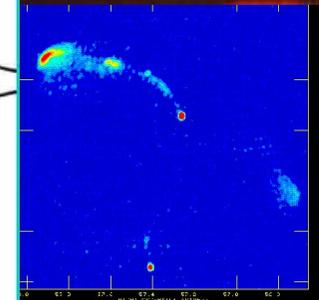
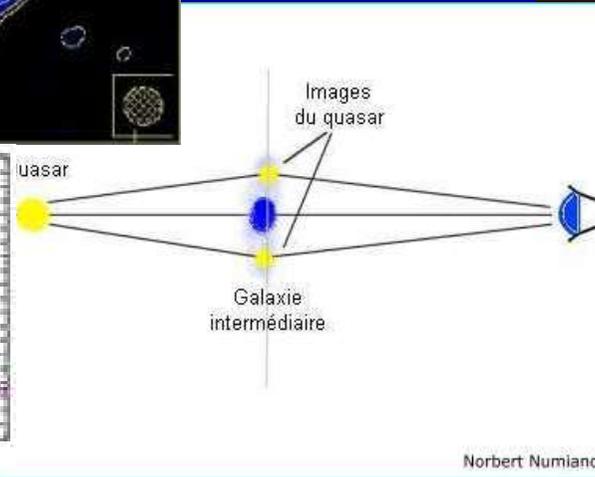
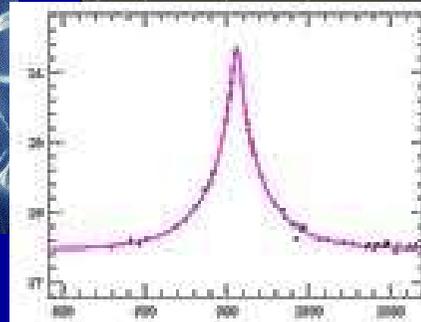
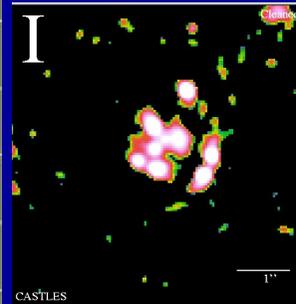
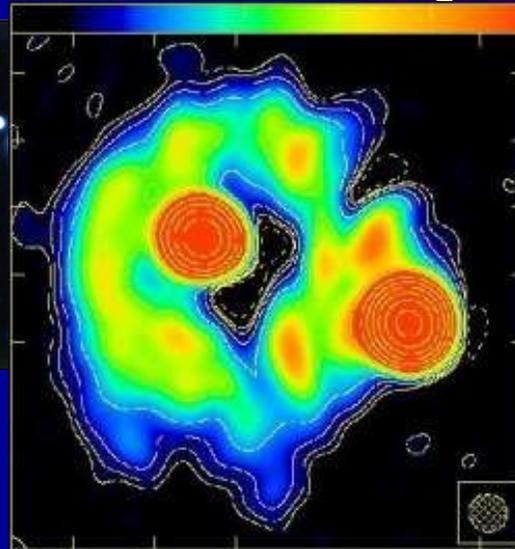




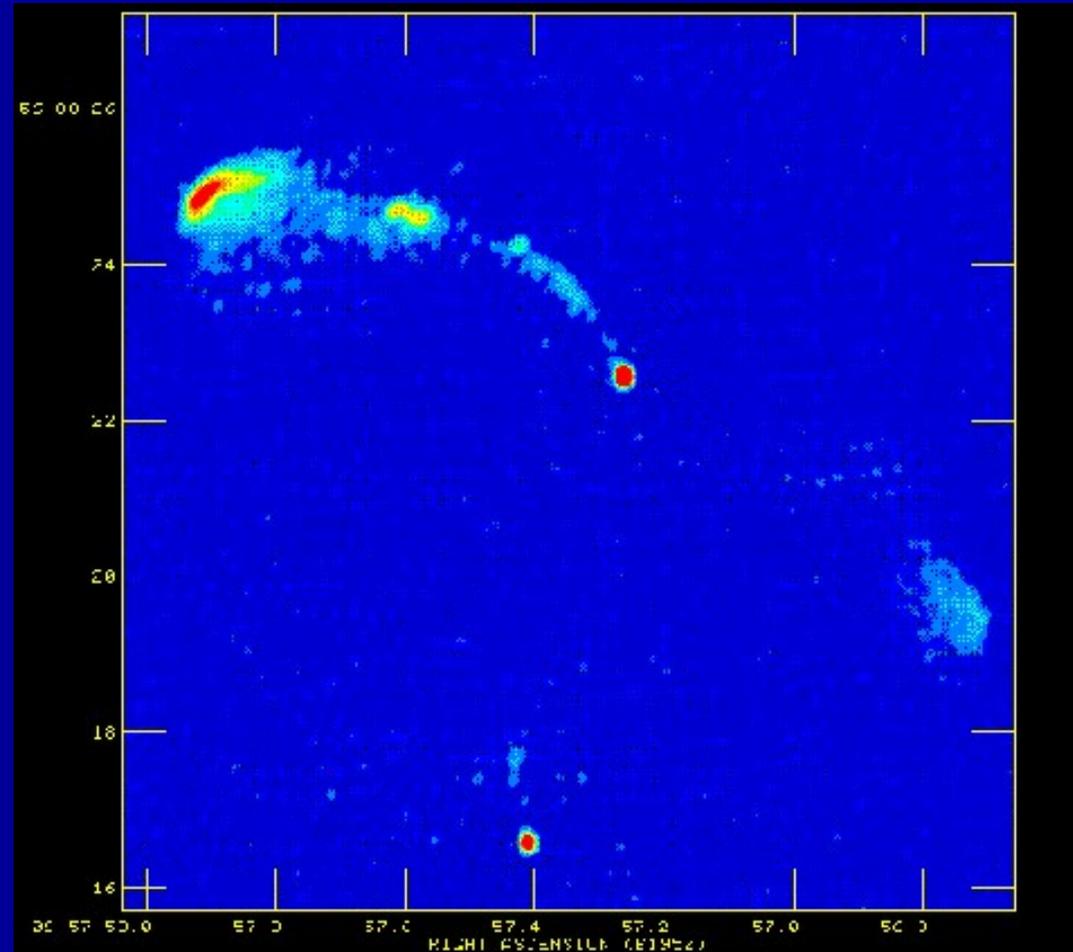
LENTEs GRAVITACIONAIS: Os Telescópios da Natureza



Uma Lente Gravitacional

1979:

Astronomia *à grega*
ficaria por aqui...



1. História

Newton (1704), *Opticks*: “Do not Bodies act upon Light at a distance, and by their action bend its Rays; and is not this action strongest at the least distance?”
(terá já assumido a luz com “fotões”, ou seria da refacção atmosférica que Newton estaria a falar?)

Soldner (1801), *On the deviation of a light ray from its motion along a straight line through the attraction of a celestial body which it passes close by*: raio de luz é desviado pelo Sol de 0.875”.

Einstein (1911) chegou à mesma conclusão (sem saber do artigo de Soldner?), notando que corpos sem massa (fotões), mas com **energia**, também são afectados por um campo gravitacional (massa=energia/c²)

1914: expedição de observadores alemães desloca-se à Rússia para observar um eclipse (fotografar as estrelas) mas é (alegadamente) detida pois começa a I Guerra Mundial. “Sorte” para Einstein, já com o Nobel havia 10 anos...

Einstein (1915): Rel. Geral completa, dá 1.75” (questão: quem tem razão?)

Edington (1919): 1ª Lente gravitacional descoberta (deslocação aparente de estrelas causada pelo sol). Eclipse fotografado em Maio 1919, nova foto seis meses depois da mesma área do céu (agora visível à noite)

Edington (1920): multiple-imaging (star-star)

Chwolson (1924), Einstein (1936): “Einstein Ring”

Zwicky (1937): multiple-imaging (gal-gal); podem-se “pesar” galáxias com esta técnica; galáxias como “telescópios cósmicos naturais”

Walsh, Caldwell & Weymann (1979), *Nature*: 1ª Imagem Múltipla descoberta por acaso...

Lynds & Petrosian (1989), *ApJ*: 1ª Lente-enxame de galáxias descoberta (Abell 370)

Hoje, já com uma série de rastreios dedicados a esta procura, conhecemos **centenas** de lentes gravitacionais, das quais cerca de 70 são imagens múltiplas de quasares/rádio galáxias:

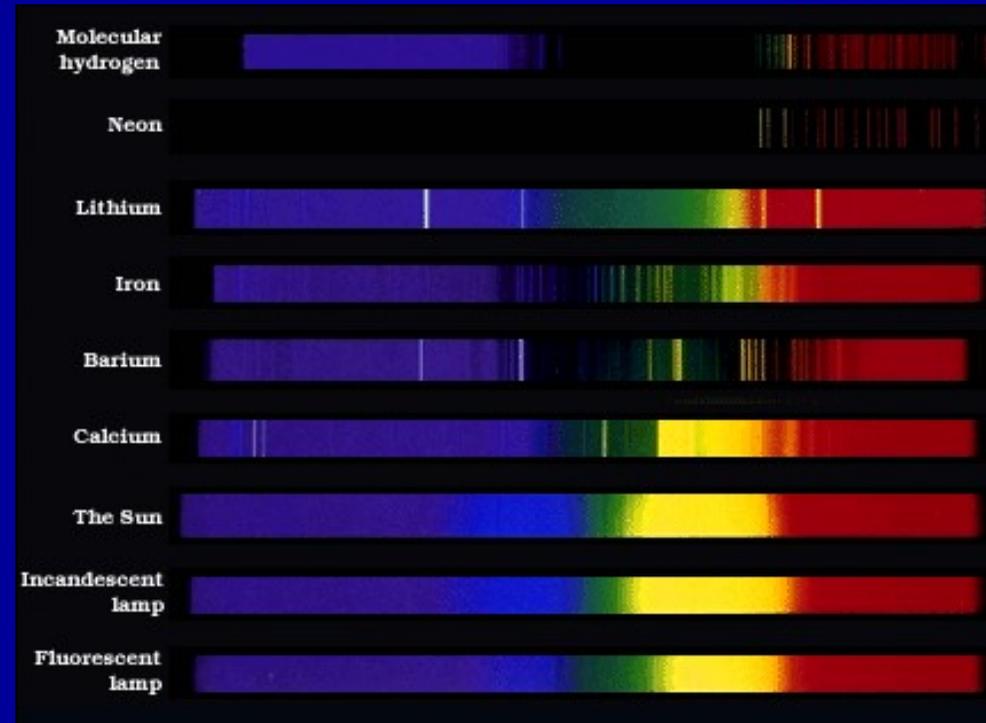
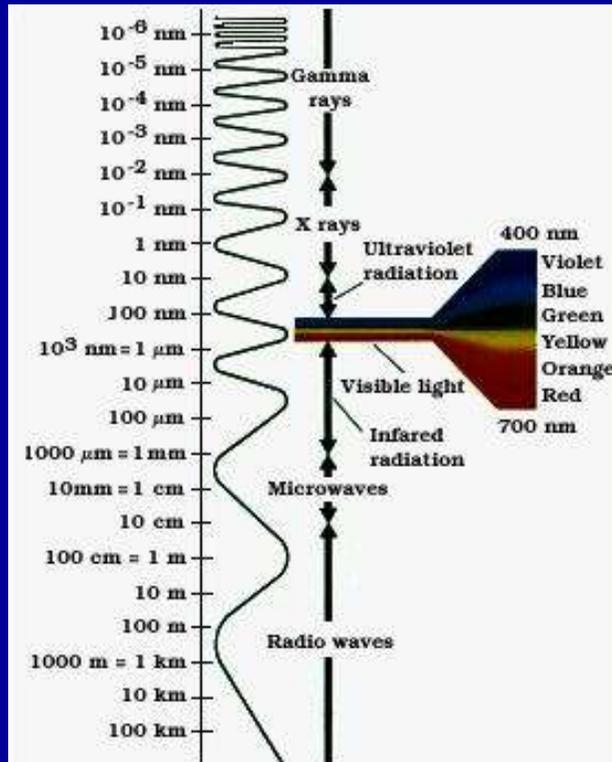
<http://cfa-www.harvard.edu/castles/>

