

Gravitationslinsen

Robert W. Schmidt

Astronomisches Rechen-Institut
am Zentrum für Astronomie
der Universität Heidelberg

Heraeus-Seminar zur Lehrerfortbildung

Potsdam Telegraphenberg 14.3.2015

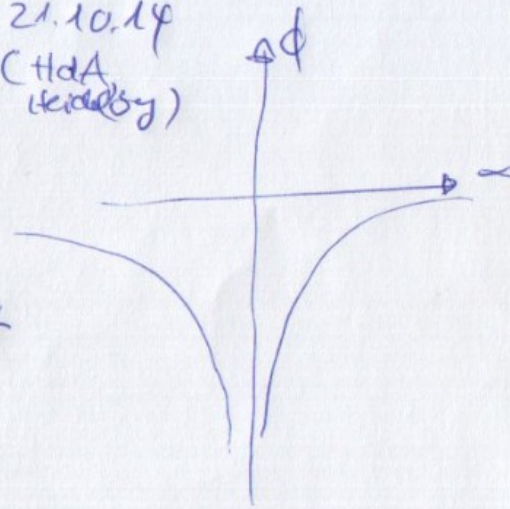
Überblick

1. Geschichtliches zur Lichtablenkung
2. Mehrfachbilder und Lichtlaufzeiten
3. Microlensing und Quasare
4. Dunkle Materie

2. Mehrfachbilder und Lichtlaufzeiten

Lichtablenkung

Lehrfoto Bildy 21.10.14
(HdA
Kernphysik)



Voraussetzung: $|\phi| \ll c^2$ $v \ll c$

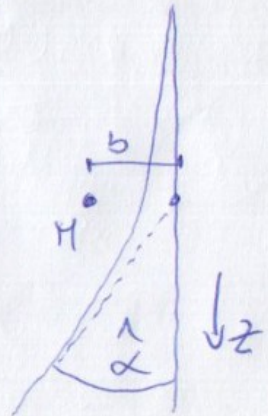
$\Rightarrow$ Krümmung der Raumzeit $\hat{=}$ variable Brechungsindex für Licht

$$n = 1 - \frac{2}{c^2} \phi = 1 + \frac{2}{c^2} |\phi|$$

1. Shapiro-Delay $n > 1 \Rightarrow$ Licht langsamer als im Vakuum $v = \frac{c}{n} = c - \frac{2}{c} |\phi| \equiv c - \Delta v$

$$c \Delta t = \int_1^2 \Delta v \cdot dt = \int_1^2 \frac{2}{c} |\phi| \frac{dl}{c}$$

Shapiro-Delay: $\Delta t = \int_{\text{Quelle}}^{\text{Beobachter}} \frac{2}{c^3} |\phi| dl$



2. Lichtablenkung

$$\frac{1}{\alpha} = - \int_{\text{Lichtweg}} \vec{\nabla}_{\perp} \overset{(n)}{V} dl = \frac{2}{c^2} \int_{\text{Lichtweg}} \vec{\nabla}_{\perp} \phi dl$$

Kürzester Weg

$$\delta \int n dl = 0$$

Wenn Ablenkung klein: Wähle gerade Weg für Integration! Punktmasse $\phi(b, z) = -\frac{GM}{\sqrt{b^2 + z^2}}$

$$\vec{\nabla}_{\perp} \phi = \frac{d}{db} \phi = \frac{GMb}{\sqrt{b^2 + z^2}^3} \Rightarrow \frac{1}{\alpha} = \frac{2}{c^2} \int \vec{\nabla}_{\perp} \phi dz = \frac{4GM}{c^2 b} \vec{e}_b$$

$$\int \frac{dz}{(b^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{2}{b^2}$$

Mehrfachbilder

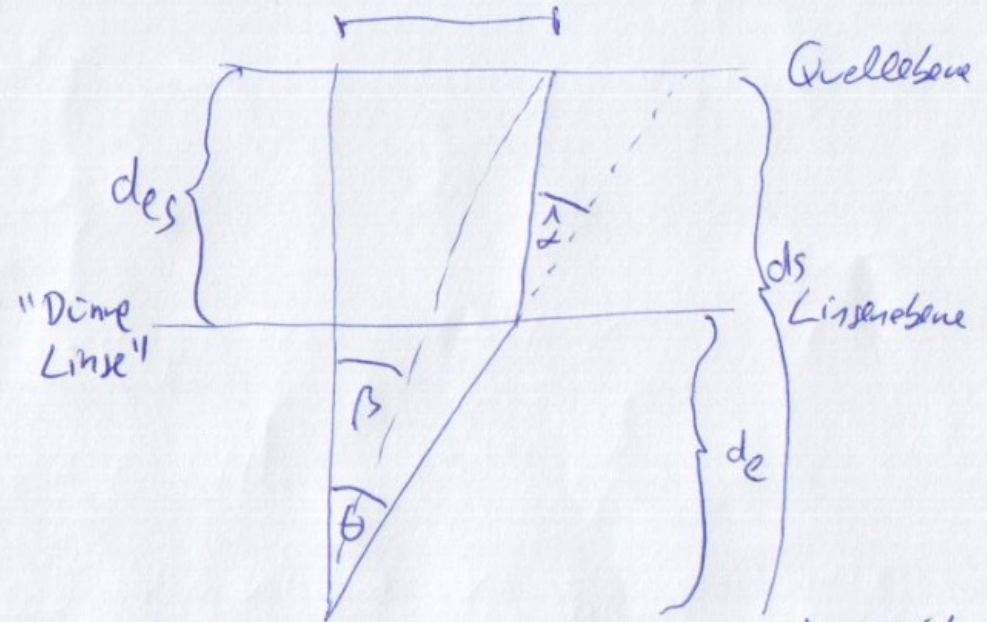
Linsengleichung

$$\Theta \cdot d_s - \alpha d_{es} = \beta \cdot d_s$$

(kleine Winkel!)

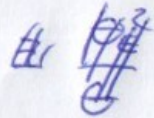
$$\alpha = \frac{d_{el}}{d_s} \alpha$$

$$\Rightarrow \Theta - \alpha = \beta$$



Punktlinse

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2(d_s d_{el} \Theta)} \Rightarrow \alpha = \frac{d_{el}}{d_s d_{el}} \frac{4GM}{c^2} \frac{1}{\Theta}$$



$$\equiv \frac{\Theta_E^2}{\Theta} \quad (\text{Einstein-Radius})$$

$$= 0.9 \sqrt{\frac{M}{10^6 M_\odot}} \left(\frac{d_{el}}{d_s} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\text{Gpc}}$$

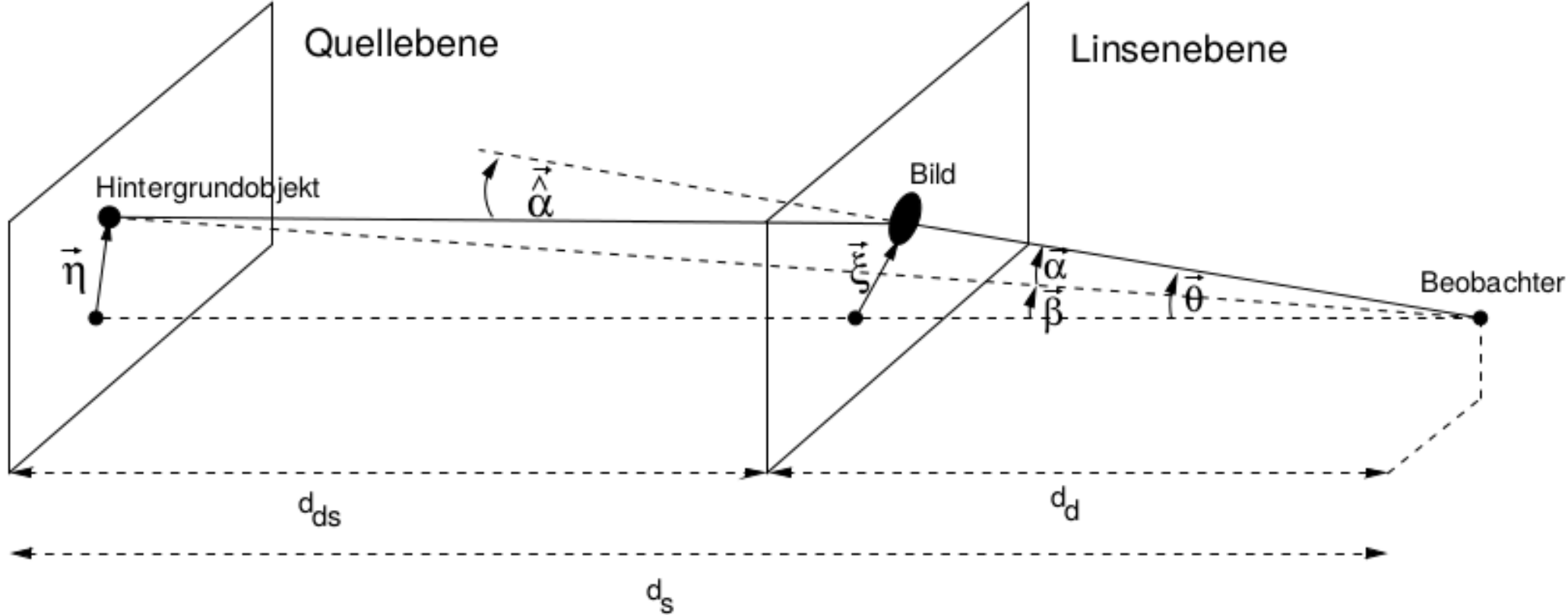
$$\Theta_E = 0.9 \text{ mas} \sqrt{\frac{M}{M_\odot}} \left(\frac{d_{el}}{d_s} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{10 \text{ Gpc}}$$

$$\Rightarrow \Theta^2 - \beta \Theta - \Theta_E^2 = 0$$

$$\Theta_{1,2} = \frac{\beta}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\beta}{2}\right)^2 + \Theta_E^2}$$

$$= \frac{1}{2} \left(\beta \pm \sqrt{\beta^2 + 4\Theta_E^2} \right)$$

$$\beta = 0 \Rightarrow \Theta = \Theta_E \quad (\text{Ring})$$



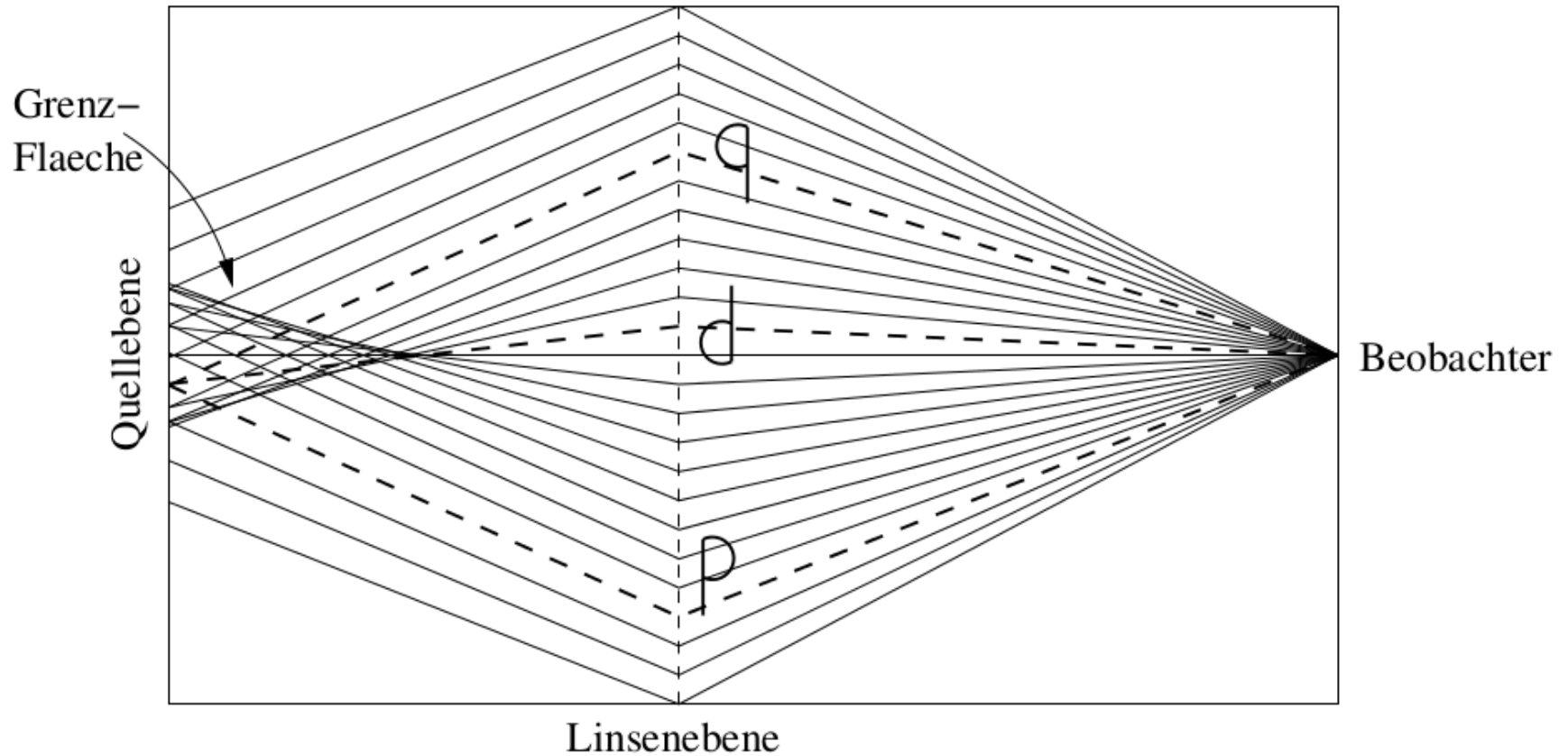
Abbildungsmatrix

$$A = \frac{\partial \vec{\beta}}{\partial \vec{\theta}} = \begin{pmatrix} 1 - \kappa - \gamma_1 & -\gamma_2 \\ -\gamma_2 & 1 - \kappa + \gamma_1 \end{pmatrix}$$

