



SAPIENZA
UNIVERSITA DI ROMA



Fisica degli esopianeti

Cattedra Fermi 2019

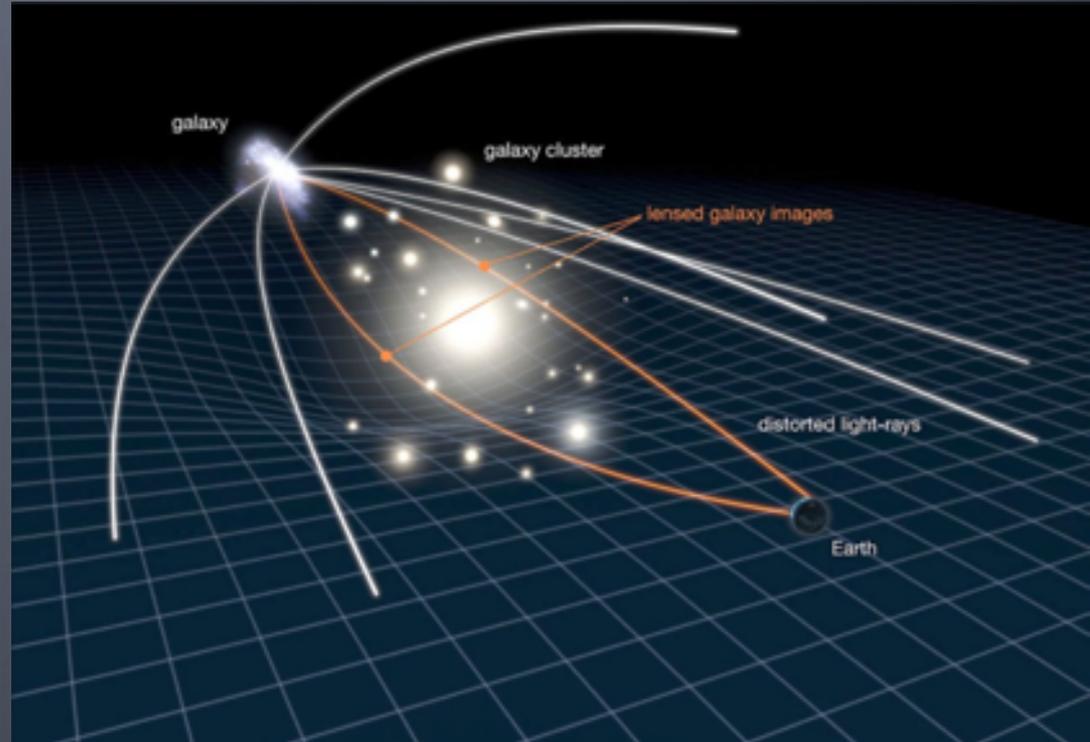
Tecniche di rivelazione: Microlenti gravitazionali

Giovanna Tinetti

Lenti gravitazionali

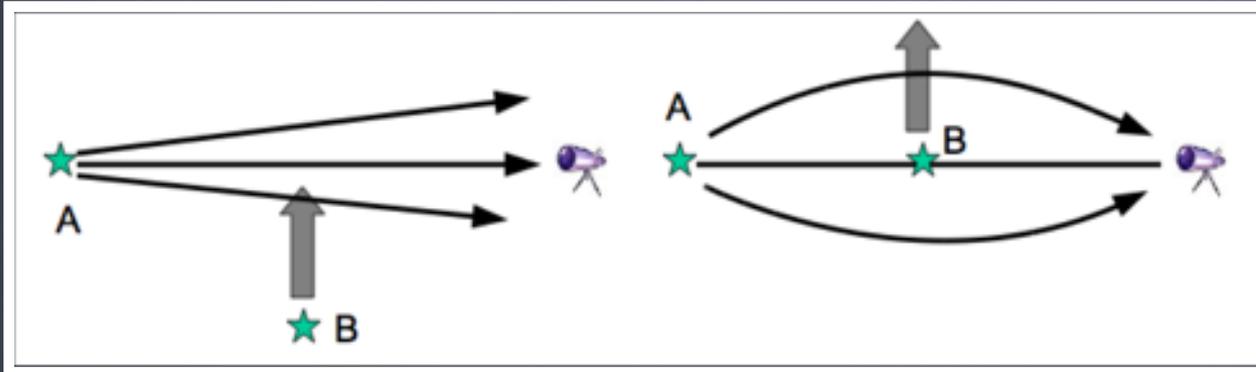
Caso generale

- ☆ In relatività generale la materia distorce lo spazio-tempo
- ☆ Anche la radiazione è deflessa
- ☆ La luce emessa da una **sorgente** lontana è curvata dal potenziale gravitazionale di un oggetto più vicino (**lente**)
- ☆ L'immagine della sorgente è distorta e amplificata



Lenti gravitazionali

Caso generale



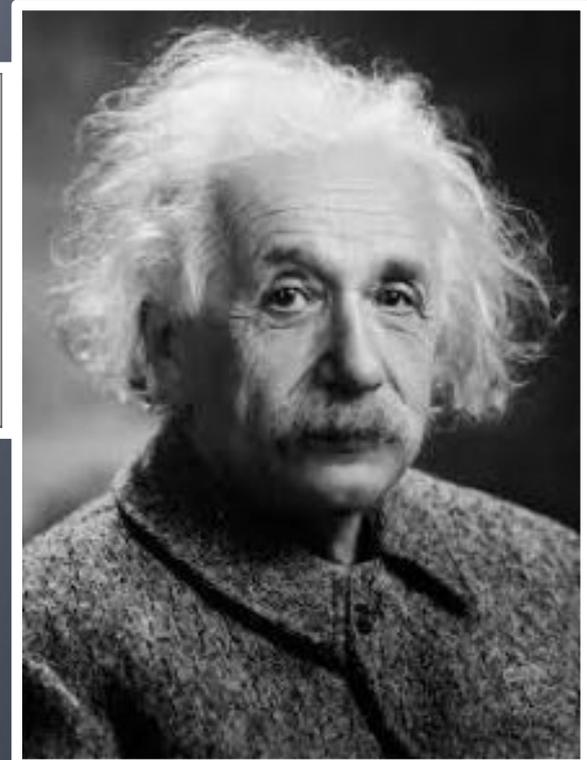
LENS-LIKE ACTION OF A STAR BY THE DEVIATION OF LIGHT IN THE GRAVITATIONAL FIELD

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. This note complies with his wish.

Therefore, there is no great chance of observing this phenomenon, even if dazzling by the light of the much nearer star B is disregarded. This apparent amplification of q by the lens-like action of the star B is a most curious effect, not so much for its becoming infinite, with x vanishing, but since with increasing distance D of the observer not only does it not decrease, but even increases proportionally to \sqrt{D} .

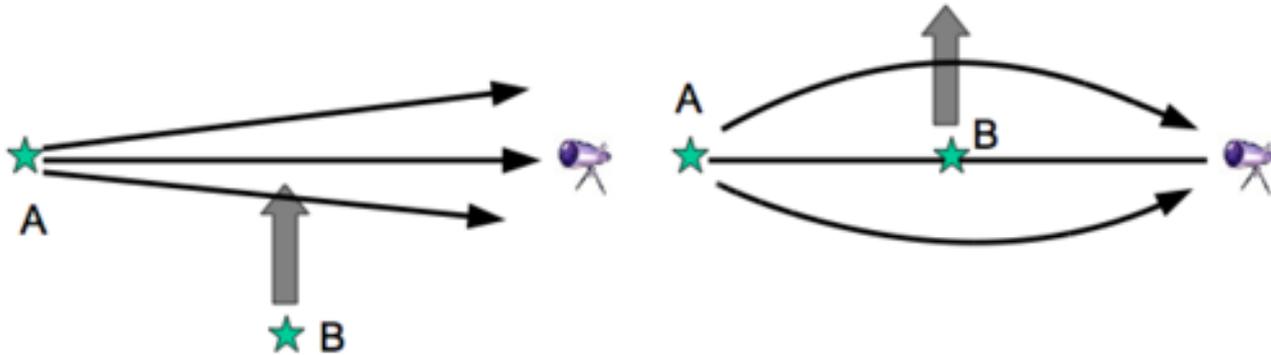
ALBERT EINSTEIN

INSTITUTE FOR ADVANCED STUDY,
PRINCETON, N. J.



