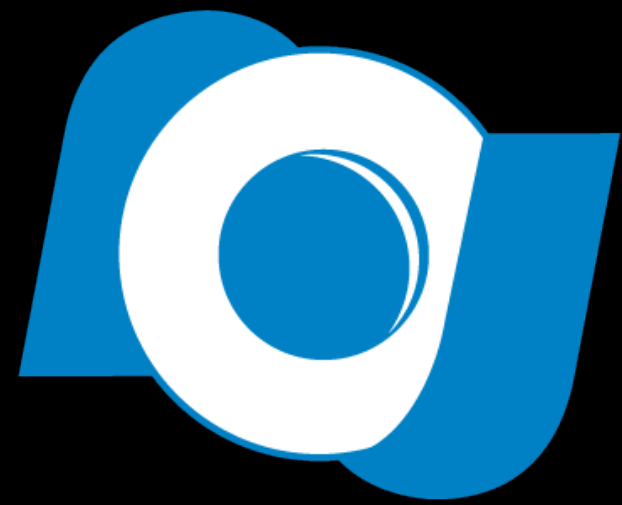




Observatório
Nacional

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



Escola de Inverno em Astrofísica 2026 | Astrofísica Extragaláctica

Aglomerados de Galáxias: As Maiores Estruturas do Universo

Rogério Monteiro-Oliveira, Ph.D. (孟羅傑)

rmo@on.br | monteiro-oliveira.com

O Universo Através das Lentes Gravitacionais

Rio de Janeiro, 24 de julho de 2026

Aula 03

Neste minicurso

- Aula 01: Introdução ao Universo em Larga Escala (Seg, 21/07 14:00 - 15:15)
- Aula 02: Crescimento e Evolução dos Aglomerados (Qua, 22/07 11:00 - 12:15)
- Aula 03: O Universo Através das Lentes Gravitacionais (Sex, 24/07 9:15 – 10:30)

Hoje:

- O que são lentes gravitacionais?
- Fusões entre aglomerados de galáxias

O que são Lentes Gravitacionais?



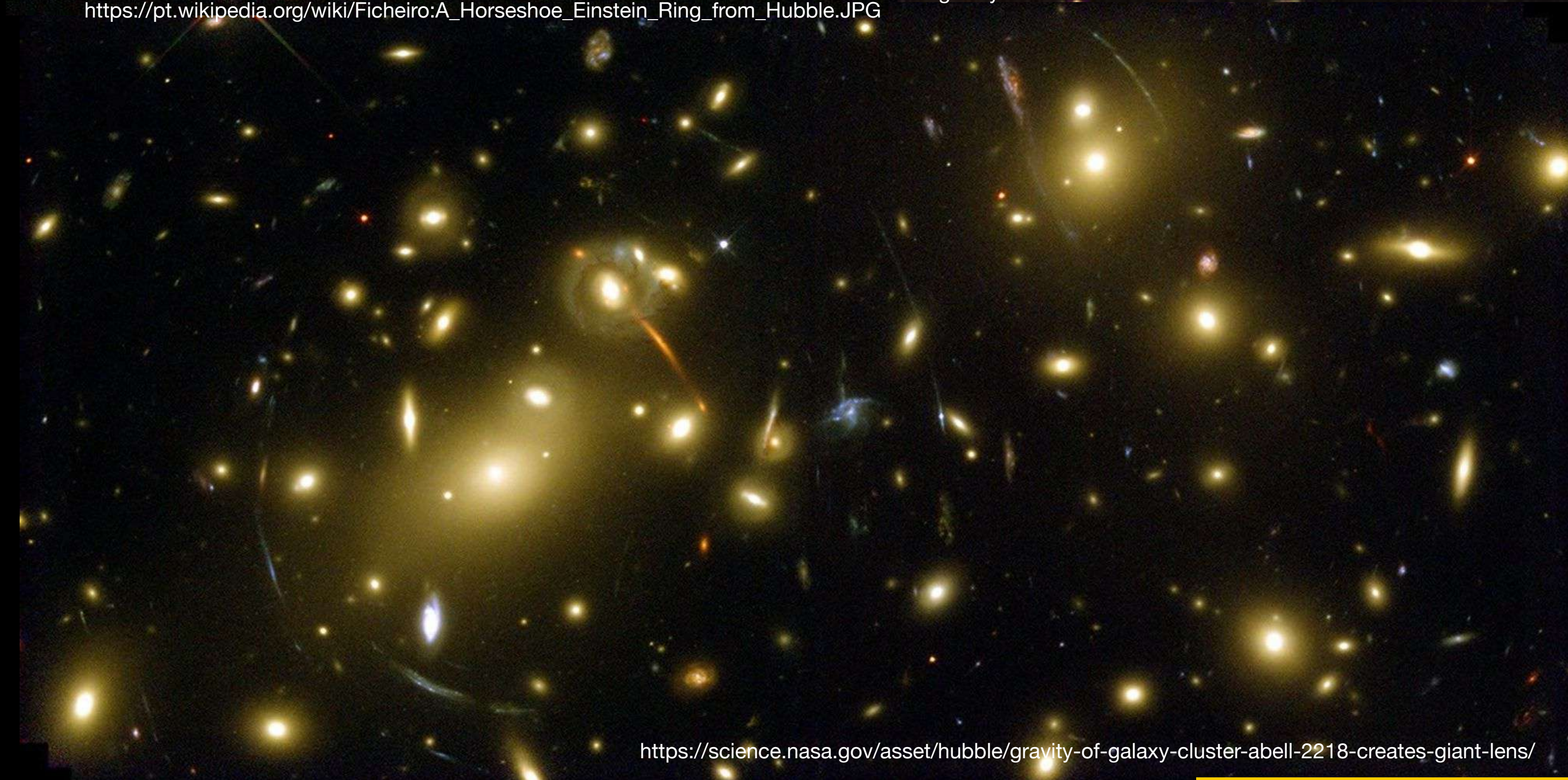
https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:A_Horseshoe_Einstein_Ring_from_Hubble.JPG



<https://science.nasa.gov/asset/hubble/hubble-sees-giant-lensed-galaxy-arc/>



<https://science.nasa.gov/asset/hubble/lensing-galaxy-cluster-abel-383/>

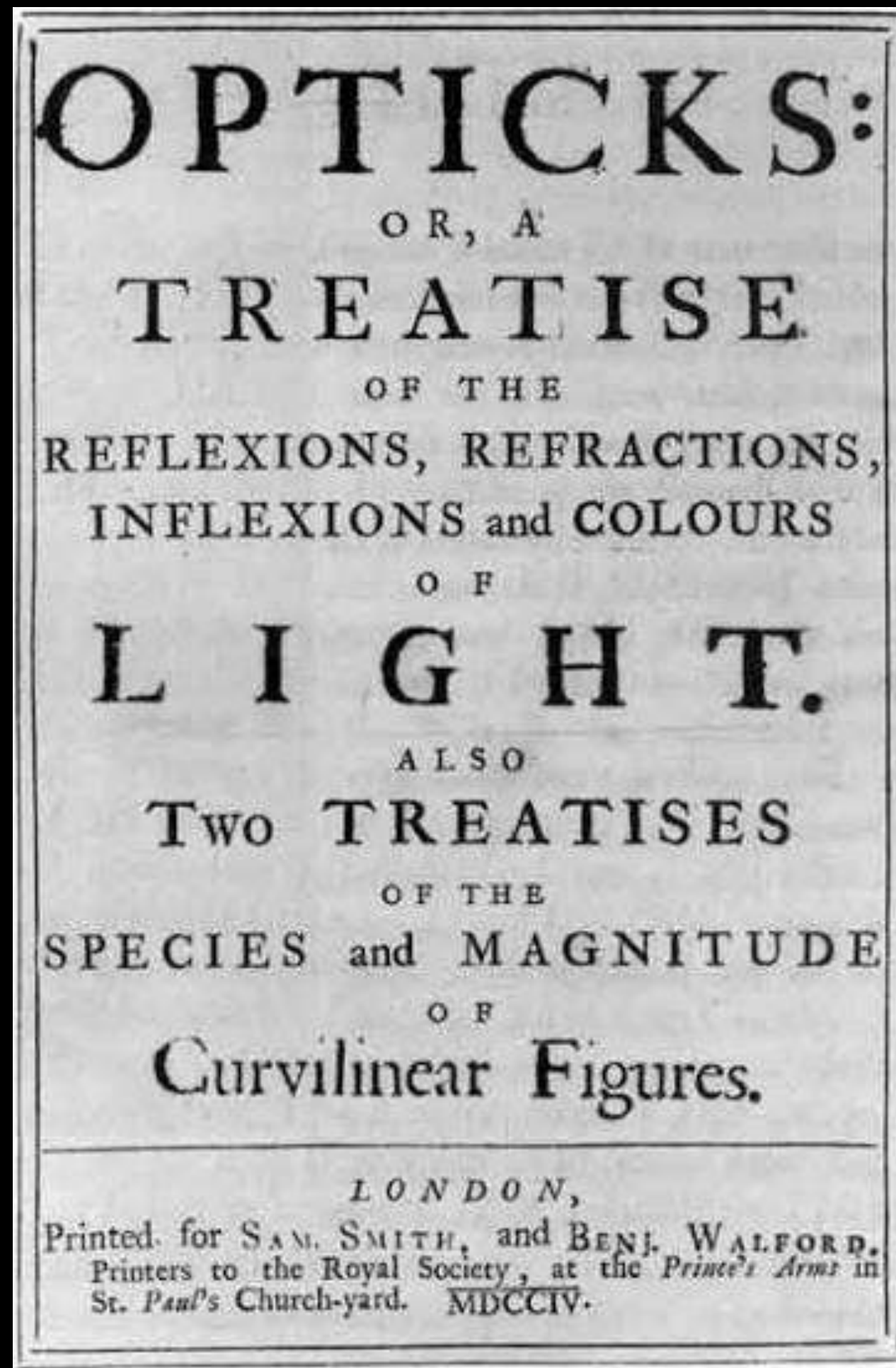


<https://science.nasa.gov/asset/hubble/gravity-of-galaxy-cluster-abel-2218-creates-giant-lens/>



<https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:HST-Smiling-GalaxyClusterSDSS-J1038+4849-20150210.jpg>

Brevíssimo Contexto Histórico



- Ao contrário da crença popular, Newton não foi o precursor da deflexão gravitacional da luz (seu famoso trecho no livro *Opticks* tratava de difração).

"Questão 1: Não agem os corpos sobre a luz à distância e, por sua ação, curvam os seus raios; e não é essa ação (*caeteris paribus*) mais forte à menor distância?"

Newton (1704)

Brevíssimo Contexto Histórico

- O **primeiro cálculo** quantitativo foi feito em 1804 por Soldner. Usando física newtoniana, ele calculou um desvio de **0.84 arcsec** para um raio de luz rasante ao Sol.
- Usando a **Relatividade Geral**, Einstein recalcula o ângulo de deflexão para **1.75 arcsec** (o dobro do valor previsto pela mecânica clássica).
- A teoria é **comprovada** observando o desvio da luz de estrelas de fundo durante o eclipse solar de 1919. A equipe em Sobral-CE mediu **1.98 ± 0.18 arcsec**, validando a teoria de Einstein contra a newtoniana. No mesmo ano, Oliver Lodge cunha o termo "**lente**".



<https://ims.com.br/eventos/marc-ferrez-e-o-eclipse-de-sobral-ims-paulista/>



<https://oglobo.globo.com/rio/museu-de-astronomia-ciencias-afins-relembra-visita-de-albert-einstein-ao-rio-em-1925-16081101>

De Curiosidade Teórica à Ferramenta Astrofísica

- Nos anos 20 e 30, Chwolson e Link (que publicou 9 meses antes de Einstein) sugeriram que alinhamentos perfeitos criariam “anéis” ou galáxias duplicadas. Einstein (1936) publicou o formalismo matemático da lente, mas era pessimista: achava que nunca conseguiríamos observar o efeito por depender de alinhamentos raros entre estrelas.
- Fritz Zwicky propõe usar galáxias inteiras como lentes, e não estrelas individuais. Isso não só tornava o efeito observável (com separações visíveis no telescópio), como serviria de “balança” para medir a massa da galáxia lente.
- Após um longo hiato teórico, o avanço dos detectores (CCDs) e a radioastronomia confirmaram a previsão teórica. Walsh (1979) e sua equipe detectaram o primeiro sistema de imagens múltiplas: um par de quasares idênticos criados pela deflexão de uma galáxia no caminho.

As lentes gravitacionais são
ferramentas astrofísicas
fundamentais para determinar a
massa de estruturas cósmicas