Vergrößerung

$$\mu = \frac{1}{\det A}$$

Anschaulich Punktlinse: $\mu = \frac{\theta d \theta}{\beta d \beta}$



Abbildungsmatrix

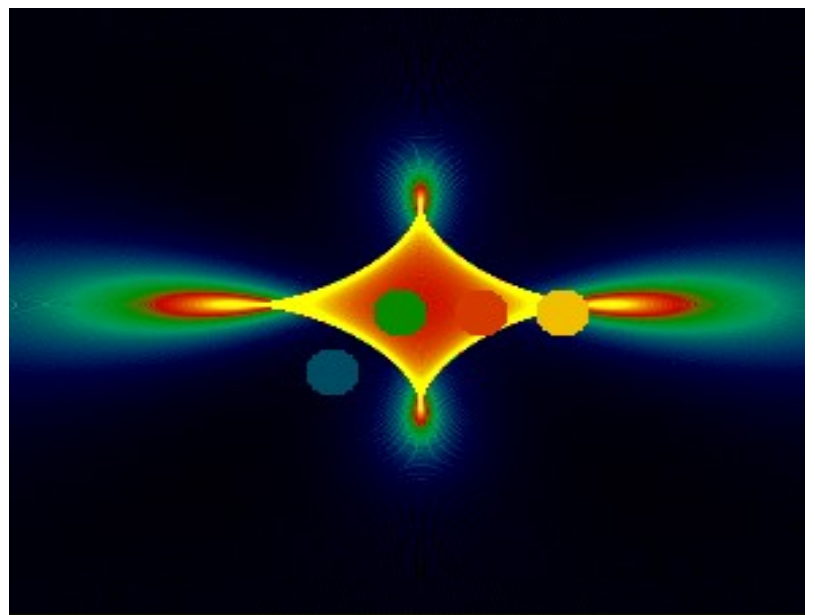
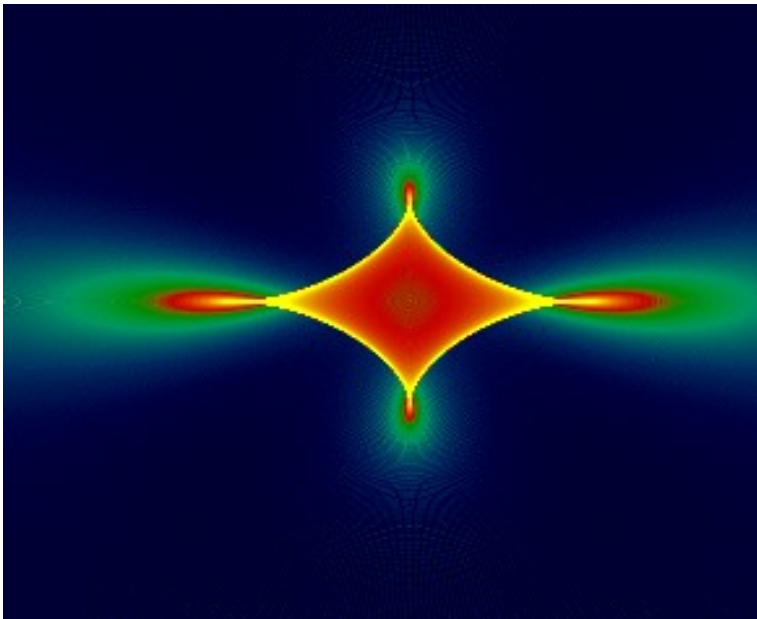
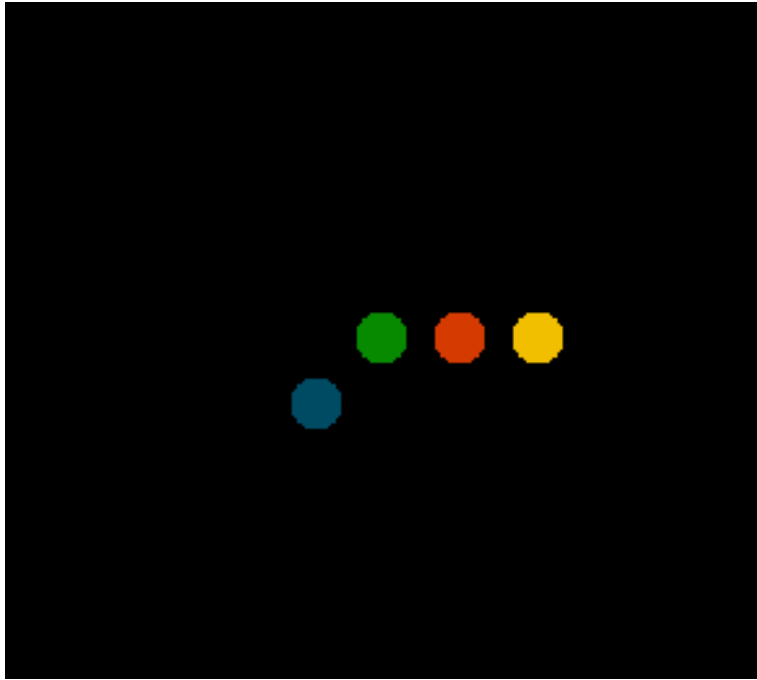
$$A = \frac{\partial \vec{\beta}}{\partial \vec{\theta}} = \begin{pmatrix} 1 - \kappa - \gamma_1 & -\gamma_2 \\ -\gamma_2 & 1 - \kappa + \gamma_1 \end{pmatrix}$$

Vergrößerung

$$\mu = \frac{1}{\det A}$$

Anschaulich Punktlinse: $\mu = \frac{\theta d \theta}{\beta d \beta}$

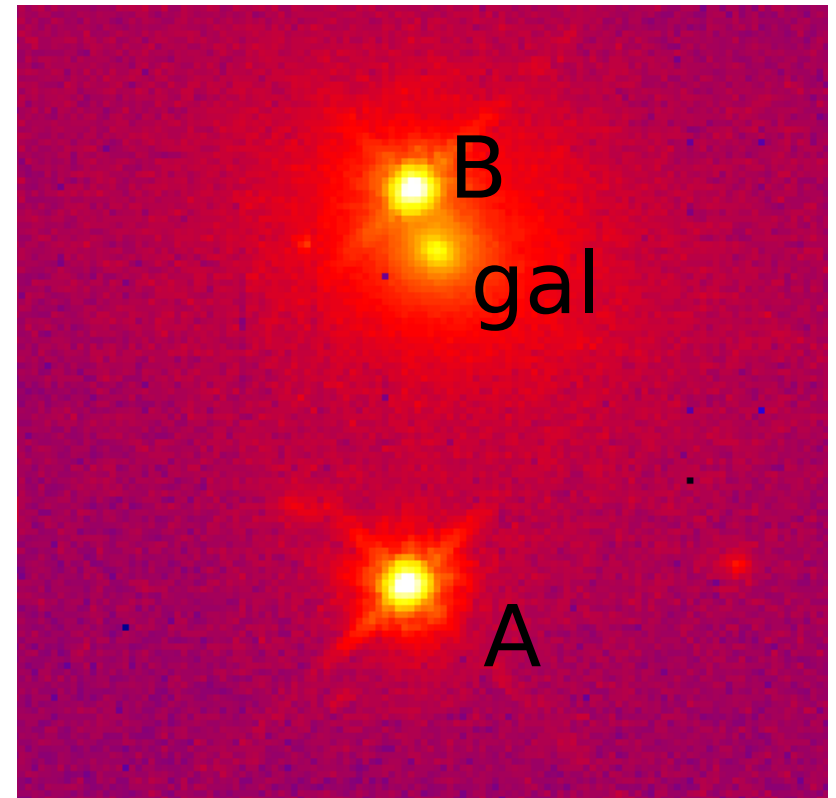
Wie viele Bilder entstehen beim Gravitationslinseneffekt?



Elliptische Linse! (bei Punktlinse ist $N=2$)

Die erste Gravitationslinse Q0957+561

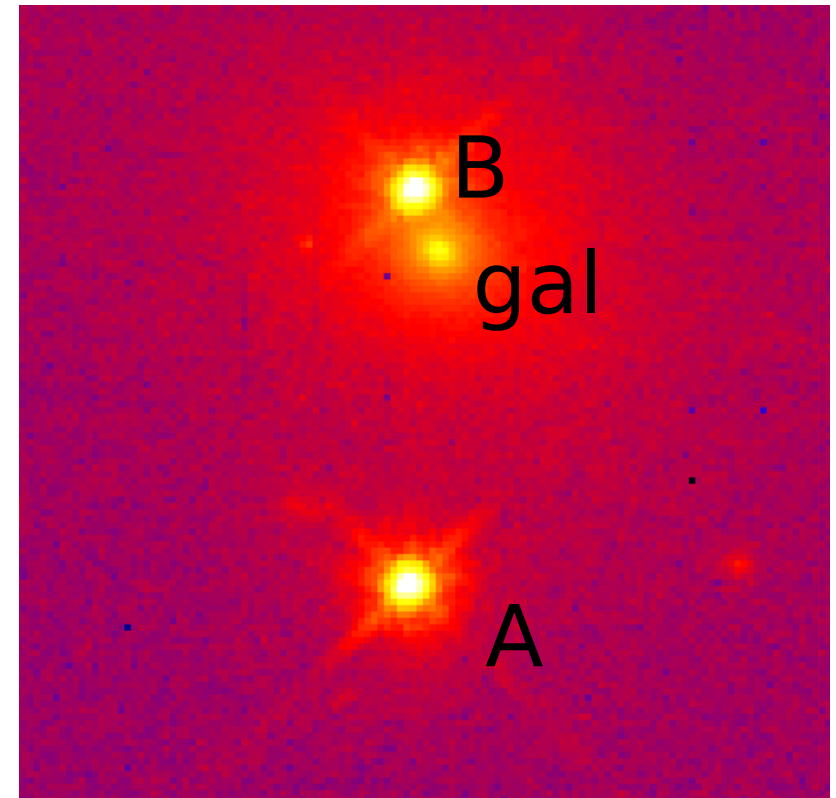
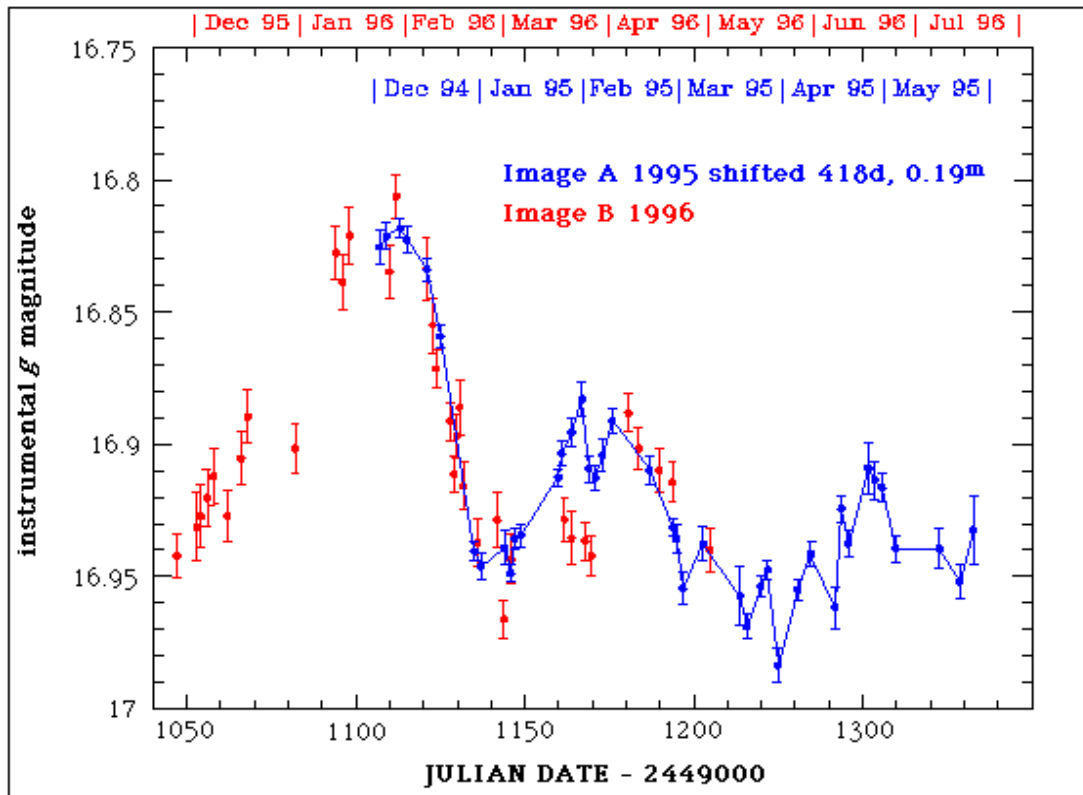
HST



Zwei Quasarbilder, 6.1 Bogensekunden Abstand,
 $z=1.41$, Galaxie dazwischen: $z = 0.36$