Lenti gravitazionali

Caso generale



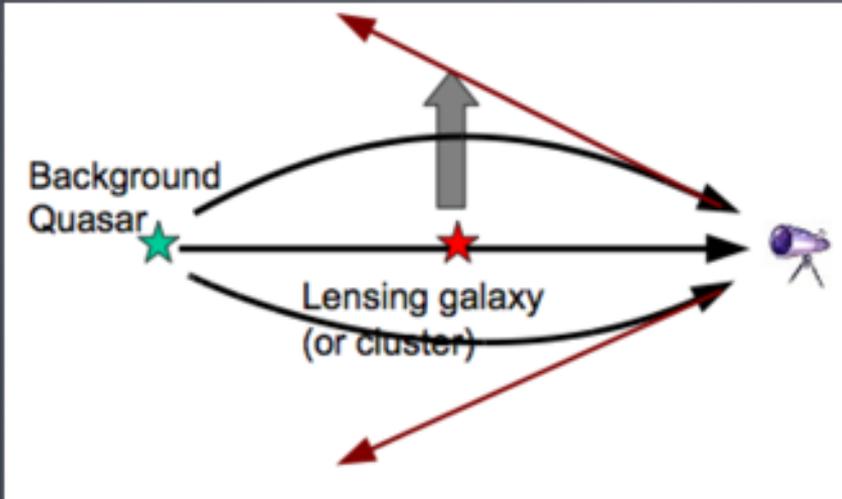
Raggio di Schwarzschild

$$R_S = 2GM_L / c^2 ,$$

- ☆ La curvatura è piccola ed è proporzionale alla dimensione di un buco nero con la massa della stella lente (raggio di Schwarzschild)
- ☆ il Sole ha un raggio di Schwarzschild di ~ 3 km, quello della Terra misura ~ 9 mm
- ☆ R_S funge da orizzonte degli eventi, per cui la velocità di fuga è = velocità della luce

Lenti gravitazionali

Caso generale



☆ La Galassia lente crea 4 immagini di un quasar distante

Lenti gravitazionali

Abell 2218



Lenti gravitazionali

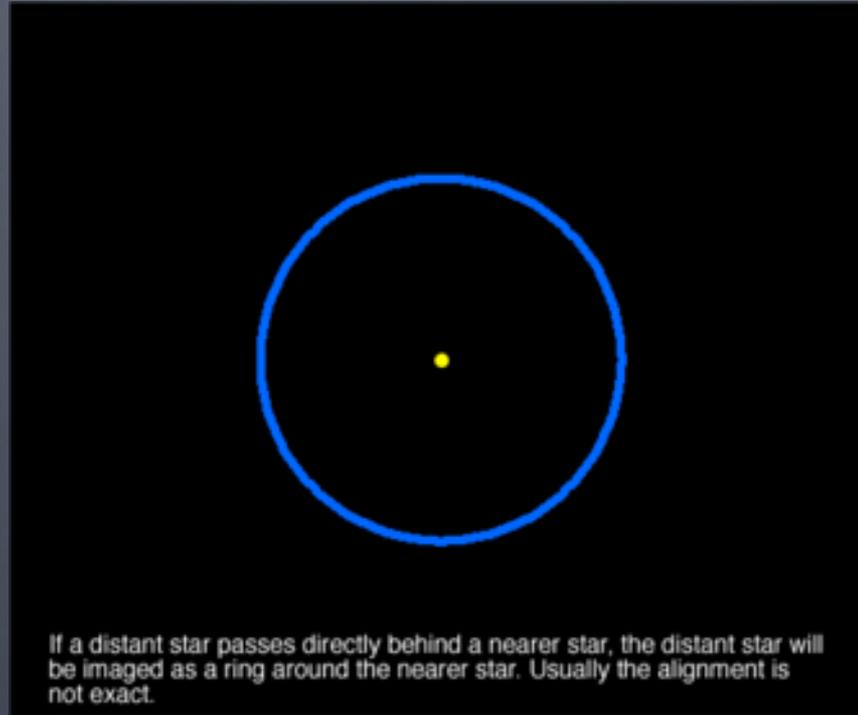
Effetto dovuto ad un buco nero

- ☆ Effetto di lente gravitazionale causato da un buco nero (lente).
- ☆ L'immagine di una galassia si vede sul fondo.
- ☆ L'ingradimento massimo avviene quando la galassia e il buco nero sono allineati.



Lenti gravitazionali

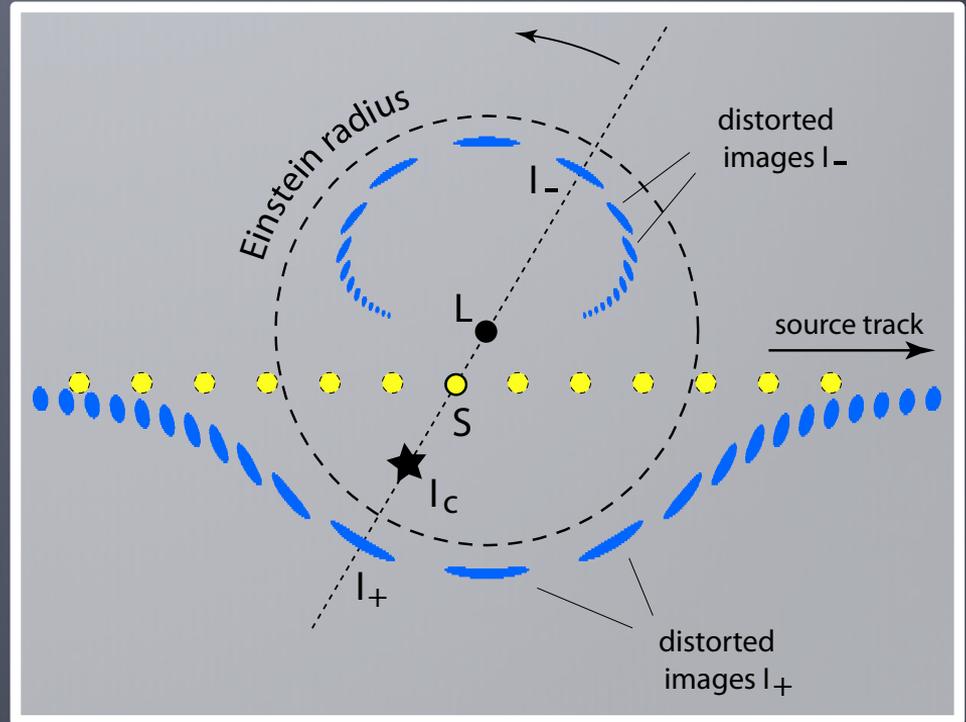
Importanza dell'allineamento sorgente-lente



Lenti gravitazionali

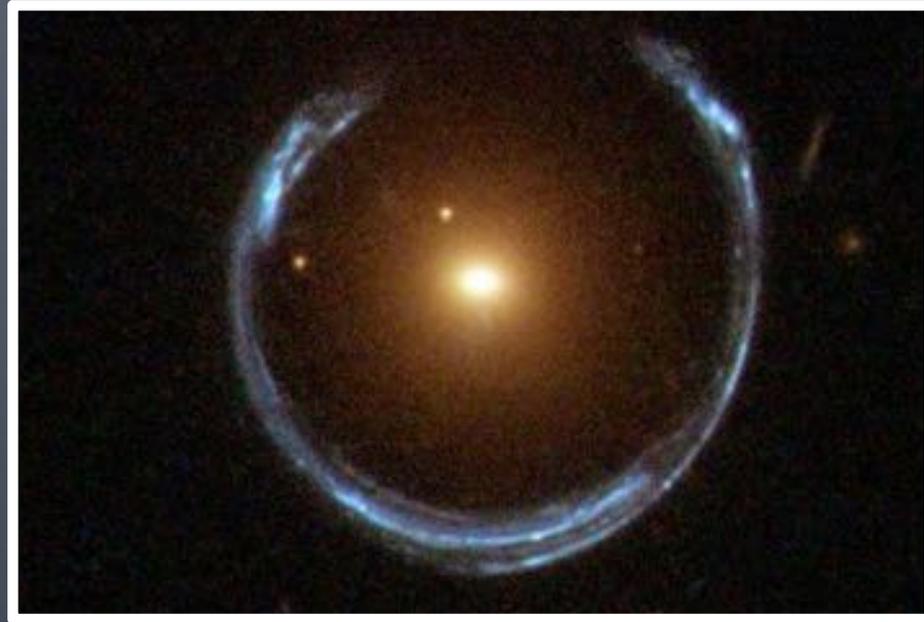
Importanza dell'allineamento sorgente-lente

