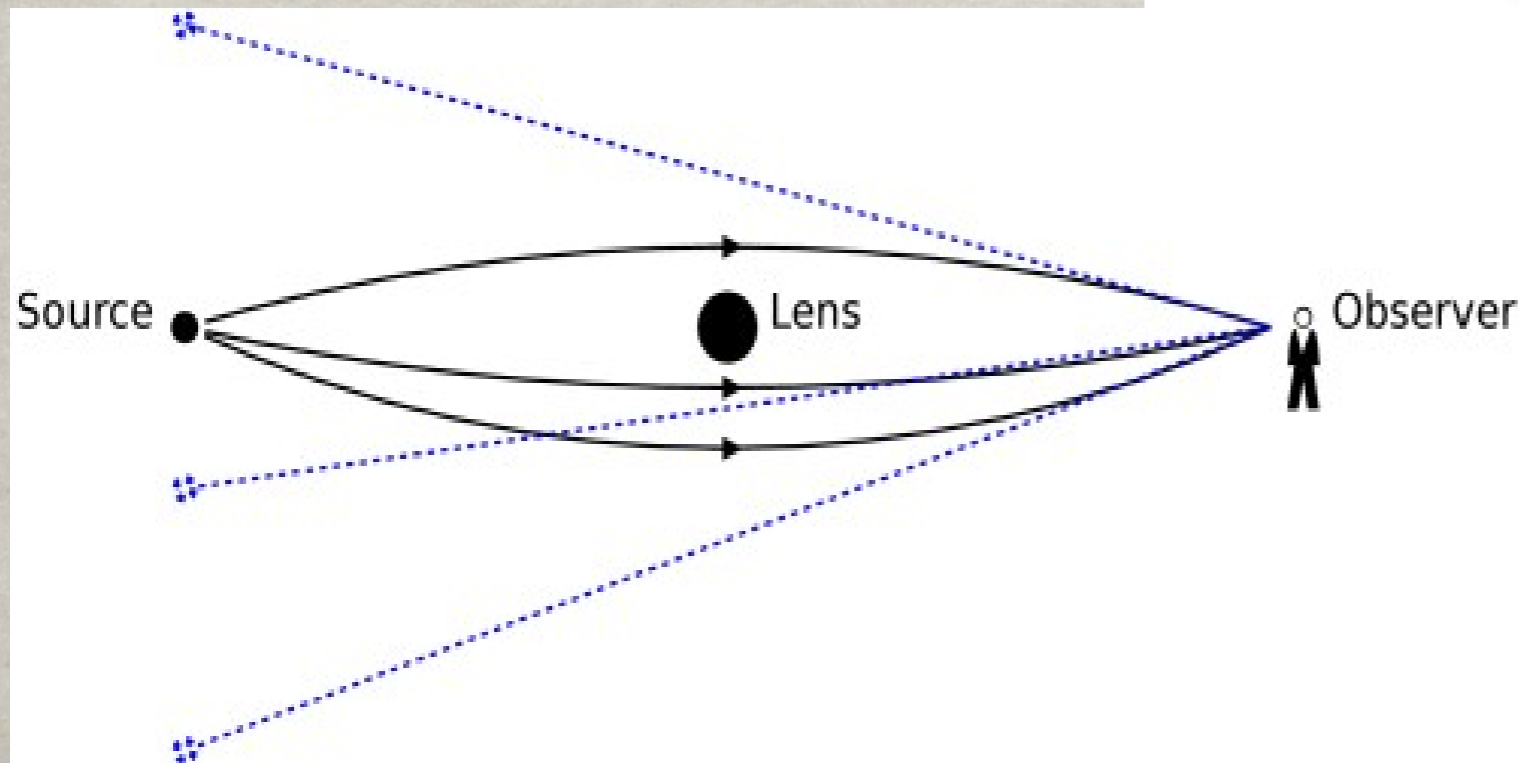
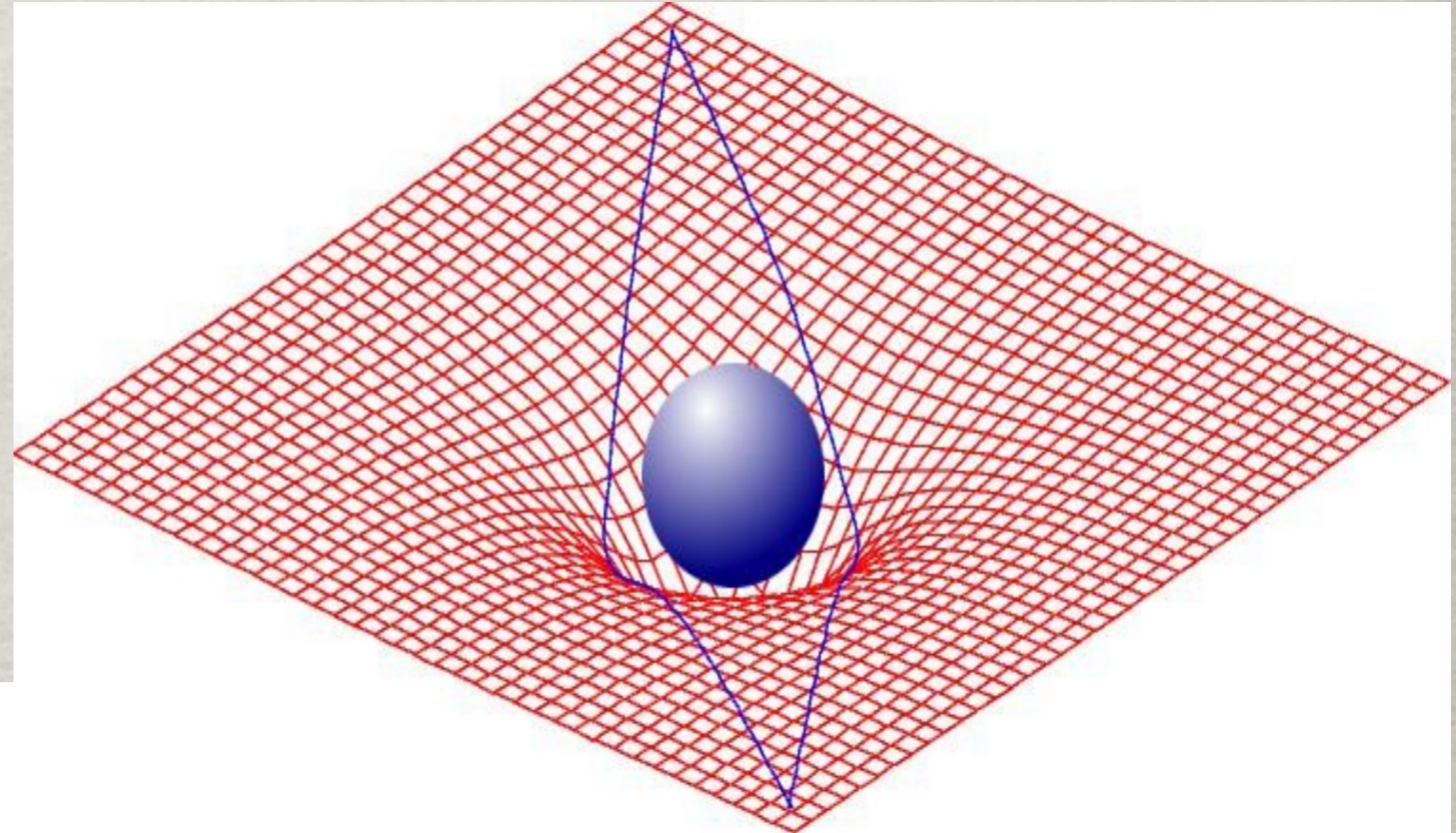


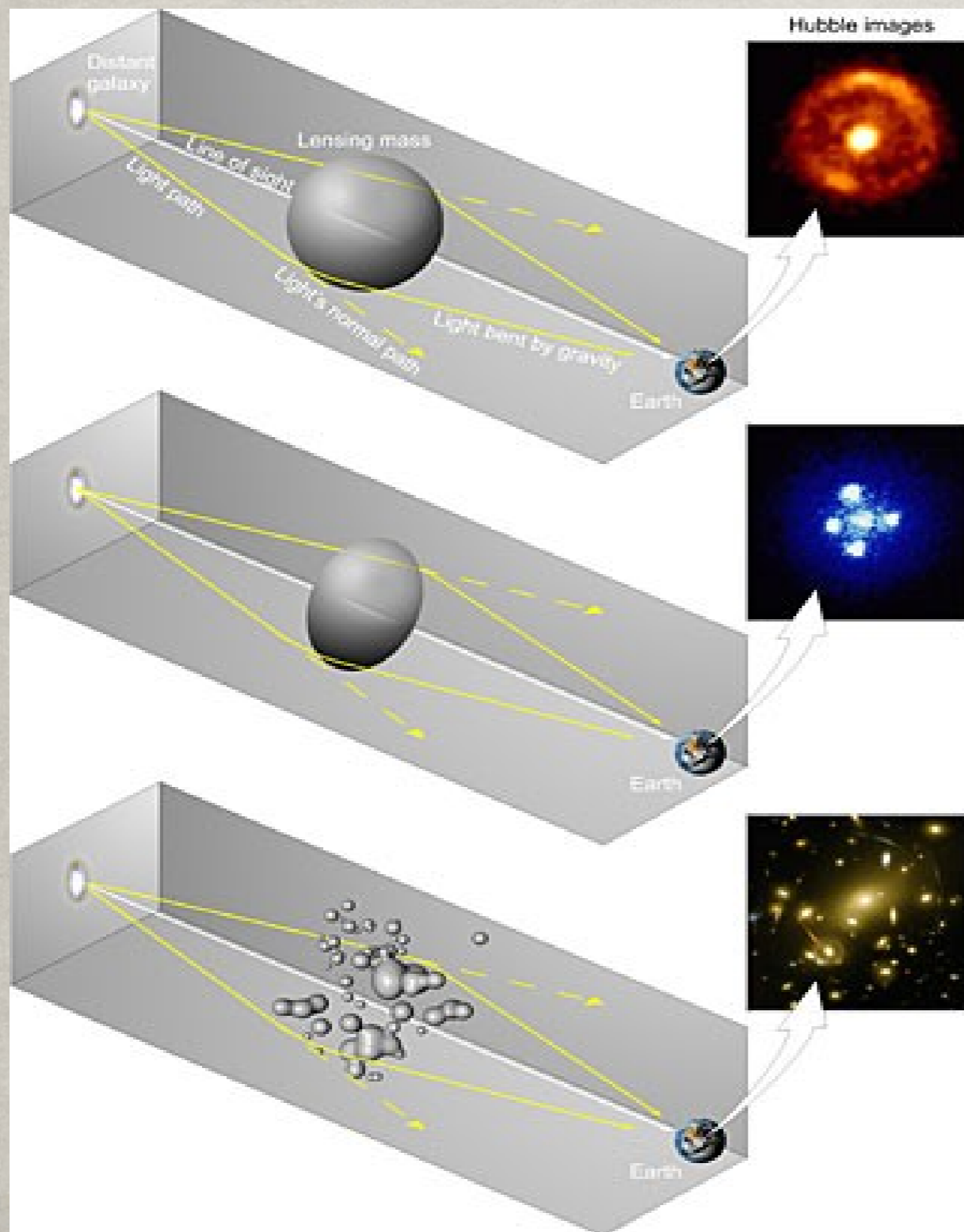
Lentes Gravitacionais

Introdução

“Deformação” da trajetória da luz pelo espaço-tempo curvo.



