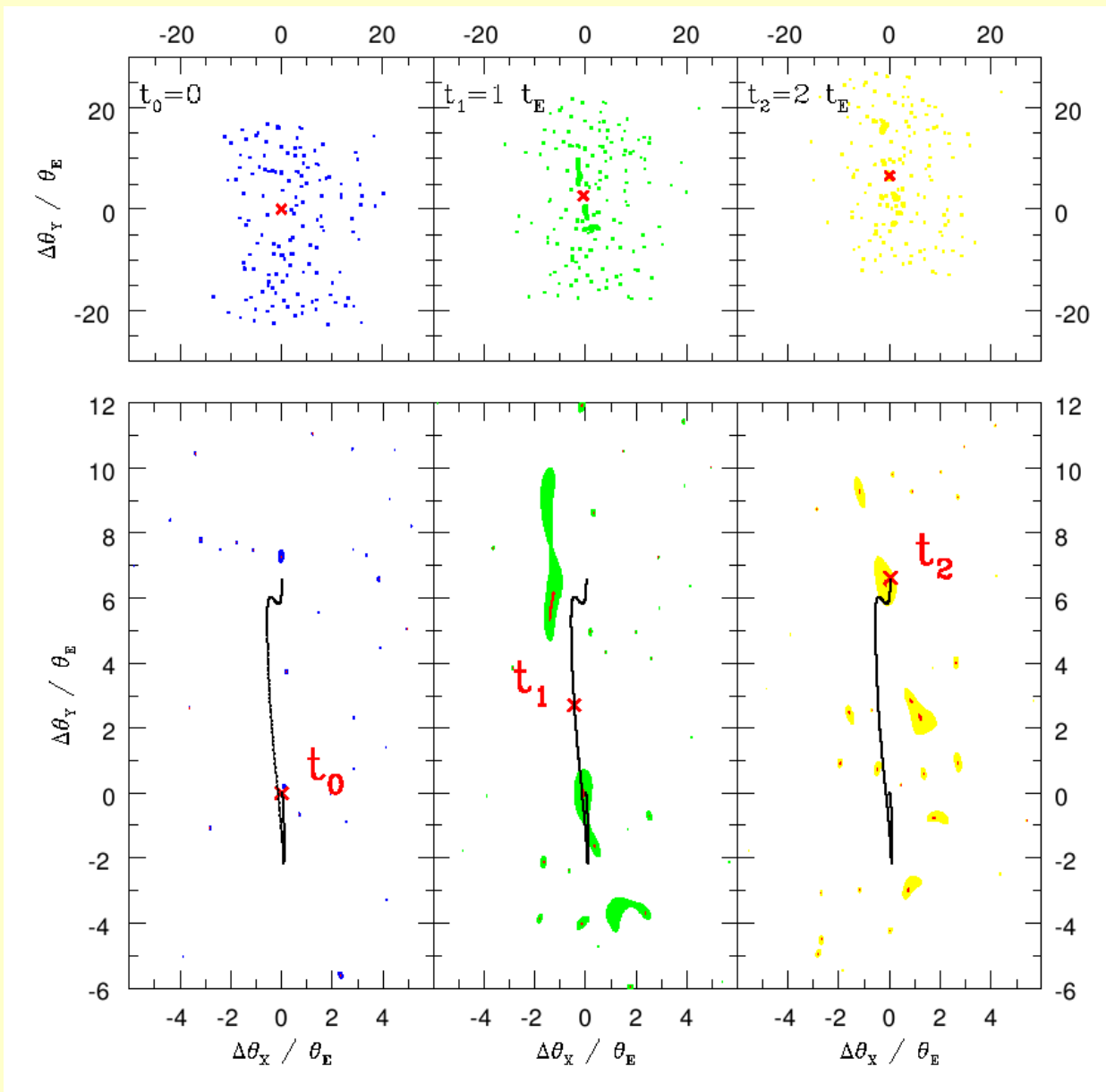
duże

średnie

małe masy mikrosoczewek

Krzywe zmian blasku w zależności od mas mikrosoczewek

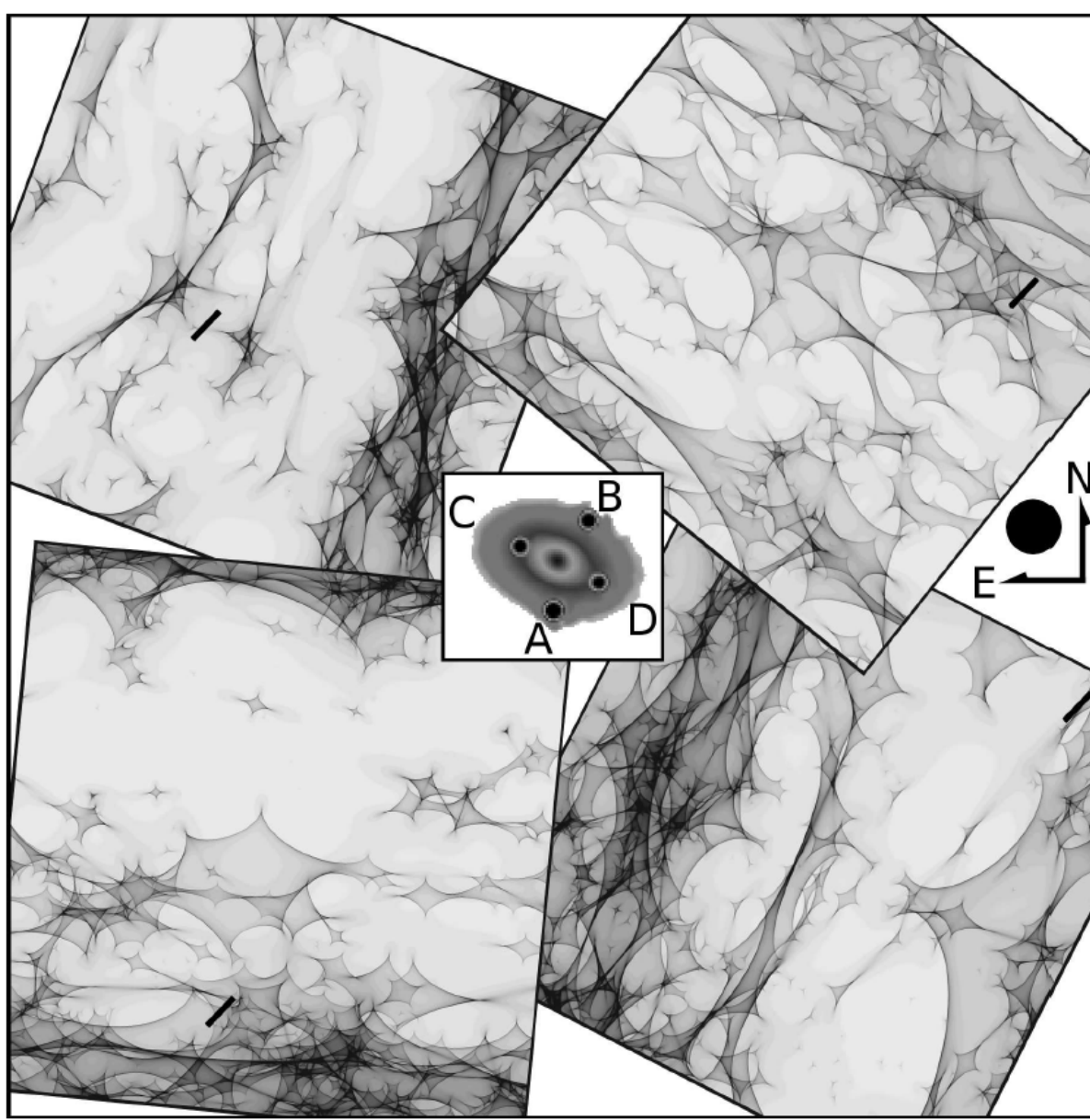
Ray shooting: przewidywanie



Ruchy gwiazd powodują zmiany struktury kaustyk, a wskutek tego zmiany [nierozdzielonego] obrazu QSO i zmiany jego centroidu – potencjalnie obserwowalne przez SIM