Ângulo de Deflexão

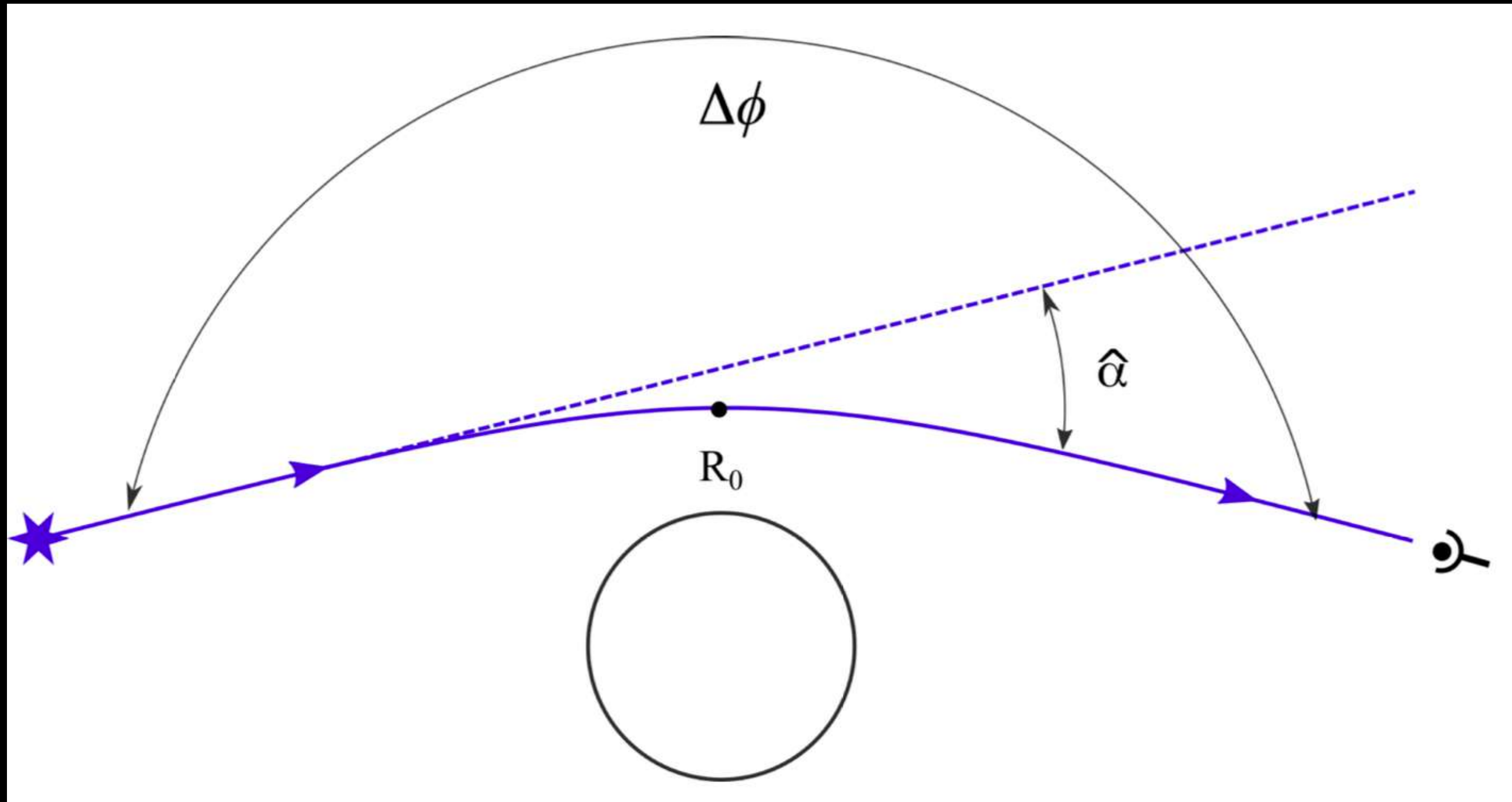
Mecânica Newtoniana

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

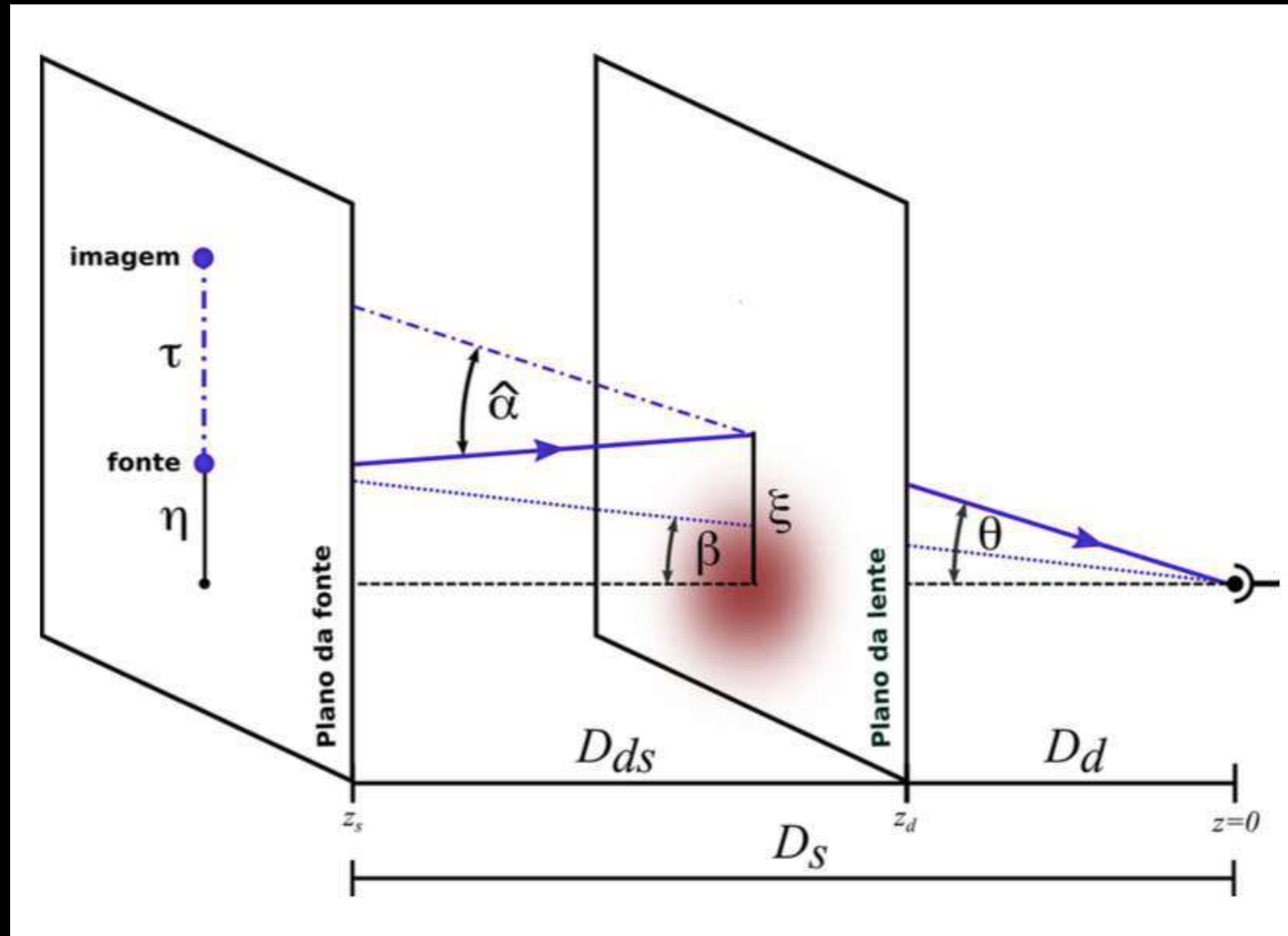
Relatividade Geral

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

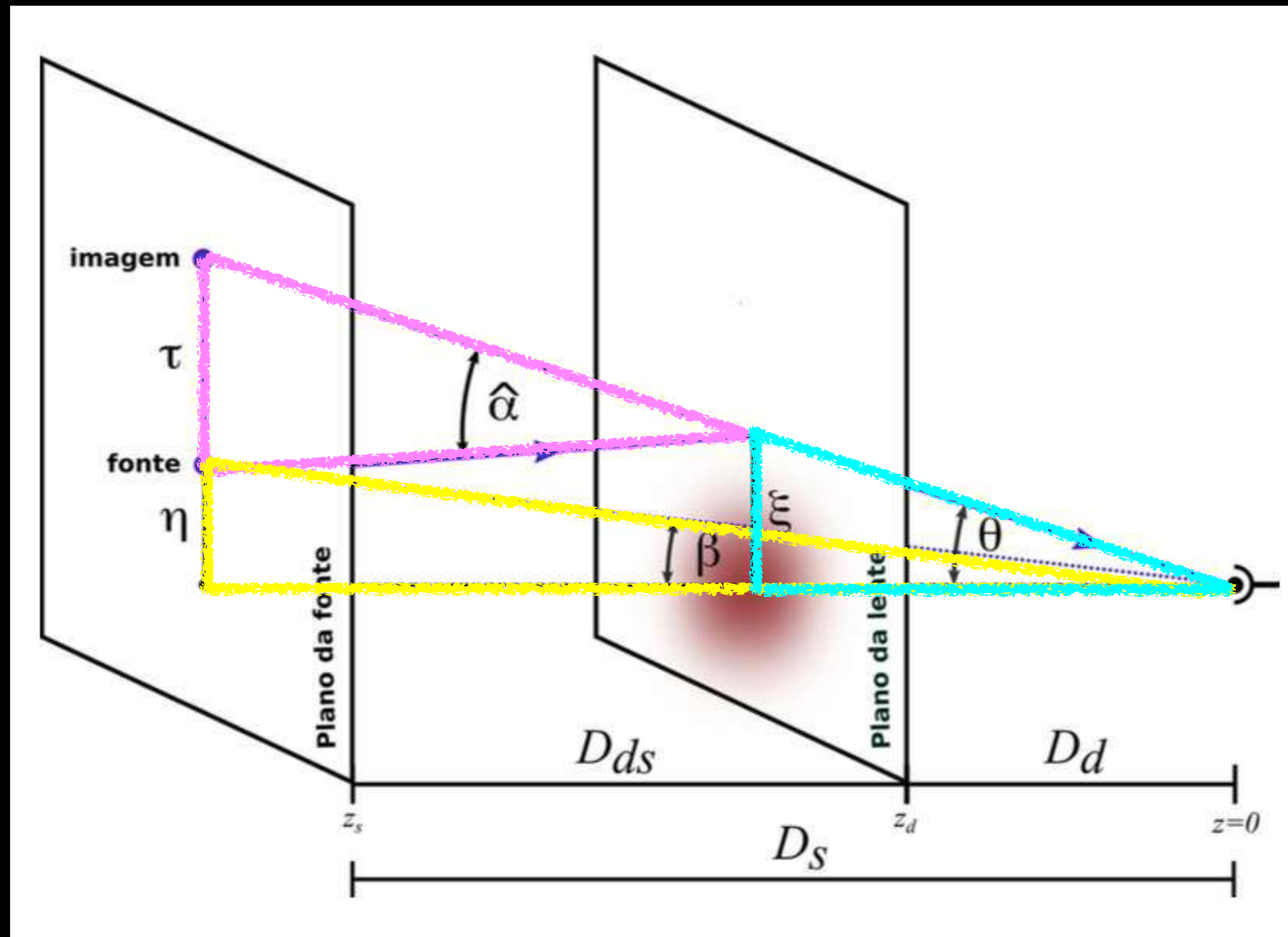
$$\hat{\alpha} = 2\hat{\alpha}_N$$



A Geometria das Lentes Gravitacionais



A Geometria das Lentes Gravitacionais

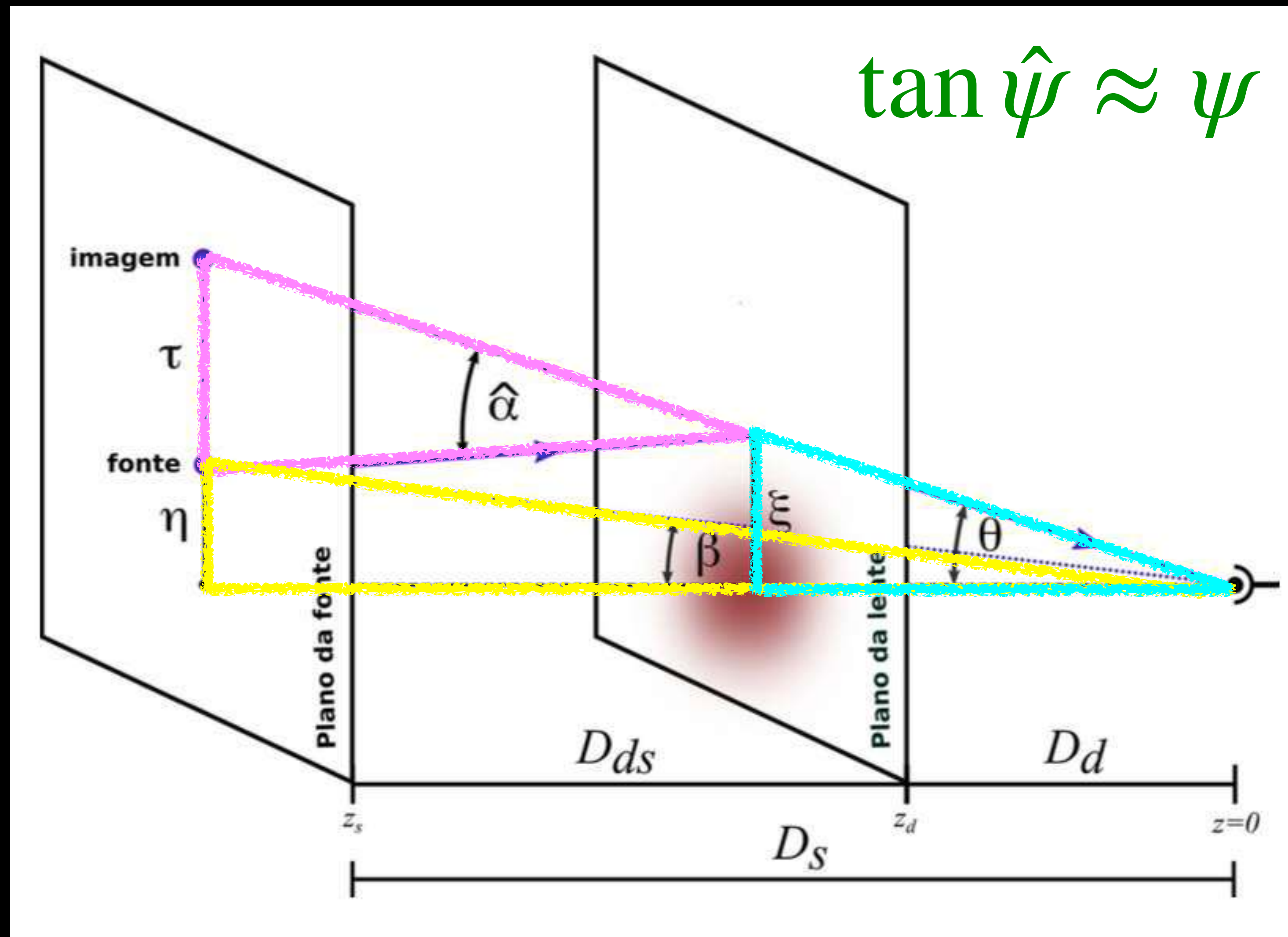


$$\tan \hat{\alpha} = \frac{\tau}{D_{ds}}$$

$$\tan \beta = \frac{\eta}{D_s}$$

$$\tan \theta = \frac{\xi}{D_d}$$

A Geometria das Lentes Gravitacionais



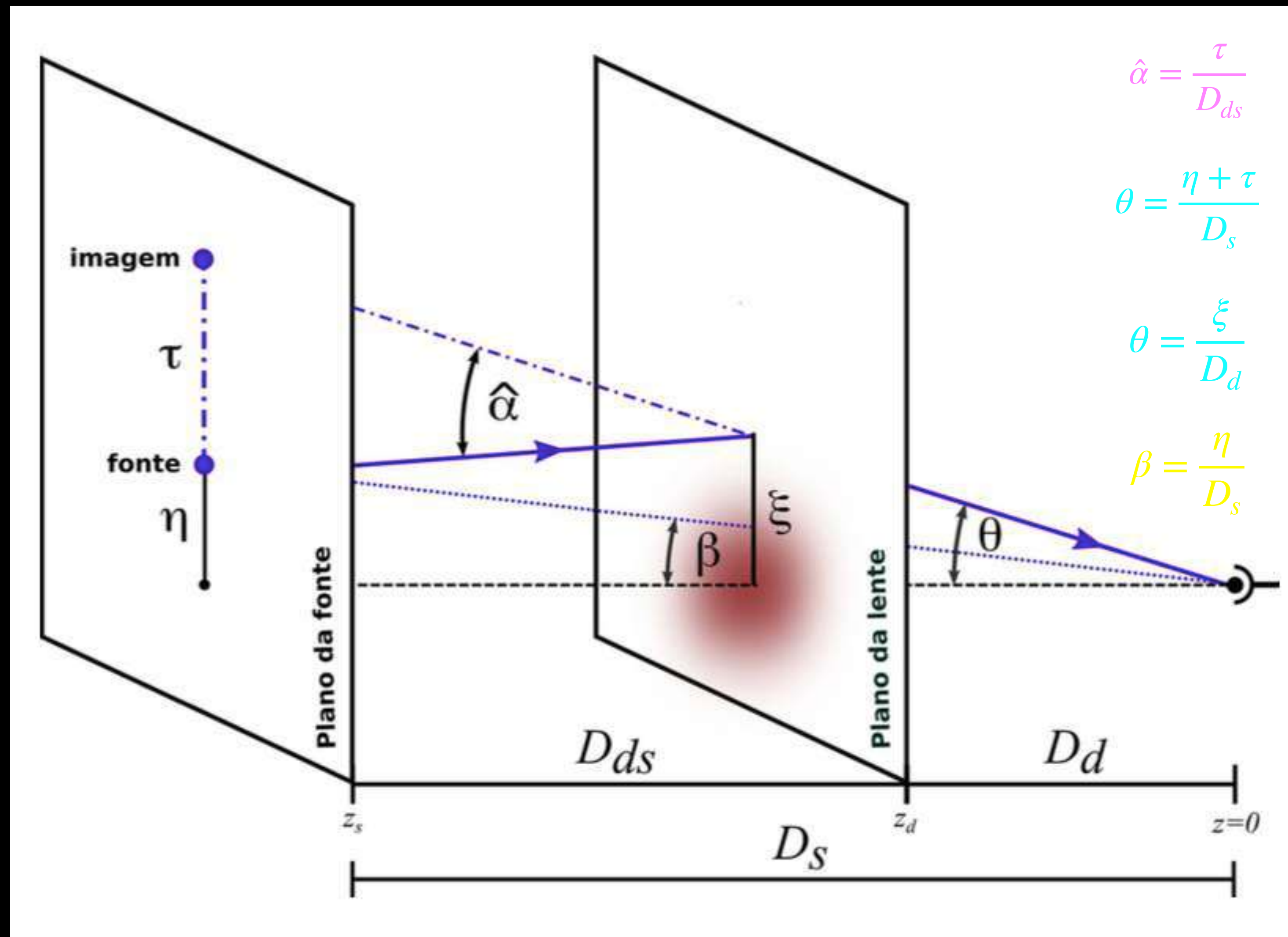
$$\hat{\alpha} = \frac{\tau}{D_{ds}}$$

$$\beta = \frac{\eta}{D_s}$$

$$\theta = \frac{\xi}{D_d}$$

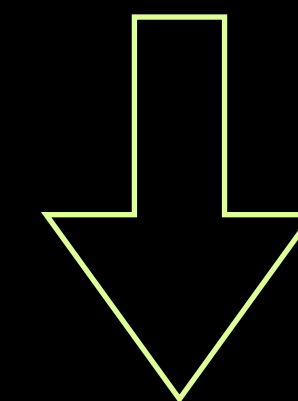
$$\theta = \frac{\eta + \tau}{D_s}$$

A Equação de lentes



$$\tau = D_{ds} \hat{\alpha}$$

$$\eta = \theta D_s - D_{ds} \hat{\alpha}$$

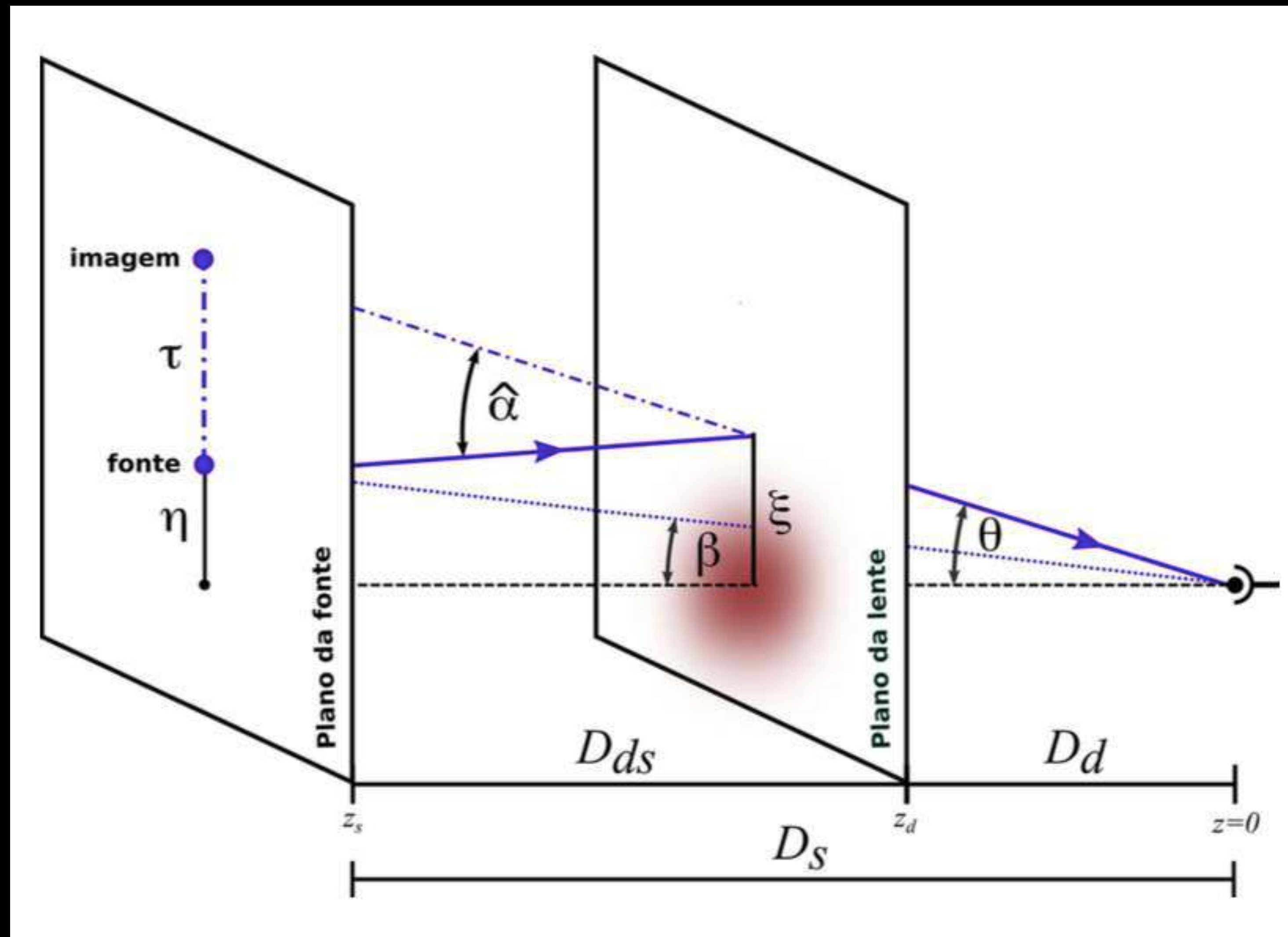


$$\frac{\eta}{D_s} = \theta - \frac{D_{ds}}{D_s} \hat{\alpha}$$

$$\beta(\theta) = \theta - \alpha(\theta)$$

Equação de Lentes

A Equação de Lentes

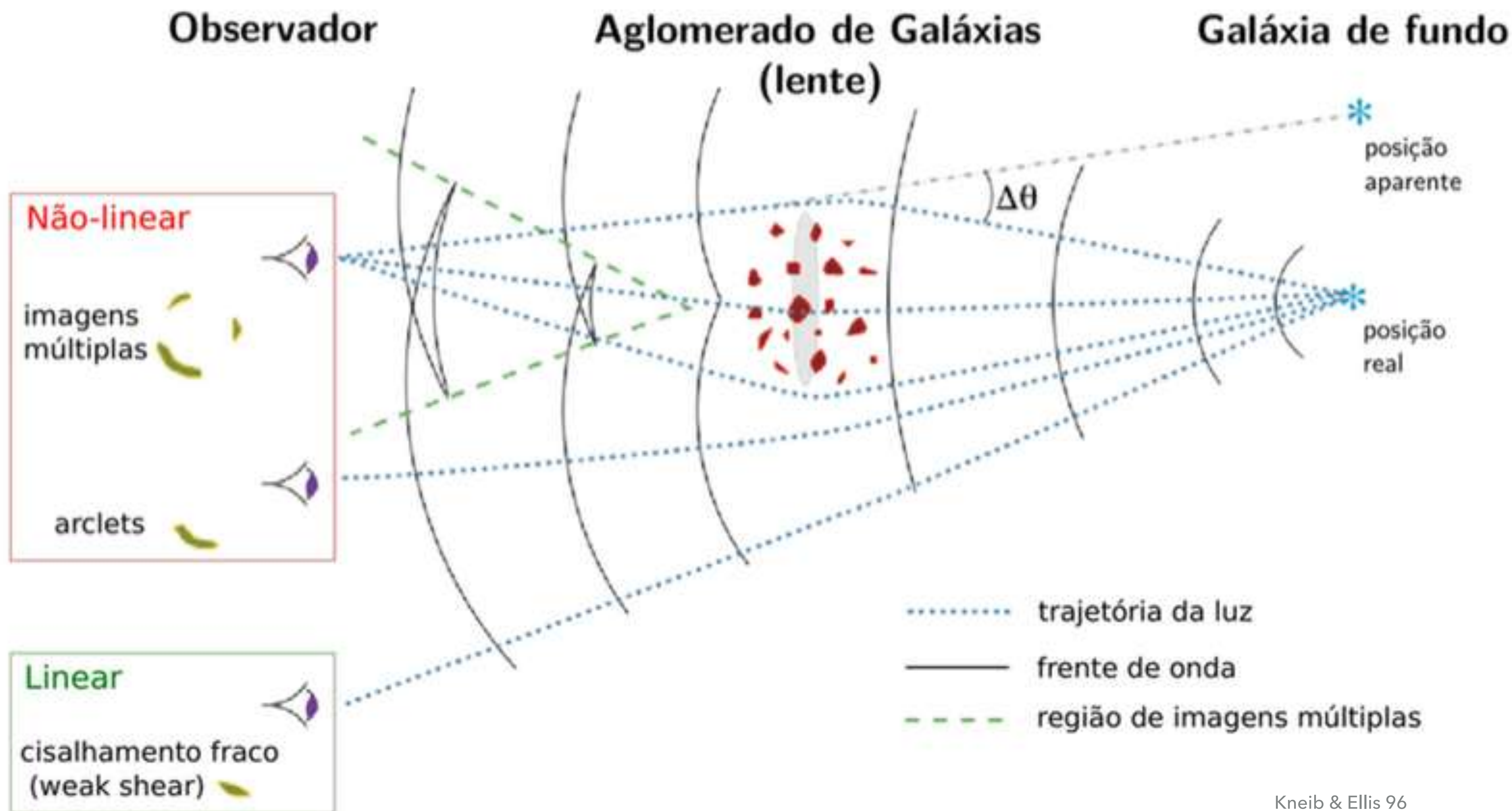


posição da fonte

deflexão gravitacional

$$\beta(\theta) = \theta - \alpha(\theta)$$

posição da imagem (observada)



Kneib & Ellis 96

Observador

Aglomerado de Galáxias
(lente)

Galáxia de fundo

$$\kappa > 1$$

Não-linear

imagens múltiplas

arclets

$$\kappa \ll 1$$

Linear

cisalhamento fraco
(weak shear)

$$\kappa \equiv \frac{\Sigma}{\Sigma_{cr}}$$

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

- trajetória da luz
- frente de onda
- - - região de imagens múltiplas

posição aparente

posição real

$\Delta\theta$

Kneib & Ellis 96

Algumas Definições

ψ

projeção 2D do seu potencial gravitacional

$$\nabla \psi = \alpha$$