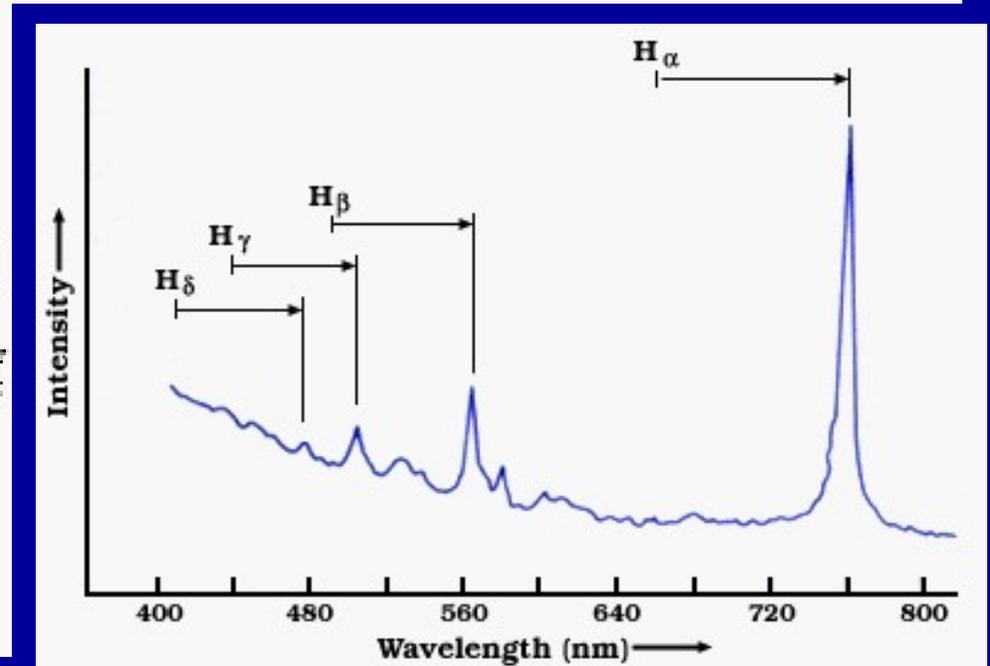
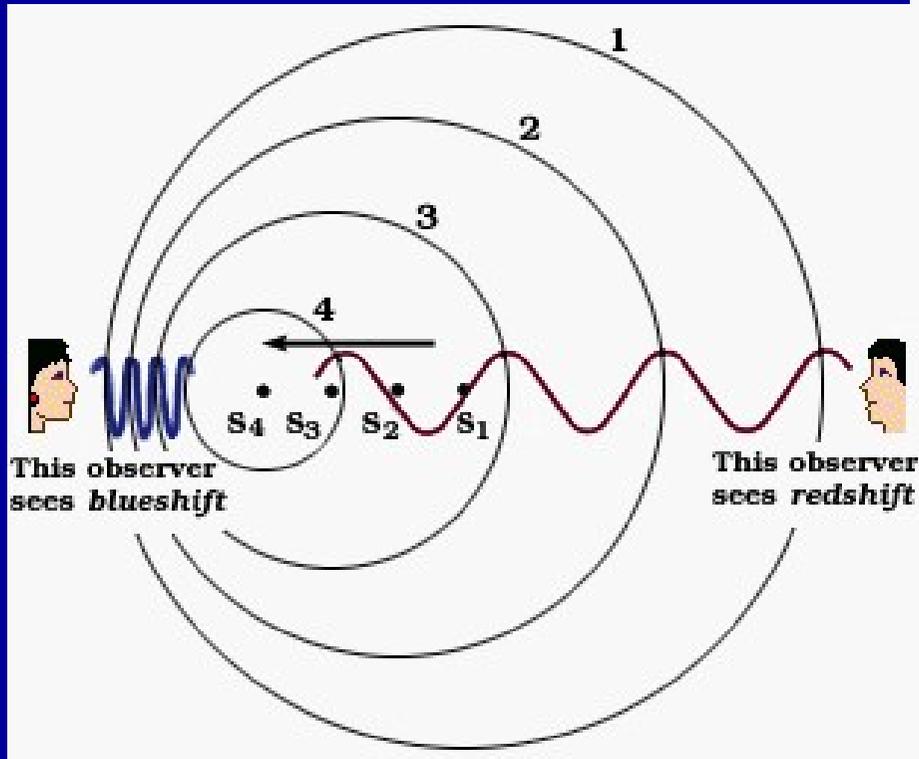
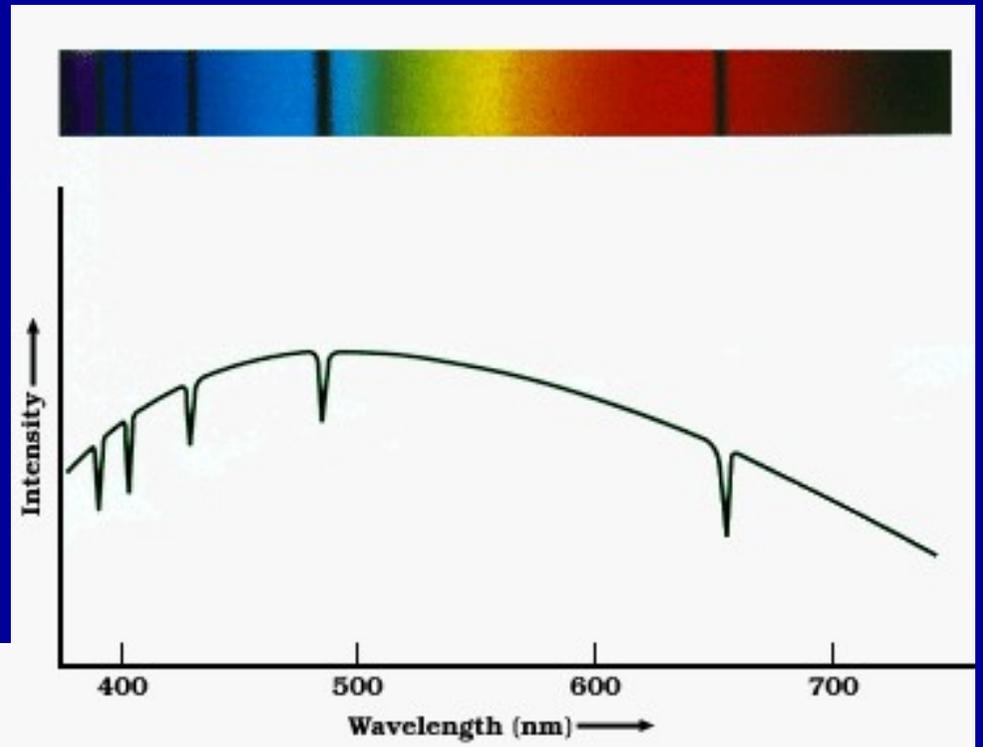
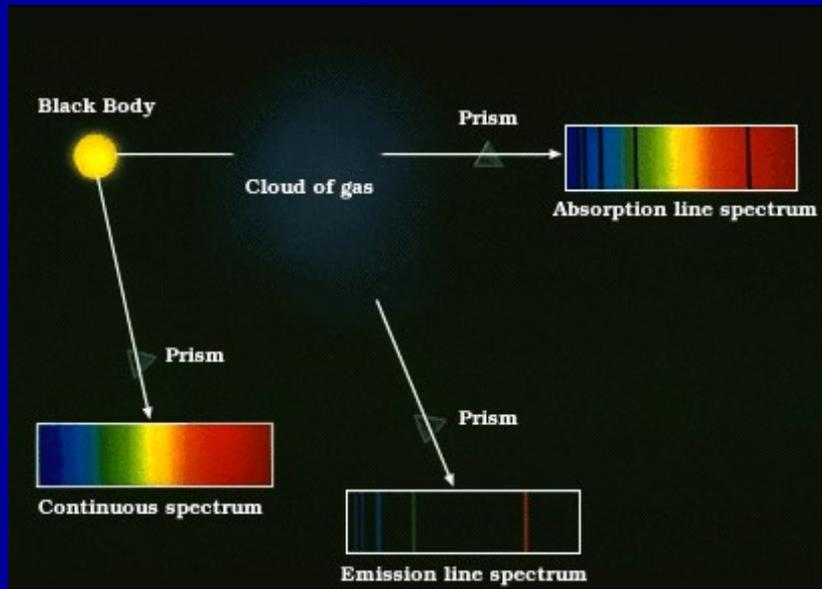
<http://vela.astro.ulg.ac.be/themes/extragal/gravlens/bibdat/>



2. Noções Básicas

UMAstronomia



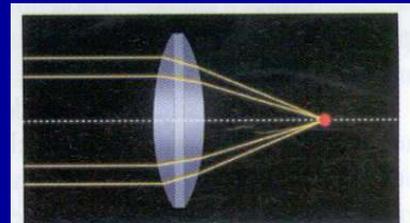


3. Lentes (na Terra e no Espaço)

Lentes gravitacionais: telescópios da Natureza

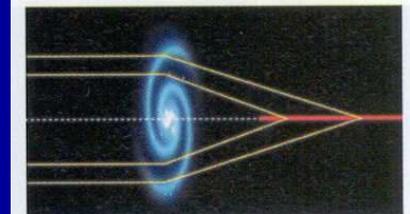
Ampliam galáxias que não veríamos de outra forma.
Podemos tirar os espectros de galáxias longínquas.