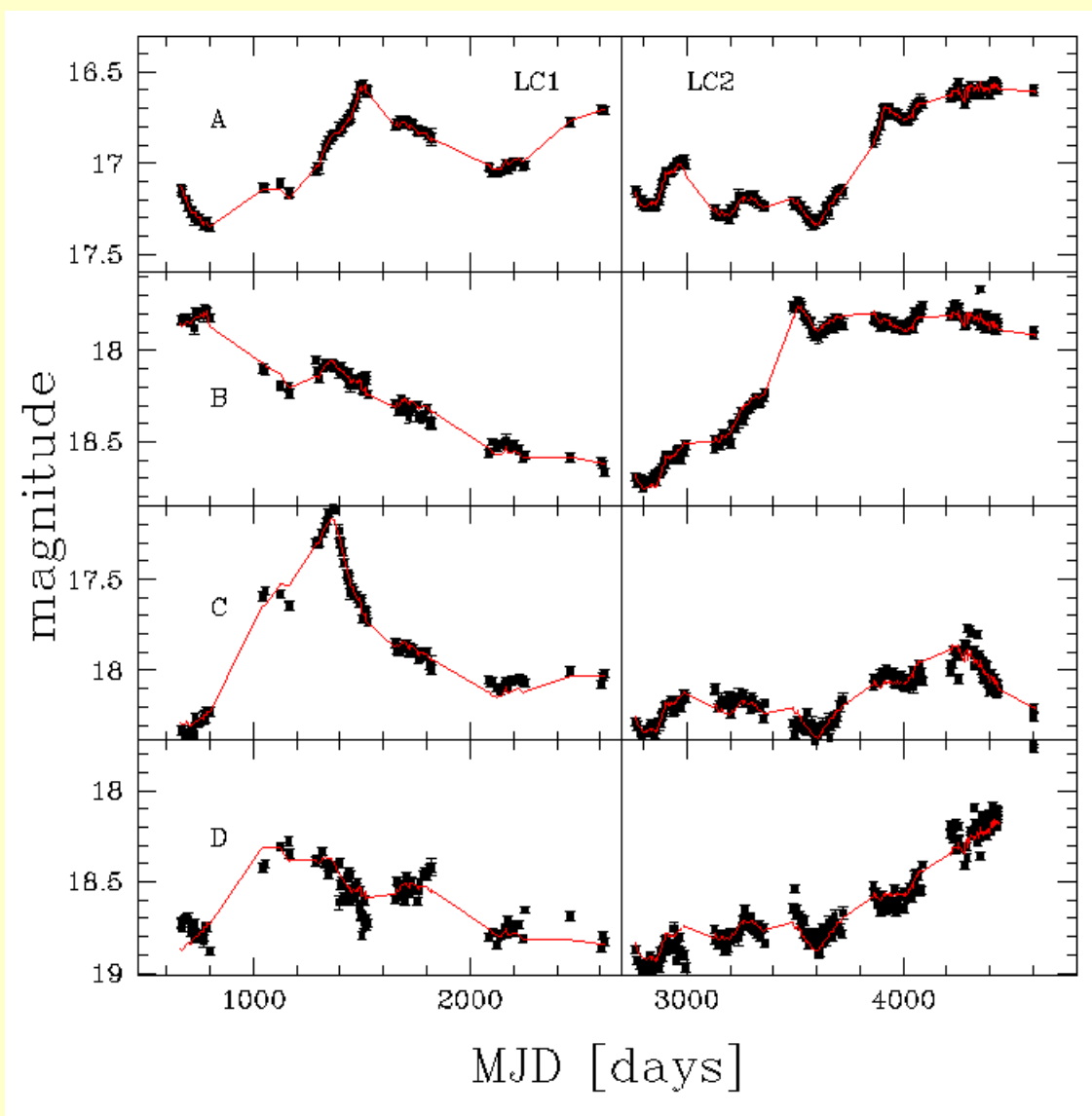
[na dole: powiększenie]

Ray shooting 2009



Technicznie możliwe jest wygenerowanie tak wielu sekwencji map (+ruchy gwiazd!), że obserwowane krzywe można **DOPASOWYWAĆ !!!**
Pozwala to otrzymać V , $\langle m \rangle$ soczewki
Rozmiar, nachylenie źródła

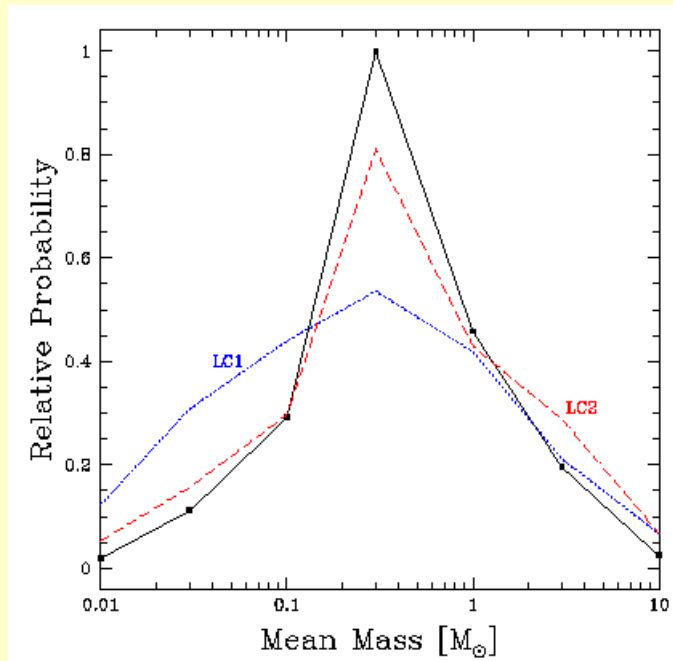
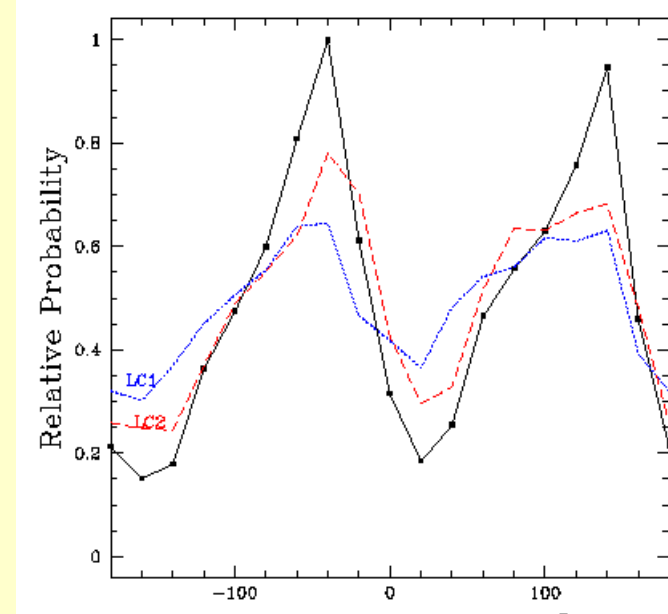
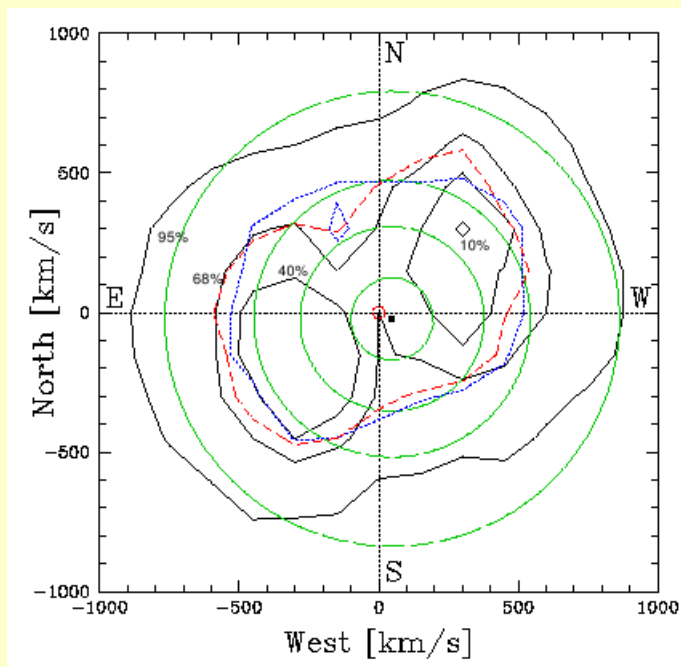
Ray shooting 2009



**Dopasowanie.
Pamięć operacyjna i komunikacja
pomiędzy procesorami głównym
ograniczeniem. Czas rachunków
(1 rok *1AMD) drugorzędny**

[Poindexter & Kochanek (2009)arXiv:0910.3213,3669]