- ☆ Sorgente e lente perfettamente allineate: l'immagine è distorta lungo l'**anello di Einstein**
- ☆ Sorgente e lente NON allineate: si creano 2 immagini distinte della sorgente I_+ e I_-



Lenti gravitazionali

Anello di Einstein



☆ Sorgente e lente perfettamente allineate: l'immagine è distorta lungo l'anello di Einstein

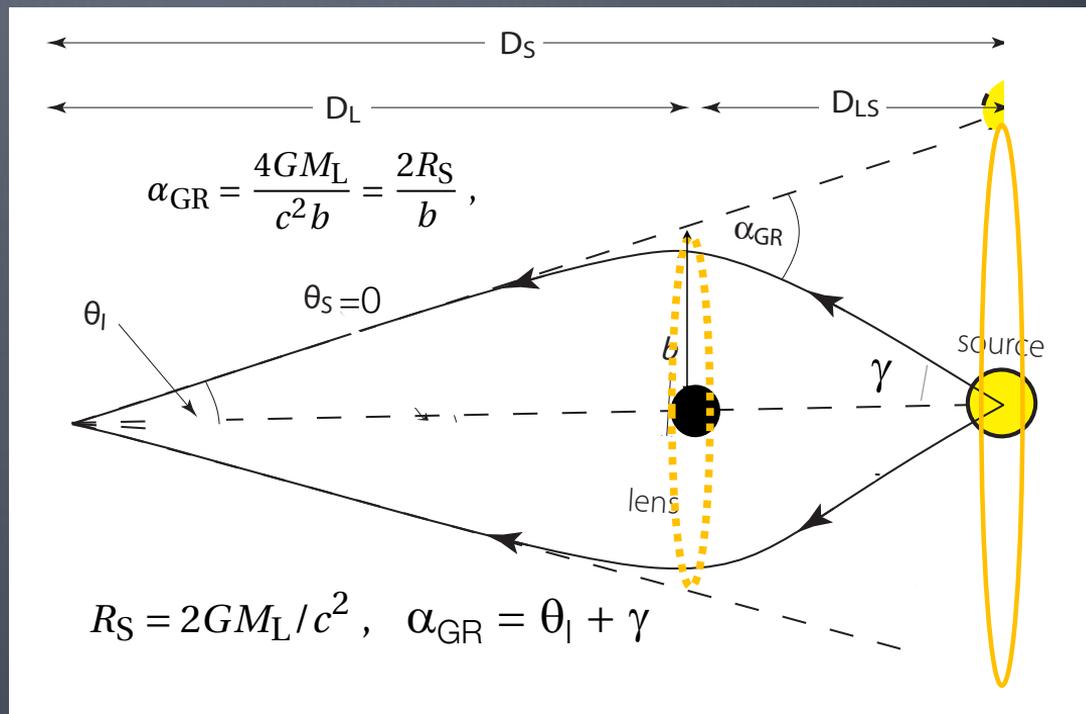
Lenti gravitazionali

Anello di Einstein: sorgente-lente sono allineate

$$\alpha_{\text{GR}} = \frac{4GM_{\text{L}}}{c^2 b} = \frac{2R_{\text{S}}}{b},$$

$$R_{\text{S}} = 2GM_{\text{L}}/c^2,$$

G is the gravitational constant,
 M is the mass of the lens,
 c is the speed of light,
 d_{L} is the angular diameter distance to the lens,
 d_{S} is the angular diameter distance to the source, and
 d_{LS} is the angular diameter distance between the lens and the source



Lenti gravitazionali

Anello di Einstein: sorgente-lente sono allineate

$$\theta_S = 0; \quad \theta_I = \theta_E$$

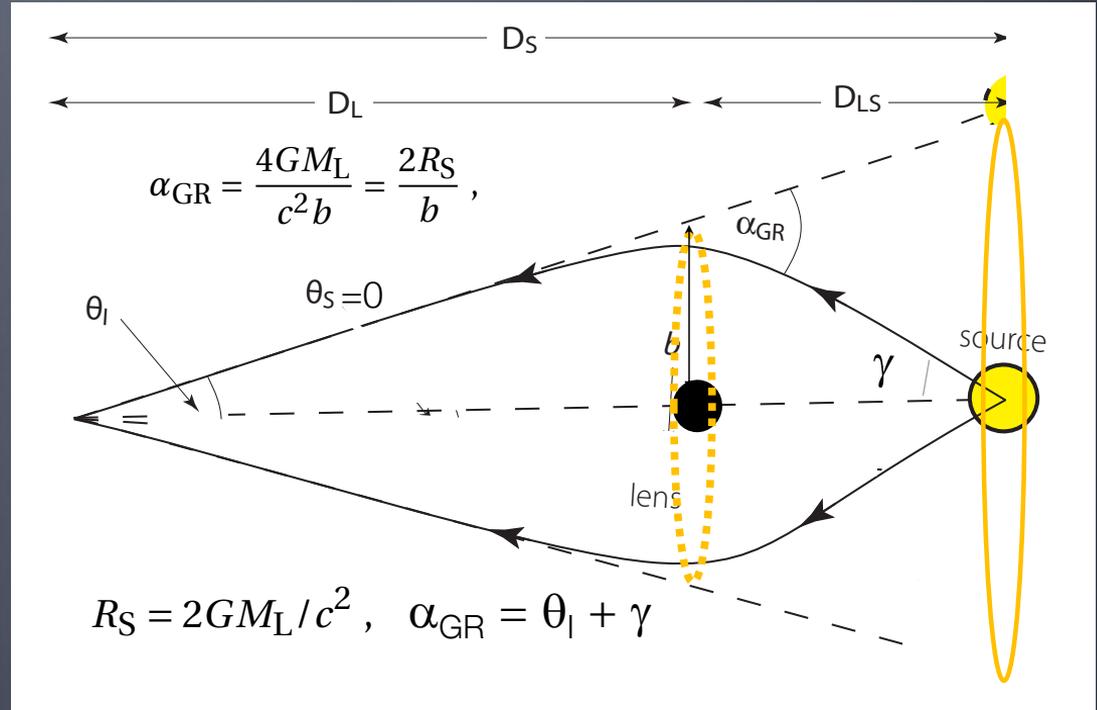
$$\alpha_{GR} = \theta_I + \gamma = \theta_E + \gamma$$

$$b = R_E$$

$$\theta_I = \theta_E = R_E / D_L$$

$$\gamma = R_E / D_{LS}$$

$$\alpha_{GR} = R_E / D_L + R_E / D_{LS}$$



Lenti gravitazionali

Anello di Einstein: sorgente-lente sono allineate

Raggio di Einstein

$$\theta_E = \left[2R_S \frac{D_{LS}}{D_L D_S} \right]^{1/2} = \left[\frac{4GM_L}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S} \right]^{1/2}$$

$$R_E = \theta_E D_L = \left[2R_S \frac{D_L D_{LS}}{D_S} \right]^{1/2} .$$



Lenti gravitazionali

Anello di Einstein: sorgente-lente sono allineate

Raggio di Einstein

$$\theta_E \simeq 1.0 \left(\frac{M_L}{M_\odot} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{D_L}{8 \text{ kpc}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{D_{LS}}{D_S} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ mas ,}$$
$$R_E \simeq 8.1 \left(\frac{M_L}{M_\odot} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{D_S}{8 \text{ kpc}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{D_L D_{LS}}{D_S} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ AU .}$$



Lenti gravitazionali

Anello di Einstein: sorgente-lente sono allineate

- ☆ Se $M = M_{\odot}$, $D_L = 4000$ parsecs e $D_S = 8000$ parsecs (tipico), $\theta_E = 0.001$ arcsec
- ☆ Osservazioni da terra hanno risoluzione angolare ~ 0.4 arcsec, 400 volte + grande.
- ☆ Visto che θ_E è così piccolo, non si osserva normalmente se non in caso di eventi estremi