**Um campo gravitacional curva ondas
electromagnéticas como uma lente de vidro, as
camadas atmosféricas ou a água (refracção).**



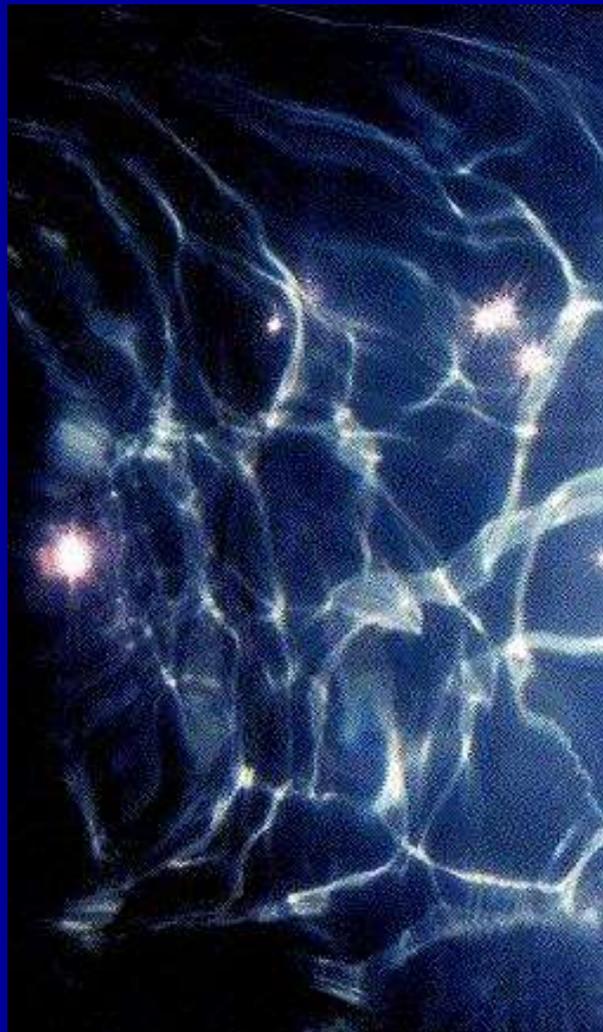
CONVEX GLASS LENS

Light near the edge of a glass lens is deflected more than light near the optical axis. Thus, the lens focuses parallel light rays onto a point.



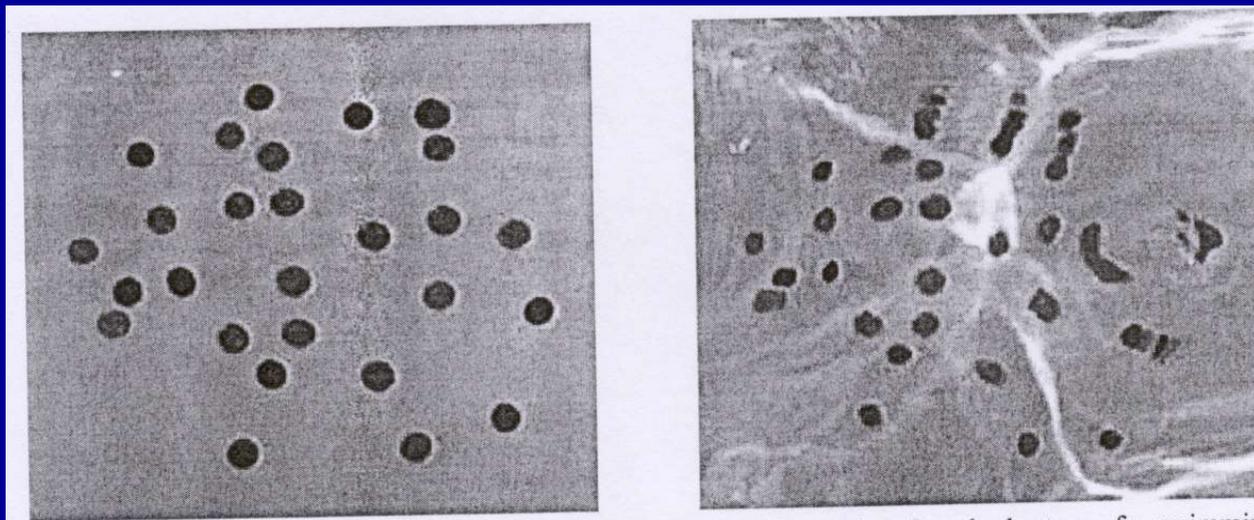
GRAVITATIONAL LENS

Light near the edge of a gravitational lens is deflected less than light near the center. Thus, the lens focuses light onto a line rather than a point.

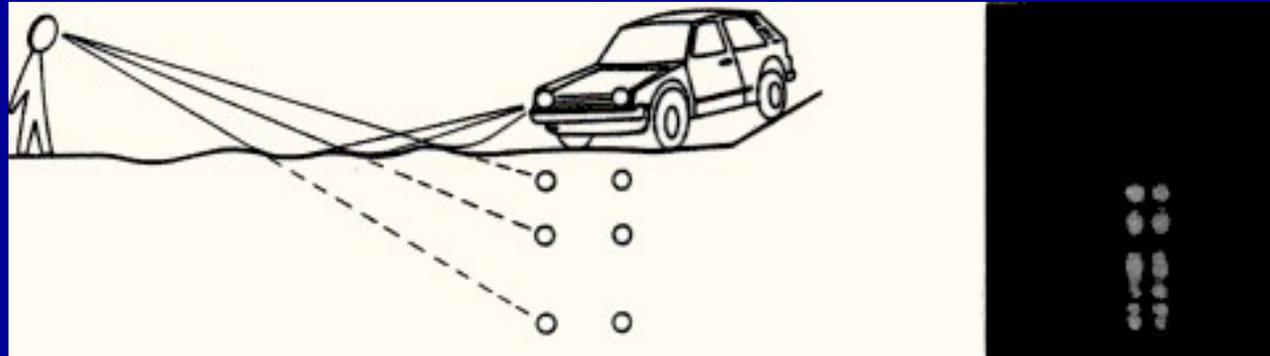


NA ÁGUA:

Imagens múltiplas e distorção:



NA ATMOSFERA:



“Didactical experiments” (Surdej et al)

<http://vela.astro.ulg.ac.be/themes/extragal/gravlens/bibdat/engl/DE/didac.html>



SIMULAÇÃO:

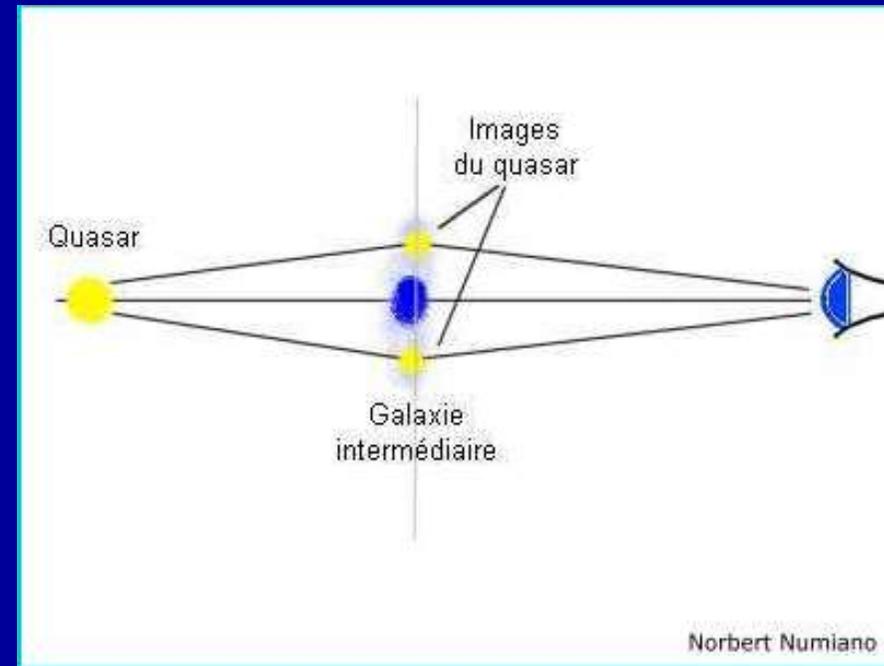
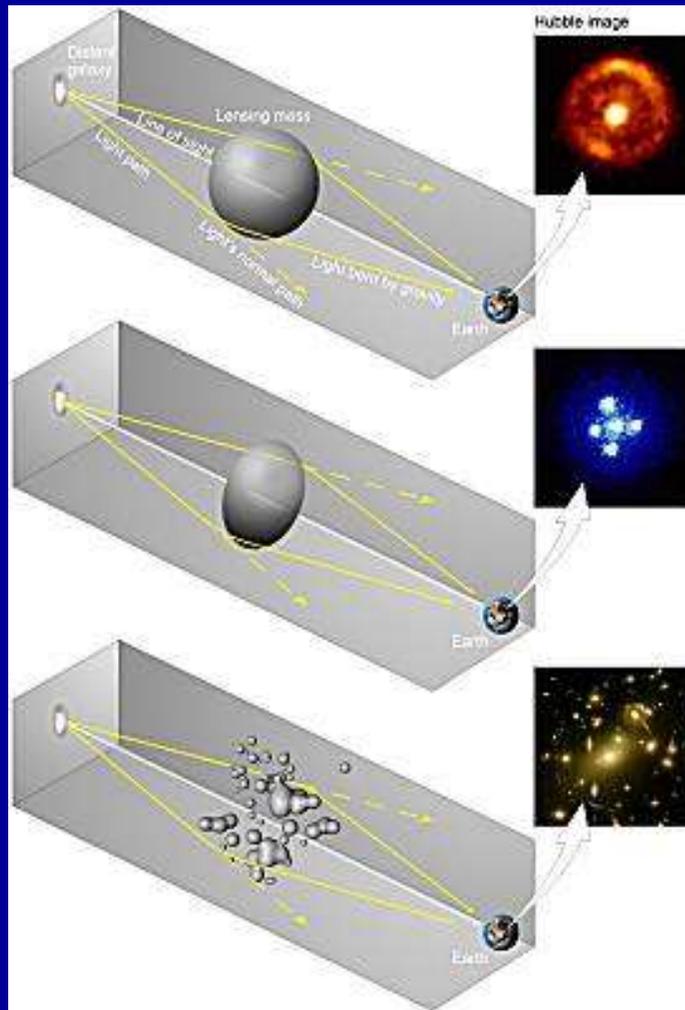
Buraco Negro com a massa de Saturno



Castle on the Mall, Washington, D.C., EUA



4. Teoria



O efeito de **lente gravitacional** tem as seguinte vertentes:

- 1) Mudança de *posição* (à la Edington 1919)
- 2) Multiplicação (à la Walsh et al 1979)
- 3) Amplificação e redução (em todos os casos)
- 4) Deformação (em todos os casos)

No que segue concentramo-nos apenas em **imagens múltiplas**:



- A produção de **imagens múltiplas** depende de $\Sigma_{cr} > 1 \text{ g/cm}^2$
(densidade semelhante a um filme de água para observações ao microscópio)
- O número total de imagens é ímpar (a não ser para modelos “teóricos” singulares) **mas** só vemos um número par pois uma delas, que estaria no centro, é fortemente de-magnificada (dezenas ou centenas de vezes) e, além disso, será “tapada” pela lente