Lenteamento Forte

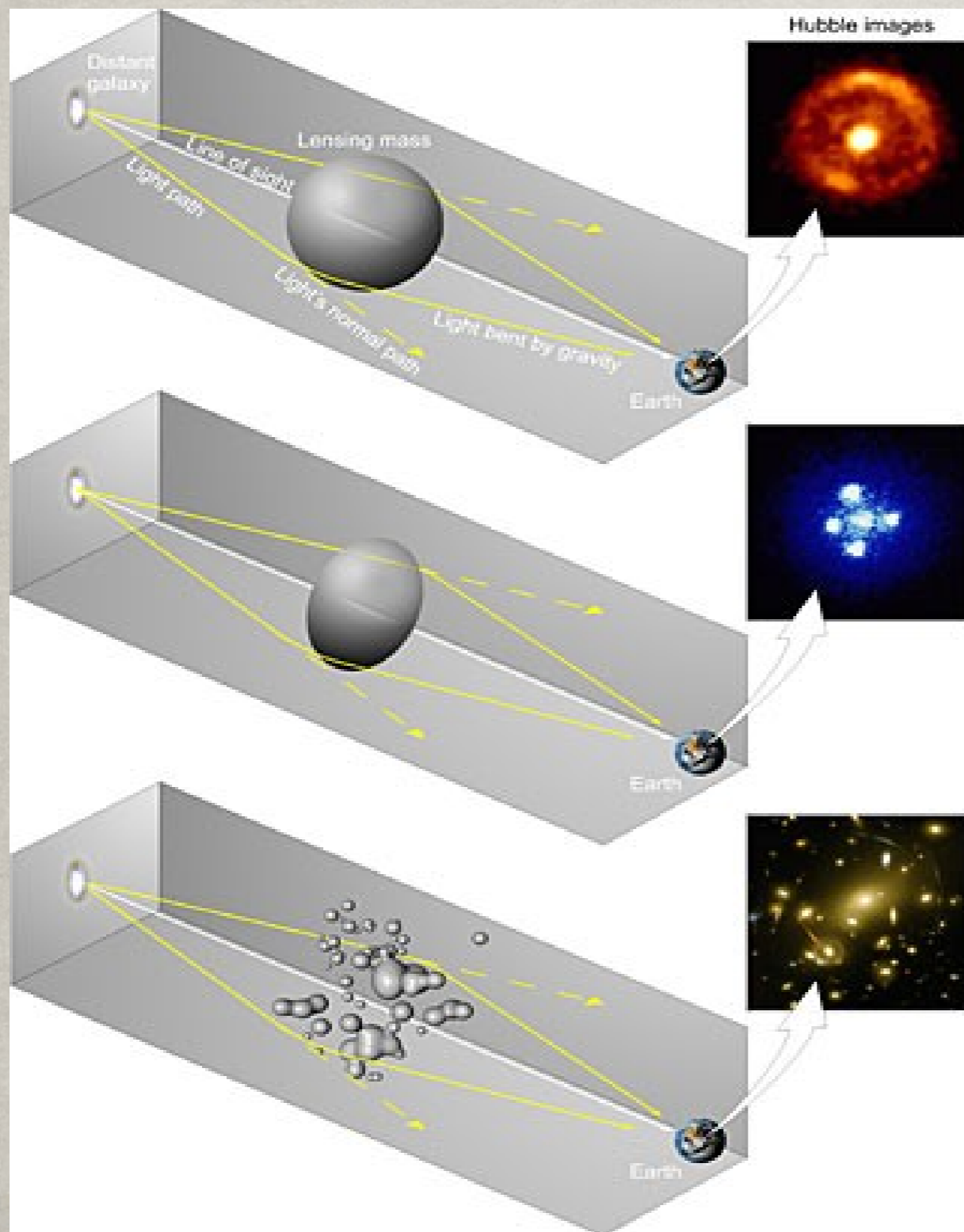


Grande distorções e
magnificações



- Arcos
- Anel de Einstein

Lenteamento Forte

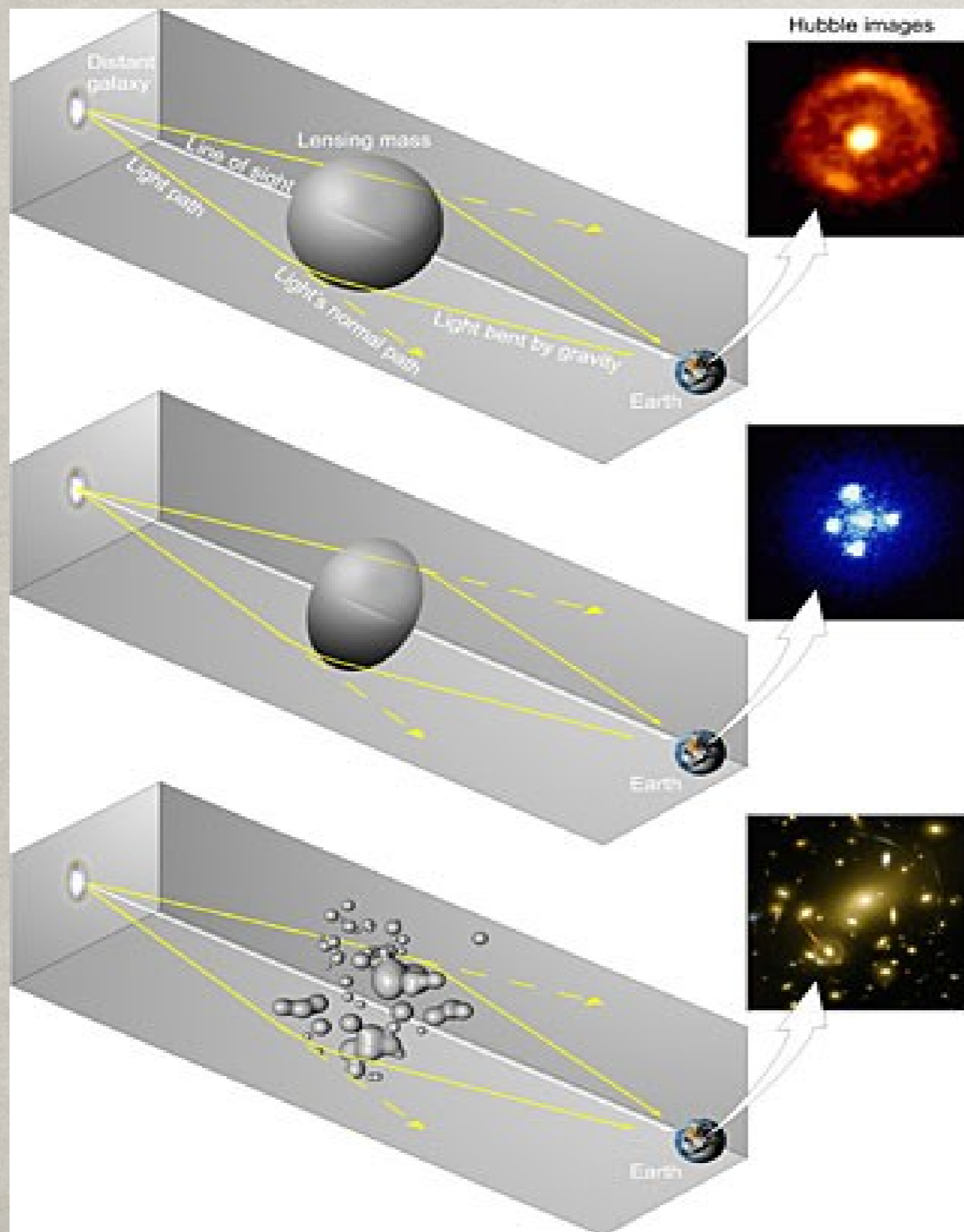


Grande distorções e magnificações



- Imagens múltiplas de um quasar

Lenteamento Forte

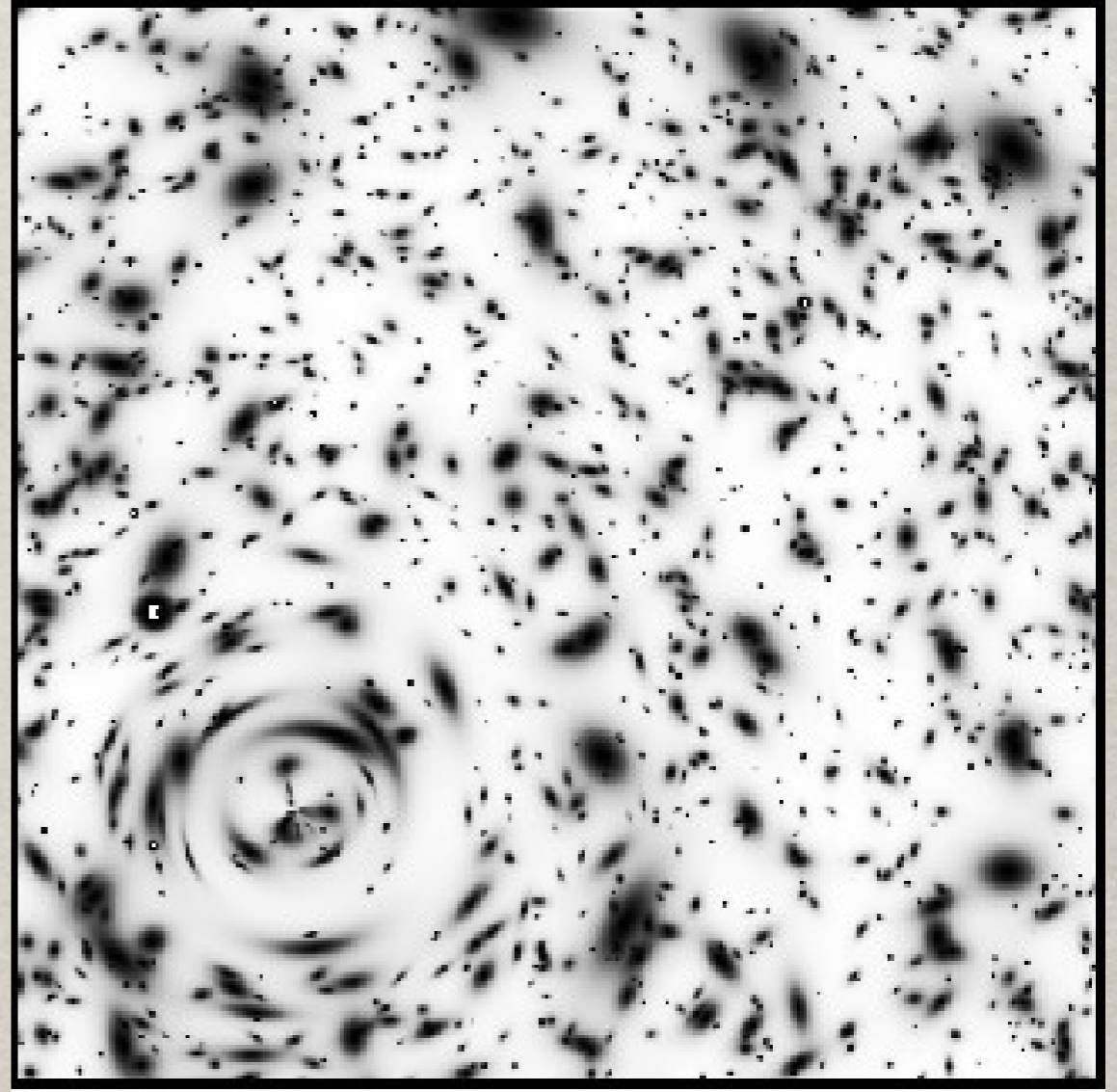
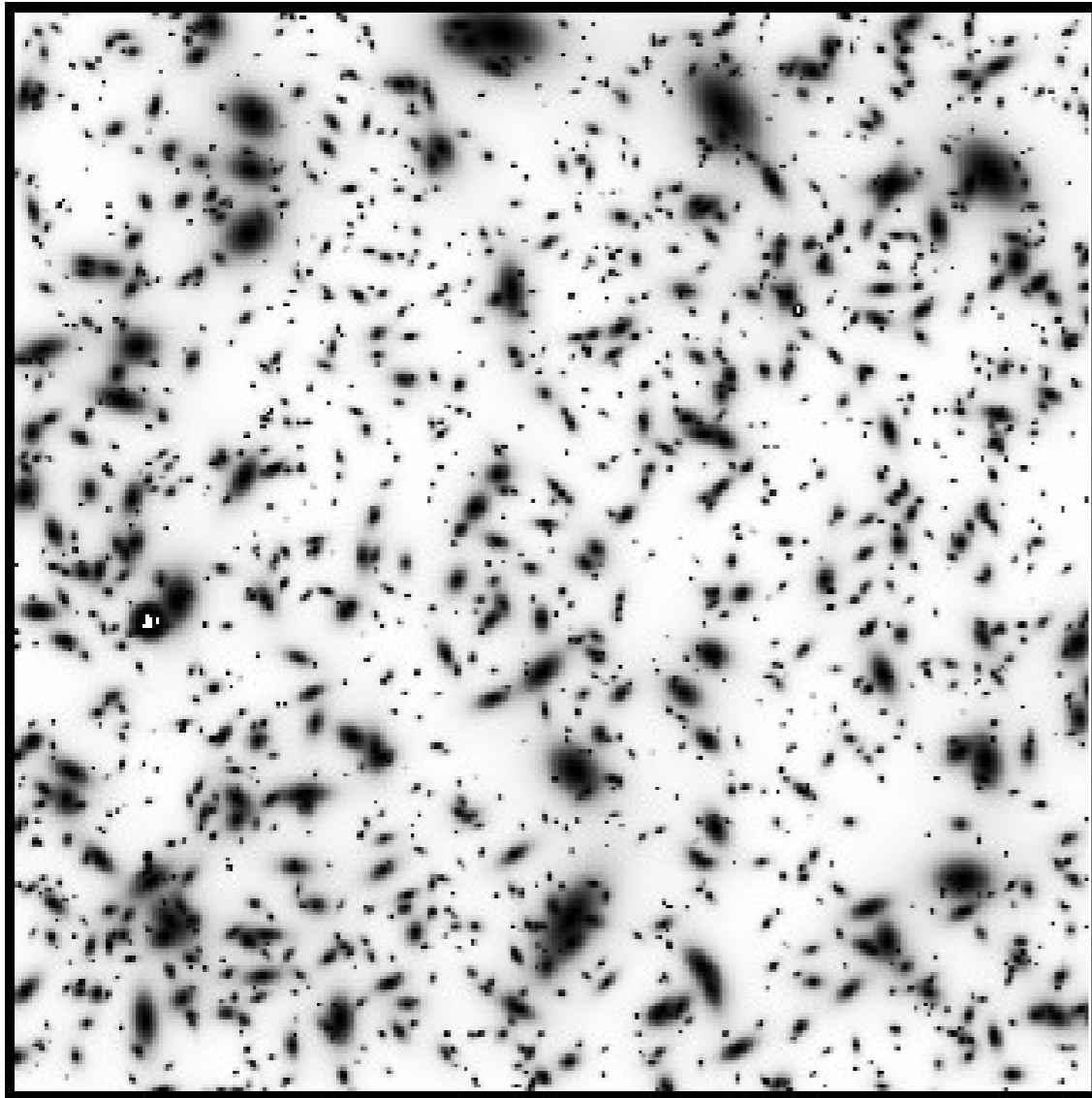