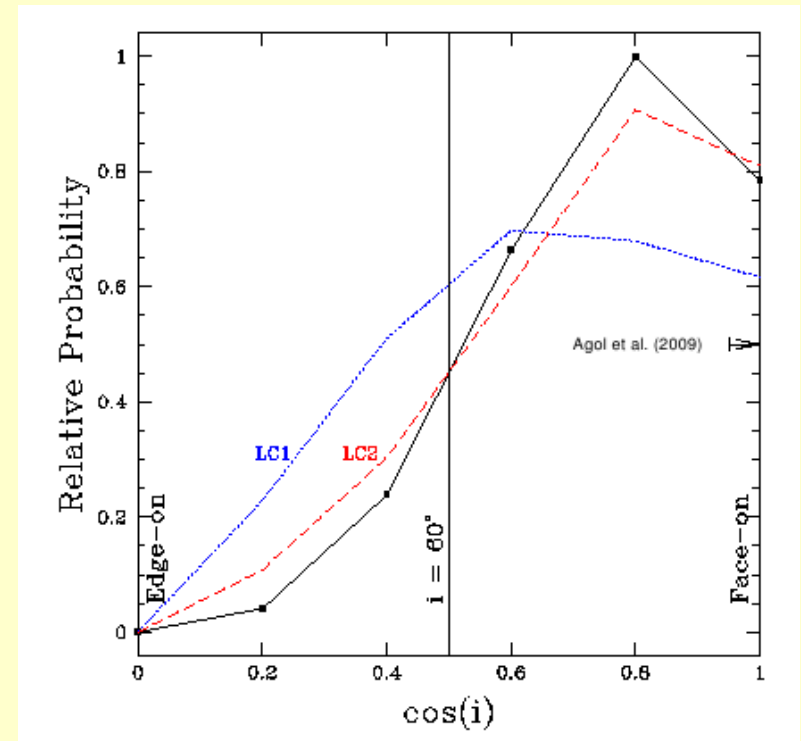
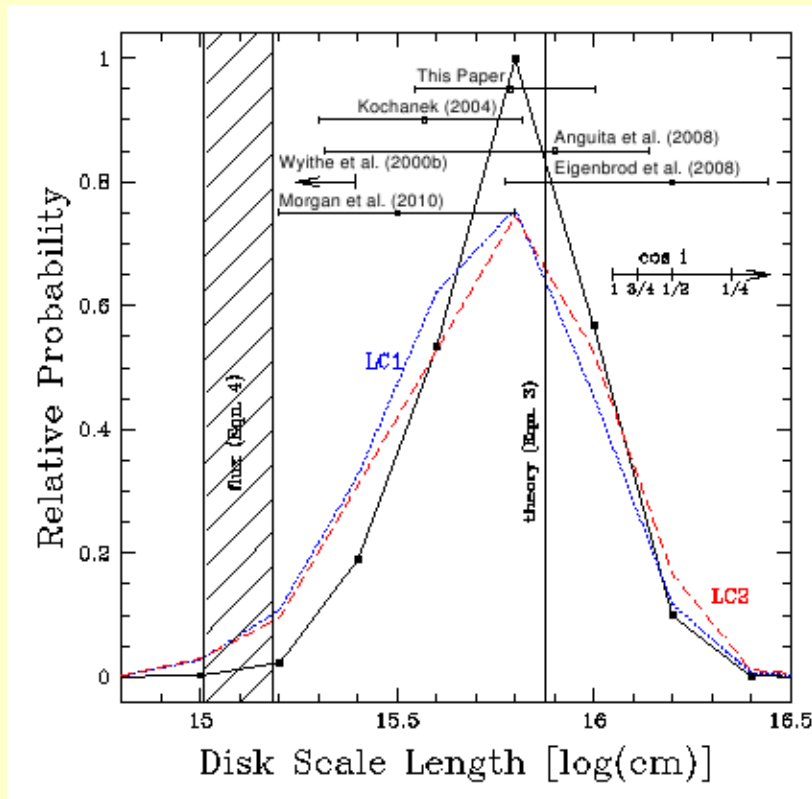
Ray shooting 2009



Dopasowanie: najbardziej prawdopodobne parametry soczewki

[Poindexter & Kochanek (2009) arXiv:0910.3213,3669]

Ray shooting 2009



Dopasowanie: najbardziej prawdopodobne parametry źródła (dysku akrecyjnego QSO)

[Poindexter & Kochanek (2009)arXiv:0910.3213,3669]

Mikrosoczewkowanie QSO

- Modele pozwalają ograniczyć maksymalne rozmiary dysku akrecyjnego [np] Q2237+0305 **oraz jego nachylenie**
- Zmienność w dziedzinie optycznej większa niż w podczerwieni ==> obszar emisji w podczerwieni większy
- Zmienność szerokich linii słabsza niż w kontinuum ale większa niż dla linii wąskich ==> brak sprzeczności z modelem zunifikowanym
- Zależność od postulowanej masy mikrosoczewek ==> funkcja mas gwiazd w galaktykach-soczewkach ~podobna do tej z Galaktyki ($\langle m \rangle \sim 0.3 M_{\text{Sun}}$)
- Ziarnistość makrosoczewki i wywoływane przez nie zmiany wzmocnienia poszczególnych obrazów powodują zmiany stosunków jasności obrazów. To może tłumaczyć trudności w modelowaniu makrosoczewek

W gromadach galaktyk

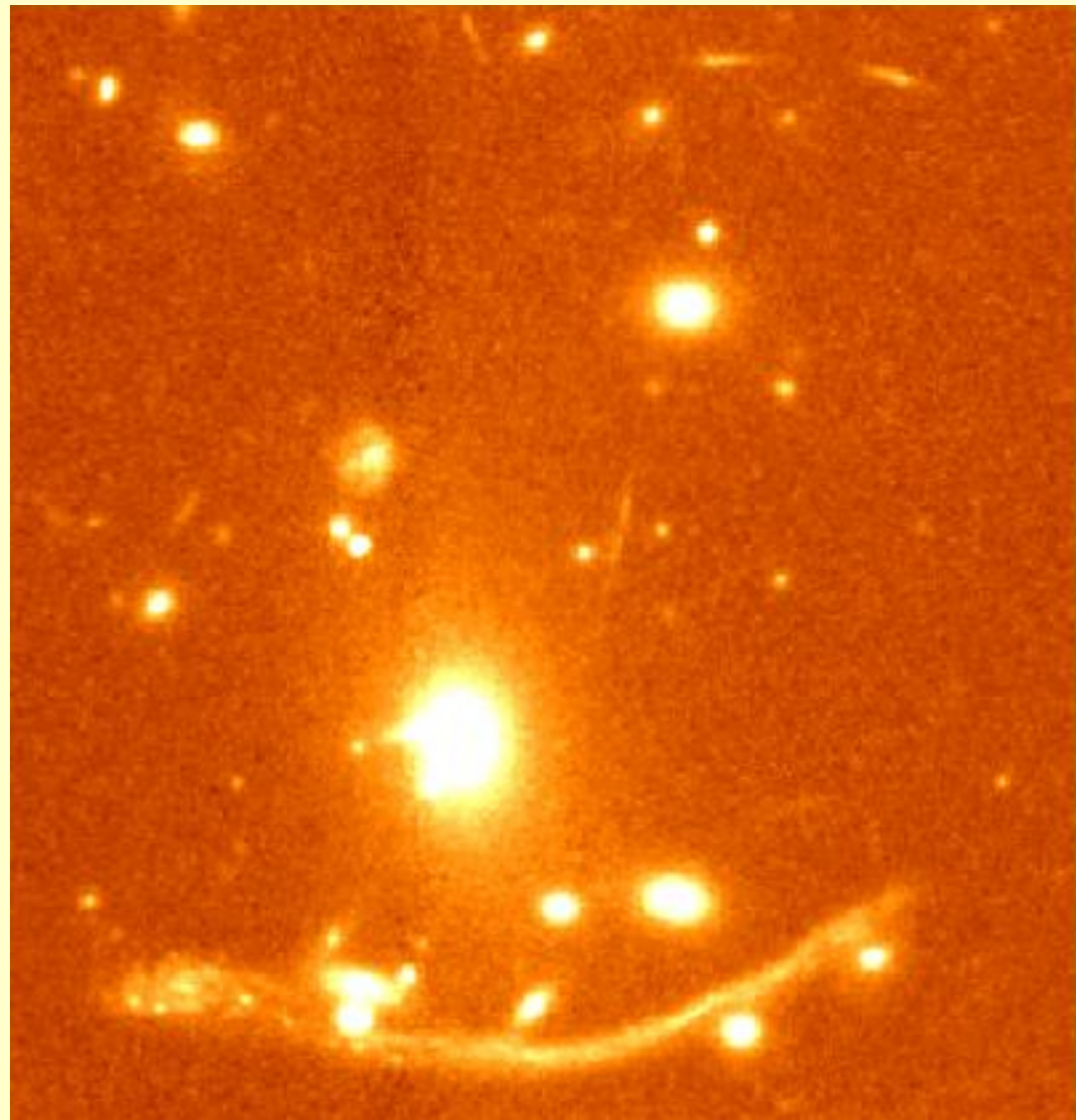


A370

$Z_{A370}=0.37$

$Z_{arc} = 0.724$

Lynds, R., and Petrosian, V.,
``Giant luminous arcs in galaxy
clusters'', Bull. Am. Astron. Soc.,
18, 1014-1014, (1986).

