

O UNIVERSO VISTO ATRAVÉS DE LENTES GRAVITACIONAIS



MARTÍN MAKLER

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS

Universo no Parque on-line
20 de fevereiro de 2021

O UNIVERSO VISTO ATRAVÉS DE LENTES GRAVITACIONAIS

MARTÍN MAKLER
CBPF



CBPF

MCTI



**“Não há perguntas bobas:
toda pergunta é um grito
para compreender o
mundo.”**

Carl Sagan

A luz fazendo a curva

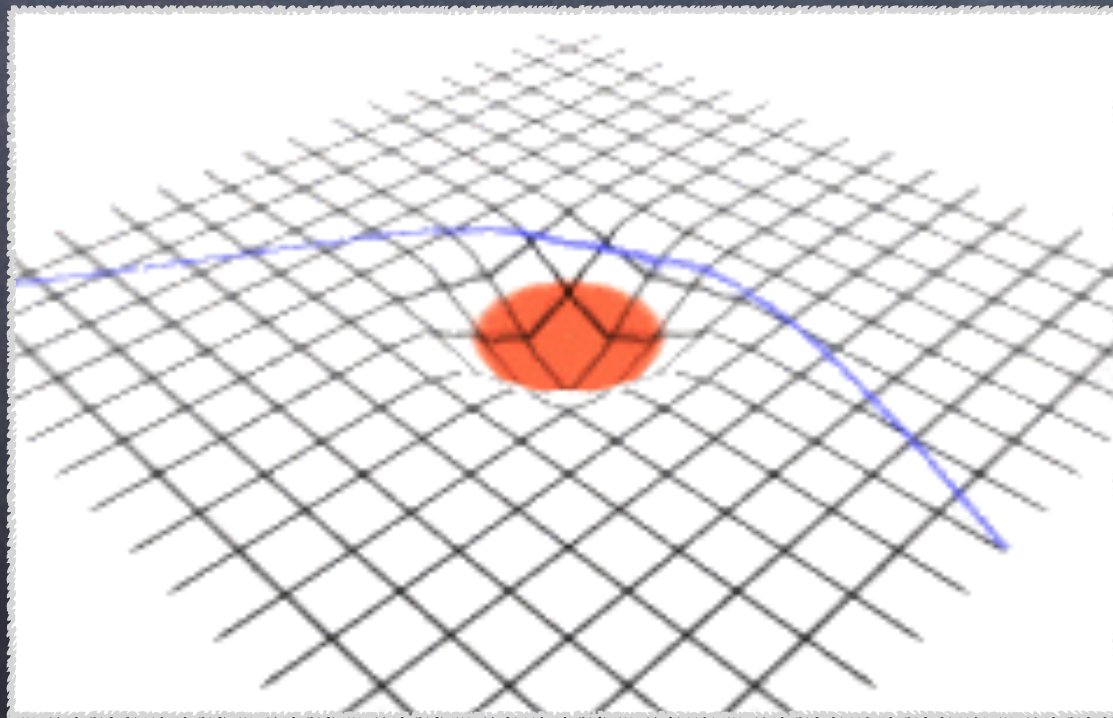
Propagação da luz e relatividade geral

1905: Einstein propõe a relatividade restrita

1911: Obtém o desvio da luz (igual ao newtoniano)

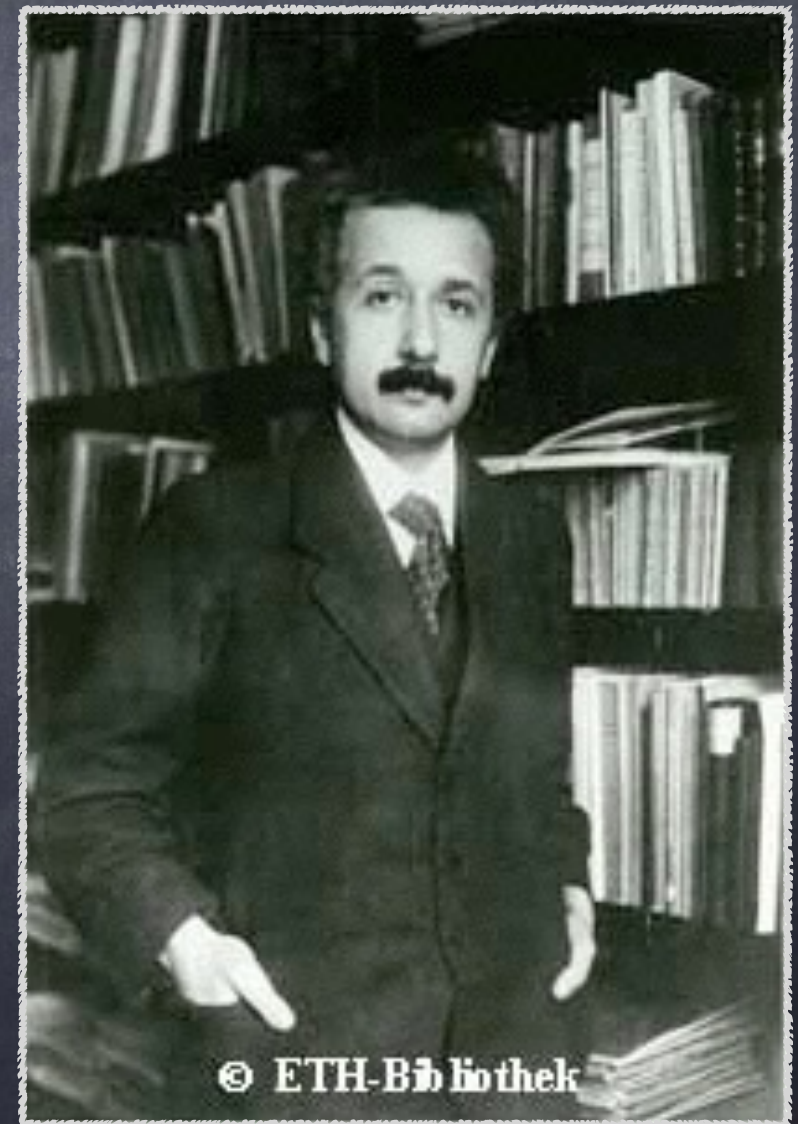
1915: Teoria da relatividade geral

Espaço-tempo curvo



Tudo o que existe “sente” a gravidade:
caio logo existo

$$E = mc^2$$



Relatividade Geral (1915): A teoria de Einstein da gravidade

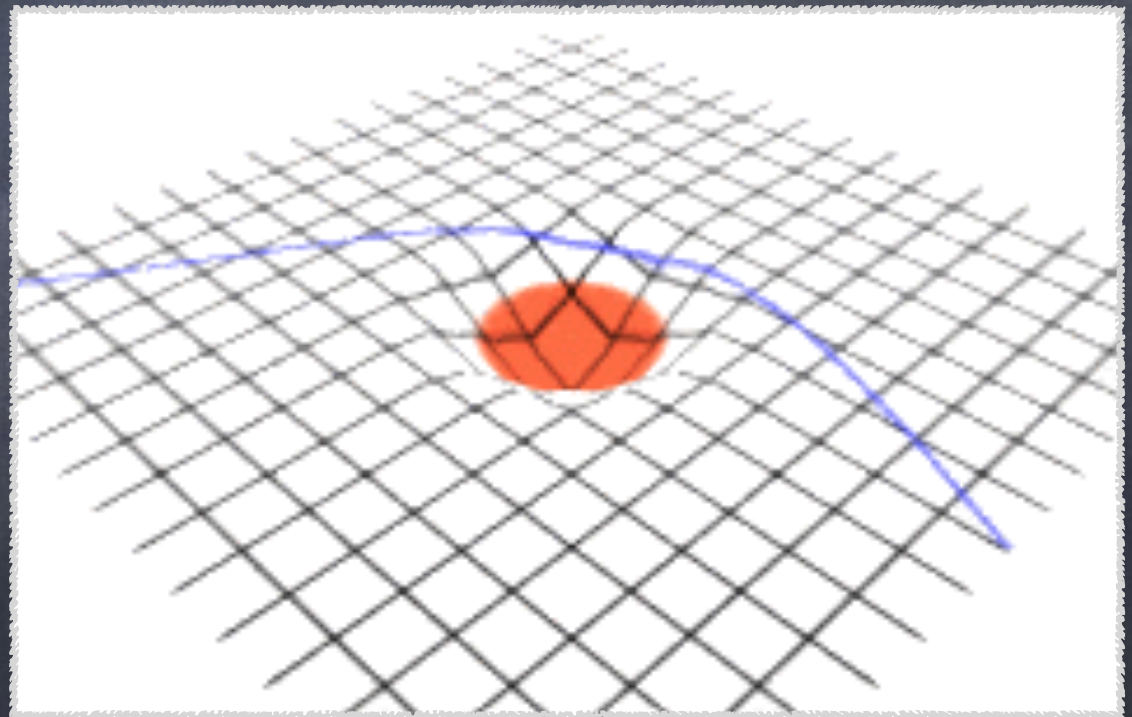
👁 10 anos depois da relatividade especial, uma nova revolução

O espaço-tempo é curvo! Seguindo a matemática do espaço-tempo curvo (Riemann) e a física física da gravidade

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

A matéria diz ao espaço como se curvar,
O espaço diz à matéria como se mover

“Tecido” do espaço-tempo, com
propriedades dinâmicas!



Relatividade Geral (1915): A teoria de Einstein da gravidade

👁 10 anos depois da relatividade especial, uma nova revolução

O espaço-tempo é curvo! Seguindo a matemática do espaço-tempo curvo (Riemann) e a física física da gravidade

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

A matéria diz ao espaço como se curvar,
O espaço diz à matéria como se mover

“Tecido” do espaço-tempo, com
propriedades dinâmicas!

👁 Compatível com a lei
de Newton (para baixas
velocidades e baixas massas)

👁 Compatível com a
relatividade restrita

👁 Explica a precessão do
perihélio de mercúrio

👁 Prevê muitos
fenômenos novos

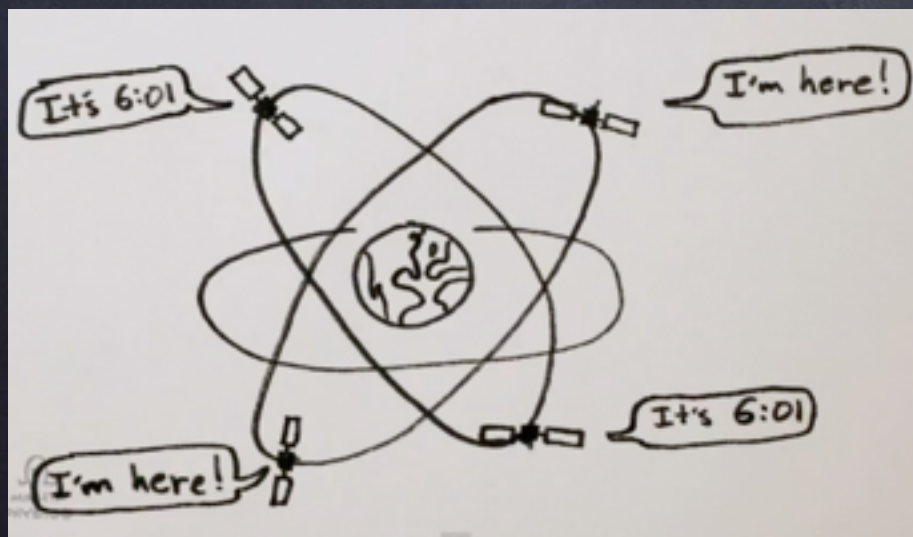
Relatividade Geral (1915): A teoria de Einstein da gravidade

10 anos depois da relatividade especial, uma nova revolução

O espaço-tempo é curvo! Seguindo a matemática do espaço-tempo curvo (Riemann) e a física física da gravidade

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

A matéria diz ao espaço como se curvar,
O espaço diz à matéria como se mover

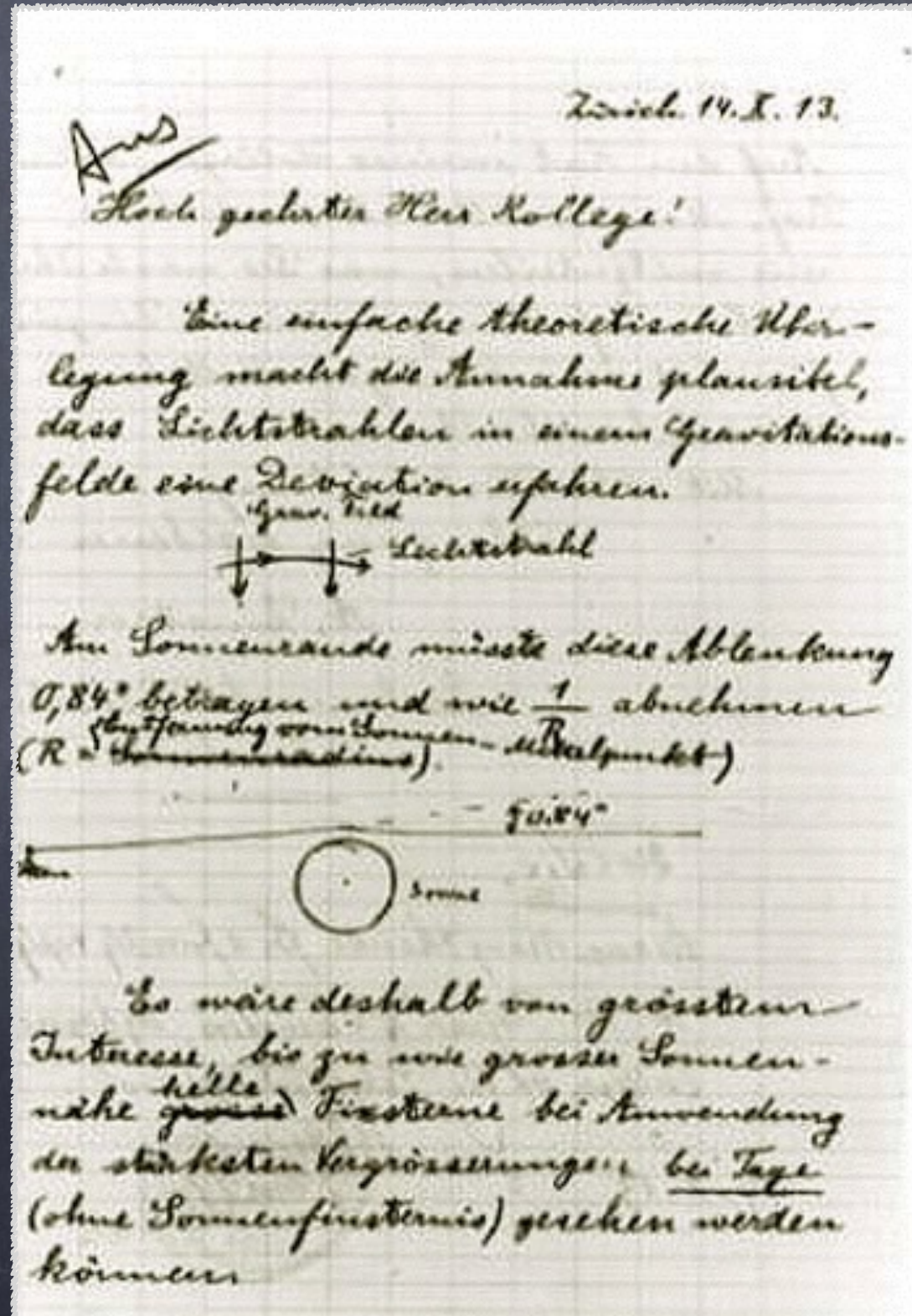


- Desvio da luz (fator dois)
- Lentes gravitacionais
- Cosmologia moderna
- Buracos negros
- Ondas gravitacionais
- Referenciais acelerados (paradoxo dos gêmeos)
- GPS!..

