

Introducción al Fenómeno Lente Gravitatoria

Verónica Motta

Departamento de Física y Astronomía
Universidad de Valparaíso



Índice

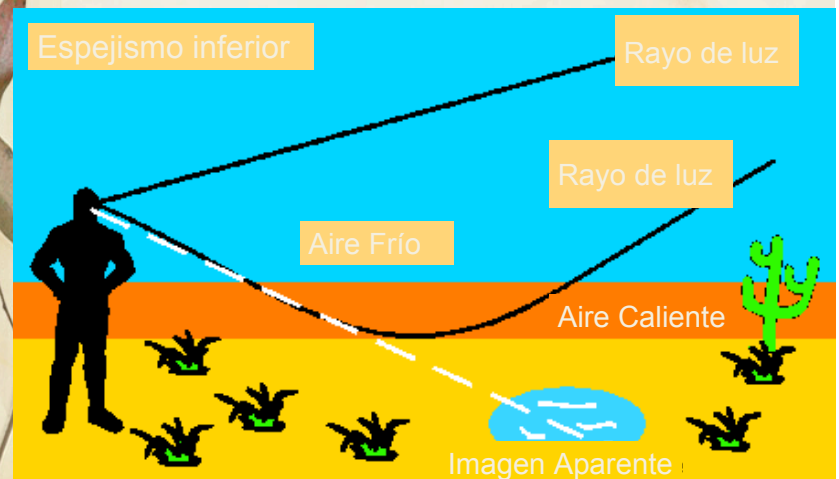
- Introducción
- Historia
- Ecuaciones
- Configuraciones de imágenes
- Tipos de efecto lente
- Aplicaciones (*strong lensing*)
 - Materia oscura
 - Extinción
 - H_0

UCh 25/09/2007

Lentes Gravitatorias - V. Motta

2

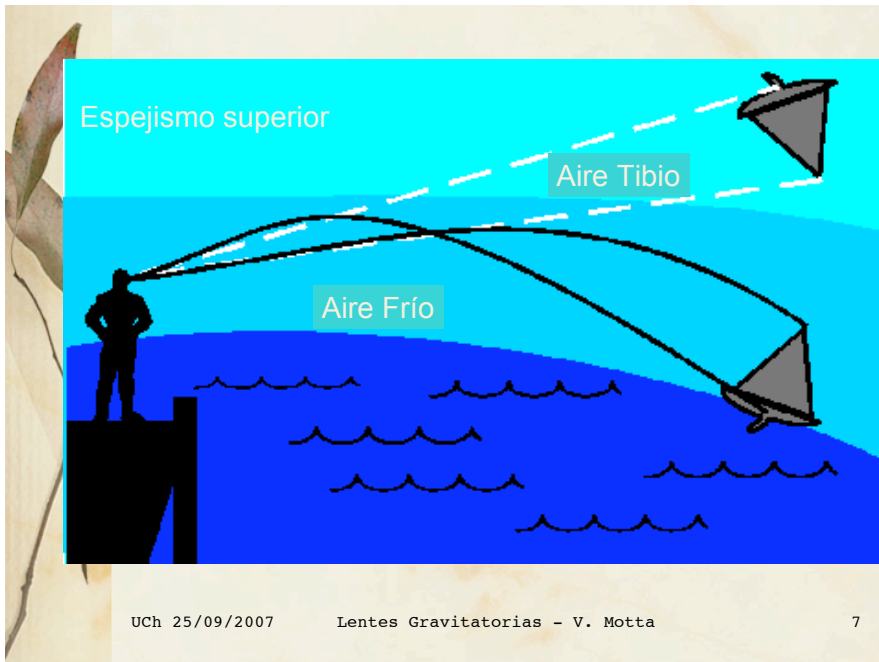
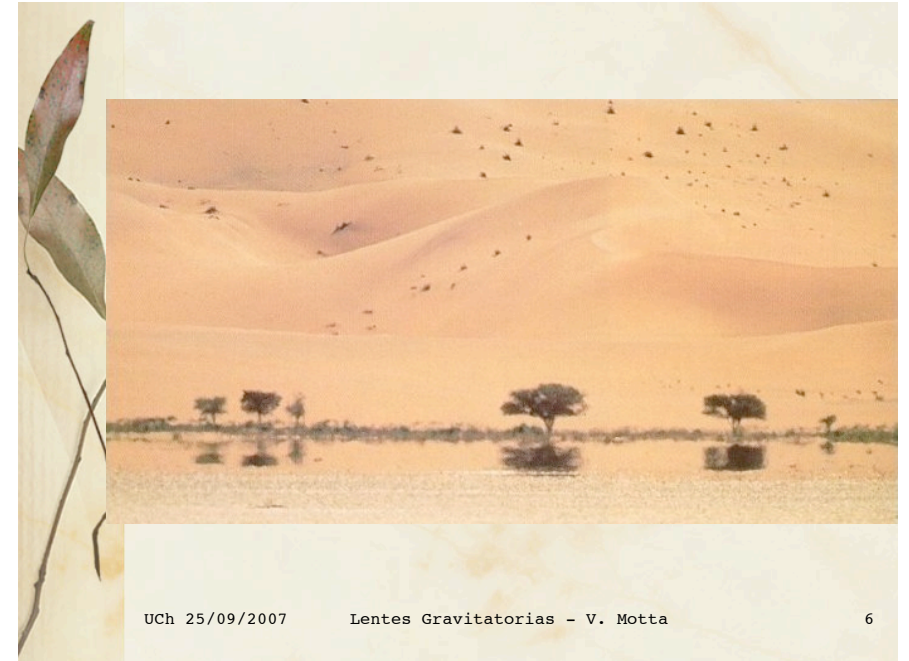
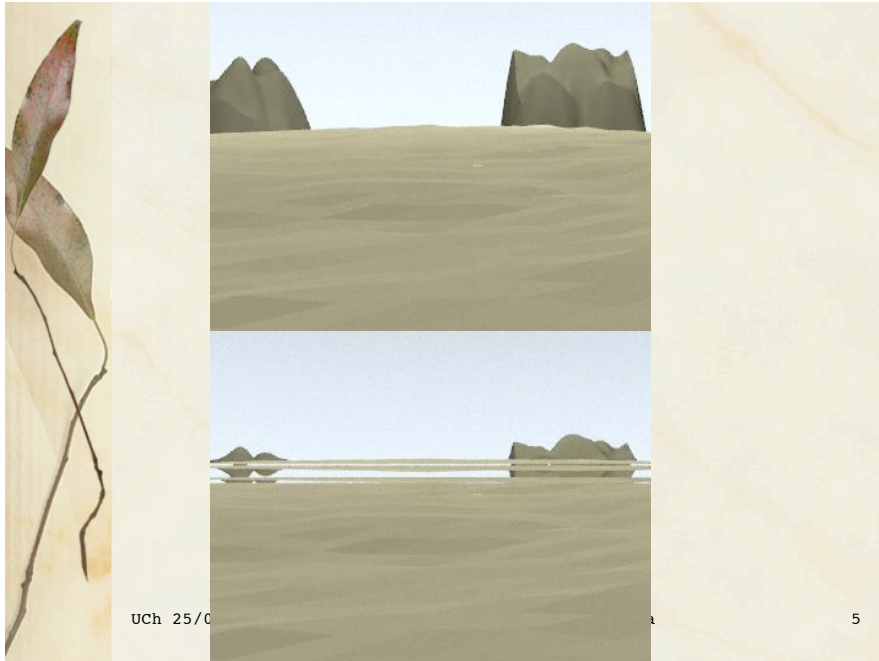
Espejismos