Die erste Gravitationslinse Q0957+561

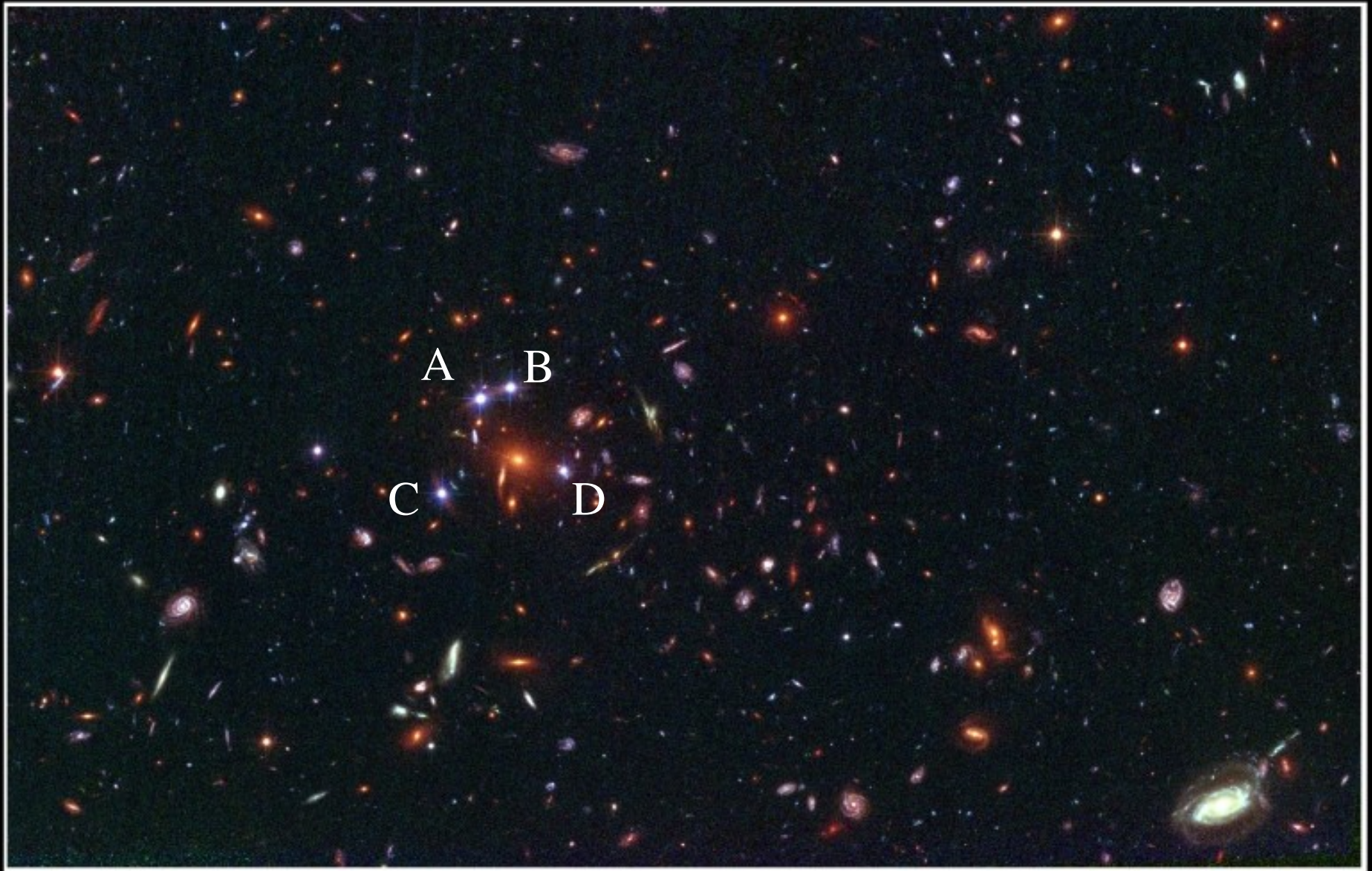
HST



Lichtlaufzeitunterschied: 418 ± 3 Tage
(Kundic et al.)

Vierfachquasar SDSS1004+4112

$z_g=0.68$ $z_Q=1.73$



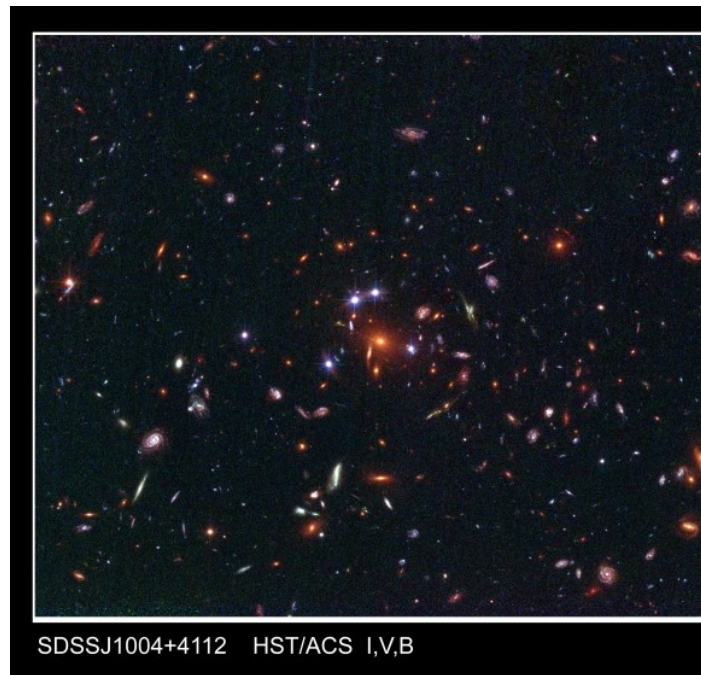
SDSSJ1004+4112 HST/ACS I,V,B

N →

Vierfachquasar SDSS1004+4112



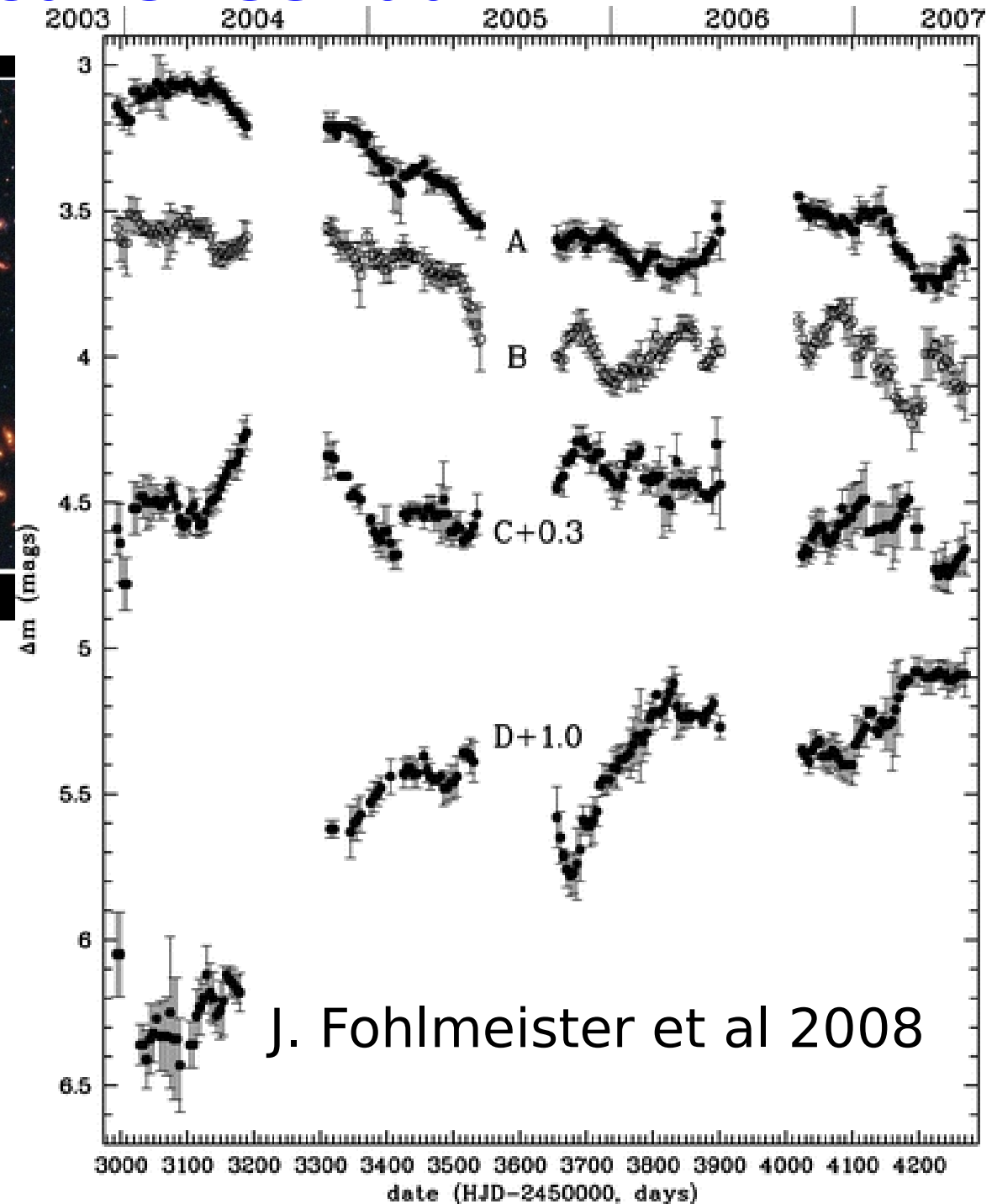
Vierfachquasar SDSS1004+4112



$AB = 41 \pm 2$ Tage

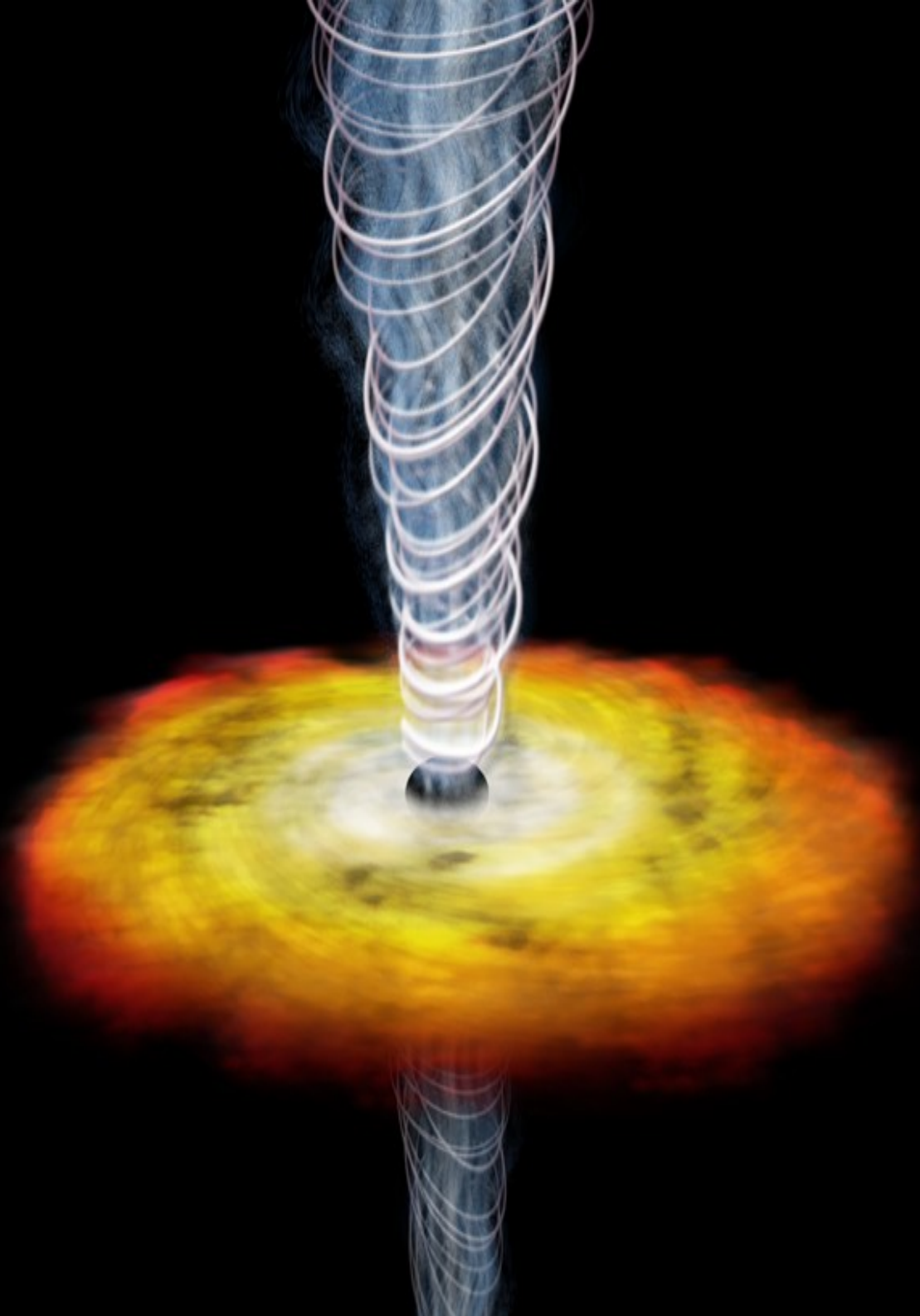
$CA = 822 \pm 2$ Tage

$C - A - B$



3. Microlensing und Quasare

Abb.: CXC/NASA



Der Vierfachquasar “Einstein Kreuz”