gradiente do potencial gravitacional projetado
equivale ao ângulo de deflexão

$$\nabla^2 \psi = 2\kappa$$

laplaciano do potencial gravitacional
projetado equivale ao dobro da convergência

No regime de lente gravitacional fraca,
a distorção morfológica das fontes de
fundo é tratada como uma
transformação linear local

Formalismo das Lentes Fracas

$$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \mathcal{A}(\theta) \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

fonte

imagem

$$\mathcal{A}(\theta) = \frac{\partial \beta}{\partial \theta} = \delta_{ij} - \frac{\partial^2 \psi(\theta)}{\partial \theta_i \partial \theta_j}$$

$$\frac{\partial^2 \psi(\theta)}{\partial \theta_i \partial \theta_j} = \psi_{i,j}$$

Convergência e Cisalhamento

convergência

$$\kappa \equiv \frac{\Sigma}{\Sigma_{cr}}$$

$$\kappa = \frac{1}{2}(\psi_{11} + \psi_{22})$$

cisalhamento (shear)

$$\gamma \equiv \gamma_1 + i\gamma_2 = |\gamma| e^{2i\varphi}$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{2}(\psi_{11} - \psi_{22})$$

$$\gamma_2 = \psi_{12} = \psi_{21}$$

	<0	>0
κ		
γ_1		
γ_2		

Cisalhamento Reduzido

- O efeito da lente gravitacional é uma **combinação** do cisalhamento e a convergência

$$g = \frac{\gamma}{1 - \kappa}$$

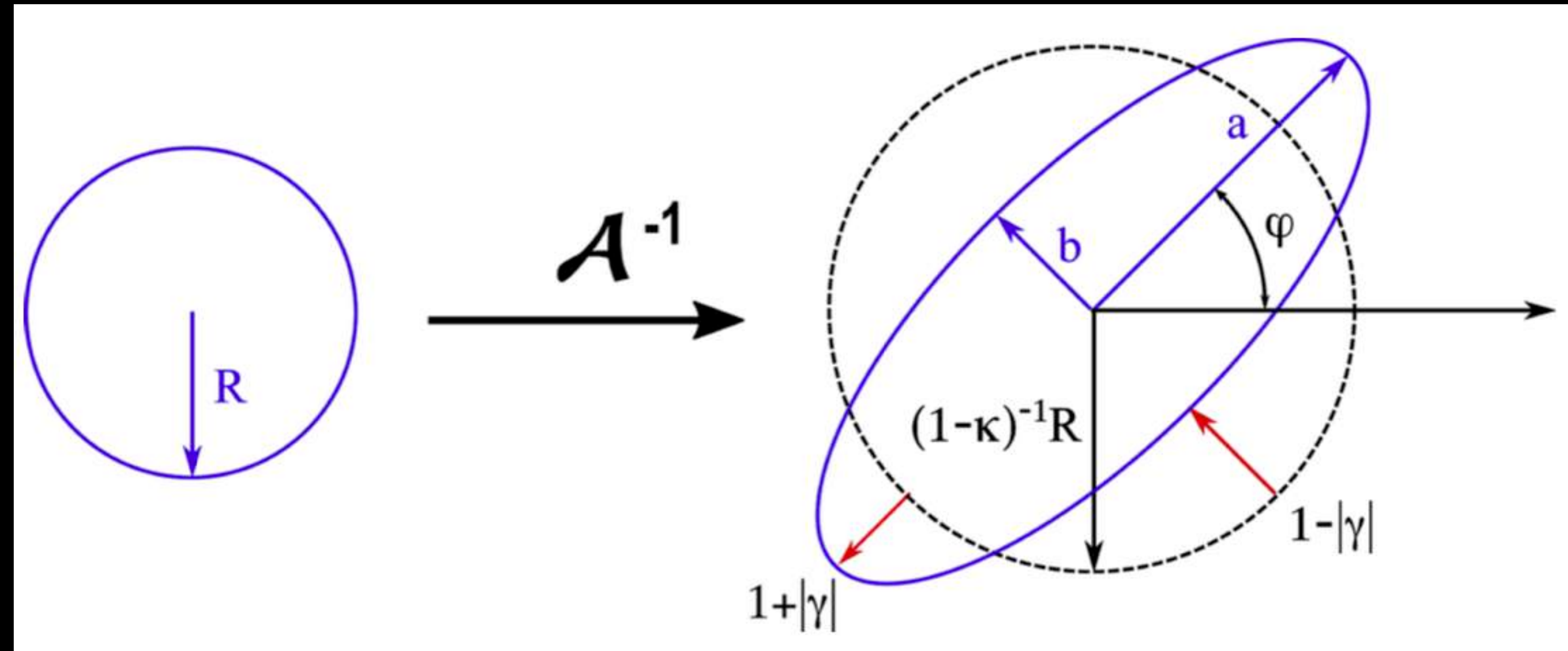
$$g \equiv g_1 + ig_2 = \frac{|\gamma|}{1 - \kappa} e^{2i\varphi}$$

No Regime Fraco...

$$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \mathcal{A}(\theta) \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

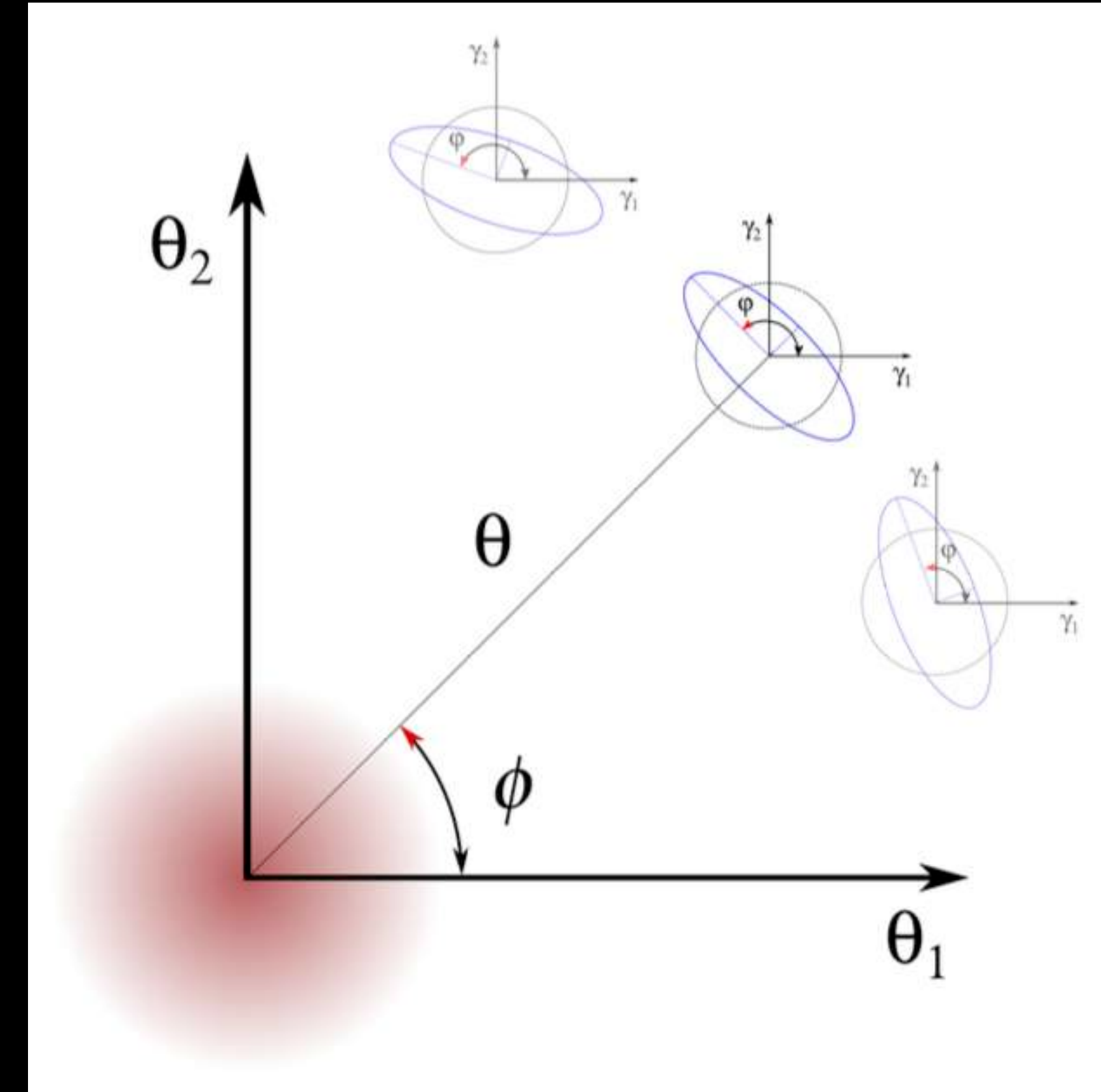
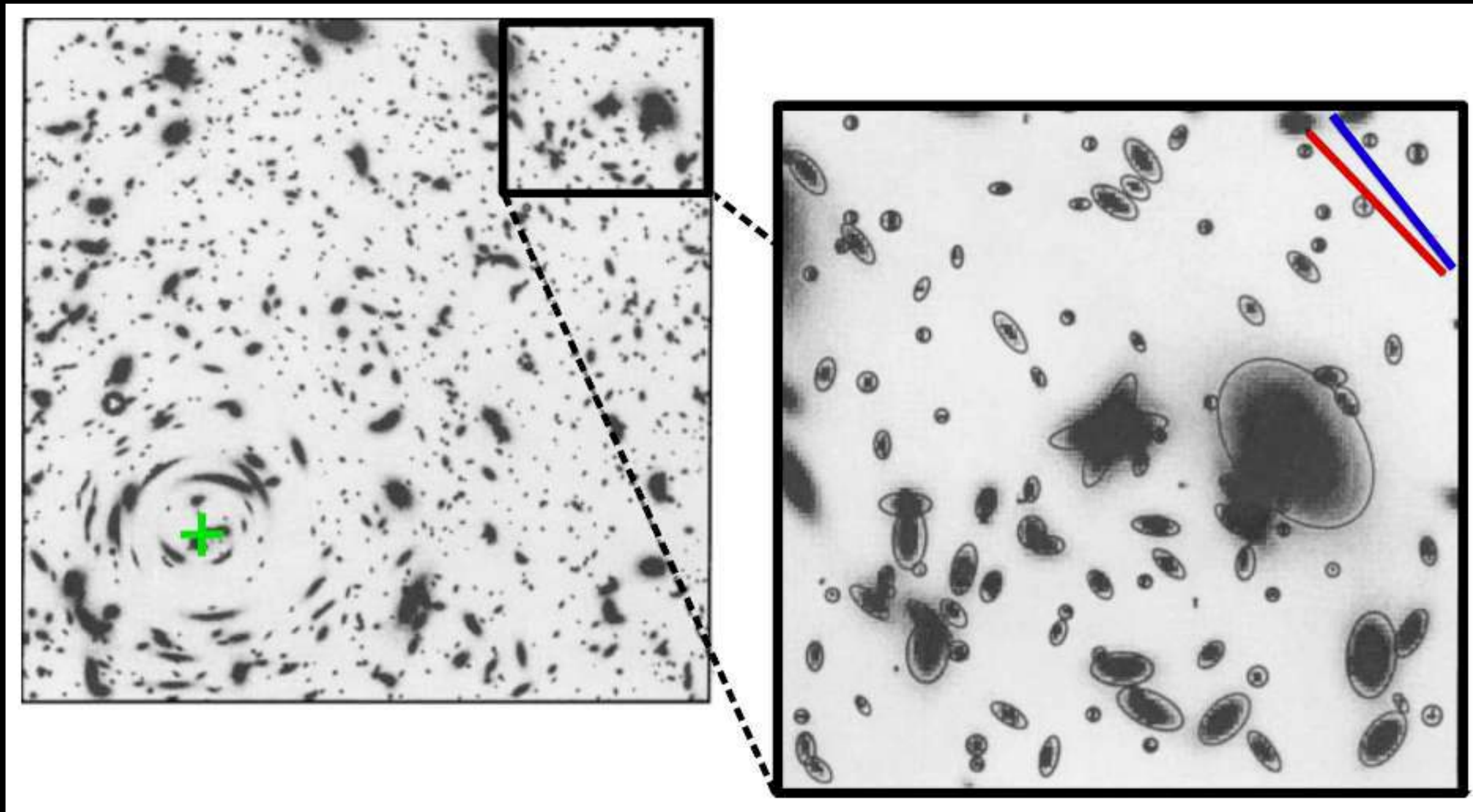
fonte

imagem



$$\mathcal{A}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 - \kappa - \gamma_1 & -\gamma_2 \\ -\gamma_2 & 1 - \kappa + \gamma_1 \end{bmatrix} = (1 - \kappa) \begin{bmatrix} 1 - g_1 & -g_2 \\ -g_2 & 1 + g_1 \end{bmatrix}$$

