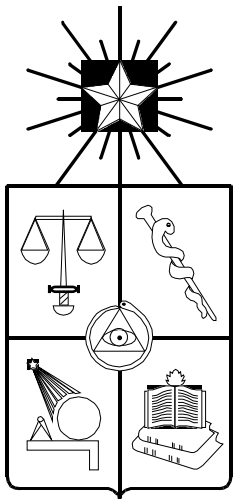


Lentes gravitacionales

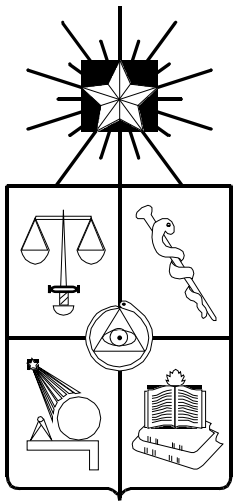


Sebastian Lopez
Departamento de Astronomía
Universidad de Chile

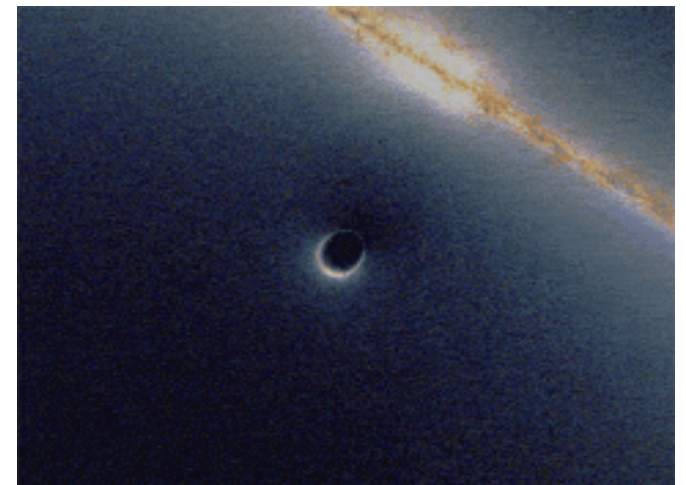


Lentes gravitacionales

Deflección de la luz por campo gravitacional



Sebastian Lopez
Departamento de Astronomía
Universidad de Chile



◆ Historia

- ◆ Primer artículo sobre deflección de la luz cerca de cuerpos masivos:

“Ueber die Ablenkung eines Lichtstrals von seiner geradlinigen Bewegung, durch die Attraktion eines Weltkörpers, an welchem er nahe vorbeigeht“

Johann Soldner, **1804**, geodesista, matemático y astrónomo alemán del Observatorio de Berlín



◆ Historia

- ◆ Primer artículo sobre deflección de la luz cerca de cuerpos masivos:

“Ueber die Ablenkung eines Lichtstrals von seiner geradlinigen Bewegung, durch die Attraktion eines Weltkörpers, an welchem er nahe vorbeigeht“

Johann Soldner, **1804**, geodesista, matemático y astrónomo alemán del Observatorio de Berlín

$$\phi = 0.84 \text{ arcsec}$$

◆ Historia

- ◆ Segundo artículo sobre deflección de la luz cerca de cuerpos masivos:

“Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes”

Albert Einstein (1911) *Annalen der Physik*, 35, 898



◆ Historia

- ◆ Segundo artículo sobre deflección de la luz cerca de cuerpos masivos:

“Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes”

Albert Einstein (1911) Annalen der Physik, 35, 898

$$\phi = 0.84 \text{ arcsec}$$

◆ Historia

- ◆ Segundo artículo sobre deflección de la luz cerca de cuerpos masivos:

“Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes”

Albert Einstein (1911) Annalen der Physik, 35, 898

Relatividad General
aún no desarrollada!

$$\phi = 2 GM_{sol} / c^2 R_{sol} = 0.84 \text{ arcsec}$$

◆ Historia

Carta Einstein en 1913 a Hale, director de Mt Wilson. Éste sólo contestó después de terminada la I Guerra...

Zürich 14. I. 13.

Aus
 Hoch geehrter Herr Kollege!

Eine einfache theoretische Überlegung macht die Annahme plausibel, dass Lichtstrahlen in einem Gravitationsfelde eine Deviation erfahren.

An Sonnensande müsste diese Ablenkung $0,84^\circ$ betragen und wie $\frac{1}{R}$ abnehmen ($R = \text{Sonnenradius}$).

Es wäre deshalb von grösstem Interesse, bis zu wie grosser Sonnen-nähe ^{helle} Fixsterne bei Anwendung der stärksten Vergrösserungen bei Tage (ohne Sonnenfinsternis) gesehen werden können.

◆ Historia

- ◆ Planes para medir el ángulo erróneamente calculado tuvieron que posponerse (eclipse en Rusia, comienza la I Guerra, investigadores apresados)
- ◆ Cuando se completa la Teoría de Relatividad General, Einstein puede correctamente calcular:

$$\phi = 2 GM_{sol} / c^2 R_{sol} = 1.74 \text{ arcsec}$$

4 corrección de considerar curvatura del espacio

◆ Historia

- ◆ Se mide ángulo correcto a un 20% de precisión en eclipse de 1919 (Arthur Eddington)

Confirmación más reciente (0.02%): Lebach, D.E., Corey, B.E., Shapiro, I.I., Ratner, M.I., and Webber, J.C., ``*Measurement of the solar gravitational deflection of radio waves using very-long-baseline interferometry*'', Phys. Rev. D, 75, 1439, (1995).

◆ Historia

- ◆ En las décadas posteriores casi nada se investiga sobre lentes gravitacionales.
- ◆ **Chwolson** en 1924 (“*una estrella exactamente detrás de otra resultaría en una imagen circular*”)
- ◆ **Zwicky** en 1937 (“*nebulosas extragalácticas más probables de ser lentificadas*”)
- ◆ ...primera aplicación astronómica ~50 años más tarde!!!



Sjur Refsdal

res casi nada se inves-
cionales.

*la estrella exactamente
en una imagen*

*osas extragalácticas
nteadas”)*

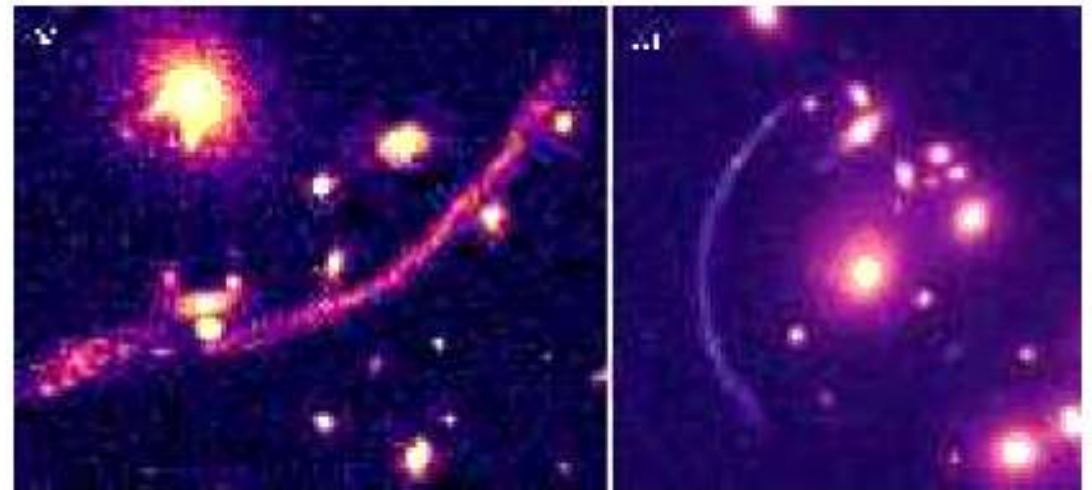
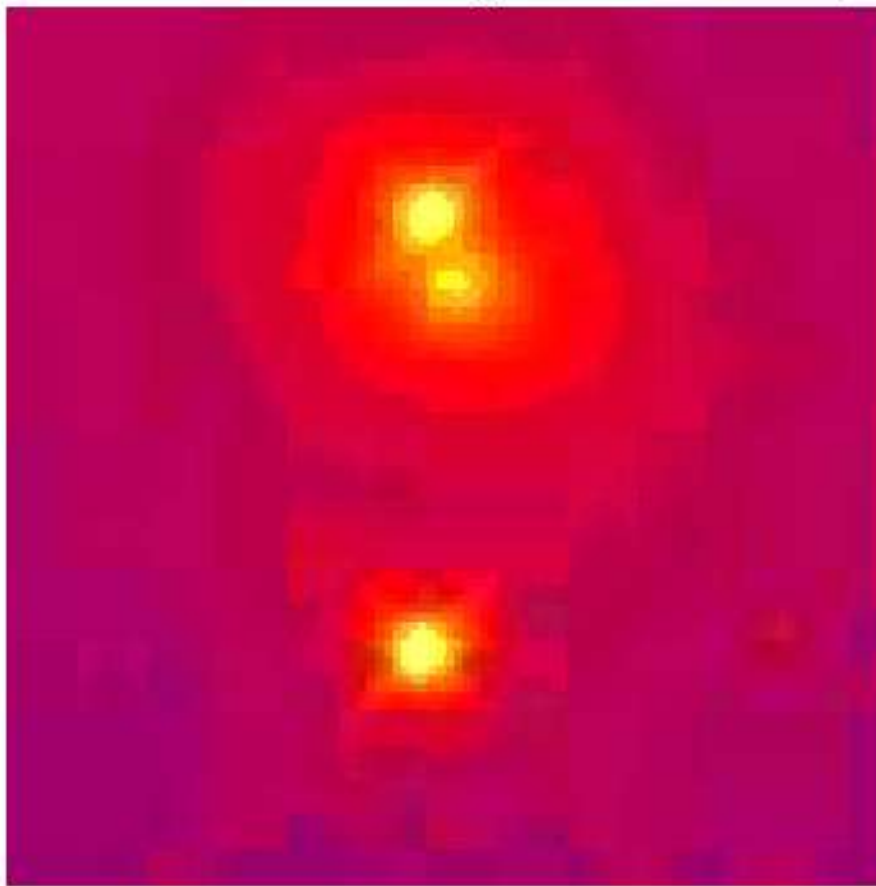
ronómica ~50 años más

◆ Historia

- ◆ Refsdal en los 60 deriva ecuaciones básicas para la teoría de lentes (Refsdal, S., 1966, ``*On the possibility of testing cosmological theories from the gravitational lens effect*'', Mon. Not. R. Astron. Soc., **132**, 101).
- ◆ Propone el uso de time delays para determinar la constante de Hubble.
- ◆ Con el descubrimiento de QSOs se investiga sobre lentes de imágenes distantes.
- ◆ Recién en 1979 se descubre el primer QSO lenticado (Walsh, Carswell & Weymann 1979, Nature, 279,381)

- ◆ Tipos de lensing

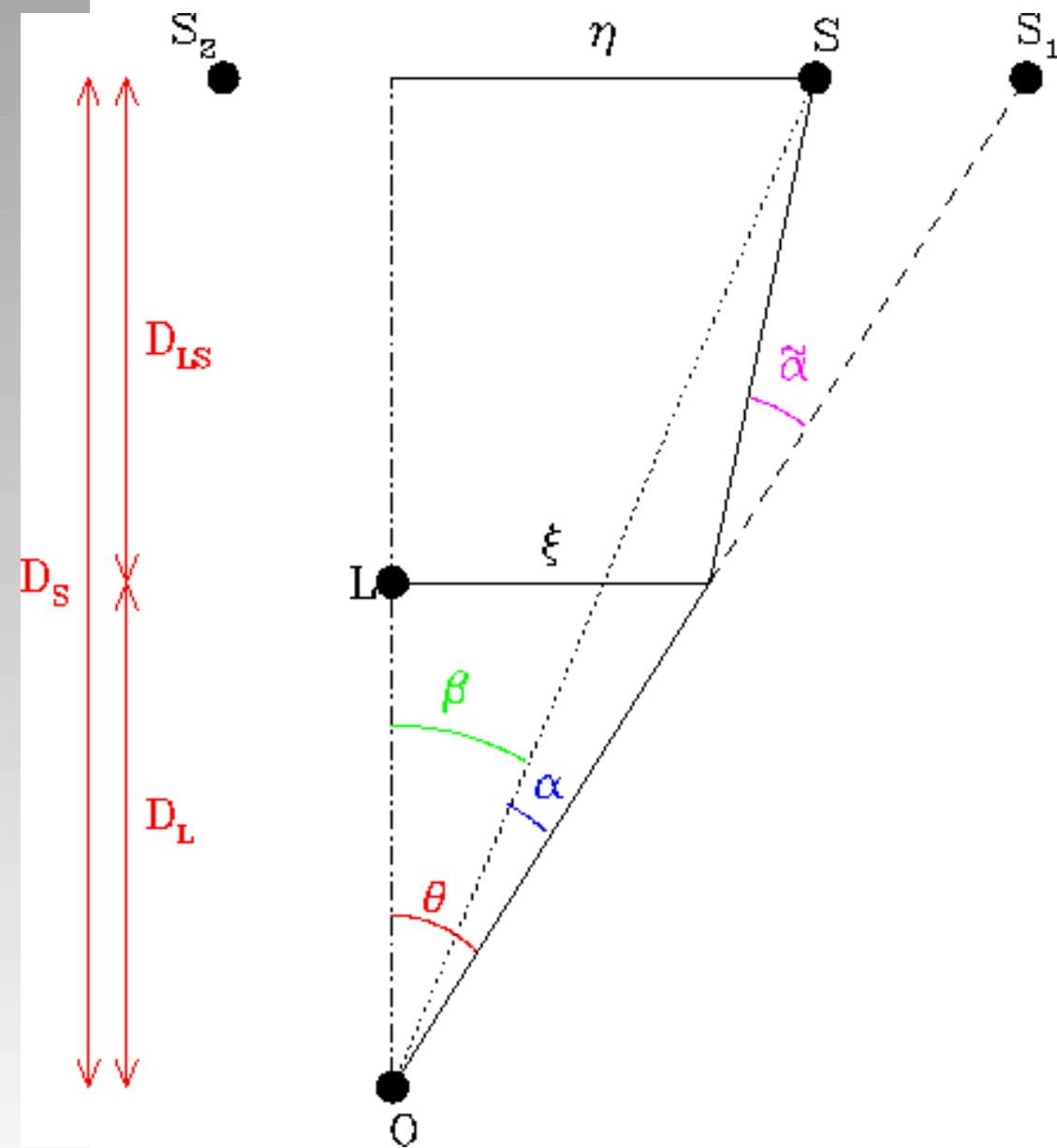
- ◆ **Strong lensing:** imagenes múltiples de QSOs lentificados por galaxias, arcos de galaxias lentificados por galaxias en un cluster