	Circular Singular	Circular Non Singular	Non Circular Singular	Non Circular Non Singular
Caustics				
Critical lines				

- Surge um “anel de Einstein” no alinhamento perfeito e quando a lente tem um potencial de massa circular; senão surge uma quad/anel

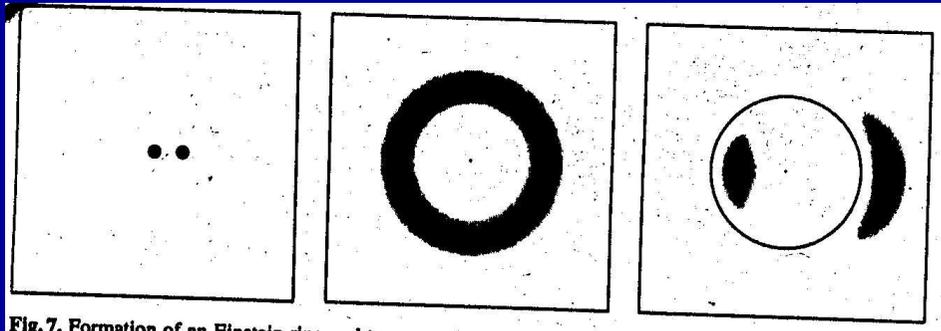
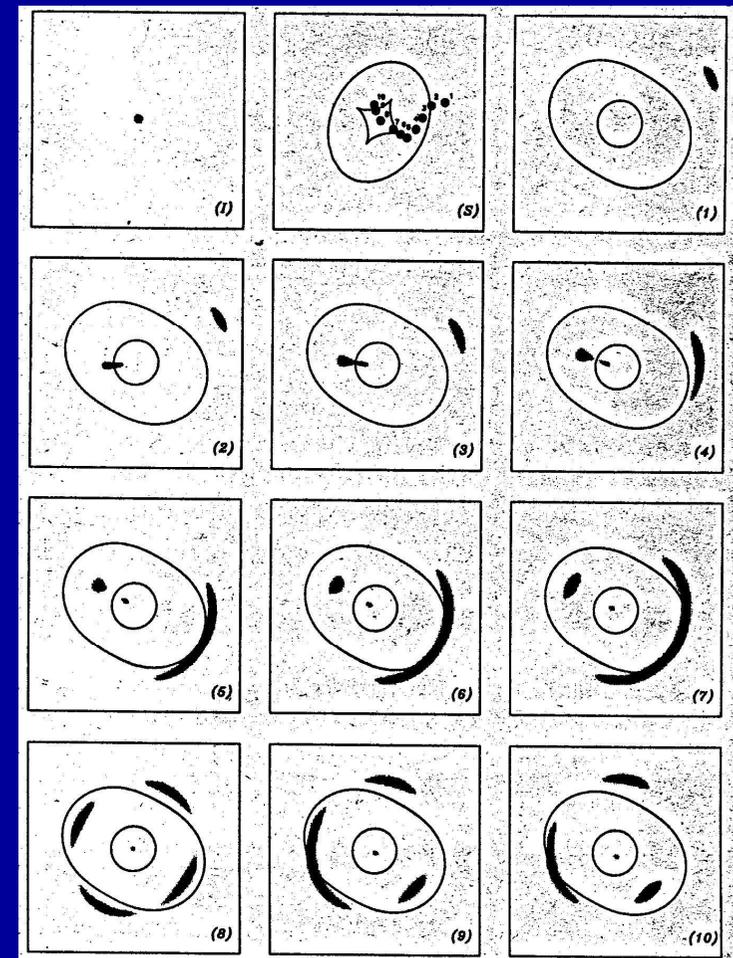


Fig. 7. Formation of an Einstein ring...

Anel de Einstein no alinhamento perfeito
(potencial circular)

Várias imagens conforme posição geométrica



SIMULAÇÃO ÓPTICA:

Modelos clássicos (lente simples): a) Ponto (como base de cálice de champanhe), b) Esfera sem núcleo (singular – SIS), c) Elipsóide/Espiral (como a Terra, mas mais exagerado)

Com estes modelos e “setup” podem-se reproduzir todos os mais de 70 casos de imagens múltiplas conhecidos



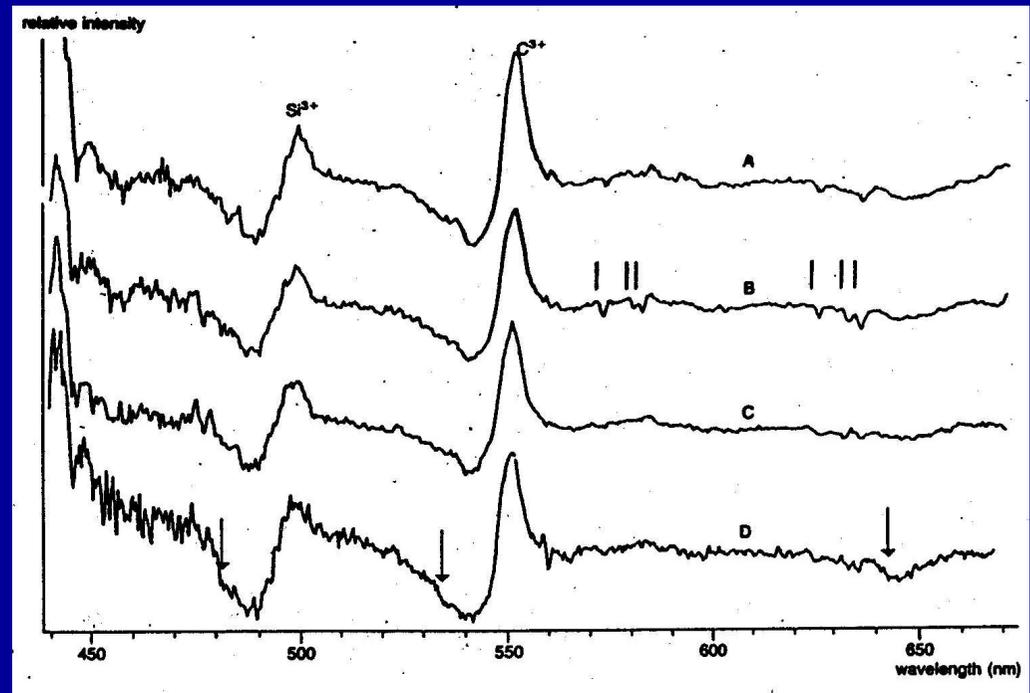
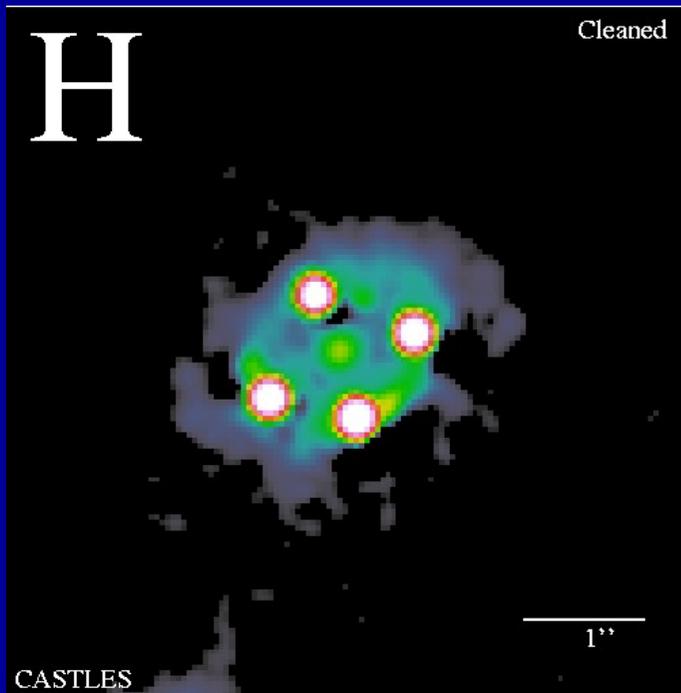
Ecrã é como se fosse uma fotografia do que o observador (pequeno orifício no cartão) vê.

5. Identificação

Estamos na presença de um efeito de lente gravitacional em **imagens múltiplas** se:

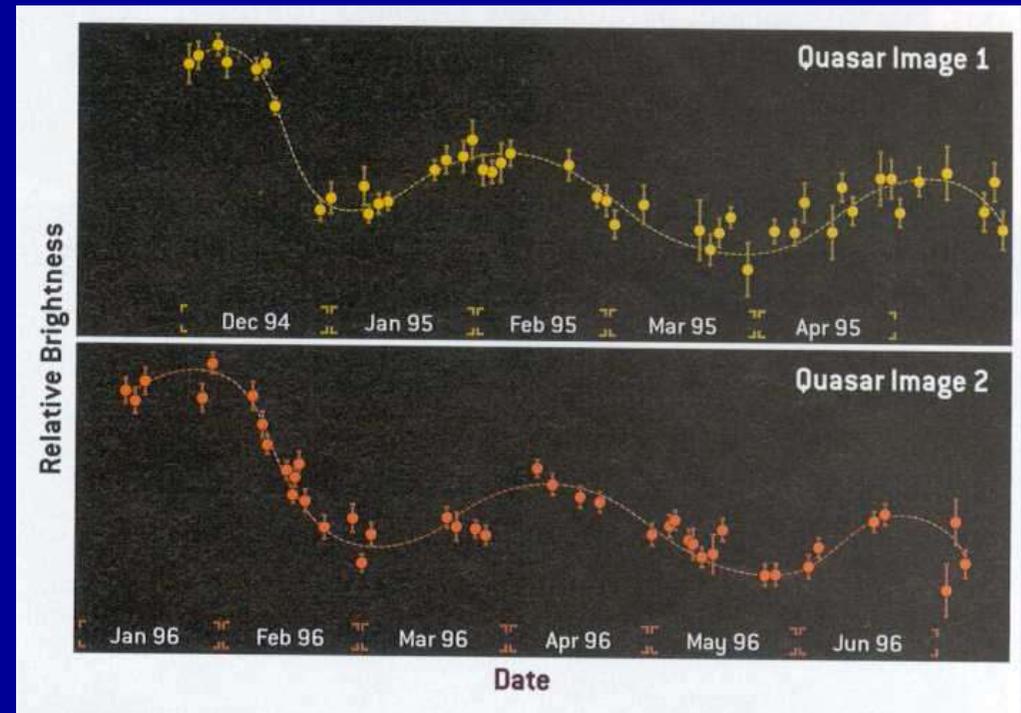
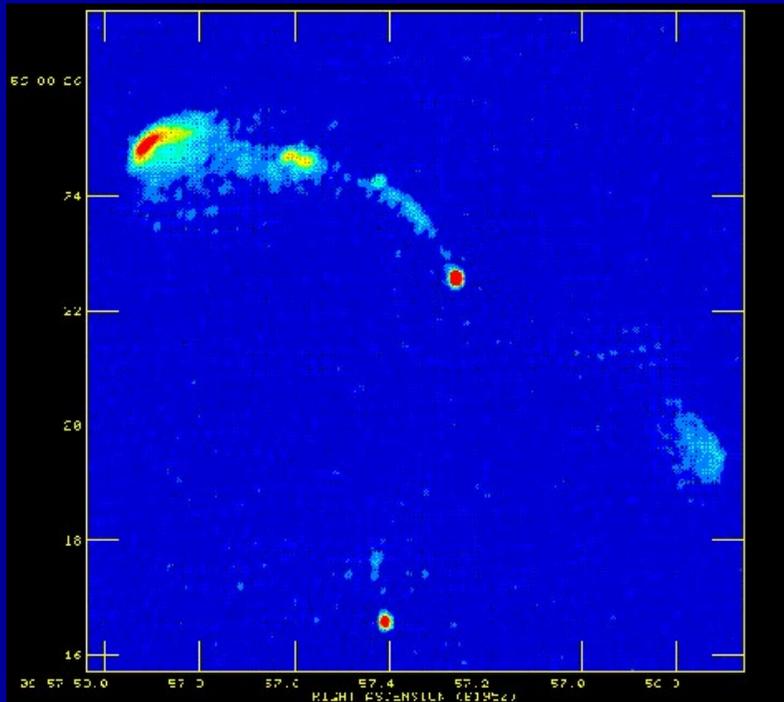
- Os espectros/cores são iguais para todas as imagens (intensidades podem ser diferentes mas não as *razões*) – nuances: microlensing