Lentes Fracas no Contexto Observacional



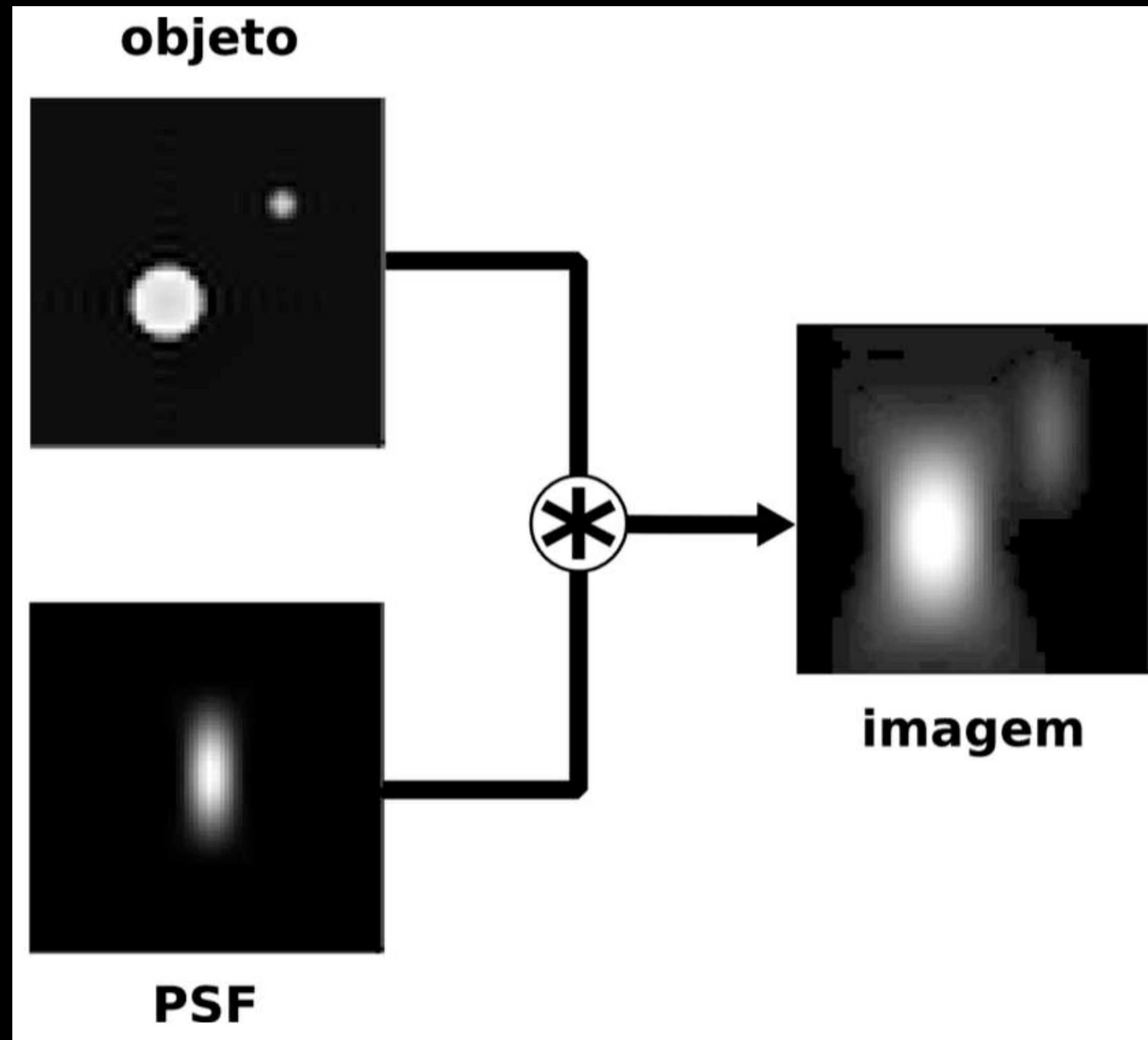
$$E(e^{(s)}) = 0$$

na ausência de lentes

$$E(e) \approx g \approx \gamma$$

$$g = \frac{\gamma}{1 - \kappa}$$

A Point Spread Function (PSF)



Galáxias: do formato intrínseco até a imagem medida



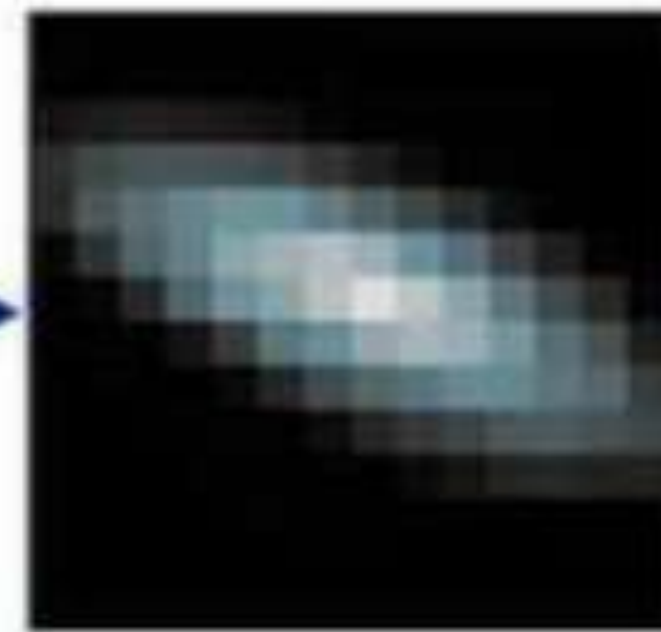
Galáxia com elipticidade intrínseca desconhecida



Efeito de lente gravitacional causa um cisalhamento (shear)



Atmosfera + telescópio causam uma convolução



Detectores medem uma imagem pixelizada

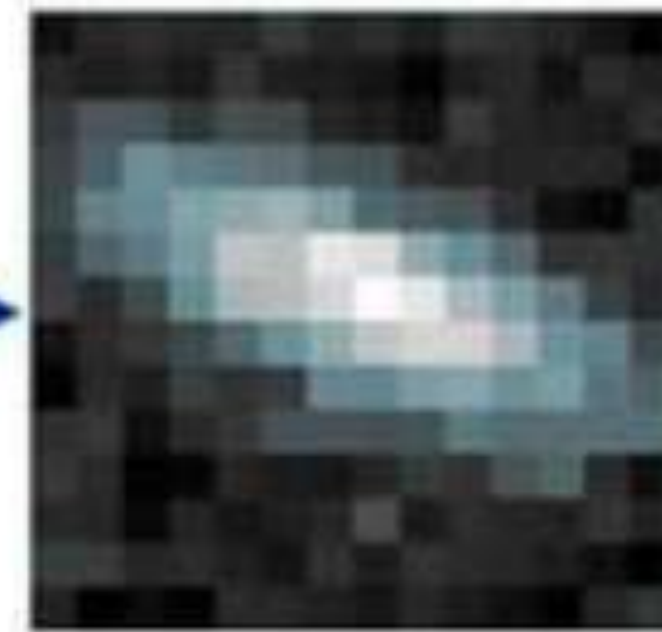


Imagem também contém ruído

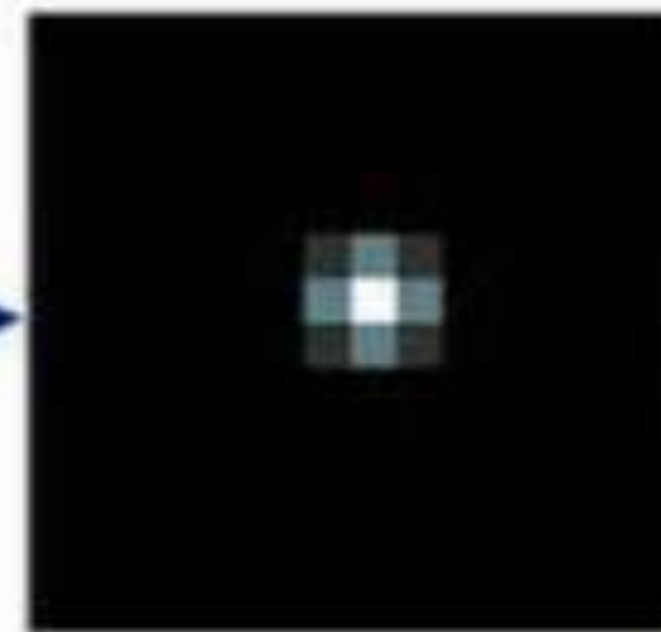
Estrelas: de fontes pontuais até a imagem medida



Estrela (fonte pontual)



Atmosfera + telescópio causam uma convolução



Detectores medem uma imagem pixelizada

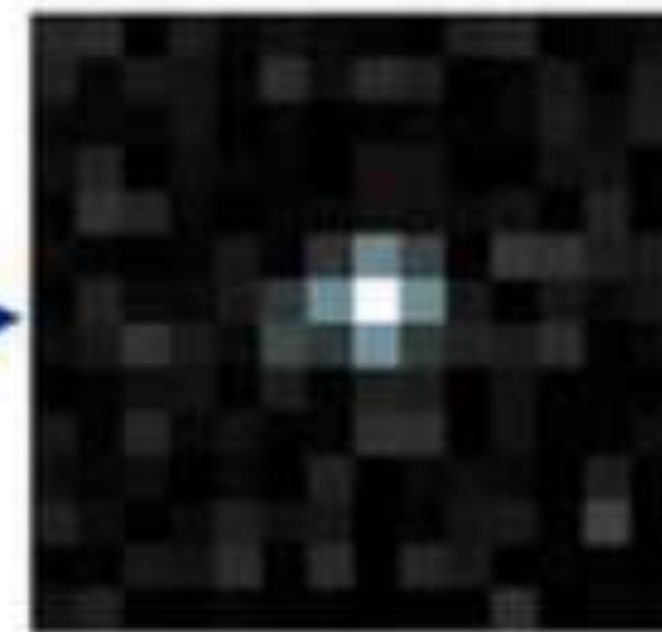
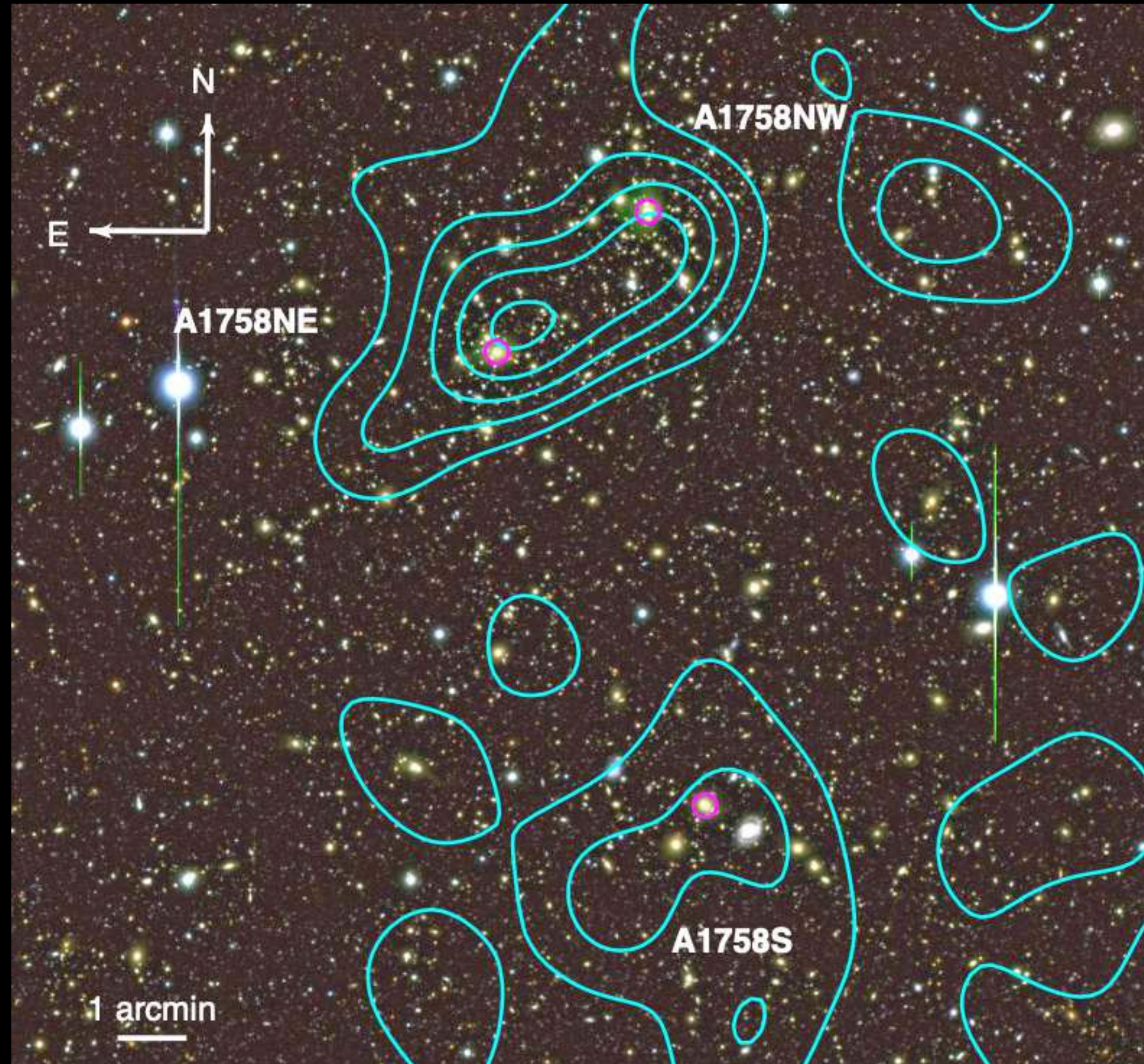