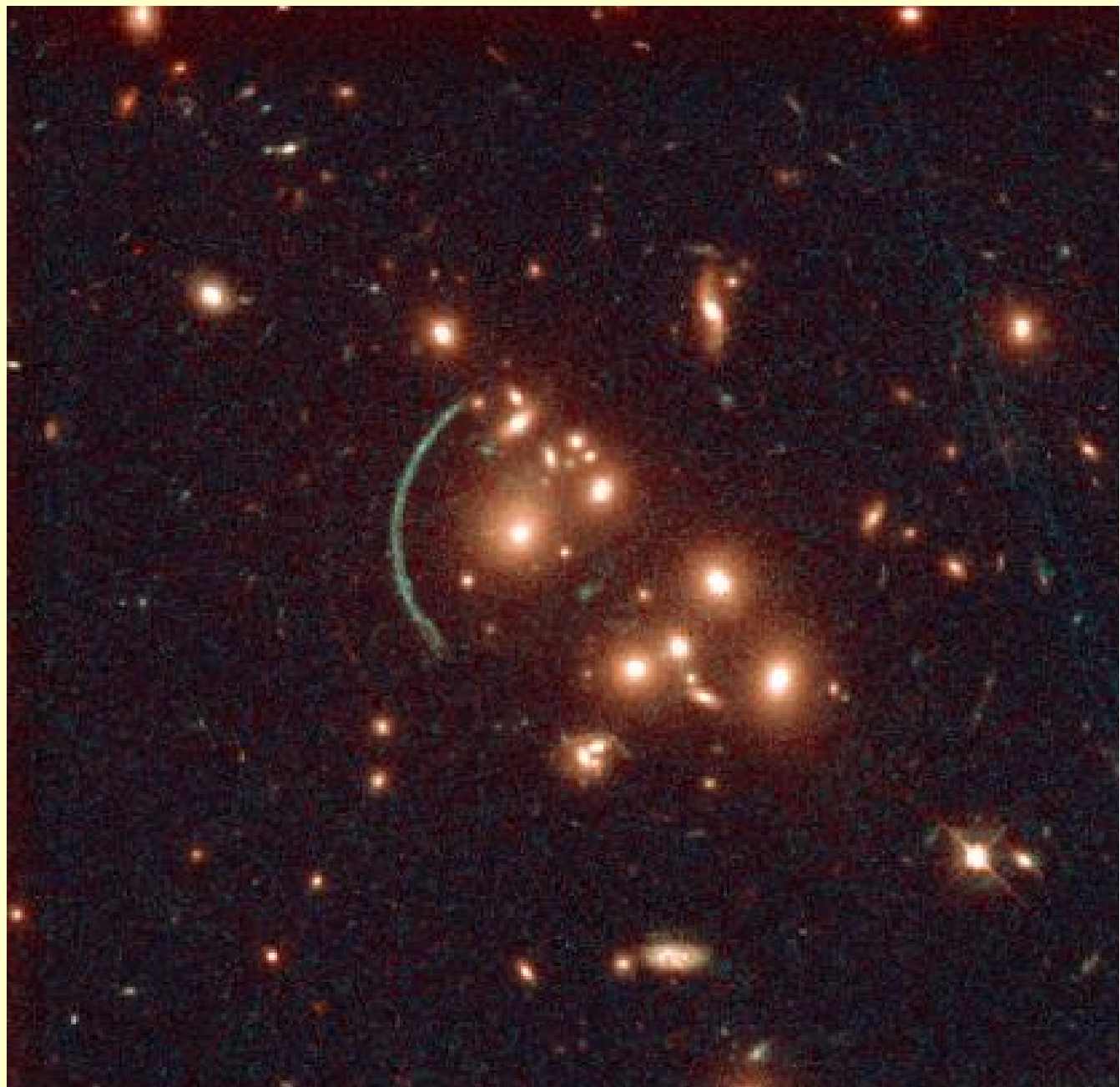


Soucail, G., Fort, B., Mellier, Y., and Picat, J.P., ``A blue ring-like structure
in the center of the A 370 cluster of galaxies'', Astron. Astrophys., 172, L14-
L16, (1987).