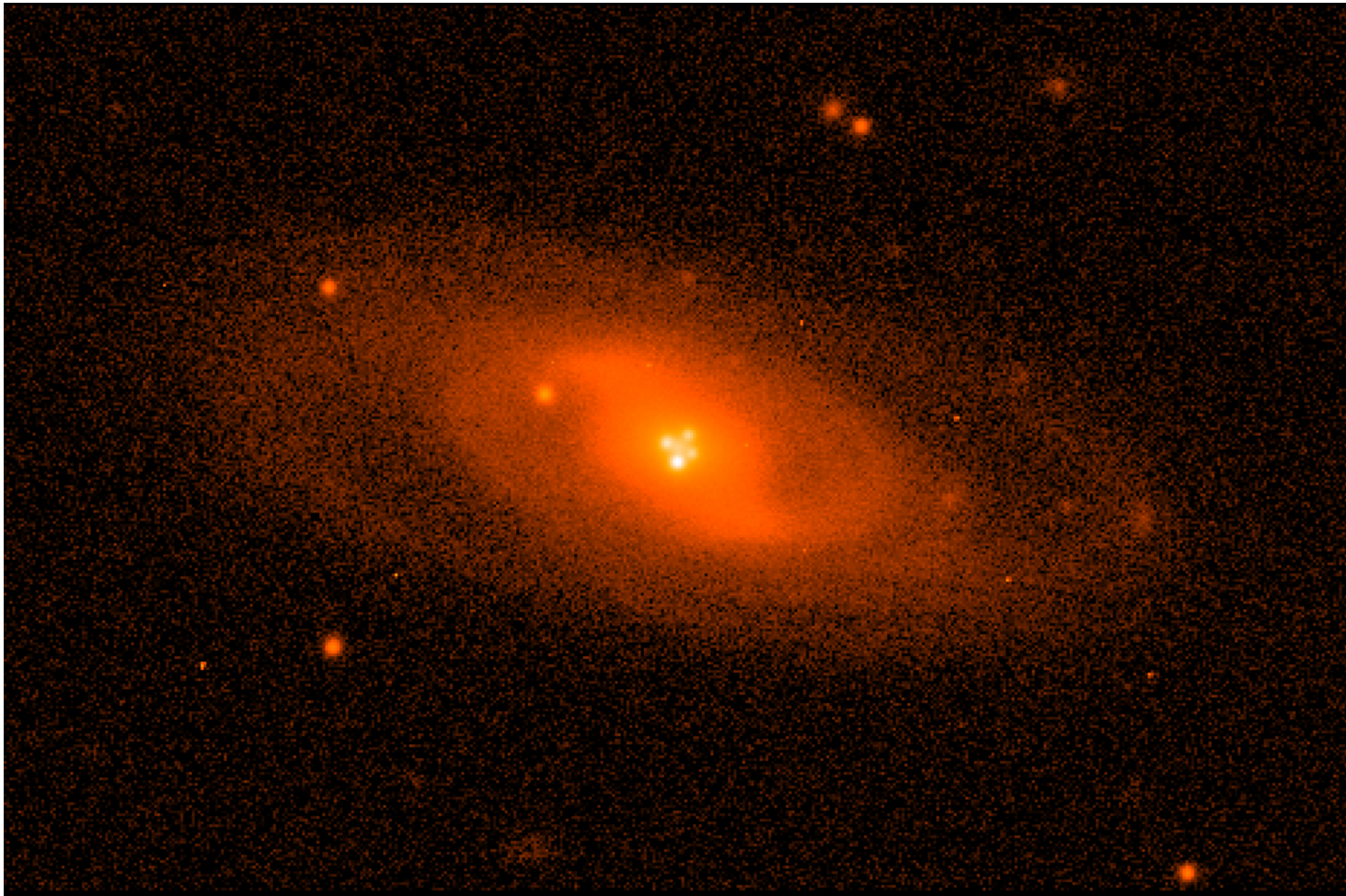


Image credit: Christina Abajas and IAC, Tenerife

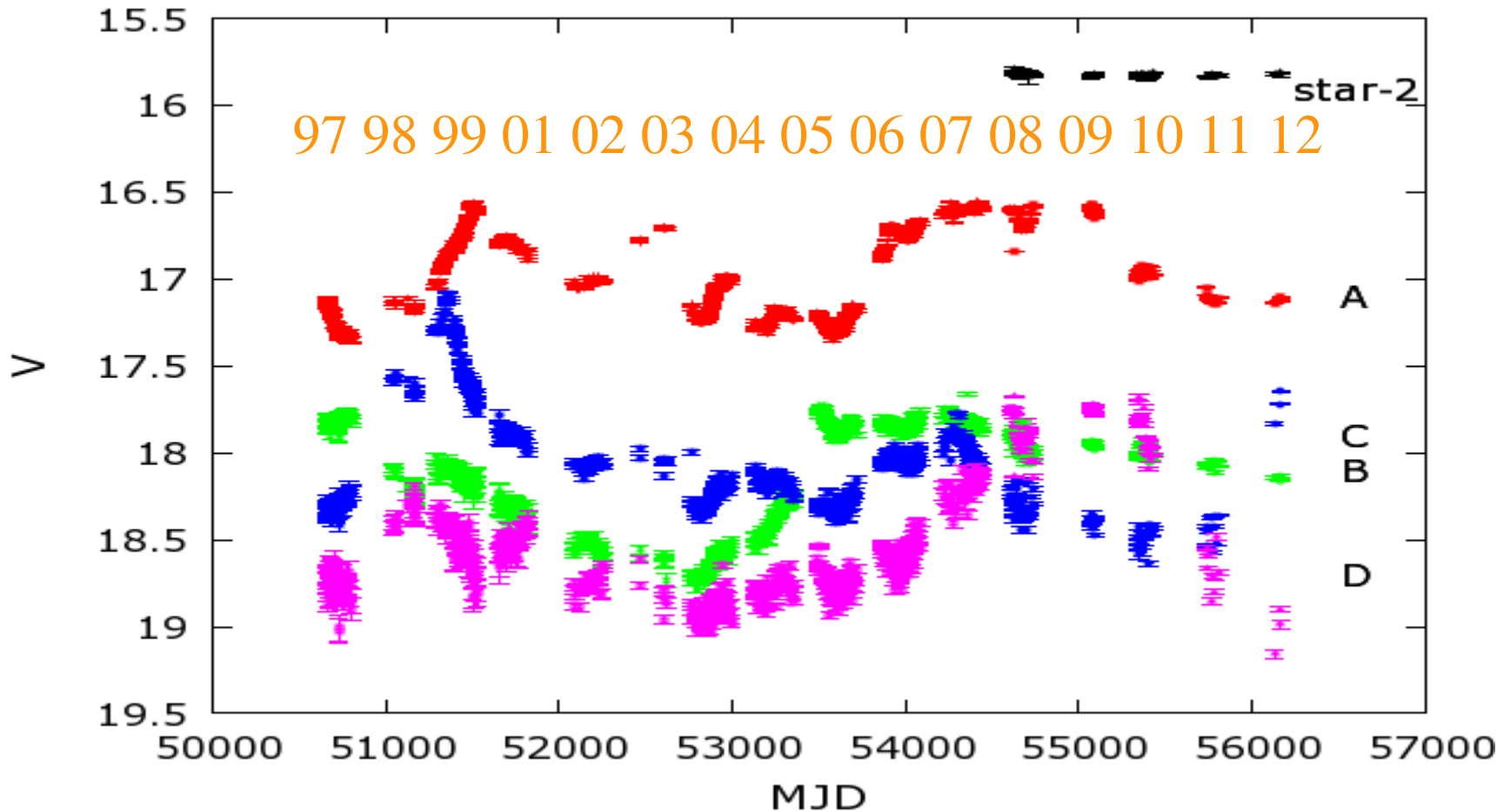
$z = 1.695$, Abstand 1.7 Bogensekunden;
Galaxie bei Rotverschiebung $z = 0.04$

Veränderungen die NICHT vom Quasar selbst kommen



G. Lewis 1996

OGLE: 1997-2008

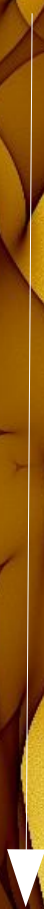


Mindstep 2008--

(Doktorarbeit E. Giannini, HD)