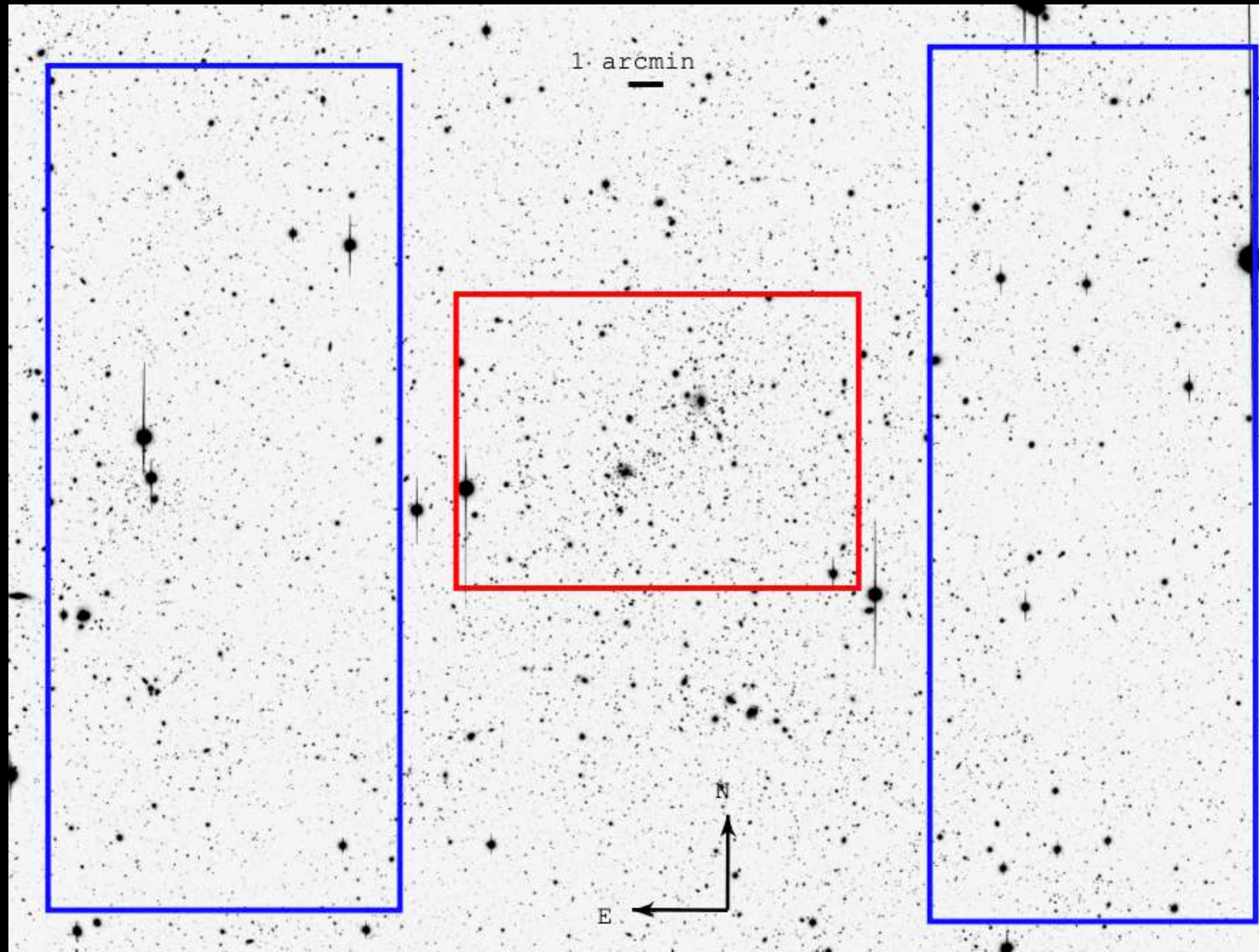
Imagem também contém ruído

O Resultado: Mapa da Distribuição de Massa



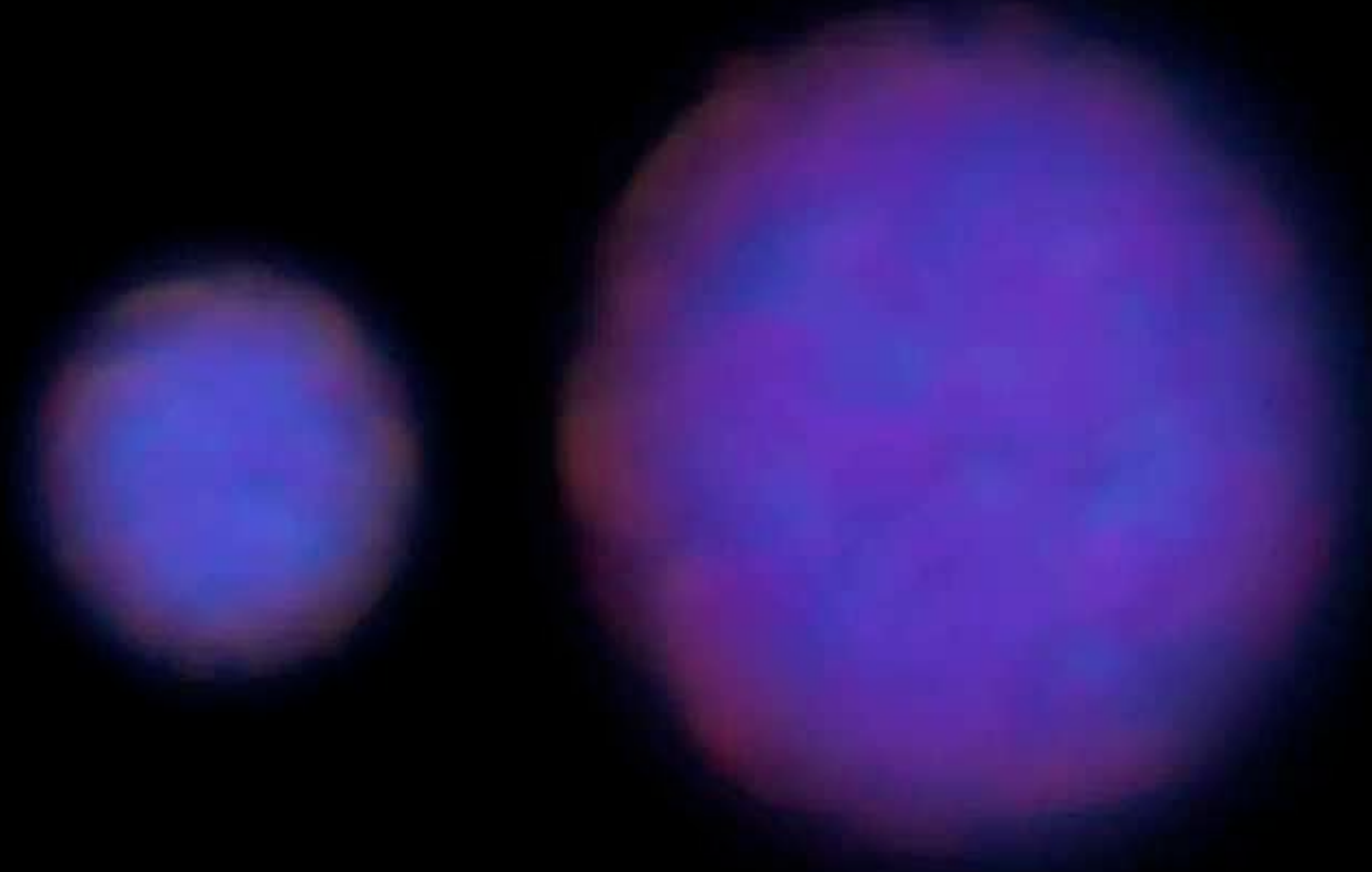
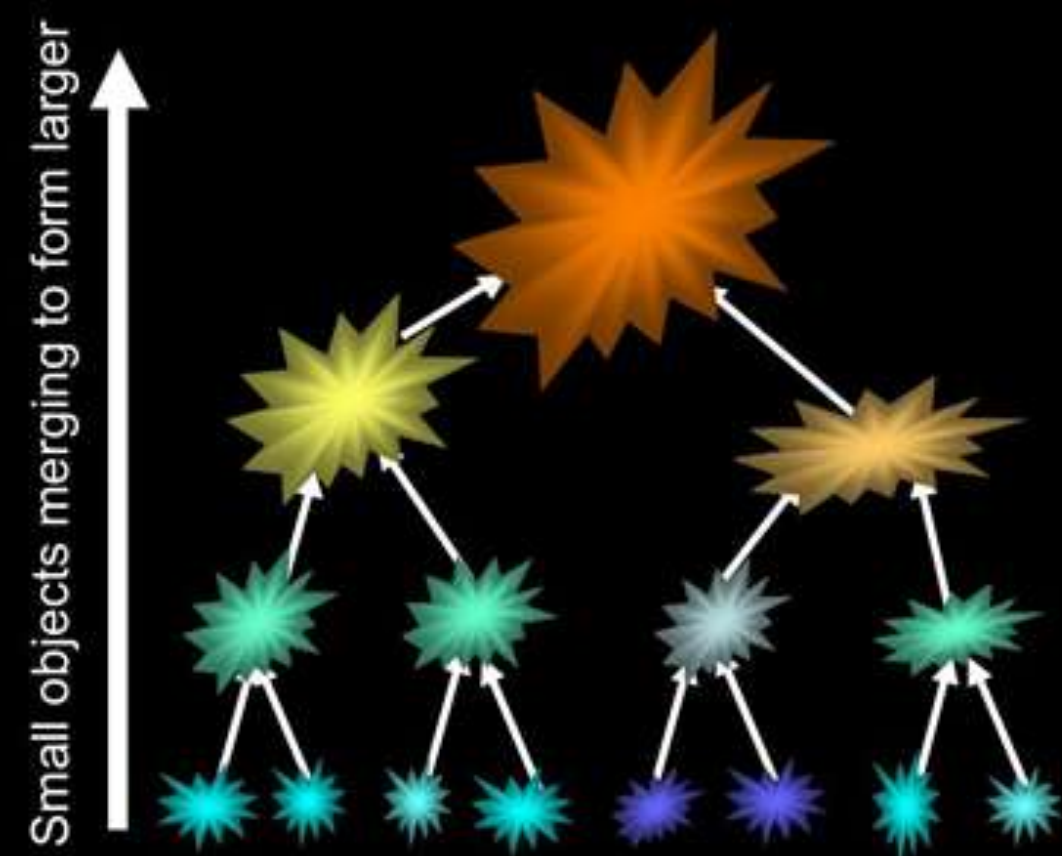
~80% da massa do
aglomerado é
matéria escura

Só pra lembrar...



a medida da forma
das galáxias é
realizada em imagens
monocromáticas
profundas

Fusões entre Aglomerados de Galáxias

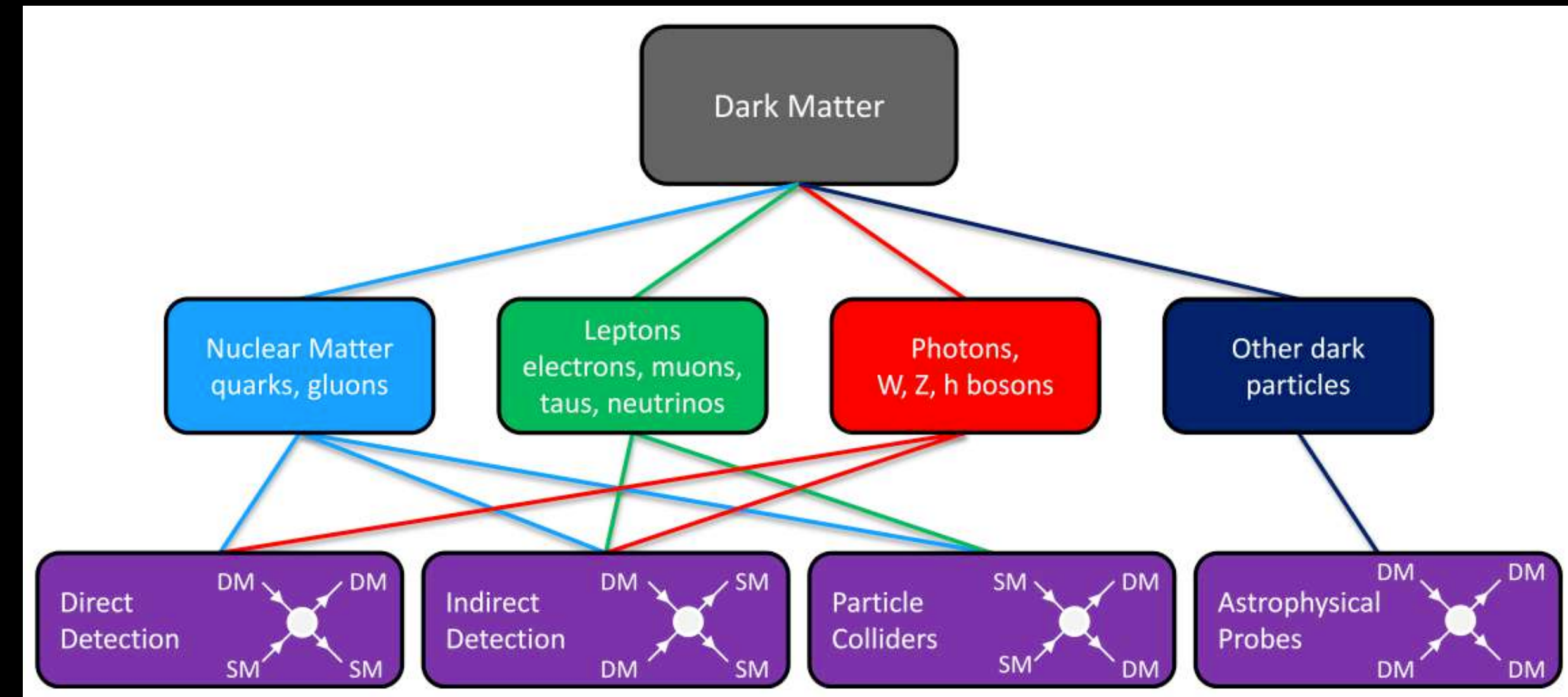
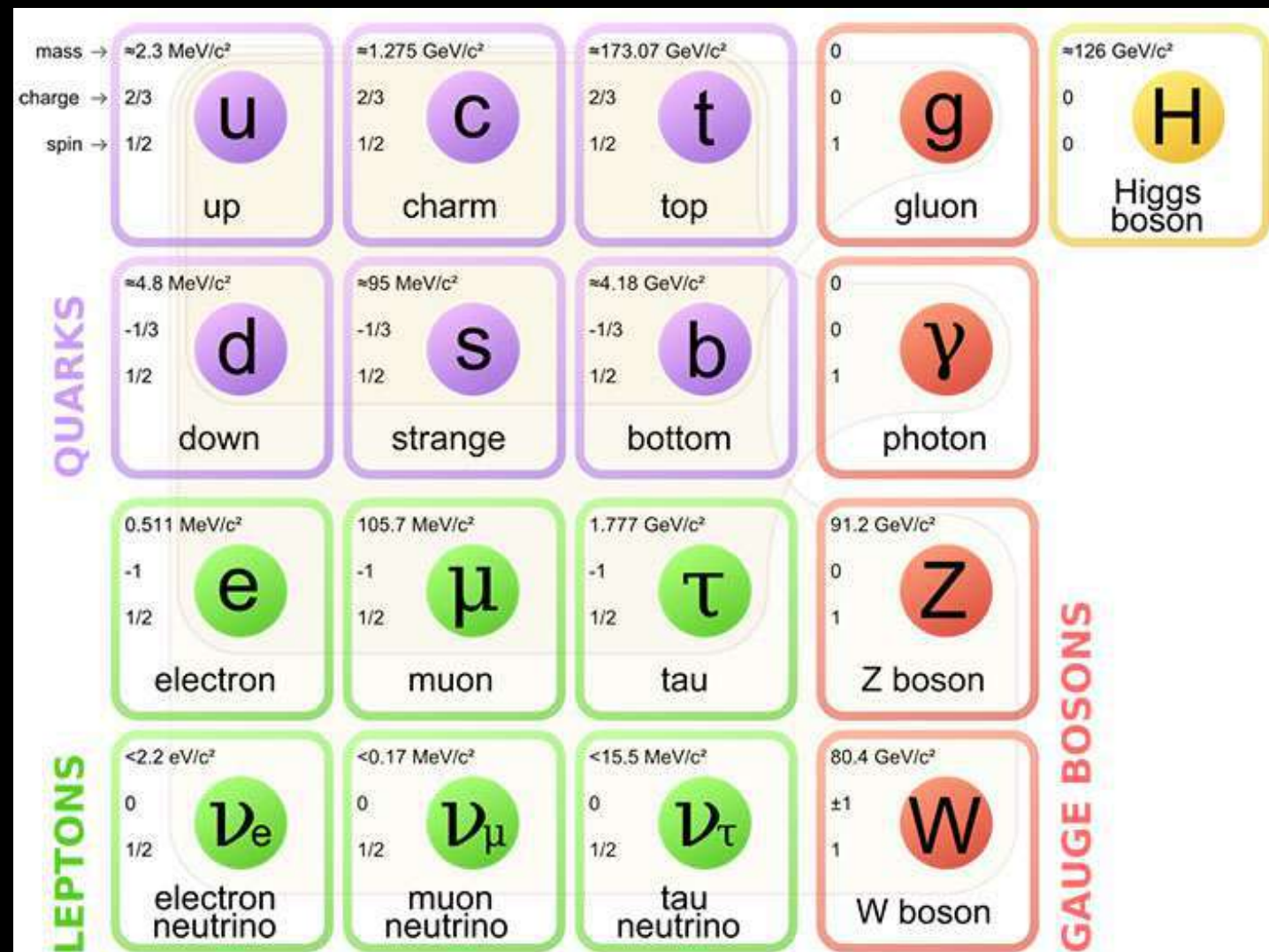


Segundo o cenário hierárquico, aglomerados se formam a partir da fusão de estruturas menores

Aglomerados em Fusão: excelentes laboratórios

arXiv:1305.1605

- ▶ Detalhes do cenário hierárquico
- ▶ Estudo dos componentes do aglomerado
- ▶ Ambiente para a evolução das galáxias
- ▶ A natureza da matéria escura



Apenas sistemas
astrofísicos conseguem
investigar a autointeração
da matéria escura

... uma pequena digressão antes de continuar:
o modelo Λ CDM realmente funciona bem?

Talvez Não! (Ao Menos em Pequenas Escalas)

- O modelo Λ CDM **falha** ao explicar algumas **inconsistências em escalas de galáxias**:



Λ CDM

Much more than we expected, but now less than what we want

Michael S. TURNER

M.S. Turner
Kavli Institute for Cosmological Physics
The University of Chicago
5640 S. Ellis Avenue
Chicago, IL 60637-1433
USA E-mail: mturner@uchicago.edu

arXiv:2109.01760

Challenges for Λ CDM: An update

L. Perivolaropoulos^{1,*} and F. Skara^{1,†}

¹*Department of Physics, University of Ioannina, 45110 Ioannina, Greece*
(Dated: April 7, 2022)

arXiv:2105.05208

Article

Small Scale Problems of the Λ CDM Model: A Short Review

Antonino Del Popolo^{1,2,3,*} and Morgan Le Delliou^{4,5,6}

- ¹ Dipartimento di Fisica e Astronomia, University of Catania, Viale Andrea Doria 6, 95125 Catania, Italy
 - ² INFN Sezione di Catania, Via S. Sofia 64, I-95123 Catania, Italy
 - ³ International Institute of Physics, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 59012-970 Natal, Brazil
 - ⁴ Instituto de Física Teórica, Universidade Estadual de São Paulo (IFT-UNESP), Rua Dr. Bento Teobaldo Ferraz 271, Bloco 2 - Barra Funda, 01140-070 São Paulo, SP Brazil; delliou@ift.unesp.br
 - ⁵ Institute of Theoretical Physics Physics Department, Lanzhou University No. 222, South Tianshui Road, Lanzhou 730000, Gansu, China
 - ⁶ Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Ed. C8, Campo Grande, 1769-016 Lisboa, Portugal
- * Correspondence: adelpopolo@oact.inaf.it