Cl 2244-02

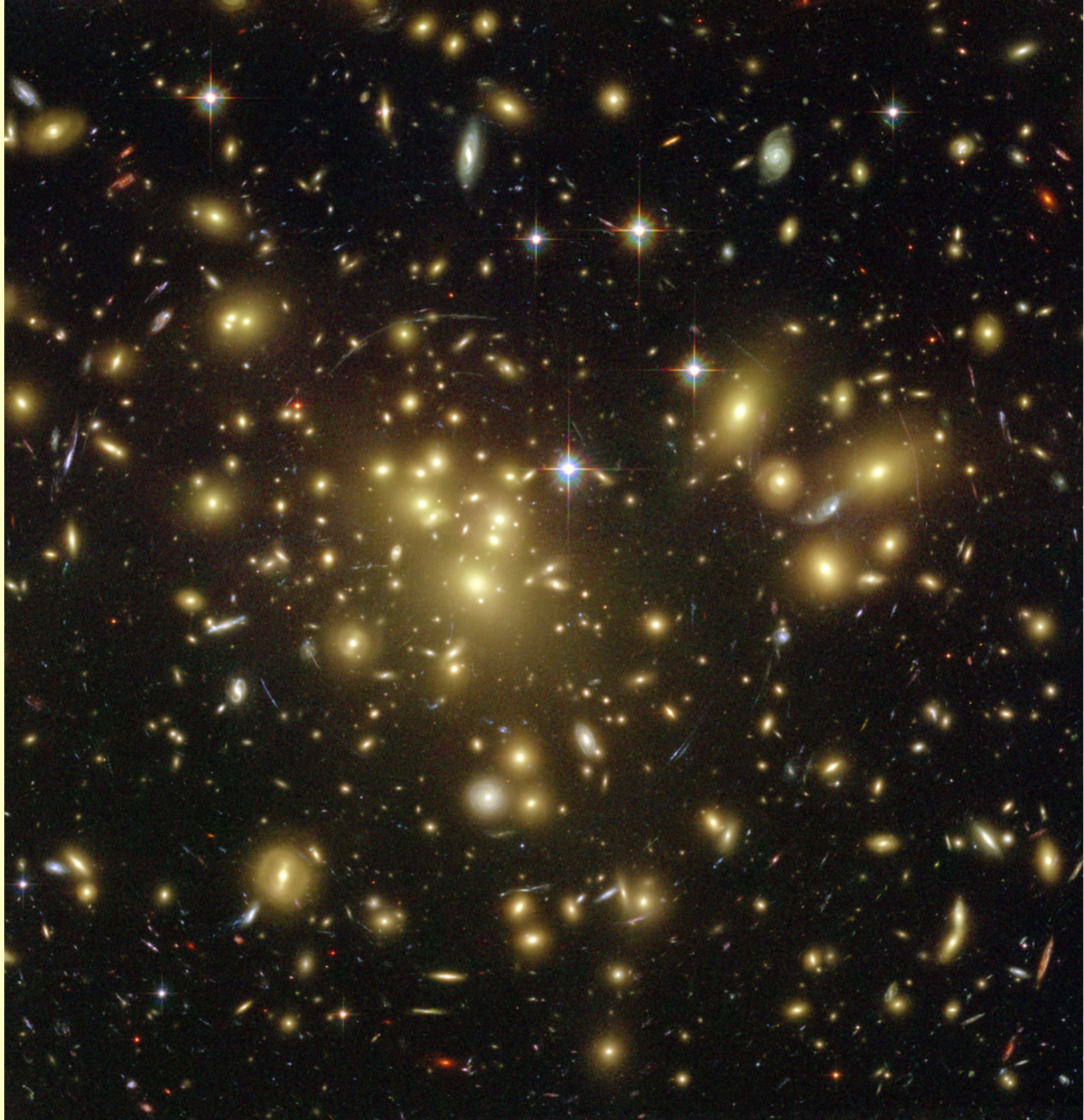
$Z_{cl2244} = 0.33$

$Z_{arc} = 2.24$



**HST:
A1689**

Z_1689= 0.185

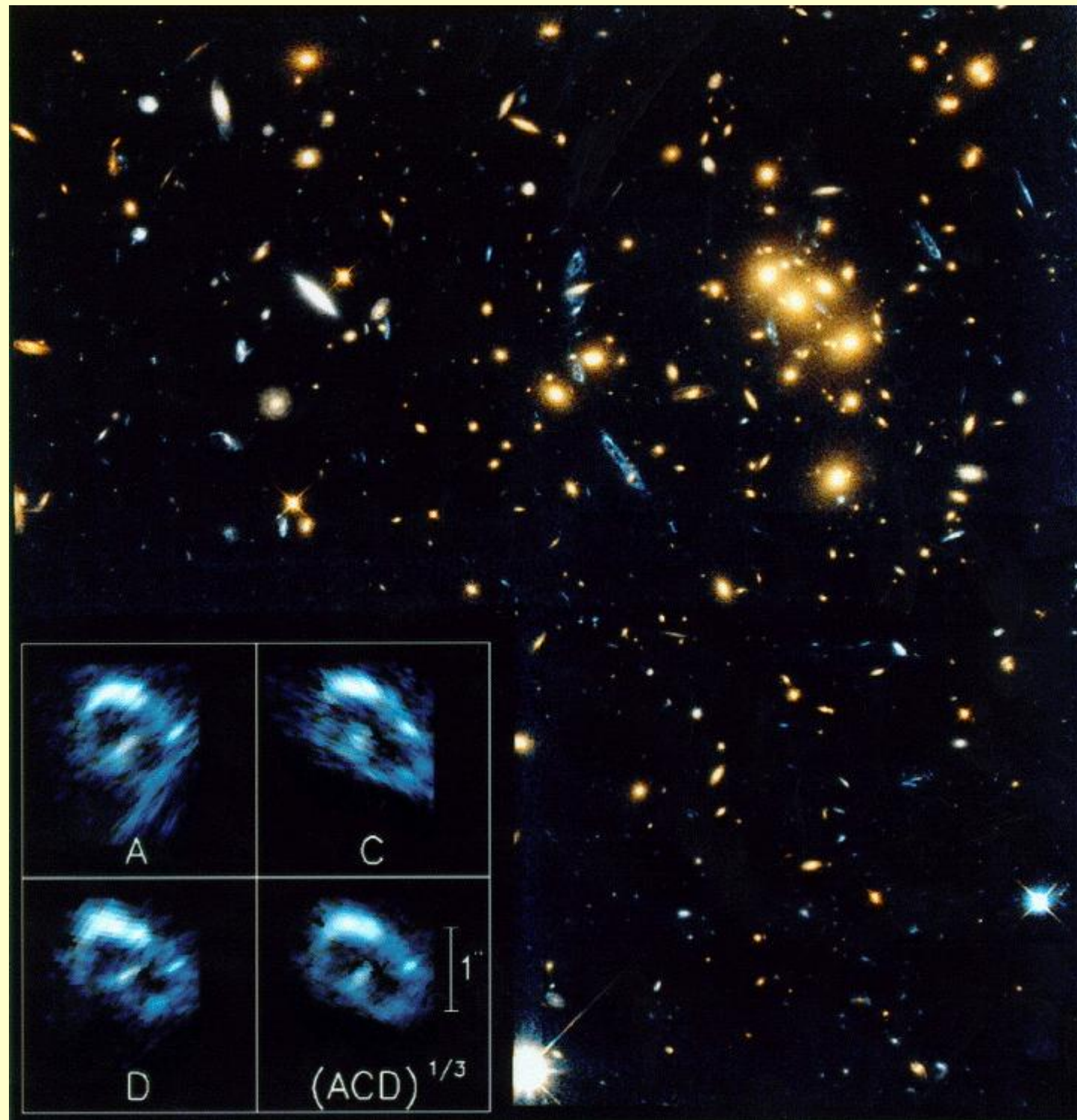


HST: Cl 0024+16

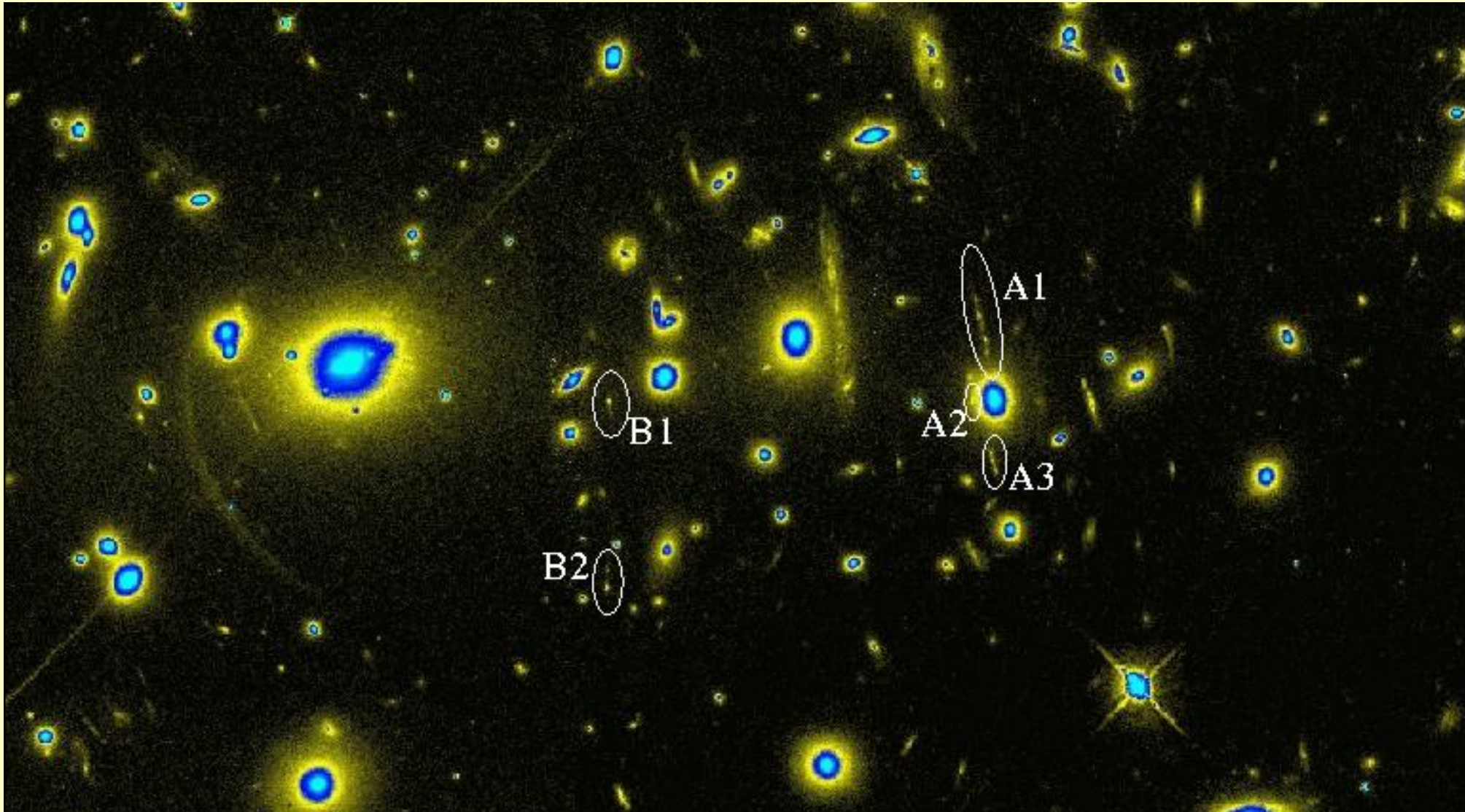
$$Z_{cl0024} = 0.39$$

$$Z_{arc} = 1.63$$

Model soczewki
pozwala otrzymać
kształt źródła –
podobieństwo
zrekonstruowanych A,
B i C świadczy, że
fragmenty łuku są
obrazami jednego
źródła.

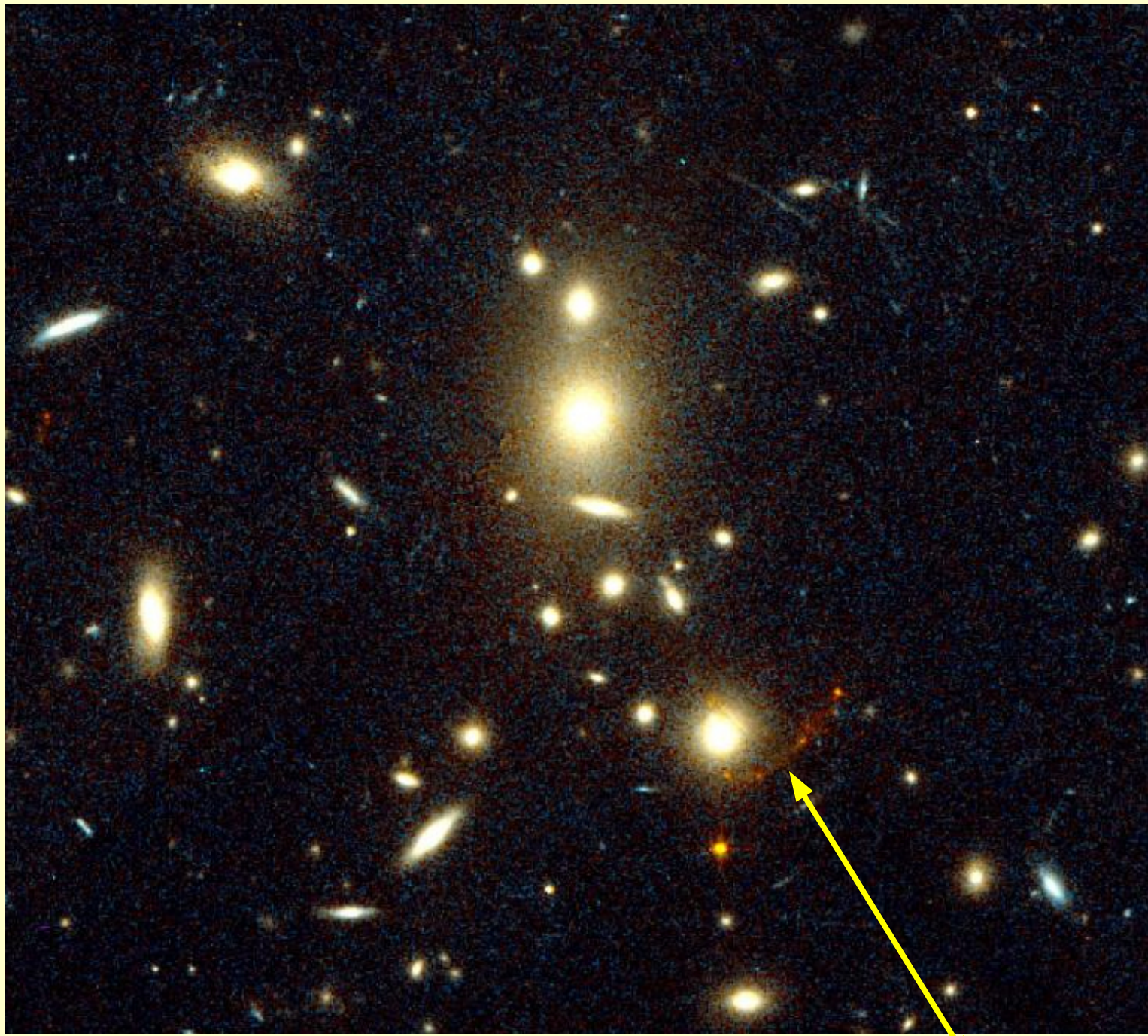


HST: A2390



$Z_{2390}=0.23$; thick arc $Z=0.913$;
two multiple-image systems A and B: $Z_A=4.04$ $Z_B=4.05$