Breve história da deflexão da luz

Deteccção

1912: Einstein sugere
que astrônomos meçam
o desvio



Breve história da deflexão da luz

Detecção

1912: Einstein sugere que astrônomos meçam o desvio

1912: Expedição Argentina para observar eclipse em Cristina (MG)

Choveu



Breve história da deflexão da luz

Detecção

1912: Expedição Argentina para observar eclipse em Cristina (MG)

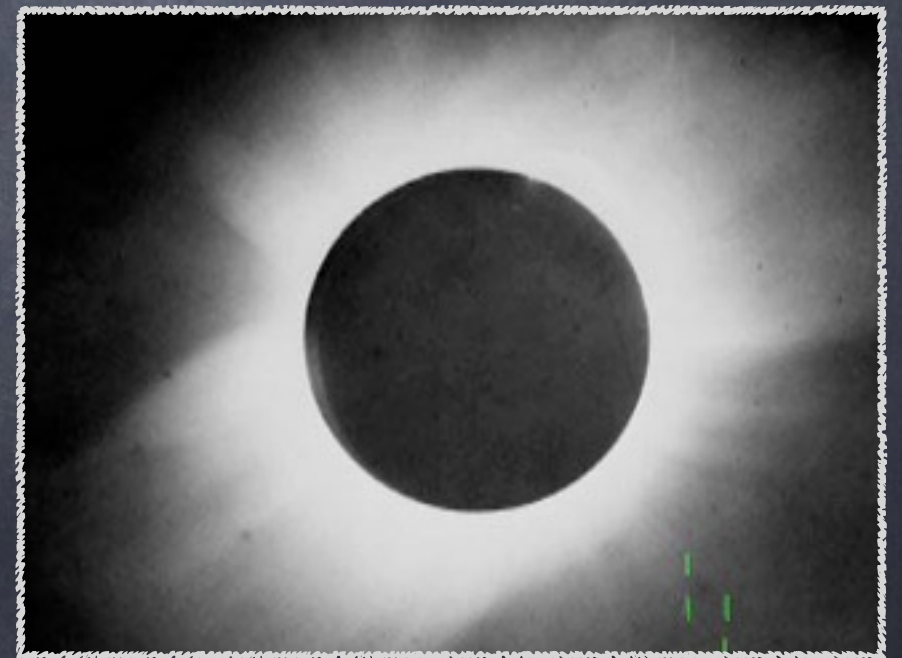
Choveu

1914: Expedição de Erwin Freundlich para observar eclipse na Criméia (Rússia)

Acabarem presos por causa da primeira guerra mundial

1919: Sobral

**Detecção do desvio da luz pela gravidade
(tempo melhor do que na Ilha de Príncipe)**



*"A pergunta que a minha mente formulou foi respondida
pelo céu ensolarado do Brasil"*

A. Einstein

Einstein virou pop!

Detecção

1912: Expedição Argentina para observar eclipse em Cristina (MG)

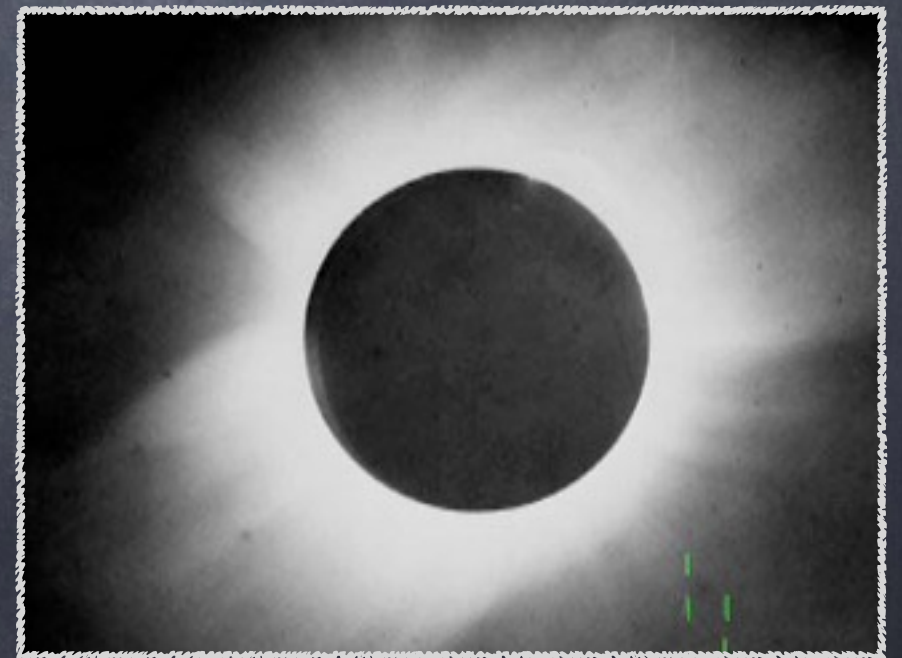
Choveu

1914: Expedição de Erwin Freundlich para observar eclipse na Criméia (Rússia)

Acabaram presos por causa da primeira guerra mundial

1919: Sobral

Detecção do desvio da luz pela gravidade
(tempo melhor do que na Ilha de Príncipe)



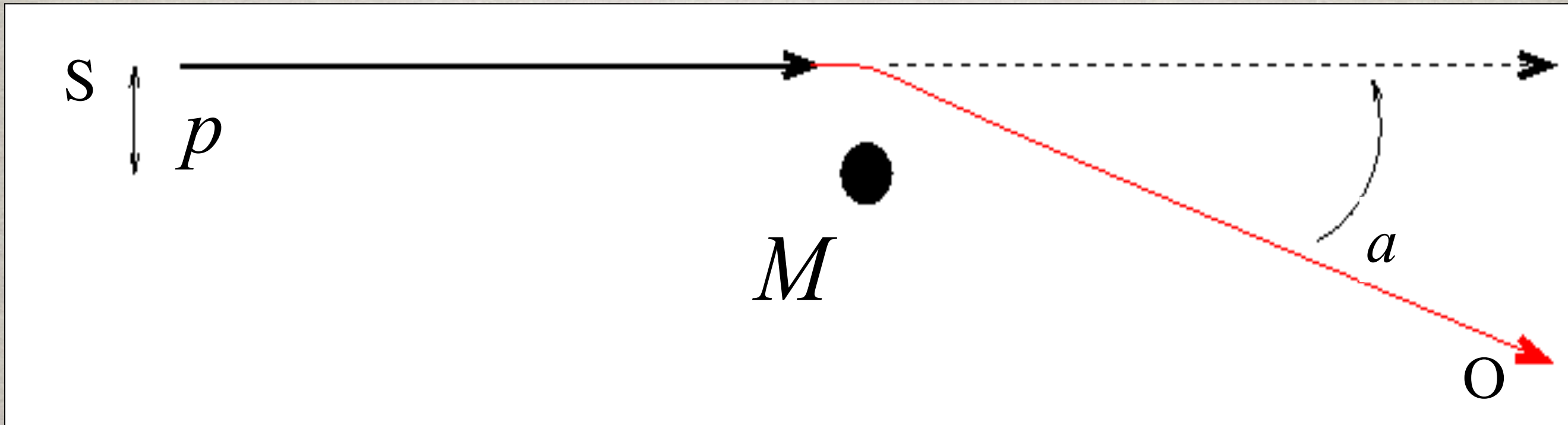
"A pergunta que a minha mente formulou foi respondida
pelo céu ensolarado do Brasil"

A. Einstein

A wide-angle photograph of a beach. The foreground is a sandy beach with some small rocks and debris. The middle ground is the turquoise ocean with gentle waves. The background is a clear blue sky. The text "LENTES GRAVITACIONAIS" is overlaid in the center of the image.

LENTES GRAVITACIONAIS

DESVIO DA LUZ PELA GRAVITAÇÃO



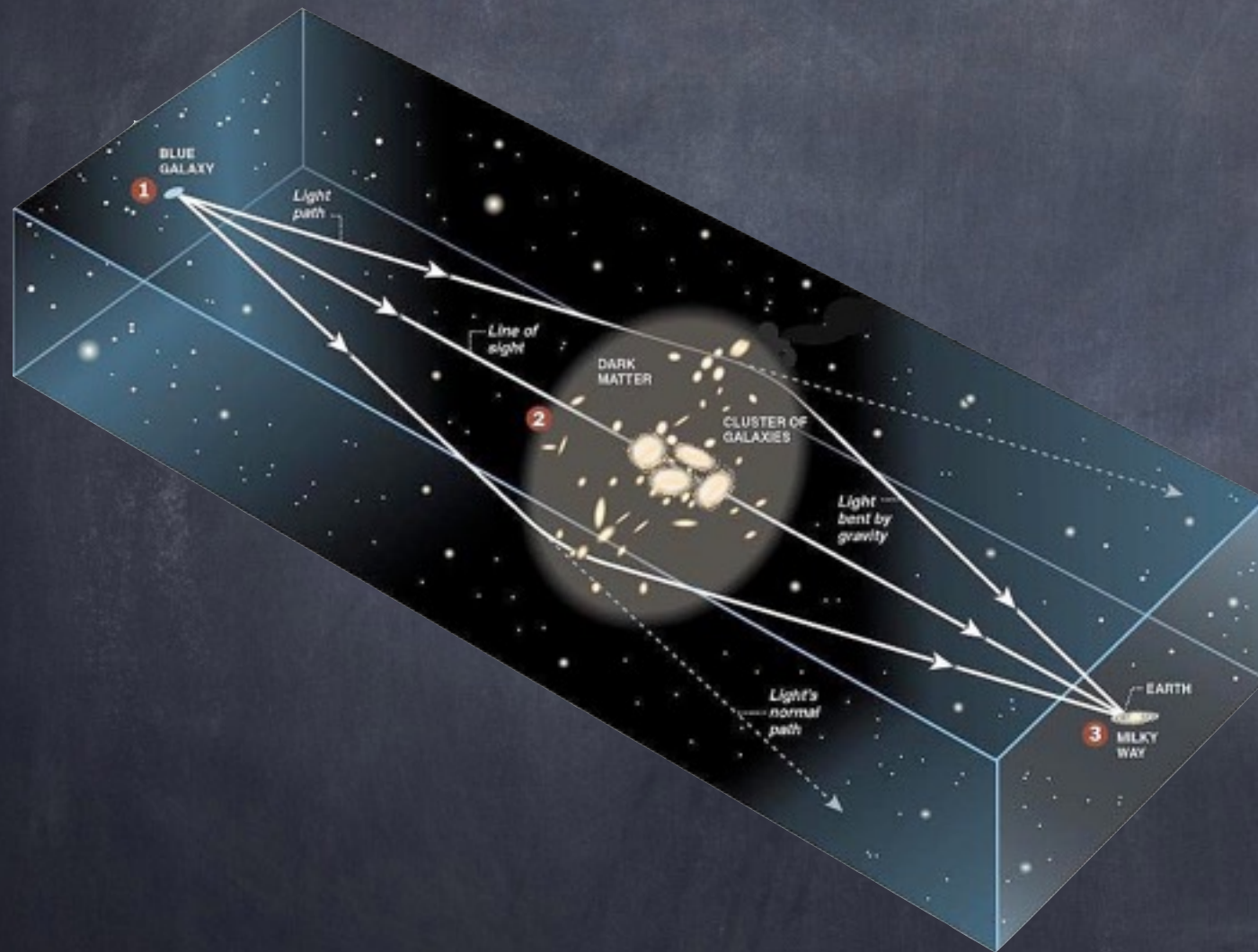
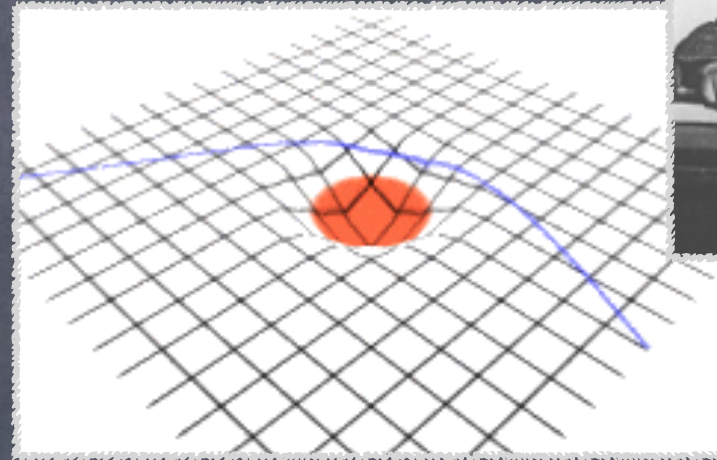
Desvio causado
por uma fonte
pontual:

$$a = \frac{4GM}{c^2} \frac{1}{p}$$

● Acromático

Lentes Gravitacionais

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

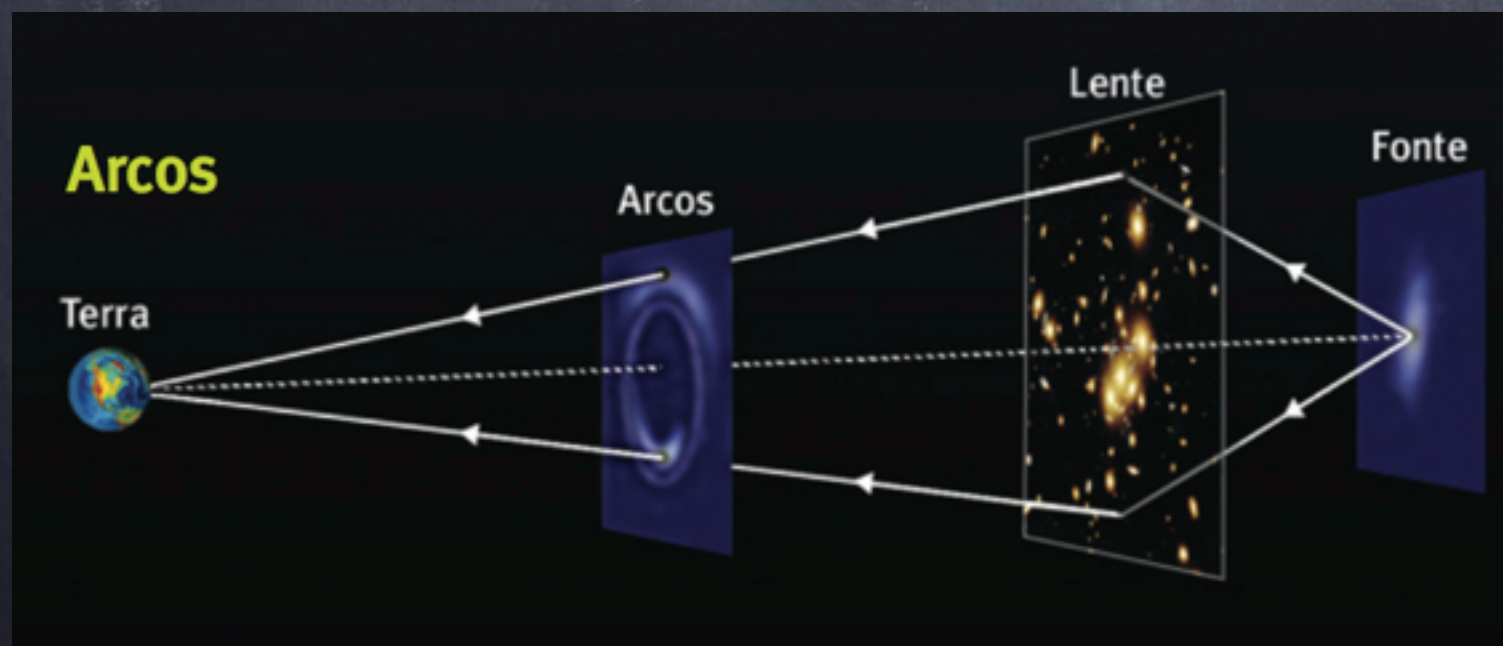


Imagens múltiplas
Miragens gravitacionais



Efeito forte de lente

- Imagens múltiplas, grandes deformações, magnificação, atraso temporal
 - Trajetória de luz no espaço curvo
 - brilho superficial conservado
 - acromático
 - estrutura de galáxias e aglomerados → matéria escura e bárions
 - informações complementares sobre a cosmologia e testes da gravidade
- } → Telescópios gravitacionais



efeito forte de lentes, gravidade fraca



arcos gravitacionais

UMA MIRÍADE DE FENÔMENOS

Intensidade

- Lenteamento forte
 - Grandes magnificações
 - Imagens múltiplas
 - Distorções
 - Anéis
 - Arcos
- Lenteamento fraco
 - Pequena rotação
 - Pequena magnificação
 - Detectado estatisticamente