UCh 25/09/2007

Lentes Gravitatorias - V. Motta

4

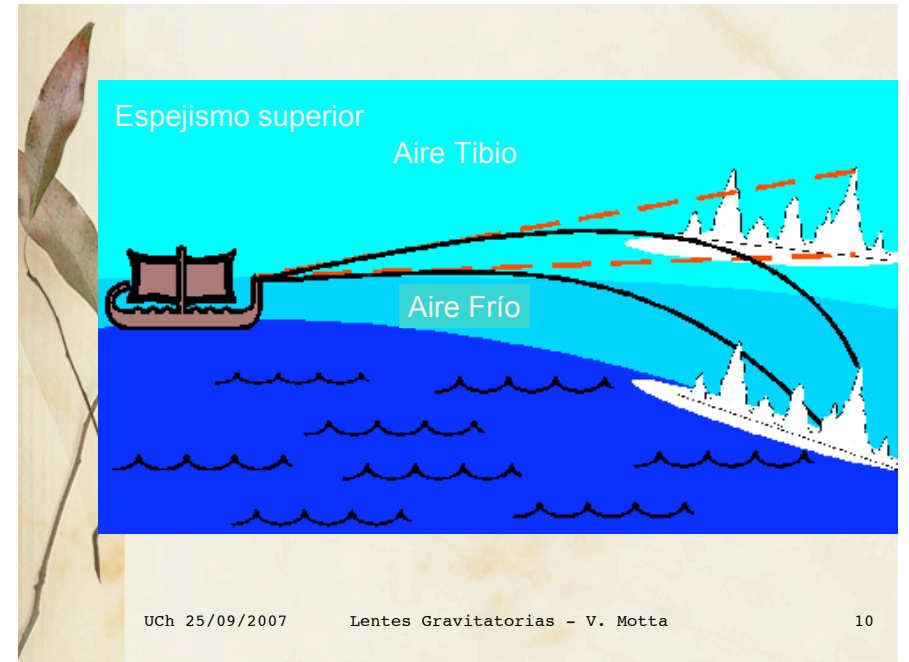




UCh 25/09/2007

Lentes Gravitatorias - V. Motta

9



UCh 25/09/2007

Lentes Gravitatorias - V. Motta

10



UCh 25/09/2007

Lentes Gravitatorias - V. Motta

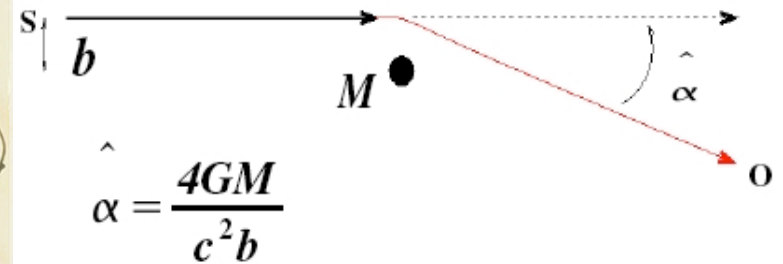
11



Descubrimiento de la deflexión de la luz

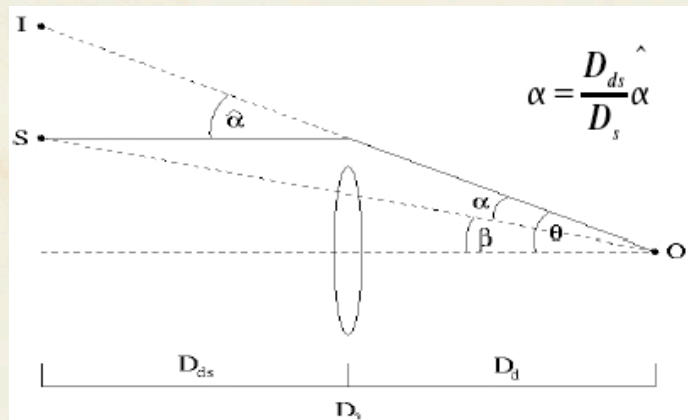
- Sospechada por Newton y Laplace
 - Soldner calcula el ángulo de deflexión (1804)
- Einstein aplica la RG (1915)
 - El ángulo de deflexión es el doble
- Experimento con el eclipse de Sol (1917)
 - Confirma resultado de Einstein

Una ecuación de la RG



Independiente de la longitud de onda

Ángulo de deflexión aparente

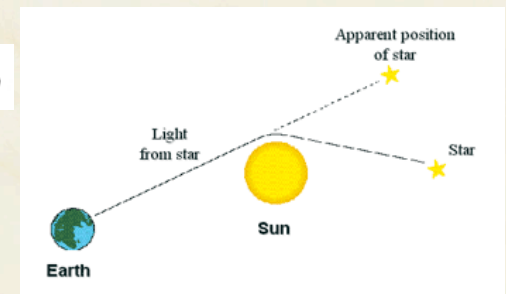


Deflexión producida por el Sol

○ $D_{DS} \sim D_S \Rightarrow$

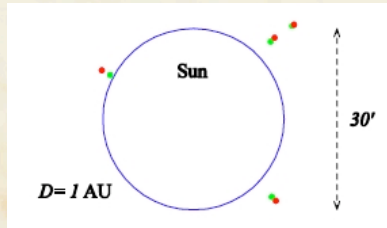
$\hat{\alpha} \simeq \alpha = 4GM / c^2 b$

○ $\alpha = 1.75''$



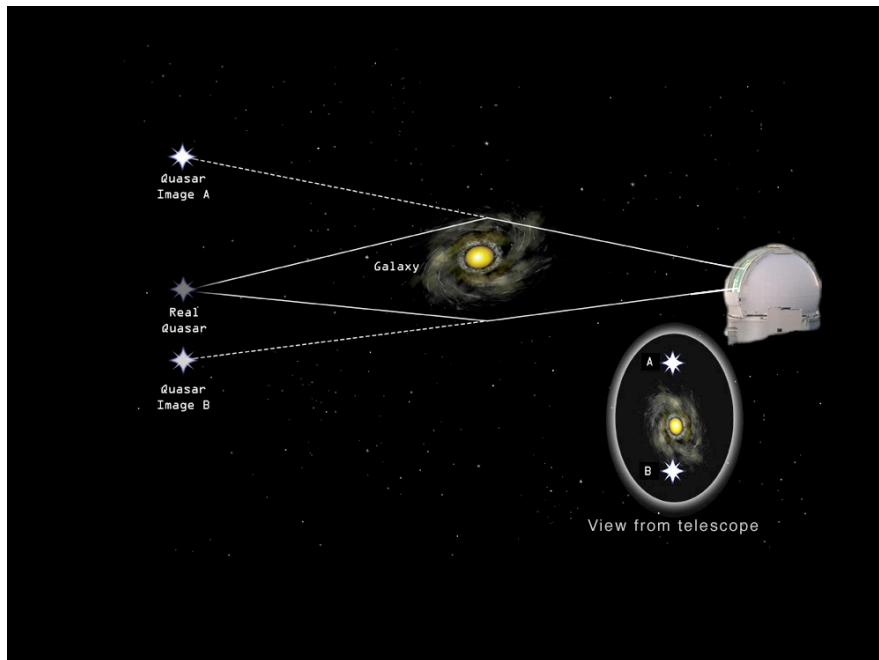
El experimento del eclipse de Sol

- Eddington et al.
 - 29 marzo 1919
 - Isla Príncipe (costa oeste de África)
- Concuerda con Einstein



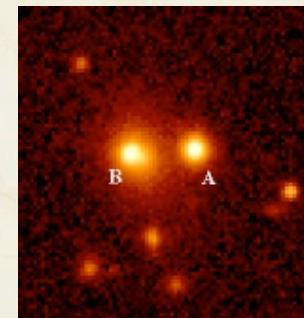
Historia de muchas imágenes

- Sugerida por Eddington (1920)
- Einstein considera las estrellas como lentes (1936)
 - Concluye que la separación es muy pequeña para ser observada
- Zwicky considera a las galaxias como lentes (1937)
 - Debería observarse imágenes separadas
 - Importante medida de la masa
 - Telescopios gravitatorios
 - Probabilidad de observar el fenómeno