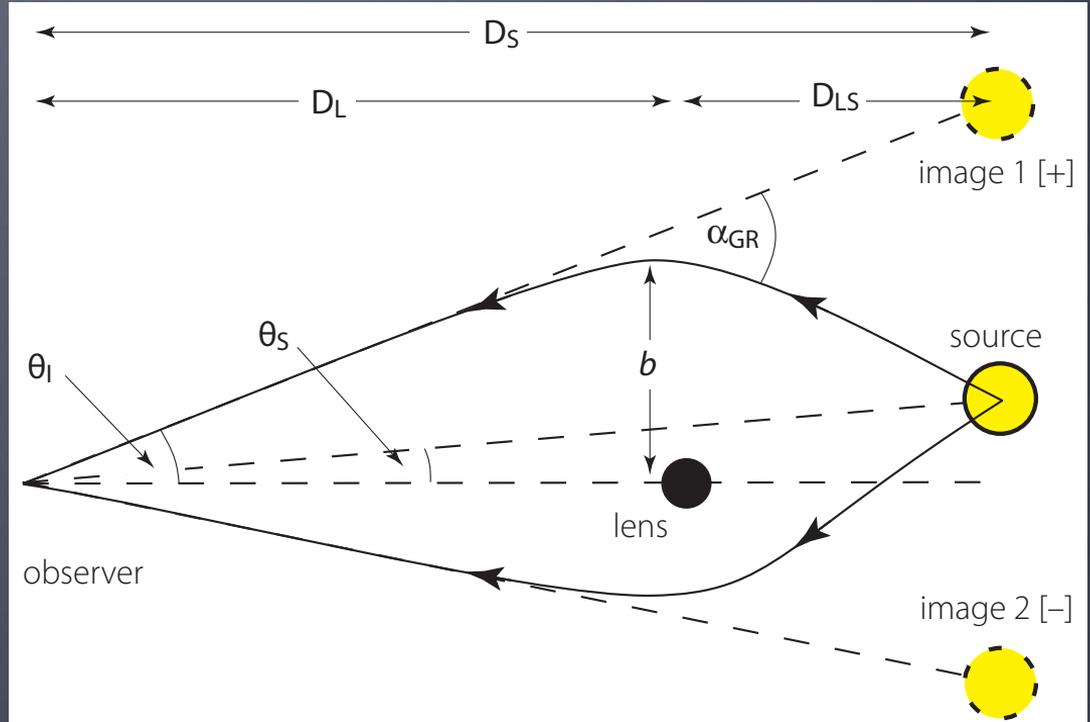


Lenti gravitazionali

Sorgente-lente NON sono allineate

$$\alpha_{\text{GR}} = \frac{4GM_{\text{L}}}{c^2 b} = \frac{2R_{\text{S}}}{b},$$

$$R_{\text{S}} = 2GM_{\text{L}}/c^2,$$



Equazione di una lente

Sorgente-lente NON sono allineate

$$\theta_I^2 - \theta_S \theta_I - \theta_E^2 = 0 .$$

☆ L'equazione ha 2 soluzioni, cioè ci sono 2 immagini della sorgente.

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

☆ La separazione angolare tra le 2 immagini è $\Delta\theta$

$$\Delta\theta \equiv \theta_+ - \theta_- = \sqrt{\theta_S^2 + 4\theta_E^2} .$$

Micro lente gravitazionale

Lente singola

- ☆ Durante un evento la sorgente è amplificata di un fattore **A**.
- ☆ **A** dipende dall'allineamento osservatore, lente, sorgente
- ☆ **u** : separazione angolare tra lente e sorgente, θ_s , diviso θ_E

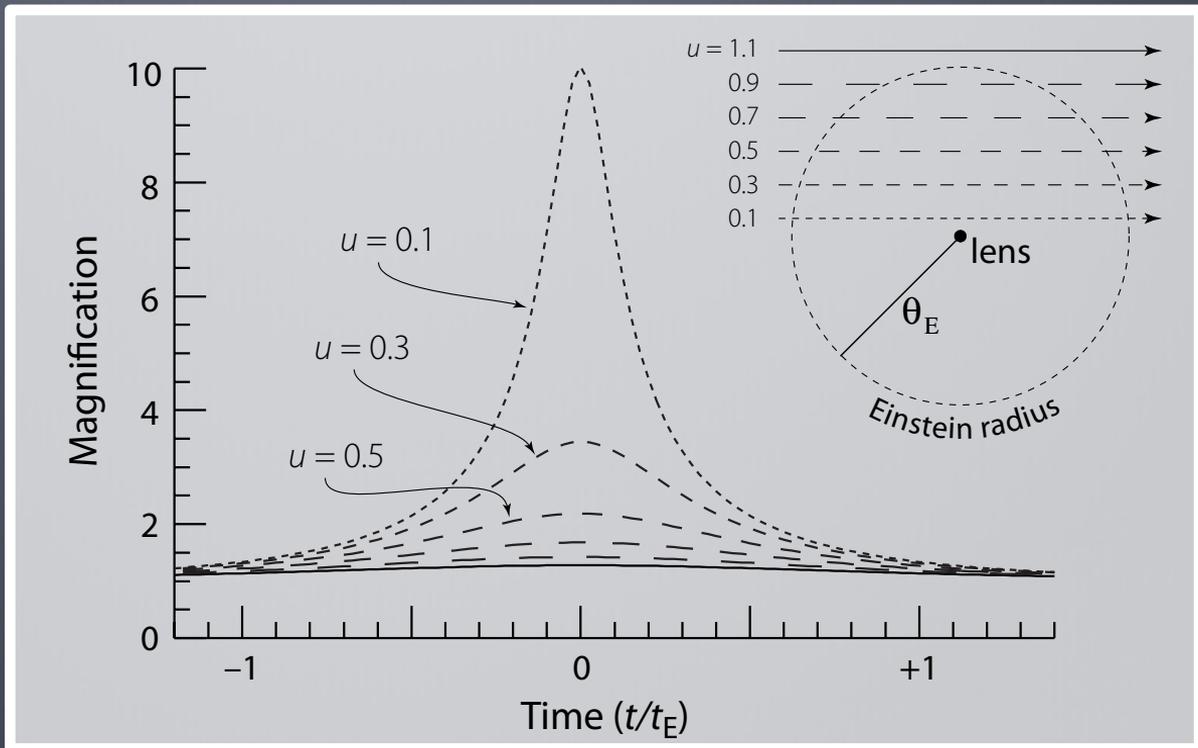
$$u \equiv \frac{\theta_s}{\theta_E},$$

$$A_{\pm} = \frac{1}{2} \left(\frac{u^2 + 2}{u \sqrt{(u^2 + 4)}} \pm 1 \right),$$

Micro lente gravitazionale

Lente singola

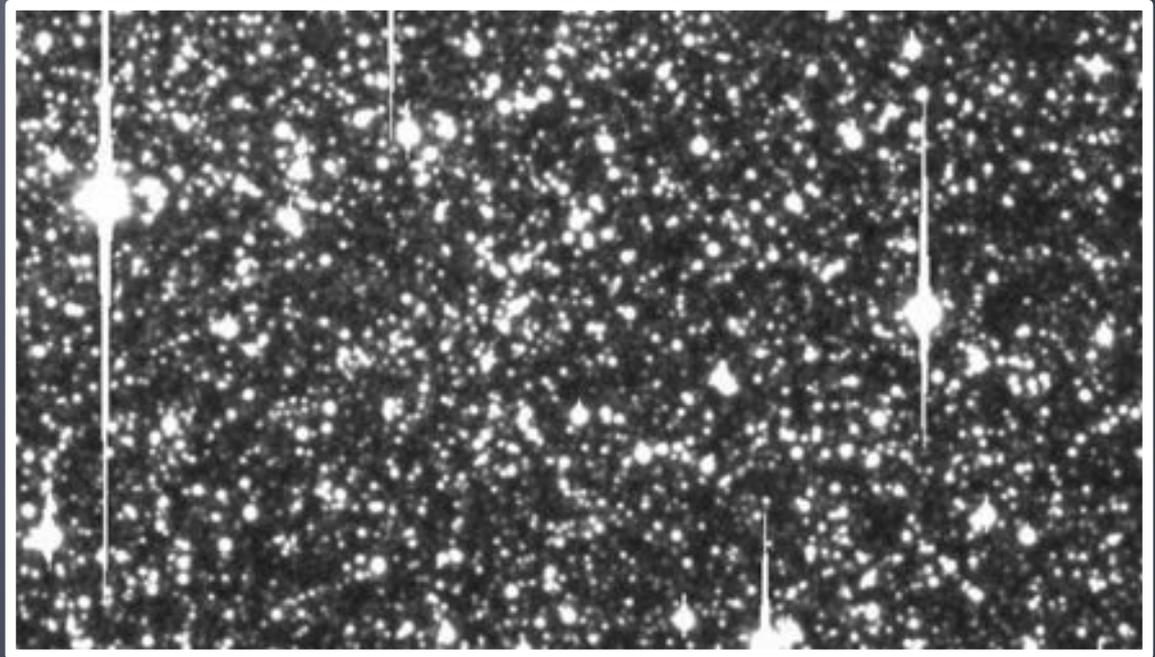
$$u \equiv \frac{\theta_S}{\theta_E},$$



Micro lente gravitazionale

Lente singola

- ☆ **A > 100** sono eventi rari, (alcuni all'anno)
- ☆ Per aumentare la probabilità, si puntano i telescopi verso il centro della galassia, dove c'è più densità stellare