Microlensing hängt von der Quellgröße ab

1

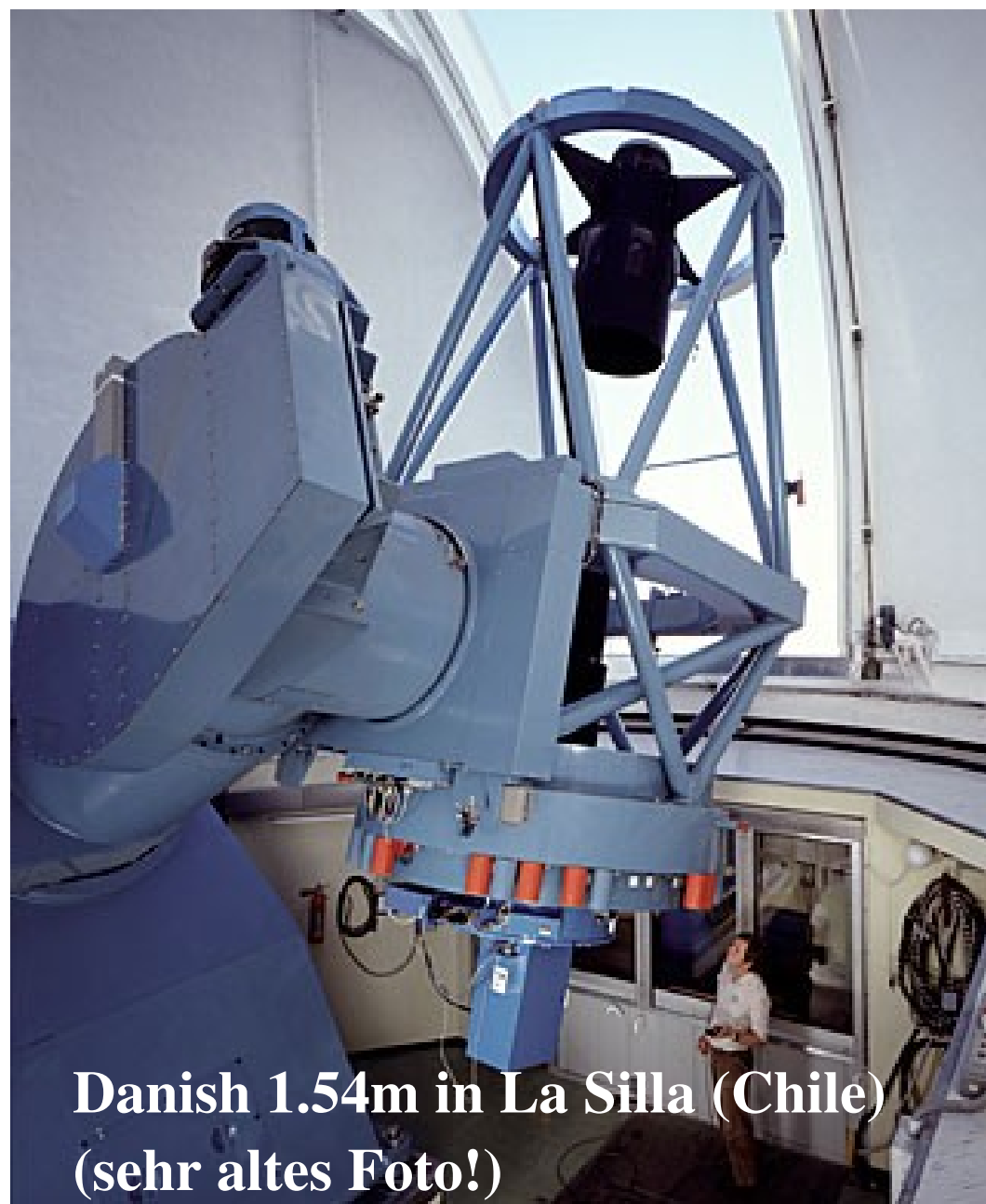


4

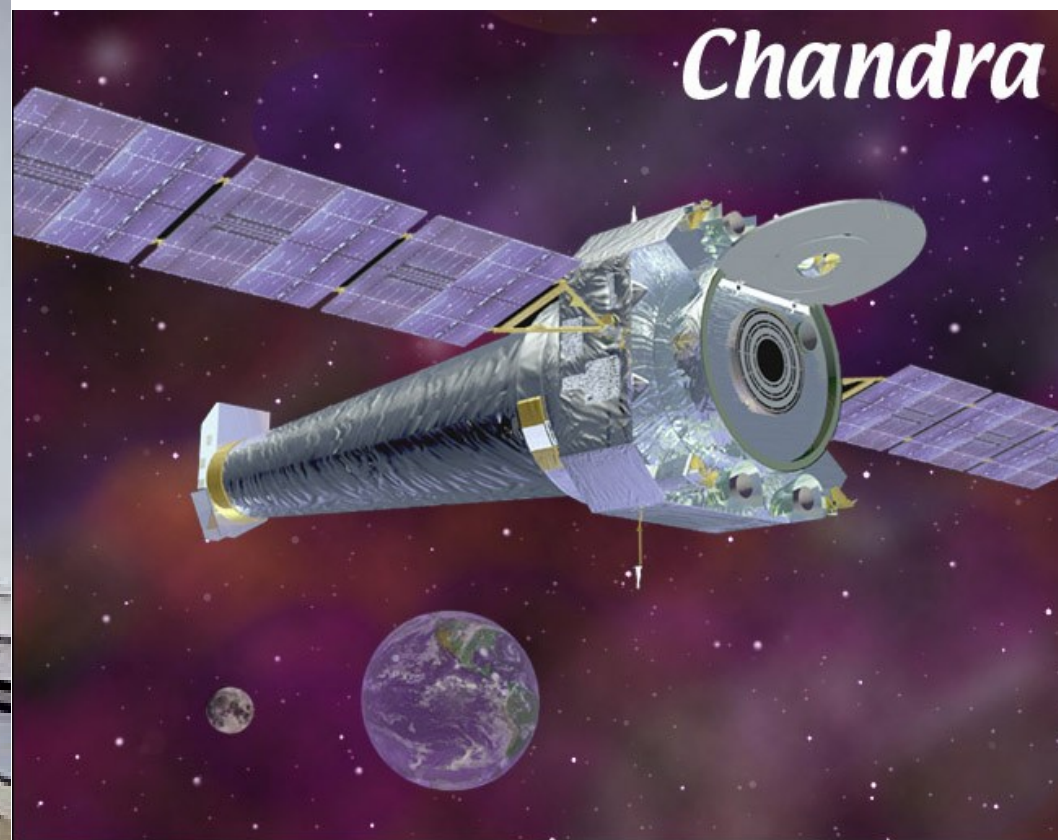


10

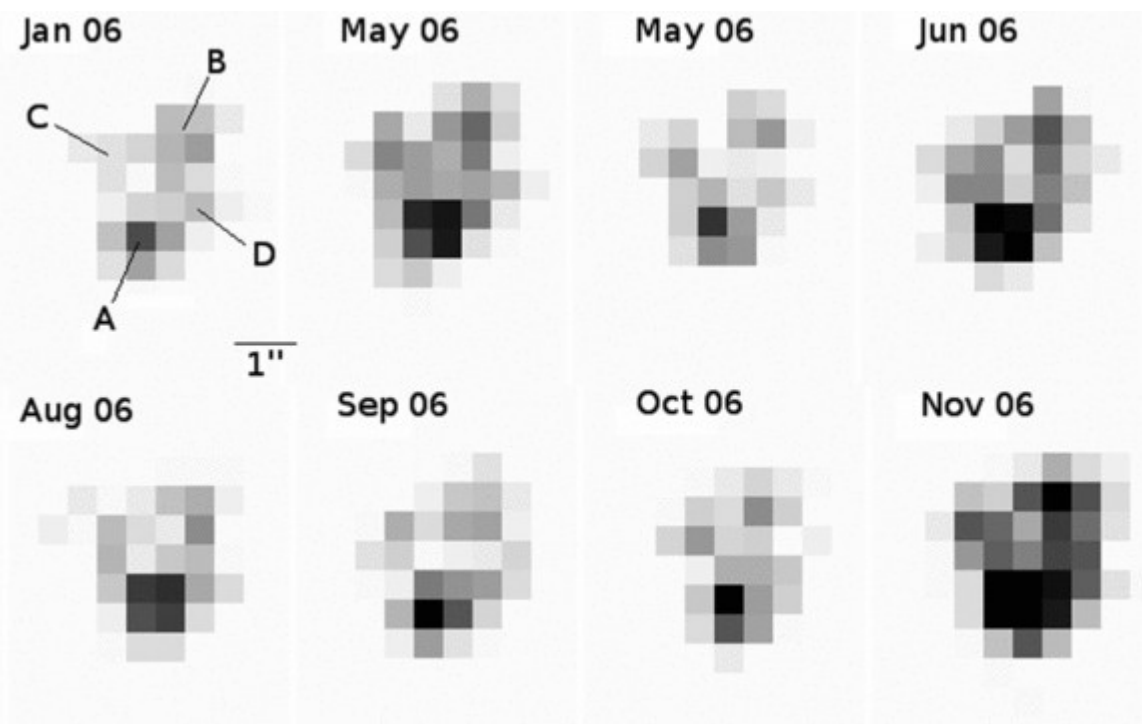




Danish 1.54m in La Silla (Chile)
(sehr altes Foto!)

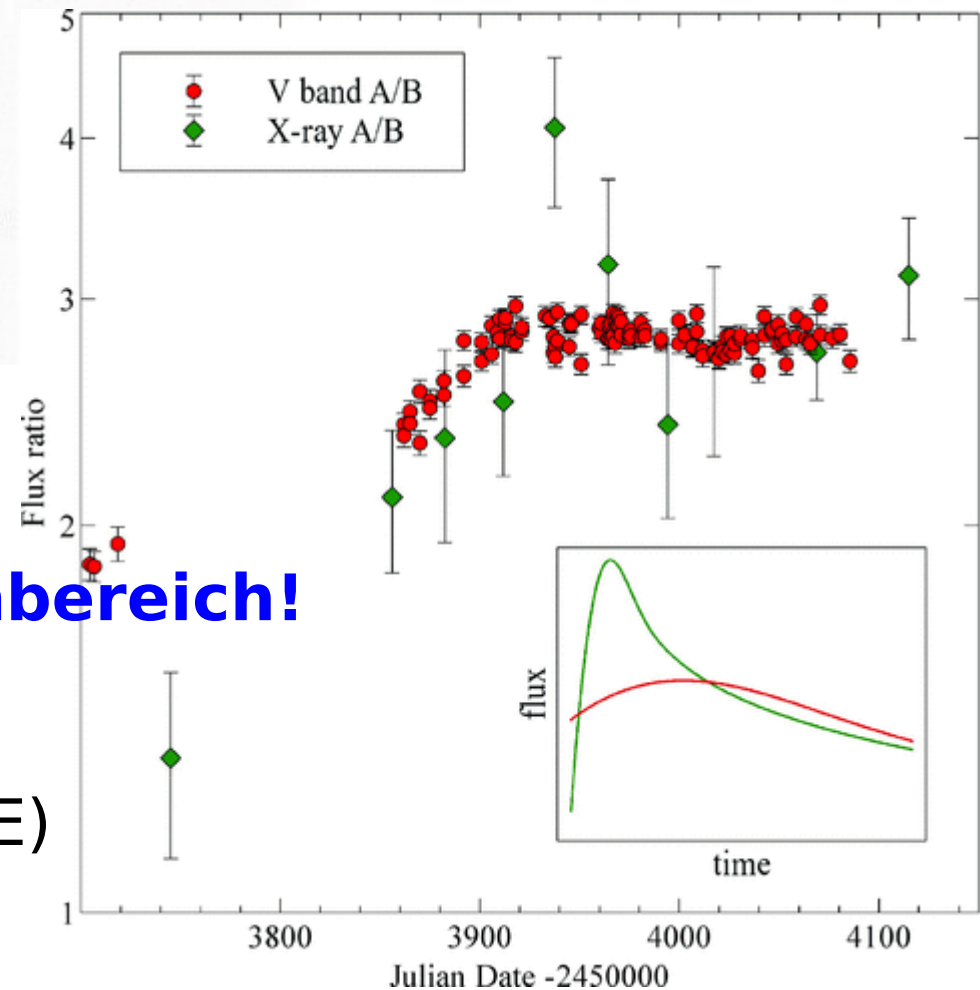


Röntgenteleskop
Elliptischer Orbit $\rightarrow$ 1/3 Mond



Mikrolinseneffekt im Röntgenbereich!

Einzelne Datenpunkte=Chandra
Rot Datenpunkte = optisch (OGLE)

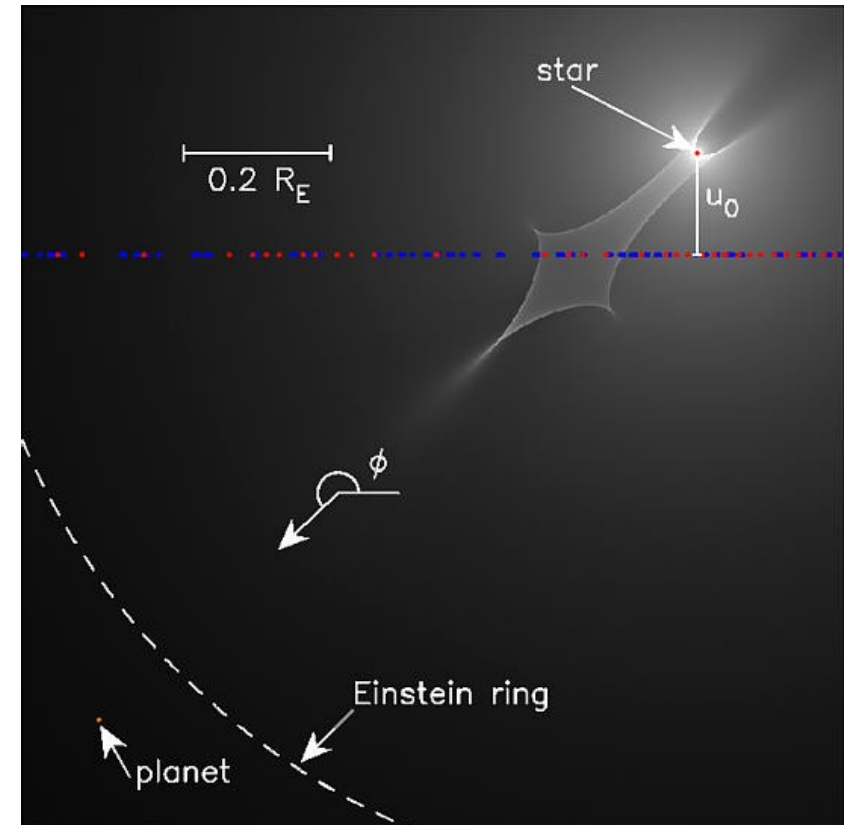
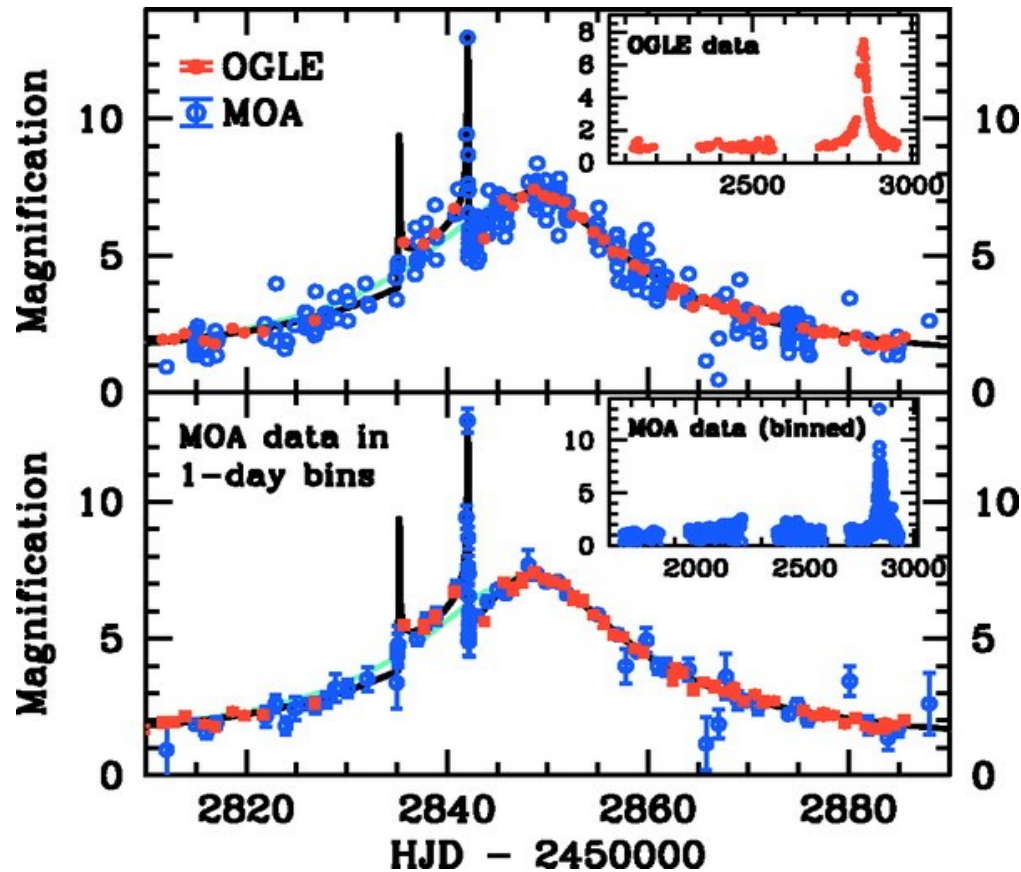


→ Röntgenquelle ~Faktor 10 kleiner als die Region
des sichtbaren Lichts

Und noch eine andere Art von Microlensing:

Der erste “Mikrolinsen-**Planet**”: OGLE-2003-BLG-235

Bond et al. (2004)