Escala angular

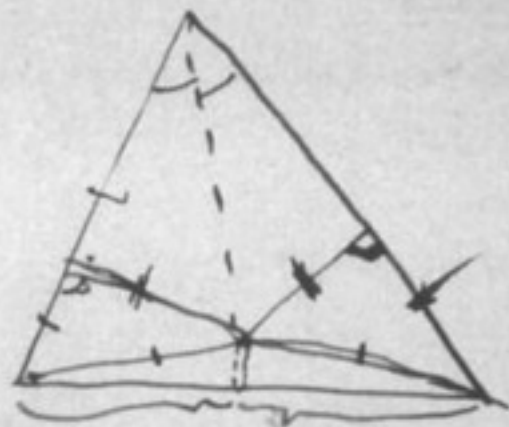
- Micro/mili-lenteamento
 - MACHOS
 - Busca de planetas
- Micro-lenteamento
 - Quasares
- “Macro-lenteamento”
 - Galáxias
 - Aglomerados
 - Estrutura em grande escala

escalas pequenas: femtolensing
(+ótica ondulatória)

lenteamento de ondas gravitacionais

campo forte: retrolensing, BH shadow

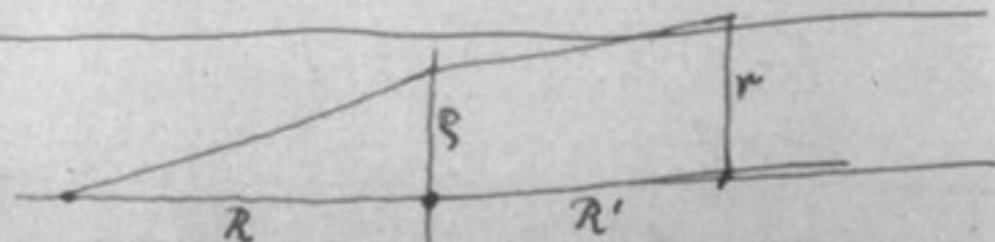
Alle Dreiecke sind gleichschenkelig.



Heckersteinberg

Berlin-Halensee,

Machin Friedrichstr. 33.



$$r = s \frac{R+R'}{R} - \frac{R'\alpha}{s}$$

$$r_0 = s_0 - \frac{1}{s_0} \dots (1)$$

$$s_0^2 = s^2 \frac{R+R'}{R R' \alpha}$$

Einsteigl. $r = \dots - \frac{R\alpha}{s} = \dots - \frac{R\alpha}{s_0} \sqrt{\frac{R+R'}{R R' \alpha}}$
 $= \dots - \frac{1}{s_0} \sqrt{\frac{R}{R'} (R+R') \alpha}$

≠

$$\left. \begin{aligned} r_0 &= r \sqrt{\frac{R}{R' (R+R') \alpha}} \\ s_0 &= s \sqrt{\frac{R+R'}{R R' \alpha}} \end{aligned} \right\} (2)$$

1) gibt zwei Wurzeln für s_0

Von hier an Index ϕ weglassen.

$$2 + r^2 = s^2 + \frac{1}{s^2}$$

$$f = \varphi + \frac{\pi^2}{\varphi}$$

$$df = \left(1 - \frac{\pi^2}{\varphi^2}\right) d\varphi = \left(1 - \frac{1}{s^2}\right) d\varphi$$

$$R df = \pm H d\varphi$$

$$R = \pm \frac{H}{1 - \frac{1}{s^2}}$$

$$R_{tot} = H \left\{ \frac{1}{1 - \frac{1}{s_1^2}} + \frac{1}{\frac{1}{s_2^2} - 1} \right\} \dots (3)$$

Klammer gibt relative Helligkeit.

$$r = \frac{1}{x} - x$$

$$\left\{ \right\} = \frac{1}{1 - x_1^4} + \frac{1}{x_2^4 - 1}$$

DISCUSSION

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.

The light coming from a star A traverses the gravitational field of another star B , whose radius is R_0 . Let there be an observer at a distance D from B and at a distance x , small compared with D , from the extended central line $\overline{AB}$. According to the general theory of relativity, let α_0 be the deviation of the light ray passing the star B at a distance R_0 from its center.

For the sake of simplicity, let us assume that $\overline{AB}$ is large, compared with the distance D of the observer from the deviating star B . We also neglect the eclipse (geometrical obscuration) by the star B , which indeed is negligible in all practically important cases. To permit this, D has to be very large compared to the radius R_0 of the deviating star.

It follows from the law of deviation that an observer situated exactly on the extension of the central line $\overline{AB}$ will perceive, instead of a point-like star A , a luminous circle of the angular radius β around the center of B , where

$$\beta = \sqrt{\alpha_0 \frac{R_0}{D}}.$$

It should be noted that this angular diameter β does

not decrease like $1/D$, but like $1/\sqrt{D}$, as the distance D increases.

Of course, there is no hope of observing this phenomenon directly. First, we shall scarcely ever approach closely enough to such a central line. Second, the angle β will defy the resolving power of our instruments. For, α_0 being of the order of magnitude of one second of arc, the angle R_0/D , under which the deviating star B is seen, is much smaller. Therefore, the light coming from the luminous circle can not be distinguished by an observer as geometrically different from that coming from the star B , but simply will manifest itself as increased apparent brightness of B .

The same will happen, if the observer is situated at a small distance x from the extended central line $\overline{AB}$. But then the observer will see A as two point-like light-sources, which are deviated from the true geometrical position of A by the angle β , approximately.

The apparent brightness of A will be increased by the lens-like action of the gravitational field of B in the ratio q . This q will be considerably larger than unity only if x is so small that the observed positions of A and B coincide, within the resolving power of our instruments. Simple geometric considerations lead to the expression

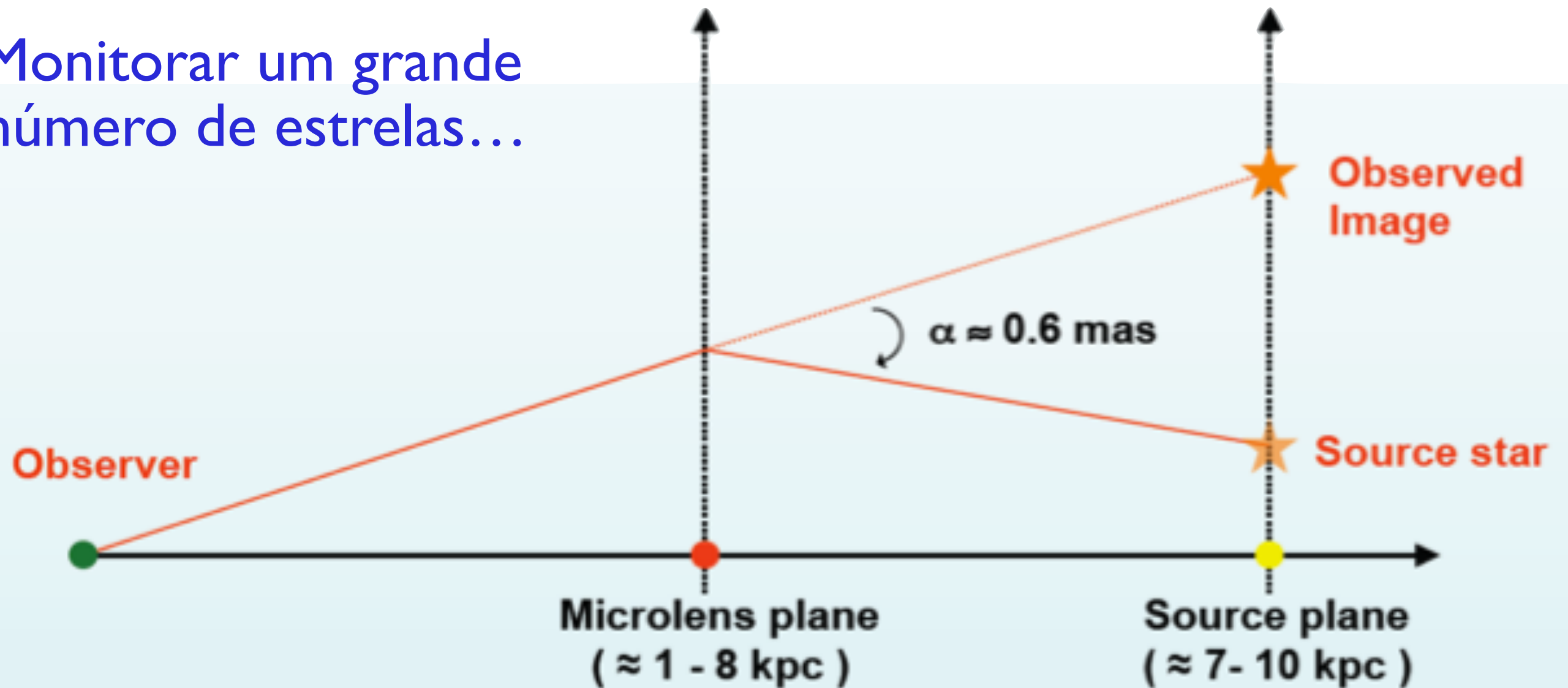
$$q = \frac{l}{x} \cdot \frac{1 + \frac{x^2}{2l^2}}{\sqrt{1 + \frac{x^2}{4l^2}}},$$

where

$$l = \sqrt{\alpha_0 D R_0}.$$

Micro(mili)lenteamento na galáxia

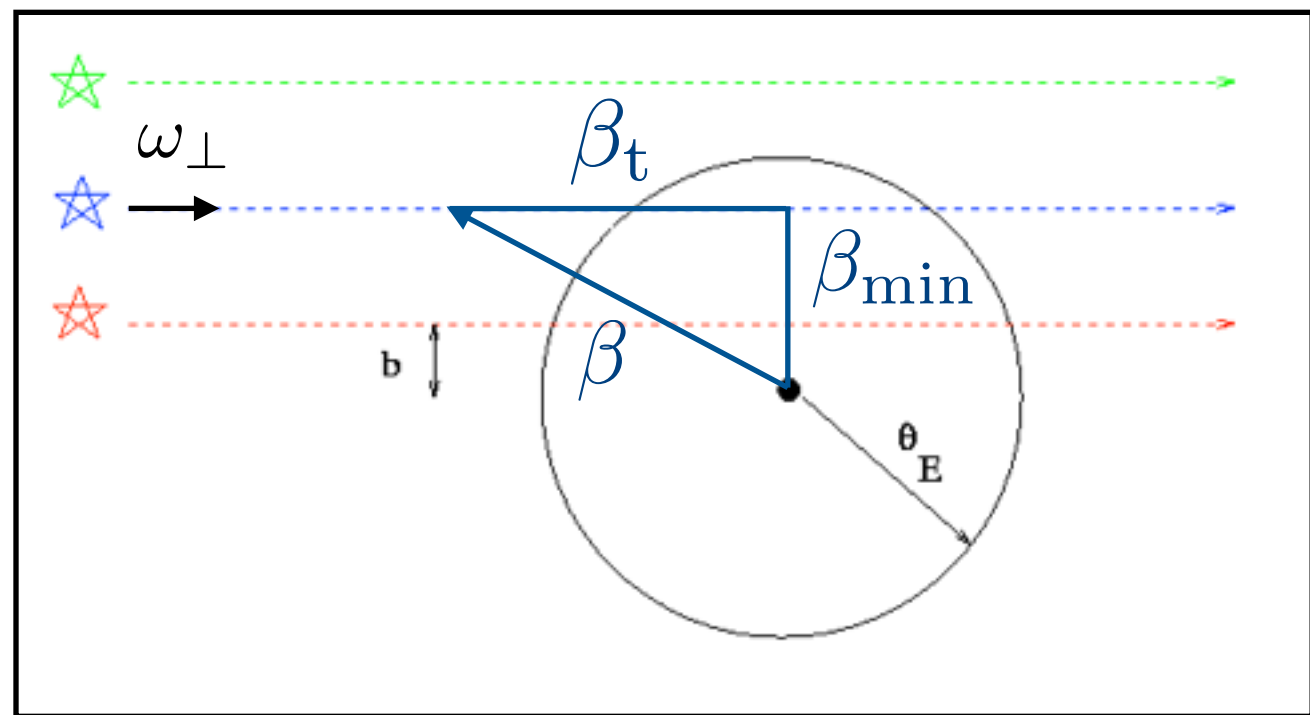
Monitorar um grande número de estrelas...



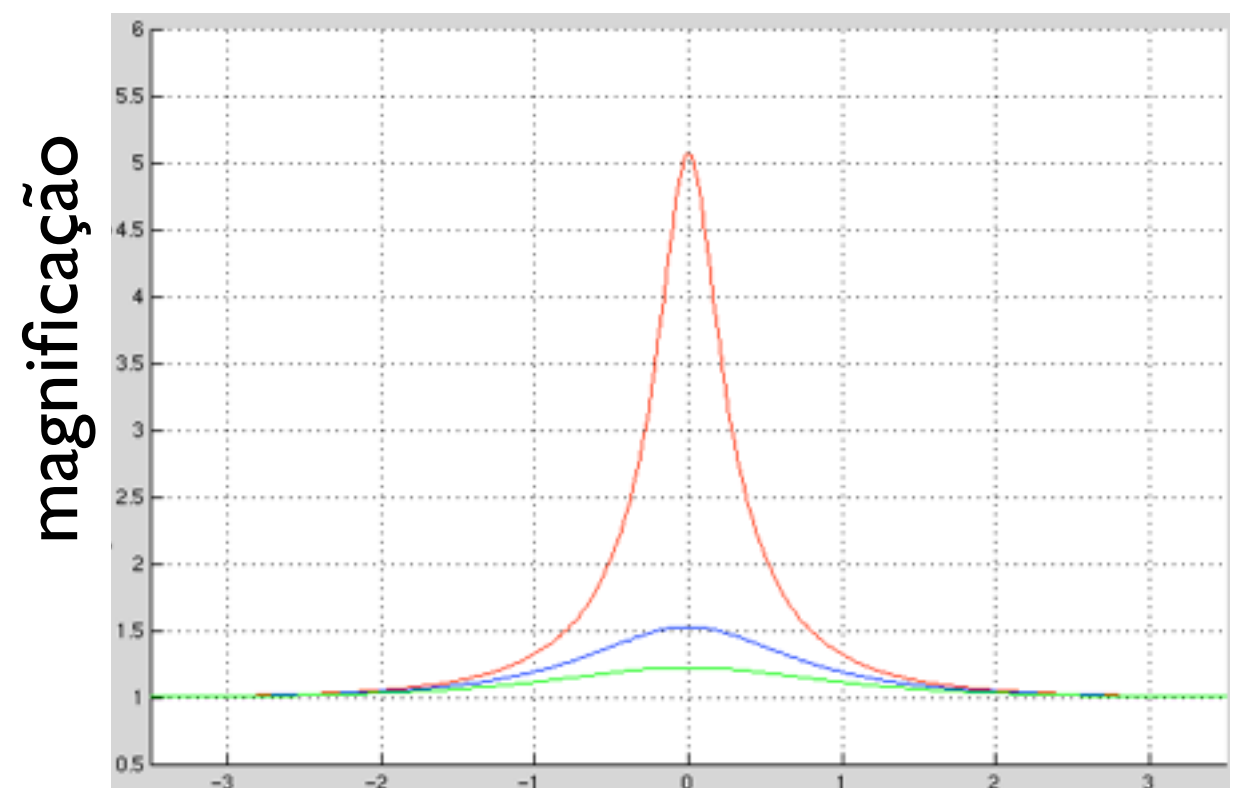
Microlenteamento I

Lente Pontual

$$\mu = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}} \quad u = \beta/\theta_E \quad \beta_t = \omega_{\perp} t = \frac{v_{\perp}}{D_{OL}} t$$