Micro lente gravitazionale

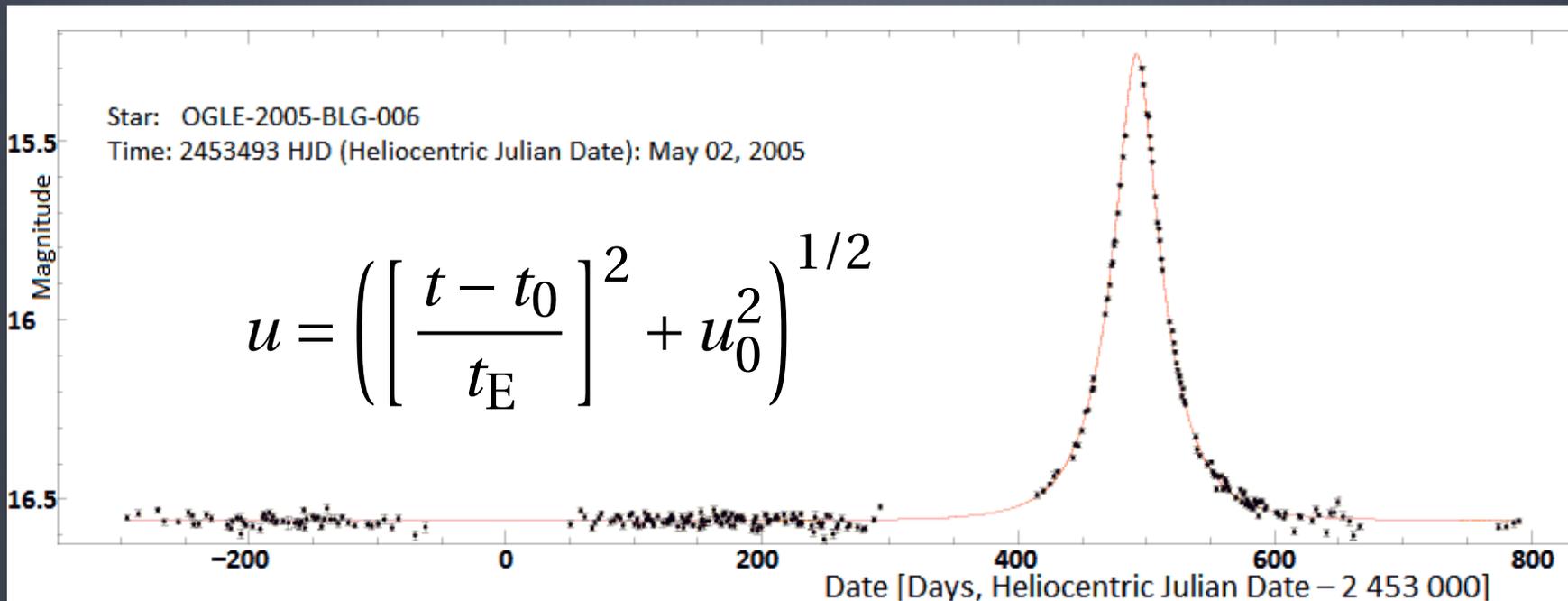
Lente singola: 3 parametri

- ☆ Il tempo per attraversare l'anello di Einstein: t_E
- ☆ Il tempo t_0 (dove u è minimo e A è massimo)
- ☆ La separazione minima u_0

$$u = \left(\left[\frac{t - t_0}{t_E} \right]^2 + u_0^2 \right)^{1/2}$$

Micro lente gravitazionale

Durata dell'evento per una lente stellare



Microlente gravitazionale

Durata dell'evento per una lente stellare

$$t_E = R_E / v_{\perp} \simeq 70 \left(\frac{M_L}{M_{\odot}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{D_S}{8 \text{ kpc}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{D_L D_{LS}}{D_S} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{v_{\perp}}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-1} \text{ days .}$$

☆ Per una sorgente a 8 kpc, una lente di massa solare a 4 kpc, t_E è ~ 35 giorni

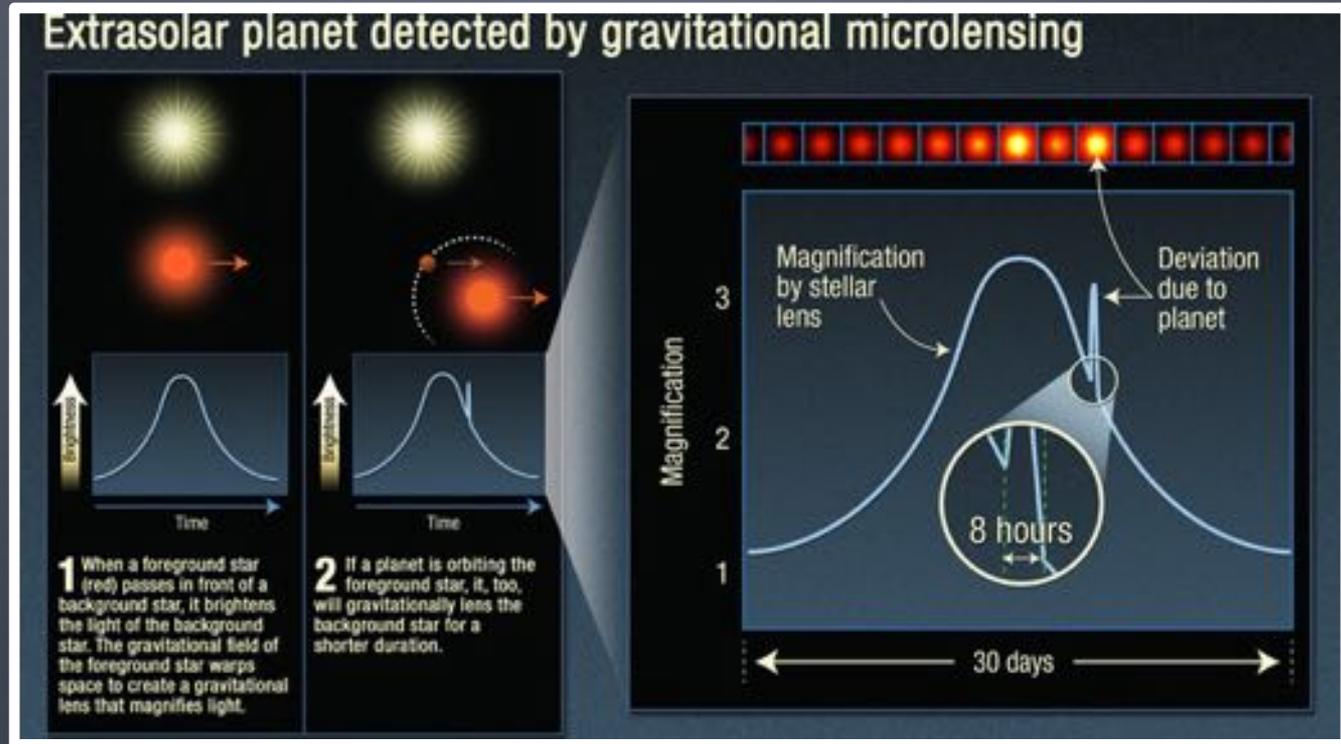
Micro lente gravitazionale

Lente binaria: 6 parametri

- ☆ Il tempo per attraversare l'anello di Einstein: t_E
- ☆ Il tempo t_0 (dove \mathbf{u} è minimo e \mathbf{A} è massimo)
- ☆ La separazione minima u_0
- ☆ Il rapporto di massa delle 2 lenti: $q = M_p/M_*$
- ☆ La distanza (in proiezione) stella pianeta durante l'evento: $d = a/R_E$
- ☆ L'angolo tra la sorgente e la traiettoria della binaria α