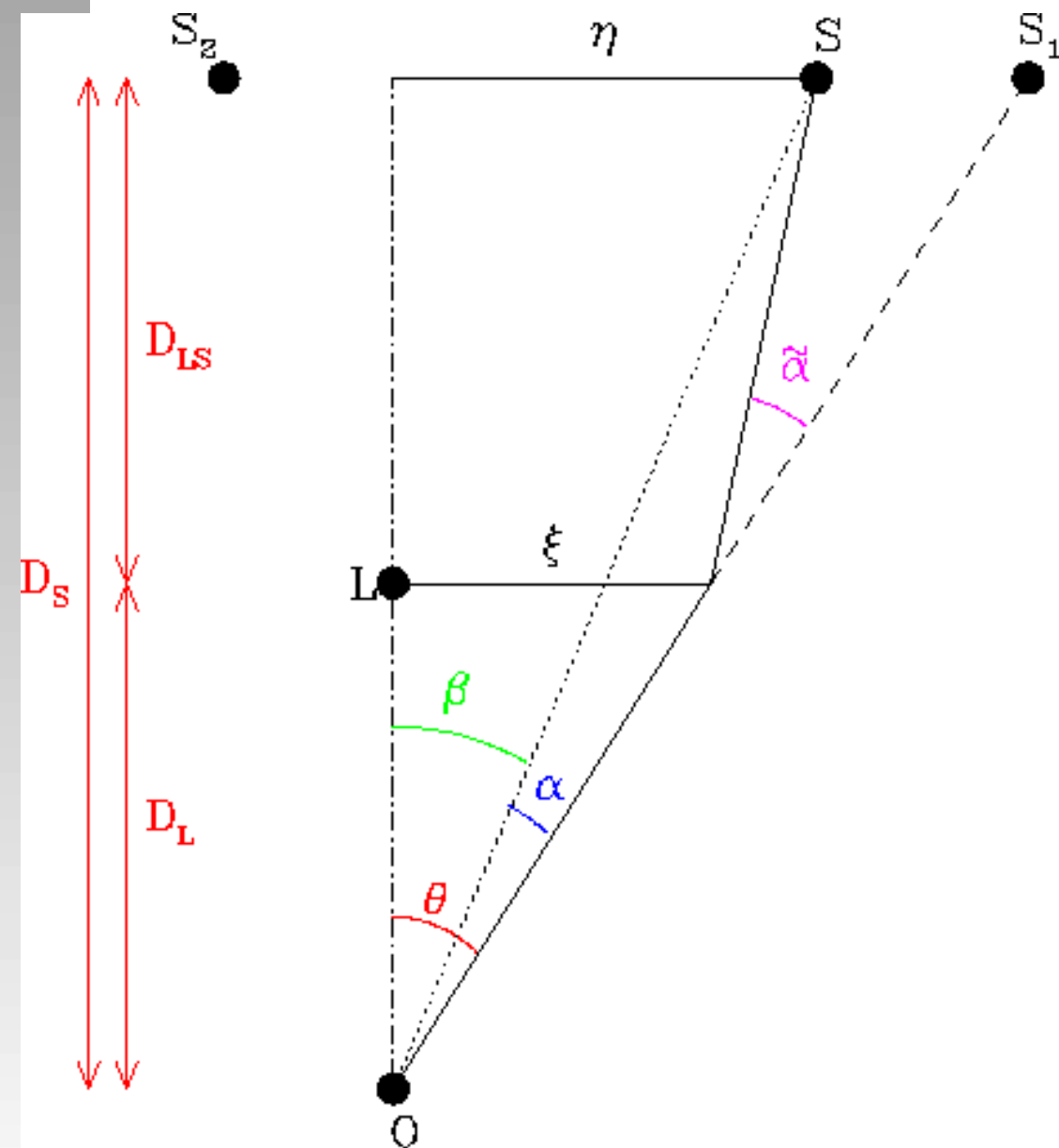
- ◆ Tipos de lensing
 - ◆ **Strong lensing:** imágenes múltiples de QSOs lentificados por galaxias, arcos de galaxias lentificados por galaxias en un cluster
 - ◆ **Weak lensing:** determinación estadística de deformación de galaxias por un cluster

- ◆ Tipos de lensing
 - ◆ **Strong lensing:** imágenes múltiples de QSOs lentificados por galaxias, arcos de galaxias lentificados por galaxias en un cluster
 - ◆ **Weak lensing:** determinación estadística de deformación de galaxias por un cluster
 - ◆ **Micro-lensing:** estrellas en el halo lentificadas por otras estrellas. No hay múltiples imágenes pero sí cambio en la magnitud de los objetos fuente (también se ha tratado de determinar microlensing extragaláctico)

◆ Modelo

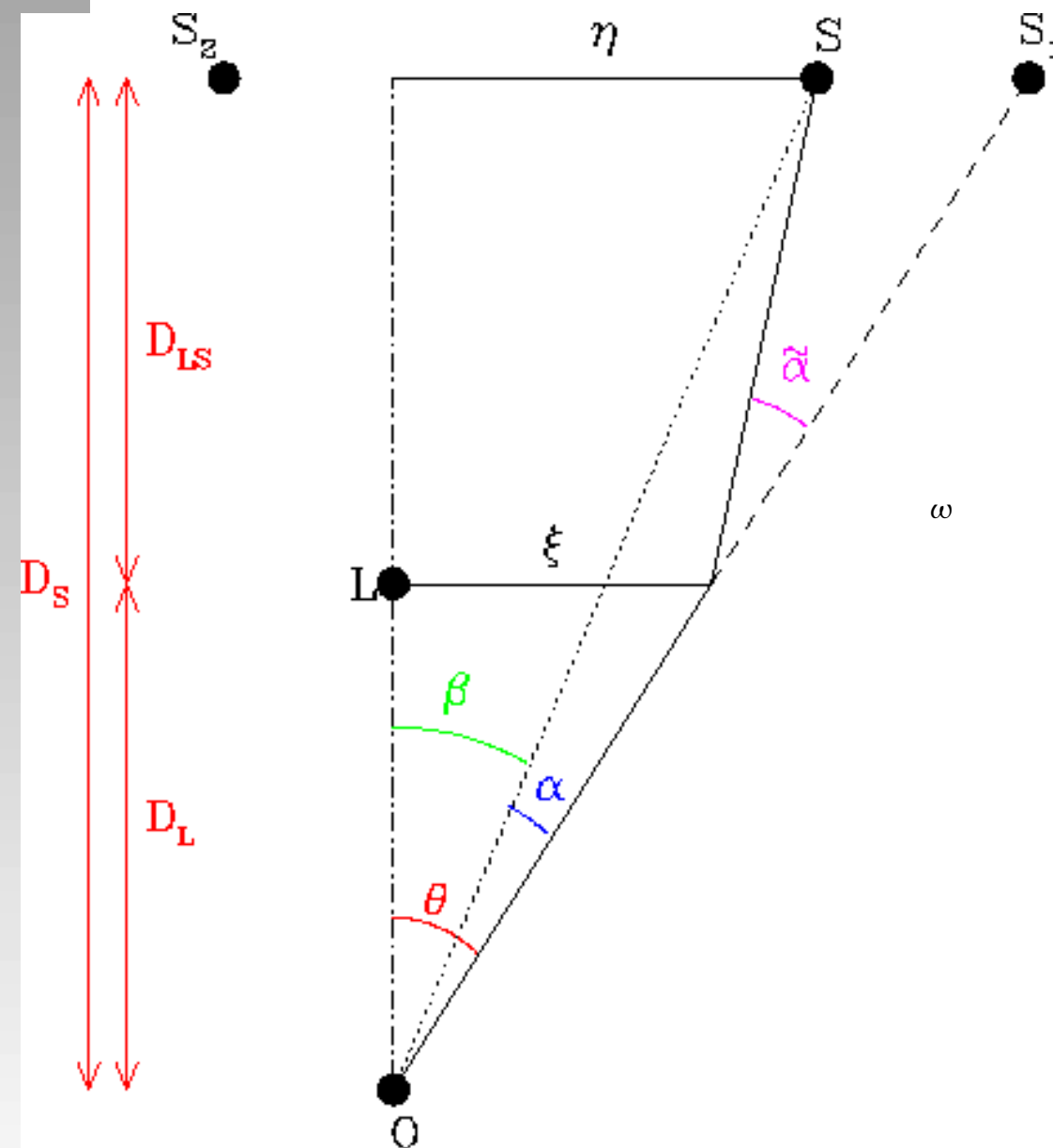


◆ Modelo



Nos interesa una relación para el observable θ

◆ Modelo

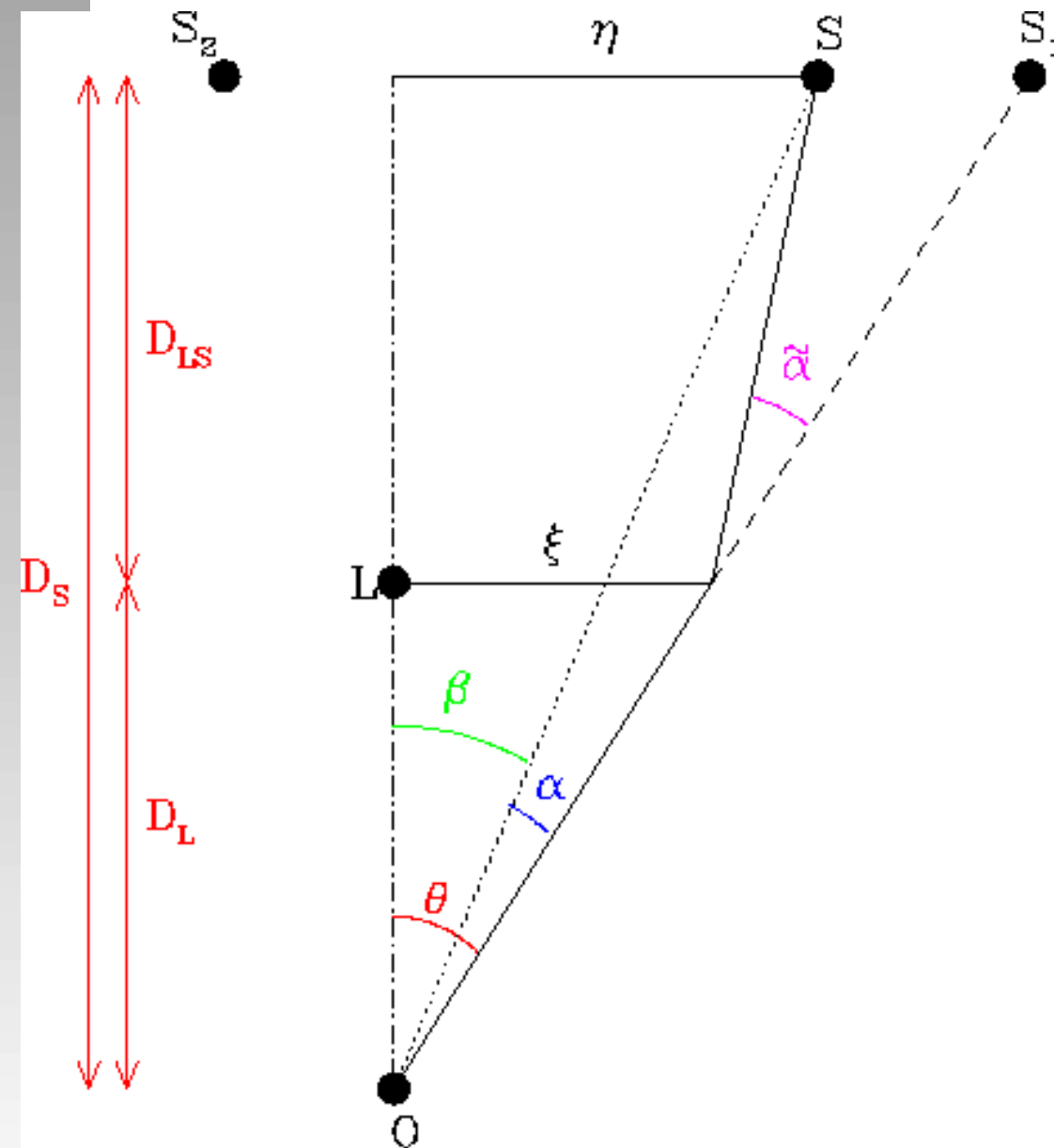


- ◆ La luz se defleca durante todo su recorrido a la tierra, pero se asume que el efecto es producido sólo por una galaxia o cluster (aproximación de “lente delgado”)
- ◆ La aprox. Es válida si:

$$|\Phi| \ll c^2 \quad v \ll c$$

◆ Modelo

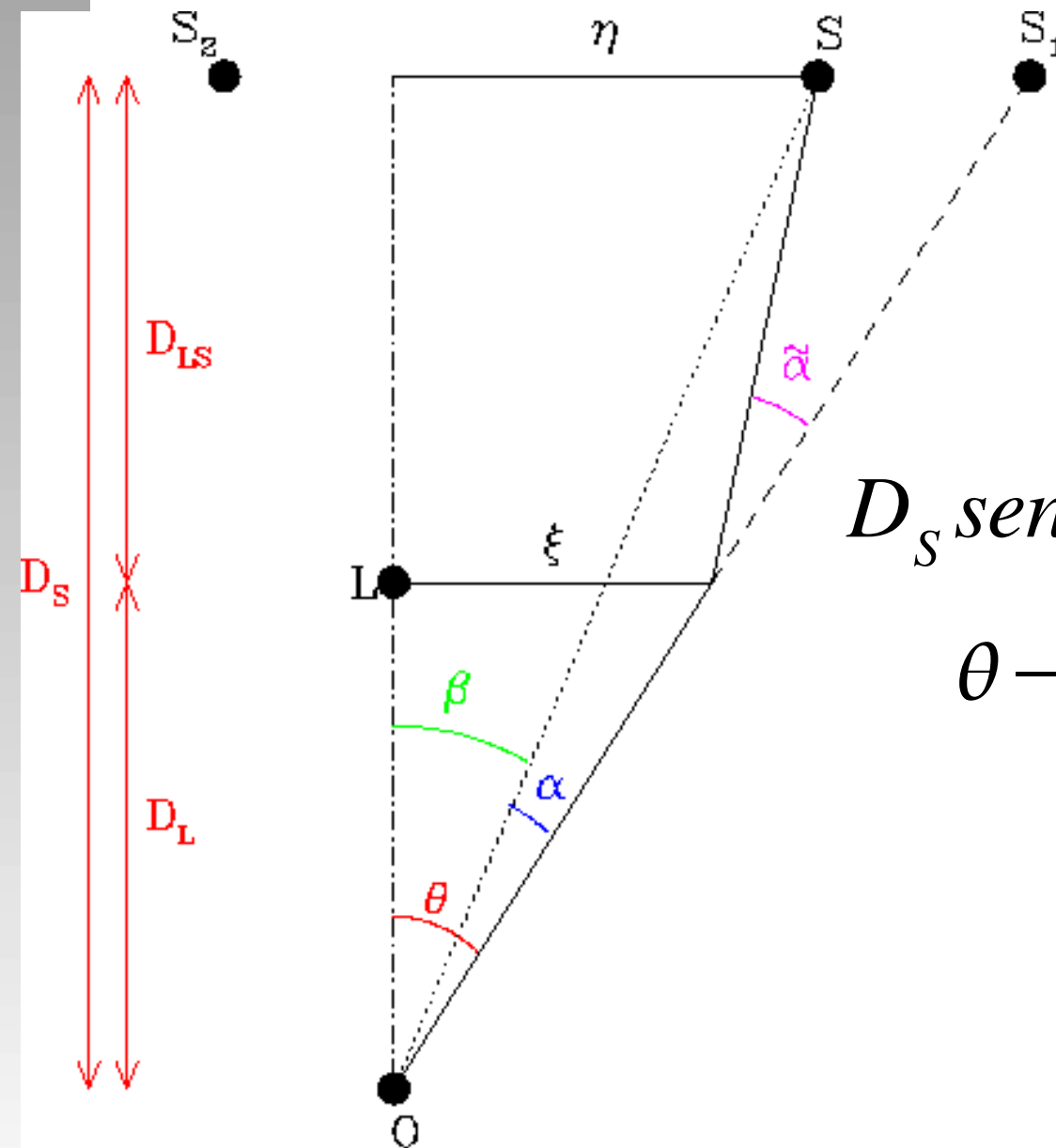
◆ Ángulo de deflección



$$\tilde{\alpha}(\xi) = \frac{4GM(\xi)}{c^2} \frac{1}{\xi} \quad (1)$$

◆ Modelo

◆ Aproximación de lente delgada:

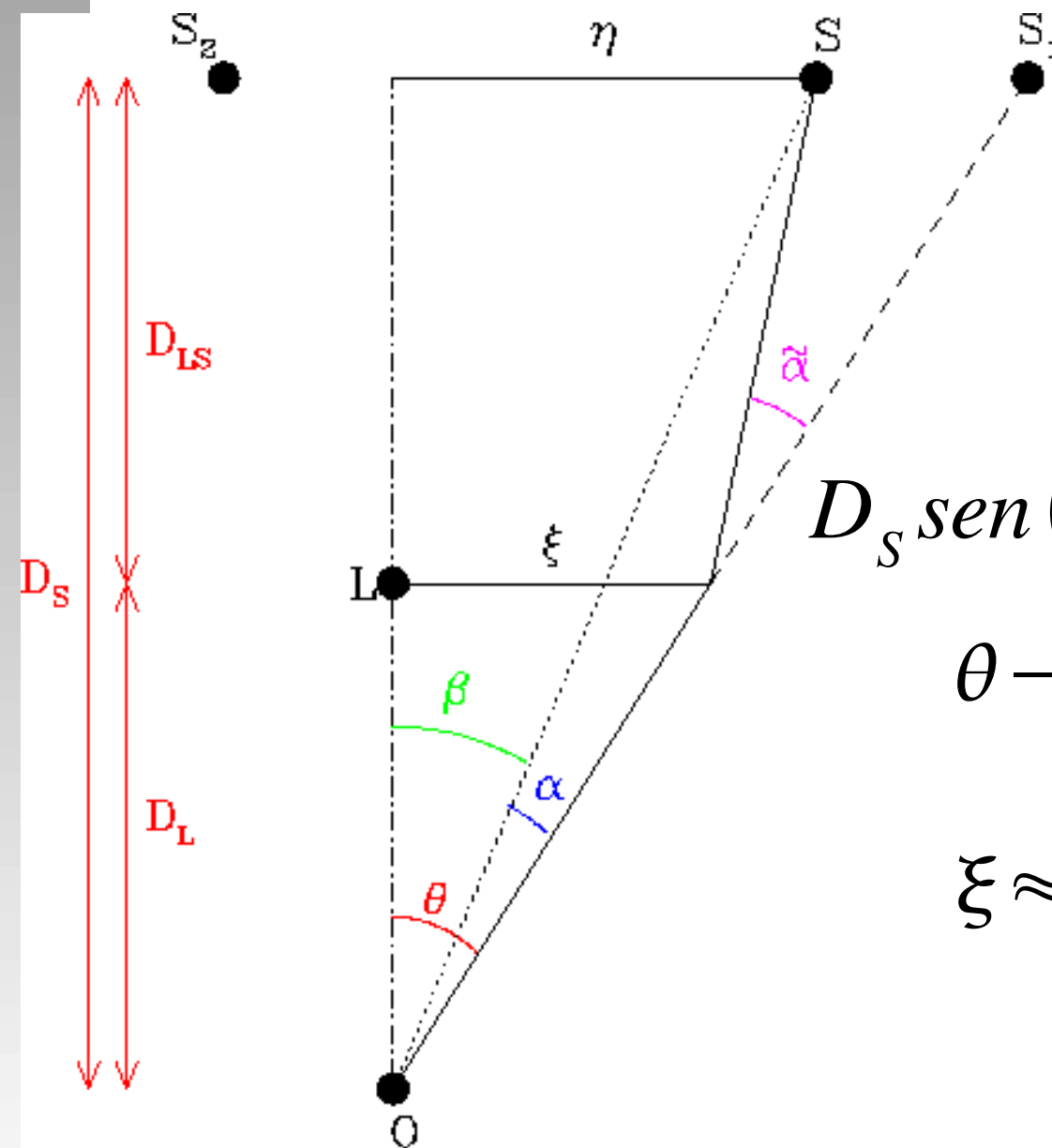


$$D_S \sin(\theta - \beta) = D_{LS} \sin(\tilde{\alpha}(\xi)) \quad (2)$$

$$\theta - \beta \approx D_{LS} \tilde{\alpha}(\xi) / D_S \quad (3)$$

◆ Modelo

◆ Aproximación de lente delgada:



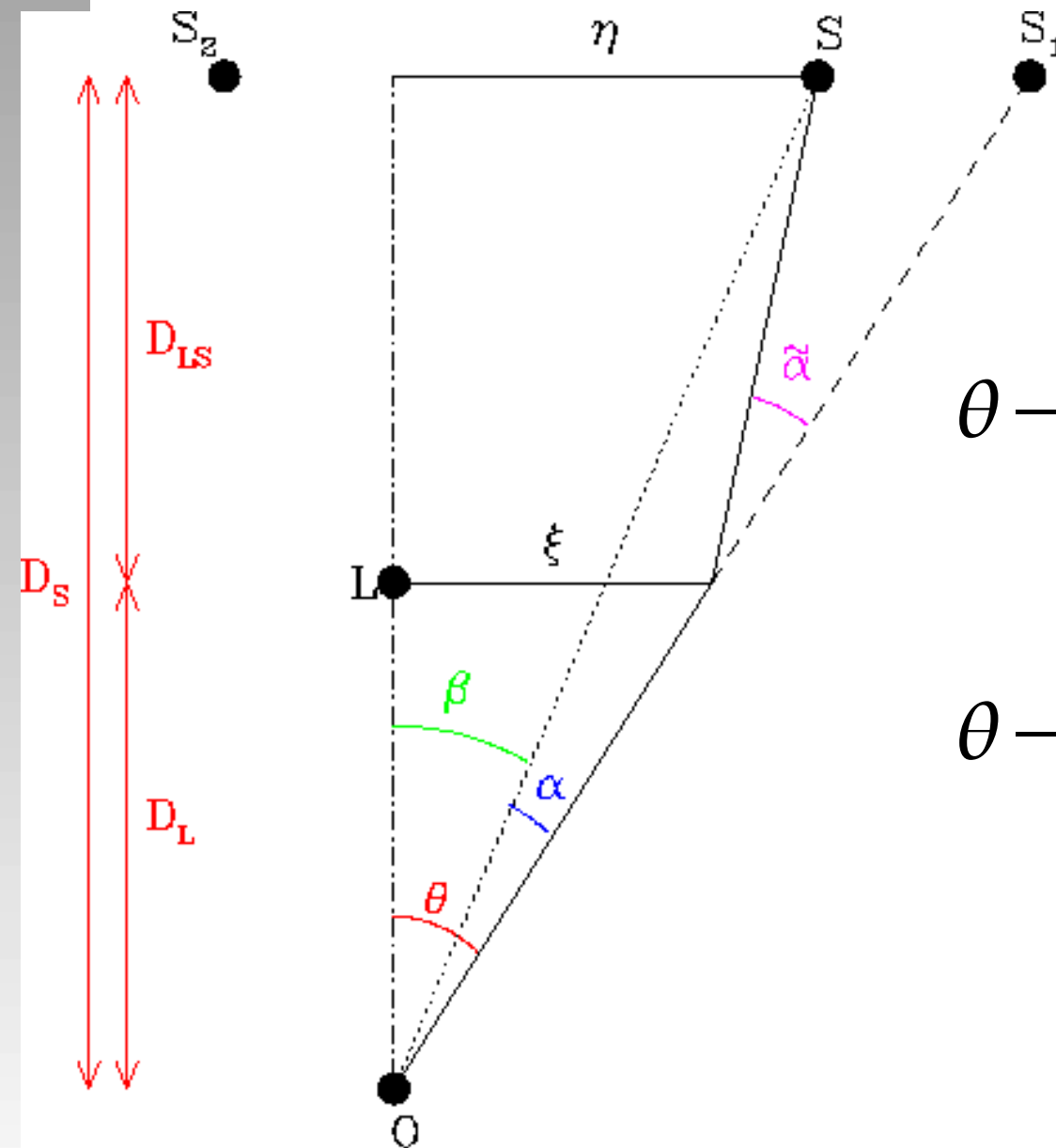
$$D_S \text{sen}(\theta - \beta) = D_{LS} \text{sen}(\tilde{\alpha}(\xi)) \quad (2)$$

$$\theta - \beta \approx D_{LS} \tilde{\alpha}(\xi) / D_S \quad (3)$$

$$\xi \approx \theta D_L \quad (4)$$

◆ Modelo

◆ (1) y (4) en (3):

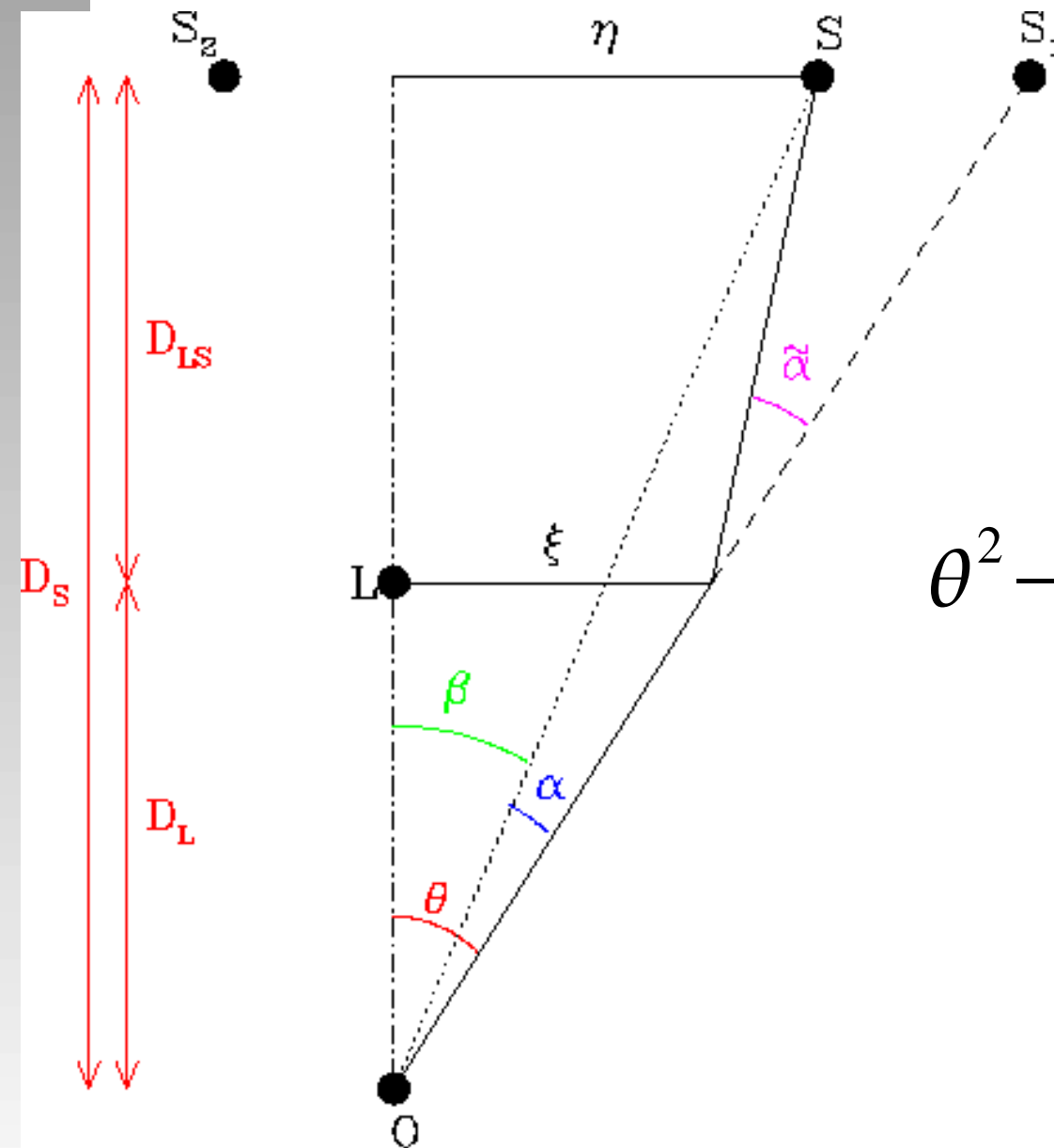


$$\theta - \beta \approx D_{LS} \tilde{\alpha}(\xi) / D_S \quad (3)$$

$$\theta - \beta \approx D_{LS} \frac{4GM(\xi)}{c^2} \frac{1}{\theta D_L D_S}$$

◆ Modelo

◆ Ordenando (5):

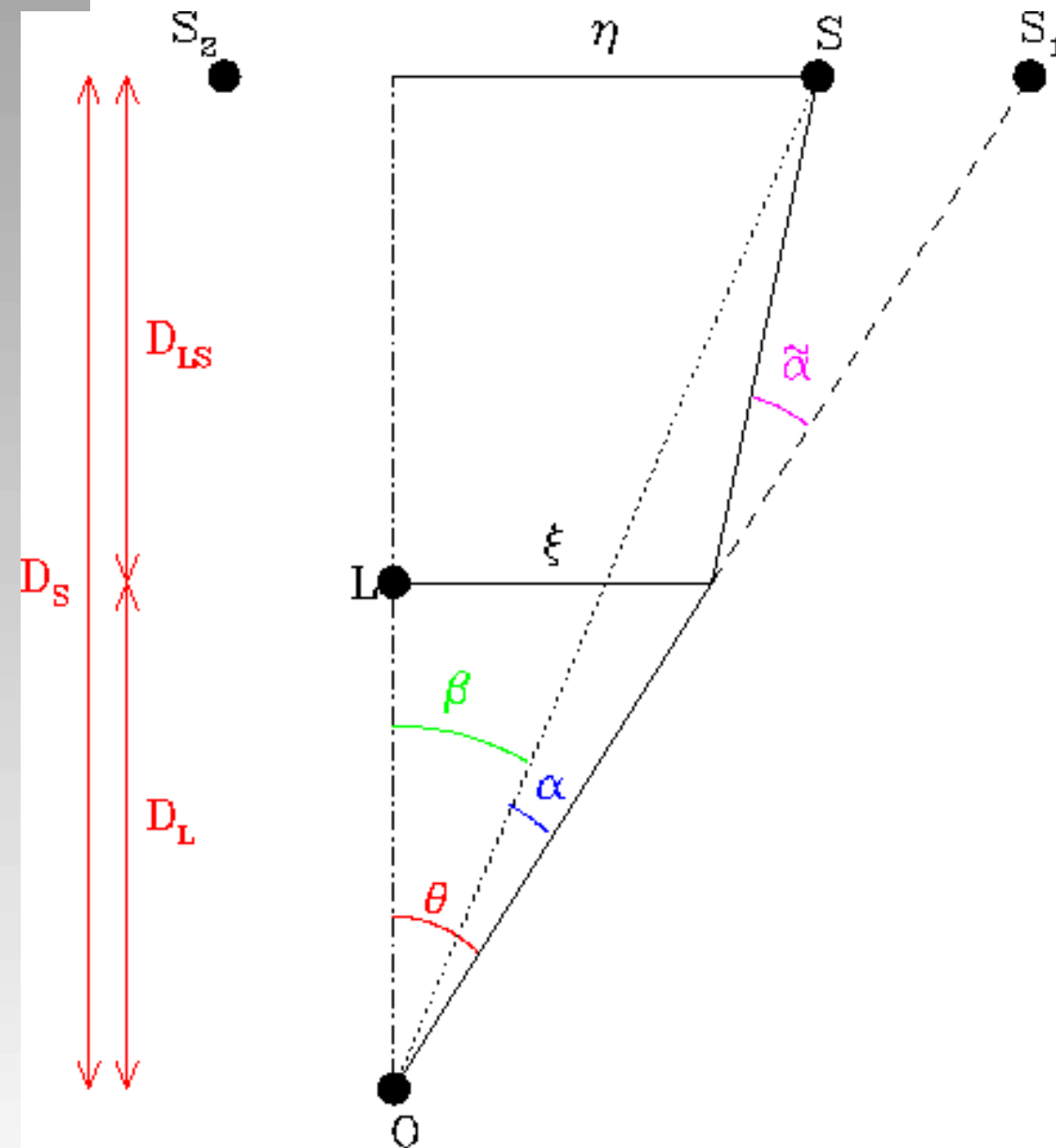


$$\theta^2 - \beta \theta = \frac{4GM(\xi)}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S} \quad (6)$$