Plano de lente



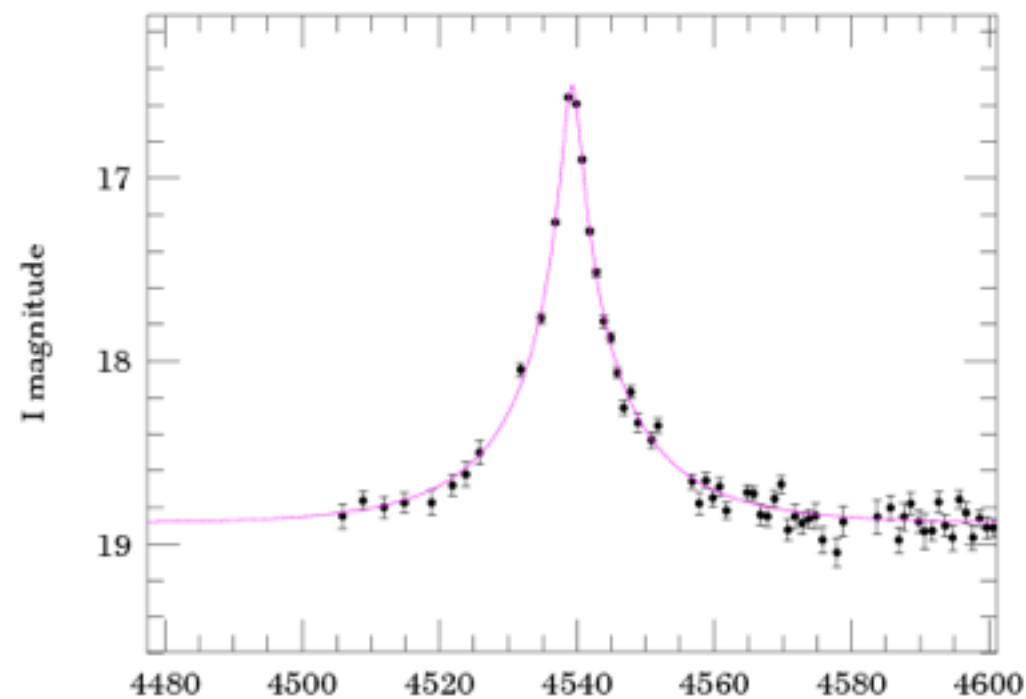
Distância à lente na direção x_l
em unidades do raio de Einstein

Exercício: escrever $\mu(t)$ usando que a velocidade relativa entre a lente e a fonte é constante. Fazer os gráficos de $\mu(t)$ com o tempo em unidades de $t_E = D_{OL}\theta_E/v_{\perp}$

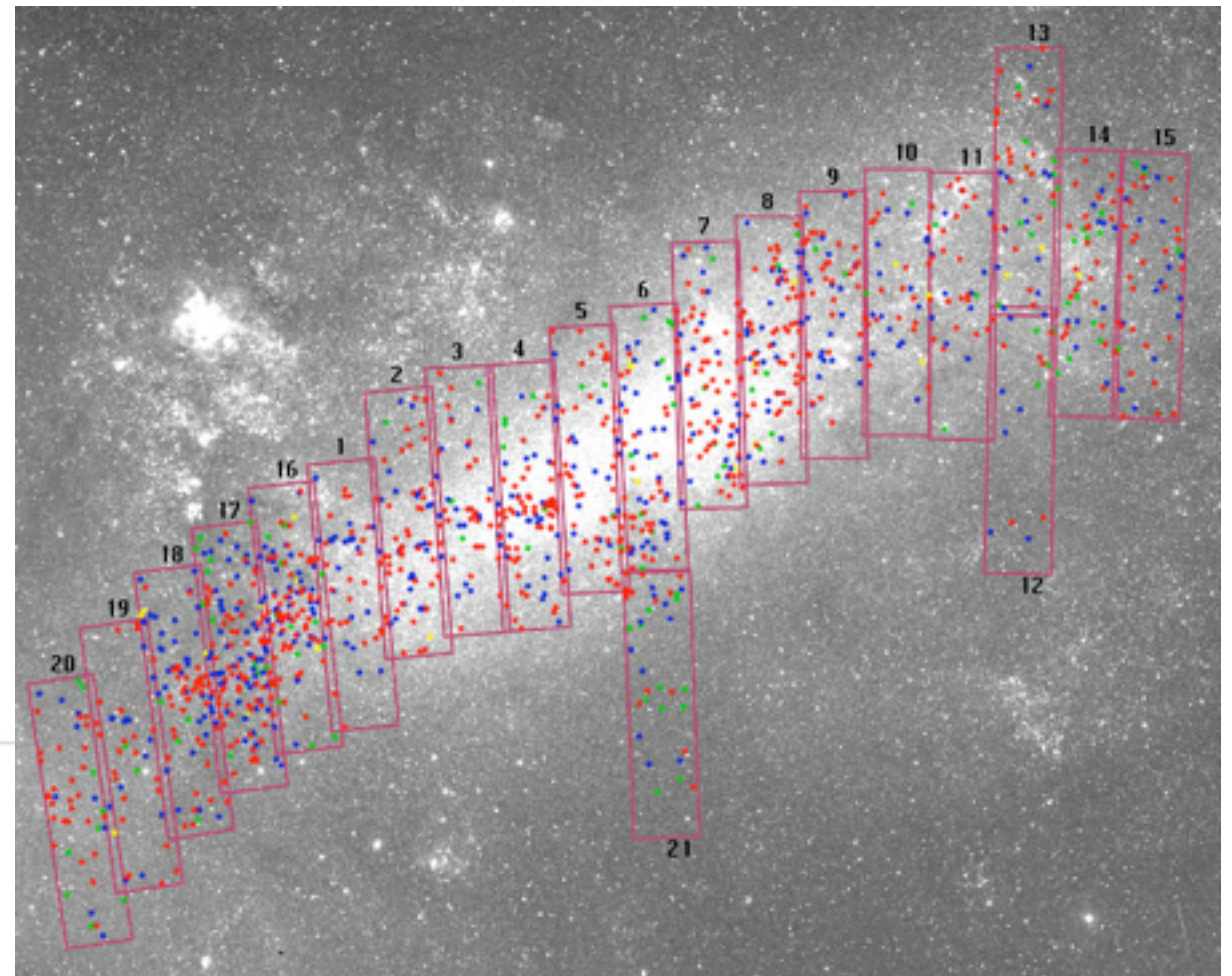
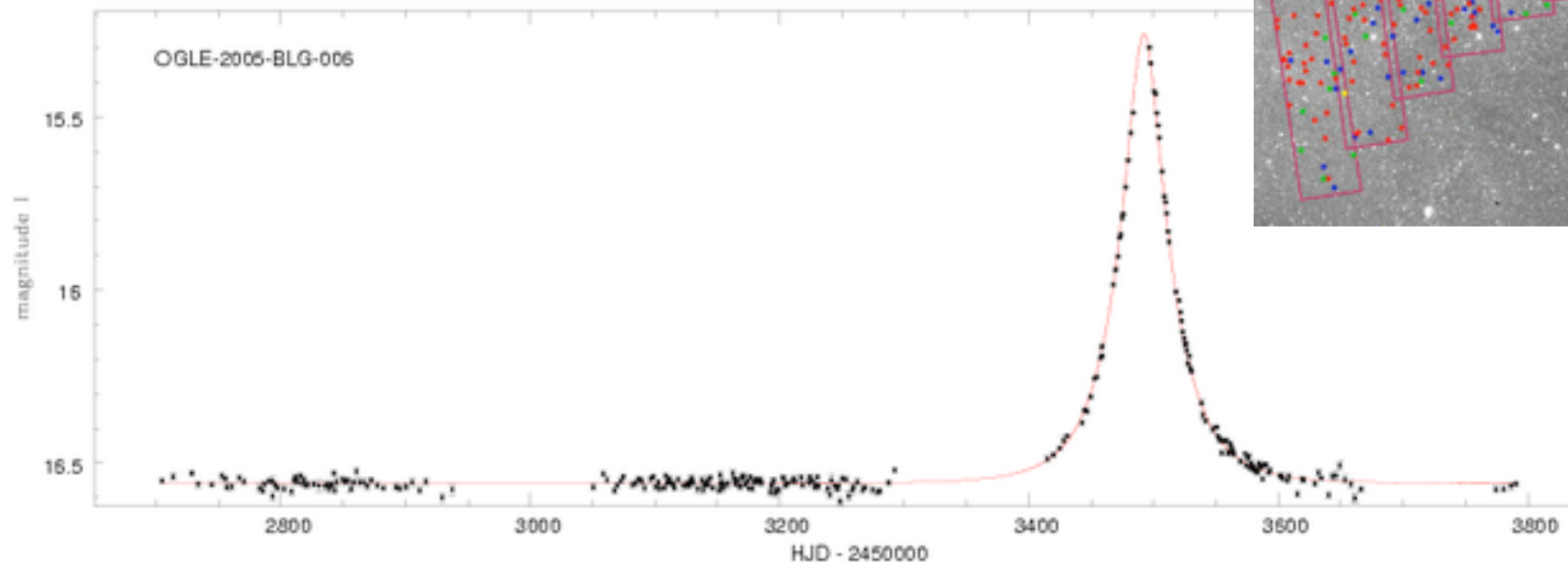
Observações de micro(mili)-lenteamento

Projetos MACHO, OGLE, EROS...