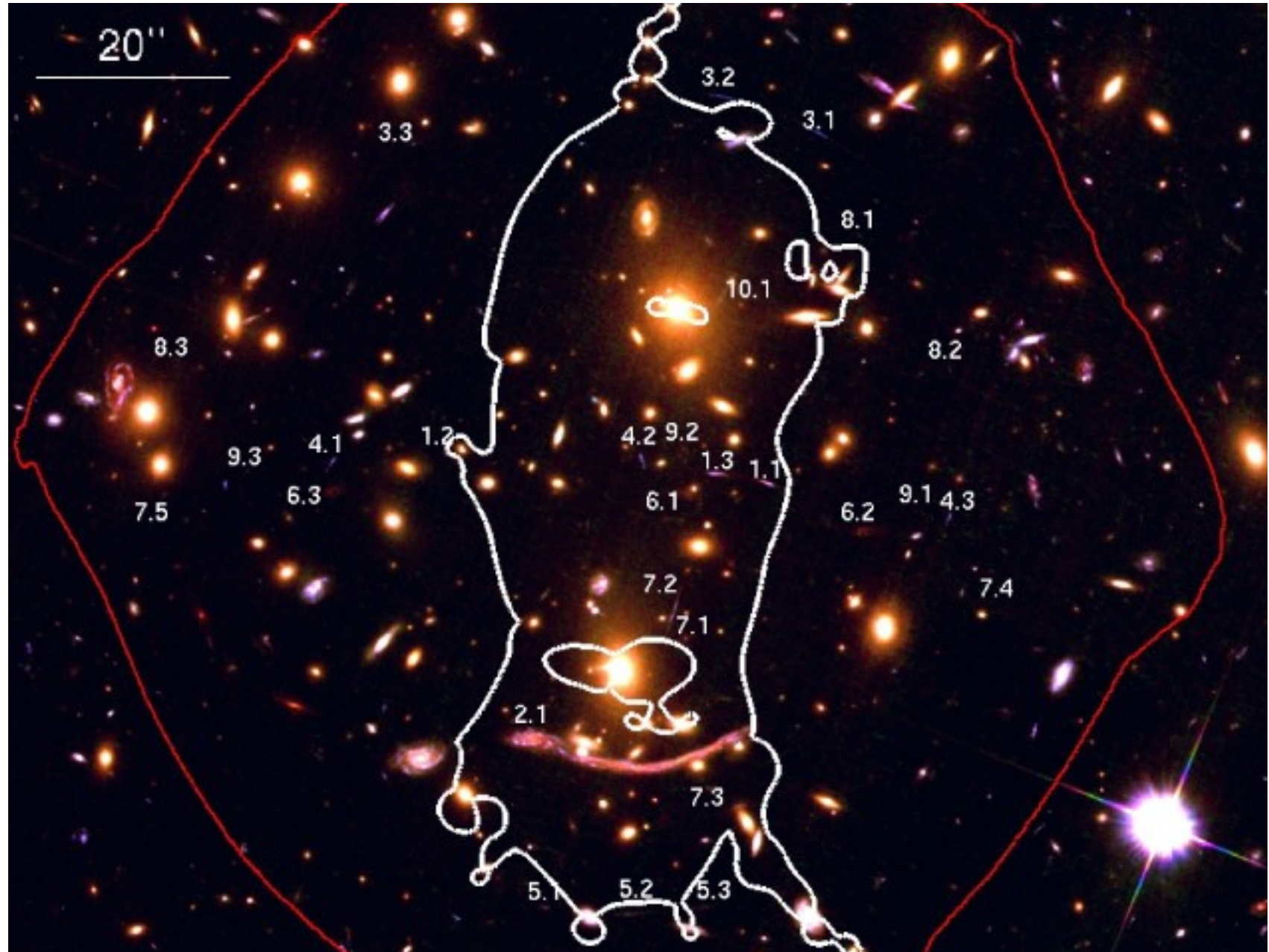


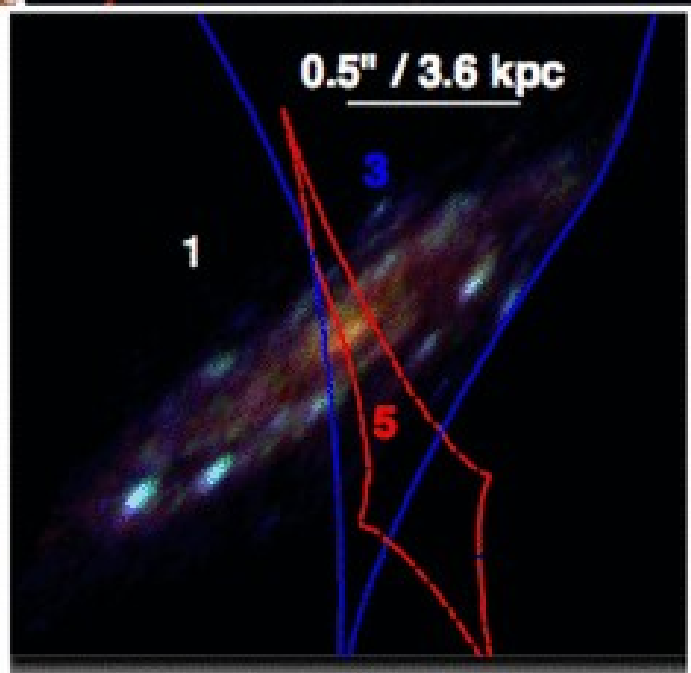
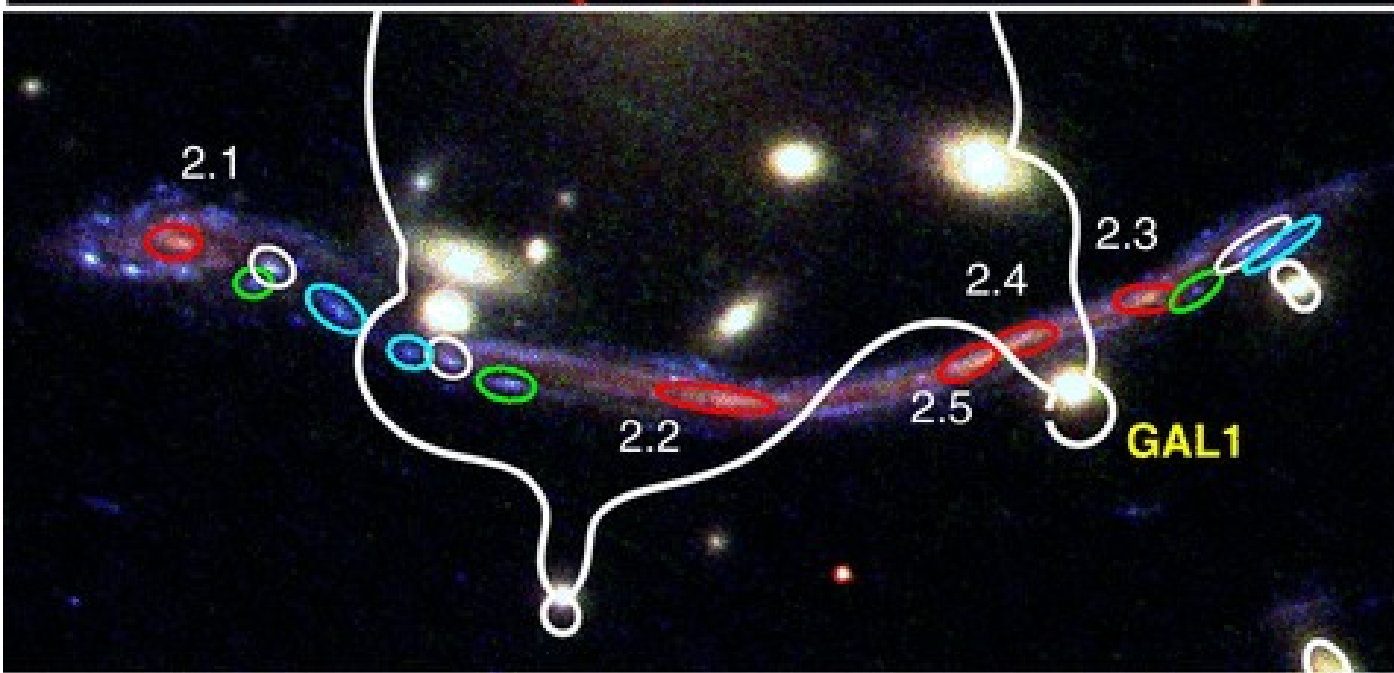
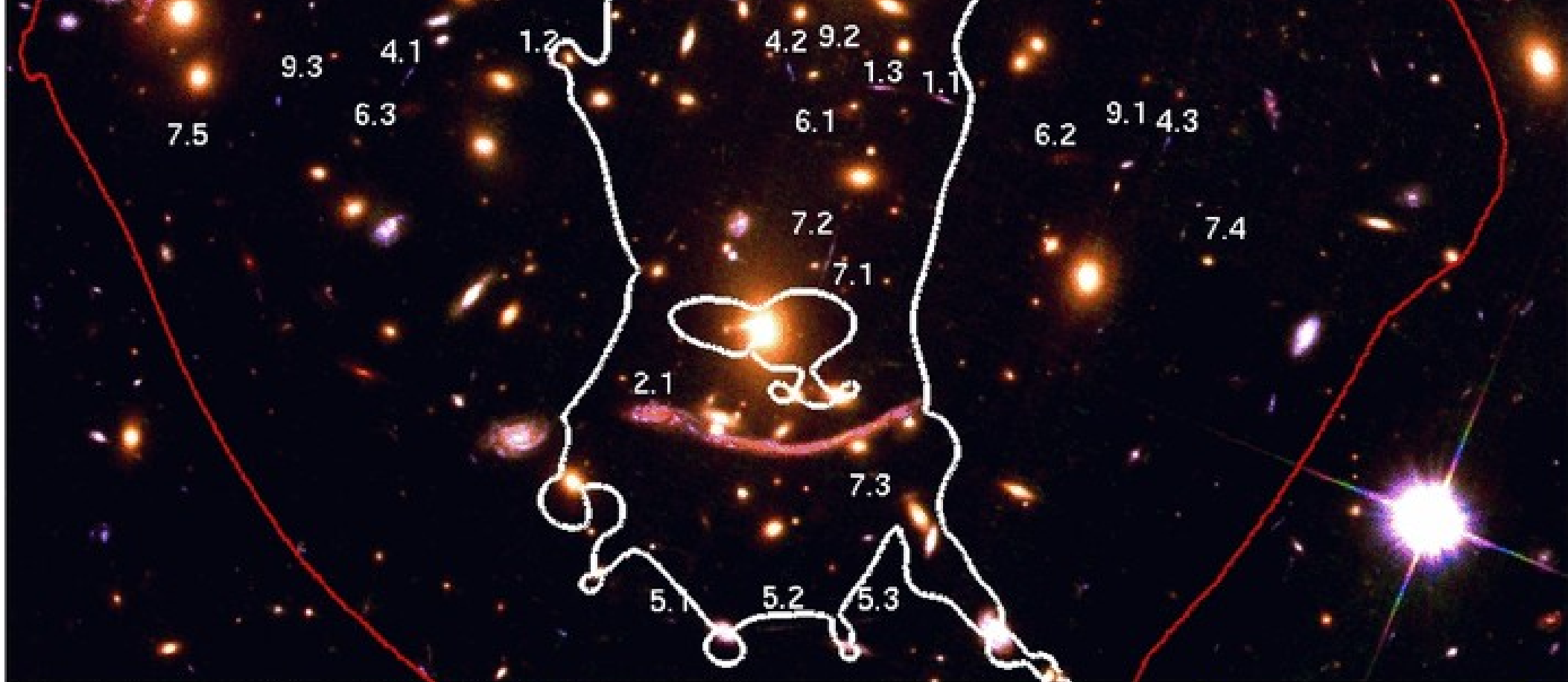
Abstand Planet-Stern: 3 Erdabstände

Planeten-Masse: $1.5 M_{\text{Jup}}$

4. Dunkle Materie

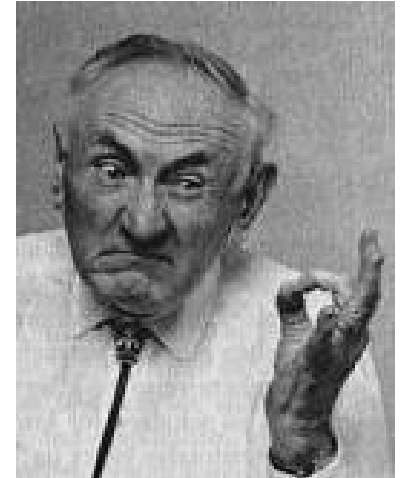
Richard et al 2010: Abell 370 mit dem Hubble Space Telescope





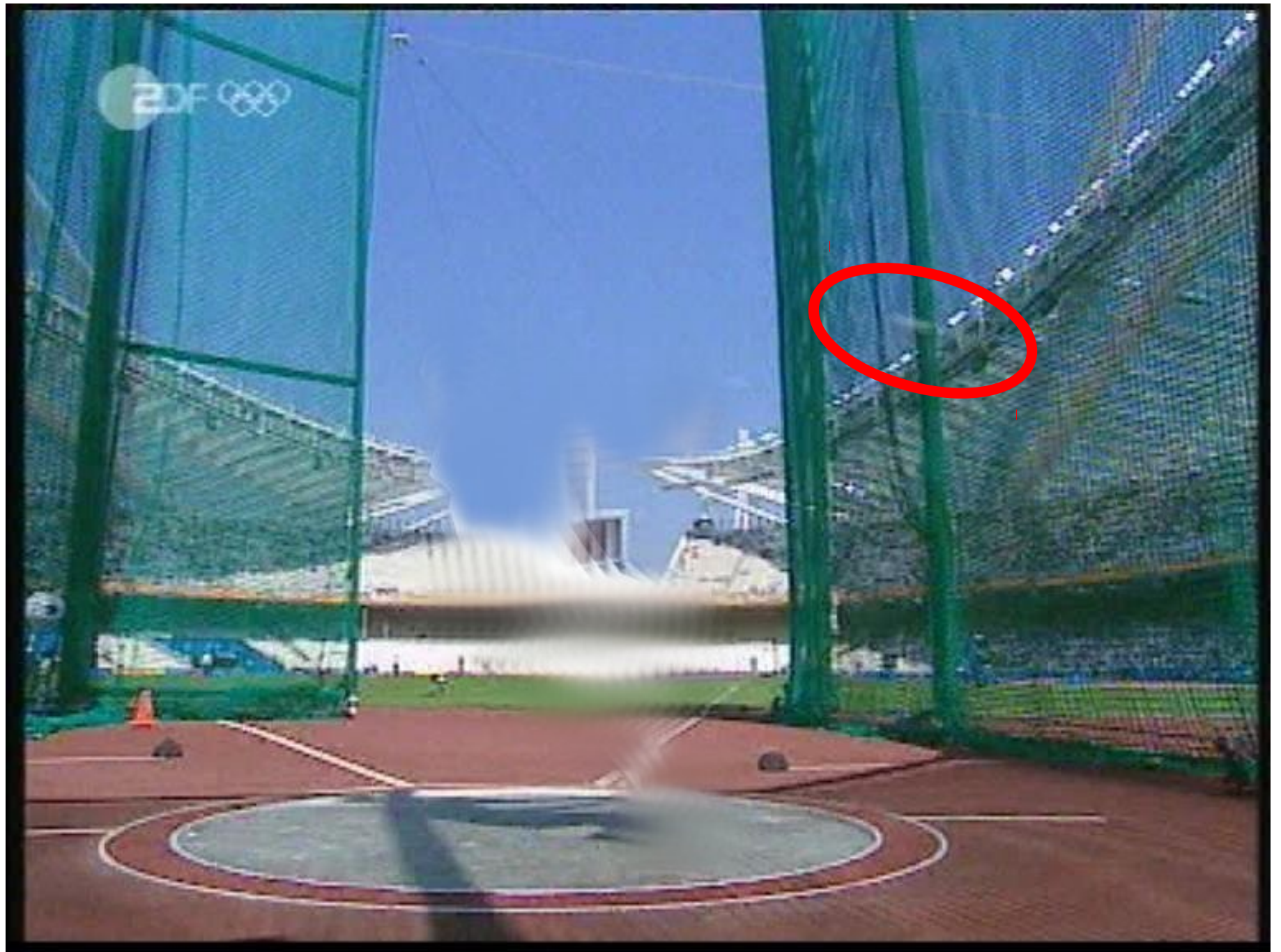
Dunkle Materie in Galaxienhaufen?