Micro lente gravitazionale

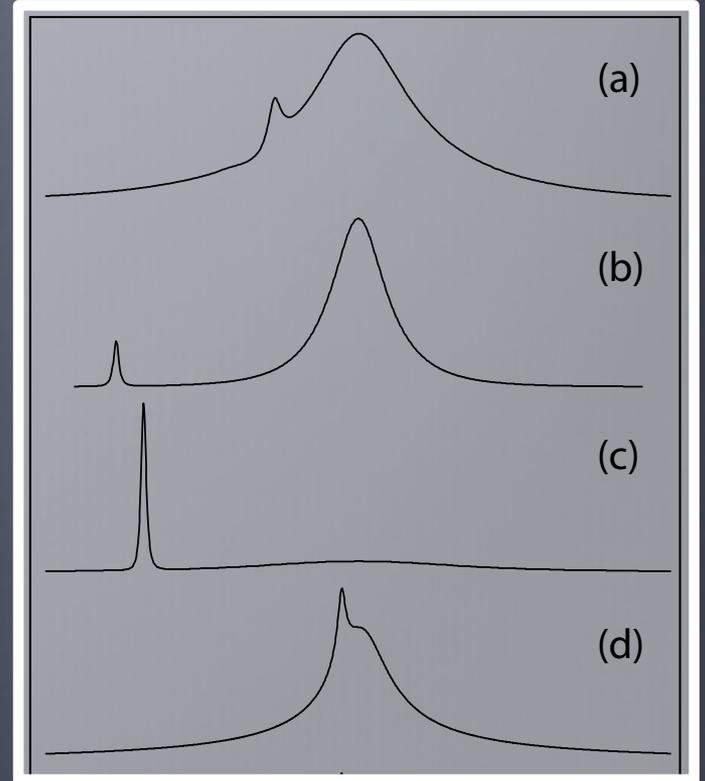
Lente binaria: stella con pianeta



Curve di luce

Lente binaria: stella con pianeta

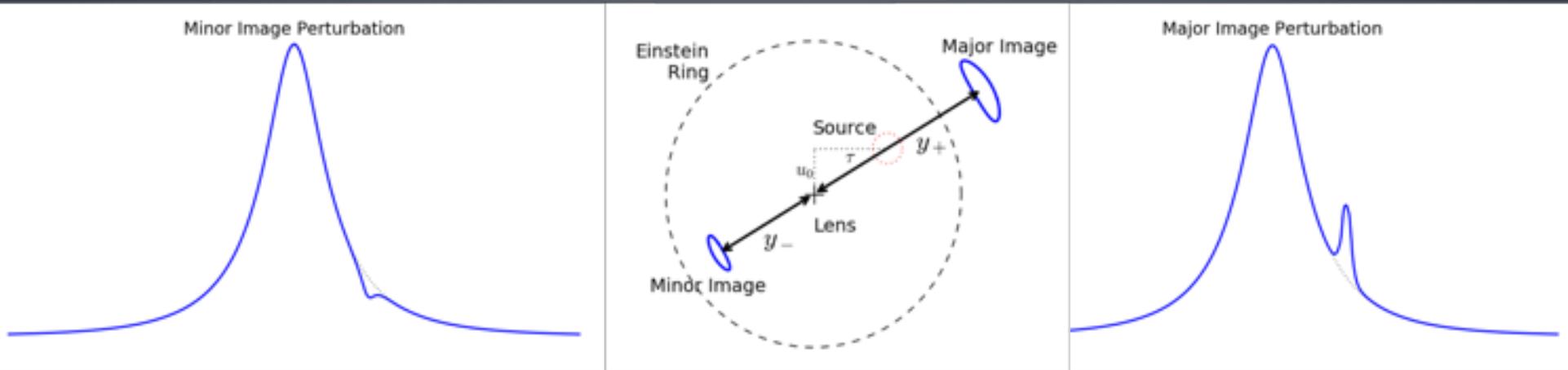
- a) Distanza $d \sim R_E$
- b) Distanza $d \gg R_E$
- c) Come b)
- d) $d \ll R_E$



Curve di luce

Lente binaria: stella con pianeta

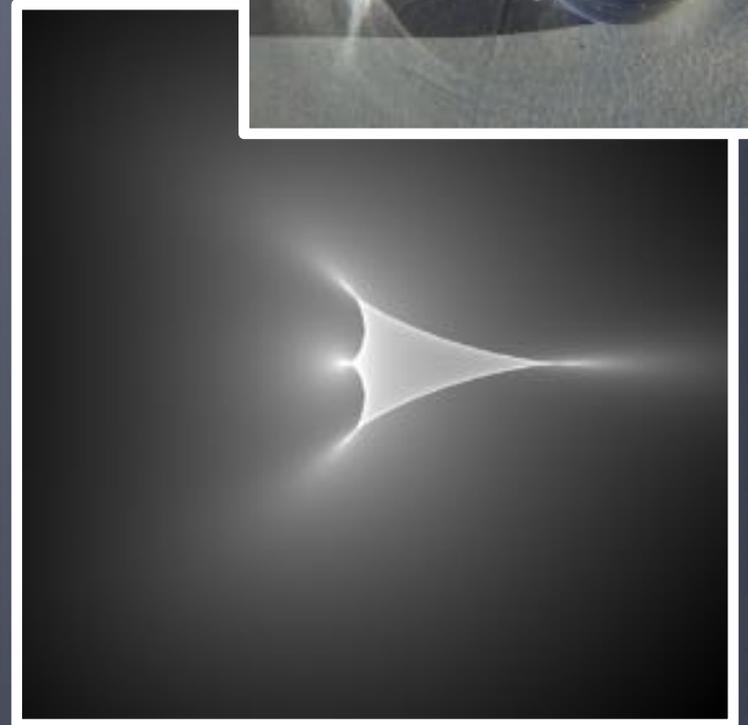
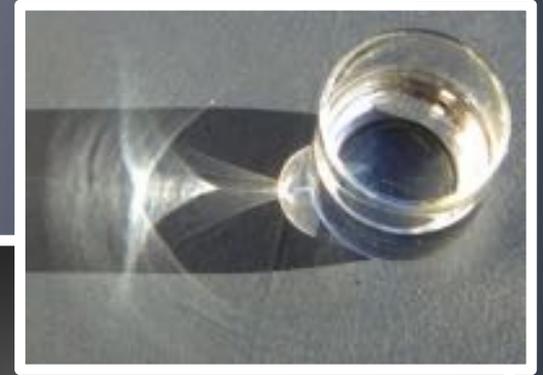
- ☆ Se il pianeta perturba l'immagine minore, l'ampiezza diminuisce
- ☆ L'ampiezza aumenta se il pianeta perturba l'immagine maggiore



Caustiche

Caso generale

- ☆ Le caustiche sono soluzioni dell'equazione di una lente per cui l'ampiezza \rightarrow infinito.
- ☆ Per una lente singola, la caustica è un punto singolo a $u=0$.
- ☆ Per lenti binarie, la caustica è una curva complessa