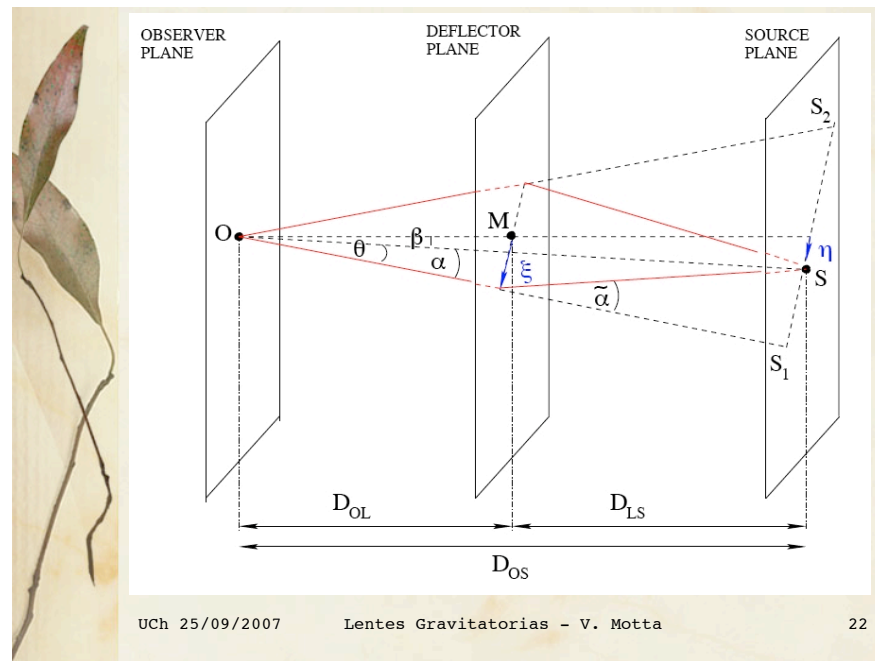


Descubrimiento de imágenes múltiples

- Walsh, Carswell & Weymann (1979)
- Q0957+561 2 imágenes, separación 6''



Ecuaciones



Distancias

- Métrica Robertson-Walker
- Desplazamiento al rojo (z)
R(t) radio del universo en el tiempo t

$$1 + z = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{R(t_0)}{R(t)}$$

- Distancia entre dos objetos a z_i y z_j

$$D(z_i, z_j) = \frac{2c}{H_0} \frac{(1 - \Omega_0 - G_i G_j)(G_i - G_j)}{\Omega_0^2 (1 + z_i)(1 + z_j)^2}$$

$$G_i = \sqrt{1 + \Omega_0 z_i}$$

$$G_j = \sqrt{1 + \Omega_0 z_j}$$

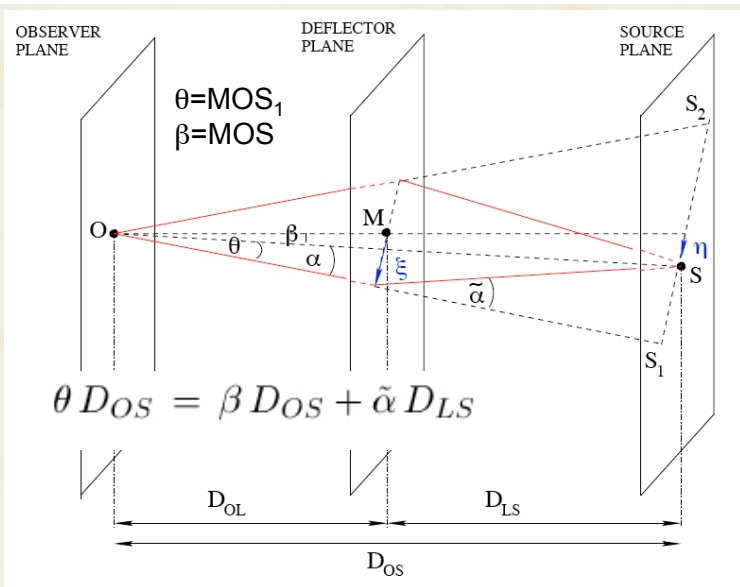
Distancias

- Universo con λ₀ = 0 Ω₀ = 1

$$D(z_i, z_j) = \frac{2c}{H_0} \frac{(-G_i G_j)(G_i - G_j)}{(1 + z_i)(1 + z_j)^2},$$

$$G_i = \sqrt{1 + z_i},$$

$$G_j = \sqrt{1 + z_j}.$$



Ecuación de la Lente

$$\theta D_{OS} = \beta D_{OS} + \tilde{\alpha} D_{LS} \quad \tilde{\alpha} = \frac{4GM(\xi)}{c^2} \frac{1}{\xi}$$

Definimos: $\alpha(\theta) = \frac{D_{DS}}{D_S} \tilde{\alpha}(\theta)$

Ecuación de la lente: $\beta = \theta - \alpha(\theta)$

Ecuación de la lente asimétrica:

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

Ecuación de la lente

Ecuación de la lente asimétrica

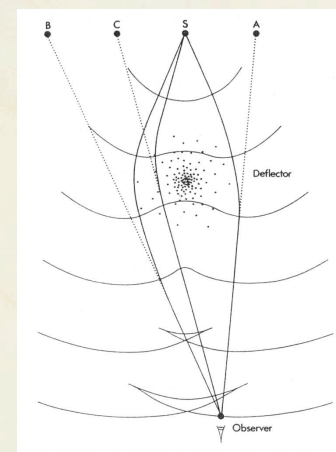
$$\vec{\beta} = \vec{\theta} - \vec{\alpha}(\theta)$$

Para ángulos pequeños, los ángulos se relacionan con las distancias en cada plano:
 posición de la fuente $\vec{\beta}$ $\vec{\theta}$ ángulo de deflexión
 posición observada de las imágenes

$$\vec{\beta} = \vec{\eta}/D_{OS}$$

$$\vec{\theta} = \vec{\xi}/D_{OL}$$

Retraso Temporal



Retraso Temporal

- Definimos densidad crítica de masa superficial

$$\Sigma_{critic} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_s}{D_d D_{ds}},$$

$$\kappa = \frac{\Sigma}{\Sigma_{critic}},$$

- El potencial de deflexión es

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

- Imágenes son puntos críticos de ψ

Retraso Temporal

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

como $\vec{\nabla} \ln |\vec{\theta}| = \vec{\theta}/|\vec{\theta}|^2$

entonces $\vec{\alpha} = \vec{\nabla} \psi$

donde $\vec{\alpha}(\vec{\theta}) = \frac{4G}{c^2} \int_{R^2} \frac{(\vec{\theta} - \vec{\theta}') \Sigma(\vec{\theta}')}{|\vec{\theta} - \vec{\theta}'|^3} d^2\theta'$

retraso temporal $t(\vec{\theta}) = \frac{1+z_d}{c} \frac{D_d D_s}{D_{ds}} \left[\frac{1}{2} (\vec{\theta} - \vec{\beta})^2 - \psi(\vec{\theta}) \right]$

Retraso Temporal

$$t(\vec{\theta}) = \frac{1+z_d}{c} \frac{D_d D_s}{D_{ds}} \left[\frac{1}{2} (\vec{\theta} - \vec{\beta})^2 - \psi(\vec{\theta}) \right]$$

retraso temporal entre
imágenes de la misma fuente

distancias (H_0)
de la lente
diferentes caminos
(imágenes)

potencial gravitatorio
de la lente

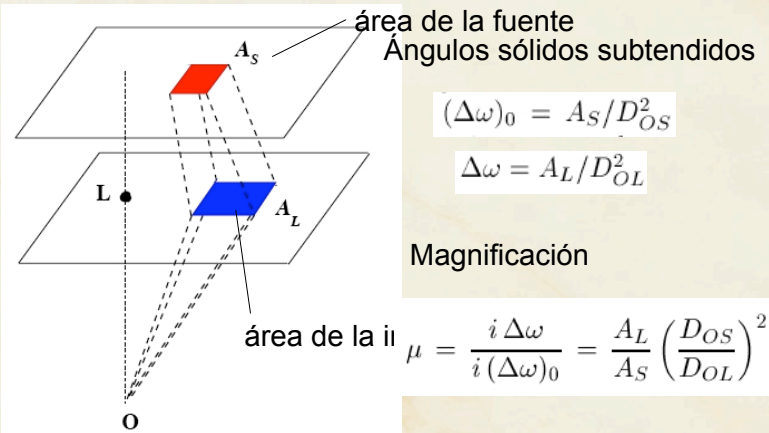
Midiendo $\Delta t(\theta)$ y con un modelo para $\psi(\theta)$, se puede determinar H_0