Ec. de lente delgado

◆ Modelo

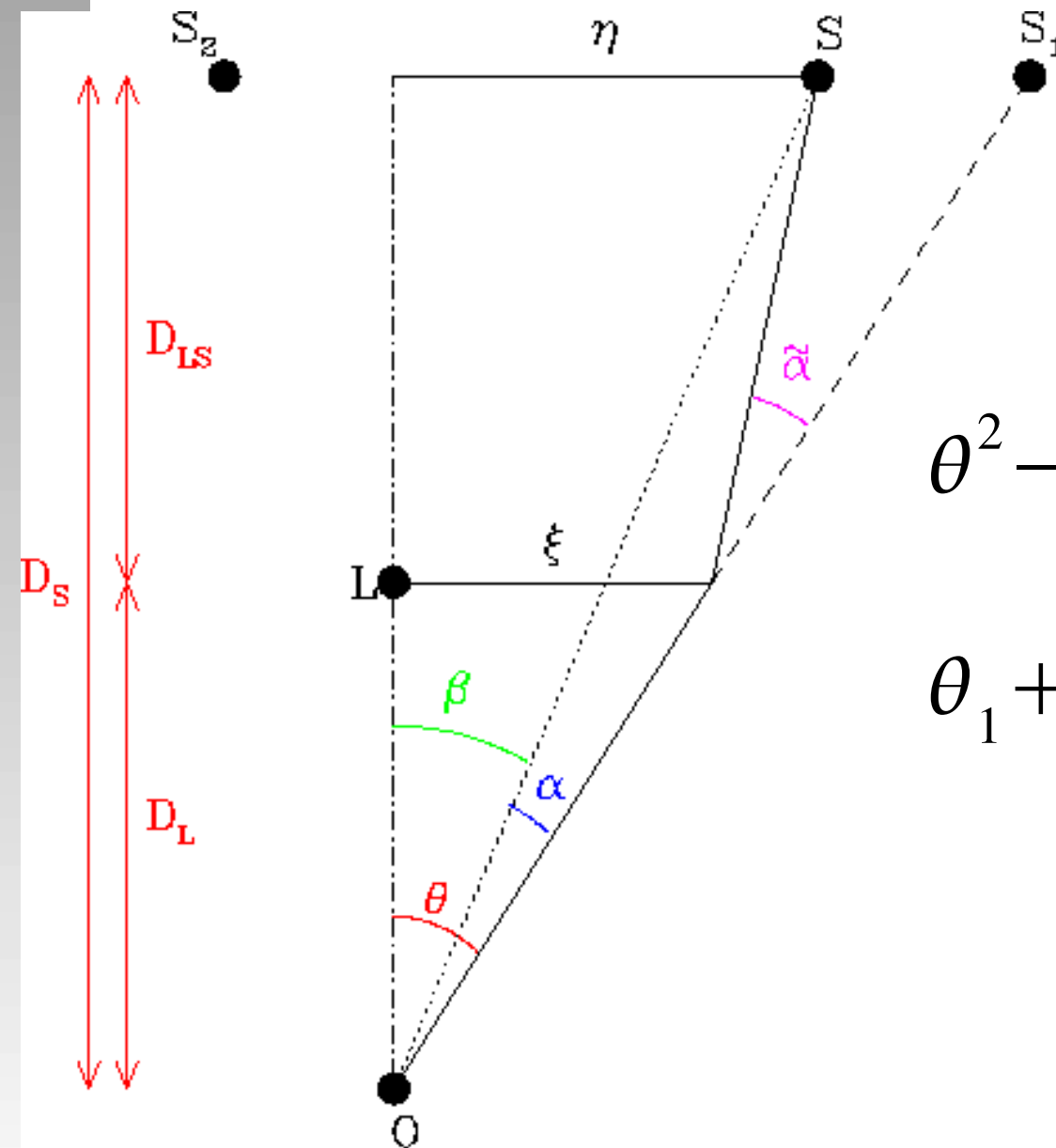
◆ Otra forma de la ecuación de lente delgado:



$$\vec{\beta} = \vec{\theta} - \vec{\alpha}(\theta)$$

◆ Modelo

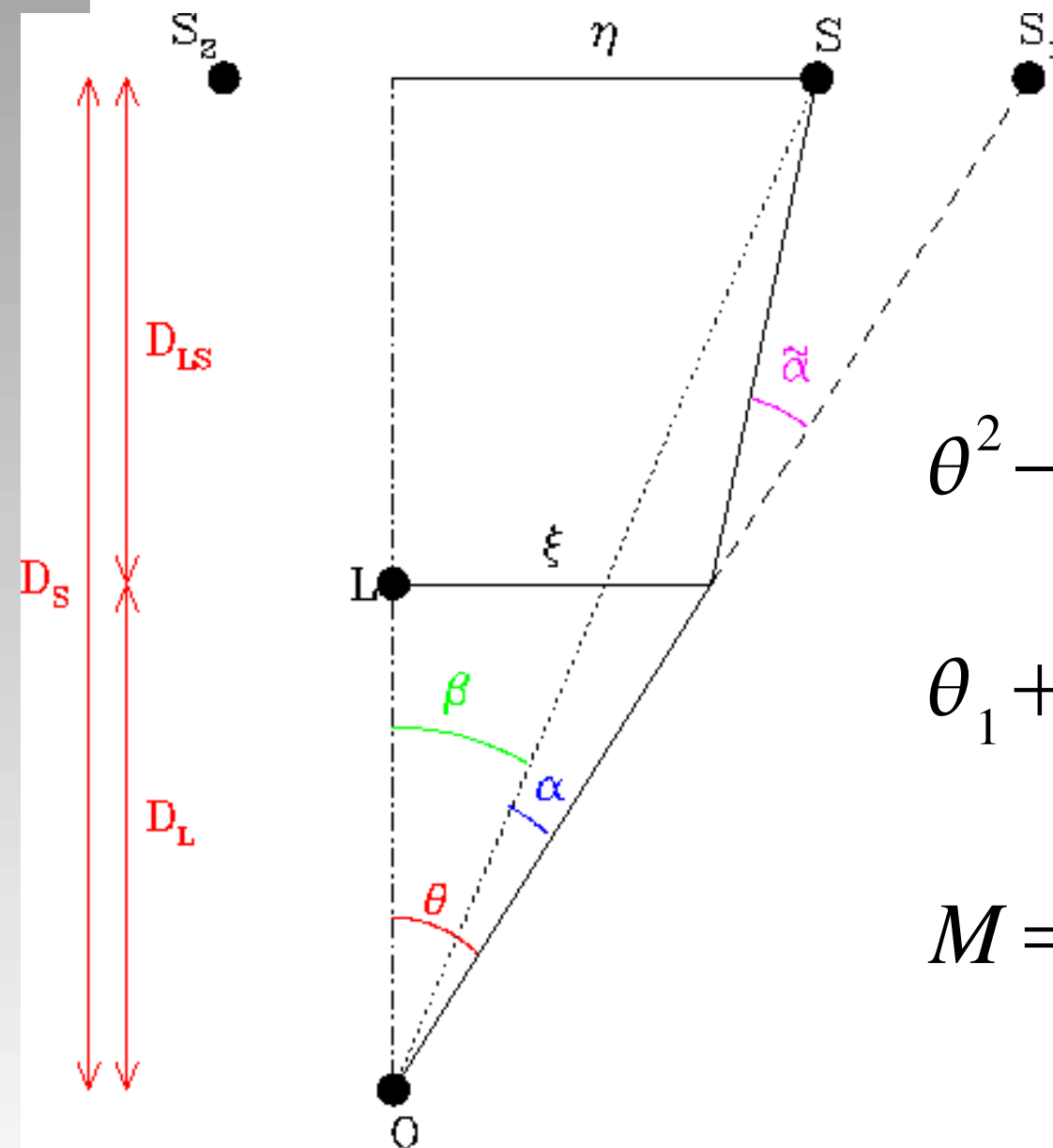
◆ Ec. (6) tiene 2 soluciones para theta que satisfacen:



$$\theta^2 - \beta \theta = \frac{4GM(\xi)}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S} \quad (6)$$

$$\theta_1 + \theta_2 = \beta \quad (7)$$

◆ Modelo



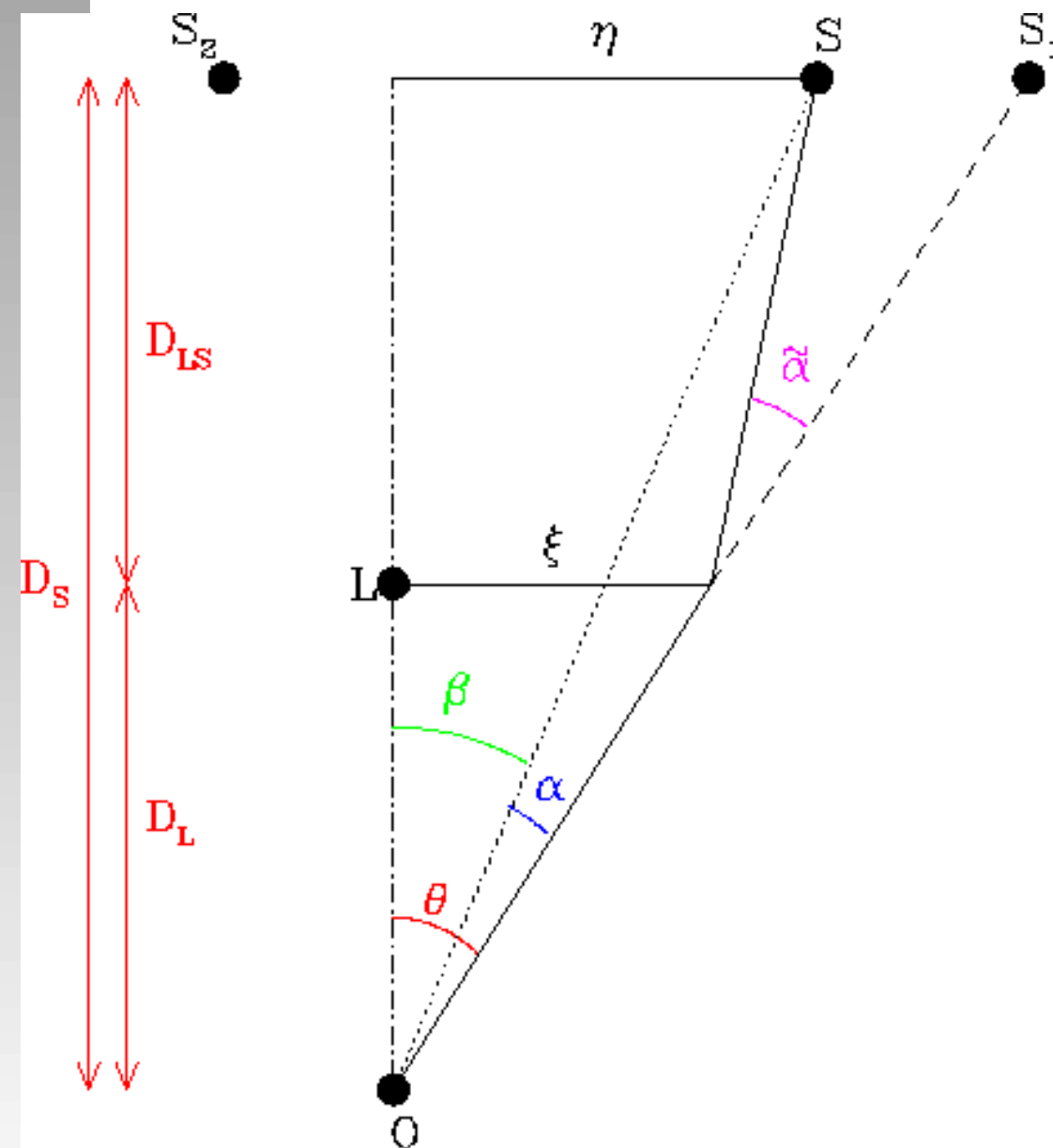
◆ Ec. (6) tiene 2 soluciones para theta que satisfacen:

$$\theta^2 - \beta \theta = \frac{4GM(\xi)}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S} \quad (6)$$

$$\theta_1 + \theta_2 = \beta \quad (7)$$

$$M = \frac{-\theta_1 \theta_2 c^2}{4G} \frac{D_L D_S}{D_{LS}} \quad (8)$$

◆ Modelo



◆ Radio de Einstein:

- ◆ Si $\beta=0$ (alineamiento con fuente), se forma un “anillo de Einstein” de radio

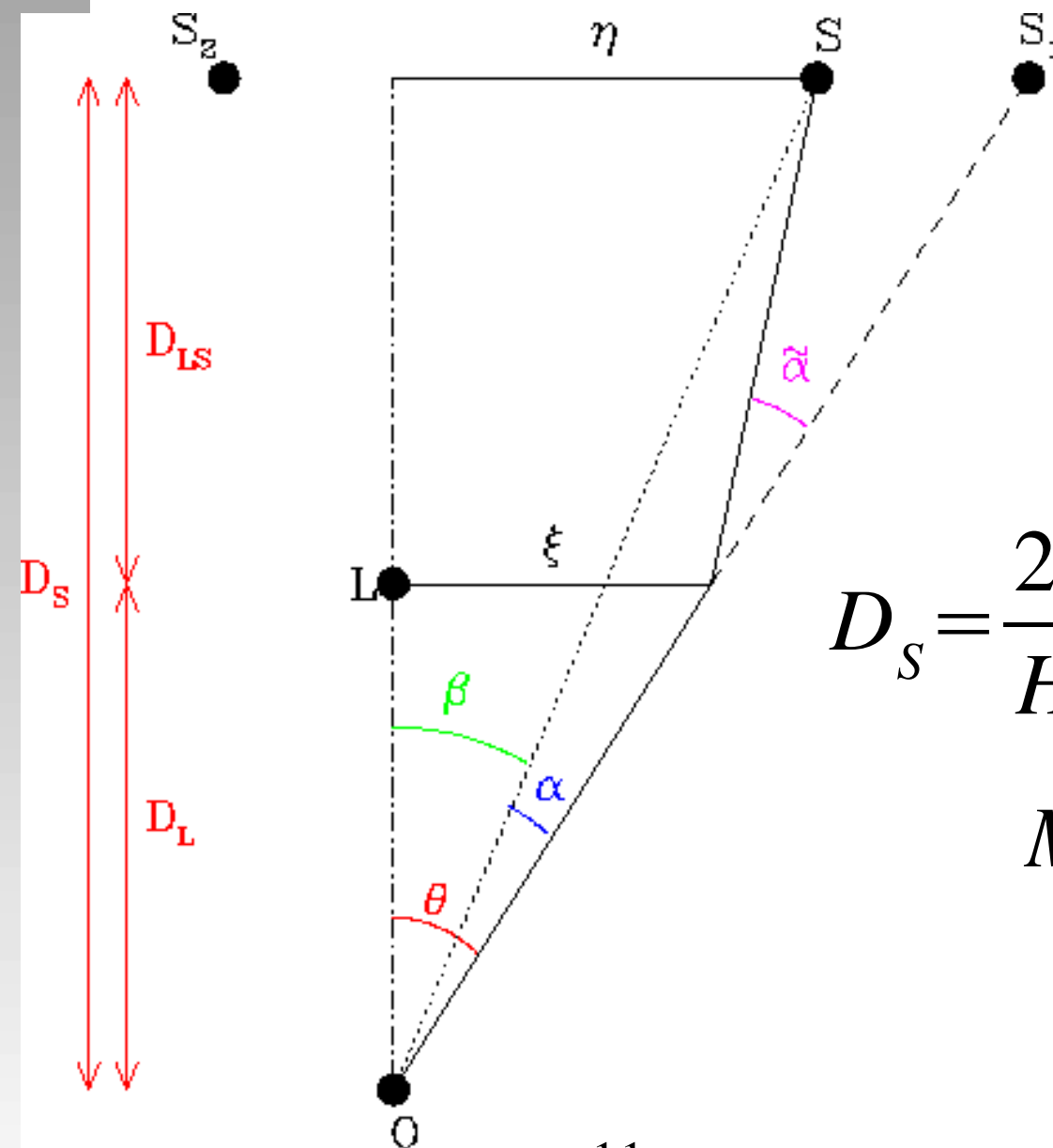
$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S}} \quad (9)$$

◆ Modelo

◆ Ejemplo:

◆ $z_S=3$ (QSO)

◆ $D_{LS} = D_L$



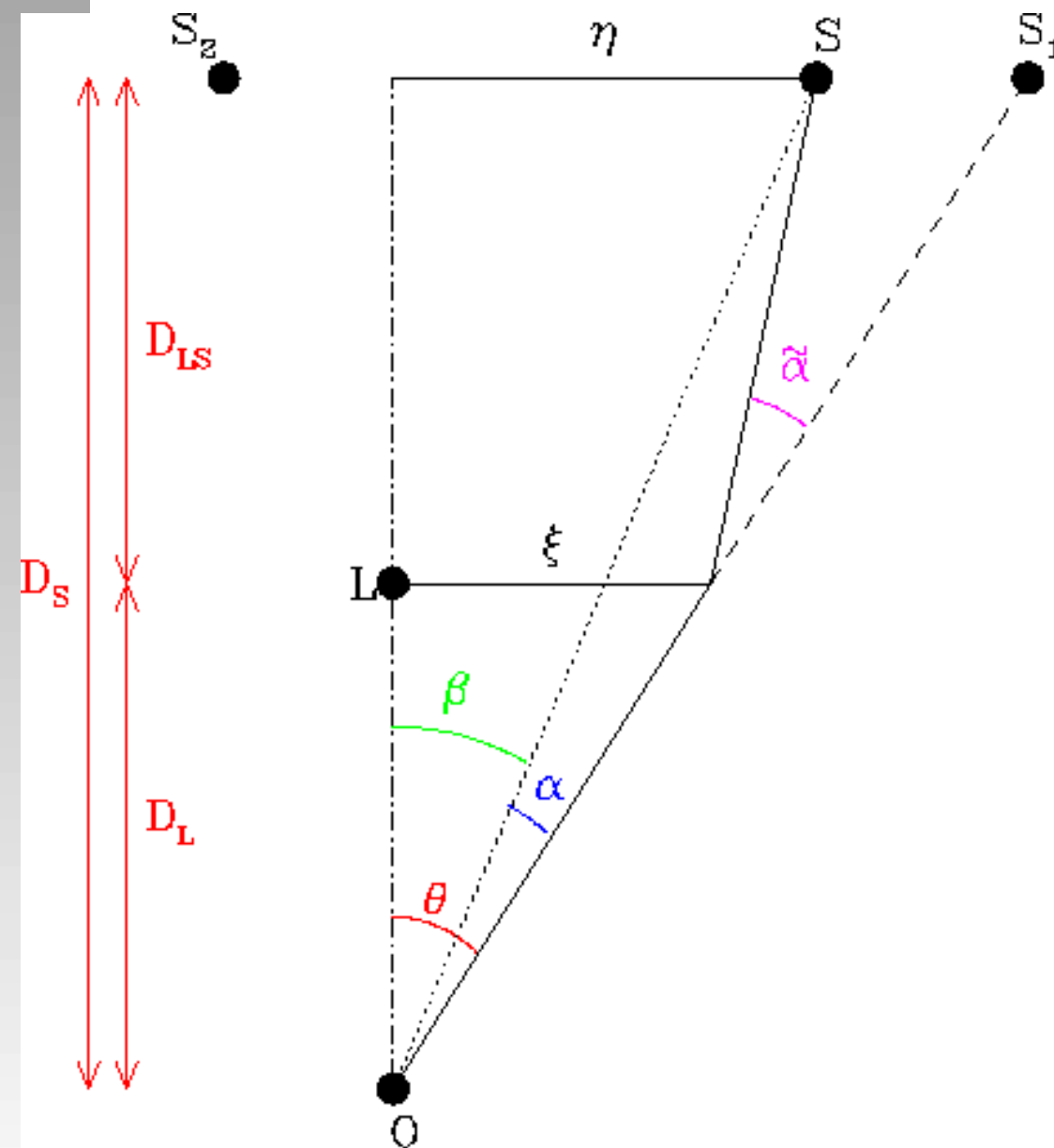
$$\left(\frac{D_{LS}}{D_L D_S} \right)^{-1} = D_S$$

$$D_S = \frac{2c}{H_0} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+z}} \right) = 3000 \text{ Mpc}$$

$$M = \theta_E^2 1.57 10^{22} M_{sun}$$

$$M = 1 10^{11} M_{sun} \Rightarrow \theta_E \approx 2.5 10^{-6} \text{ rad} = 0.5 \text{ arcsec}$$