Caustiche

Lenti binarie: cuspidi e flessi

cuspid

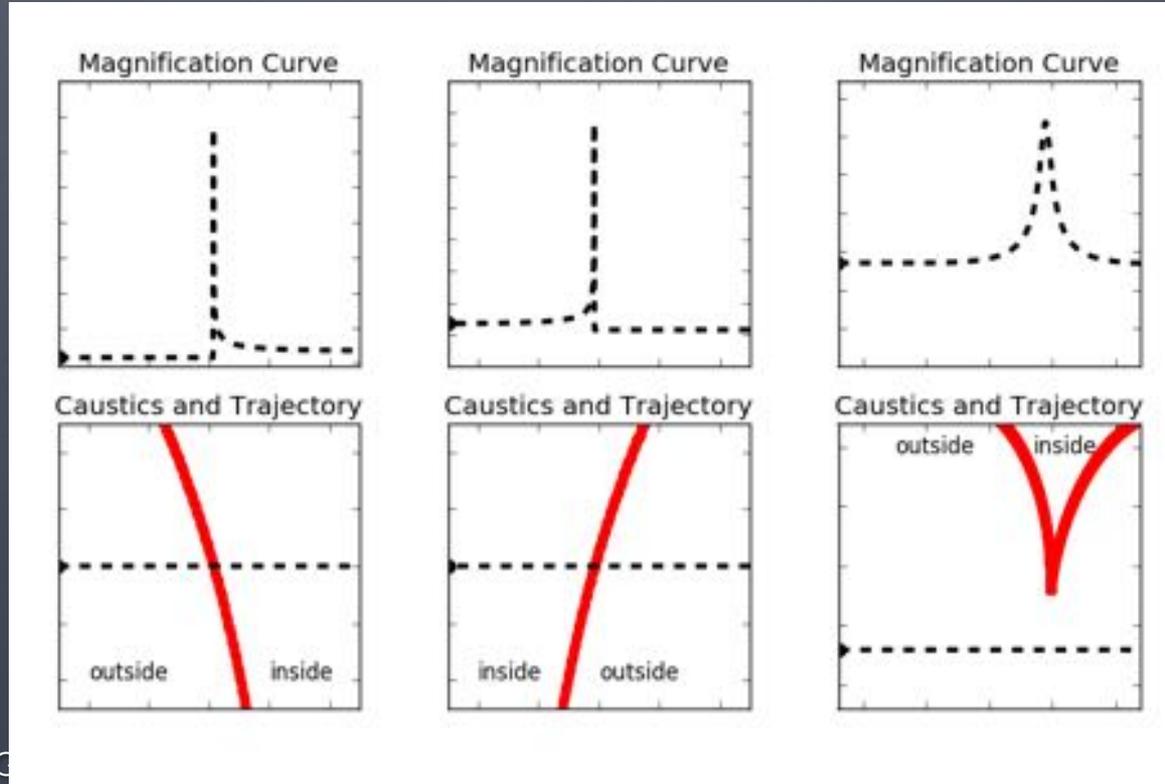
fold

outside

inside

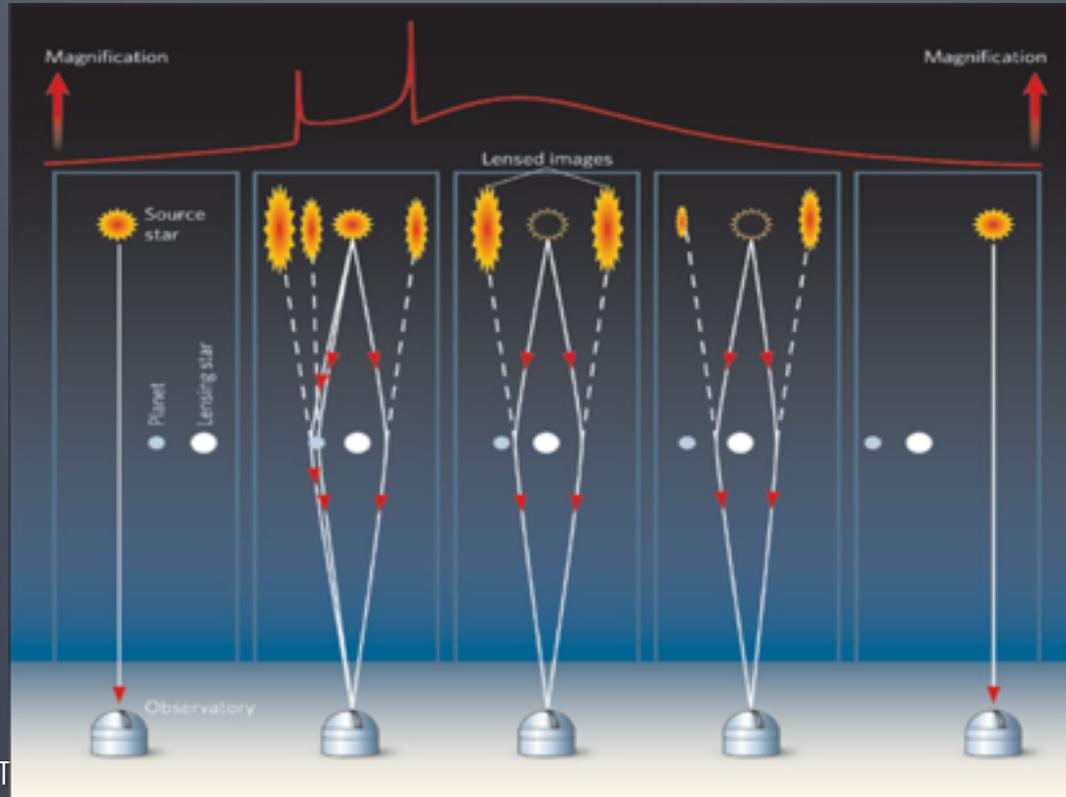
Caustiche e traiettorie

Lenti binarie



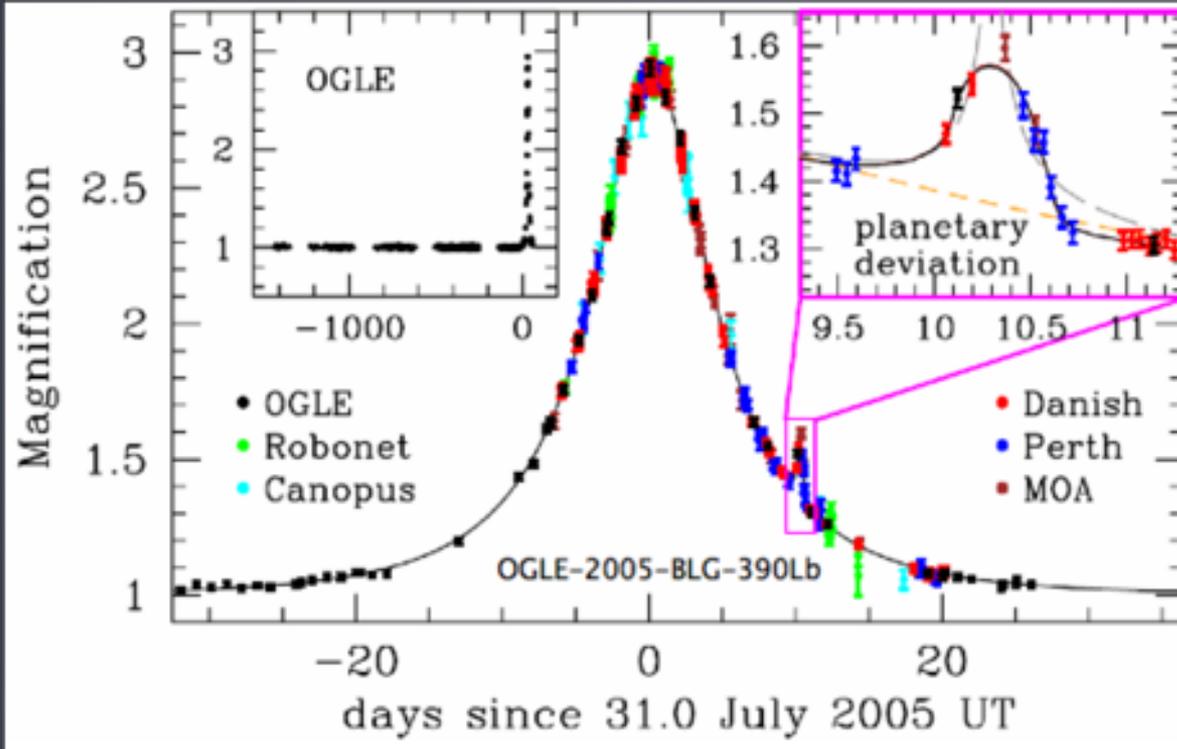
Caustiche e traiettorie

Esempio stella pianeta



Pianeta scoperto

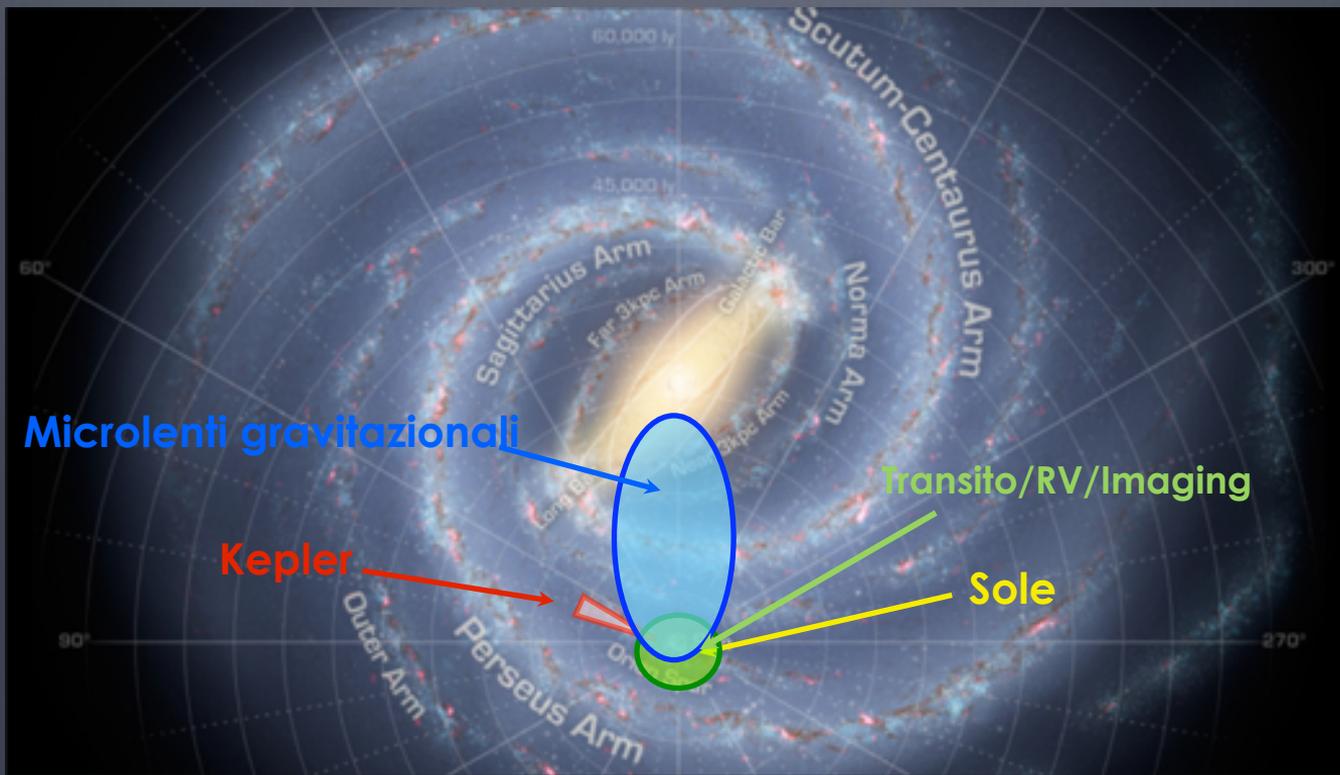
Con tecnica microlenti gravitazionali



Super-terra fredda (~ 50K)

Dove sono gli esopianeti?

Mappa pianeti scoperti nella nostra galassia



Statistica

Metodo microlenti gravitazionali

LETTER

doi:10.1038/nature10684

One or more bound planets per Milky Way star from microlensing observations

A. Cassan^{1,2,3}, D. Kubas^{1,2,4}, J.-P. Beaulieu^{1,2,25}, M. Dominik^{1,5}, K. Horne^{1,5}, J. Greenhill^{1,6}, J. Wambsganss^{1,3}, J. Menzies^{1,7}, A. Williams^{1,8}, U. G. Jørgensen^{1,9}, A. Udalski^{10,11}, D. P. Bennett^{1,12}, M. D. Albrow^{1,13}, V. Batista^{1,2}, S. Brilliand^{1,4}, J. A. R. Caldwell^{1,14}, A. Cole^{1,6}, Ch. Coutures^{1,2}, K. H. Cook^{1,15}, S. Dieters^{1,6}, D. Dominis