**HST:
Cl 1358+62**



**$Z_{cl1358} = 0.33$
 $Z_{gal} = 4.92$**

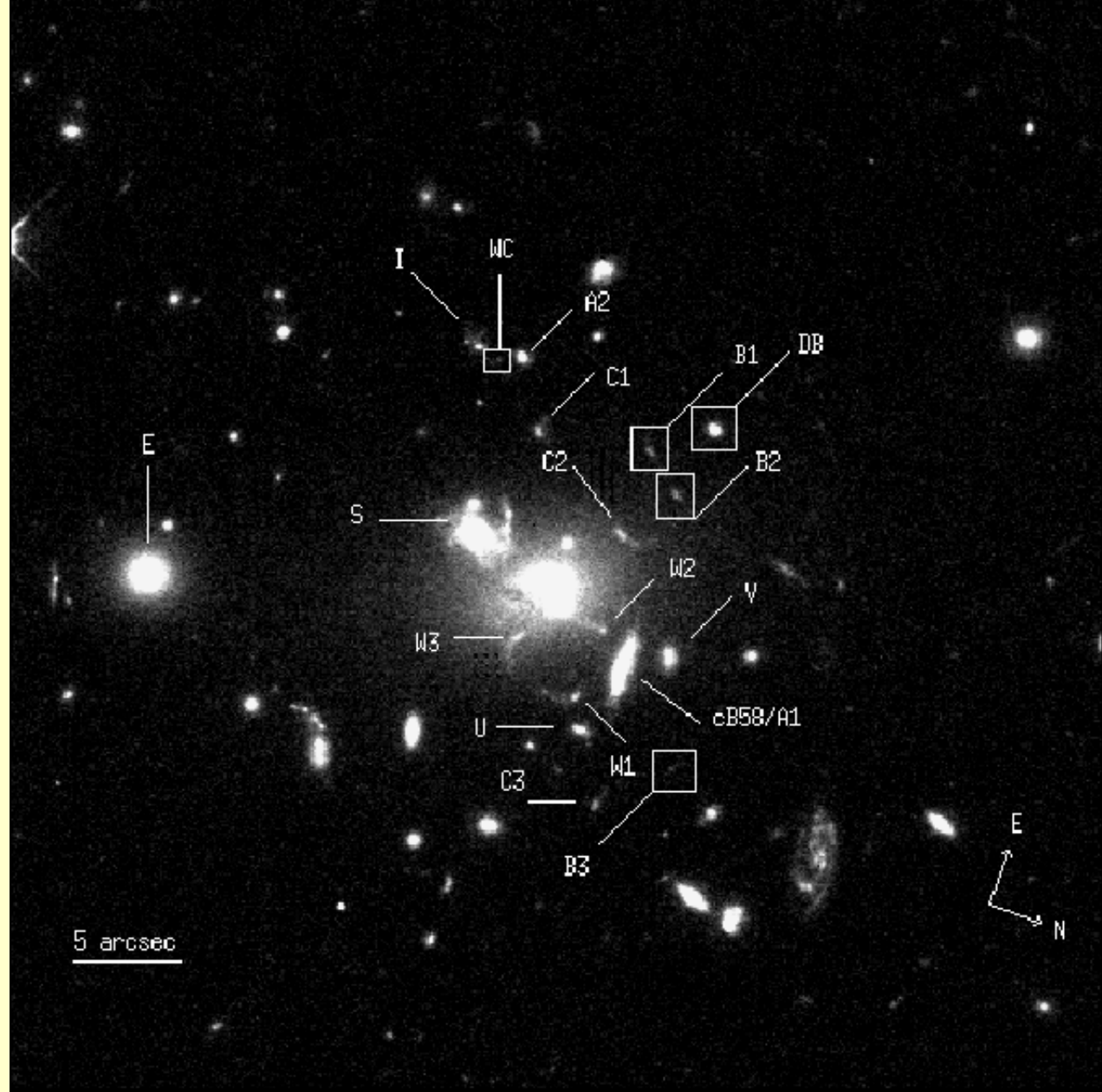
Obrazy galaktyki

HST: MS1512

$$Z_{1512} = 0.3$$

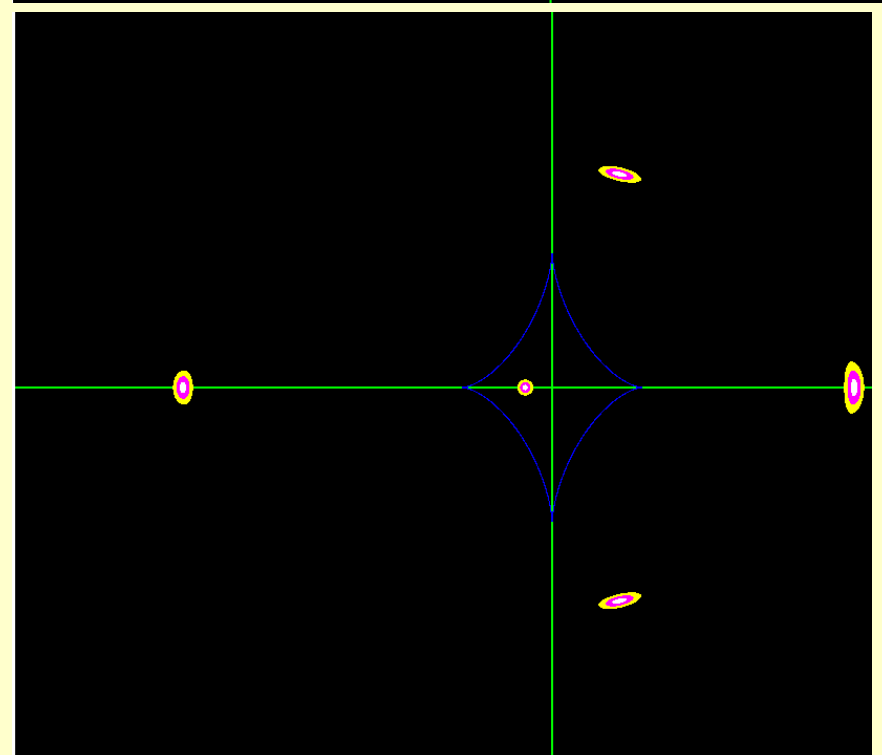
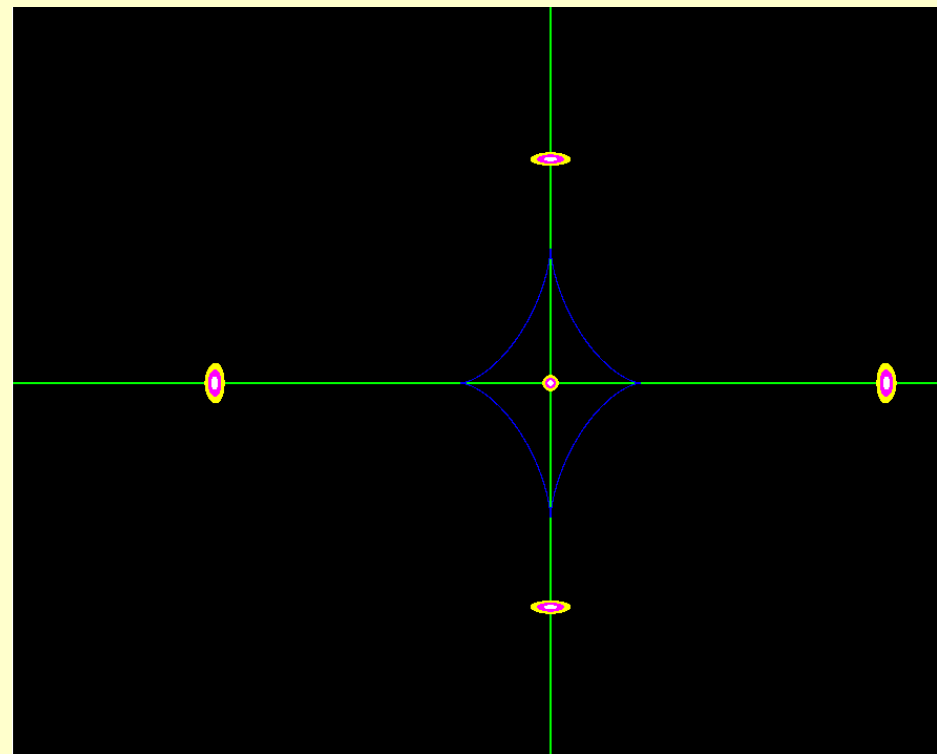
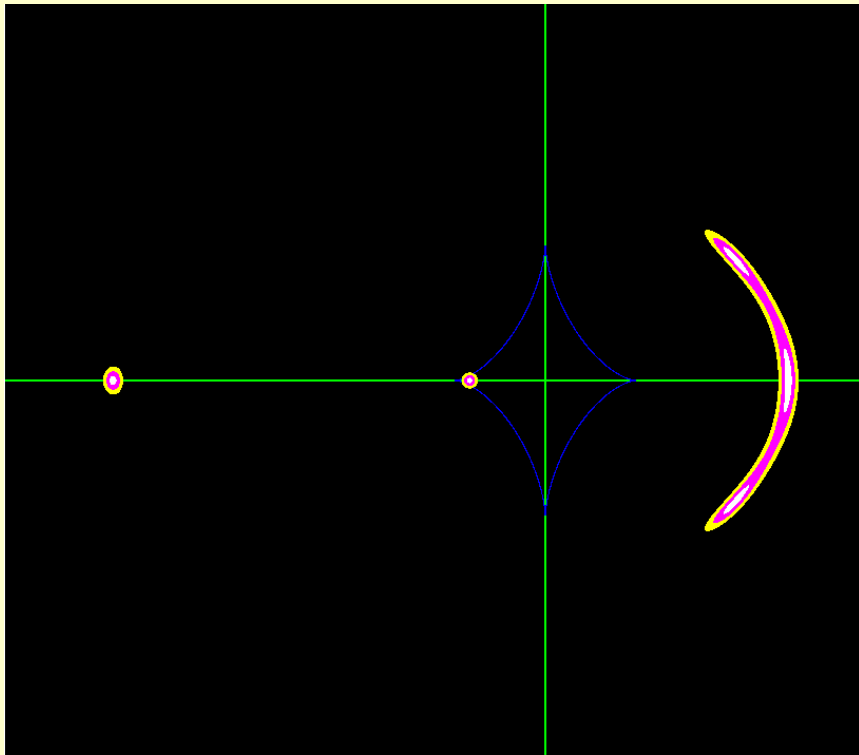
$$Z_{cB58} = 2.72$$