◆ Modelo



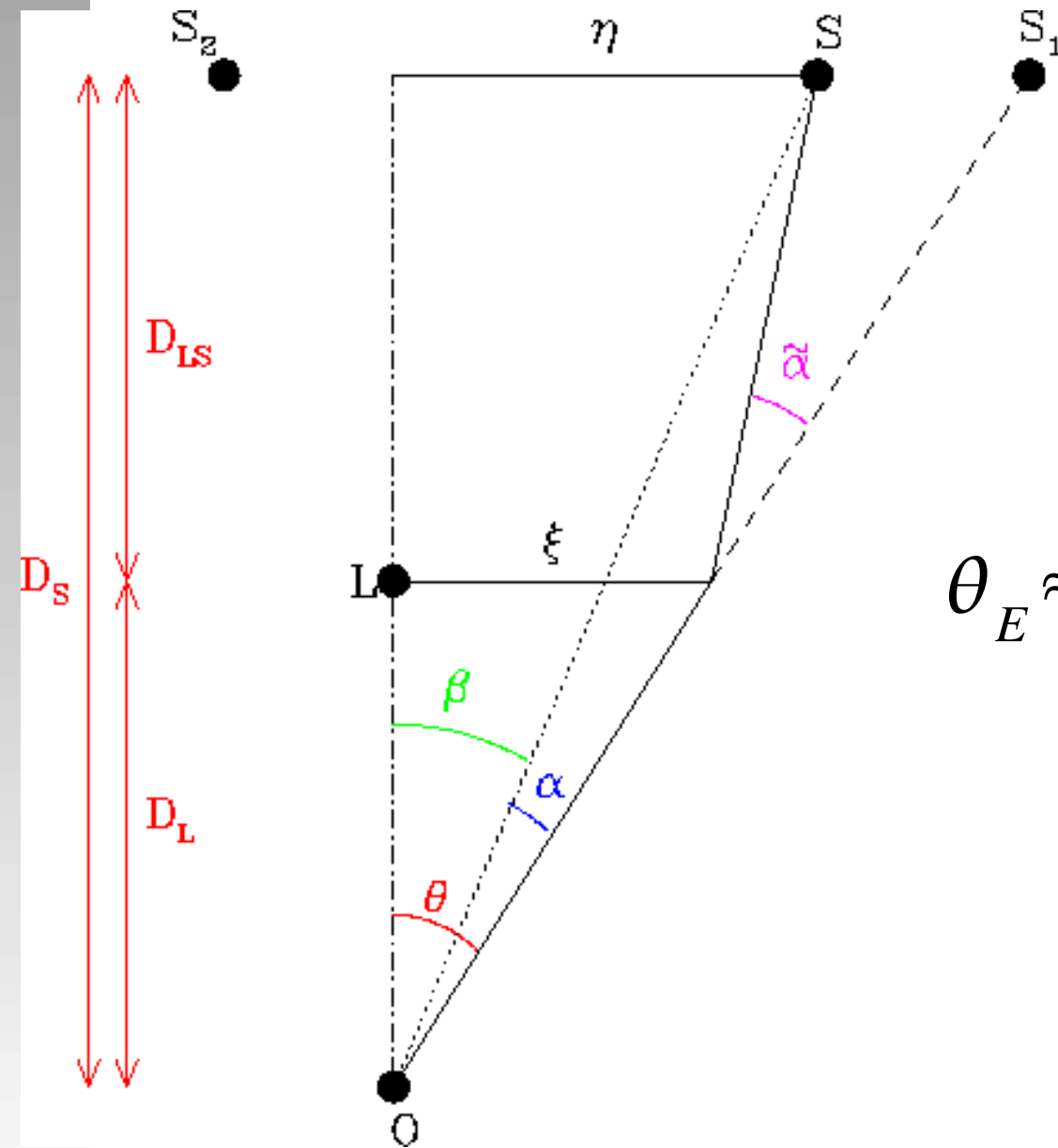
◆ Notar, en general:

◆ $D_{LS} \cdot \eta \approx D_S - D_L$

$$\theta_E \approx 1.8 \sqrt{\frac{M}{10^{12} M_{sun}}} \text{ arcsec}$$

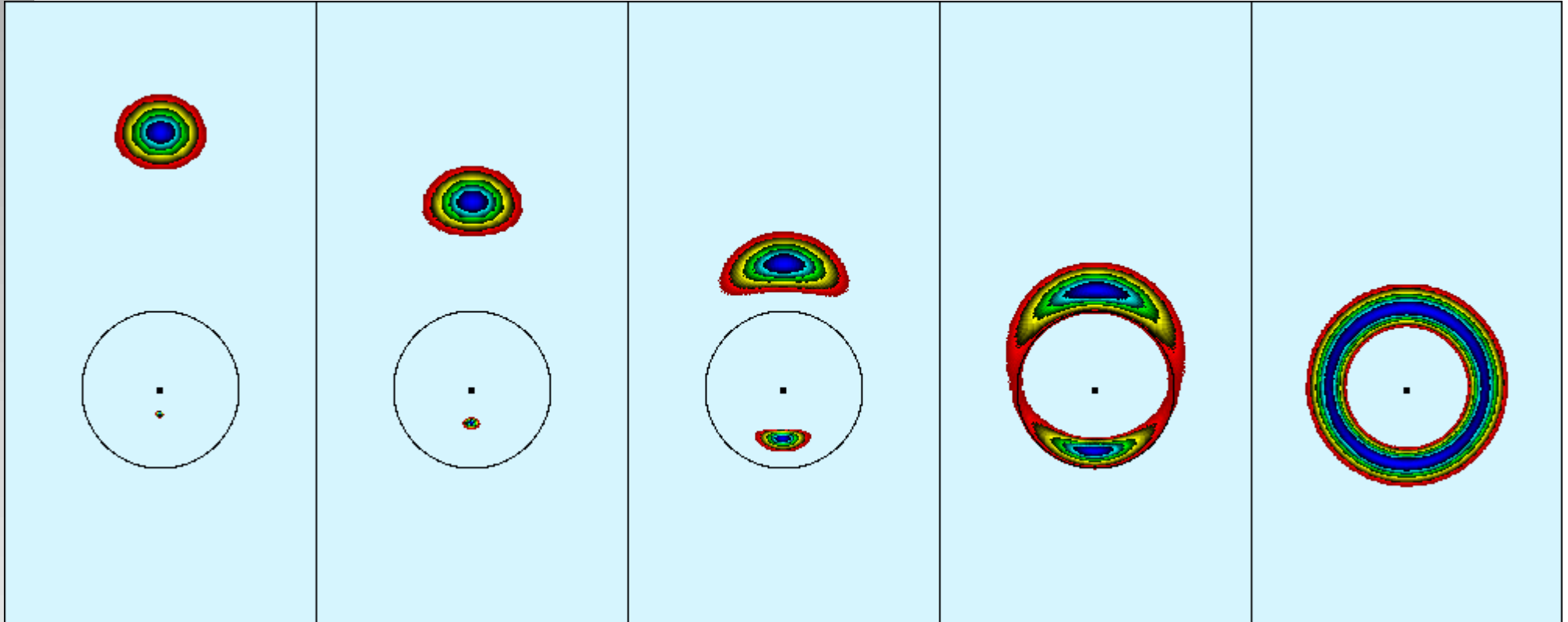
◆ Modelo

◆ Para estrellas en nuestra galaxia se tiene micro-lensing.

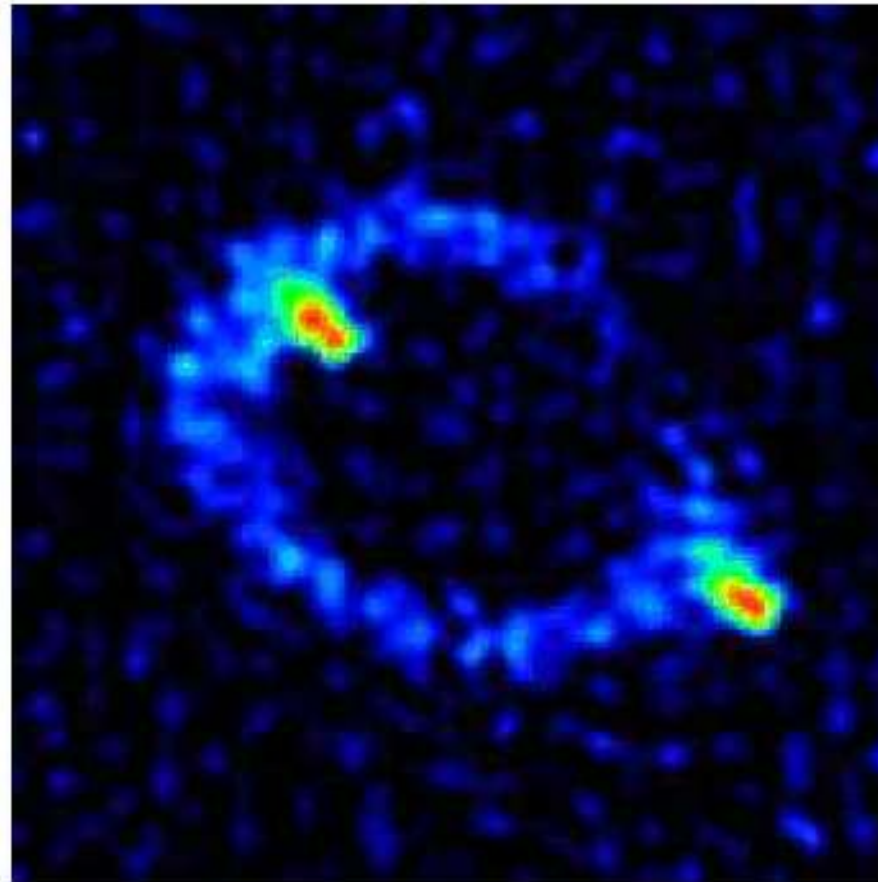


$$\theta_E \approx 0.5 \sqrt{\frac{M}{M_{sun}}} \text{ milli-arcsec}$$

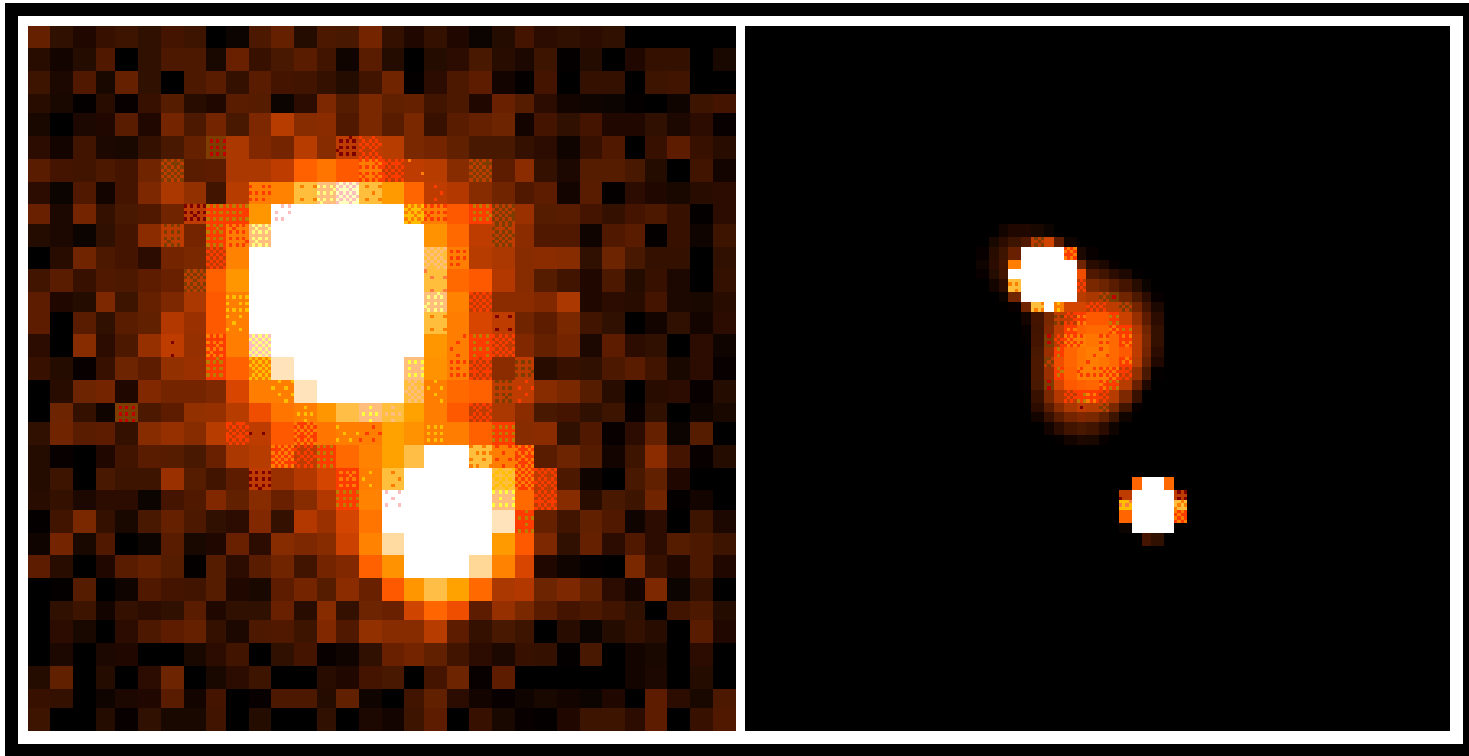
◆ Modelo



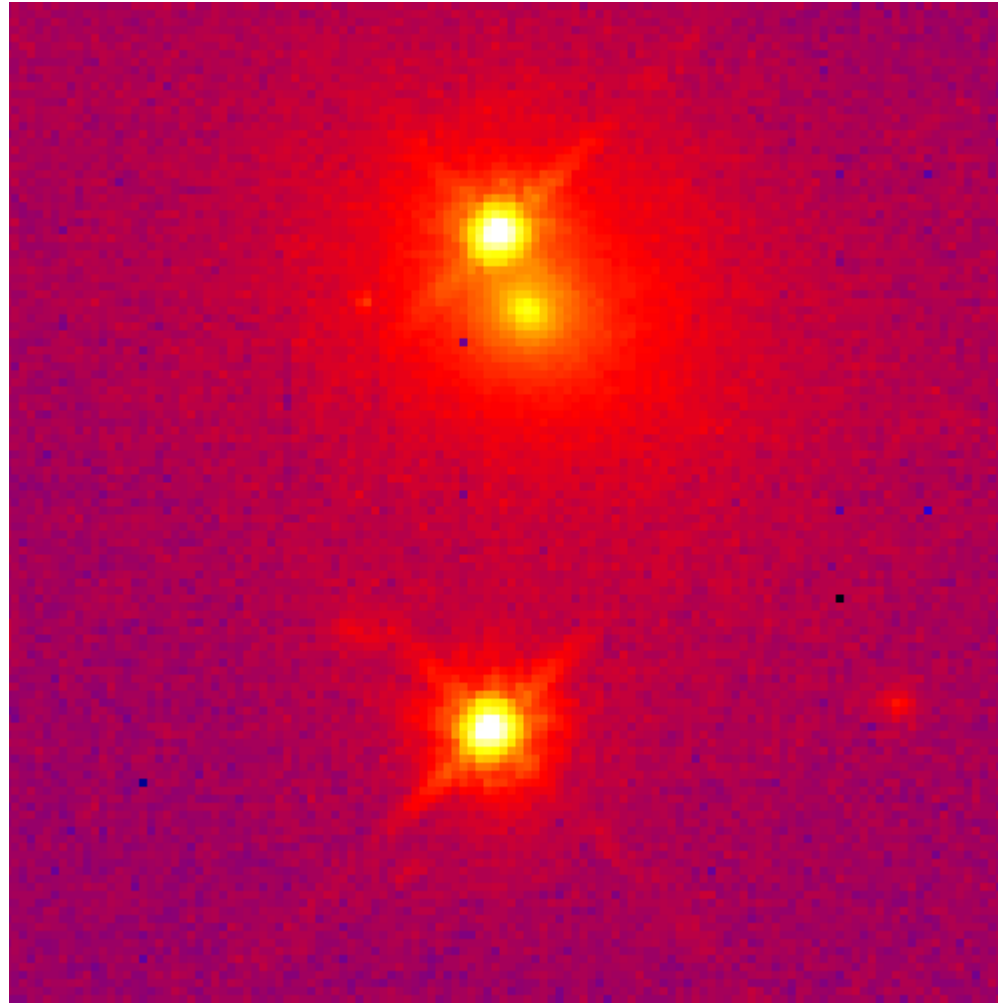
◆ Observaciones (radio) de MG1131+0456



◆ Observaciones (mid-IR, tierra) HE1104-1805



◆ Observaciones (mid-IR, HST) Q0957+561



- ◆ Modelo más sofisticado: se define una *densidad superficial de masa* en el plano del lente

$$\Sigma(\vec{\xi}) = \int_0^{D_s} \rho(\vec{r}) dz.$$

El ángulo de deflección alpha es ahora la suma sobre todos los elementos de masa

$$\vec{\alpha}(\vec{\xi}) = \frac{4G}{c^2} \int \frac{(\vec{\xi} - \vec{\xi}') \Sigma(\vec{\xi}')}{|\vec{\xi} - \vec{\xi}'|^2} d^2 \xi'.$$