UMAstronomia



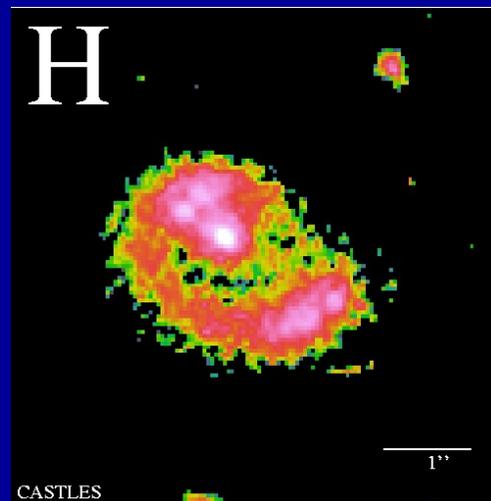
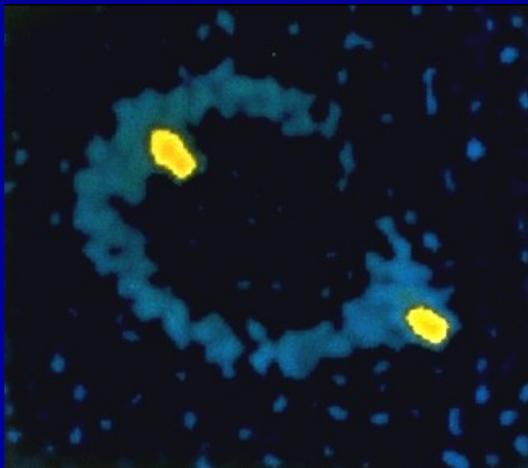
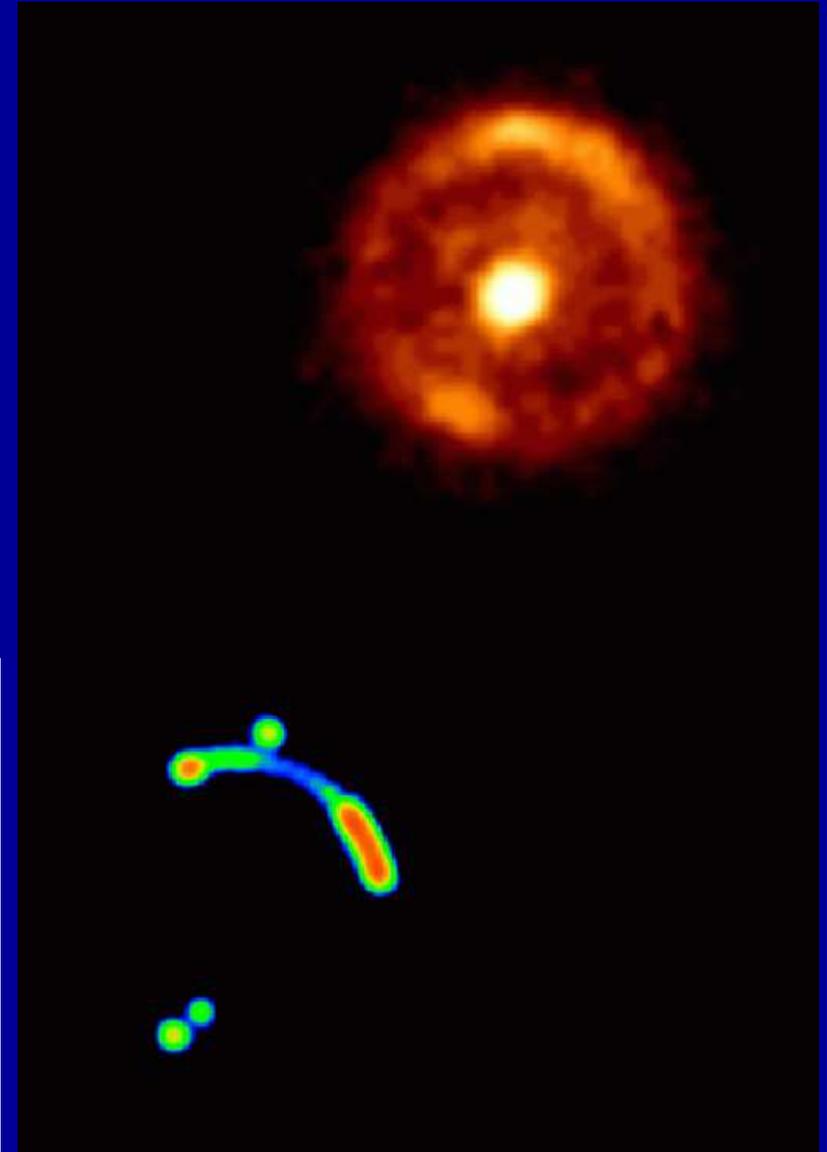
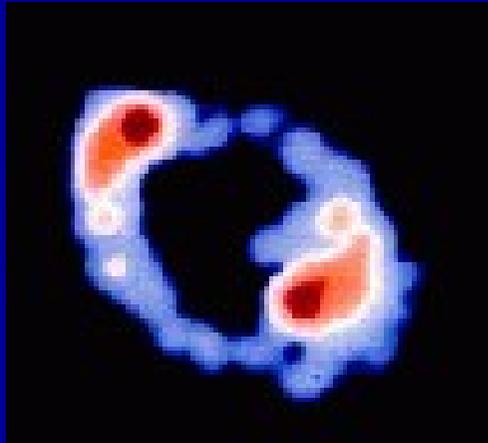
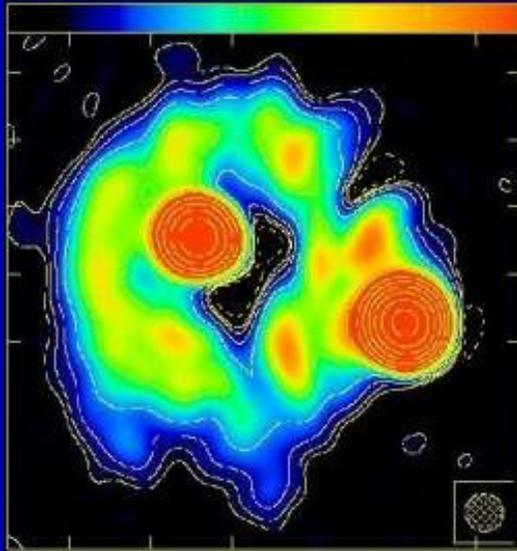
“Clover Leaf” – Trevo

- As imagens estão à mesma distância (redshift)
- Encontramos uma lente – nuances: dark lenses
- Existem “atrasos de tempo” entre as imagens (de variações semelhantes intrínsecas) proporcionais à sua separação: e.g. “old faithful” (B0957)

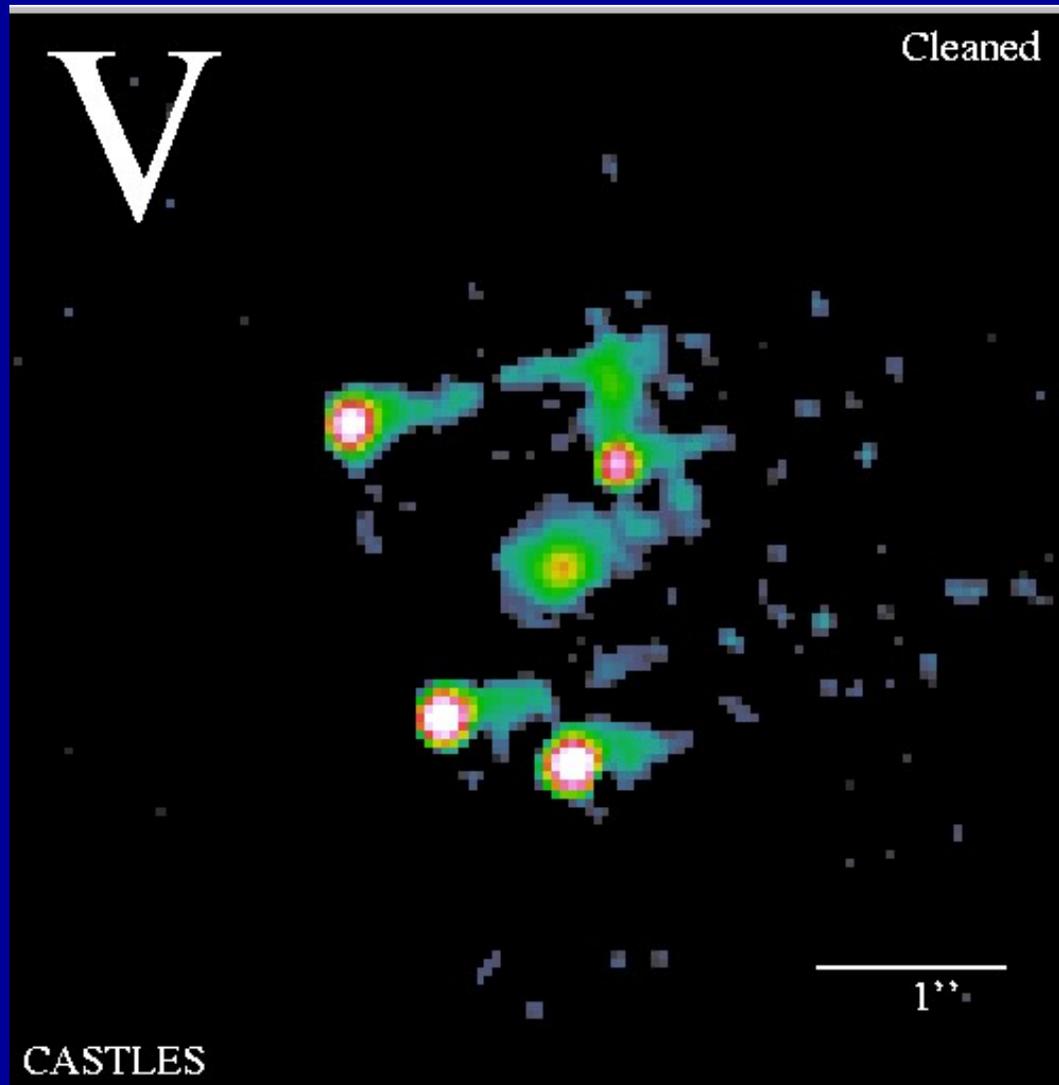




“Anéis de Einstein”