Magnificación

- En el efecto lente idealmente no hay absorción ni emisión.
- Entonces se conserva la intensidad específica (intensidad/área) para cada frecuencia ν , i_ν
- Un deflector estático no cambia ν , entonces i medida en las imágenes y en la fuente son la misma

$$i = \int_{\nu'} i_{\nu'} d\nu'$$

Magnificación



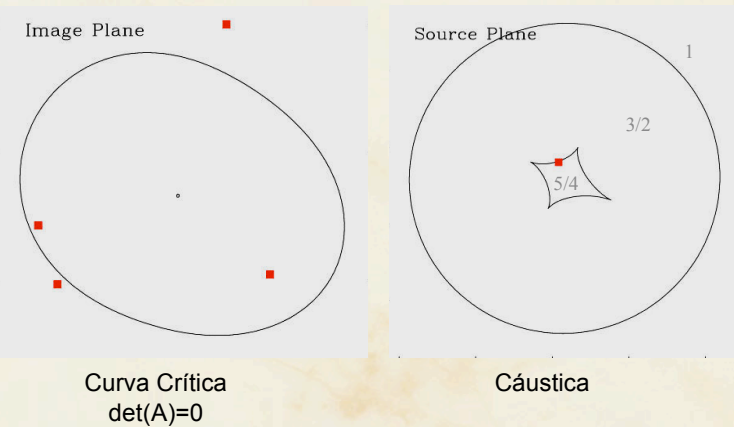
Magnificación

$$|\mu| = \frac{S_\nu}{(S_\nu)_0} = \frac{d\omega}{(d\omega)_0} = \left[\det A(\vec{\xi}) \right]^{-1}$$

$$A_{ij} = \frac{\partial \eta_i}{\partial \xi_j}$$

Brillo de las imágenes determinado por $\mu = [\det(A)]^{-1}$

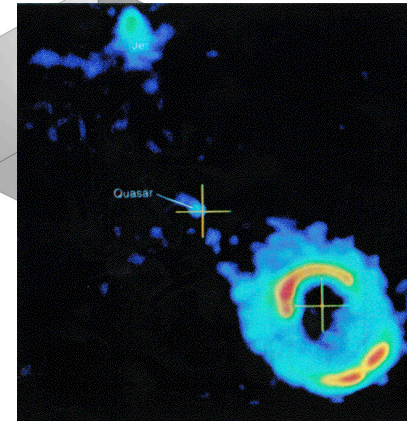
Curvas críticas y cáusticas



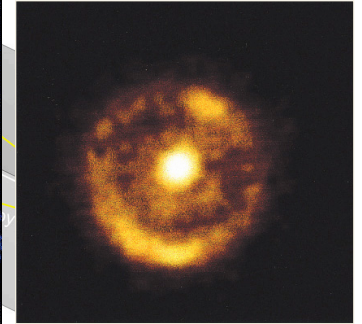
Configuraciones

Anillos de Einstein

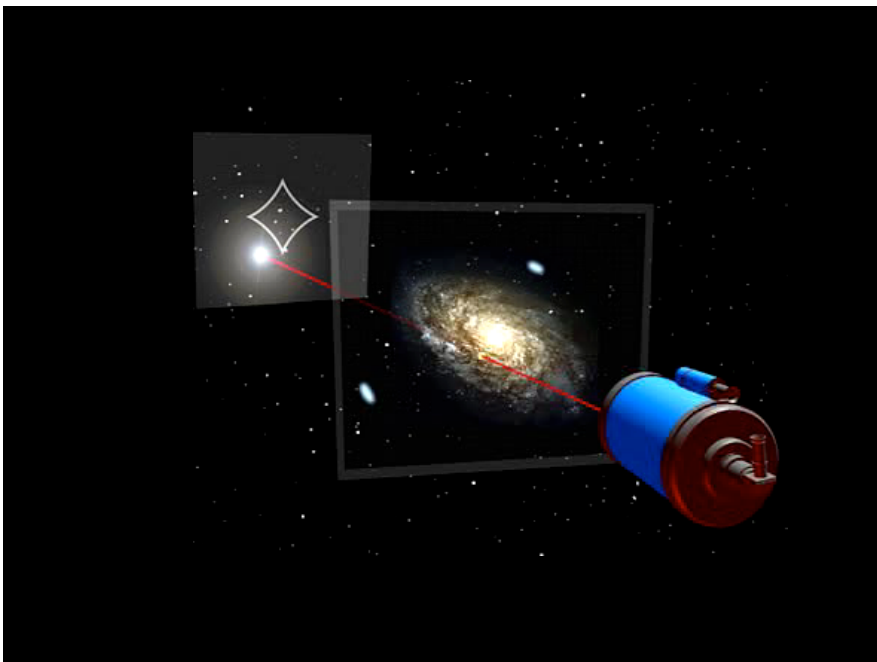
- Se producen cuando
 - Lente esférica
 - Hay alineación observador-lente-fuente ($\beta=0$)
- Imágenes sobre la curva crítica
- Fuente en una de las cúspides de la cáustica



VLA

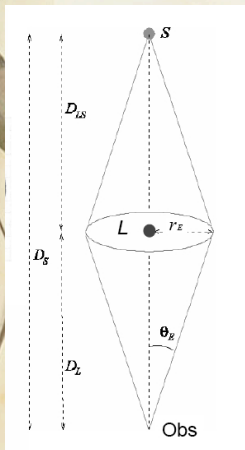


HST



Tipos de Efecto Lente

Anillos de Einstein



$$r_E = \theta_E D_L$$

$$\theta_E = \frac{2}{c} \sqrt{\frac{GM D_{LS}}{D_L D_S}} \ll 1.$$

$$r_E = \frac{2}{c} \sqrt{GM D_L \frac{D_{LS}}{D_S}}.$$

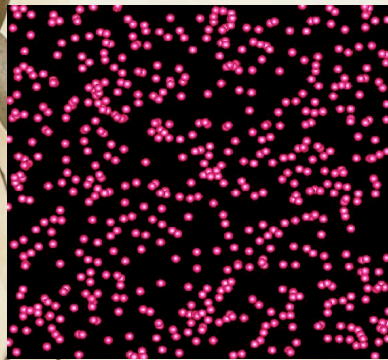
Lens mass	D_L	θ_E	r_E
$1M_\odot$	10 kpc	$10^{-3}''$	10 AU
$1M_\odot$	1000 Mpc	$3 \cdot 10^{-6}''$	0.01 pc
$10^{12}M_\odot$	1000 Mpc	$3''$	10 kpc
$10^{14}M_\odot$	1000 Mpc	$30''$	100 kpc

- Dependiendo del tipo de imágenes que se producen (intensidad del campo gravitatorio) y de la escala espacial, distinguimos tres efectos:

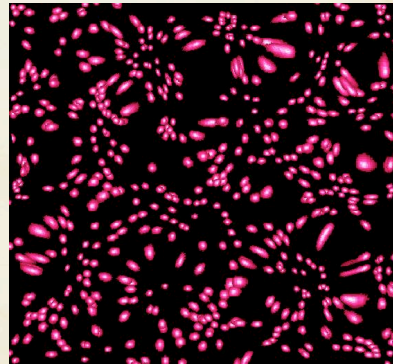
- Efecto lente débil (*weak lensing*)
- Efecto microlente (*micro lensing*)
- Efecto lente fuerte (*strong lensing*)

Efecto Lente Débil

- Producido por cúmulos de galaxias poco masivos o en las afueras de cúmulos masivos.
- Distorsiona la elipticidad de las galaxias de fondo (fuentes).
- Se utiliza para estudiar la distribución de la materia en la estructura a gran escala.