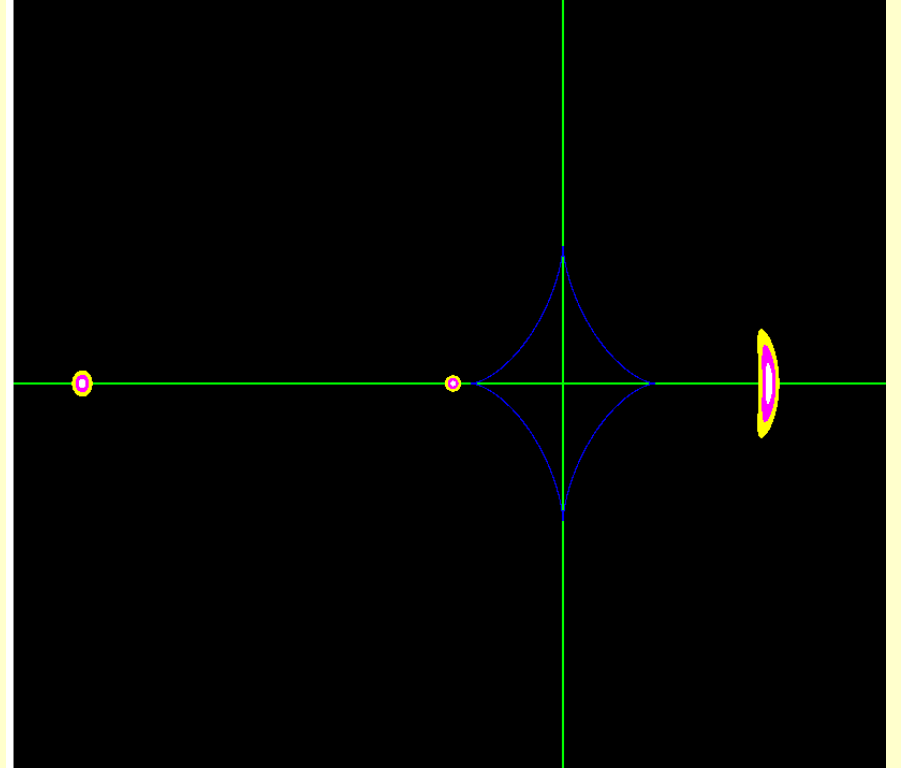
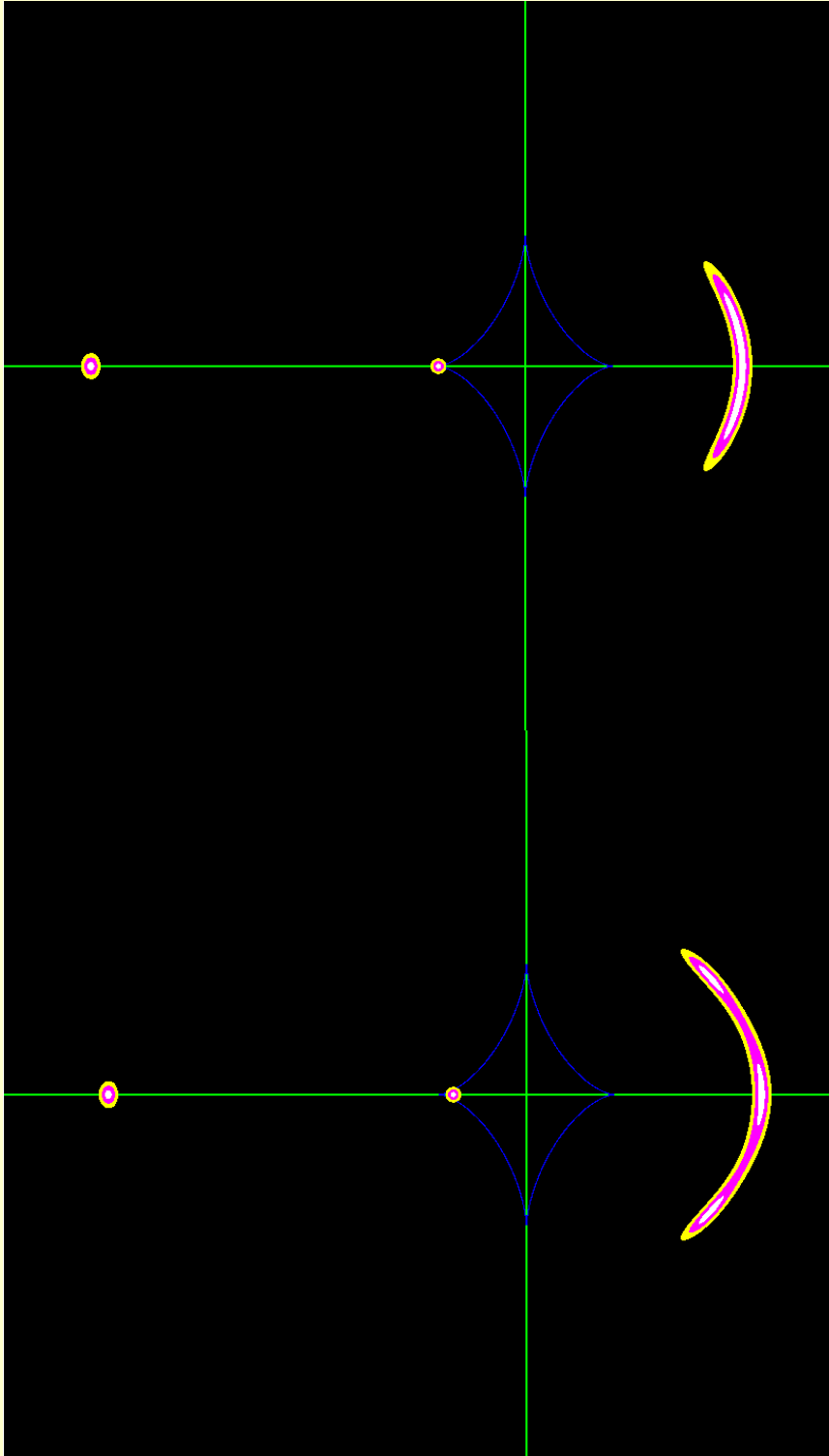
I. With this HST image, it first could be demonstrated that cB58 is an extended arc (this is difficult to recognize in the figure due to the limited dynamic range of the reproduction).



B1-3, C1-3, W1-3 and WC each are multiple images of background galaxies.