- ◆ Modelo más sofisticado: para $\beta=0$ la ecuación de lente queda

$$\tilde{\alpha}(\theta) = \frac{\Sigma}{\Sigma_{\text{crit}}} \theta.$$

Donde la densidad superficial crítica se define como

$$\Sigma_{\text{crit}} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_s}{D_L D_{LS}},$$

- ◆ Modelo más sofisticado:
 - ◆ La densidad superficial de masa crítica no es más que la masa del lente “repartida” en el área del anillo de Einstein.
 - ◆ Para $z_L=0.5$, $z_S=2.0$, se calcula:

$$\Sigma_{\text{crit}} \approx 0.8 \text{ g cm}^{-2}$$

Para una distribución de masa arbitraria, la condición $\sigma > \sigma_{\text{crit}}$ es suficiente para obtener imágenes múltiples

◆ Magnificación (μ)

- ◆ Se define como la razón entre el ángulo sólido subtendido por la imagen y aquél de la fuente.

$$\mu = \frac{\theta}{\beta} \frac{d\theta}{d\beta}.$$

Para el caso simétrico, se tenía:

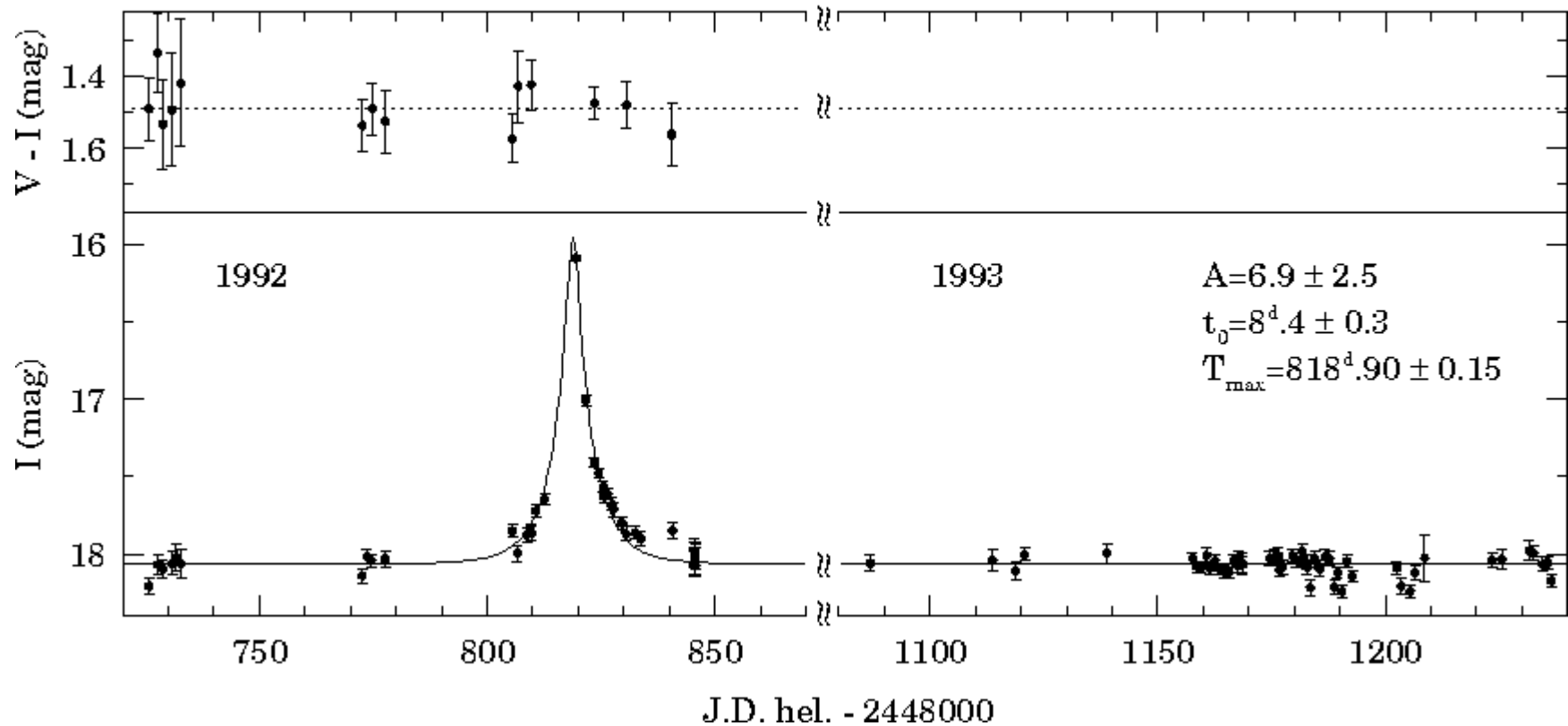
$$\theta_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\beta \pm \sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2} \right).$$

Usando la ecuación de lente se obtiene:

$$\mu_{1,2} = \left(1 - \left[\frac{\theta_E}{\theta_{1,2}} \right]^4 \right)^{-1} = \frac{u^2 + 2}{2u\sqrt{u^2 + 4}} \pm \frac{1}{2}.$$

◆ Observaciones: microlensing

OGLE μ LENS #6: MM5-B I 128727



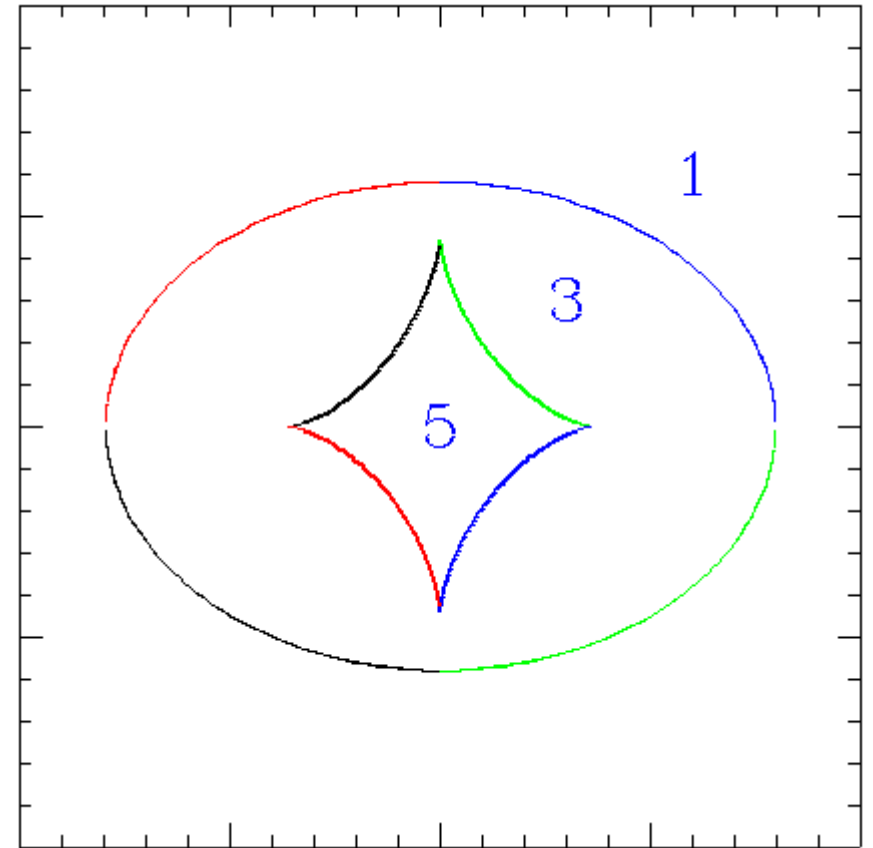
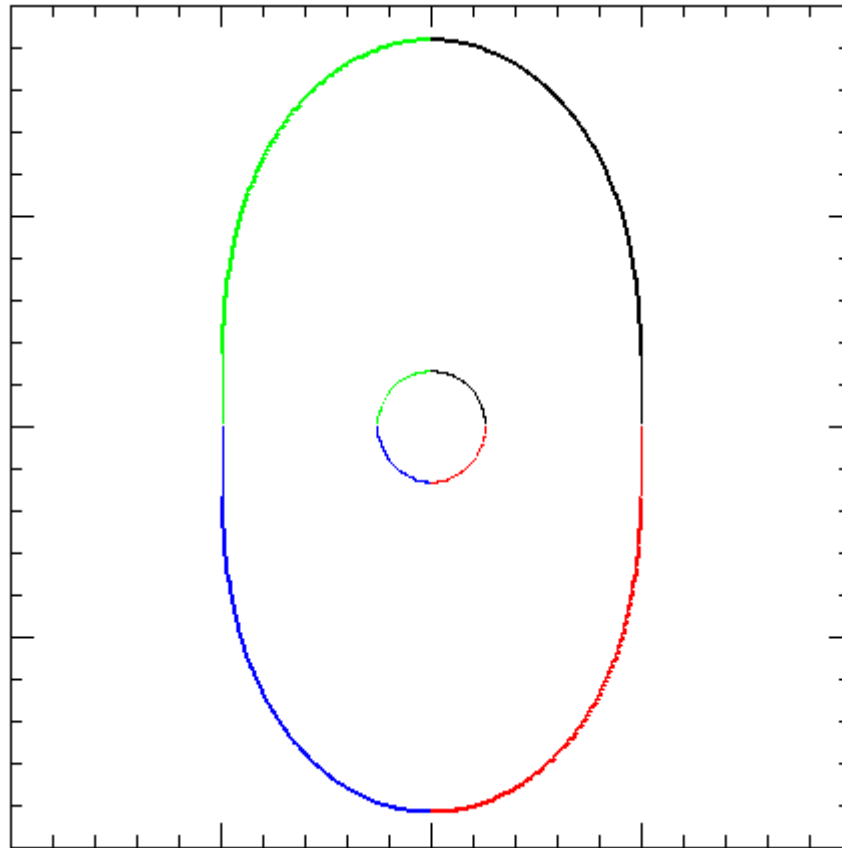
◆ Observaciones: microlensing

◆ Grupos:

- ◆ * MACHO (MASSive Compact Halo Object) .
- ◆ * EROS (EXperience de Recherche d'Objets Sombres)
- ◆ * OGLE (Optical Gravitational Lens Experiment)
- ◆ * AGAPE (Andromeda Galaxy and Amplified Pixels Experiment)
- ◆ * MOA (MACHO Observations in Astrophysics)
- ◆ * PLANET (Probing Lensing Anomalies NETWORK) .
- ◆ * DUO (Disk Unseen Objects)
- ◆ * GMAN (Global Microlensing Alert Network) .

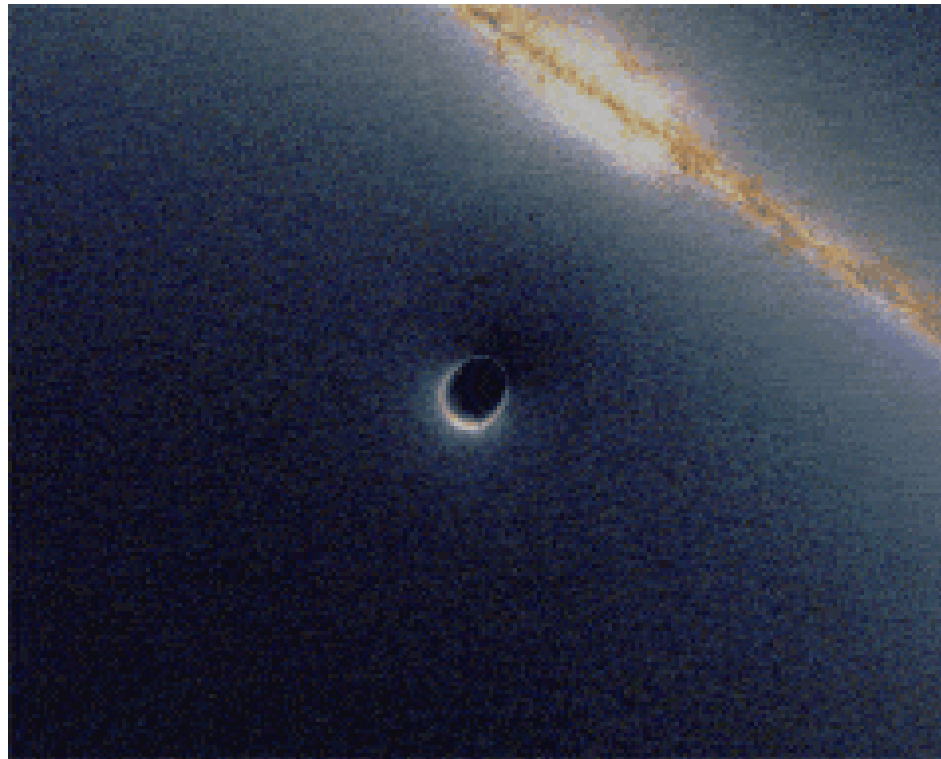
◆ Mapeo del lente

- ◆ Usando la ecuación de lente se puede determinar la magnificación en cualquier punto.
- ◆ Hay curvas en el plano del lente que producen magnificación infinita (en el plano de la fuente se llaman “cáusticas”)



◆ Mapeo del lente

- ◆ Usando la ecuación de lente se puede determinar la magnificación en cualquier punto.
- ◆ Hay curvas en el plano del lente que producen magnificación infinita (en el plano de la fuente se llaman “cáusticas”)