Grande distorções e magnificações



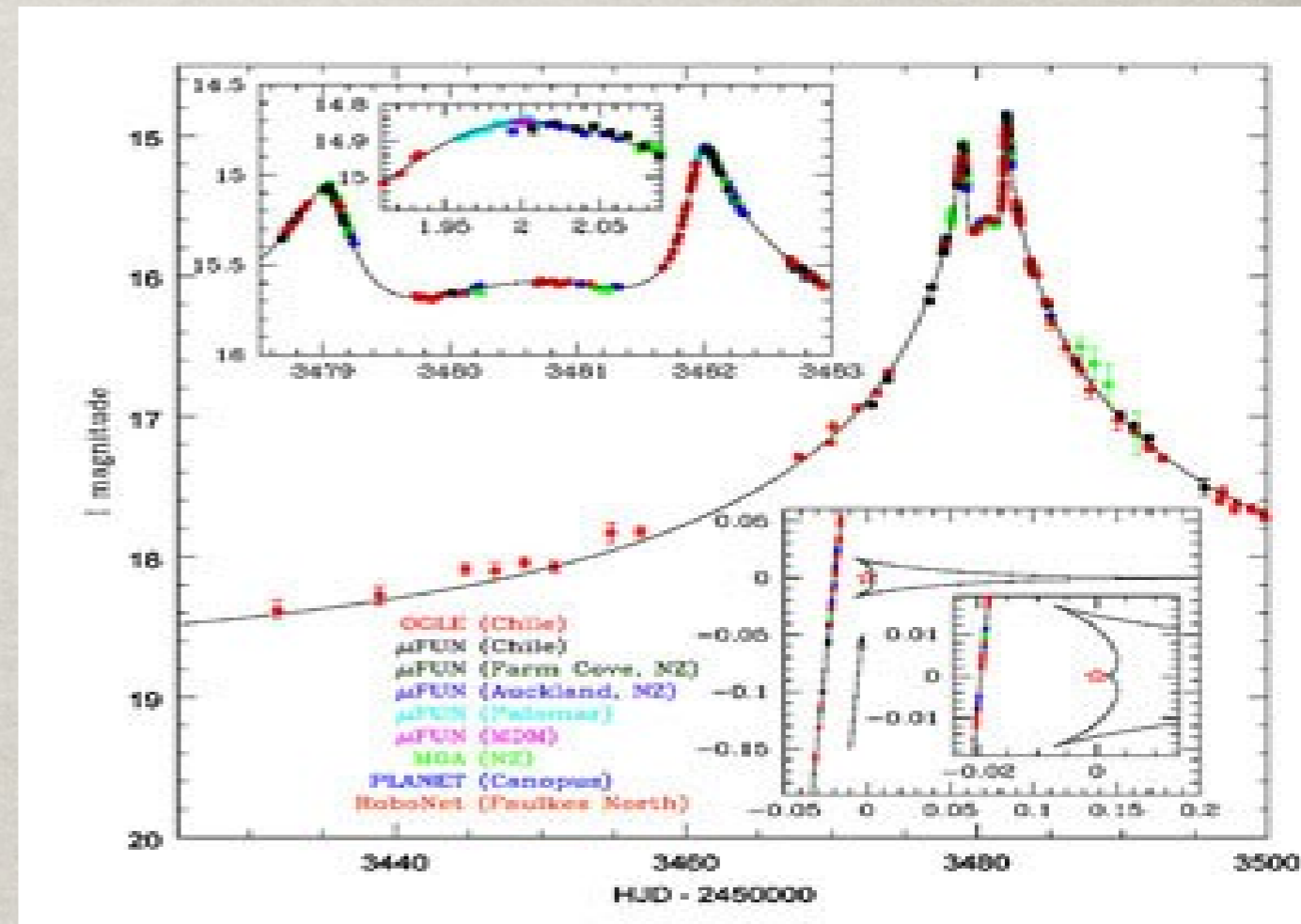
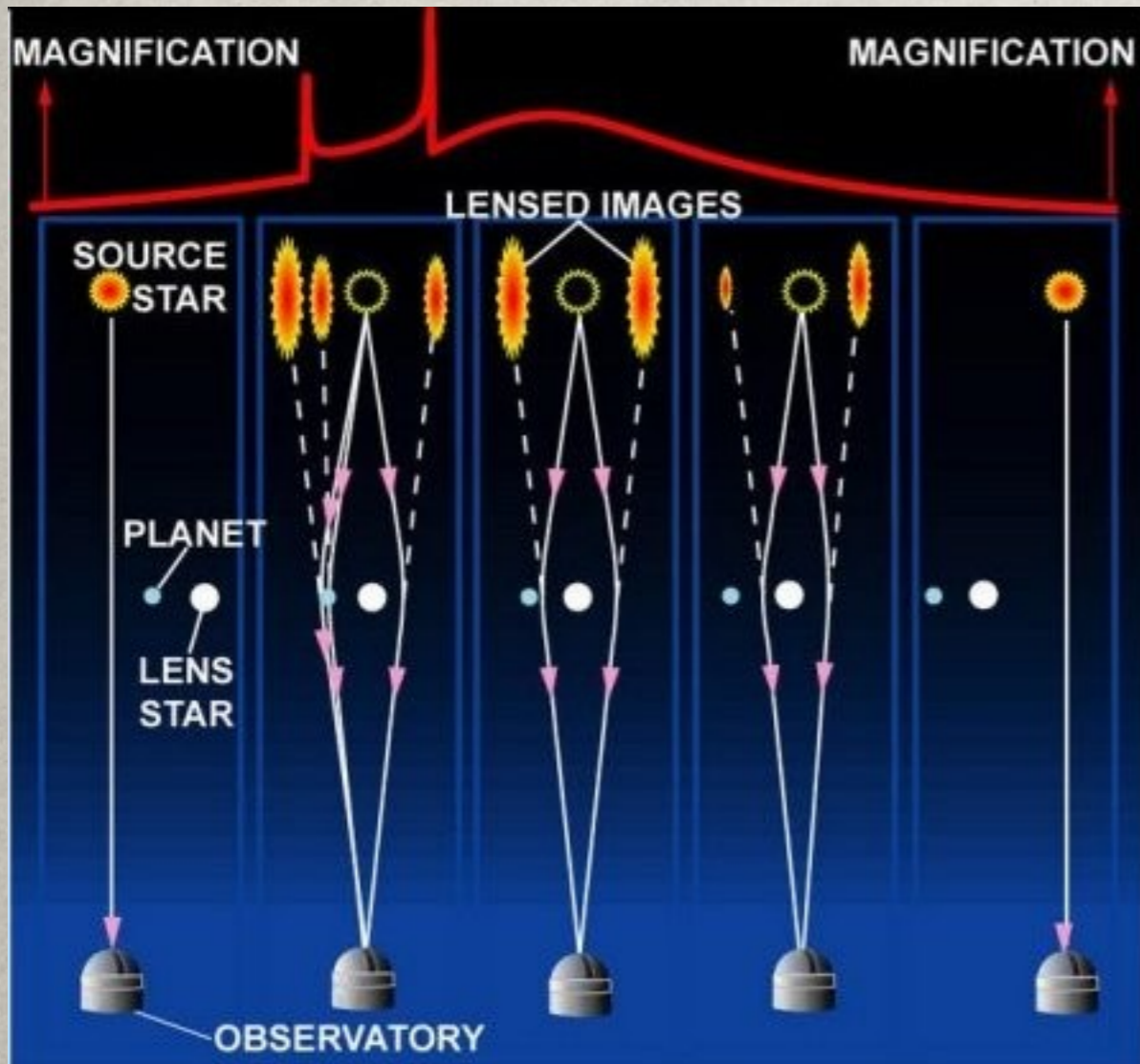
- Arcos

Lenteamento Fraco



Pequenas distorções e magnificações

Microlenteamento



Detecção de planetas

Histórico da deflexão da luz

- Suspeitada por Newton, Laplace, ...
- John Mitchell (1784): em carta a Cavendish menciona deflexão da luz pela força gravitacional
- Johan Solden (1804): primeira publicação do cálculo do ângulo de deflexão (Newtoniano)

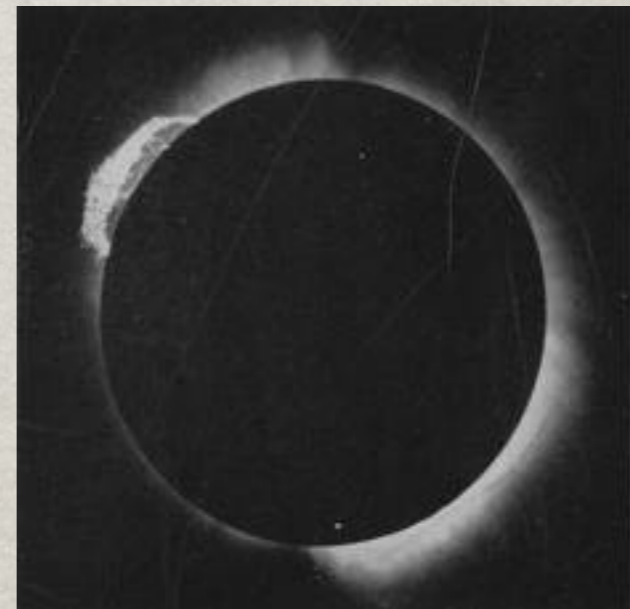
$$\hat{\alpha} = \frac{2GM}{c^2 \xi}$$

- Einstein (1911): cálculo via Princípio da Equivalência
- Einstein (1915): cálculo via Relatividade Geral (a curvatura do espaço-tempo altera a propagação da luz)

$$\hat{\alpha} = \frac{4GM}{c^2 \xi}$$

Histórico da deflexão da luz

- 1919: observação da deflexão da luz (em Sobral – CE e Ilha do Príncipe) durante eclipse solar



“A questão que minha mente formulou foi respondida pelo radiante céu do Brasil.”
Albert Einstein, 1925

Histórico das lentes

- Lodge (1919): sugeriu o termo “lentes”, mas notou que não havia distância focal
- Chwolson (1924) e Einstein (notas de 1912): alinhamento perfeito entre observador, lente e fonte geraria imagem com a forma de anel
- Einstein (1936): considerou lenteamento por uma estrela e conclui que a deflexão é muito pequena (mili segundos de arco)
- Zwicky (1937): considerou galáxias como lentes e calculou que deflexão seria da ordem de segundos de arco; lentes como telescópios naturais e probabilidade das lentes
- Klimov (1963): considerou lenteamento galáxia-galáxia
- Liebes (1964): considerou estrelas da Via Láctea lenteando estrelas de M31; microlenteamento
- Refsdal (1964): sugeriu utilizar o *time delay* para determinar a constante de Hubble