“Quad” com lente e jactos/paridade

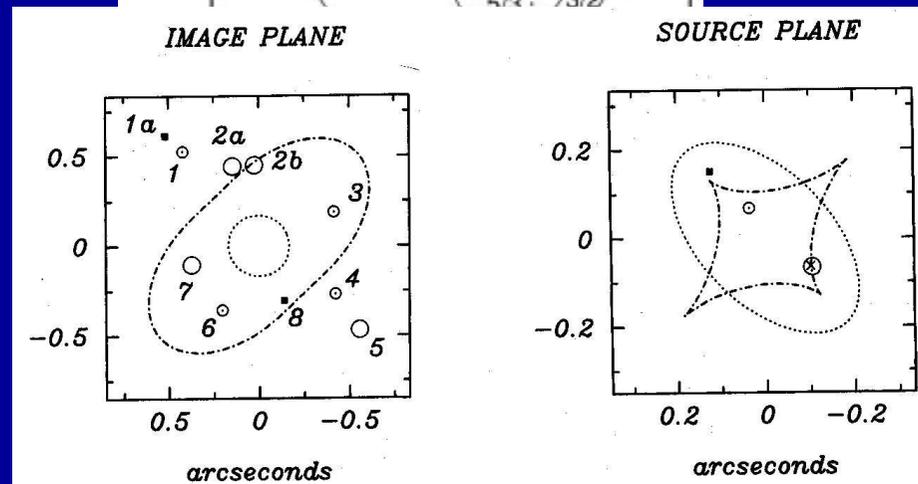
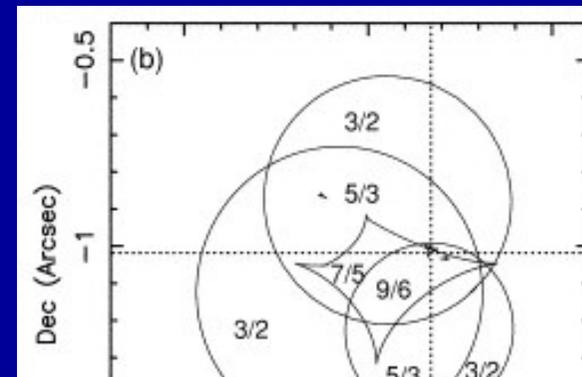
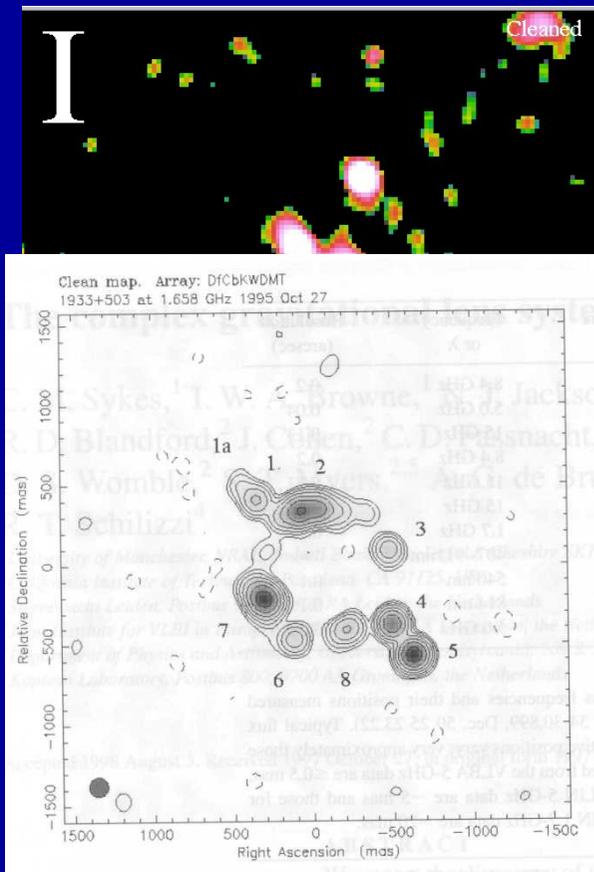


UMAstronomia



“Os Recordistas”

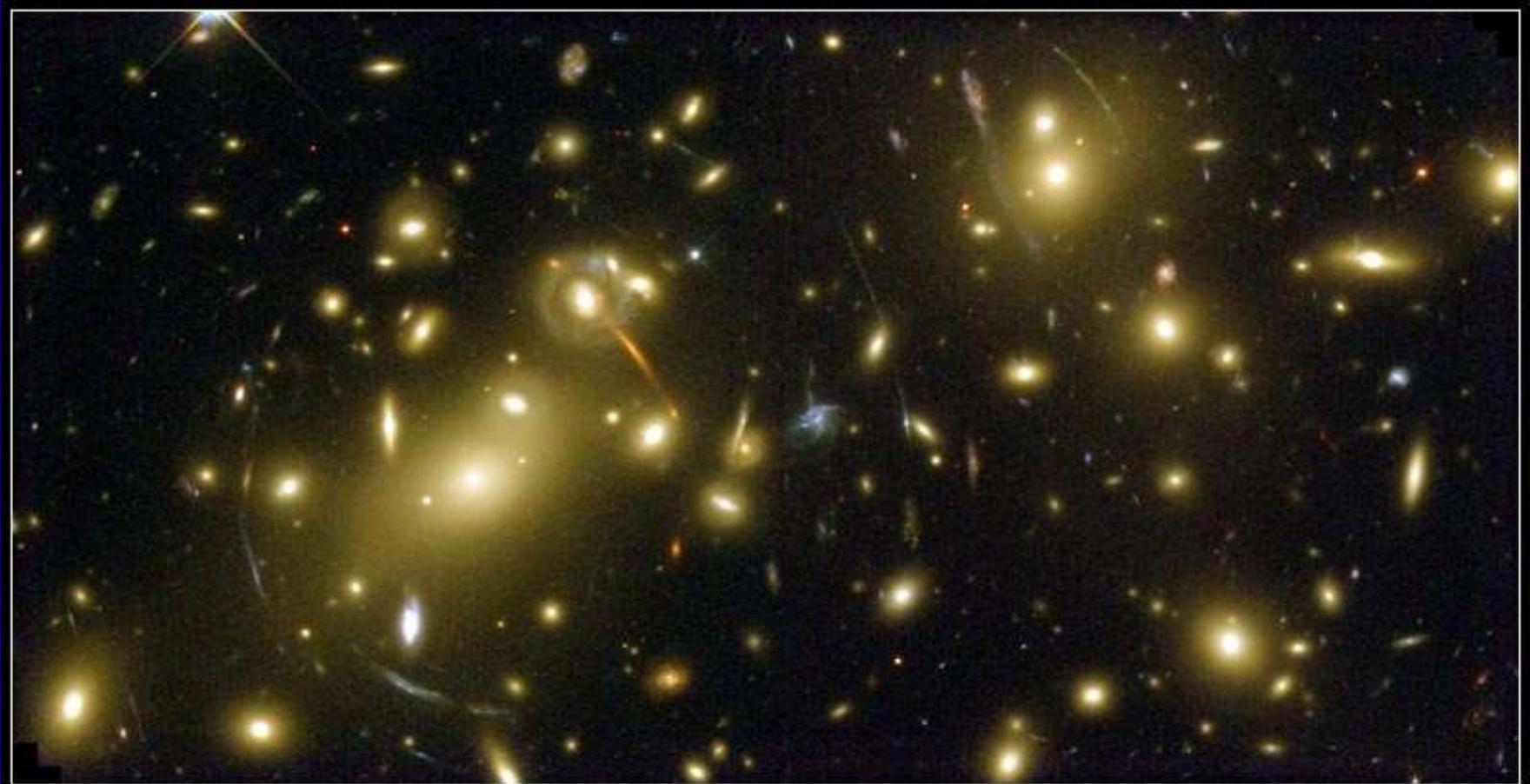
Recorde de Imagens múltiplas da mesma componente: 6 (grupo de 3 galáxias é lente):



Recorde de Imagens múltiplas da mesma fonte: 10 (de 3 componentes)