OGLE-2008-BLG-060



OGLE-2006-BLG-006

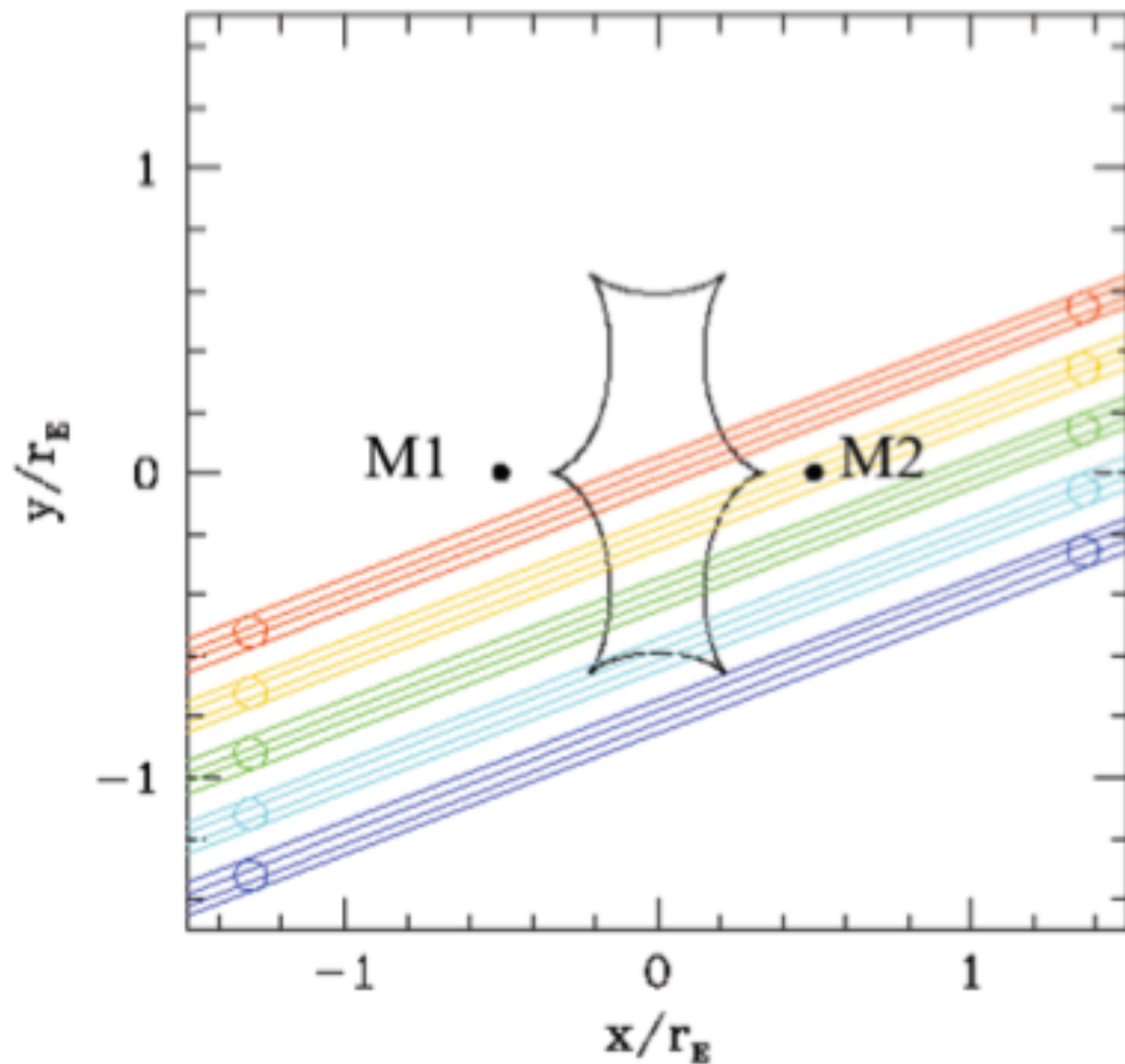


$$t_E \equiv D_d \theta_E / v_{\perp}$$

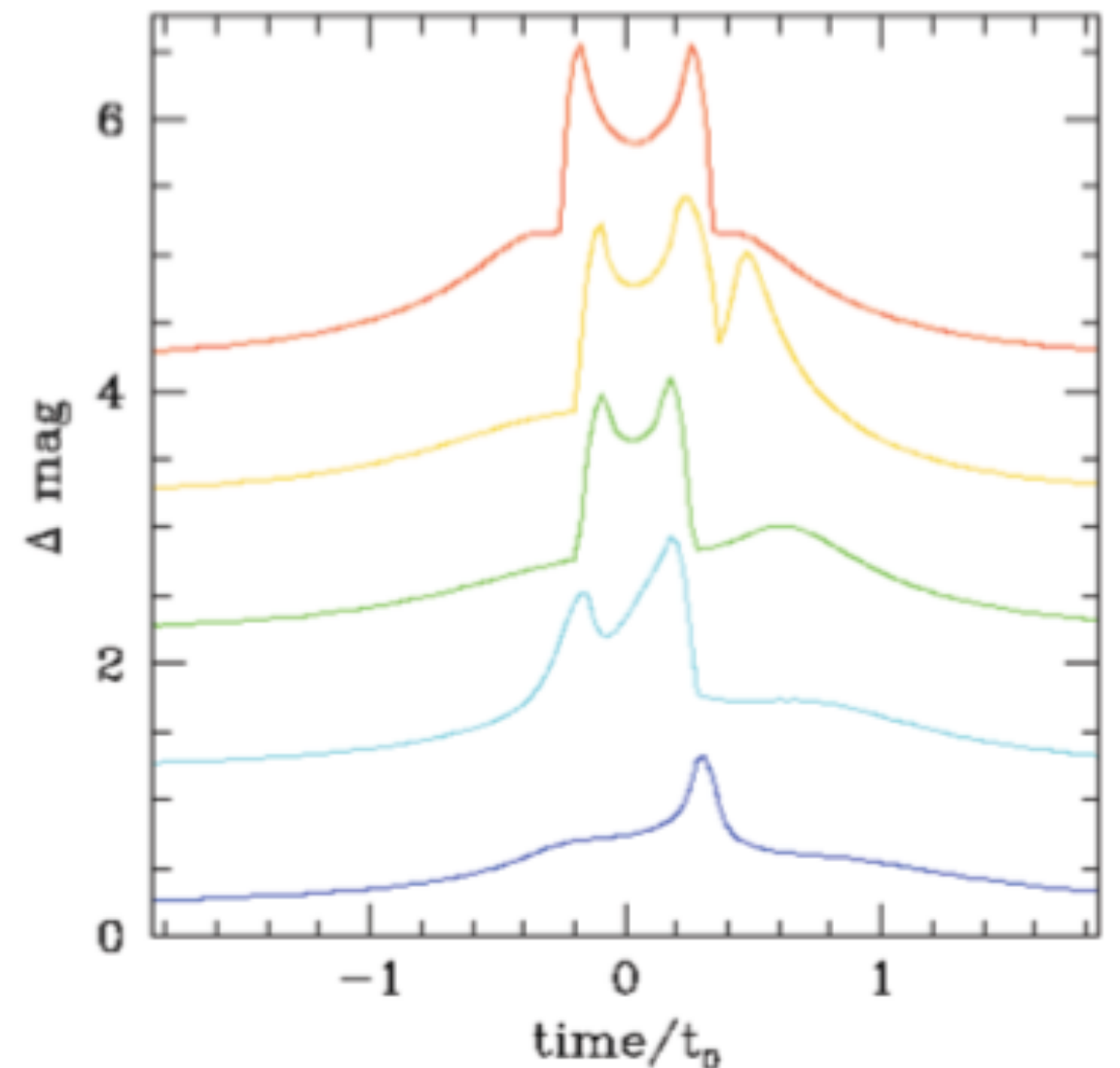
degenerescências

Microlenteamento por lente composta

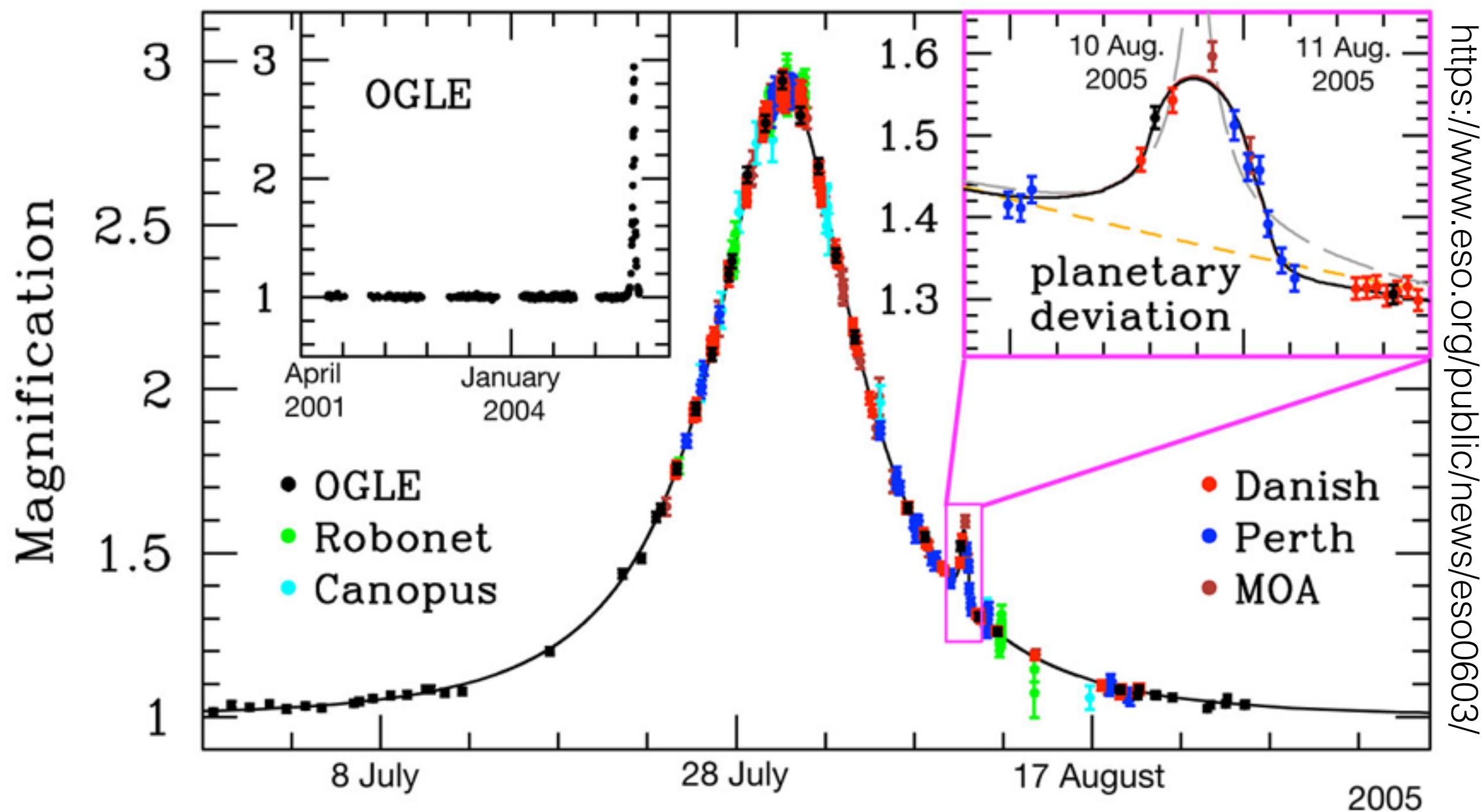
- Estrutura da cáustica



- Curvas de luz



Exoplanetas



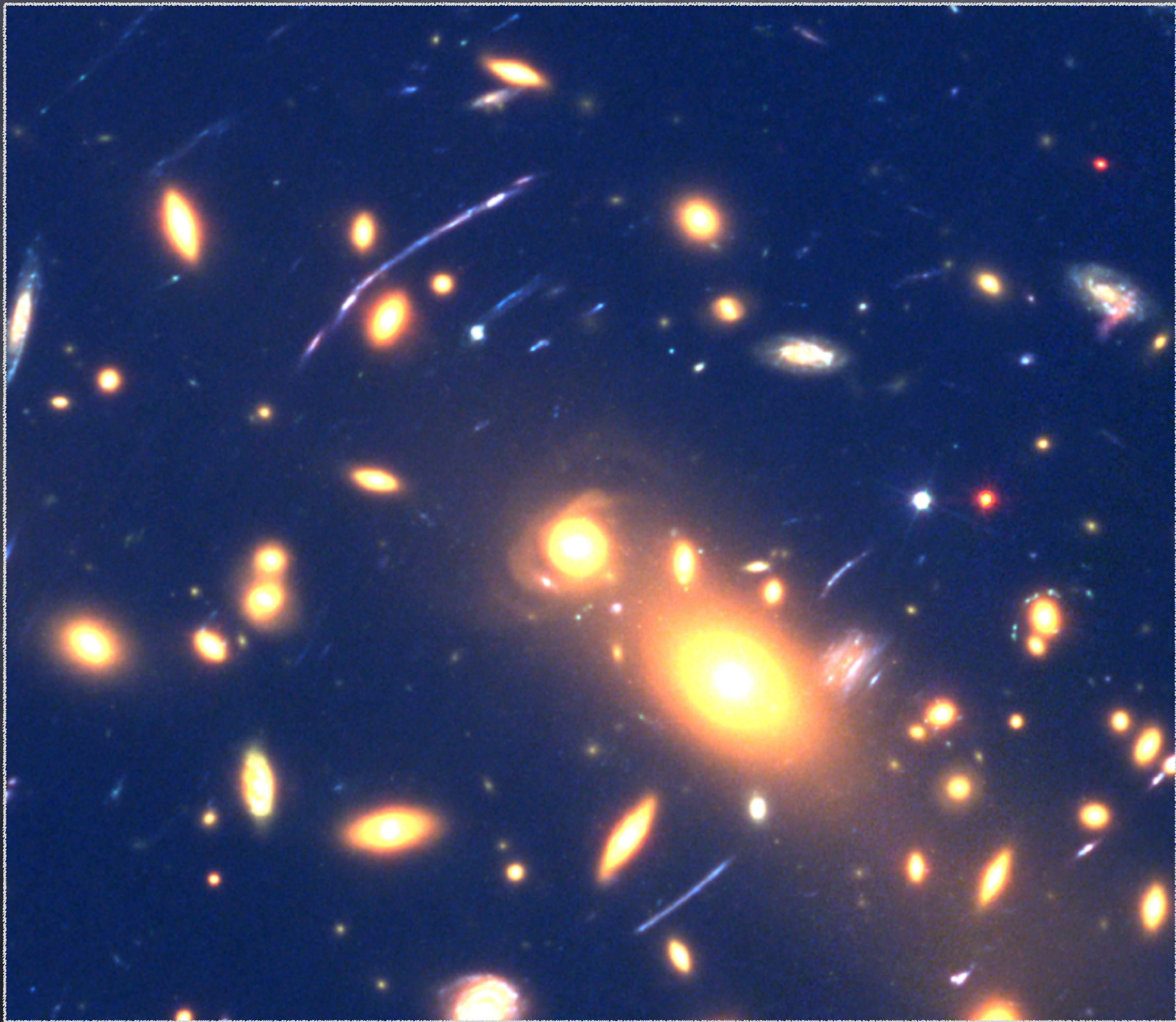
- 122 sistemas planetários descobertos
- Região de planetas tipo terrestres
- Combinação com outros métodos

Macrolenteamento – Efeito Forte

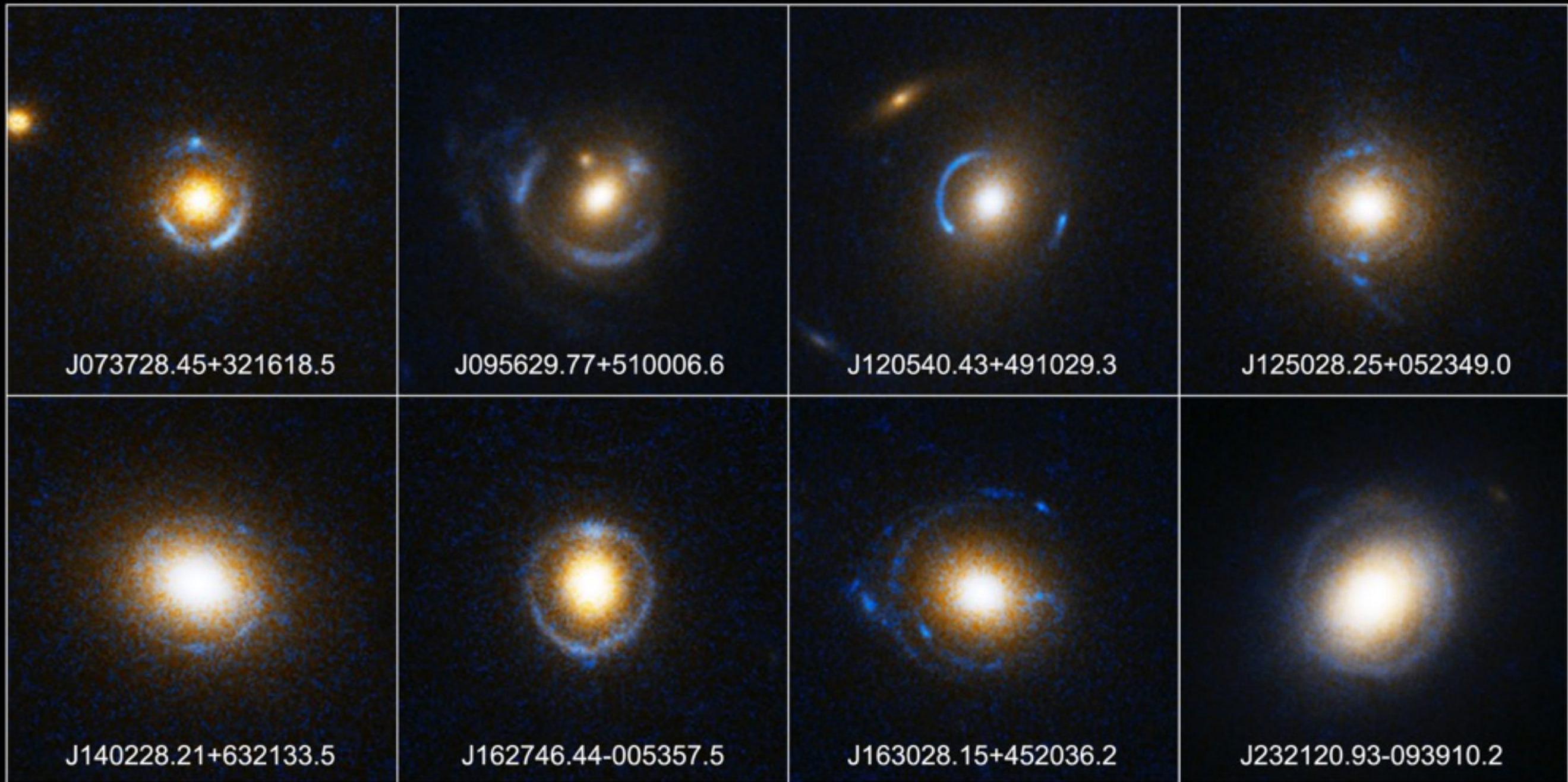


Arcos Gravitacionais

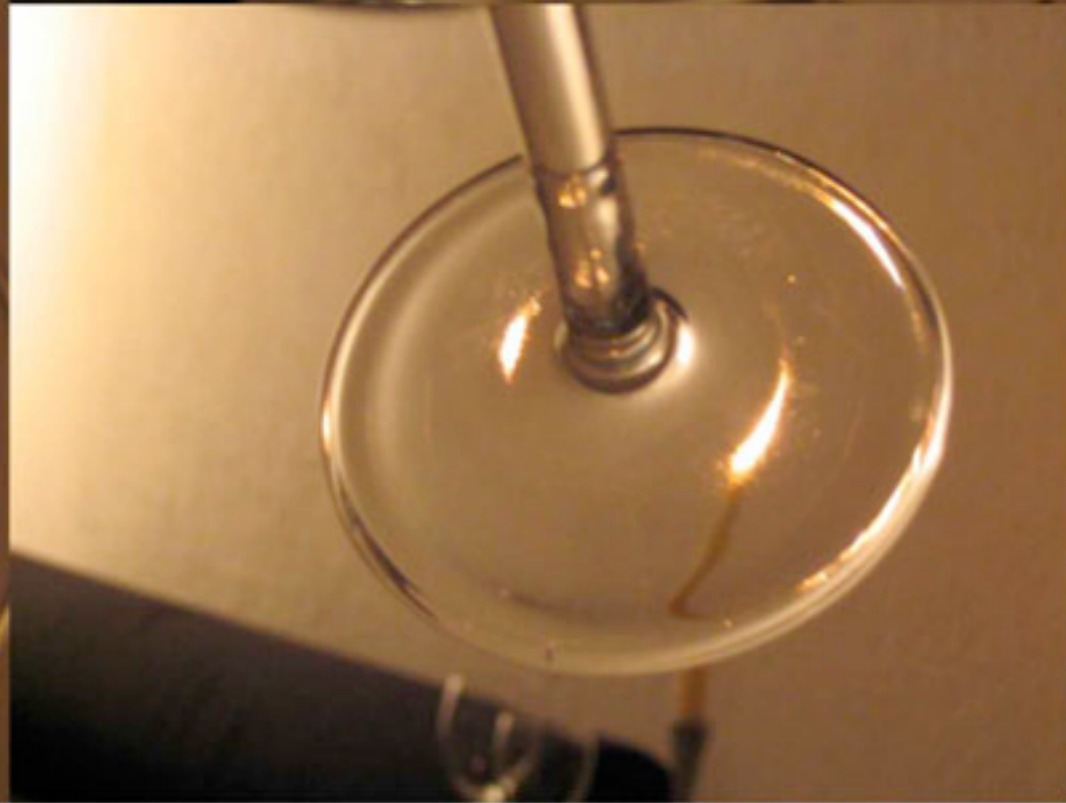
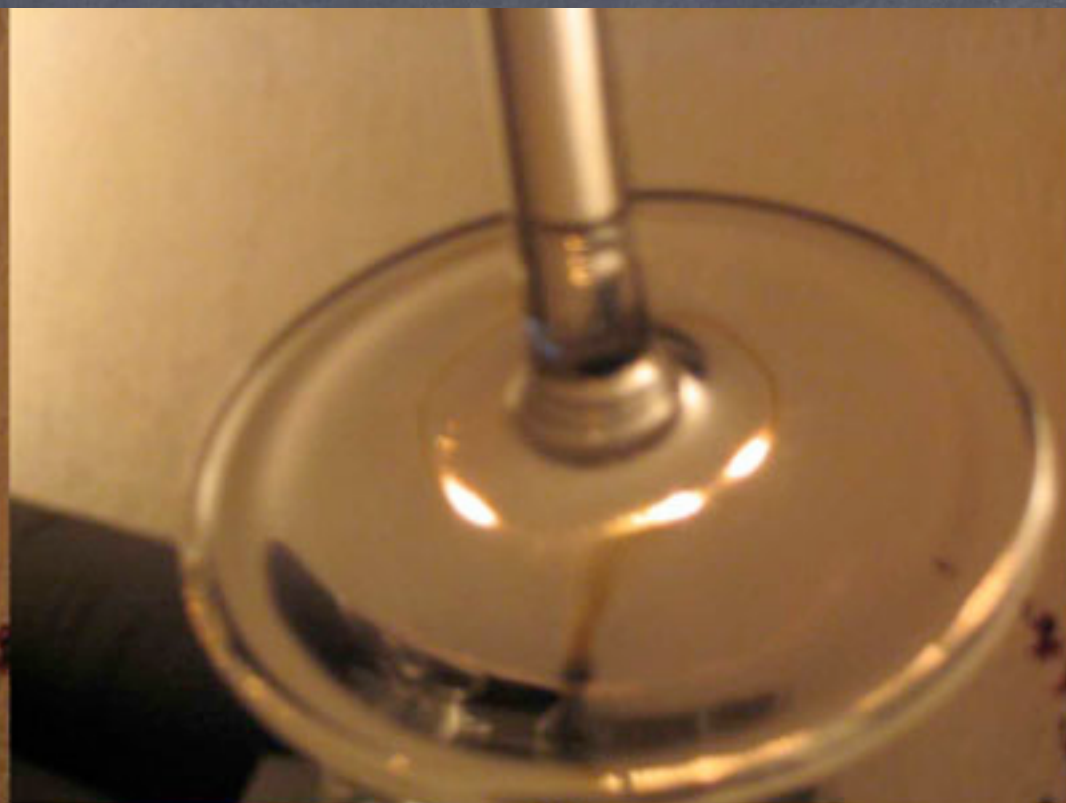