Primeiras detecções

- 1979: primeiro quasar lenteado (imagem dupla de QSO 0957+561)
- 1986: primeiro conjunto de arcos em aglomerados de galáxias (Abell 370)
- 1988: primeiro anel de Einstein (em rádio)
- 1989: microlenteamento de quasares
- 1990: primeira detecção de lentes fracas
- 2003: primeira detecção de planetas pelo efeito de microlente

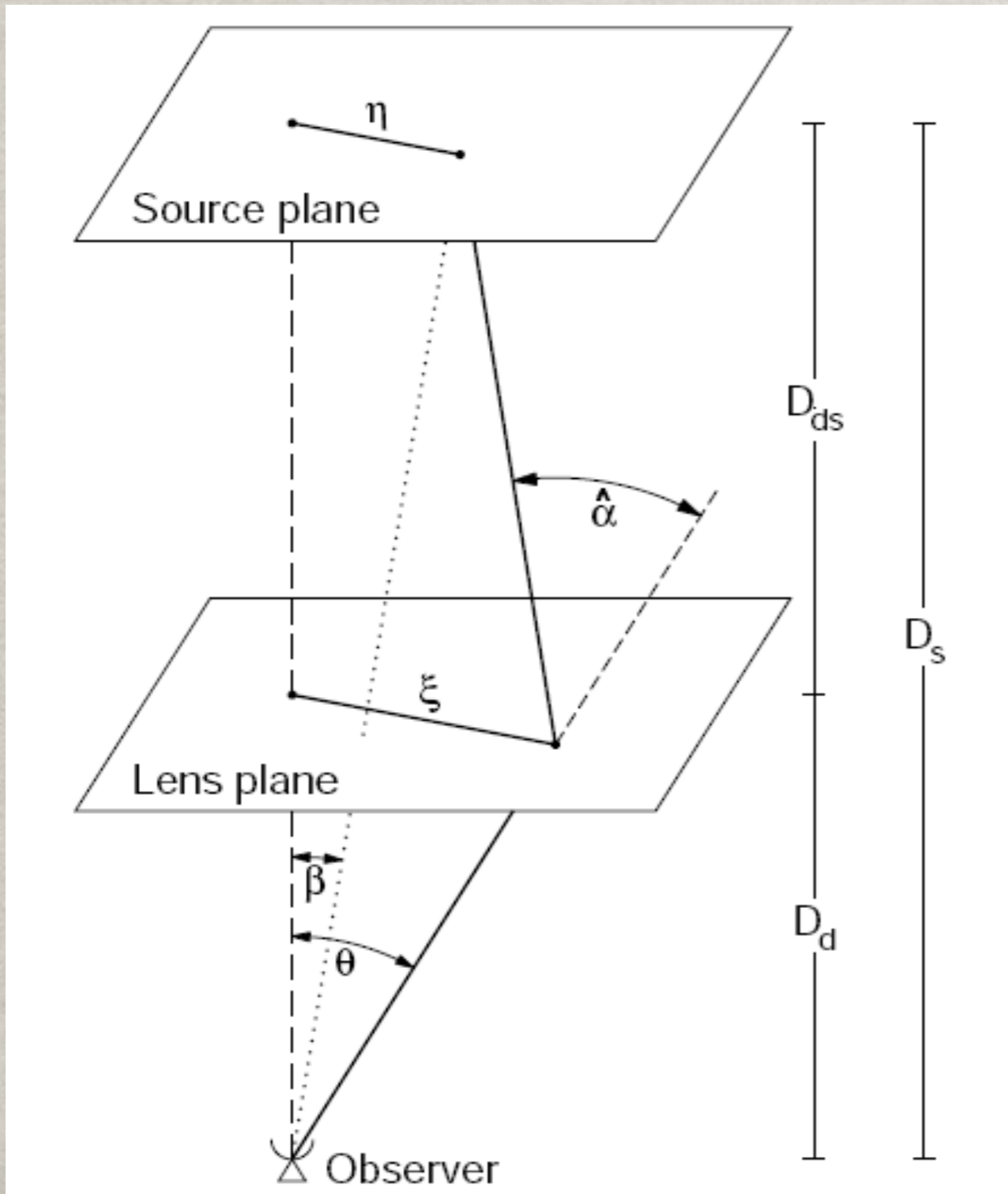
Aplicações

- Telescópios naturais
- Determinação de massa
- Estudo da natureza da matéria escura
- Busca de planetas e objetos compactos
- Estrutura de galáxias e aglomerados
- Estrutura em grande escala
- Determinação dos parâmetros cosmológicos

Aproximação de lente fina

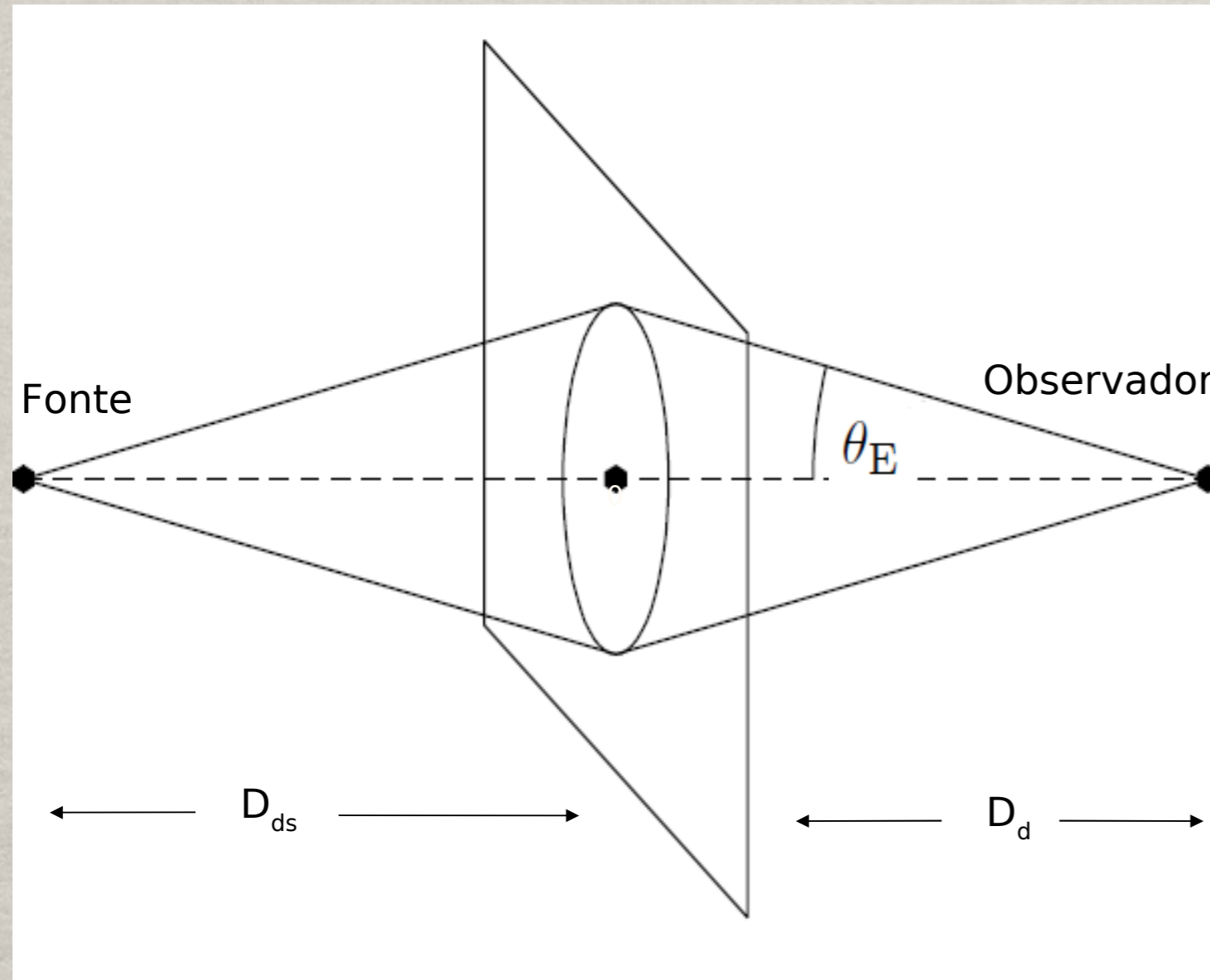
- Dimensão do objeto que faz lenteamento é muito menor do que a distância entre observador e a lente e a lente e a fonte
- Desvio da luz ocorre apenas no chamado plano da lente
- Estudos indicam que matéria ao longo da linha de visada contribui com 10% do número de arcos

Equação da lente



$$\beta = \theta - \frac{D_{ds}}{D_s} \hat{\alpha}(D_d \theta) \equiv \theta - \alpha(\theta)$$

Anel de Einstein



$$\theta_E = \left[\frac{4GM(\theta_E)}{c^2} \frac{D_{ds}}{D_d D_s} \right]^{1/2}$$

GravLens (Keeton 2001)

Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$
($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica singular
 $\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$

$$\theta_E \sim 0.7''$$
$$\theta_E \sim 0.7''$$

Fonte (extensa) alinhada com o centro da lente

Anel de Einstein



Plano da fonte

Plano da lente

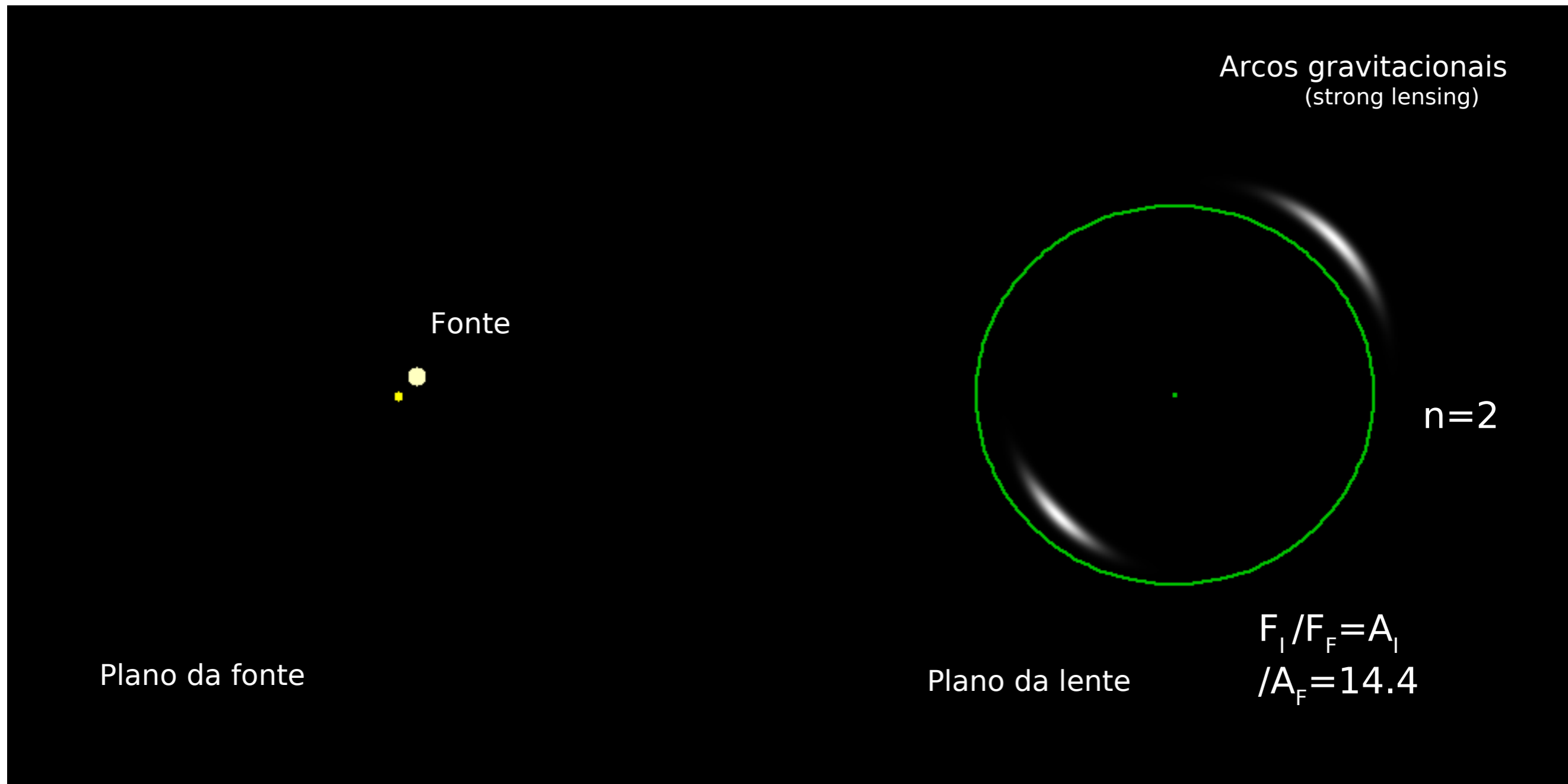
$$F_l / F_f = A_l$$
$$/A_f = 98.3$$

GravLens (Keeton 2001)

Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$
($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica singular
 $\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$

$$\theta_E \sim 0.7''$$

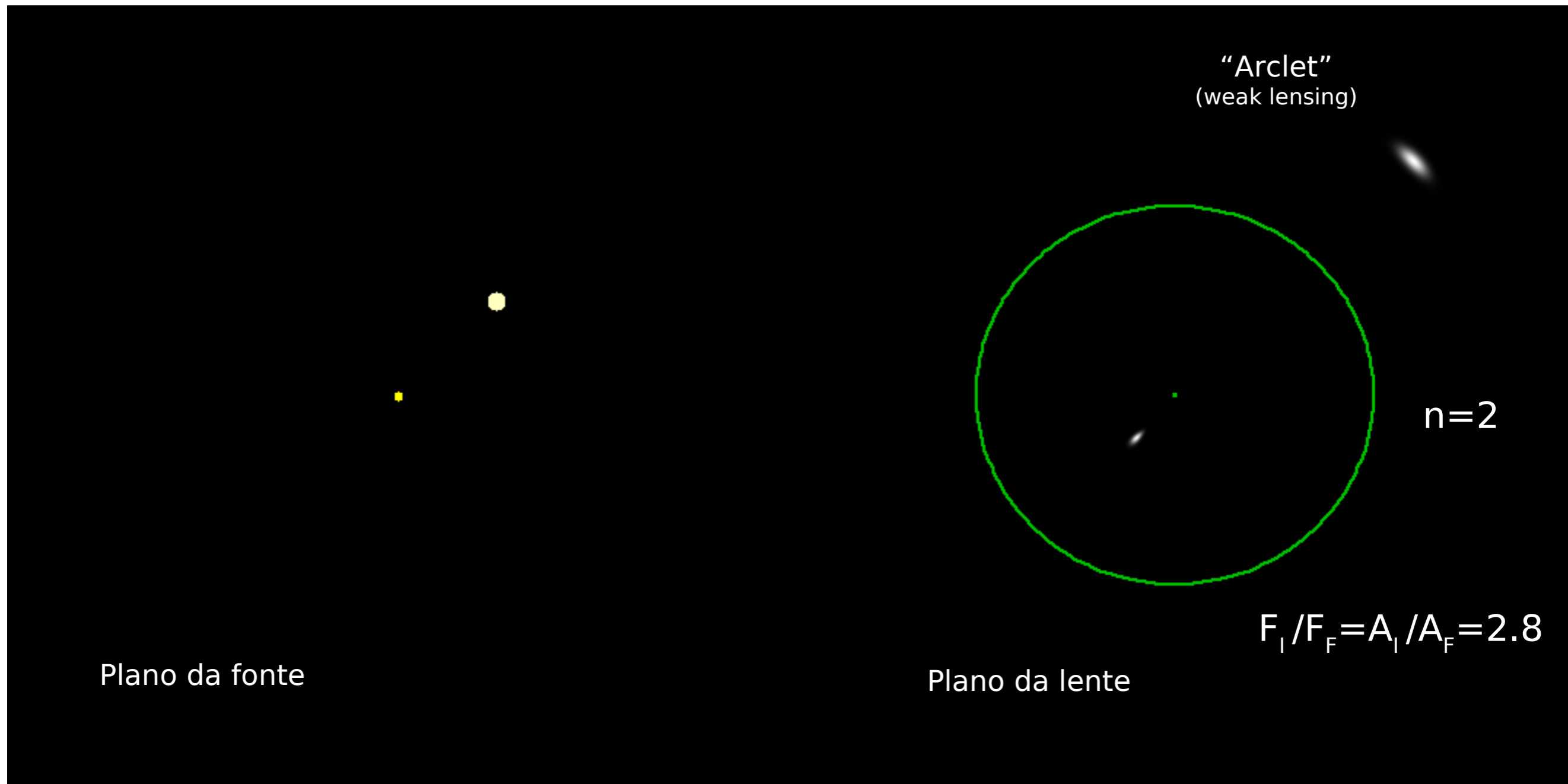


GravLens (Keeton 2001)

Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$
($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica singular
 $\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$

$$\theta_E \sim 0.7''$$



Simulação com GravLens

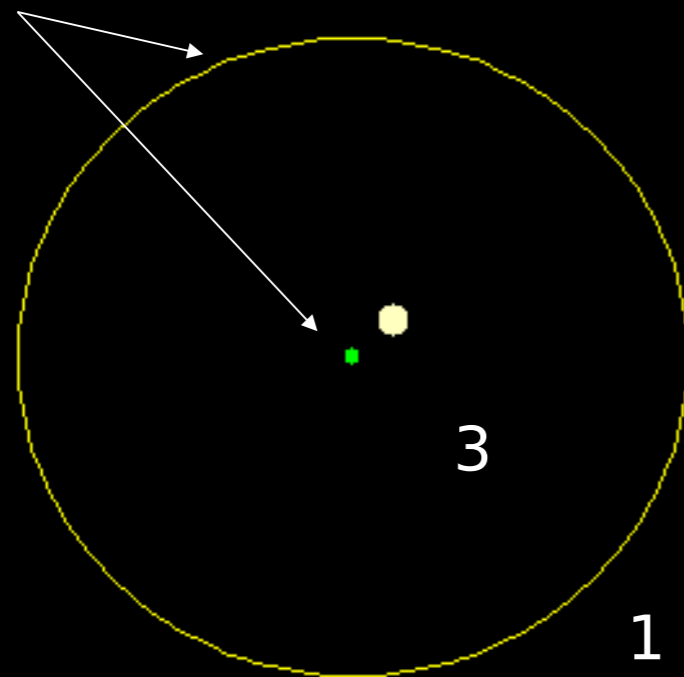
Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$ ($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica com core $r_c=0.1''$

$\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$

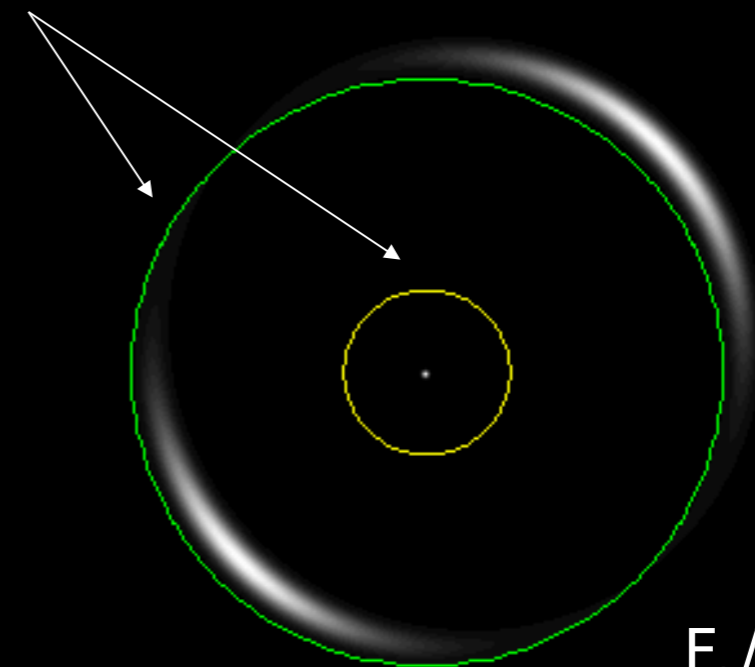
Cáusticas = mapeamento das **curvas críticas** através da eq. da lente

Cáusticas



Plano da fonte

Curvas críticas



$F_l / F_F = 31.3$

Plano da lente

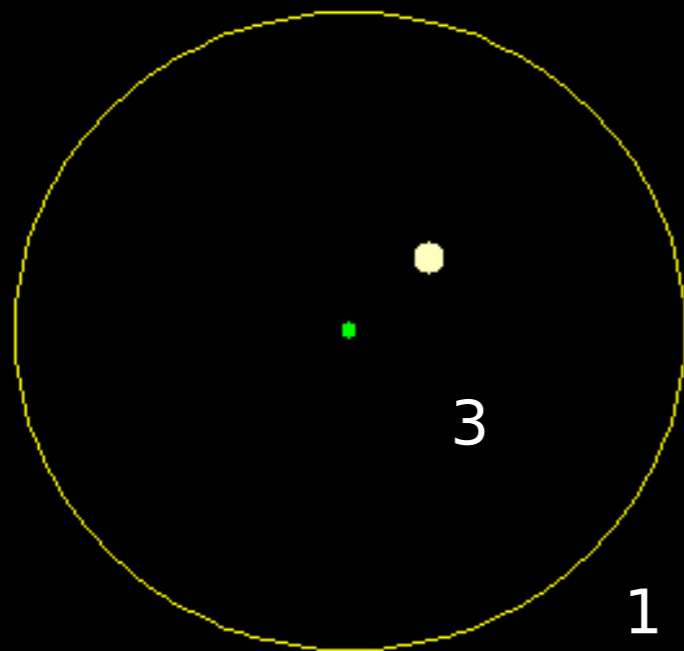
Simulação com GravLens

Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$ ($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

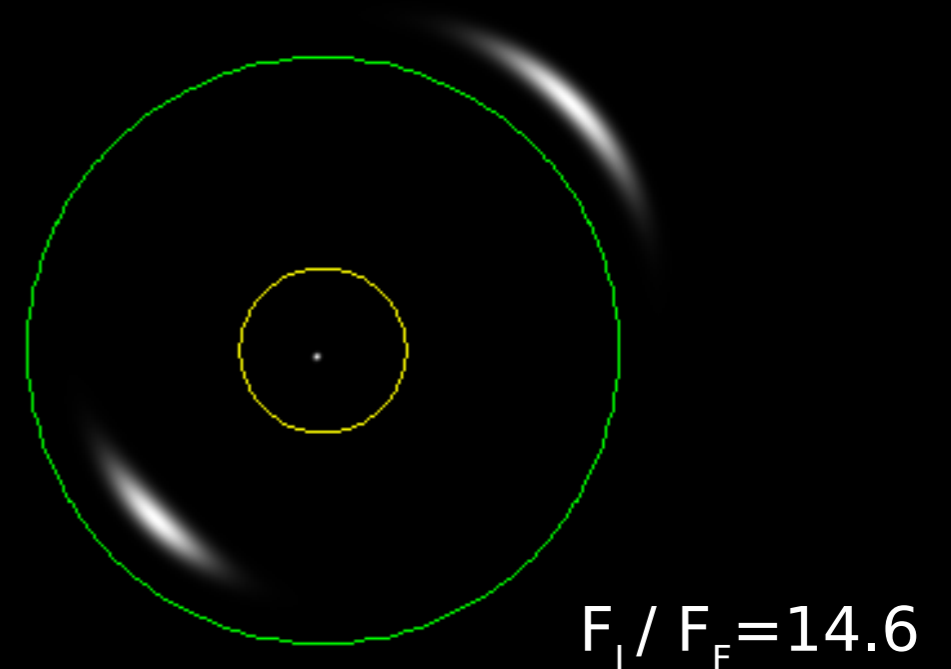
Lente: esfera isotérmica com core $r_c=0.1''$

$\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$

Cáusticas: “regiões de estabilidade de soluções”