◆ Time delay

Ver ángulo de deflección como el gradiente de un “potencial efectivo de lente”

$$\vec{\beta} = \vec{\theta} - \vec{\alpha}(\theta)$$

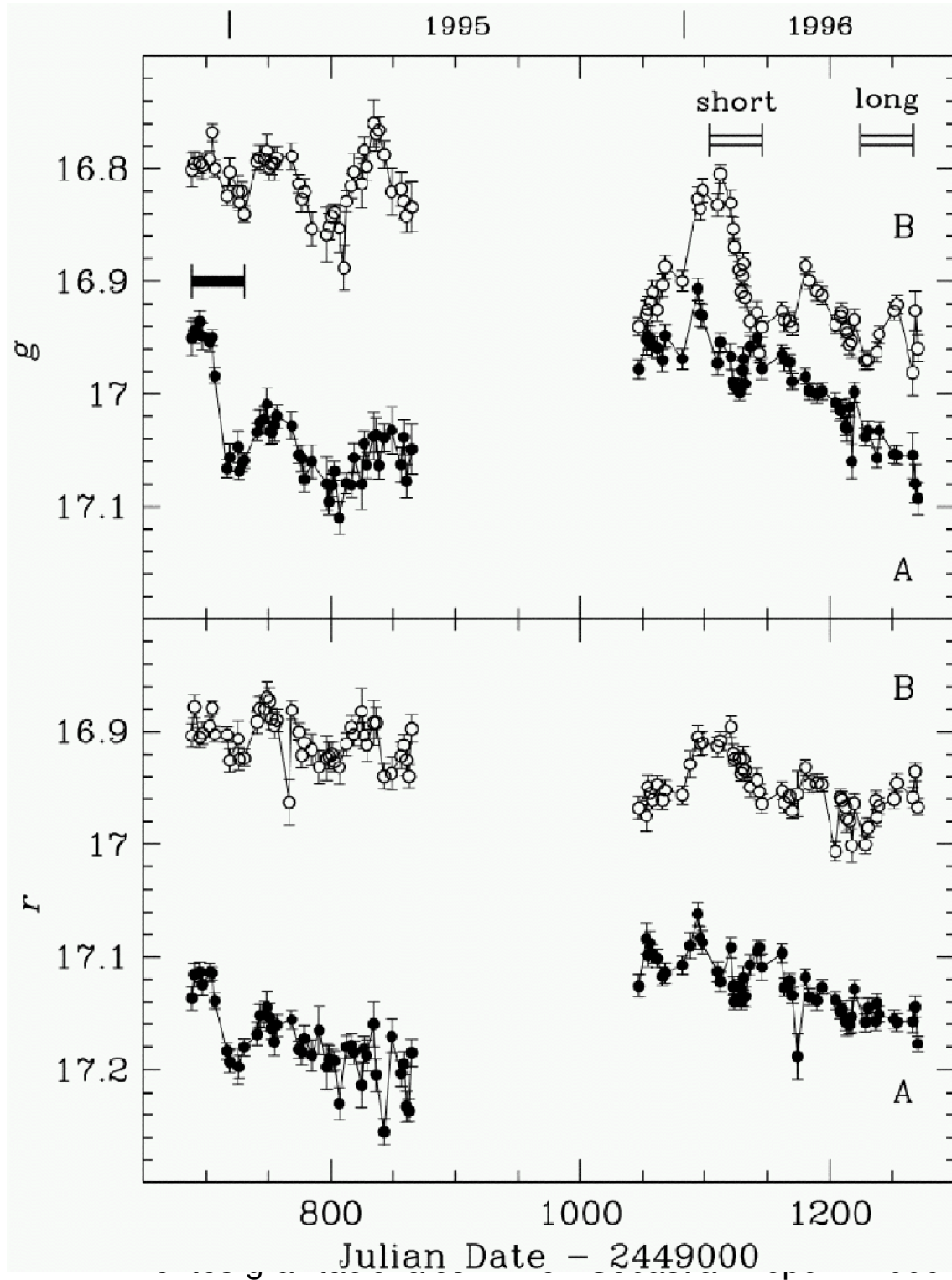
$$\vec{\nabla}_{\theta} \left(\frac{1}{2} (\vec{\theta} - \vec{\beta})^2 - \psi \right) = 0.$$

$$\tau(\vec{\theta}, \vec{\beta}) = \tau_{\text{geom}} + \tau_{\text{grav}} = \frac{1 + z_L}{c} \frac{D_L D_S}{D_{LS}} \left(\frac{1}{2} (\vec{\theta} - \vec{\beta})^2 - \psi(\theta) \right)$$

◆ Time delay

$$H_0 = 85_{-6}^{+9} \left(\frac{415 \text{ dias}}{\tau} \right) \left(\frac{\sigma}{322 \text{ km/s}} \right) \text{ [km/s/Mpc]}$$

Q0957+561 A, B
(primer "doble")

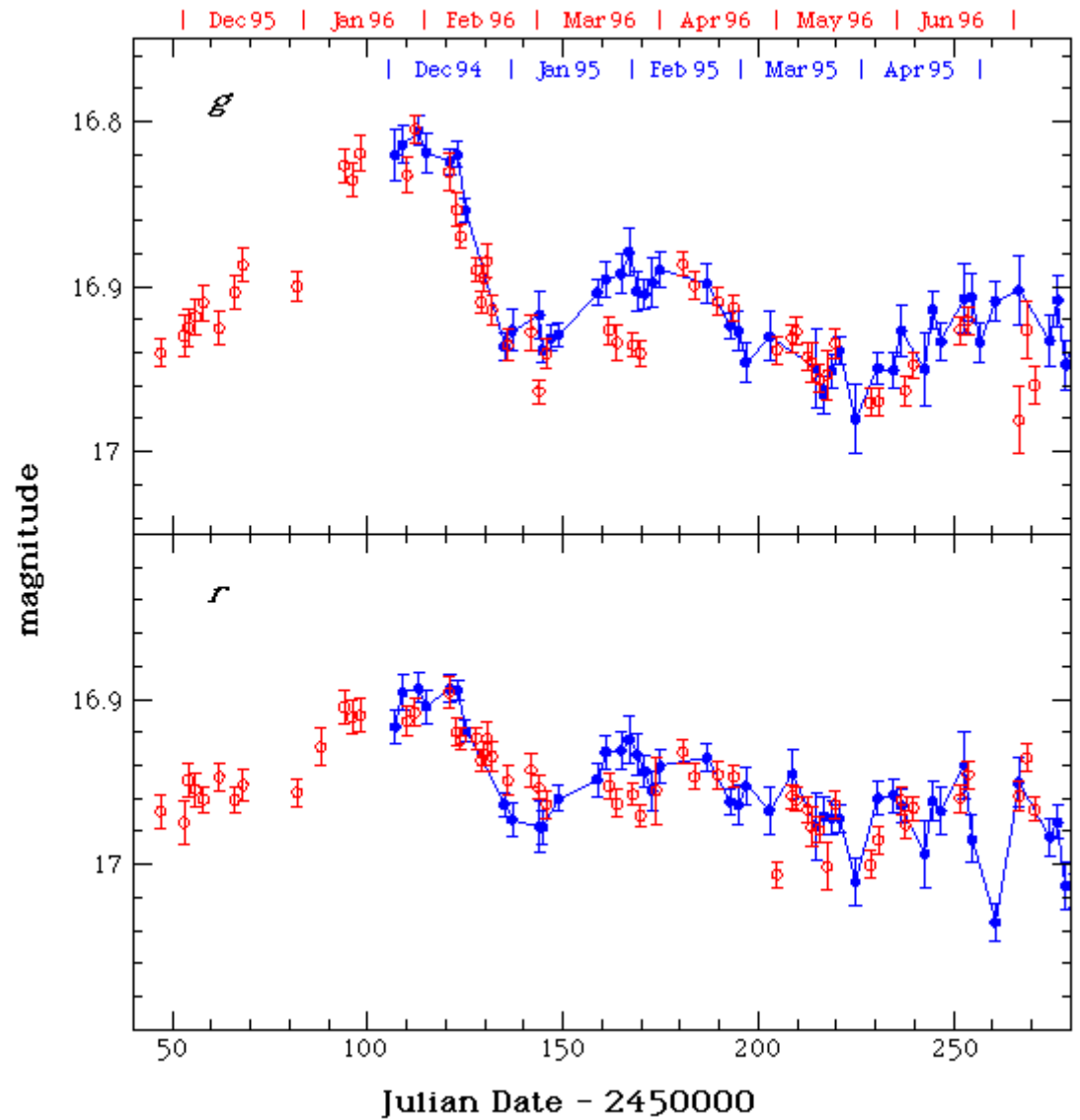


◆ Time delay

Curvas de luz desplazadas 417 días

$$H_0 = (67 \pm 13) \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

Q0957+561 A, B
(primer “doble”)



◆ Time delay

Letter to the Editor

First estimate of the time delay in HE 1104–1805*

Lutz Wisotzki¹, Olaf Wucknitz¹, Sebastian Lopez¹, and Anton Norup Sørensen²

¹ Hamburger Sternwarte, Universität Hamburg, Gojenbergsweg 112, D-21029 Hamburg, Germany

² Copenhagen University Observatory, Juliane Maries Vej 30, DK-2100 Copenhagen, Denmark

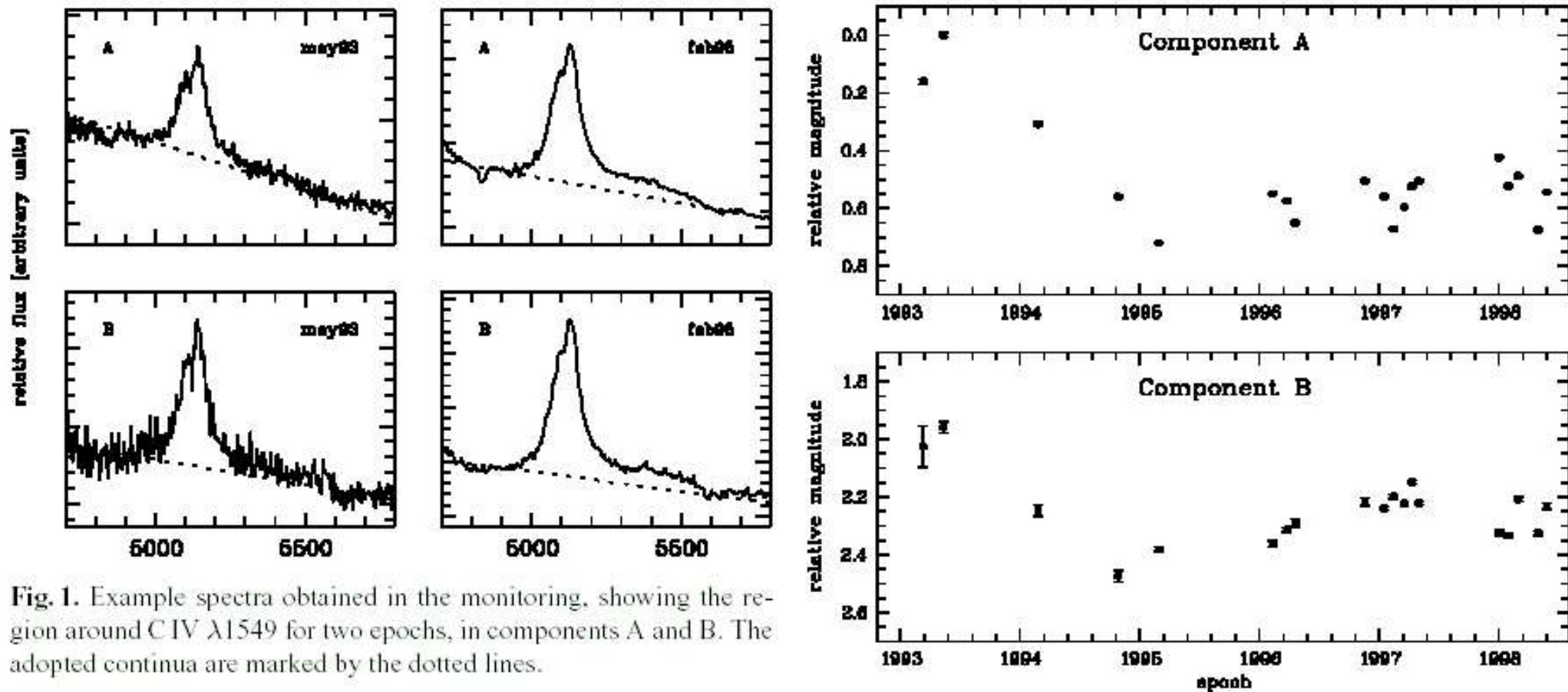
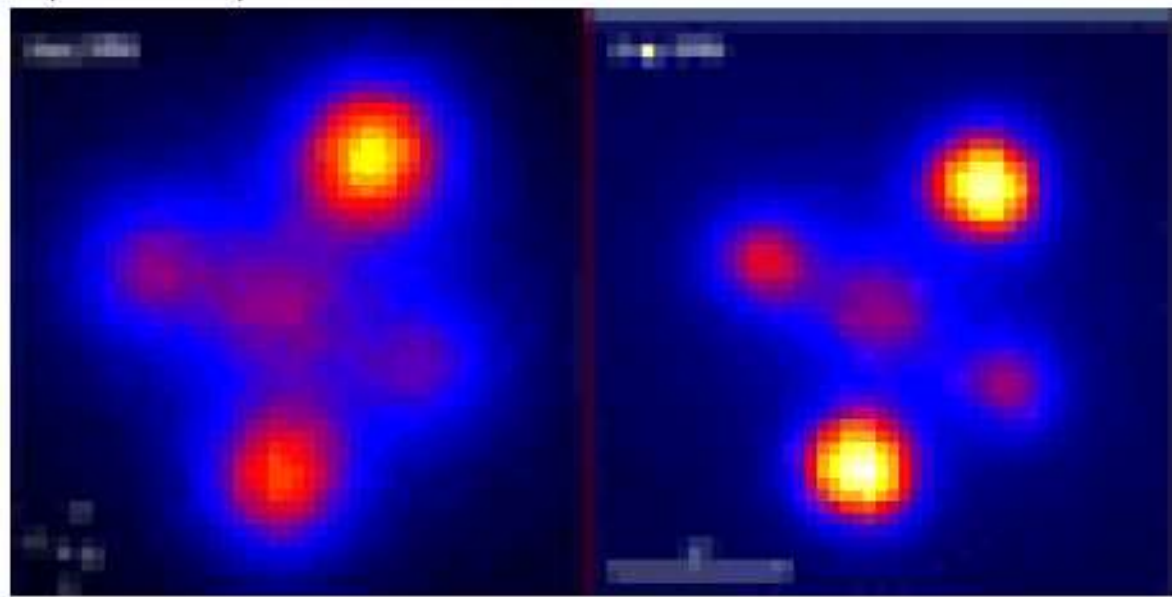


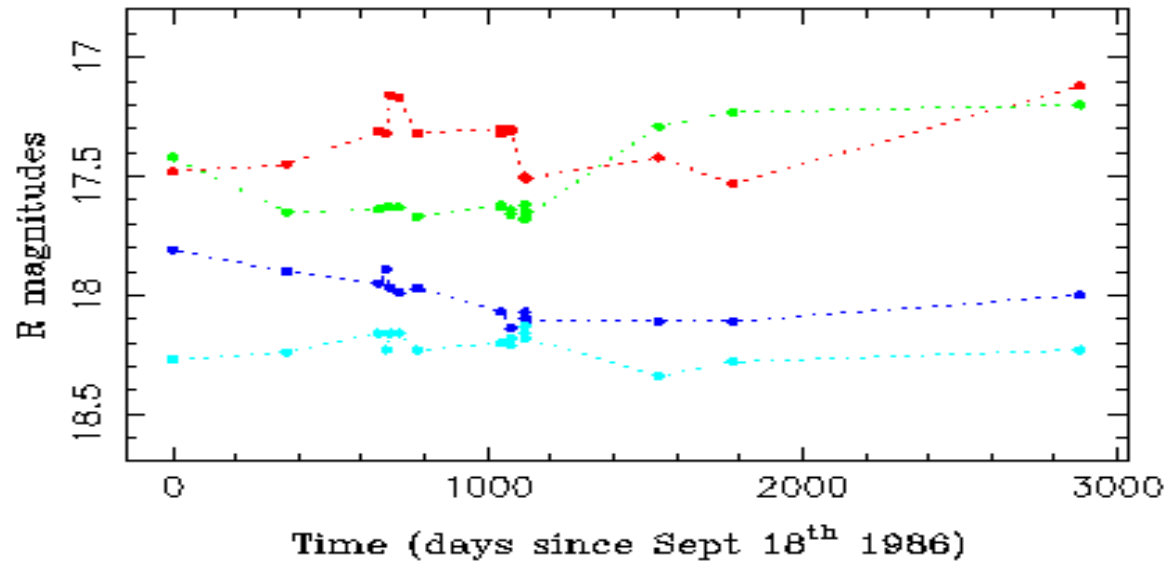
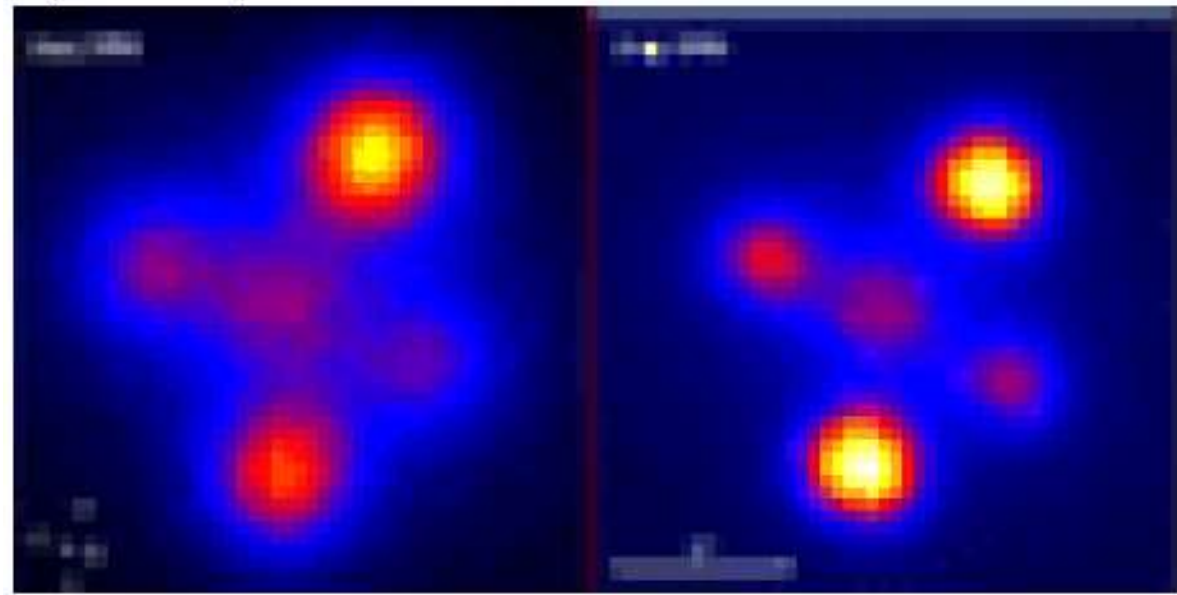
Fig. 1. Example spectra obtained in the monitoring, showing the region around C IV $\lambda 1549$ for two epochs, in components A and B. The adopted continua are marked by the dotted lines.