“Anéis de Chwolson-Einstein”



Einstein Ring Gravitational Lenses
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys



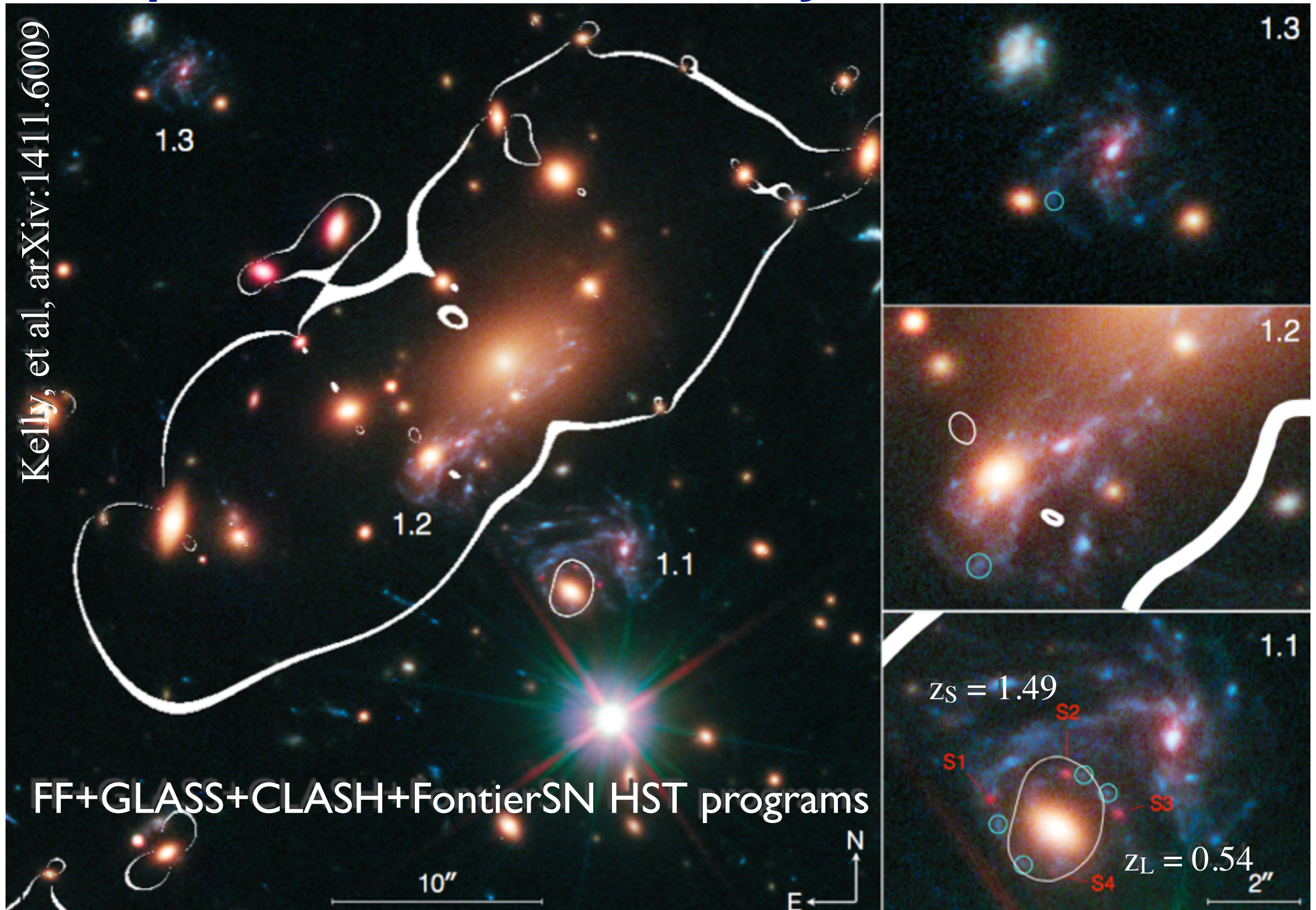
A scenic view of a beach with turquoise water and a clear blue sky. The text is overlaid on the image.

MODELAGEM DE LENTES E MÉTODO CIENTÍFICO

Supernova em galáxia atrás do aglomerado de galáxias MACS J1149.6+2223



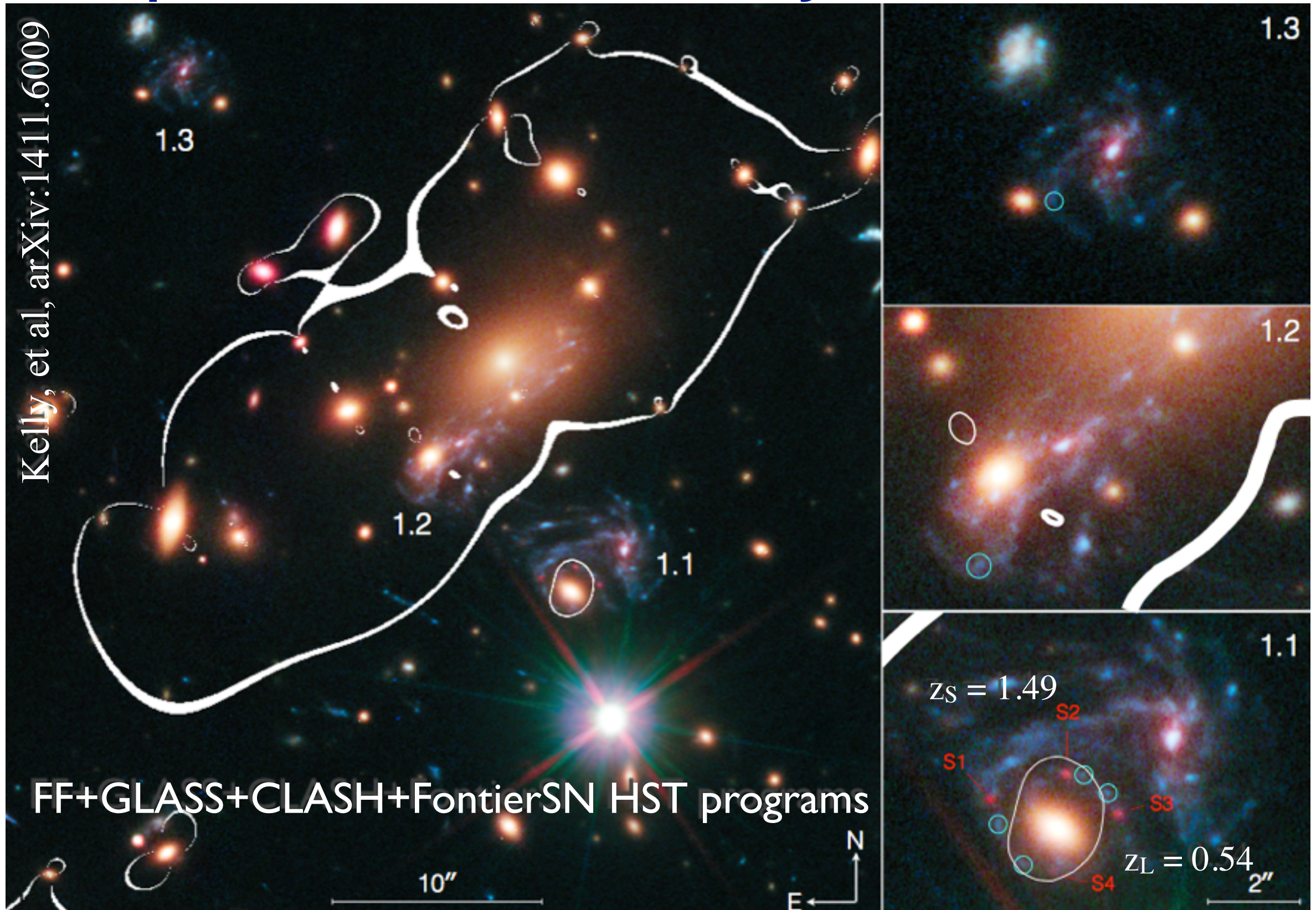
Supernova em MACS J1149.6+2223



Imagens múltiplas por galáxia do aglomerado
+ pelo potencial global (passado/futuro)

When Refsdal
meets Popper

Supernova em MACS J1149.6+2223



Usar a previsão do surgimento de imagens múltiplas da supernovas para testar os modelos

When Refsdal meets Popper!

THE STORY OF SUPERNOVA ‘REFSDAL’ TOLD BY MUSE*

C. GRILLO¹, W. KARMAN², S. H. SUYU³, P. ROSATI⁴, I. BALESTRA⁵, A. MERCURIO⁶, M. LOMBARDI⁷, T. TREU⁸,
G. B. CAMINHA⁴, A. HALKOLA, S. A. RODNEY^{9,10,11}, R. GAVAZZI¹², K. I. CAPUTI²

Draft version March 7, 2016

ABSTRACT

We present Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE) observations in the core of the Hubble Frontier Fields (HFF) galaxy cluster MACS J1149.5+2223, where the first magnified and spatially-resolved multiple images of supernova (SN) ‘Refsdal’ at redshift 1.489 were detected. Thanks to a Director’s Discretionary Time program with the Very Large Telescope and the extraordinary efficiency of MUSE, we measure 117 secure redshifts with just 4.8 hours of total integration time on a single 1 arcmin² target pointing. We spectroscopically confirm 68 galaxy cluster members, with redshift values ranging from 0.5272 to 0.5660, and 18 multiple images belonging to 7 background, lensed sources distributed in redshifts between 1.240 and 3.703. Starting from the combination of our catalog with those obtained from extensive spectroscopic and photometric campaigns using the *Hubble Space Telescope*, we select a sample of 300 (164 spectroscopic and 136 photometric) cluster members, within approximately 500 kpc from the brightest cluster galaxy, and a set of 88 reliable multiple images associated to 10 different background source galaxies and 18 distinct knots in the spiral galaxy hosting SN ‘Refsdal’. We exploit this valuable information to build 6 detailed strong lensing models, the best of which reproduces the observed positions of the multiple images with a root-mean-square offset of only 0.26″. We use these models to quantify the statistical and systematic errors on the predicted values of magnification and time delay of the next emerging image of SN ‘Refsdal’. We find that its peak luminosity should occur between March and June 2016, and should be approximately 20% fainter than the dimmest (S4) of the previously detected images but above the detection limit of the planned *HST*/WFC3 follow-up. We present our two-dimensional reconstruction of the cluster mass density distribution and of the SN ‘Refsdal’ host galaxy surface brightness distribution. We outline the roadmap towards even better strong lensing models with a synergetic MUSE and *HST* effort.

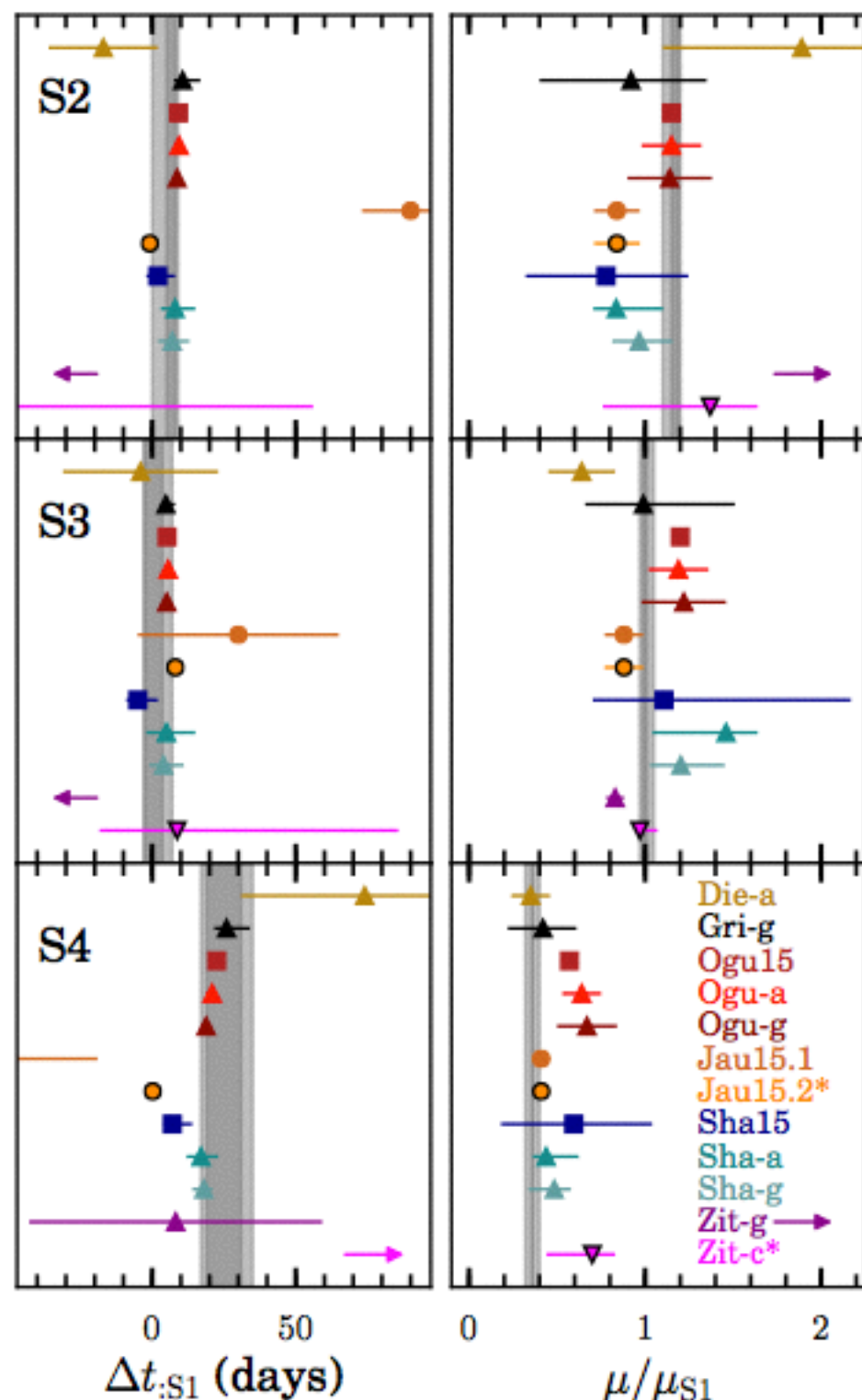
Subject headings: gravitational lensing — galaxies: clusters: general — galaxies: clusters: individuals:

MACS J1149.5+2223 — Dark matter

"REFSDAL" MEETS POPPER: COMPARING PREDICTIONS OF THE RE-APPEARANCE OF THE MULTIPLY IMAGED SUPERNOVA BEHIND MACSJ1149.5+2223

T. Treu^{1,28}, G. Brammer², J. M. Diego³, C. Grillo⁴, P. L. Kelly⁵, M. Oguri^{6,7,8}, K. Sharon¹², A. Zitrin^{13,29} [Show full author list](#)

Published 2016 January 20 • © 2016. The American Astronomical Society. All rights reserved.
The Astrophysical Journal, Volume 817, Number 1



A free-form prediction for the reappearance of supernova Refsdal in the Hubble Frontier Fields cluster MACSJ1149.5+2223

Jose M. Diego,¹★ Tom Broadhurst,^{2,3} Cuncheng Chen,⁴ Jeremy Lim,⁴ Adi Zitrin,⁵† Brian Chan,⁴ Dan Coe,⁶ Holland C. Ford,⁶ Daniel Lam⁴ and Wei Zheng⁶

¹IFCA, Instituto de Física de Cantabria (UC-CSIC), Av. de Los Castros s/n, E-39005 Santander, Spain

²Fisika Teorikoa, Zientzia eta Teknologia Fakultatea, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU, E-48080 Bilbao, Spain

³IKERBASQUE, Basque Foundation for Science, Alameda Urquijo 36-5, E-48008 Bilbao, Spain

⁴Department of Physics, The University of Hong Kong, 0000-0002-6536-5575, Pokfulam Road, Hong Kong

⁵Cahill Center for Astronomy and Astrophysics, California Institute of Technology, MS 249-17, Pasadena, CA 91125, USA

⁶Department of Physics and Astronomy, Johns Hopkins University, Baltimore, MD 21218, USA

THE STORY OF SUPERNOVA 'REFSDAL' TOLD BY MUSE*

C. GRILLO¹, W. KARMAN², S. H. SUYU³, P. ROSATI⁴, I. BALESTRA⁵, A. MERCURIO⁶, M. LOMBARDI⁷, T. TREU⁸, G. B. CAMINHA⁴, A. HALKOLA, S. A. RODNEY^{9,10,11}, R. GAVAZZI¹², K. I. CAPUTI²

Draft version March 7, 2016

Monthly Notices

of the
ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY

MNRAS 457, 2029–2042 (2016)



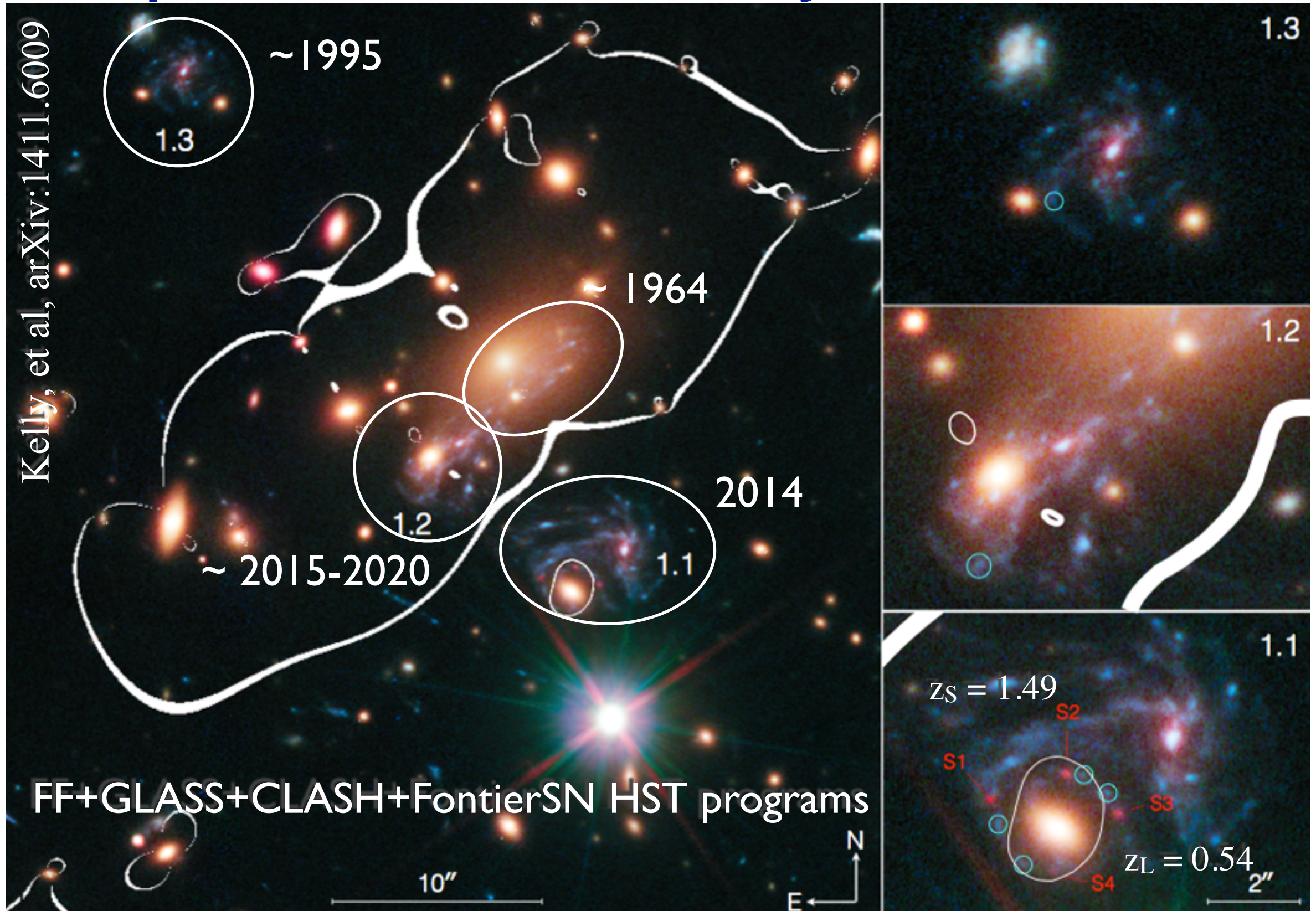
doi:10.1093/mnras/stw069

Hubble Frontier Fields: predictions for the return of SN Refsdal with the MUSE and GMOS spectrographs

M. Jauzac,^{1,2,3}★ J. Richard,⁴ M. Limousin,⁵ K. Knowles,³ G. Mahler,⁴ G. P. Smith,⁶ J.-P. Kneib,^{5,7} E. Jullo,⁵ P. Natarajan,⁸ H. Ebeling,⁹ H. Atek,⁸ B. Clément,⁴ D. Eckert,¹⁰ E. Egami,¹¹ R. Massey^{1,2} and M. Rexroth⁷

of MACS J0416.1–2403 and Abell 2744. In light of the discovery of the first resolved quadruply lensed supernova, SN Refsdal, in one of the multiply imaged galaxies identified in MACS J1149, we use our revised mass model to investigate the time delays and predict the rise of the next image between 2015 November and 2016 January.

Supernova em MACS J1149.6+2223

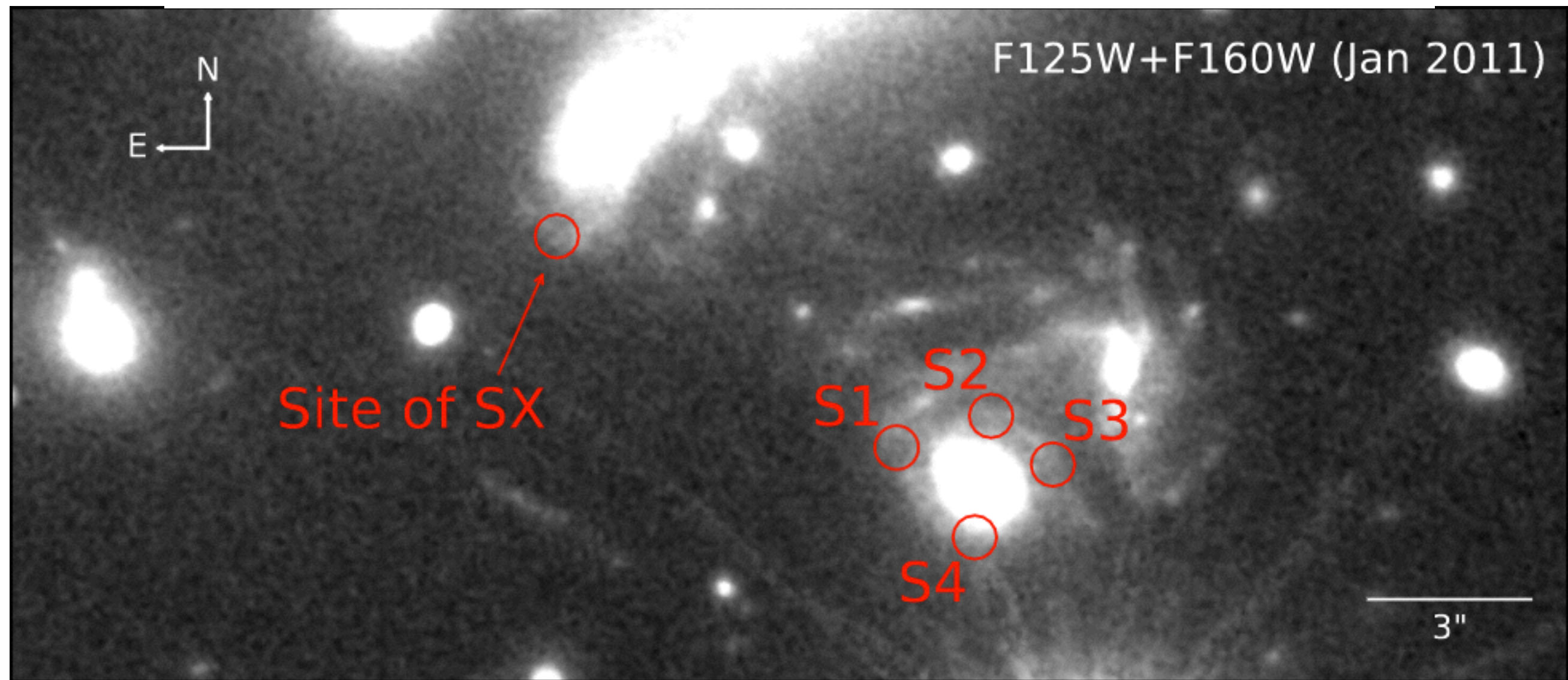


DEJA VU ALL OVER AGAIN: THE REAPPEARANCE OF SUPERNOVA REFSDAL

P. L. Kelly¹, S. A. Rodney², T. Treu^{3,3}, L.-G. Strolger⁴, R. J. Foley^{5,6}, S. W. Jha⁷, J. Selsing⁸, G. Brammer⁴, M. Bradač⁹, S. B. Cenko^{10,11} [Show full author list](#)

Published 2016 February 24 • © 2016. The American Astronomical Society. All rights reserved.

[The Astrophysical Journal Letters, Volume 819, Number 1](#)

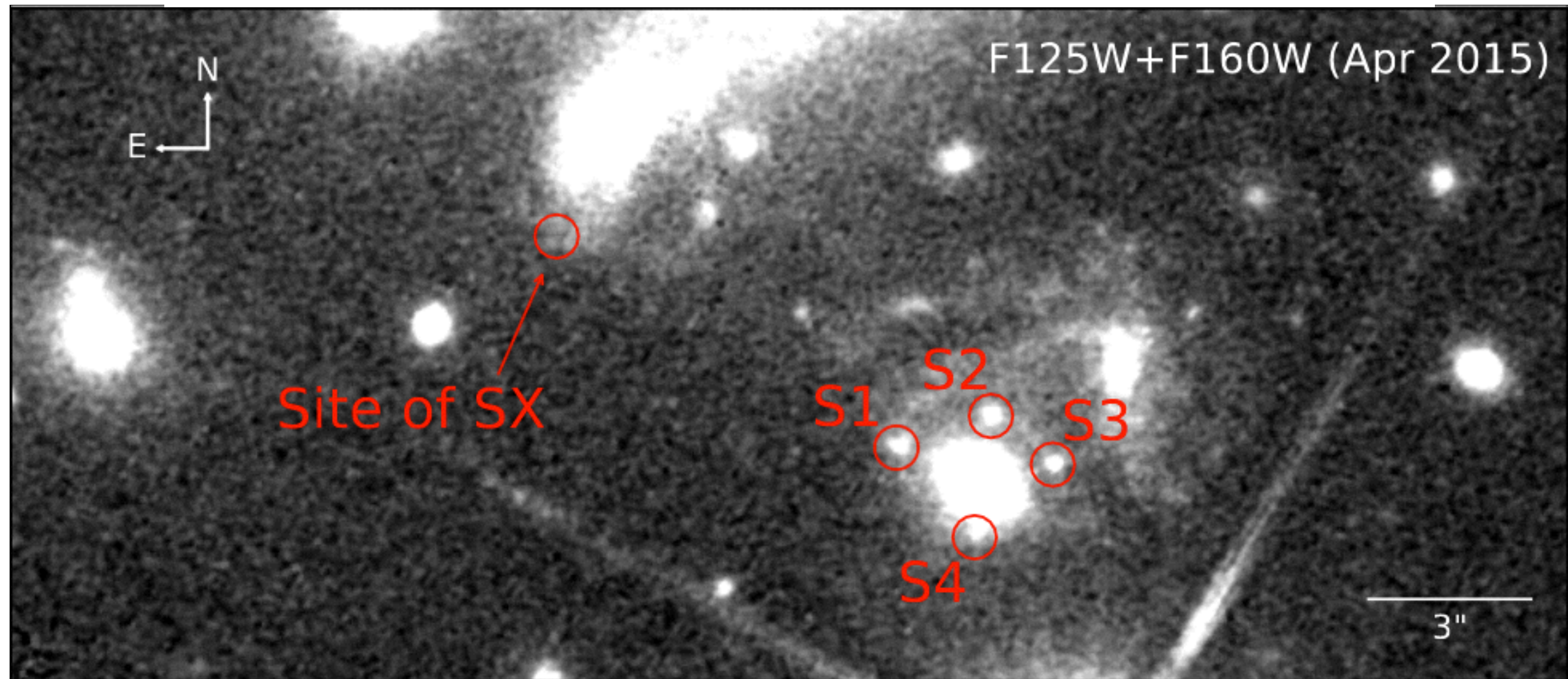


DEJA VU ALL OVER AGAIN: THE REAPPEARANCE OF SUPERNOVA REFSDAL

P. L. Kelly¹, S. A. Rodney², T. Treu^{3,3}, L.-G. Strolger⁴, R. J. Foley^{5,6}, S. W. Jha⁷, J. Selsing⁸, G. Brammer⁴, M. Bradač⁹, S. B. Cenko^{10,11} [Show full author list](#)

Published 2016 February 24 • © 2016. The American Astronomical Society. All rights reserved.