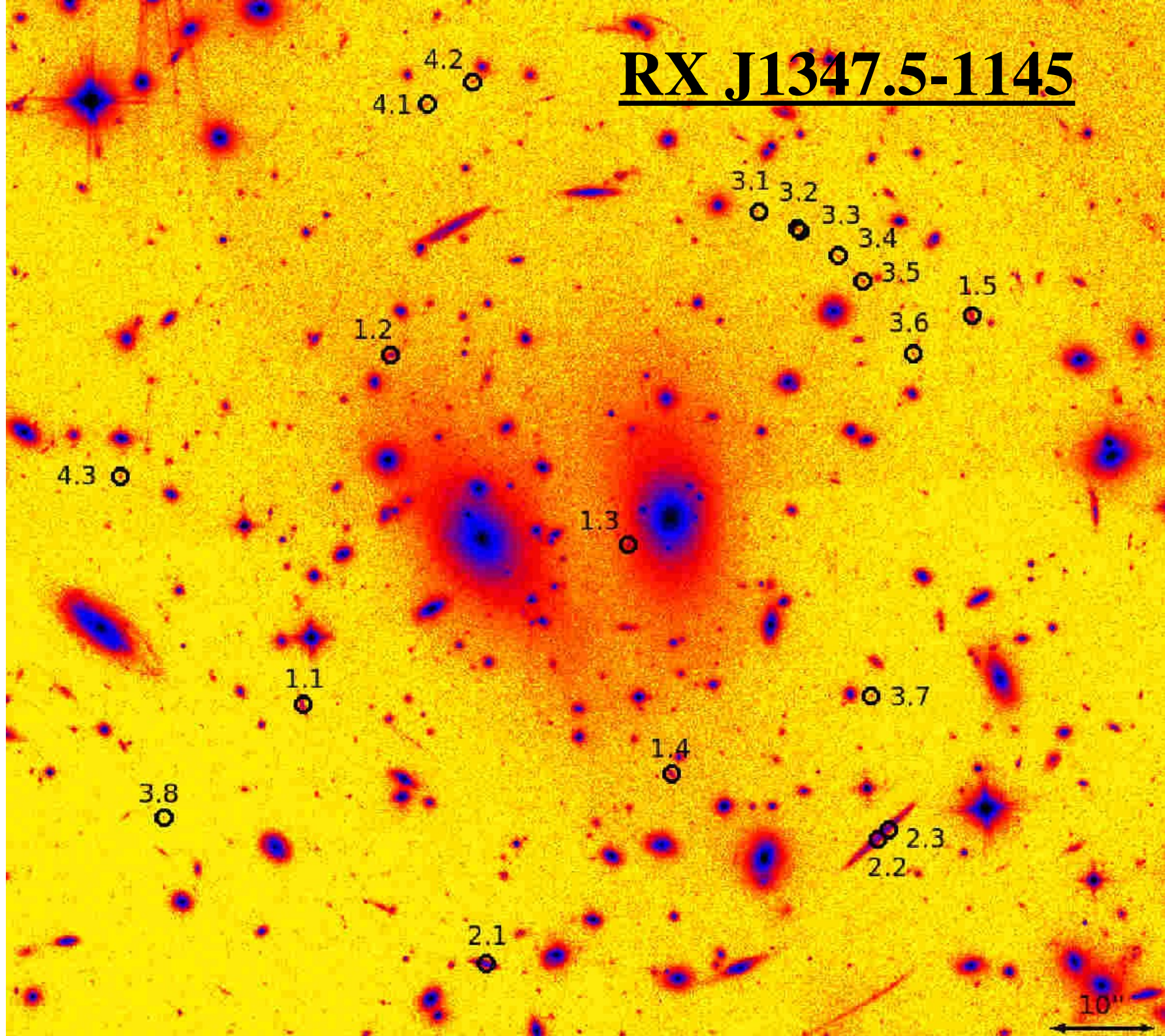
Schon in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts entdeckte Fritz Zwicky, daß die Galaxien in Galaxienhaufen “zu schnell” sind.



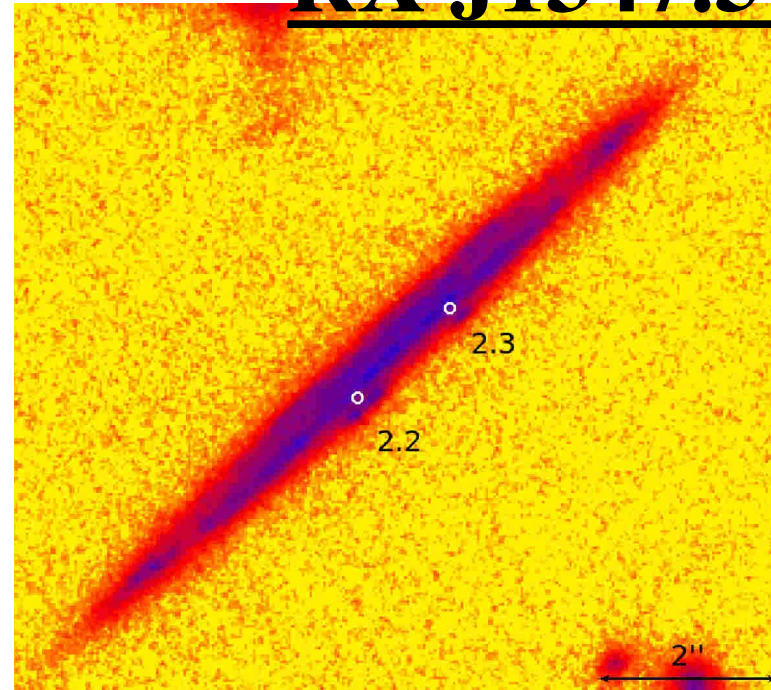
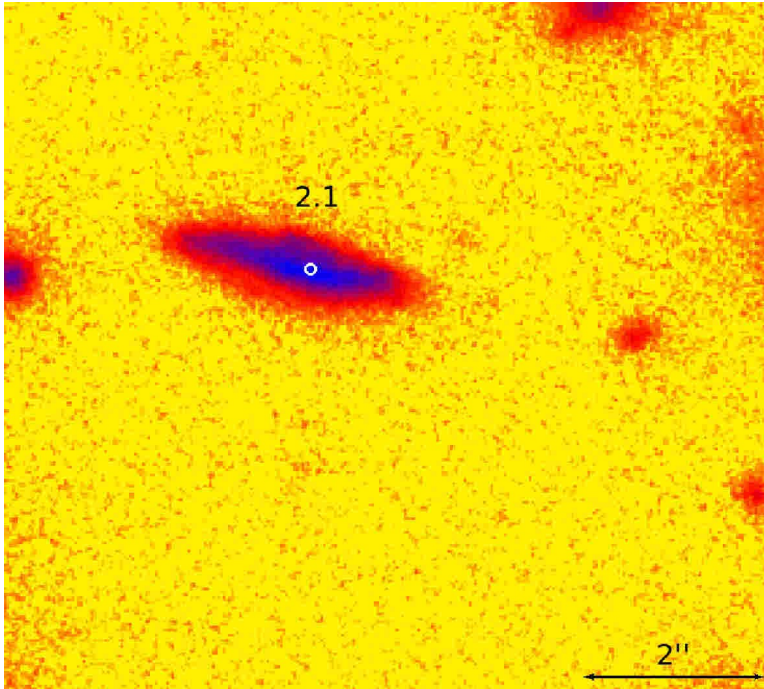
Er konnte nachweisen, daß die Gravitationskraft der Sterne allein nicht ausreicht, den Galaxienhaufen zusammenzuhalten!







RX J1347.5-1145

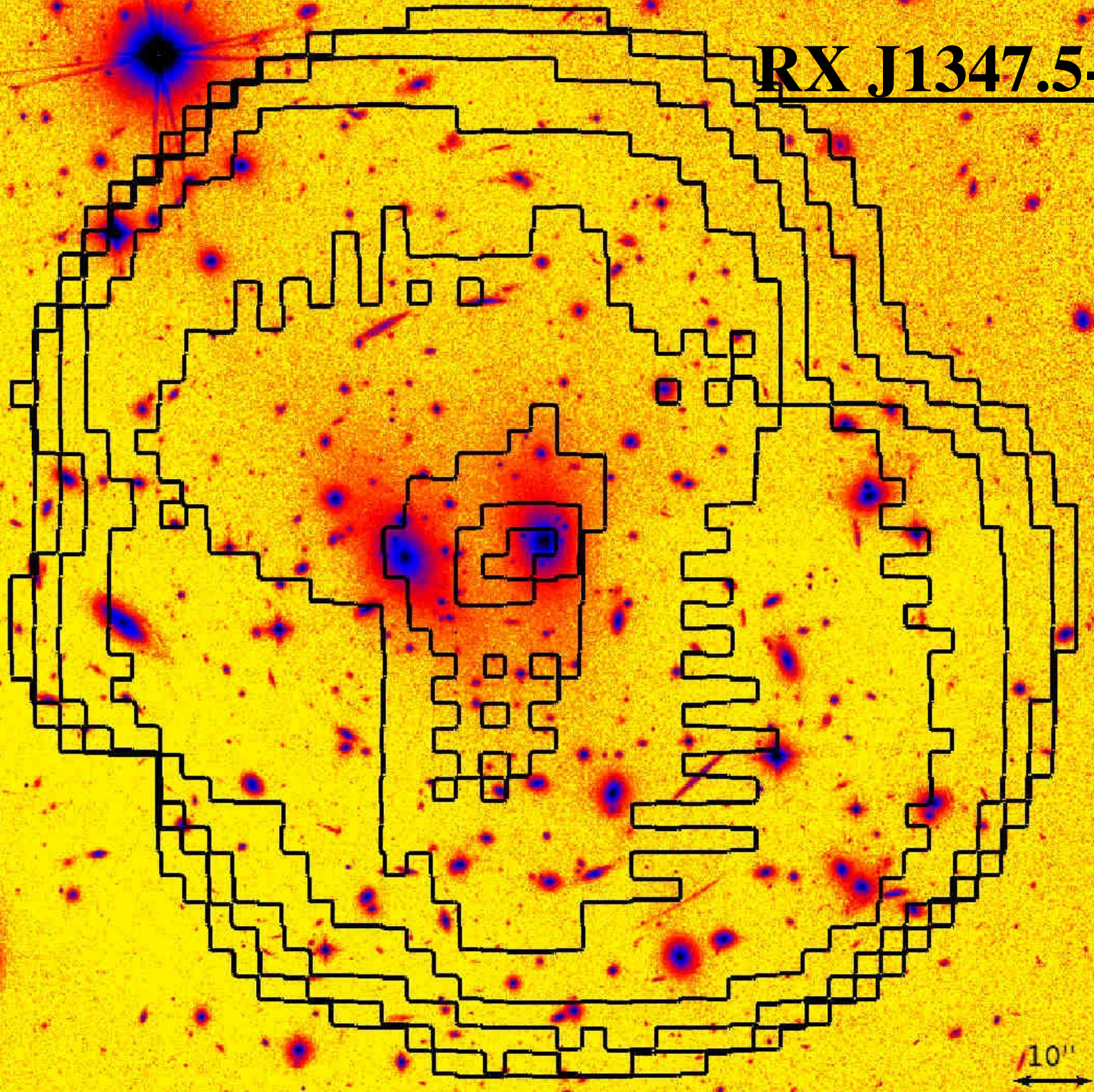


Beispiel: “Größtes” Mehrfachsystem “2” $z=1.78$

($z_{\text{Galhaufen}} = 0.451$)