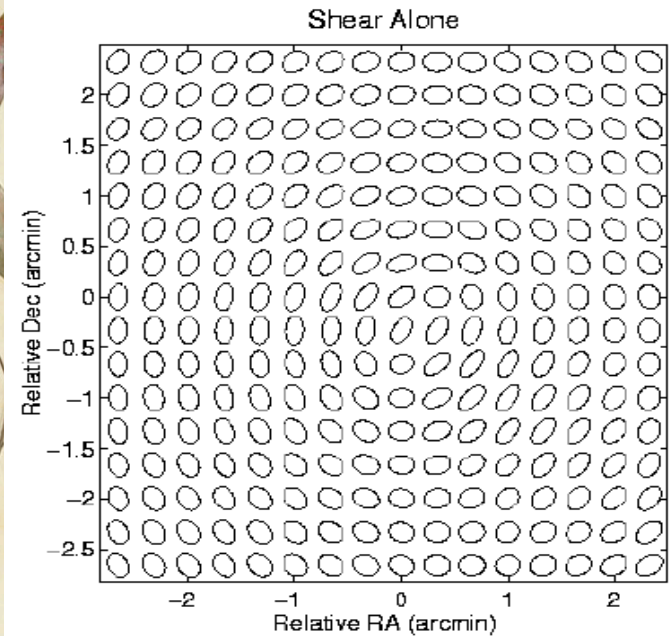
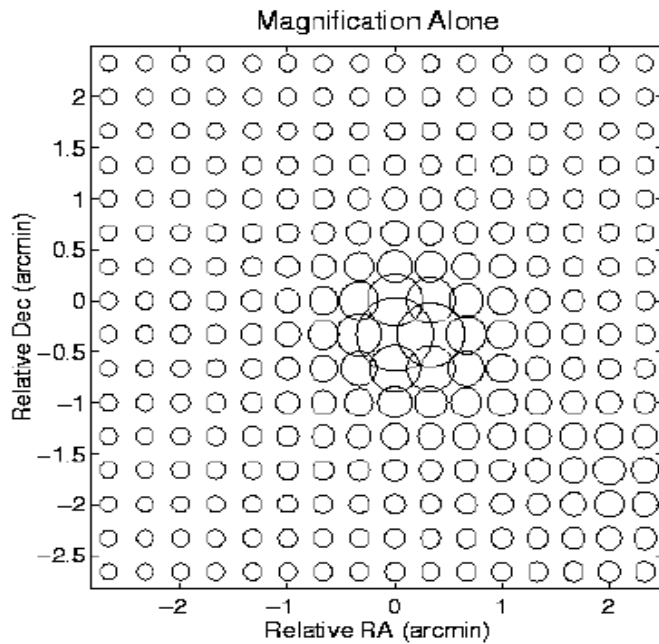
Sin efecto lente

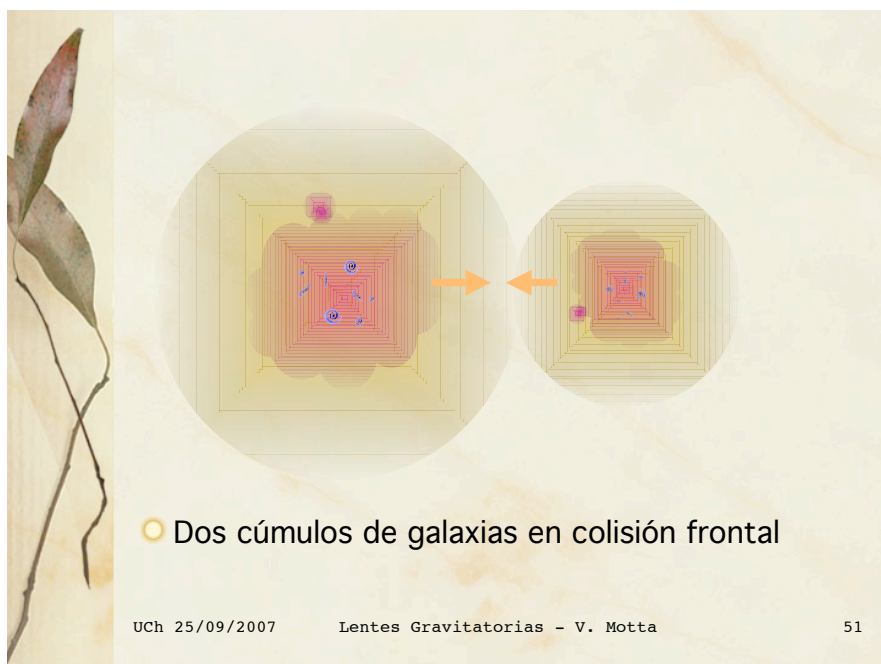
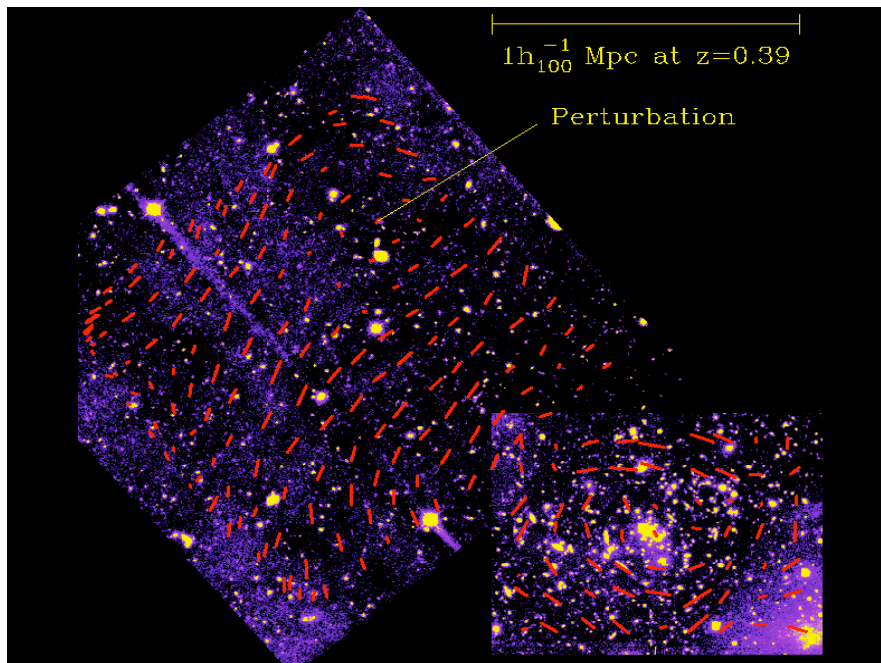