◆ Time delay



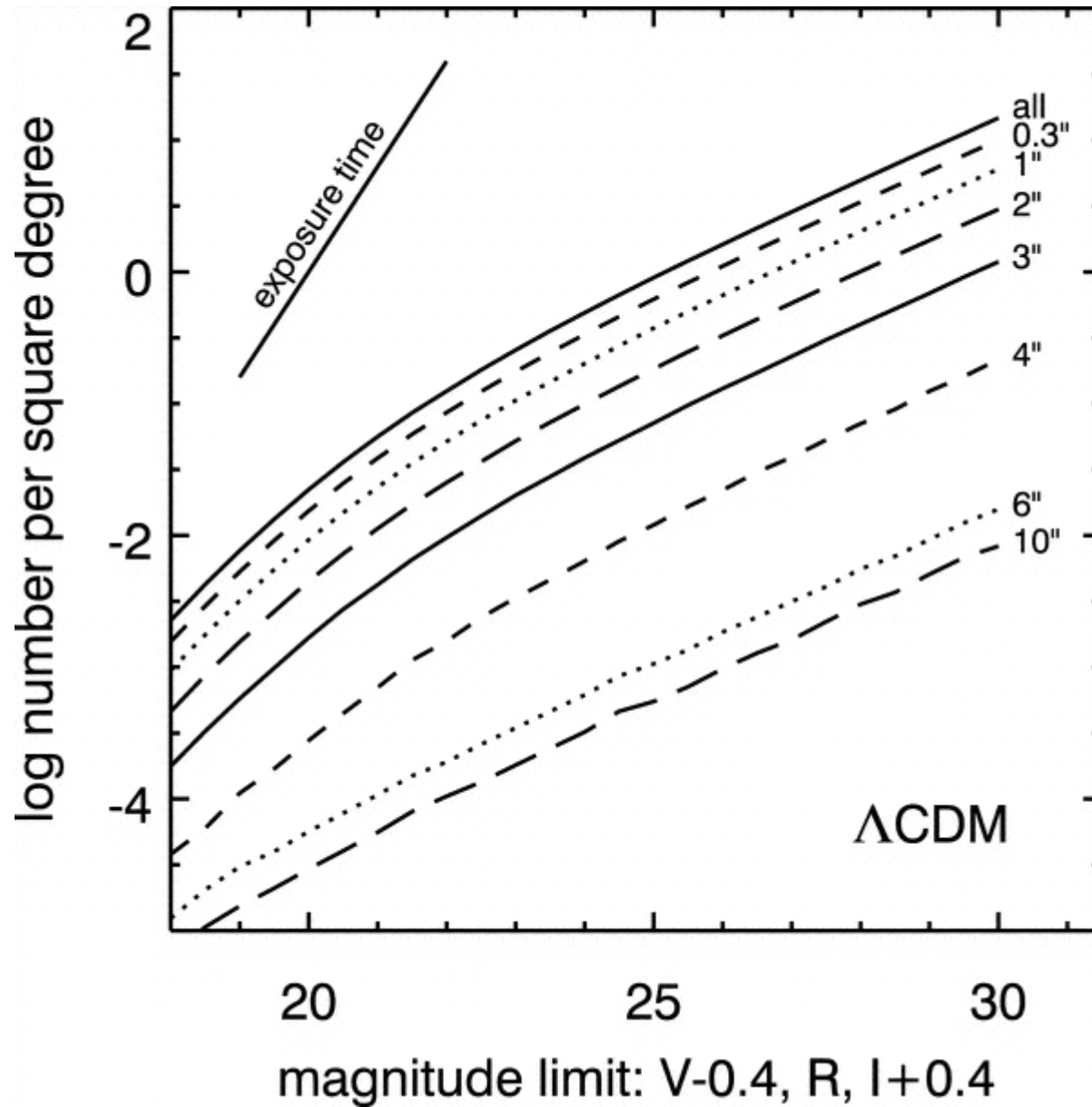
Q2237+0305

◆ Time delay

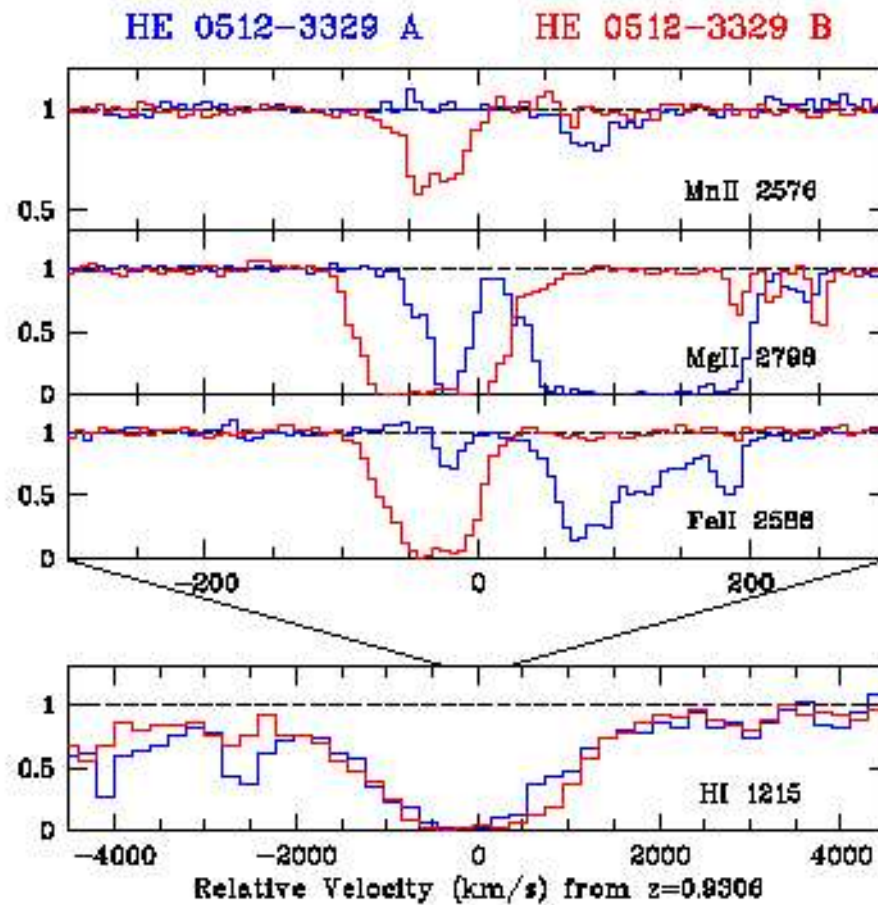
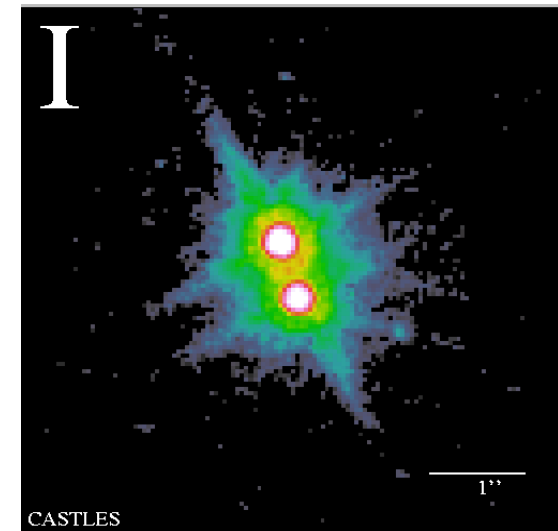


Q2237+0305

◆ Estadística de lentes



◆ Lentes como absorbentes



$\Omega_{\Lambda}!!$

◆ Lentes como absorbentes

UVES Program to test metal enrichment of the forest using parallel lines of sight



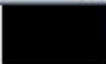
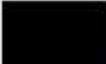






◆ Castles

Gravitational Lens Data Base - Mozilla

File Edit View Go Bookmarks Tools Window Help

http://cfa-www.harvard.edu/castles/

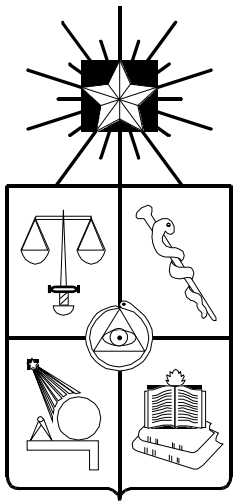
Home Bookmarks mozilla.org SuSE - The Lin...

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|-------------------------------|---|-------|-------|--------------|--------------|-------|-----------|---------|--------------|-----|------|
| 4 |  | HST01248+0351 | C | | | 01:24:45.6 | +03:51:06 | 0.029 | | | | 2 | 0. |
| 5 |  | B0128+437 | B | 3.124 | | 01:31:13.405 | +43:58:13.14 | 0.082 | | | $F_5=48$ | 4 | 0. |
| 6 |  | PMNJ0134-0931 | A | 2.216 | 0.77 | 01:34:35.67 | -09:31:02.9 | 0.031 | | | $F_5=529$ | 5R | 0. |
| 7 |  | Q0142-100 | A | 2.72 | 0.49 | 01:45:16.5 | -09:45:17 | 0.031 | I=16.47/2 | I=18.72 | $F_5 \sim 1$ | 2 | 2. |
| 8 |  | QJ0158-4325 | A | 1.29 | | 01:58:41.44 | -43:25:04.20 | 0.015 | I=17.39/2 | I=18.91 | $F_8 < 0.2$ | 2 | 1. |
| 9 |  | B0218+357 | A | 0.96 | 0.68 | 02:21:05.483 | +35:56:13.78 | 0.068 | I=18.55/4 | I=20.06 | $F_5=1209$ | 2ER | 0. |
| 10 |  | HE0230-2130 | A | 2.162 | 0.52 | 02:32:33.1 | -21:17:26 | 0.022 | I=18.00/4 | I=20.39 | | 4 | 2. |
| 11 |  | SDSS0246-0825 | A | 1.68 | | 02:46:34.11 | -08:25:36.2 | | | | | 2 | 1. |
| 12 |  | CFRS03.1077 | B | 2.941 | 0.938 | 03:02:30.9 | +00:06:02.1 | 0.098 | | I=20.36 | | 2ER | 2 |
| 13 |  | J0332-2756 | A | | 0.617 | 03:32:38.22 | -27:56:52.9 | 0.008 | V=-1.95/6 | V=20.74 | | 2E | 3.06 |

◆ Bibliografía

- <http://relativity.livingreviews.org/open?pubNo:>
- Schneider, P., Ehlers, J., and Falco, E.E.,
Gravitational Lenses, (Springer, Berlin, 1992).

La razón D/H intergaláctica



Sebastian Lopez
Departamento de Astronomía
Universidad de Chile



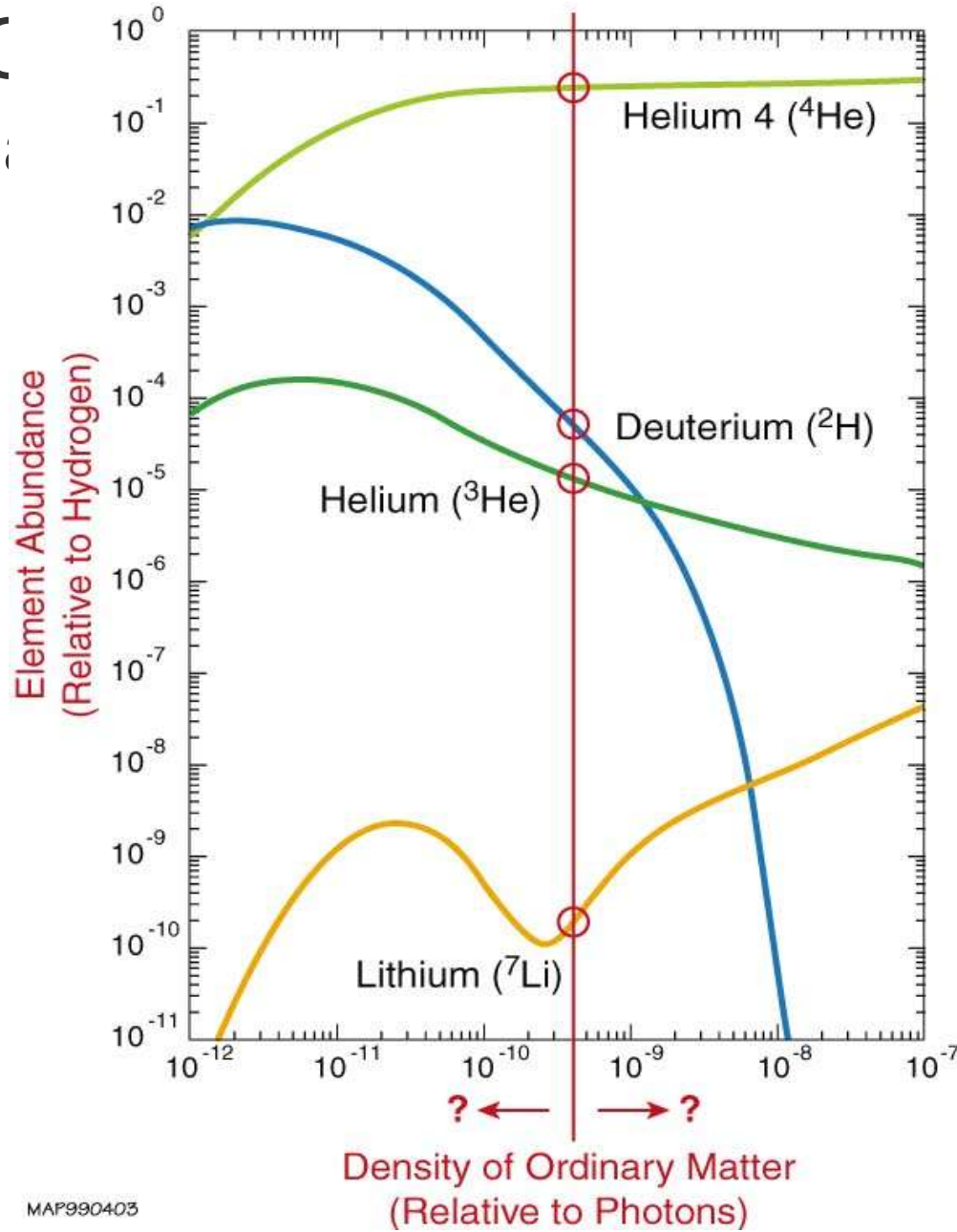
◆ Deuterio

- ◆ Deuterio en la galaxia
- ◆ Observaciones FUSE
- ◆ Prochaska et al. (2005) ApJ 620,39

- ◆ CTQ408
 - ◆ examples

◆ CTC

◆ ex:



MAP990403