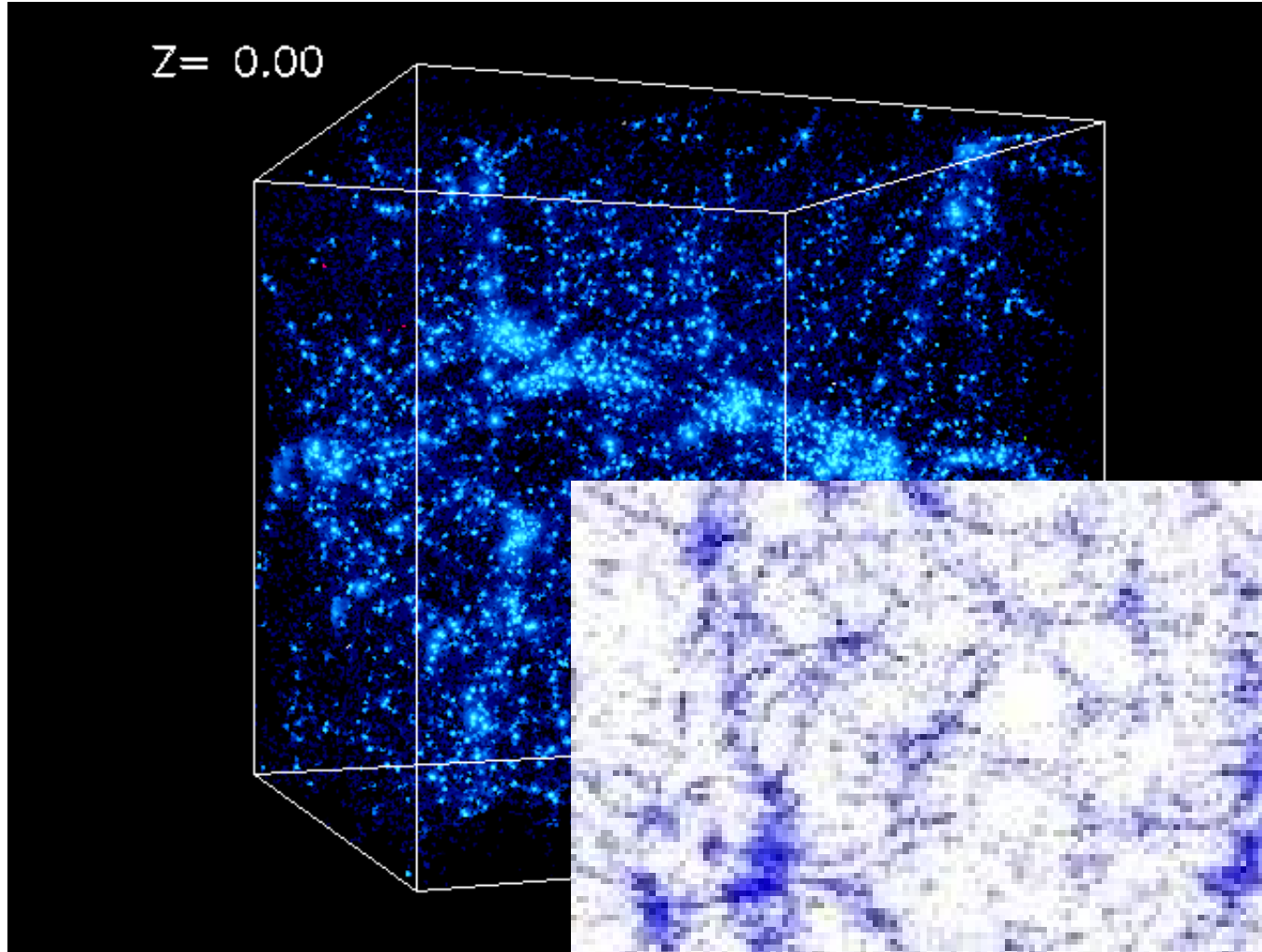


RX J1347.5-1145

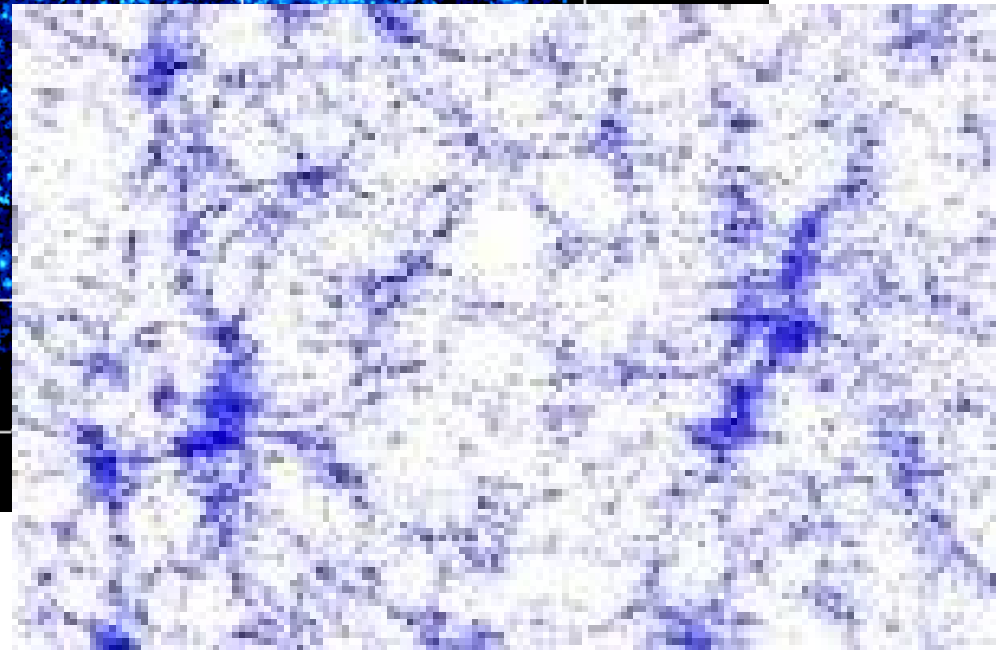


Kontouren konstanter Massendichte

Dunkle Materie als “Gerüst” des Universums



Simulation



Beobachtung (Galaxien!)

Schwacher Linseneffekt

Pot. Pkt-Masse

$$\vec{\alpha} = -\nabla \psi \rightarrow \text{Potenzial } \psi \propto \int_{\text{Himmel}} \Sigma(\vec{\theta}) \ln |\vec{\theta} - \vec{\theta}'| d^2\theta'$$

$$\Sigma \propto \kappa = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2}{\partial \theta_x^2} + \frac{\partial^2}{\partial \theta_y^2} \right) \psi$$

Poisson-Gleichung

$$\gamma_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2}{\partial \theta_x^2} - \frac{\partial^2}{\partial \theta_y^2} \right) \psi$$

Verzerrung (Scherung)

$$\gamma_2 = \frac{\partial^2}{\partial \theta_x \partial \theta_y} \psi$$

$$\gamma = \gamma_1 + i \gamma_2 \propto \int_{\text{Himmel}} D(\vec{\theta} - \vec{\theta}') \kappa(\vec{\theta}') d^2\theta'$$

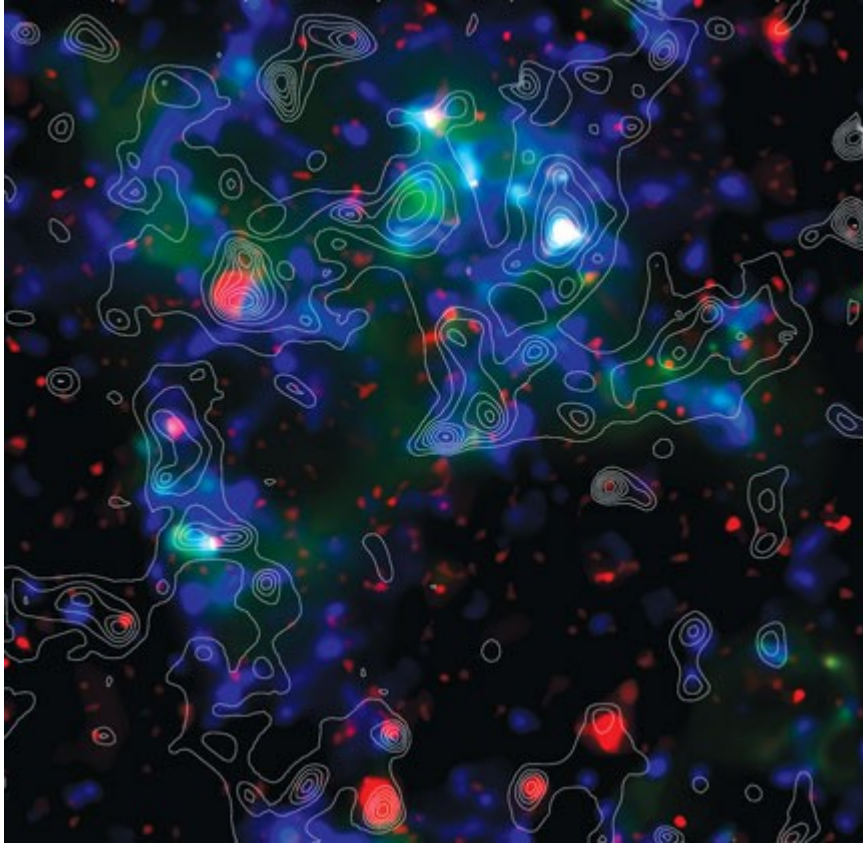
$$D(\vec{\theta}) = \frac{\theta_y^2 - \theta_x^2 - 2i\theta_x\theta_y}{|\vec{\theta}|^4}$$

Zusammenhang Gamma $\leftrightarrow$ Kappa

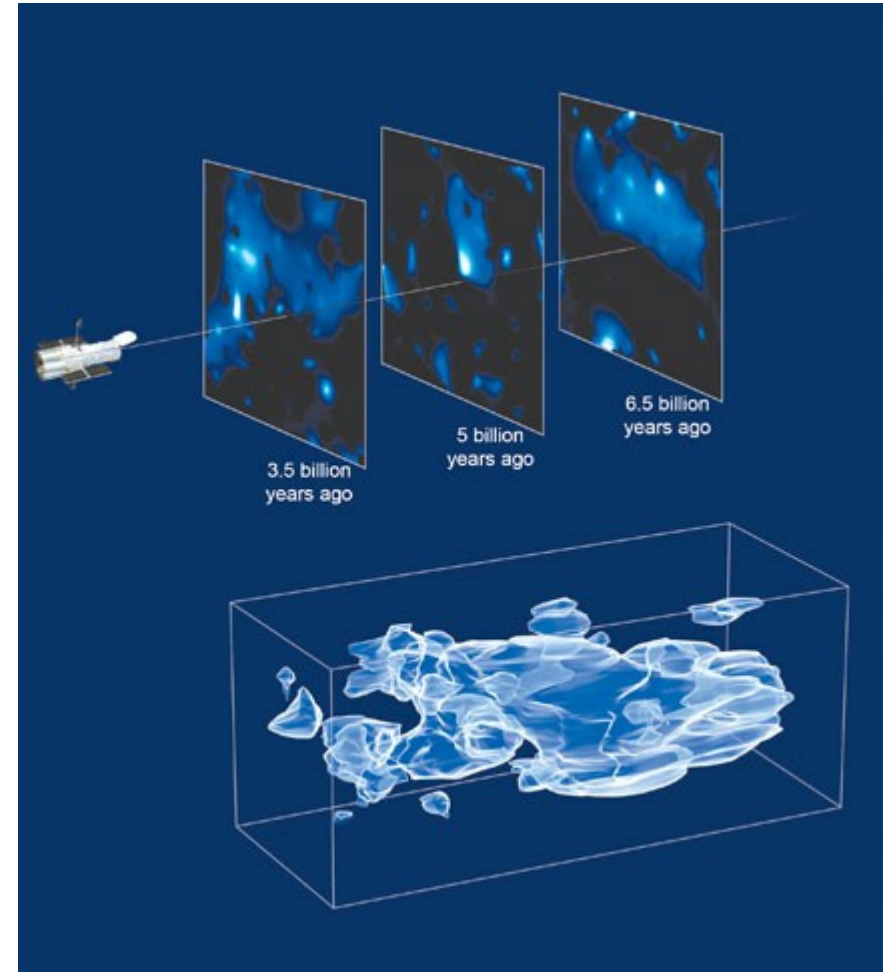
$$\text{Kaiser- Squires 1993: } \kappa(\vec{\theta}) \propto \int_{\text{Himmel}} \Re [D^*(\vec{\theta} - \vec{\theta}') \vec{\gamma}(\vec{\theta}')] d^2\theta' + \text{const.}$$

$$\kappa \ll 1 \rightarrow \epsilon \approx |\gamma|$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{N} \sum_{k \text{ Galaxien}} \epsilon_k \exp(2i\varphi_k)$$

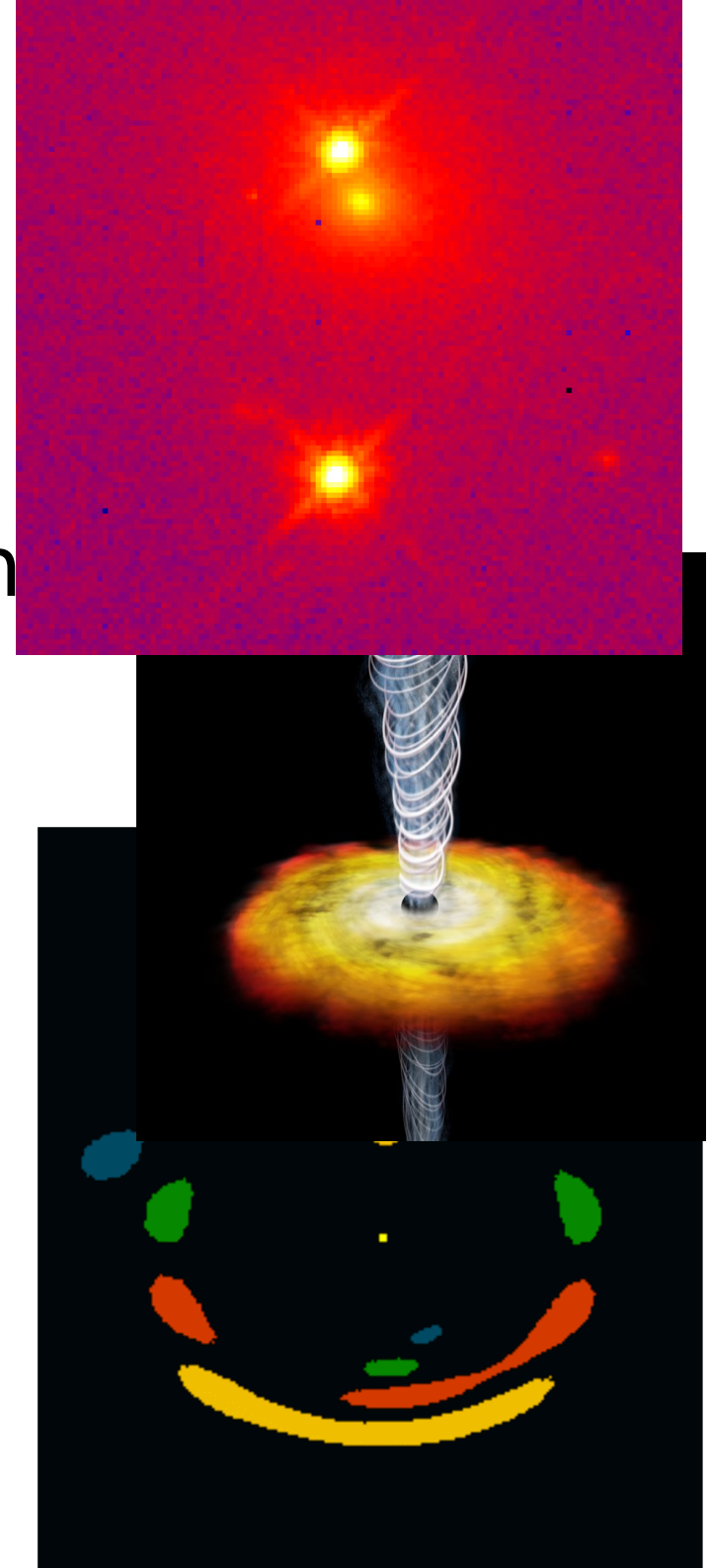


Schwacher Linseneffekt
Im COSMOS-Feld



Zum Mitnehmen

- Gravitationslinsen erzeugen Mehrfachbilder
- Gravitationslinsen vergrößern die Kernregionen von Quasaren!
- Auch Planeten sind Gravitationslinsen
- Dunkle Materie ist auch nur Materie → und lenkt damit auch Licht ab.



Ende