Con efecto lente

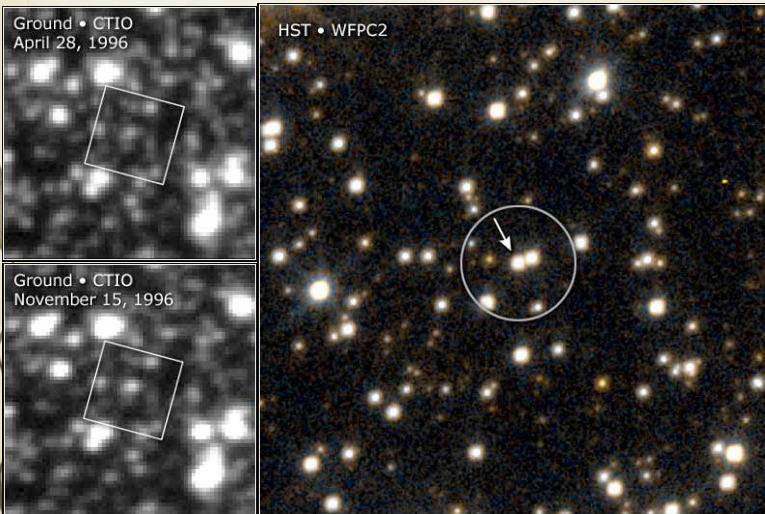
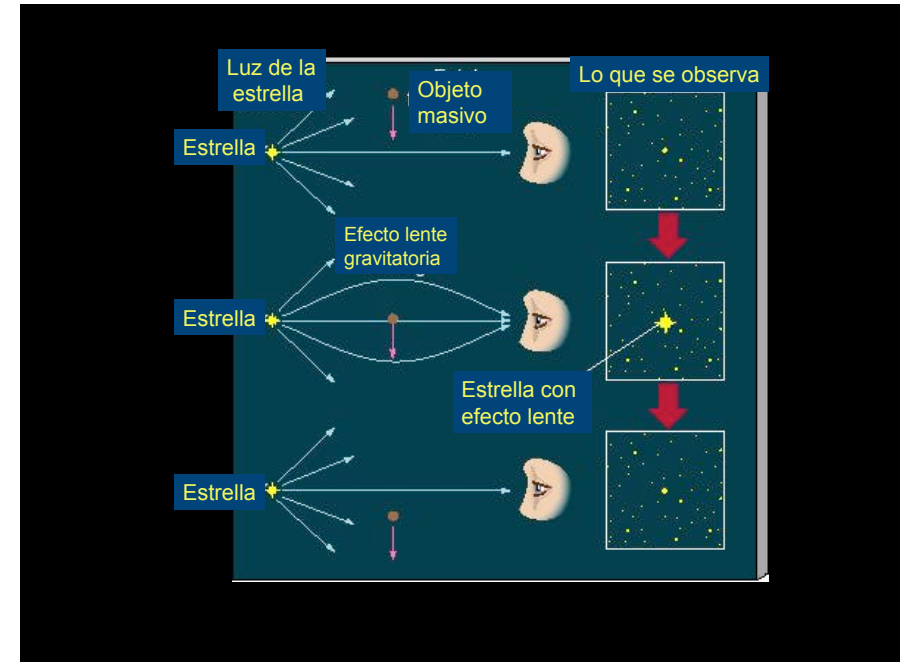
Método

- Supone todas las galaxias de fondo al mismo z .
- Promedia su forma y obtiene el *shear map*.
- Estima la distribución de materia y obtiene un nuevo *shear map*.
- Itera hasta ajustar las observaciones





- Aumento temporario del brillo de una estrella (en nuestra galaxia o en una cercana).
- Se usa para investigar objetos oscuros de masa estelar (lentes).

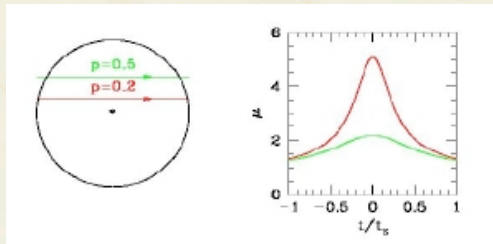


Método

- Paczynsky (1986) sugirió la búsqueda de objetos masivos en el halo de nuestra galaxia (*massive compact halo objects, MACHOs*).
- Se monitorean millones de estrellas en la LMC y se construyen curvas de luz.
- El fenómeno es acromático y simétrico en el tiempo (no se confunde con estrellas variables).

Pasaje de la lente frente a la estrella

- El máximo de magnificación se obtiene con el alineamiento
- Escala temporal $130(m/M_{\text{sun}})^{1/2}$ días (LMC)