Plano da fonte



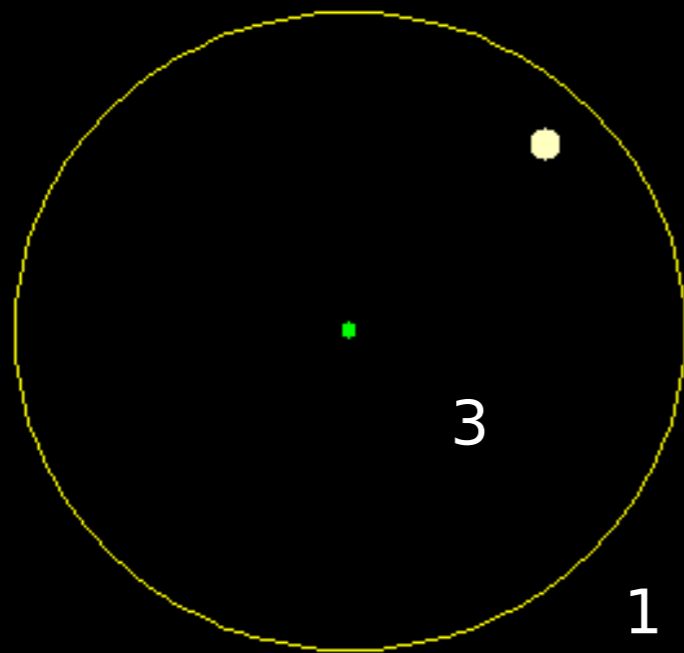
Plano da lente

Simulação com GravLens

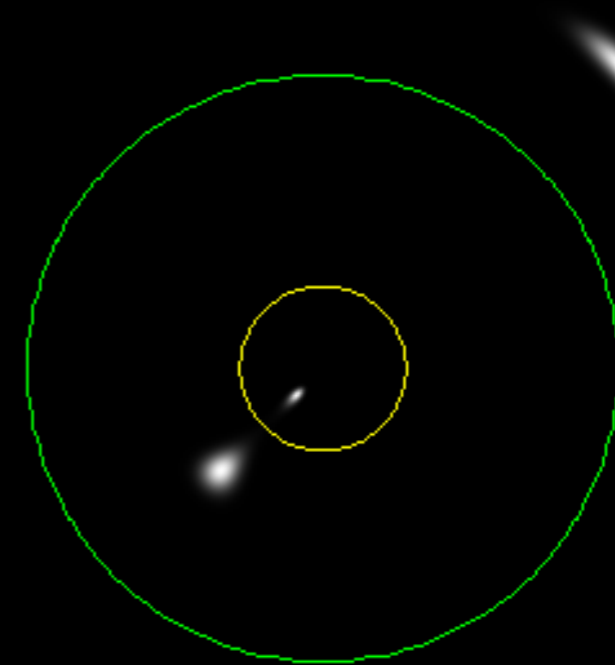
Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$ ($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica com core $r_c=0.1''$

$\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$



Plano da fonte



Plano da lente

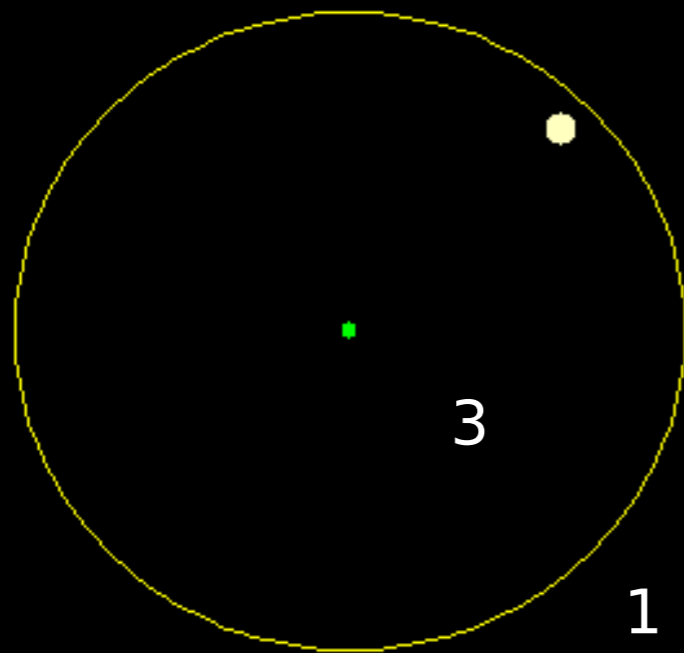
Simulação com GravLens

Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$ ($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica com core $r_c=0.1''$

$\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$

“Quando a fonte cruza uma cáustica um par de imagens é criado/destruído próximo à curva crítica correspondente, dependendo do sentido de cruzamento”



Plano da fonte



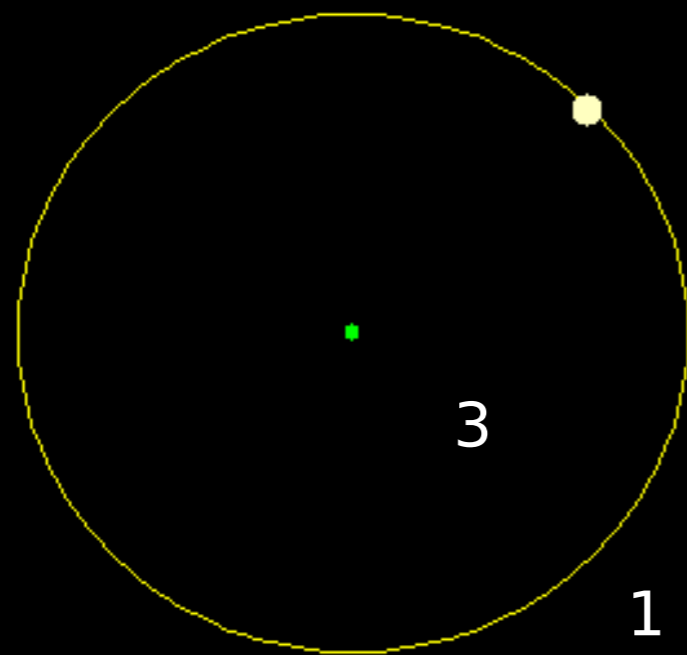
Plano da lente

Simulação com GravLens

Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$ ($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

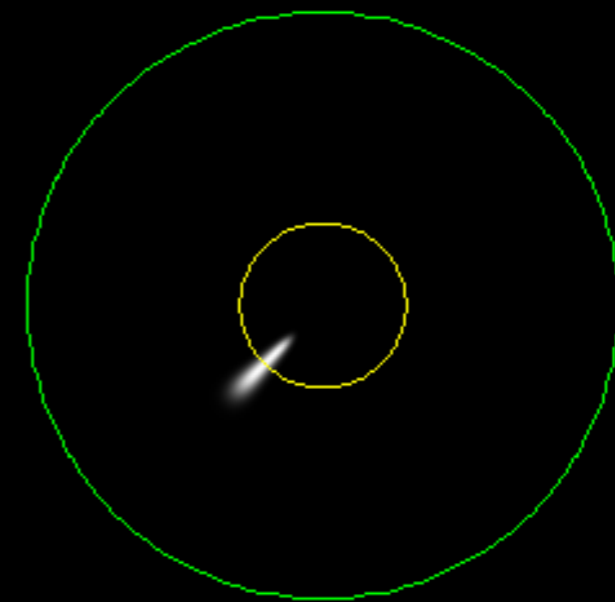
Lente: esfera isotérmica com core $r_c=0.1''$

$\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$



Plano da fonte

Arco radial



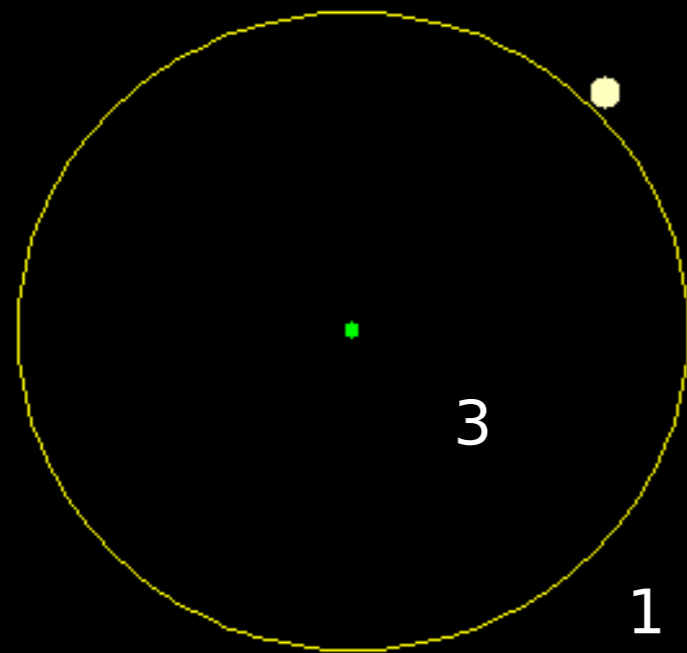
Plano da lente

Simulação com GravLens

Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$ ($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica com core $r_c=0.1''$

$\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$



Plano da fonte



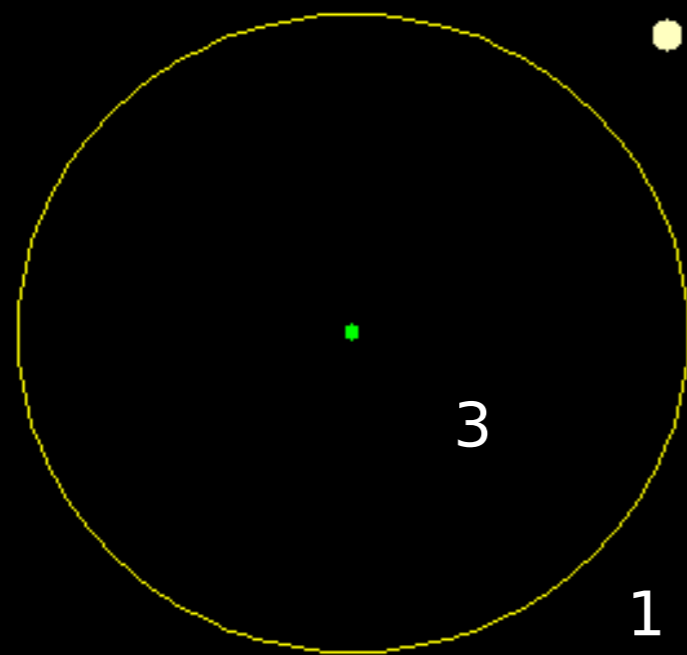
Plano da lente

Simulação com GravLens

Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$ ($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica com core $r_c=0.1''$

$\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$



Plano da fonte

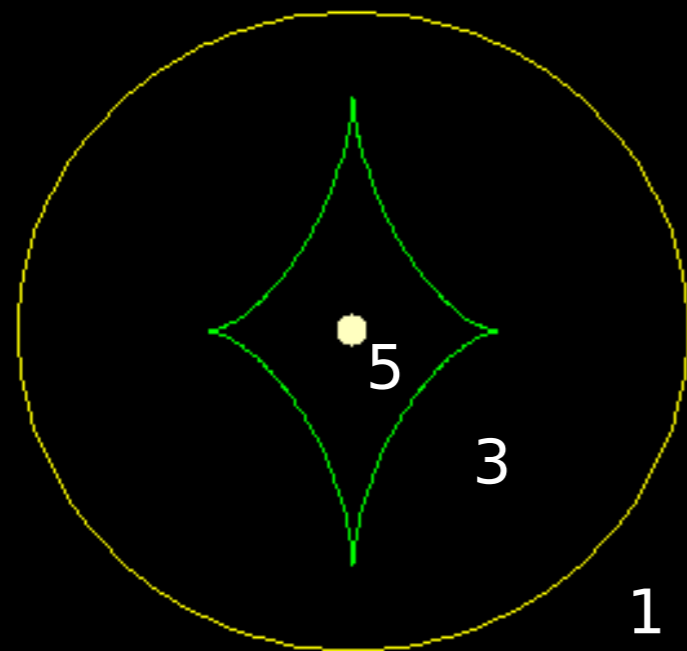


Plano da lente

Simulação com GravLens

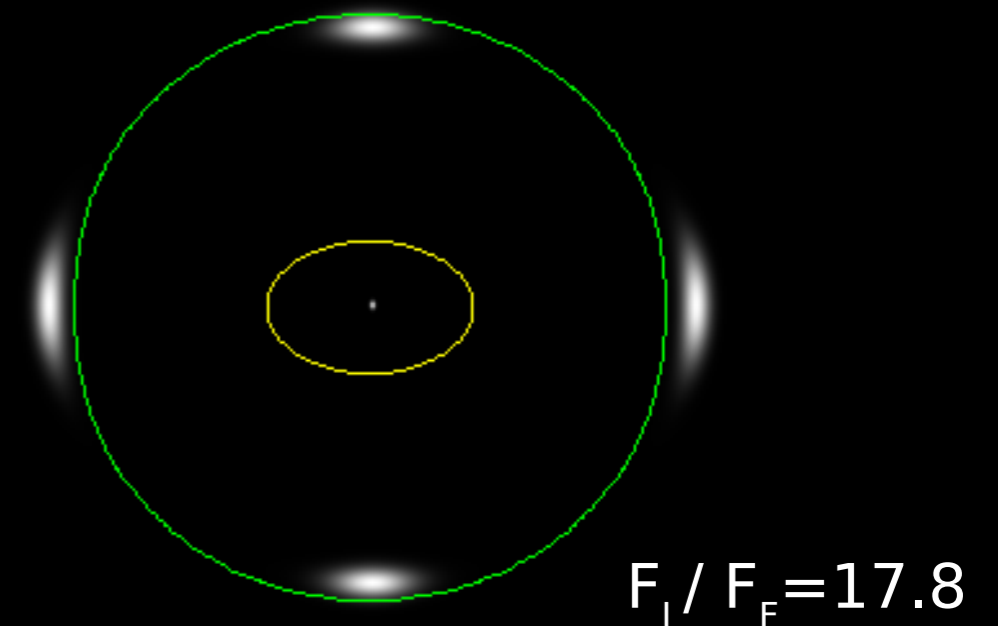
Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$ ($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica com core pseudo-elíptica $b/a=0.4$, $r_c=0.1''$, $\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$