Academic Editors: Jose Gaité and Antonaldo Diaferio

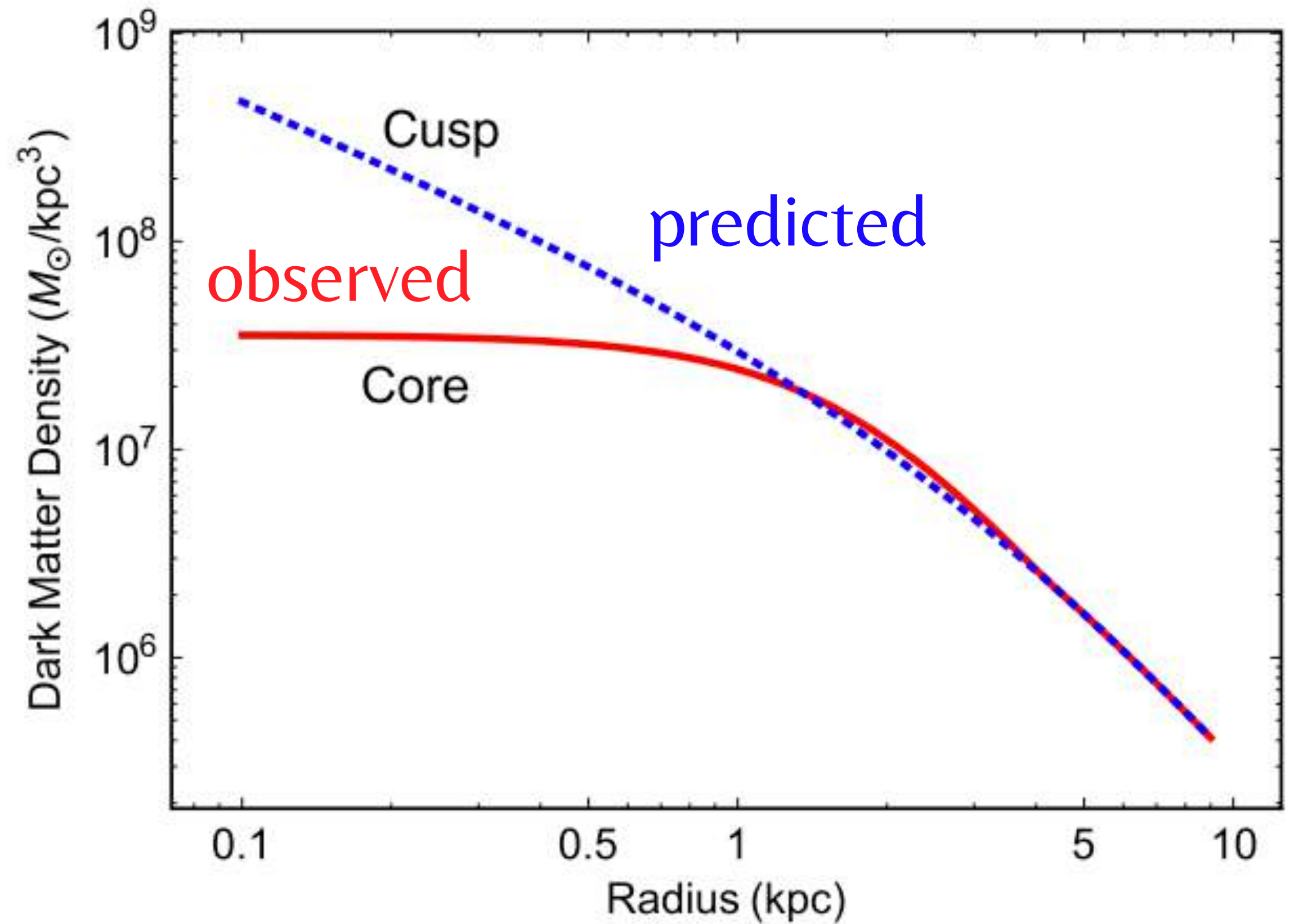
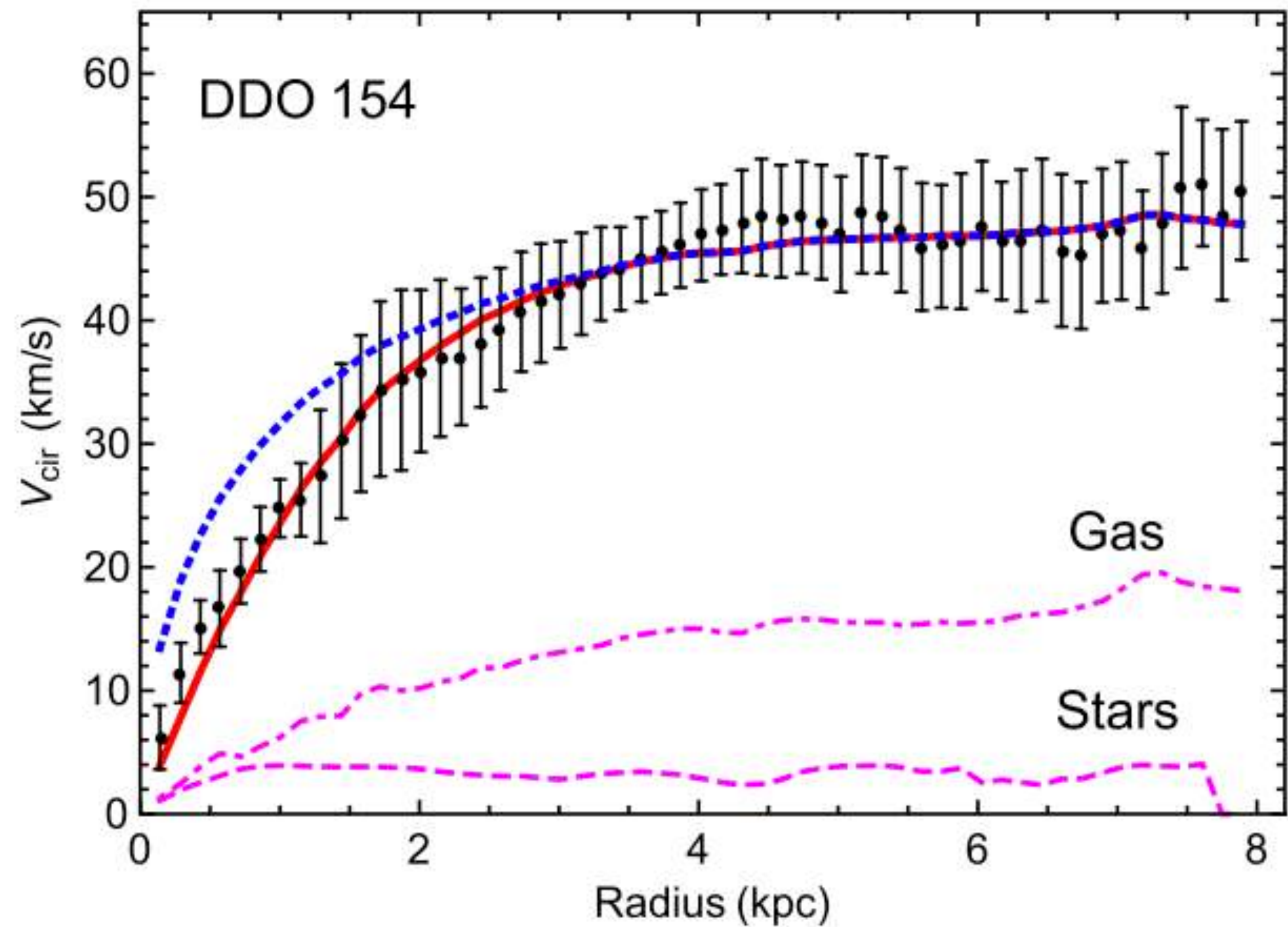
Received: 30 May 2016; Accepted: 9 December 2016; Published: 20 February 2017

arXiv:1606.07790

Talvez Não! (Ao Menos em Pequenas Escalas)

- Problema núcleo-cúspide (*core-cusp problem*)
- Problema da diversidade
- Problema “grande demais para falhar” (*too-big-too-fail*)

Problema *Core-Cusp*

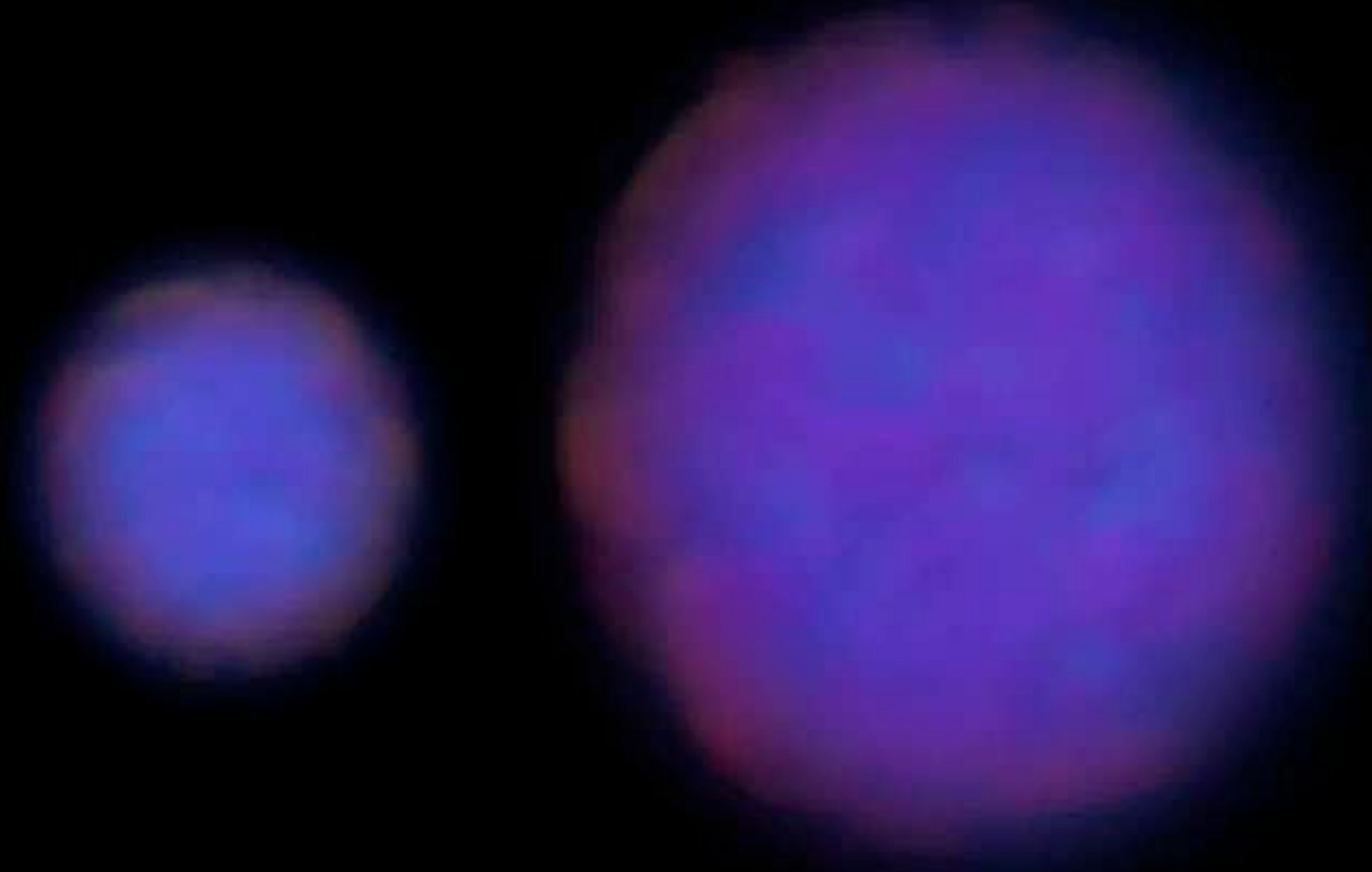
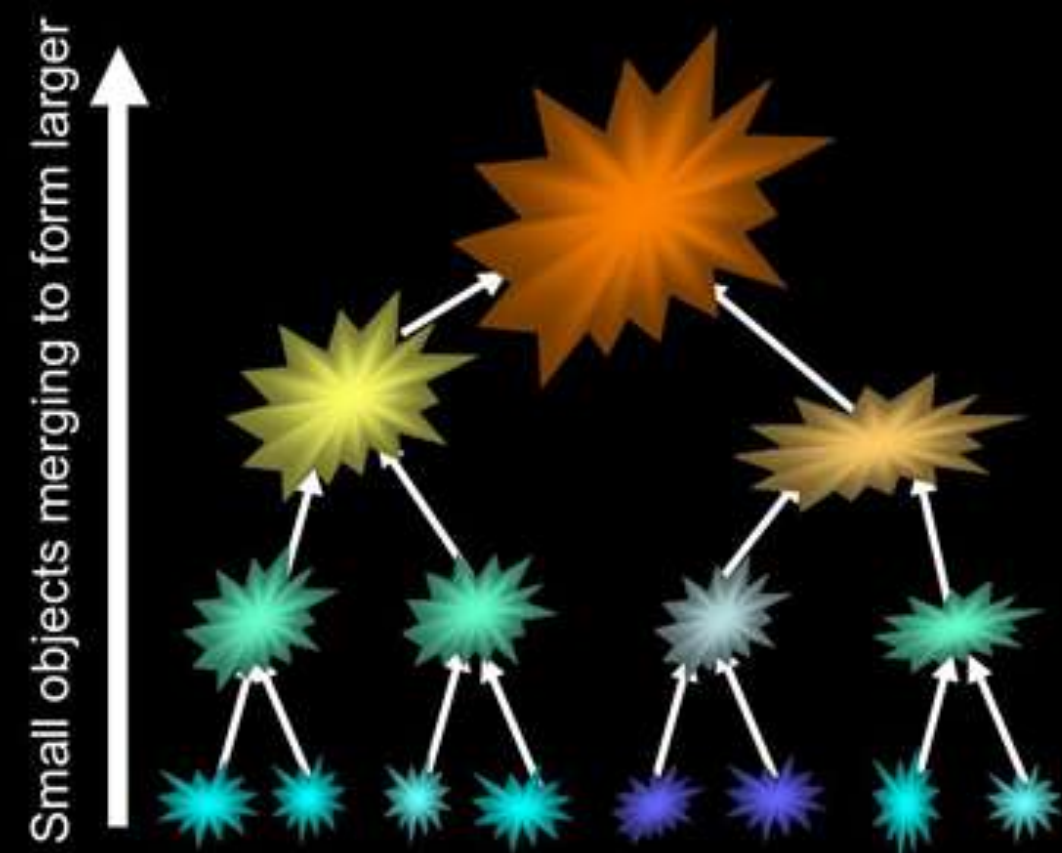


arXiv:1705.02358

Soluções?

- **Específico para este problema:** efeitos bariônicos (ex.: *feedback* de AGN).
- **Solução mais geral:** alterar o paradigma CDM e permitir interações da Matéria Escura além do modelo padrão (i.e. gravidade + força desconhecida).
- **SIDM:** Matéria Escura Autointeragente (*Self-Interacting Dark Matter*).

Como podemos testar a SIDM se
não temos matéria escura acessível
em nosso ambiente local?



Segundo o cenário hierárquico, aglomerados se formam a partir da fusão de estruturas menores

O Aglomerado Bala

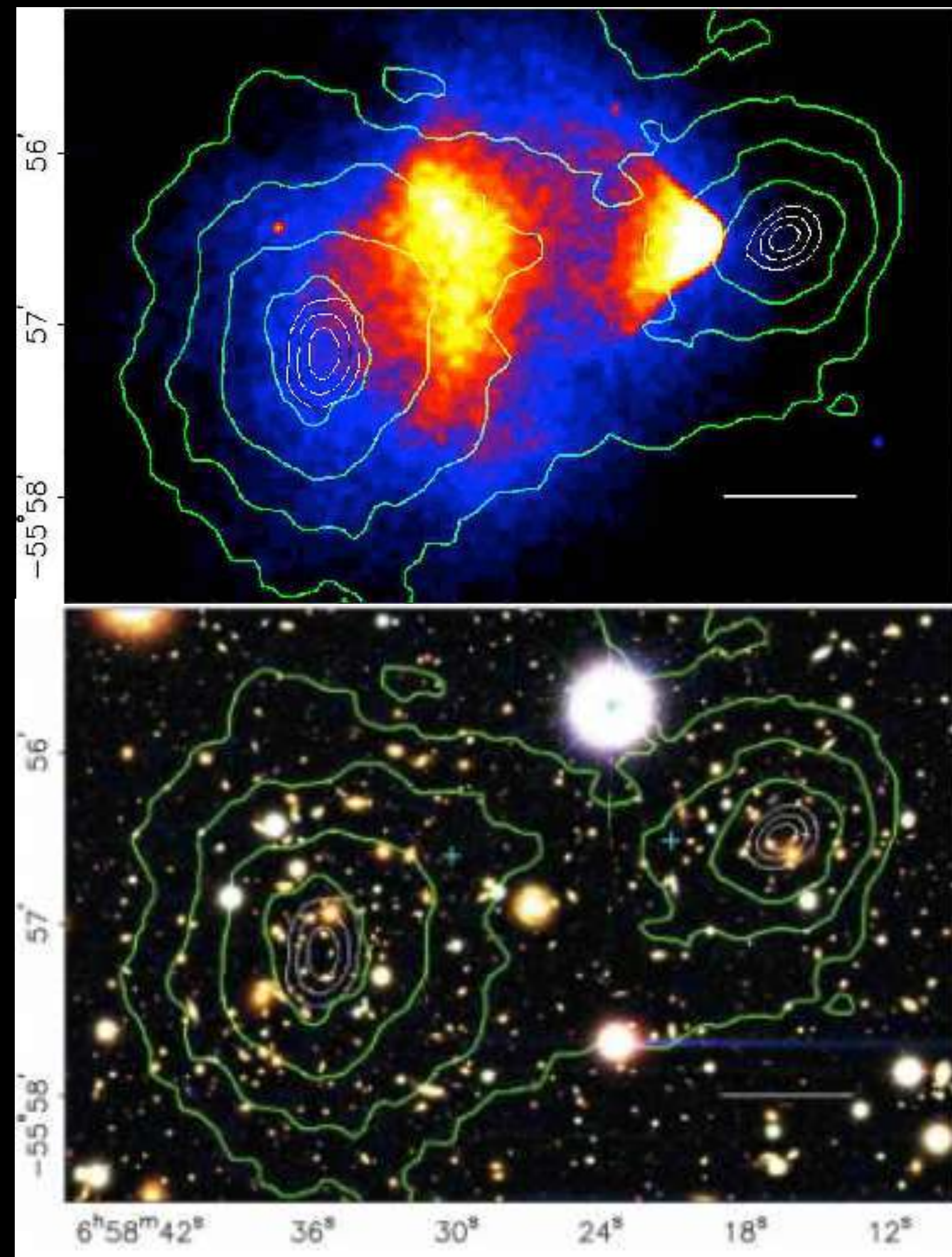


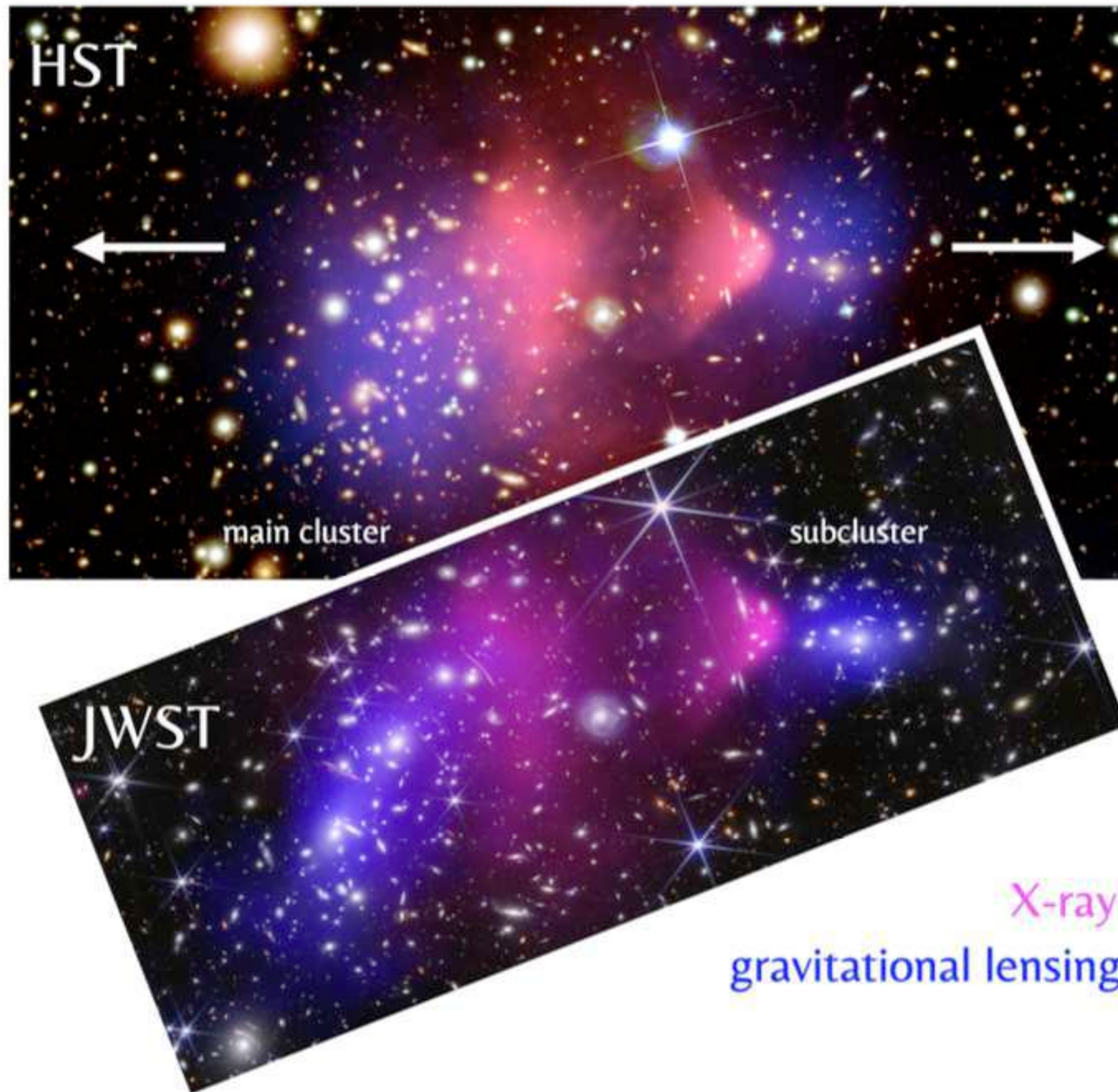
DM $\Rightarrow$ azul (lentes gravitacionais)