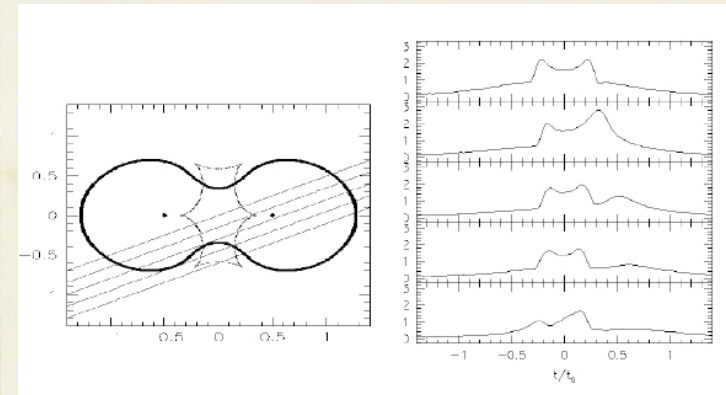


UCh 25/09/2007

Lentes Gravitatorias - V. Motta

57

Lentes binarias

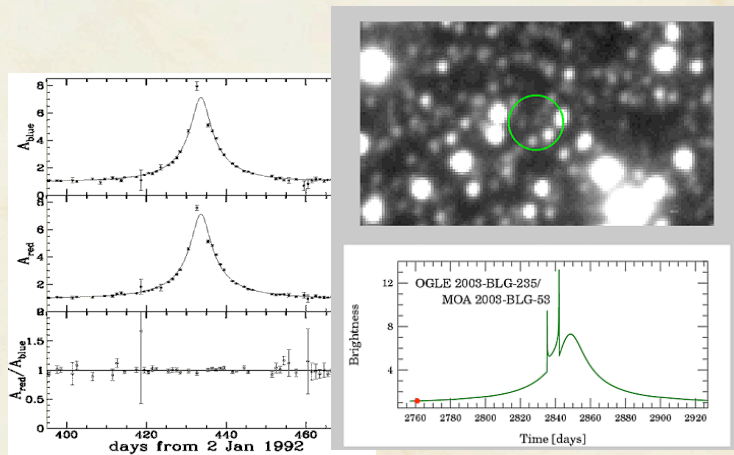


UCh 25/09/2007

Lentes Gravitatorias - V. Motta

58

Curva de Luz de la Estrella

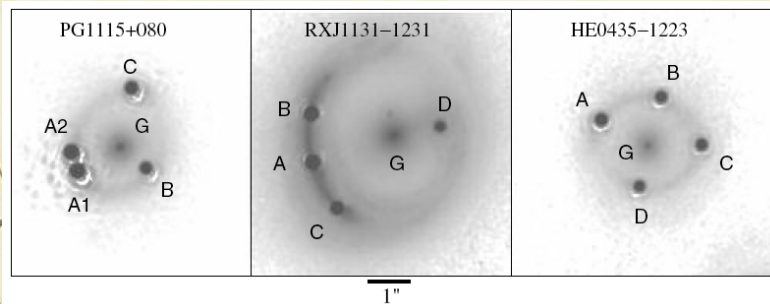


UCh 25/09/2007

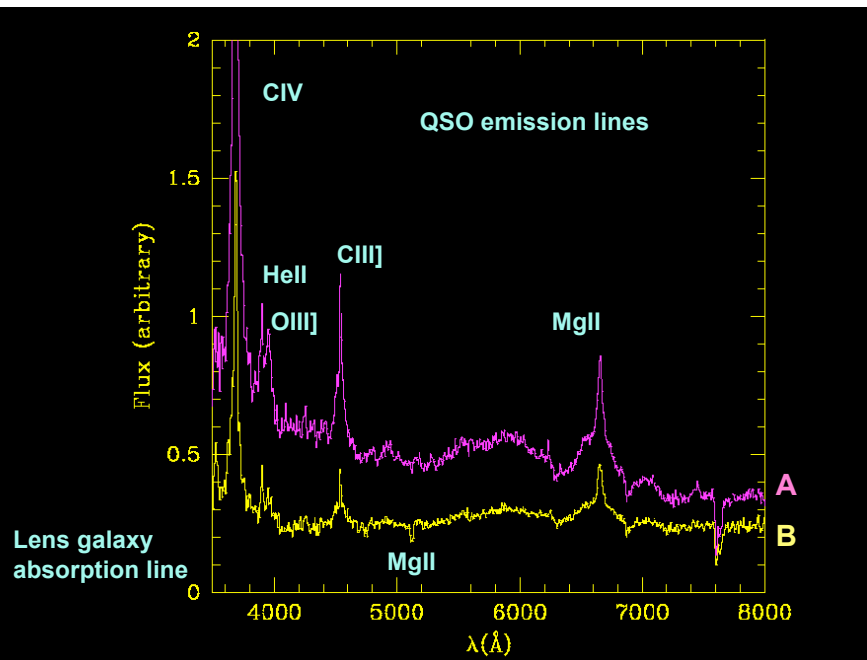
Lentes Gravitatorias - V. Motta

59

Efecto Lente Fuerte

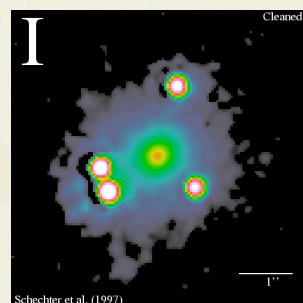
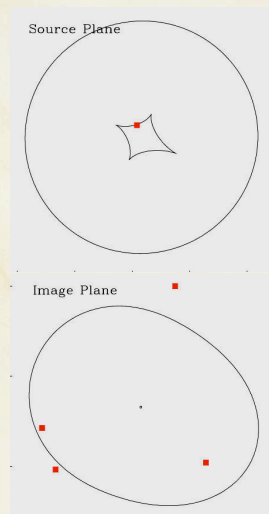


- Produce varias imágenes de la fuente.
- Espectros de las imágenes contienen información de la fuente y la lente.
- Se utiliza para estudiar:
 - halos de materia oscura (lente)
 - extinción por polvo (lente)
 - estructura de la fuente
 - H_0



Halos de materia oscura

- Se obtienen modelando el SLG.
- Es necesario conocer las distancias a la fuente y a la lente.
- Se compara la masa de los modelos con la masa luminosa



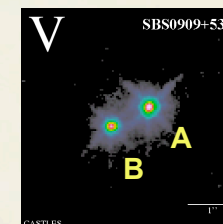
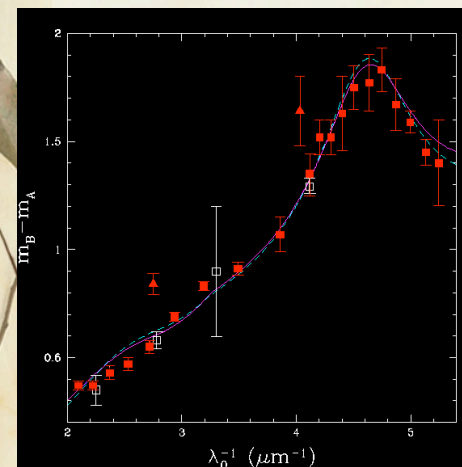
PG 1115+080

UCh 25/09/2007

Lentes Gravitatorias - V. Motta

65

Extinción en SBS0909+532



Detección del máximo a 2175Å fuera del grupo local.

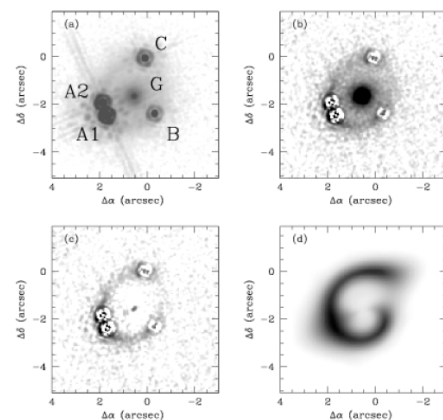
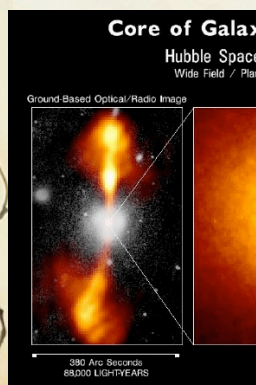
$$z_{\text{dust}} = 0.88 \pm 0.02$$

UCh 25/09/2007

Lentes Gravitatorias - V. Motta

66

Estructura de la Fuente



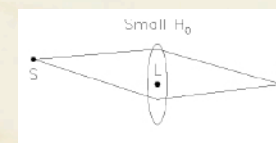
UCh 25/09/2007

Lentes Gravitatorias - V. Motta

67

Estimación de H_0

- Modelo del SLG ajustando posiciones de las imágenes y la lente.
- Curva de luz de las imágenes.
- Medición del retraso temporal ($\Delta t \propto H_0^{-1}$)

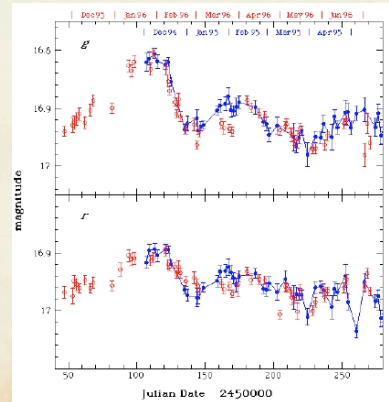
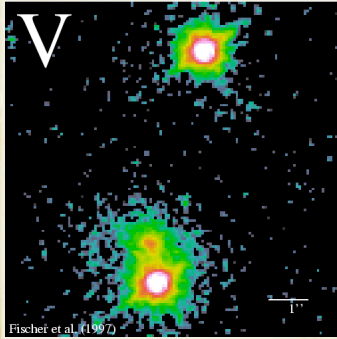


UCh 25/09/2007

Lentes Gravitatorias - V. Motta

68

Retraso Temporal para Q0957+561



UCh 25/09/2007

Lentes Gravitatorias - V. Motta

69

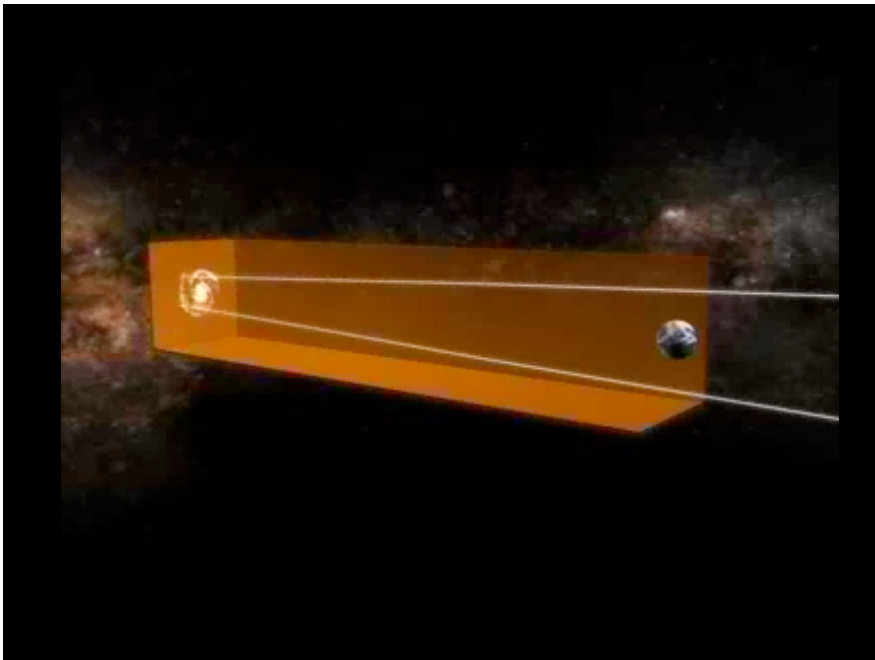
Estimación de H_0 con Q0957+561

- Retraso temporal de 417 días.
- $H_0 = 85 \pm 10$
- Gran incertidumbre en los modelos.