[The Astrophysical Journal Letters, Volume 819, Number 1](#)

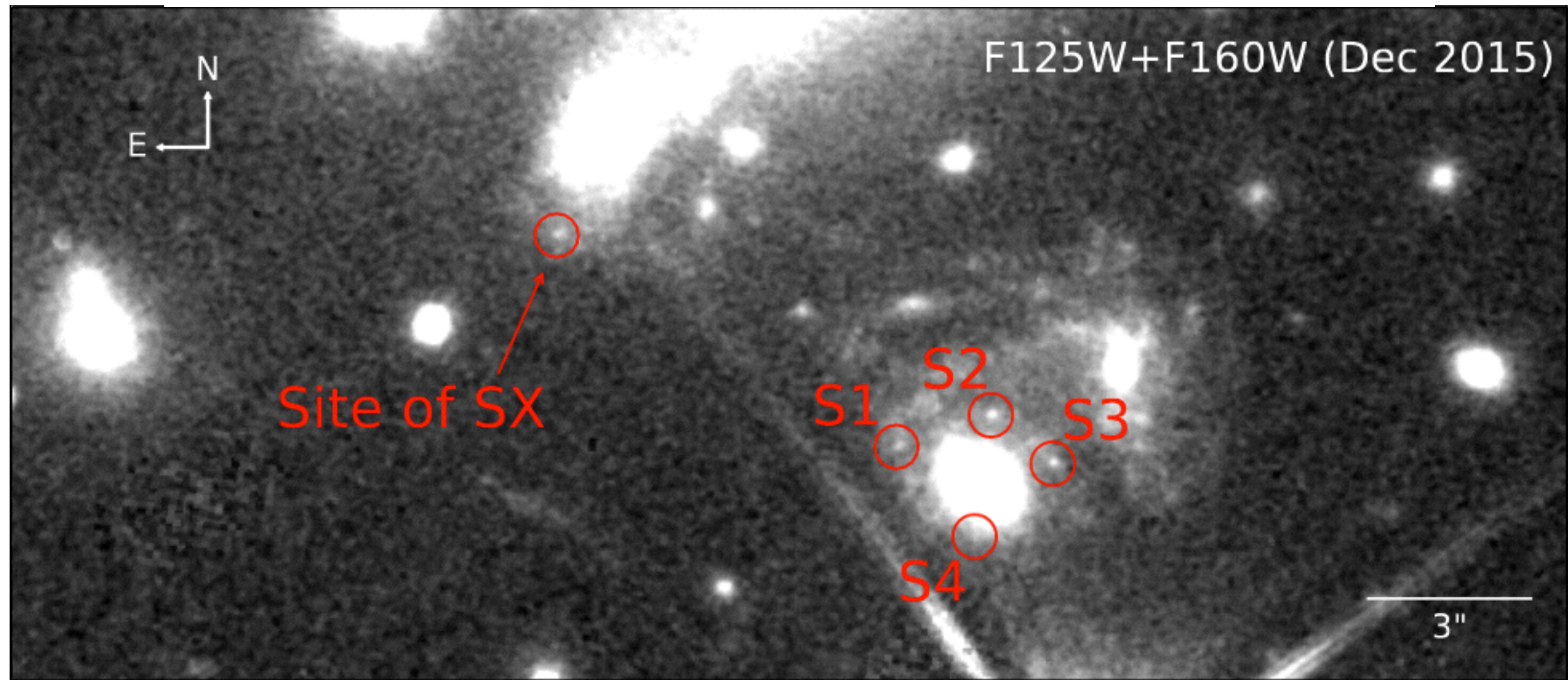


DEJA VU ALL OVER AGAIN: THE REAPPEARANCE OF SUPERNOVA REFSDAL

P. L. Kelly¹, S. A. Rodney², T. Treu^{3,3}, L.-G. Strolger⁴, R. J. Foley^{5,6}, S. W. Jha⁷, J. Selsing⁸, G. Brammer⁴, M. Bradač⁹, S. B. Cenko^{10,11} [Show full author list](#)

Published 2016 February 24 • © 2016. The American Astronomical Society. All rights reserved.

[The Astrophysical Journal Letters, Volume 819, Number 1](#)

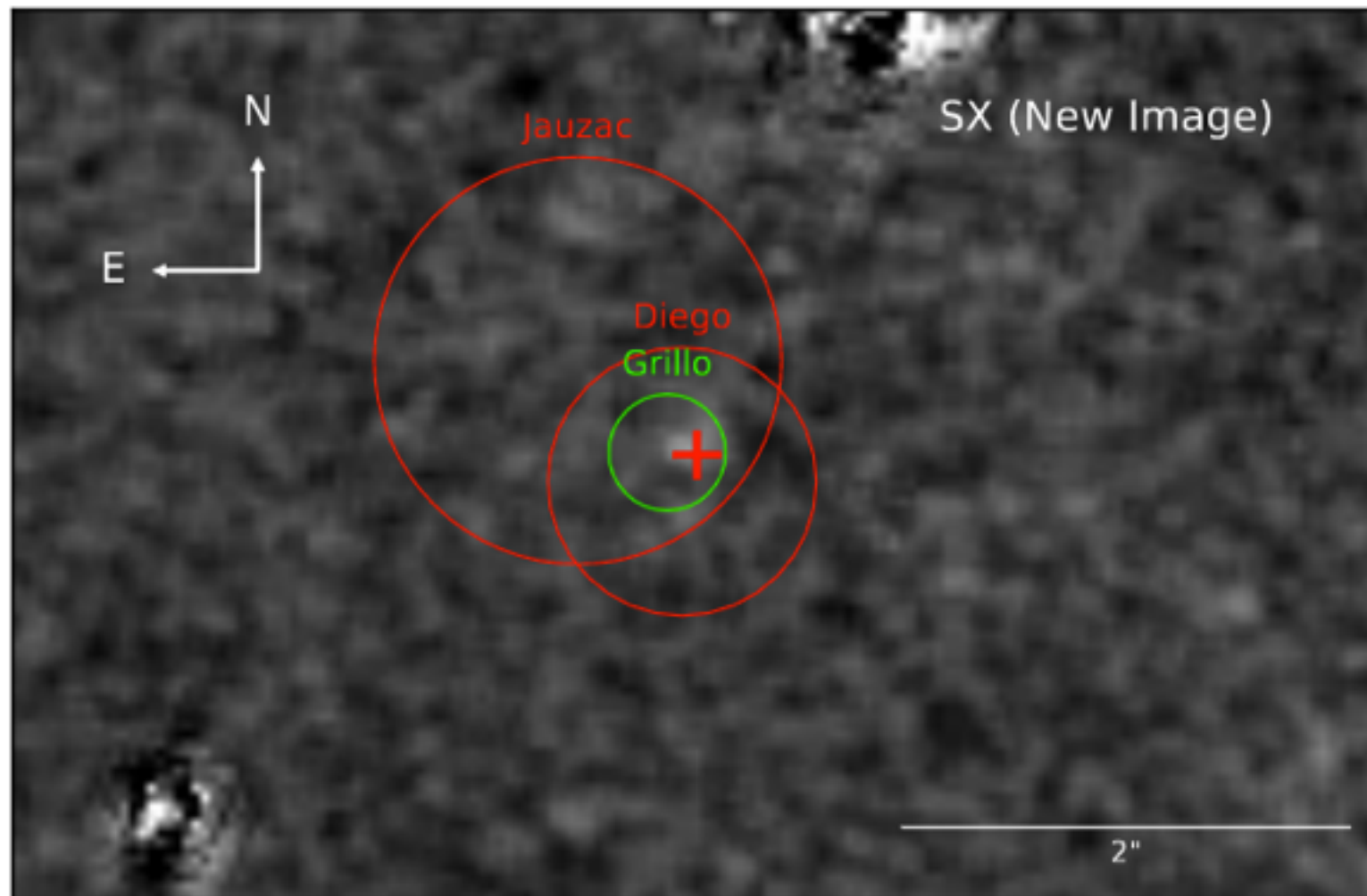


DEJA VU ALL OVER AGAIN: THE REAPPEARANCE OF SUPERNOVA REFSDAL

P. L. Kelly¹, S. A. Rodney², T. Treu^{3,3}, L.-G. Strolger⁴, R. J. Foley^{5,6}, S. W. Jha⁷, J. Selsing⁸, G. Brammer⁴, M. Bradač⁹, S. B. Cenko^{10,11} [Show full author list](#)

Published 2016 February 24 • © 2016. The American Astronomical Society. All rights reserved.

[The Astrophysical Journal Letters](#), Volume 819, Number 1



BREVE HISTÓRICO DO LENTEAMENTO GRAVITACIONAL

- **Einstein 1911-12:** previsões de Einstein e primeira tentativa de observação
- **Sobral 1919:** deflexão da luz pela gravidade
- **Chwolson 1924:** primeiro artigo sobre lentes
- **Einstein 1936:** lenteamento por estrelas

“Of course, there is not much hope of observing this phenomenon directly”

- **Zwicky 1937:** otimista

“The probability that nebulae which act as gravitational lenses will be found becomes practically a certainty”



- **Walsh, Carswell, Weymann 1979:** Descoberta do primeiro quasar lenteado (imagem dupla de QSO 0957+561)

DESCOBERTAS

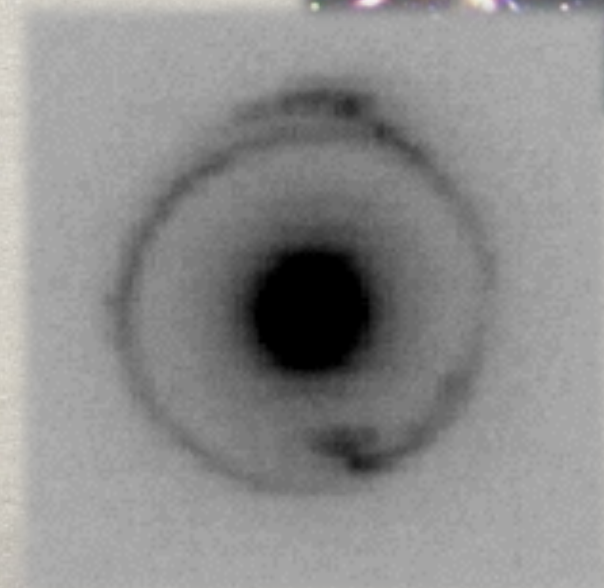
- Sobral 1919: deflexão da luz
- Walsh, Carswell, Weymann 1979: descoberta do primeiro quasar lenteado (imagem dupla de QSO 0957+561)
- Roger Lynds e Vahe Petrosian 1986, Soucail, Fort, & Picat 1987: Descoberta dos arcos gravitacionais:

arcos em A370, A2218, CL2244-02
ninguém previu...

- ✱ Hewitt, et al. 1988: anel de Einstein (no rádio)
- ✱ Irwin et al. 1989: microlenteamento de Quasares
- ✱ Colaborações EROS & MACHO, 1993:

Primeira detecção de microlenteamento

- ✱ Bond et al., 2003: Primeira detecção de planetas
 - ✱ ~2 planetas com massa de Júpiter em ~3 AU



FERRAMENTA PARA A ASTROFÍSICA E A COSMOLOGIA

- Efeito fraco de lente gravitacional (novo Universo)
- Limites em modelos cosmológicos
- Reconstrução da massa de galáxias e aglomerados
- Propriedades da matéria escura (auto-interação, morna)
- Subestruturas
- Taxa de expansão do Universo
- Telescópio gravitacional (HFF)
- Microlenteamento e buracos negros primordiais
- Sombra do buraco negro
- Lenteamento de ondas gravitacionais
- Estrelas e planetas em galáxias
- Supernovas (CLASH)
- Aprendizado de máquina (identificação, regressão, etc.)
- ...



Considerações finais

- Em poucas décadas o lenteamento gravitacional transformou-se de uma curiosidade em uma área de estudo
- e de uma área de estudo a uma ferramenta importante com aplicações e implicações em quase todos os domínios da cosmologia e astrofísica extragaláctica
- Muitos resultados e novas áreas e regimes na última década
- Novos instrumentos e *surveys* irão continuar revolucionando a área na próxima década
- Inúmeros desafios e oportunidades desde questões teóricas e de fundamentos a problemas estatísticos e computacionais e análise de dados
- É possível fazer ciência de ponta em nível mundial no Brasil!
- Muito ainda por ser descoberto por vocês!

Obrigado!



LENTESS GRAVITACIONAIS: UM RICO RECURSO DIDÁTICO NA OCASIÃO DA CELEBRAÇÃO DOS 100 ANOS DO ECLIPSE DE SOBRAL

MARTIN MAKLER

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)

<martinmakler@gmail.com>

DOI: 10.21439/conexoes.v13i2.1679

Resumo. O efeito de lente gravitacional é uma das consequências mais espetaculares da deflexão da luz pela gravidade, medida pela primeira vez em Sobral e na Ilha de Príncipe em 1919. Apesar de sua grande beleza e das inúmeras aplicações na astrofísica — desde a descoberta de planetas extrassolares até a cosmologia — esse efeito está ausente dos currículos até da graduação em física. Nesta contribuição, abordaremos alguns aspectos de lentes gravitacionais que requerem apenas matemática elementar (i. e. sem cálculo diferencial e integral) para sua compreensão, sendo facilmente acessíveis a alunos de graduação em engenharias, ciências físicas e afins, e até mesmo alunos avançados do ensino médio. Em particular, apresentaremos soluções analíticas simples para imagens de fontes pontuais e para arcos gravitacionais gerados pelo campo gravitacional de objetos compactos e galáxias. Além de serem ilustrações simples e didáticas dos efeitos de lente gravitacional, esses exemplos permitem trabalhar diversos conceitos matemáticos.

Palavras-chaves: Relatividade geral. Astrofísica. Lenteamento gravitacional. Arcos gravitacionais

Abstract. The gravitational lensing effect is one of the most spectacular consequences of light deflection by gravity, which was measured for the first time in Sobral and in Prince Island in 1919. Despite its beauty and the numerous applications in astrophysics — from the discovery of exoplanets to cosmology — this effect is absent from the curricula of undergraduate courses, even for physics majors. In this contribution we shall address a few aspects of gravitational lensing that require only elementary mathematics (i.e. without the need of calculus) for their understanding, being accessible to undergraduate students in STEM fields and even advanced high school students. In particular, we will present simple analytic solutions for the images of point sources and for gravitational arcs generated by the gravity field of compact objects and galaxies. Besides being simple and pedagogical illustrations of the effects of gravitational lensing, these examples allow one to explore different mathematical concepts.

Keywords: General Relativity. Astrophysics. Gravitational Lensing. Gravitational arcs

1 INTRODUÇÃO

Além de comprovar a previsão da teoria de relatividade geral de Albert Einstein, a observação da deflexão da luz pela gravidade durante o eclipse de 1919 abriu uma nova área de pesquisa, a do lenteamento gravitacional. Apesar de amplamente utilizado nas pesquisas em astrofísica e cosmologia, em particular na última década, esse efeito está praticamente ausente dos livros-texto e há uma escassez de material didático sobre o assunto. Existem artigos em nível de divulgação (como, por exemplo, MAKLER (2009)) e textos técnicos, mas há uma carência de material em nível intermediário. Um dos propósitos deste artigo é contribuir para suprir essa carência.

Iniciaremos com uma revisão histórica do assunto,

apresentando as discussões anteriores a Einstein, as tentativas de medir a deflexão da luz, o posterior nascimento da teoria de lentes, e as sucessivas detecções e descobertas usando esse fenômeno. Essa história também é um excelente exemplo de como funciona o método científico. São raros os exemplos na história de física em que um único acontecimento é tão decisivo em apoiar ou descartar uma teoria. Por outro lado, o desenvolvimento científico é não linear, sujeito ao acaso, a tentativas frustradas, a resultados errados, entre outras vicissitudes. Tudo isso faz parte da história da deflexão da luz.

Em seguida apresentaremos o formalismo de lente gravitacional e algumas soluções. Como mencionado, existem excelentes textos técnicos sobre o assunto de

[http://
conexoes.ifce.edu.br/
index.php/conexoes/
article/download/
1679/1322](http://conexoes.ifce.edu.br/index.php/conexoes/article/download/1679/1322)