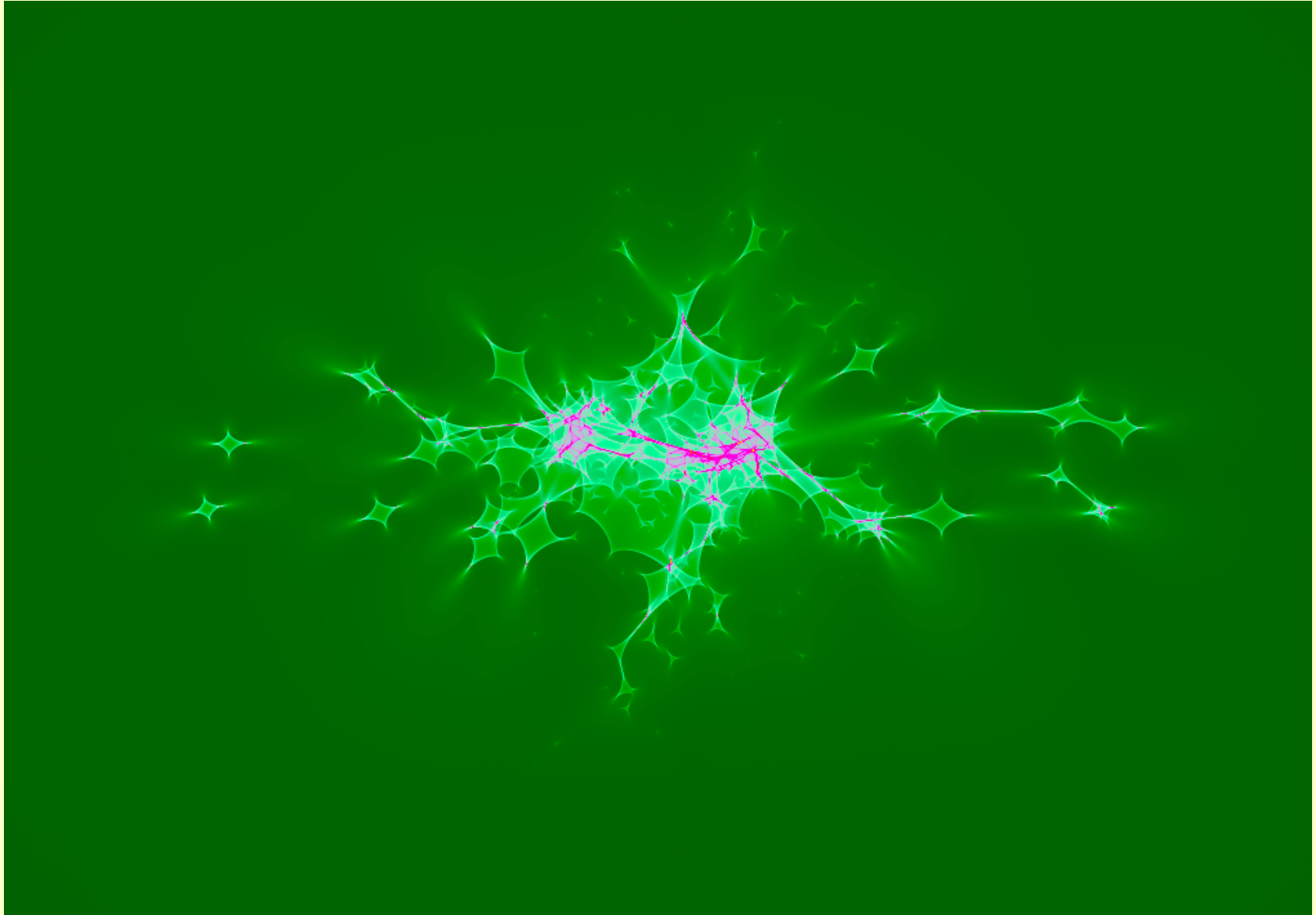
Gromady: model naiwny





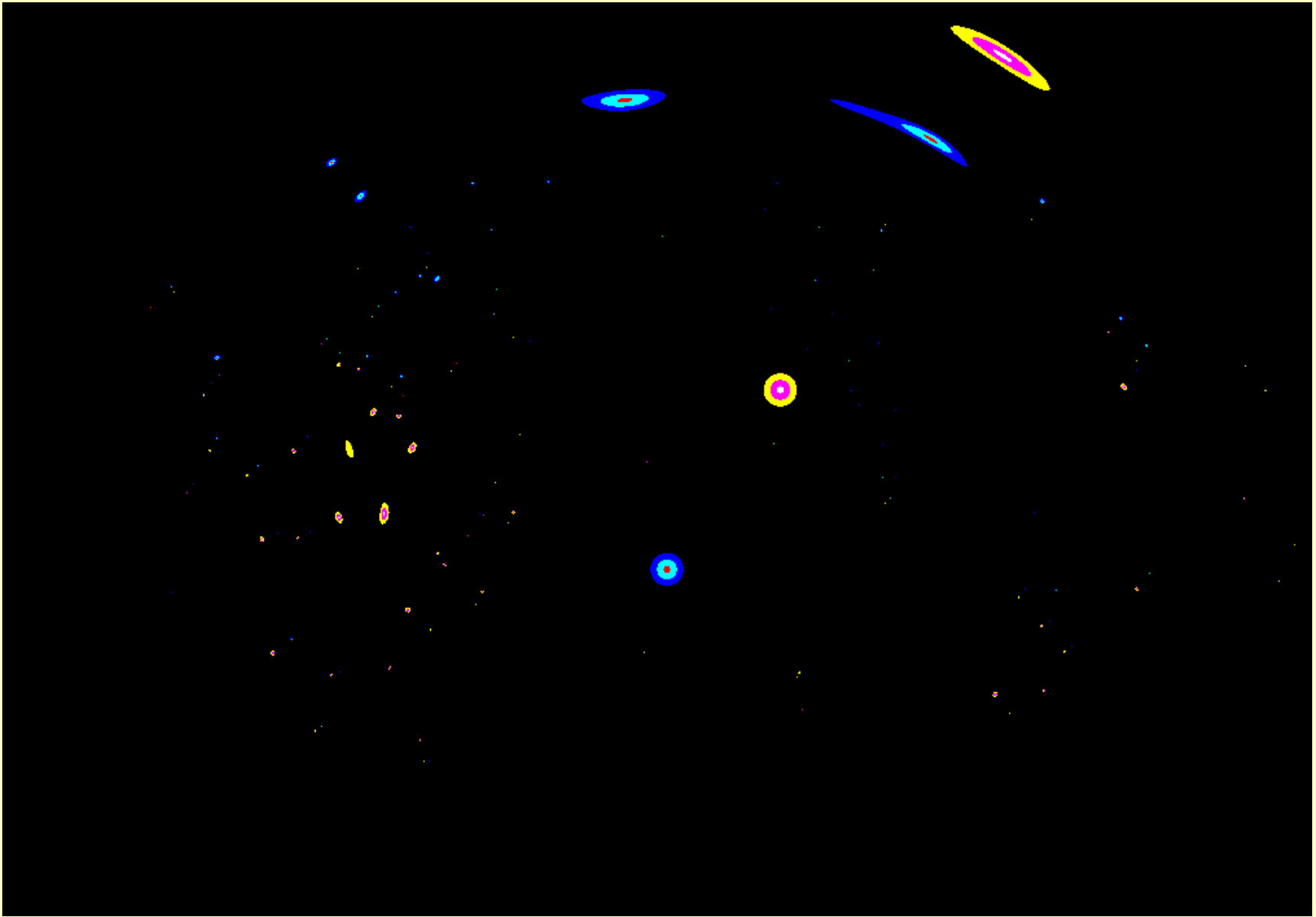
**Gromady:
model naiwny**

Gromady: symulacja



Gromada: 200 punktowych mas o położeniach losowanych zgodnie z rozkładem gęstości powierzchniowej dla „izotermicznej elipsoidy”).

Gromady: symulacja



(Mała rozdzielczość zmusza do rysowania obrazów „dużych” źródeł)

Idea oceny masy w centralnej części gromady, „wewnątrz łuku”

$$b_0 = b - \frac{4GM(b)}{c^2 b} D$$
$$\Rightarrow M(b) \approx b^2 \frac{c^2}{4GD} \equiv \pi b^2 \frac{c^2}{4\pi GD} \equiv \pi b^2 \Sigma_{cr}$$
$$M(\theta_{arc}) \approx \pi (d_{OL} \theta_{arc})^2 \Sigma_{cr}$$

- mass in cluster centers is much more concentrated than predicted by (simple) models based on X-ray observations.
- mass distribution in the inner region of clusters often shows strong substructure, or multiple mass peaks. These are easily understood in the frame of hierarchical mergers in a CDM model
- orientation of the (dark) matter appears to follow closely the orientation of the light in the cD galaxy; this supports the idea that the growth of the cD galaxy is related to the cluster as a whole, through repeated accretion of lower-mass member galaxies.
- good agreement between lensing and X-ray mass estimates for those clusters where a 'cooling flow' indicates that they are in dynamical equilibrium