UCh 25/09/2007

Lentes Gravitatorias - V. Motta

70



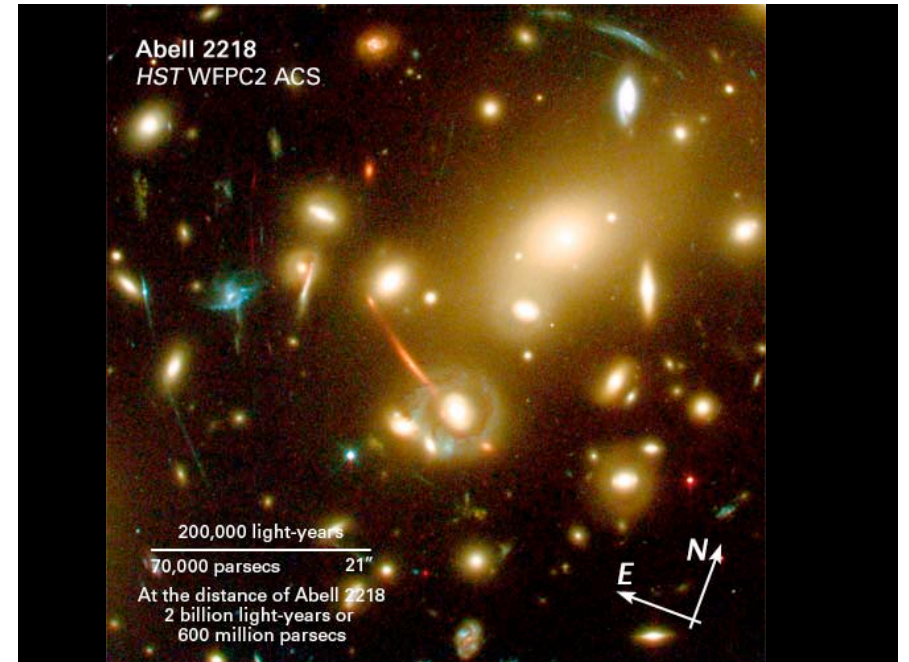
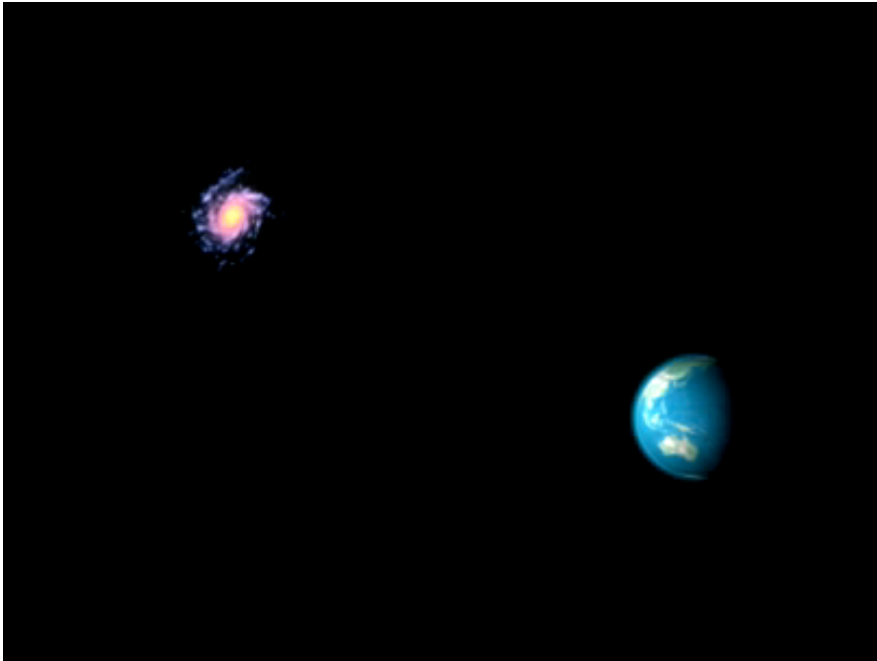
Cúmulos de galaxias

- Composición
 - ~1% de la masa está en las galaxias
 - ~10% de la masa es gas caliente
 - el resto es materia oscura

UCh 25/09/2007

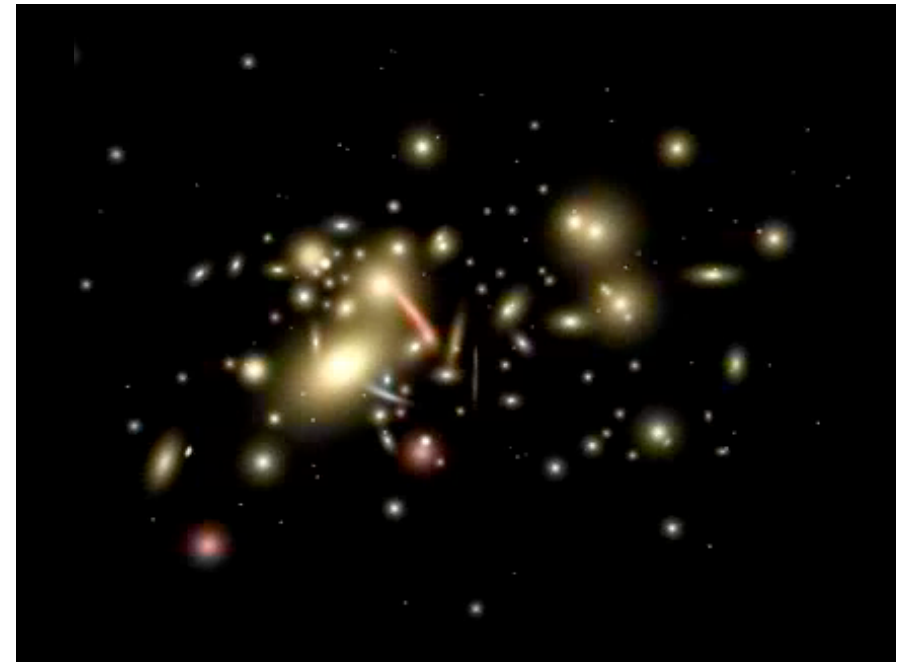
Lentes Gravitatorias - V. Motta

72

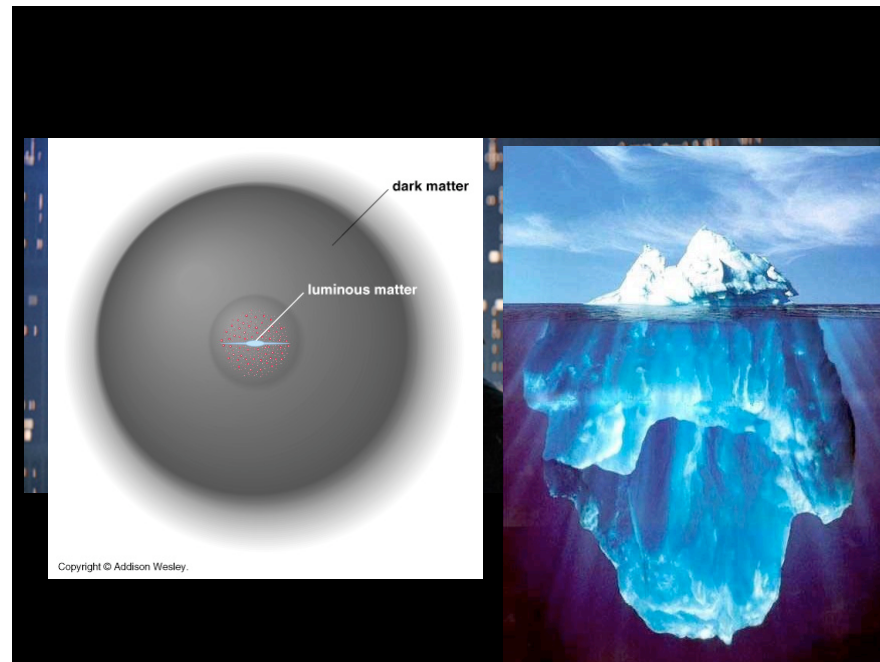


Método

- Identifica los arcos y las imágenes múltiples.
- Modela el cúmulo como esfera singular isoterma.
- Compara con las observaciones.
- Agrega el efecto de cada galaxia del cúmulo.
- Itera hasta ajustar las observaciones.



Conclusión



El avance de la cosmología