6.1.2 Imagens múltiplas em arcos/arclets (Enxames de galáxias)



Galaxy Cluster Abell 2218

HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

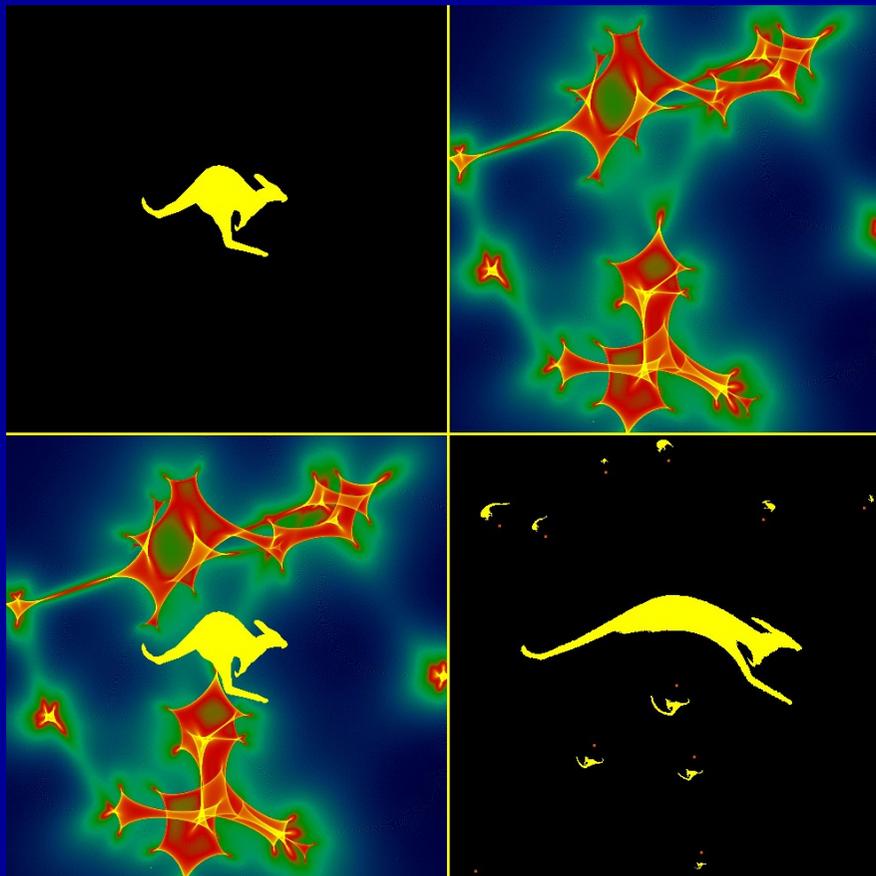


CL2244+1654

6.2 Star-Star / Star-Quasar lensing (*Micro*lensing)

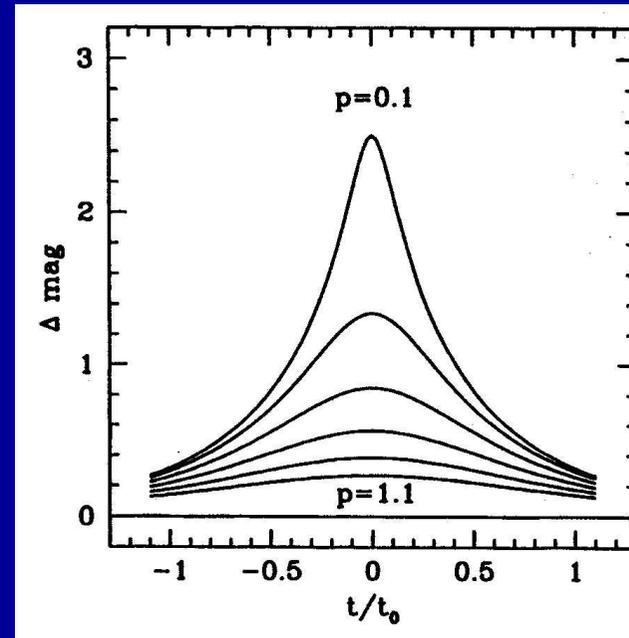
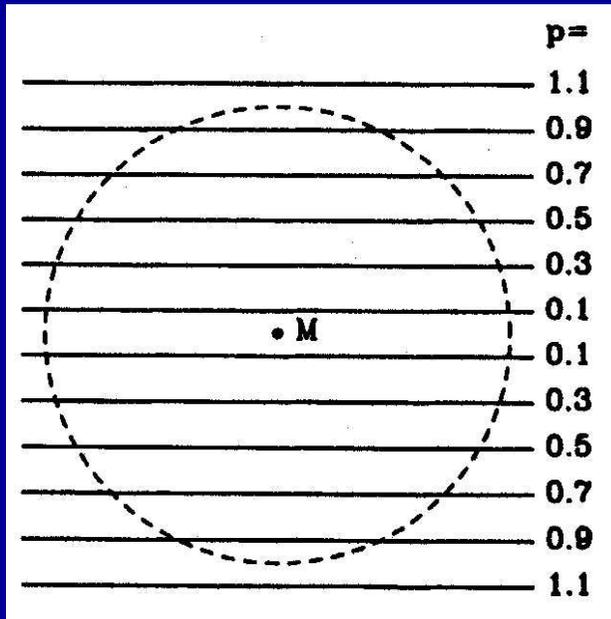
6.2.1 Star-Star

MACHO: Massive Astrophysical Compact Halo Object



A escala é 1000 vezes menor que a melhor resolução possível hoje (μ arcsec). Por isso, só se vêem os efeitos de ampliação nos “eventos”.

(vê-se a amplificação apenas)



Como sabemos que é um **MACHO** e não uma estrela variável?

1) A curva tem de ser simétrica (perfeita);

2) e tem de ser “acromática”

(todas as cores variam da mesma forma, com a mesma ampliação)

De facto, excluídas como MACHOs, mas com estudo por colegas da Astrofísica Estelar já foram identificadas perto de **um milhão** de novas estrelas variáveis!

Bolbo e LMC



OGLE (Udalski et al 92): www.astro.princeton.edu/~ogle

MACHO (Alcock et al 93): wwwmacho.mcmaster.ca

EROS (Aubourg et al 93): www.lal.in2p3.fr/EROS

DUO

AGAPE (Andrómeda)

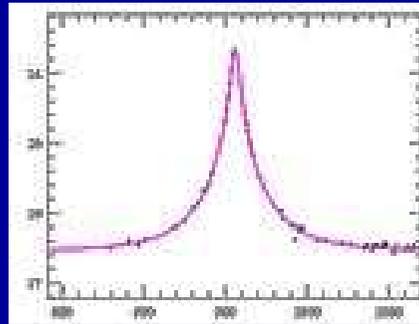
MOA

PLANET

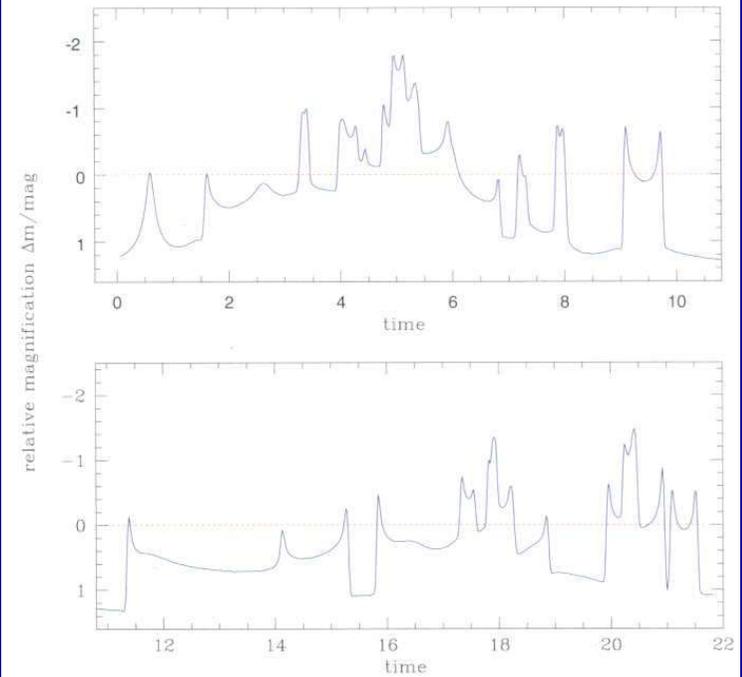
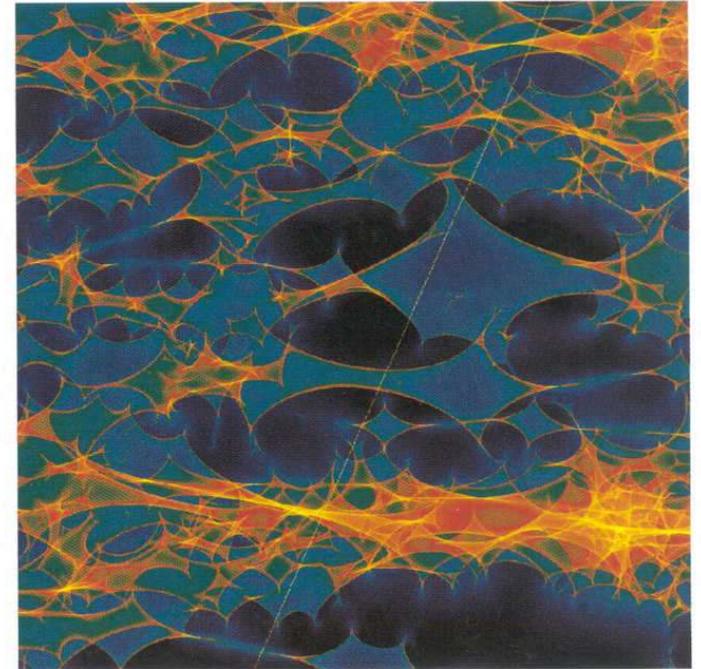
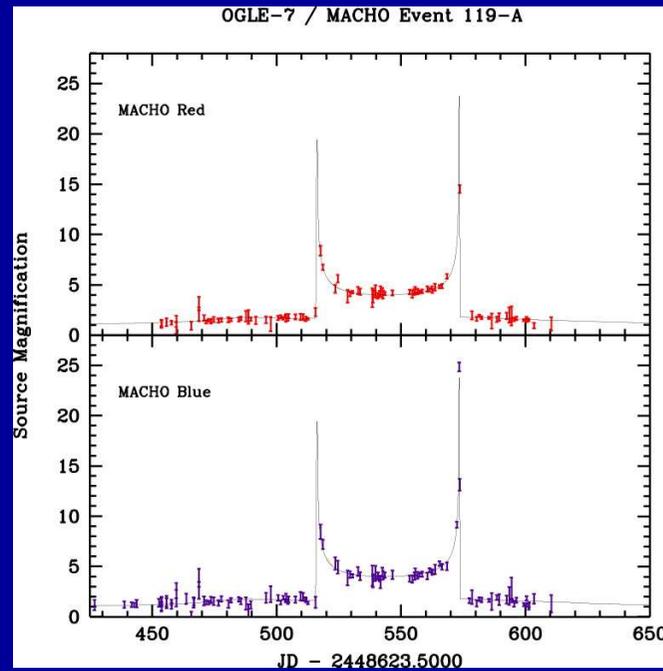
GMAN

A população de microlentes simulada tem a mesma densidade do filme; com uma população semelhante “por trás” obtemos as curvas abaixo; notem-se ampliações até cerca de 20 vezes e vários eventos binários

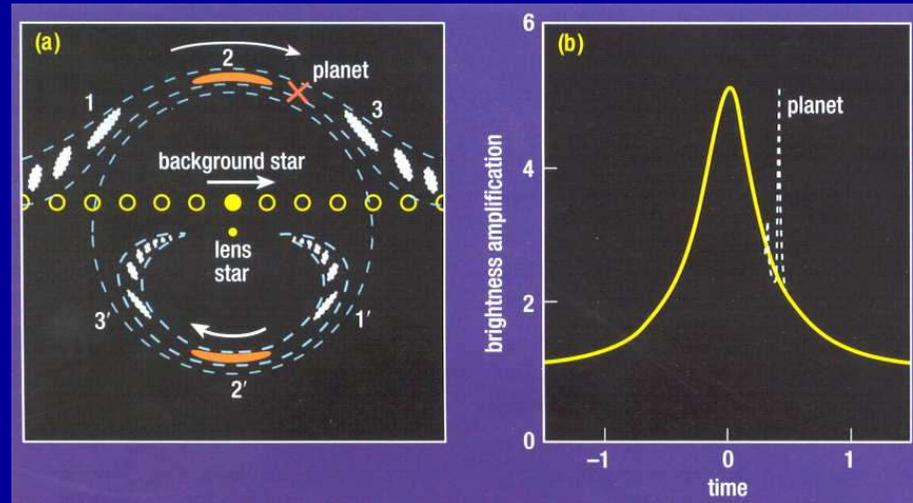
Evento típico:



Evento binário:

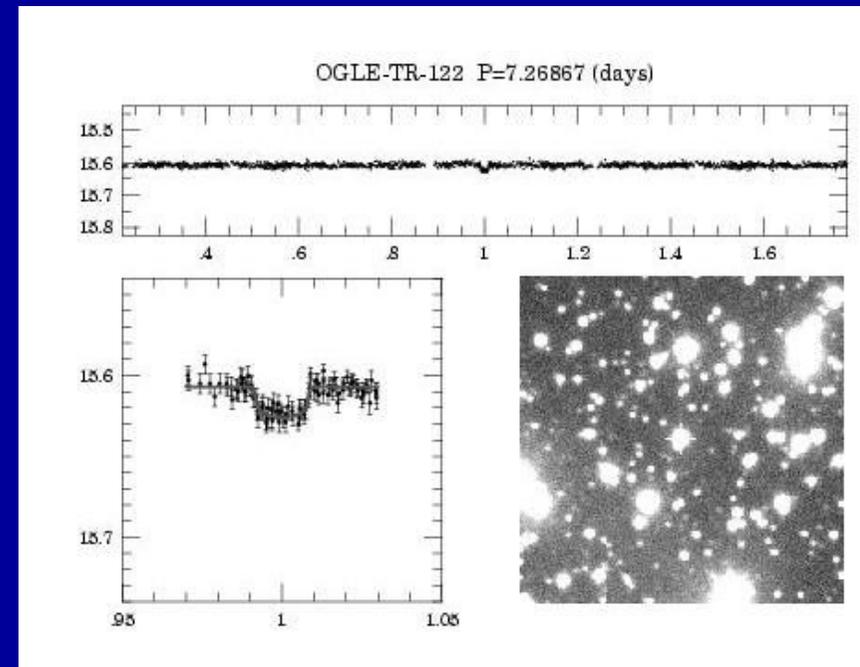


Possibilidade de detecção de planetas (simulação):



OGLEIII: 137 planet/low mass star candidates
(de eclipses, não como na curva acima):

Nota: na Madeira há potencial para se contribuir nesta área (os telescópios usados até hoje são de cerca de 1 metro de diâmetro)

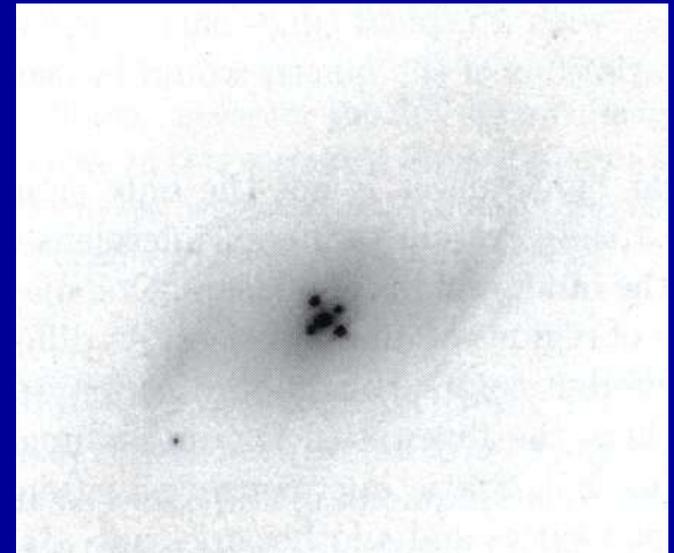
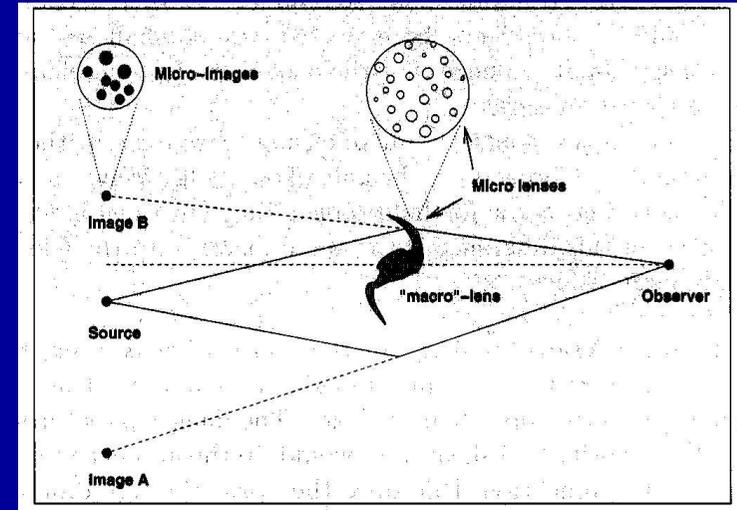


6.2.2 Star-Quasar

“Microlensing” Causado por estrelas na galáxia-lente (QSO é “pequeno”) mas pode ser também por estrelas na própria galáxia do QSO.

Nestas situações o “microlensing” só se vê numa imagem (independente do que acontece na outra): pode confundir confirmação de lentes gravitacionais se for o processo dominante (espectro sempre diferente entre as duas imagens que, de facto, são a mesma!)

B2237+0305 é ideal para microlensing!



7. Distorção/Ampliação (Weak lensing)

A elipticidade das galáxias muda (simulação abaixo) conforme distância ao centro de potencial; mais longe nem se nota nada na elipticidade – pode ser intrínseca à galáxia – “very weak lensing”. Têm de se usar processos estatísticos para a detecção destes efeitos.



(notar o strong lensing no centro)

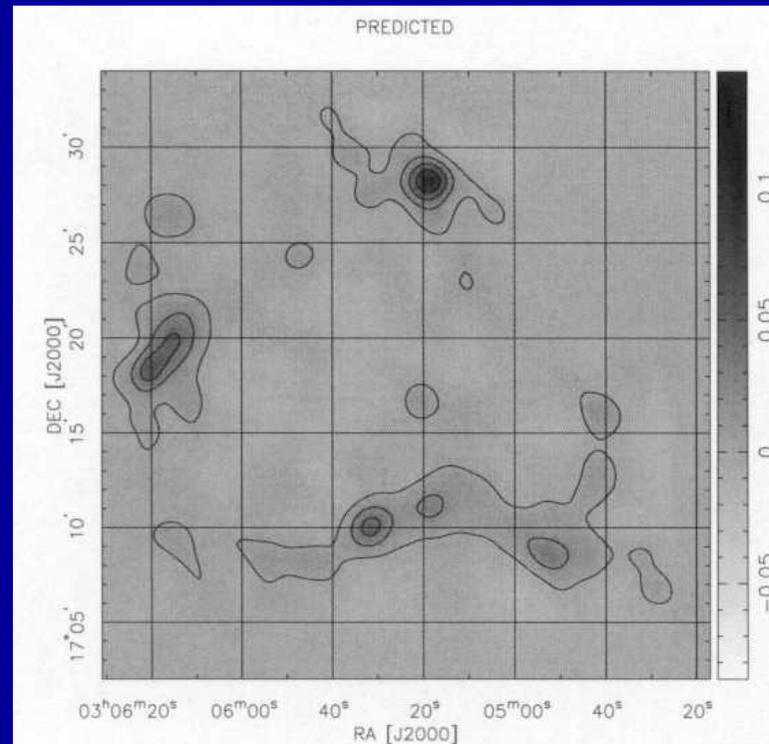


Abell 1689 (HST-ACS)



Conseguem-se determinar as distribuições de massa de:

- Enxames e Superenxames de galáxias
- O Universo como um todo
- O CMB



(3 enxames = superenxame)

8. Aplicações (Ferramenta Astrofísica)

- *Tamanho/Idade do Universo*: medir H_0 (inversamente proporcional ao “atraso de tempo”) com lentes (é independente de calibrações como para as Cefeides – HST) – processo puramente geométrico! Modelo tem de ser bem conhecido, contudo, sendo precisas imagens com boa qualidade e resolução (separações de 1”). Tem de haver variabilidade que será monitorizada para cada imagem múltipla. **Resultados (5 lentes)**: 69 ± 19 , 77 ± 29 , 53 ± 10 , 59 ± 23 , 65 ± 15 .

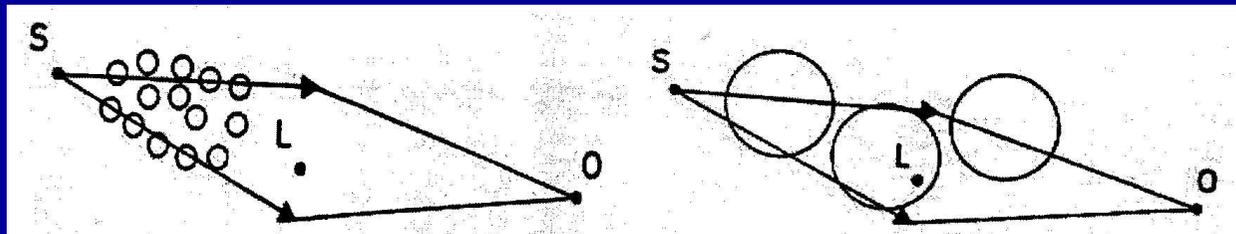
- Podem-se “pesar” buracos negros/matéria escura, que estão isolados no Universo (e, sem interações de qualquer tipo que seriam observáveis)

- Pode-se determinar a massa e a distribuição de massa em enxames e superenxames de galáxias

- *Futuro do Universo*: restringir-se (λ_0, Ω_0) e ainda Ω_{co} (do número de lentes nas amostras: < 1% dos QSOs surgem em imagens múltiplas): $\lambda_0 < 0.7$ (90%). Esta é a **constante gravitacional** “Einstein biggest blunder”; uma vez que $\Omega_0 = 0.3$ vem

$$k=1 - \Omega_0 - \lambda_0 = 0, \text{ requerido pela Inflação (à tangente)}$$

- Pode-se medir o tamanho de núvens de gás intergalácticas (invisíveis por outros métodos: muito baixo brilho superficial) – figura abaixo.
- Estuda-se a estrutura das galáxias-lentes em pormenor (já que não há outros processos, quer pela sua distância quer pela obscuridade de boa parte da mesma: Matéria Escura em halos)
- Estuda-se a estrutura do próprio Universo em larga escala
- Pode-se determinar o tamanho da região emissora dos quasares e a sua física (microlensing Star-Quasar)



Conforme a absorpção no espectro é vista nas duas imagens ou só numa, temos uma ideia do tamanho das núvens, pois sabemos a sua distância/redshift.

9. Mistérios

B2114+022: Ao fim de oito anos de trabalho foi publicado um artigo (Augusto et al 2001), mas o mistério persiste

Qual é a solução?

Proponho que pensem e me enviem comentários...