Prester^{1,16}, J. Donatowicz^{1,17}, P. Fouqué^{1,18}, K. Hill^{1,6}, N. Kains^{1,19}, S. Kane^{1,20}, J.-B. Marquette^{1,2}, R. Martin^{1,8}, K. R. Pollard^{1,13}, K. C. Sahu^{1,14}, C. Vinter^{1,9}, D. Warren^{1,6}, B. Watson^{1,6}, M. Zub^{1,3}, T. Sumi^{21,22}, M. K. Szymański^{10,11}, M. Kubiak^{10,11}, R. Poleski^{10,11}, I. Soszynski^{10,11}, K. Ulaczyk^{10,11}, G. Pietrzyński^{10,11,23} & Ł. Wyrzykowski^{10,11,24}

“Pianeti” senza stella

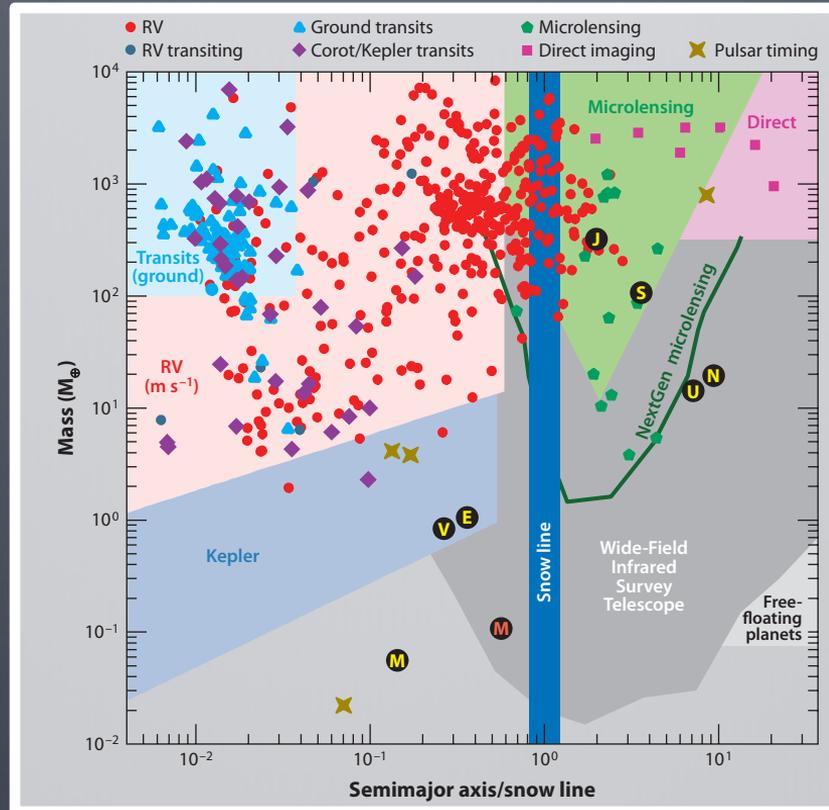
Scoperti con il metodo delle microlenti gravitazionali



Image credit: NASA-JPL

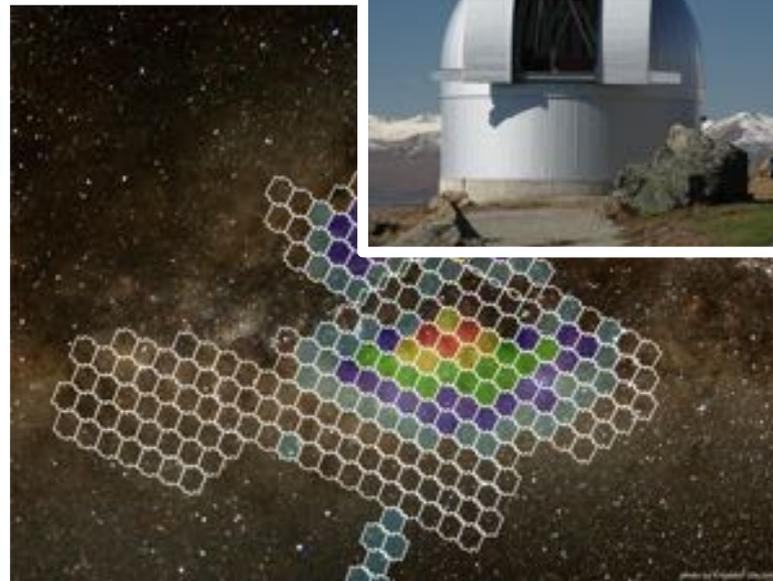
Spazio dei parametri

Metodo microlenti gravitazionali



Strumenti da terra

Reti di telescopi da terra: e.g. MOA, OGLE



ESA Euclid e NASA WFIRST

Telescopi futuri utili per studio di pianeti con microlensing