Plano da fonte

Cruz de Einstein

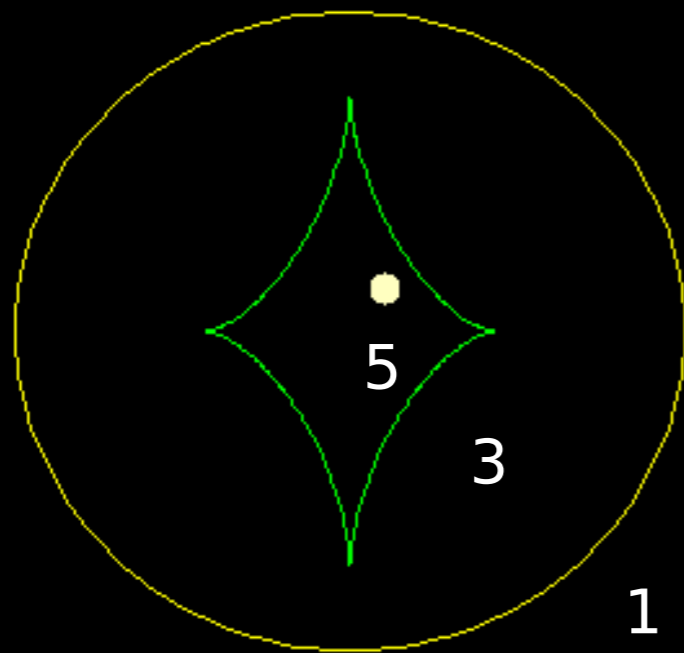


Plano da lente

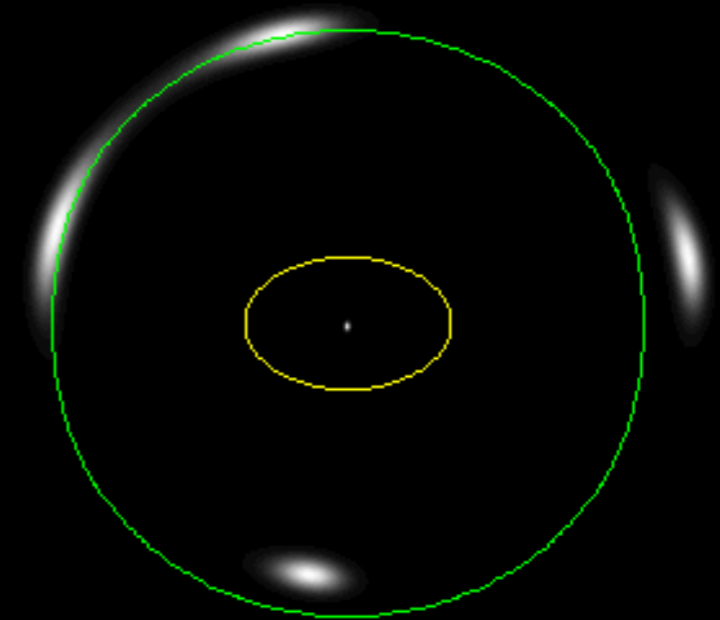
Simulação com GravLens

Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$ ($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica com core pseudo-elíptica $b/a=0.4$, $r_c=0.1''$, $\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$



Plano da fonte

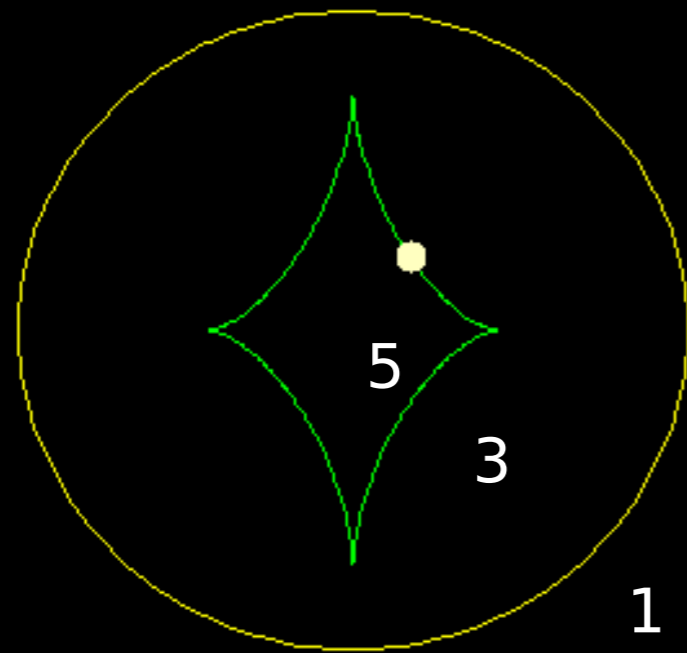


Plano da lente

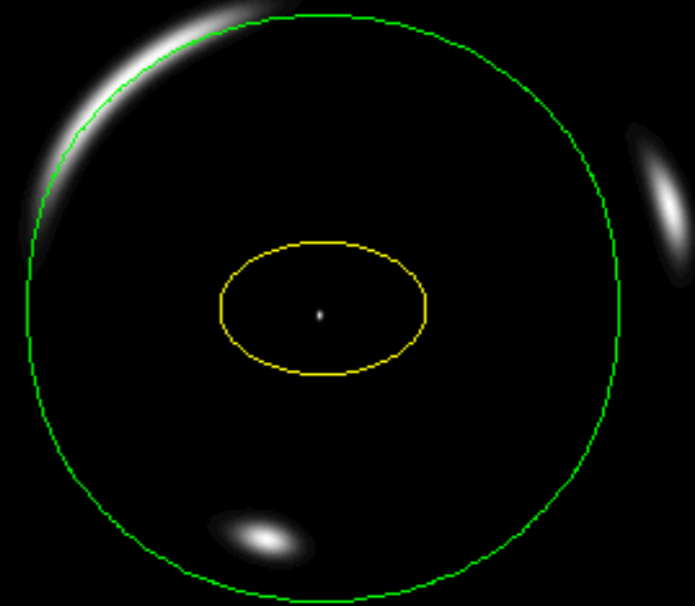
Simulação com GravLens

Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$ ($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica com core pseudo-elíptica $b/a=0.4$, $r_c=0.1''$, $\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$



Plano da fonte

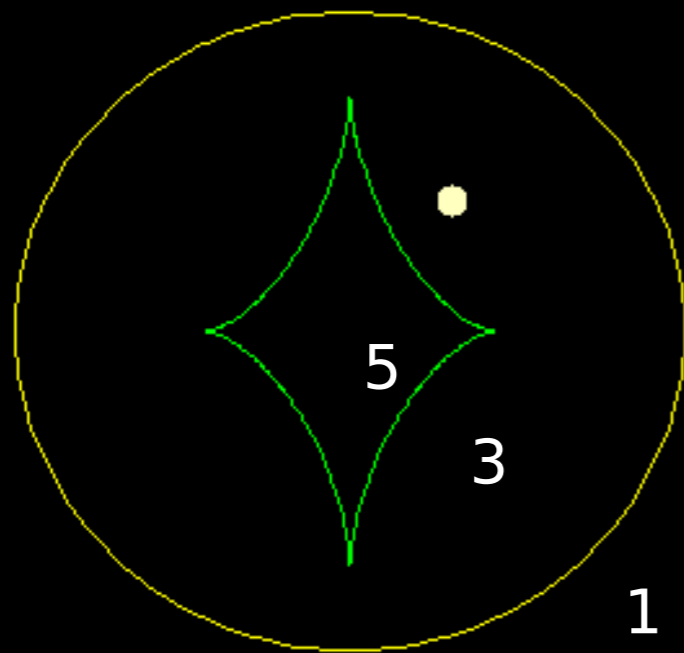


Plano da lente

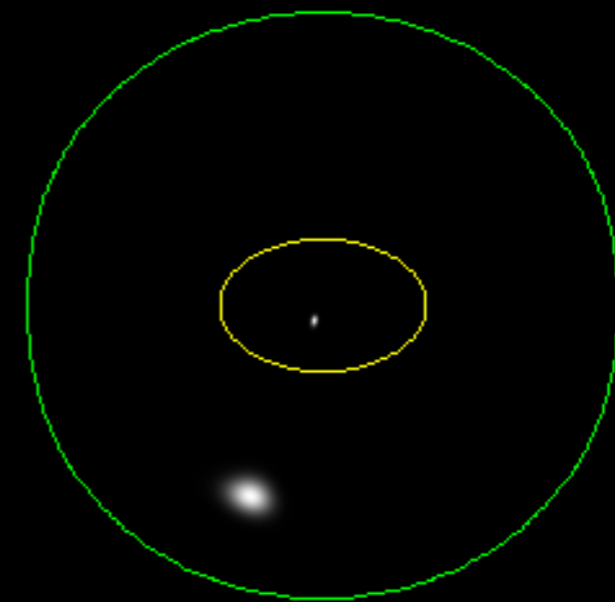
Simulação com GravLens

Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$ ($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica com core pseudo-elíptica $b/a=0.4$, $r_c=0.1''$, $\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$



Plano da fonte

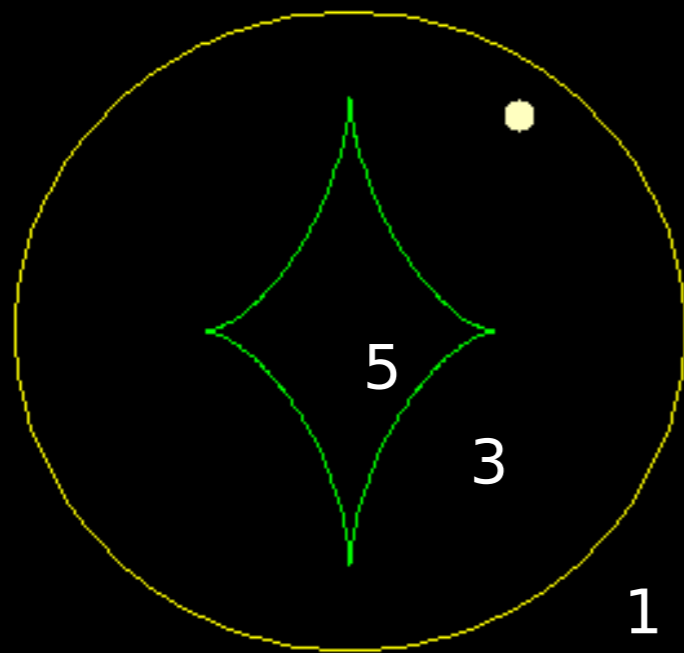


Plano da lente

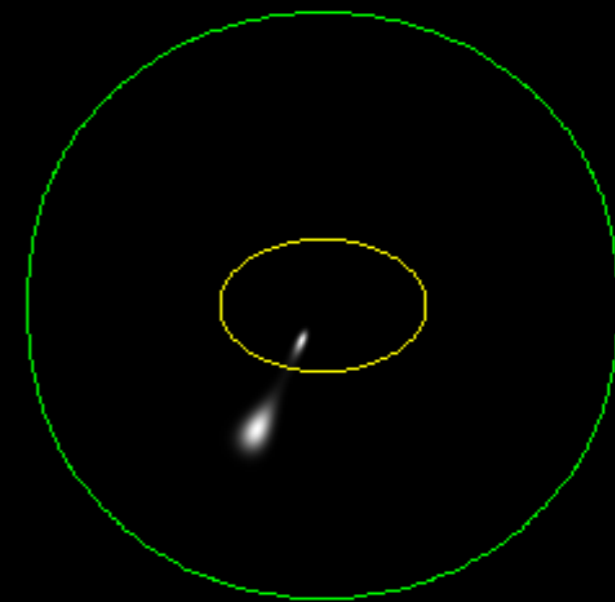
Simulação com GravLens

Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$ ($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica com core pseudo-elíptica $b/a=0.4$, $r_c=0.1''$, $\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$