ICM $\Rightarrow$ magenta

galaxies $\Rightarrow$ óptico

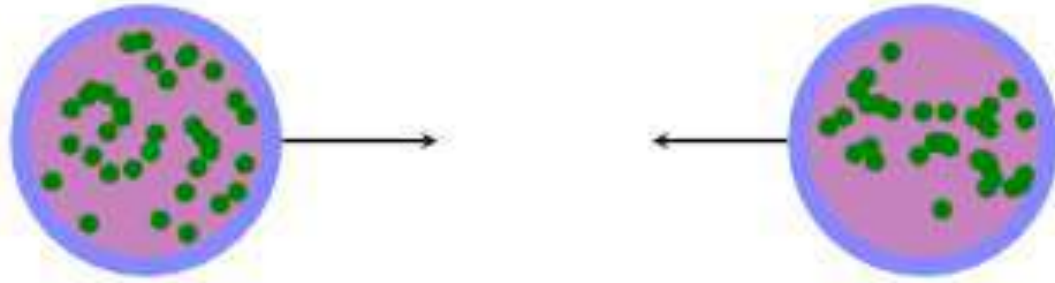
astro-ph/0608407





Pre-Merger

all three components (gas, dark matter, and galaxies) are found to be relaxed within a single potential well, displaying highly concentric spatial distributions



Post-Merger

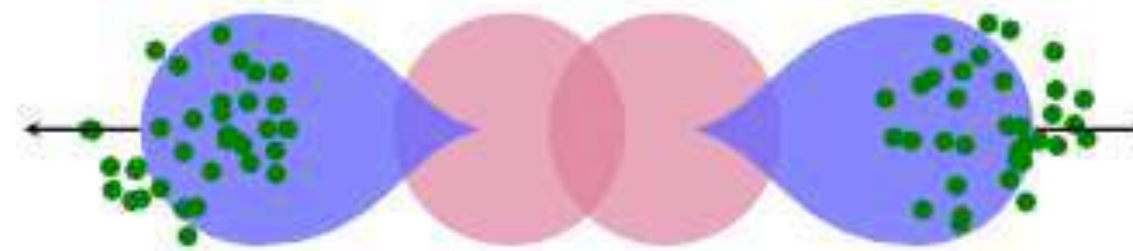
ram pressure causes the interacting gas to fall behind.

spatial offsets are generated when drag and tails decouple the dark matter halos.

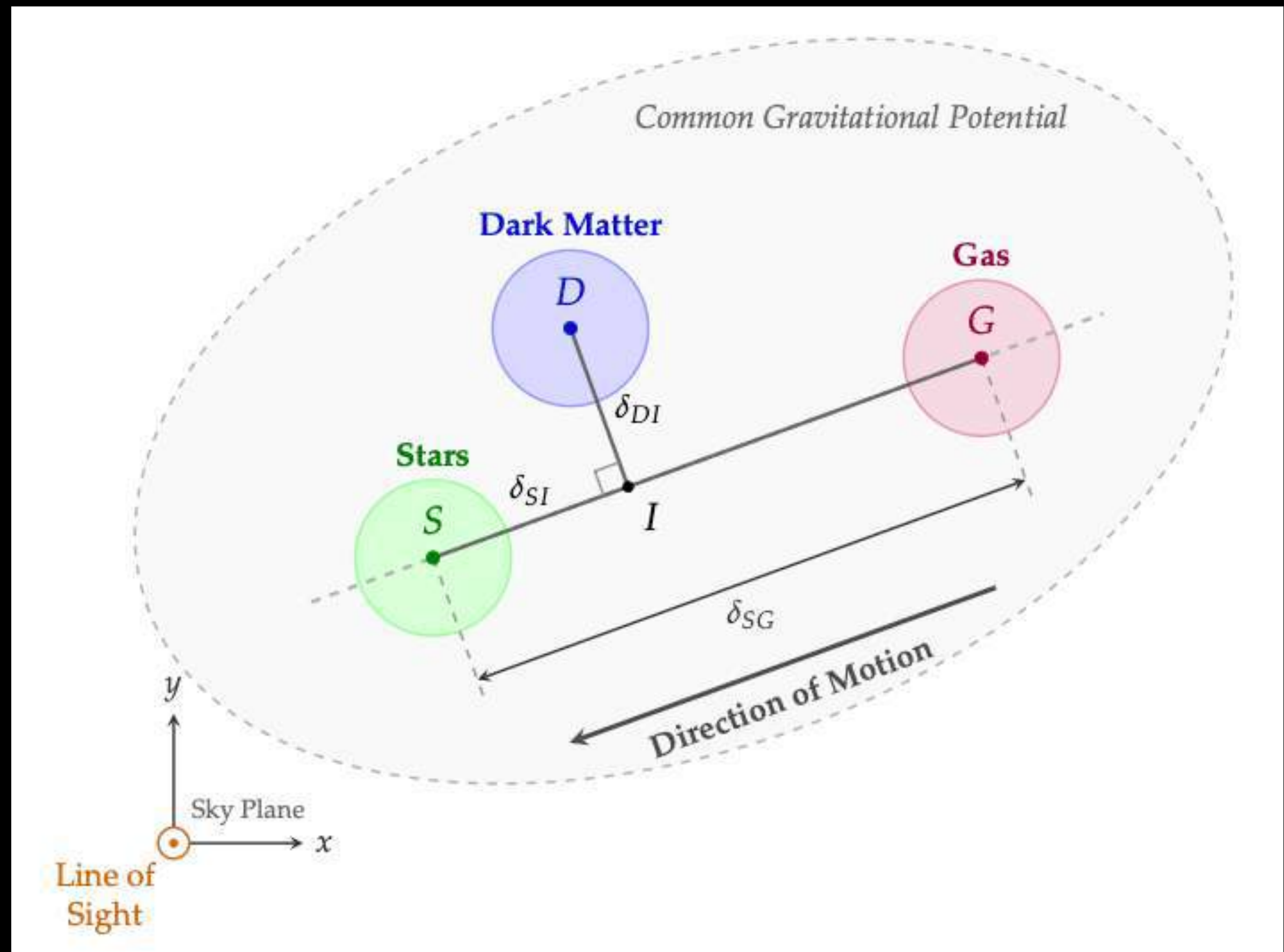


CDM

zero spatial offset between dark matter and galaxies



SIDM

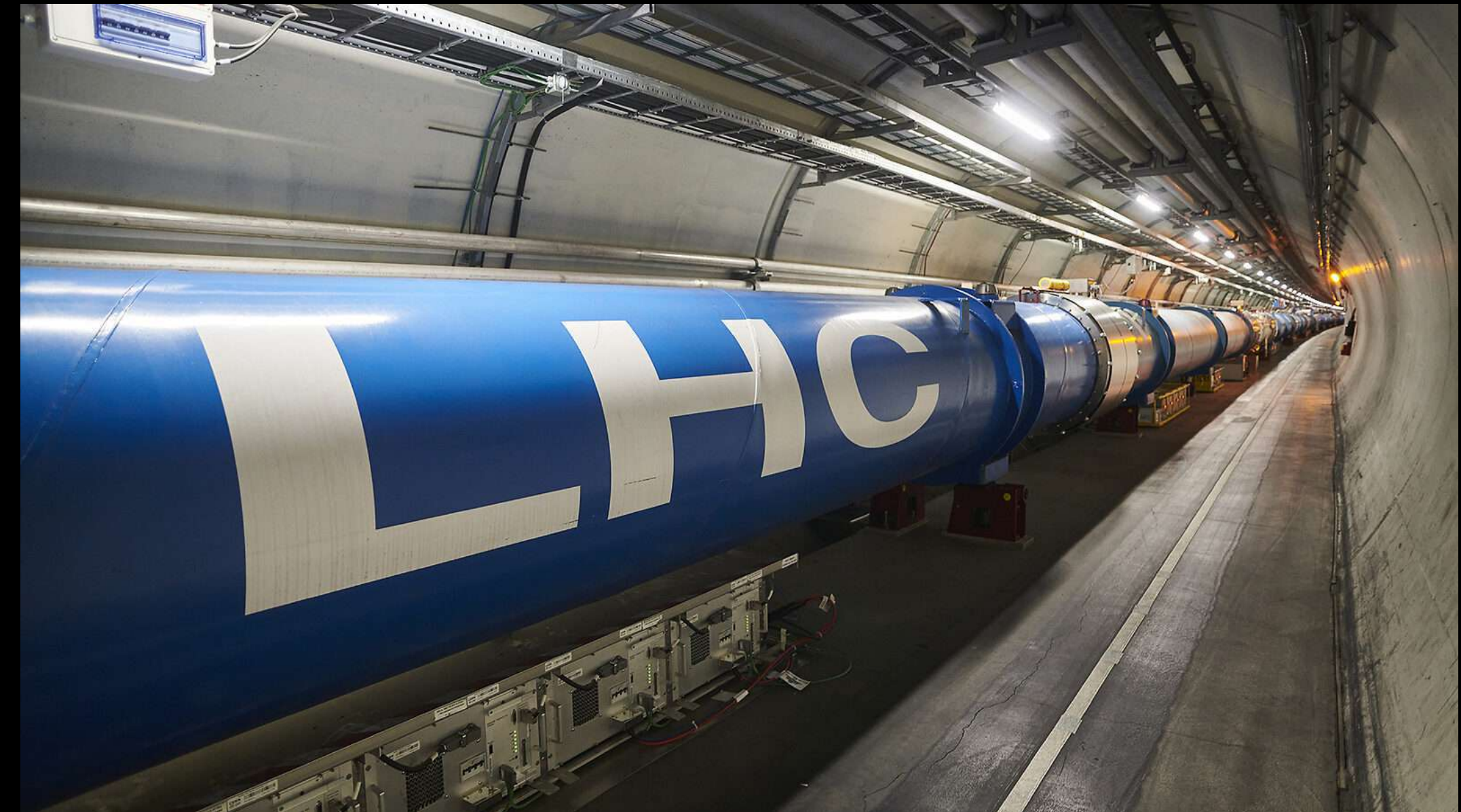


Aglomerados em Fusão são Grandes Colisores de Partículas!

- **contra:** energia por partícula $\frac{\text{merging cluster}}{LHC} \sim 10^{-6}$
- **pró:** $\sim 10^{70}$ partículas de matéria escura
- o melhor lugar para se testar SIDM!

σ/m

seção de choque de
autointeração da matéria
escura

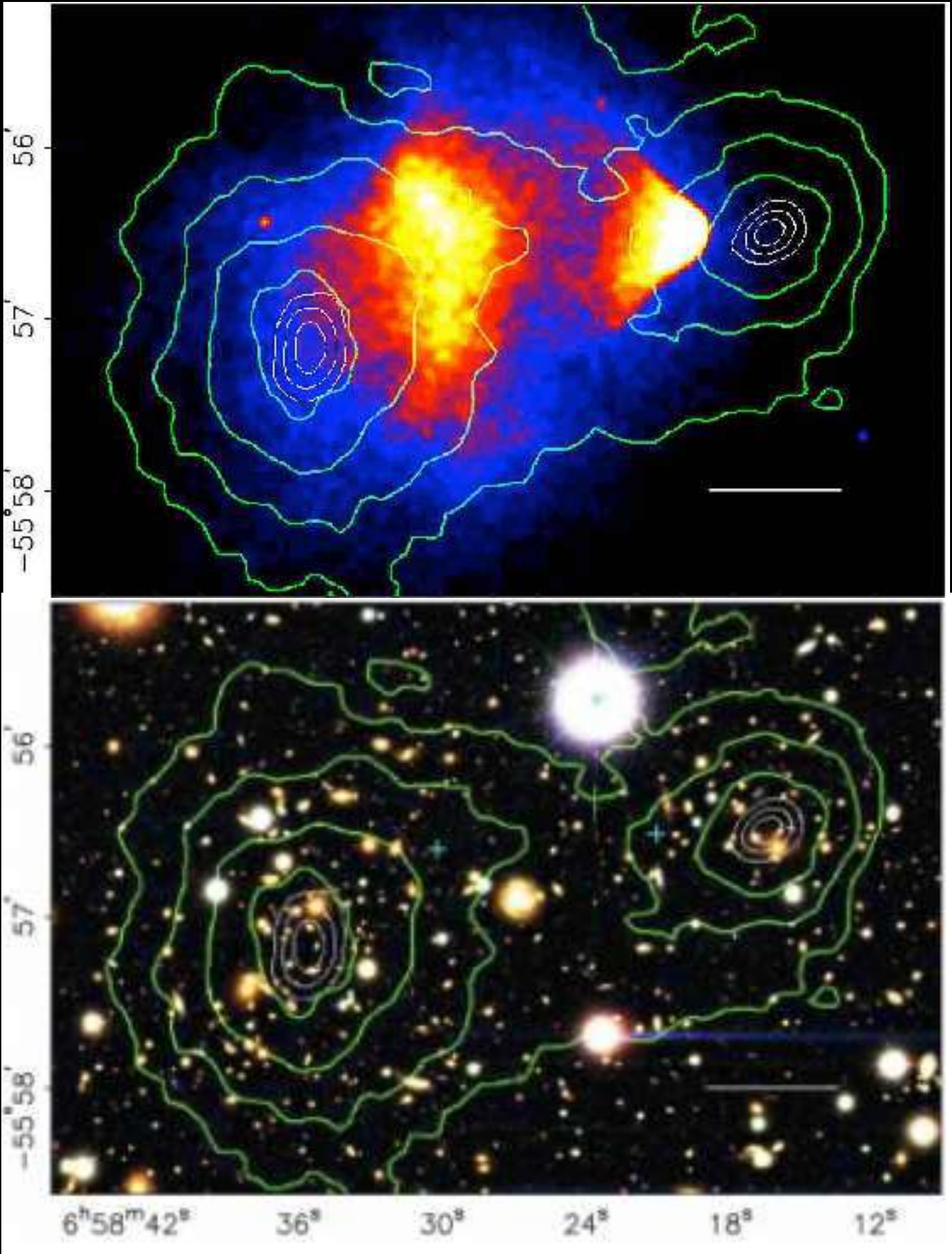


Aglomerados em Fusão são Grandes Colisores de Partículas!