Plano da fonte

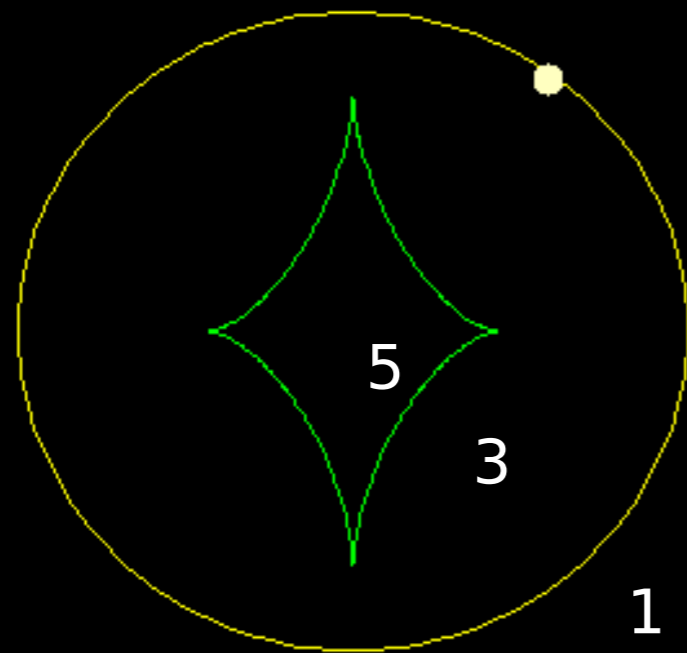


Plano da lente

Simulação com GravLens

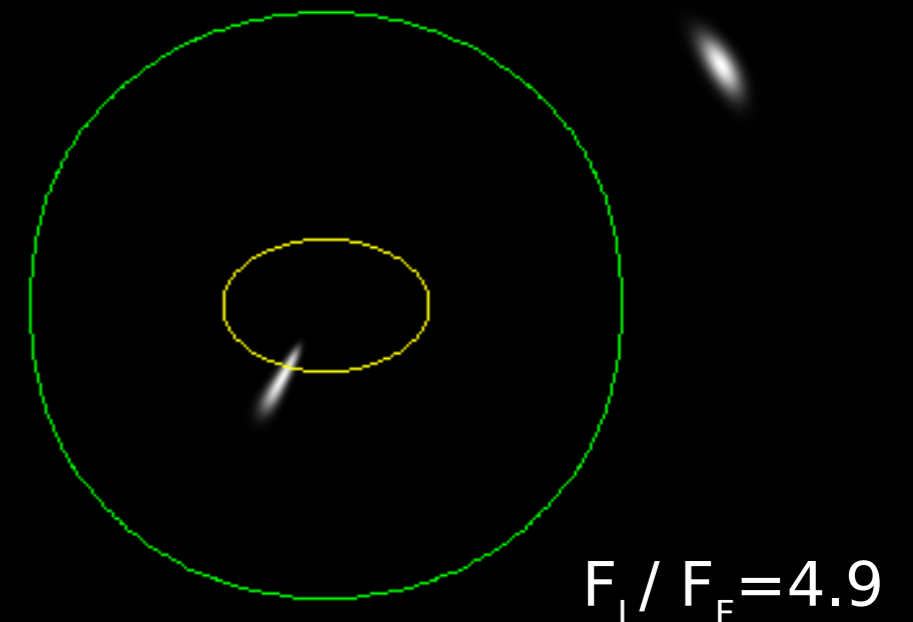
Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$ ($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica com core pseudo-elíptica $b/a=0.4$, $r_c=0.1''$, $\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$



Plano da fonte

Arco radial

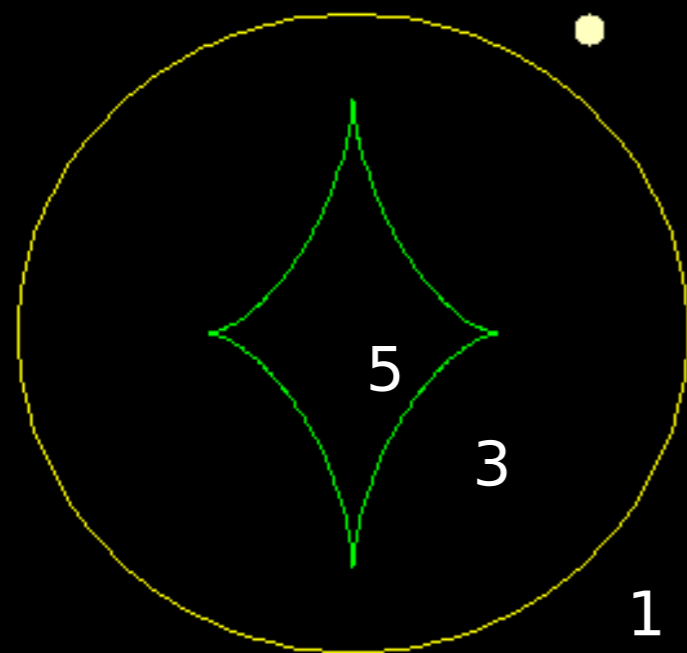


Plano da lente

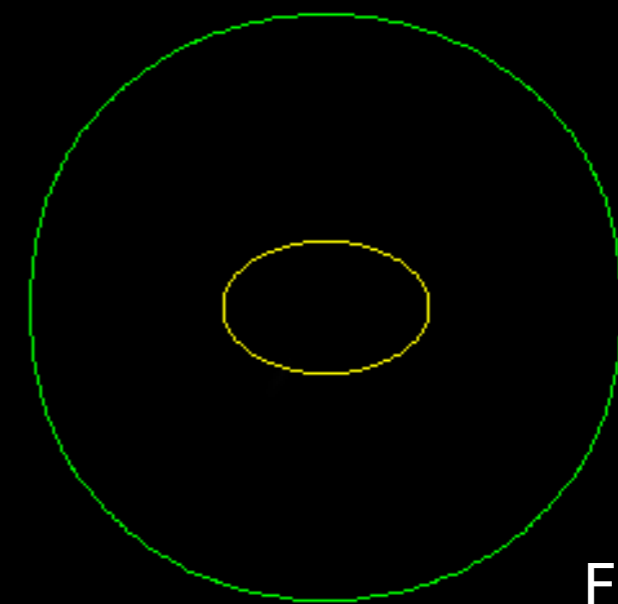
Simulação com GravLens

Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$ ($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica com core pseudo-elíptica $b/a=0.4$, $r_c=0.1''$, $\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$



Plano da fonte

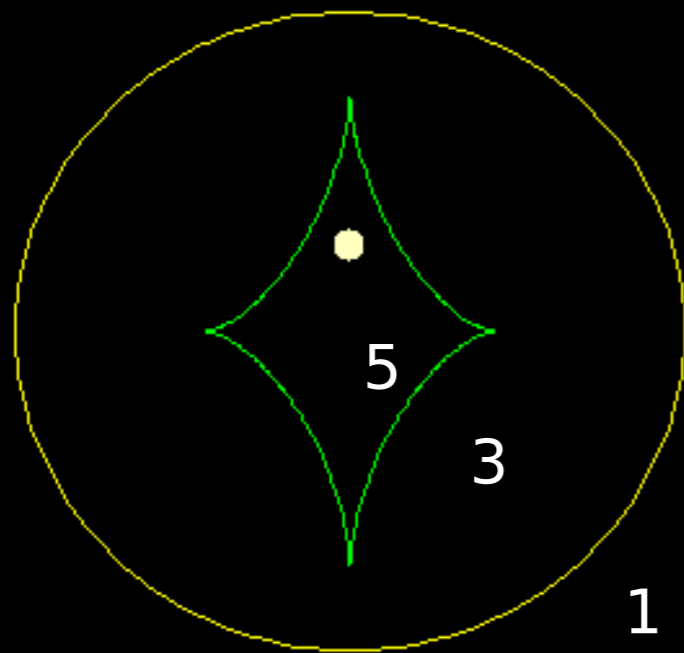


Plano da lente

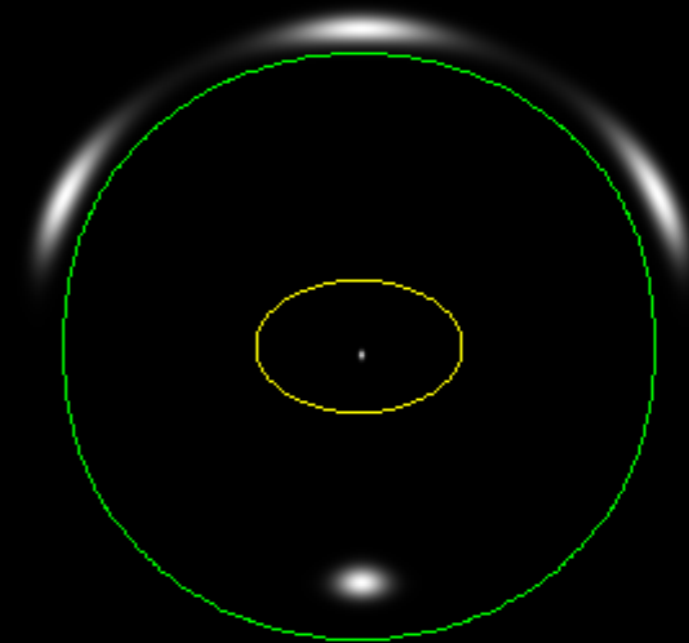
Simulação com GravLens

Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$ ($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica com core pseudo-elíptica $b/a=0.4$, $r_c=0.1''$, $\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$



Plano da fonte

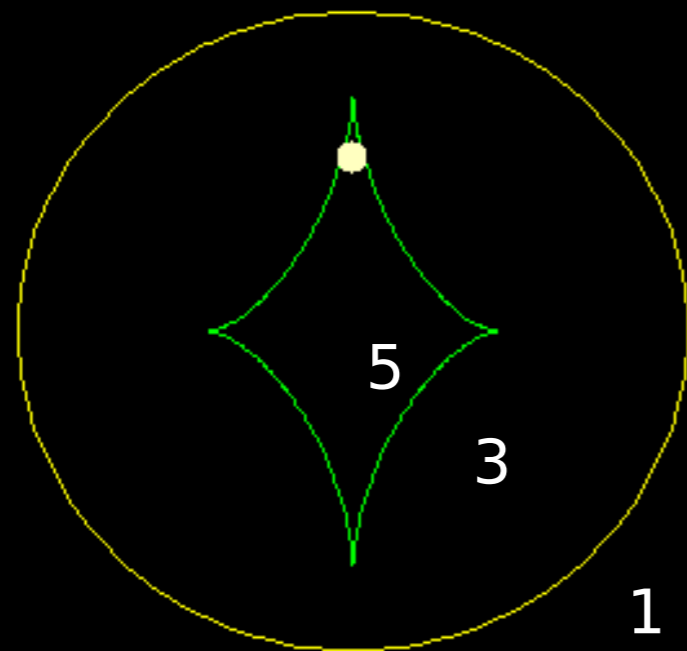


Plano da lente

Simulação com GravLens

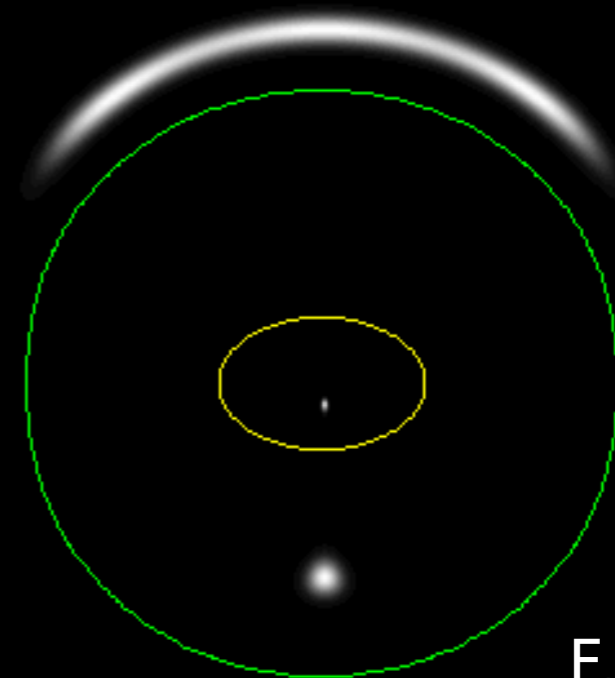
Fonte: Sérsic $n=1$, $R_0=3\text{kpc}$ ($z=1$), $D_s=2\text{Mpc}$

Lente: esfera isotérmica com core pseudo-elíptica $b/a=0.4$, $r_c=0.1''$, $\sigma=220\text{km/s}$, $D_d=1\text{Mpc}$



Plano da fonte

Arco gigante



$F_l / F_F = 18.8$

Plano da lente