- Como **estimar** ao menos uma ordem de grandeza para a **seção de choque de auto-interação**?

$$\sigma/m$$

seção de choque de
autointeração da matéria
escura



$$\sigma/m|_{\text{gas}} \gg \sigma/m$$
$$\Rightarrow \sigma/m|_{\text{gas}} \gg 1$$

$$\sigma/m|_{\text{gal}} ?$$
$$\sigma/m ?$$

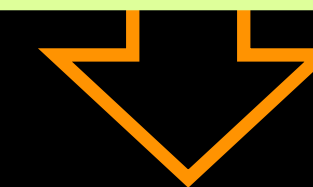

$$\sigma/m|_{\text{gal}} = 0$$

Investigando a SIDM a Partir da Anatomia Pós-Colisão

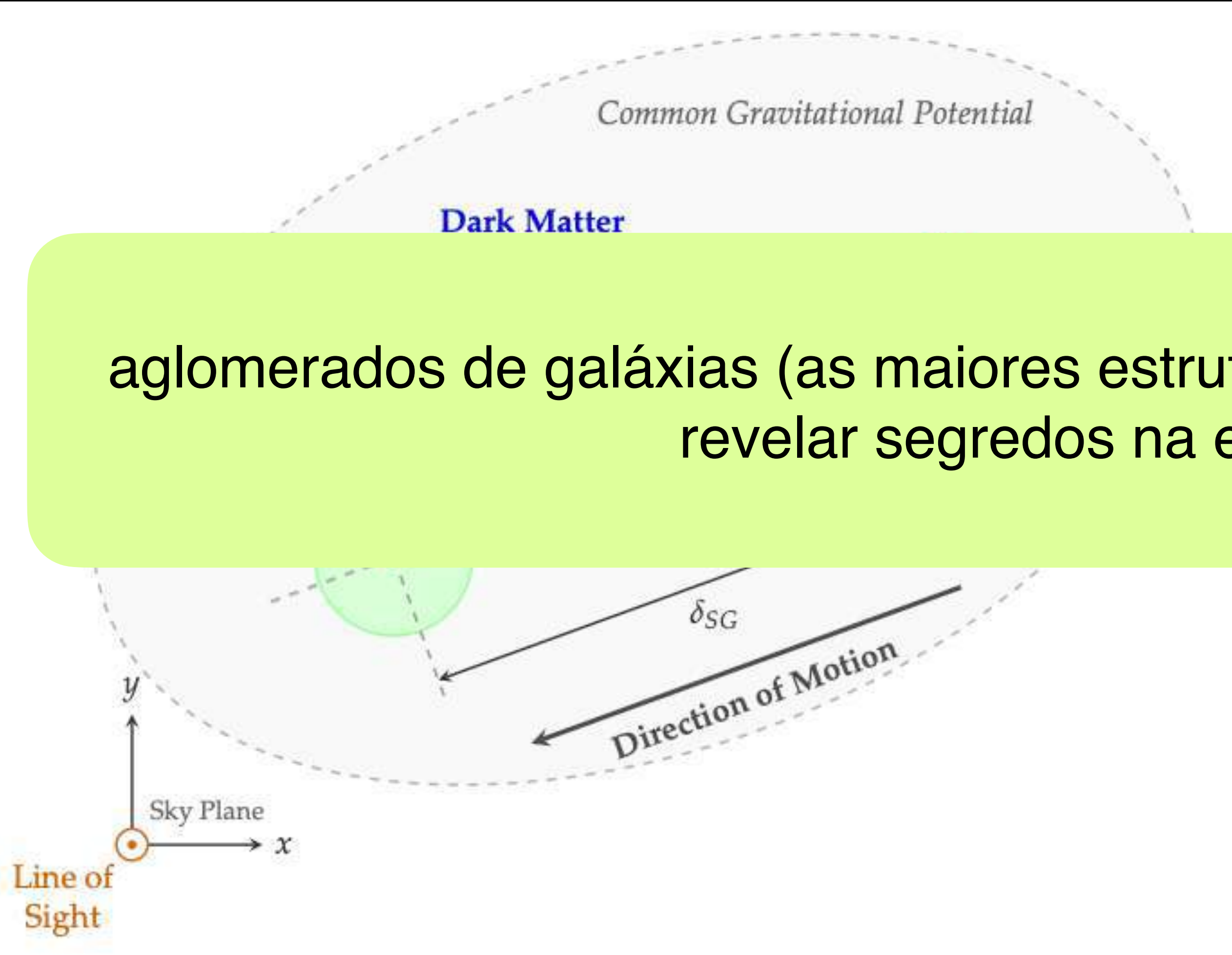
deslocamento das componentes



aglomerados de galáxias (as maiores estruturas ligadas pela gravidade) podem nos revelar segredos na escala subatômica!



$$\sigma/m$$

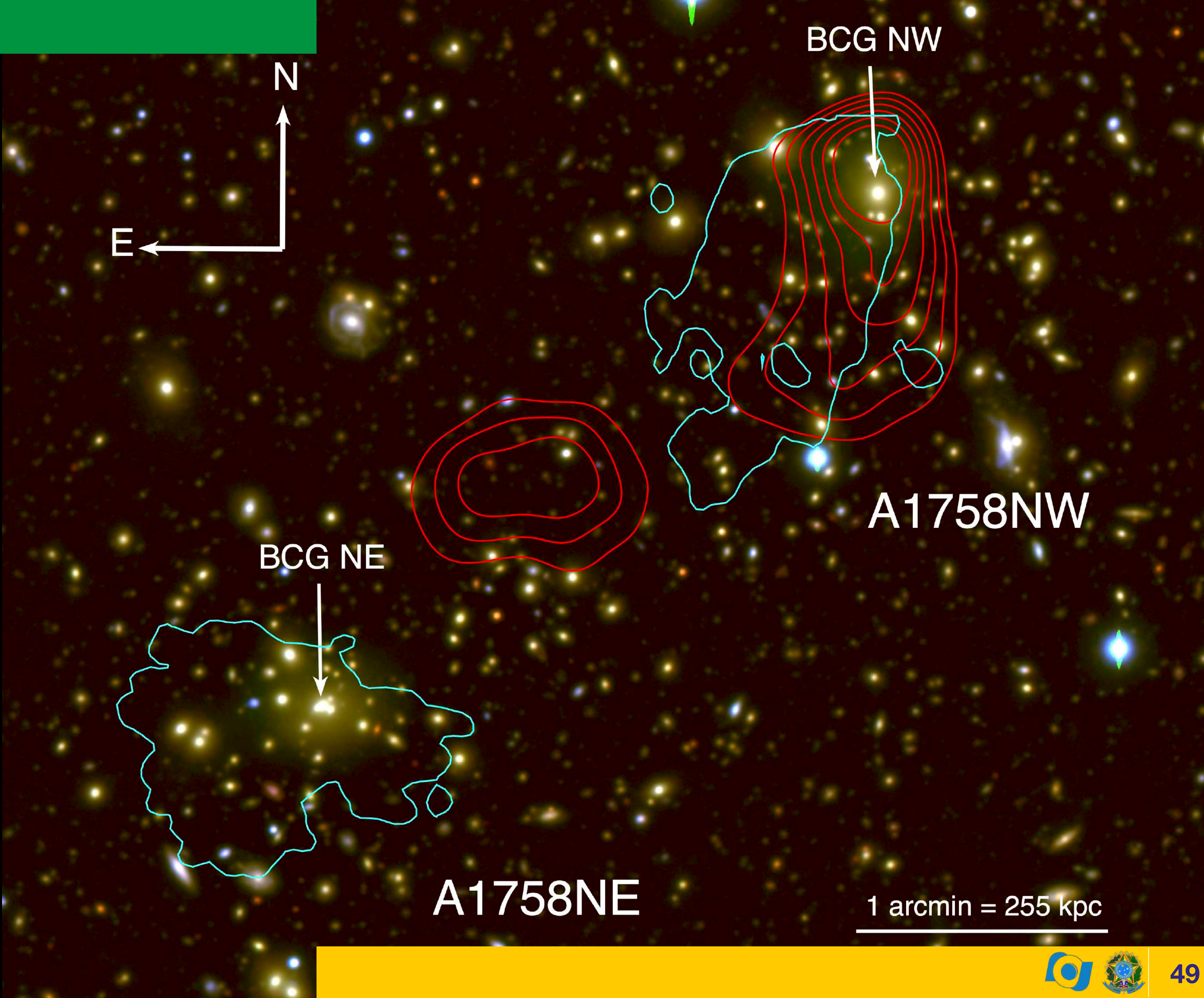


O que faço no Observatório Nacional (entre outros interesses)

- Determinar com precisão a **anatomia de aglomerados de galáxias em fase pós-colisão**.
- Integrar o mapeamento de massa (**lentes gravitacionais fracas**) à dinâmica das galáxias-membro (obtidas via espectroscopia).
- Investigar a **formação e evolução das estruturas em larga escala no Universo**.

para mais detalhes, visite em **monteiro-oliveira.com**
rmo@on.br

Aglomerado A1758





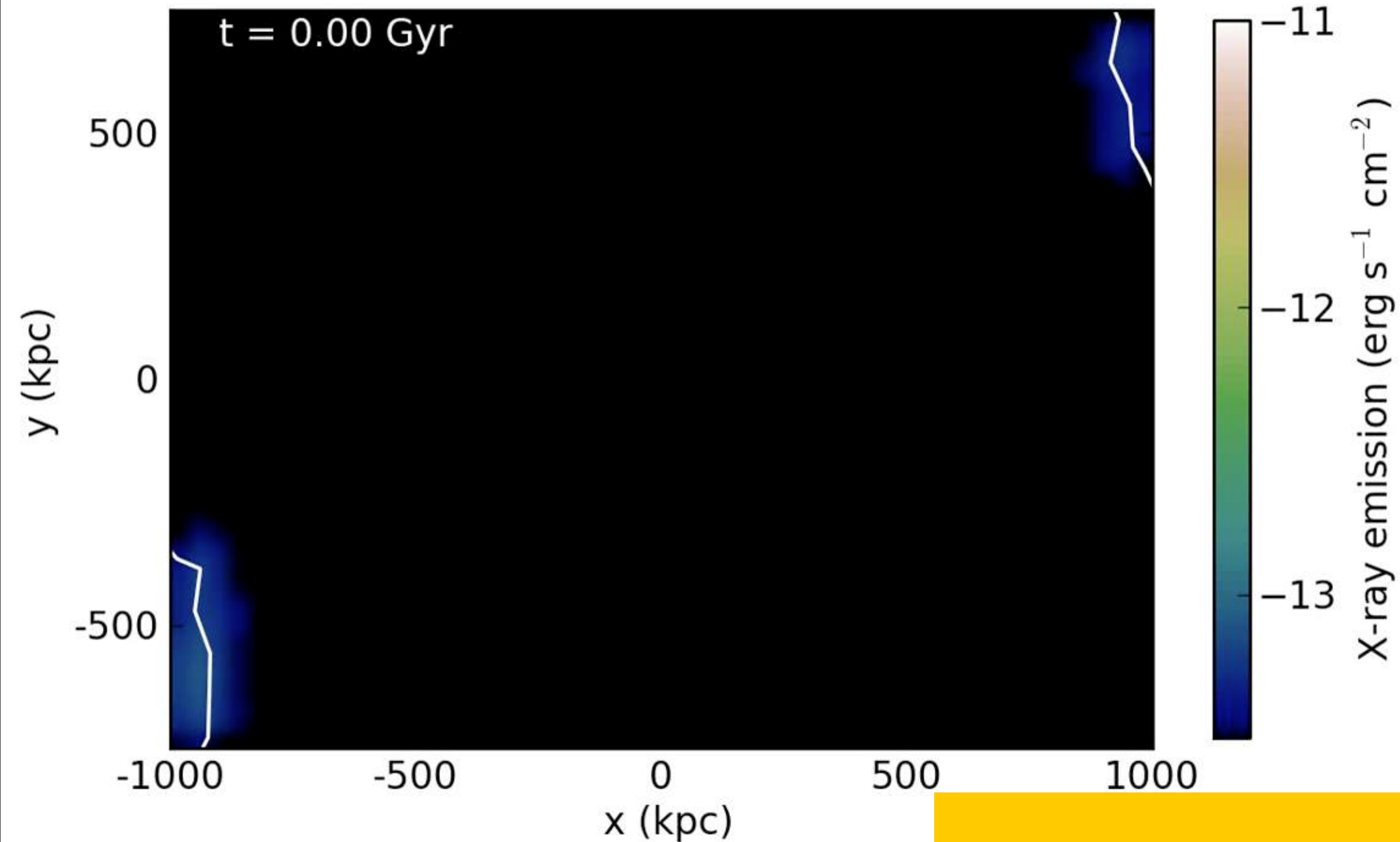
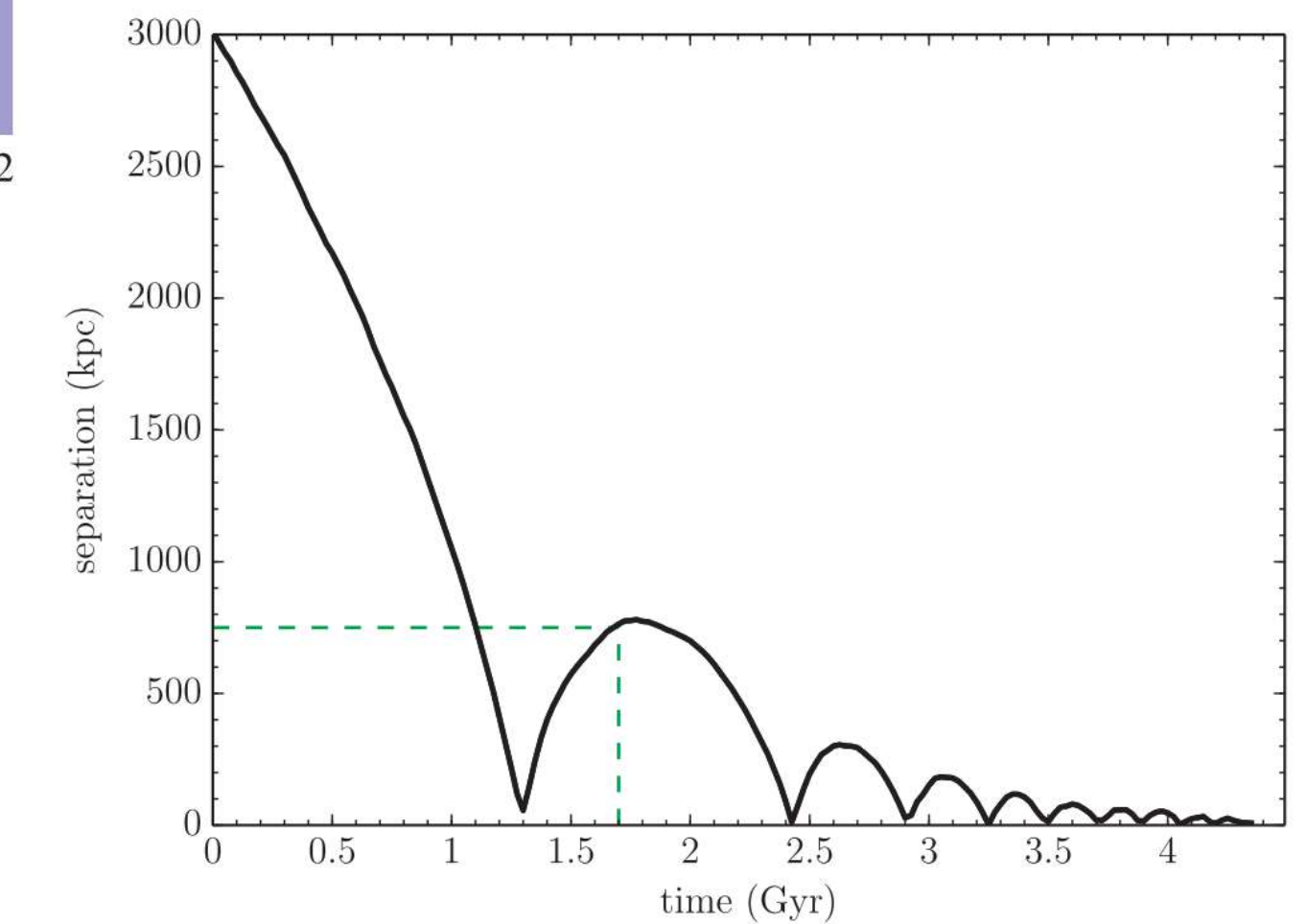
Simulating the shocks in the dissociative galaxy cluster Abell 1758N

R. E. G. Machado,^{1,2★} R. Monteiro-Oliveira,¹ G. B. Lima Neto¹ and E. S. Cypriano¹

¹*Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, R. do Matão 1226, 05508-090 São Paulo, Brazil*

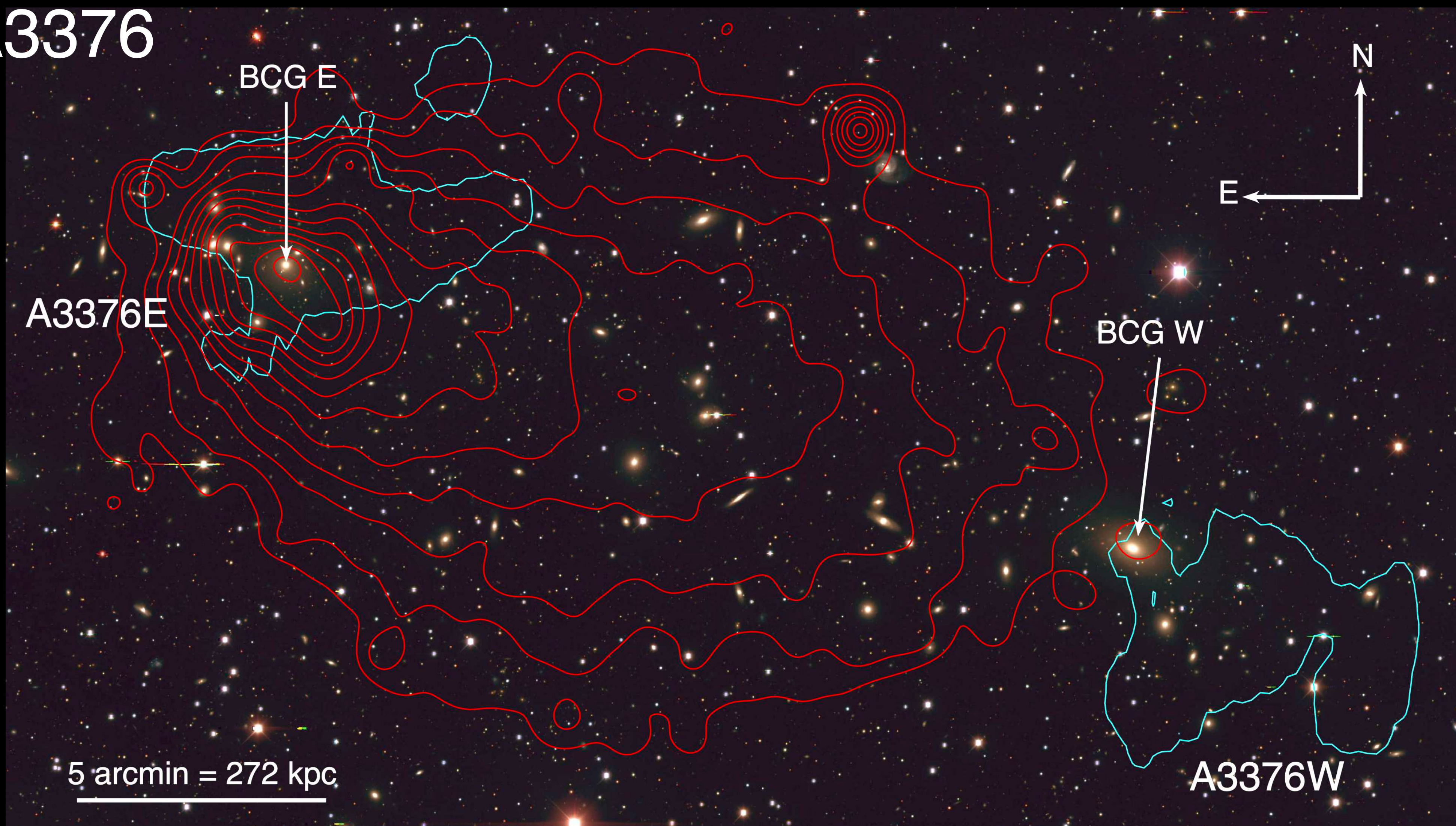
²*Departamento de Ciencias Físicas, Universidad Andrés Bello, Av. República 220, Santiago, Chile*

Accepted 2015 May 19. Received 2015 May 19; in original form 2015 March 11

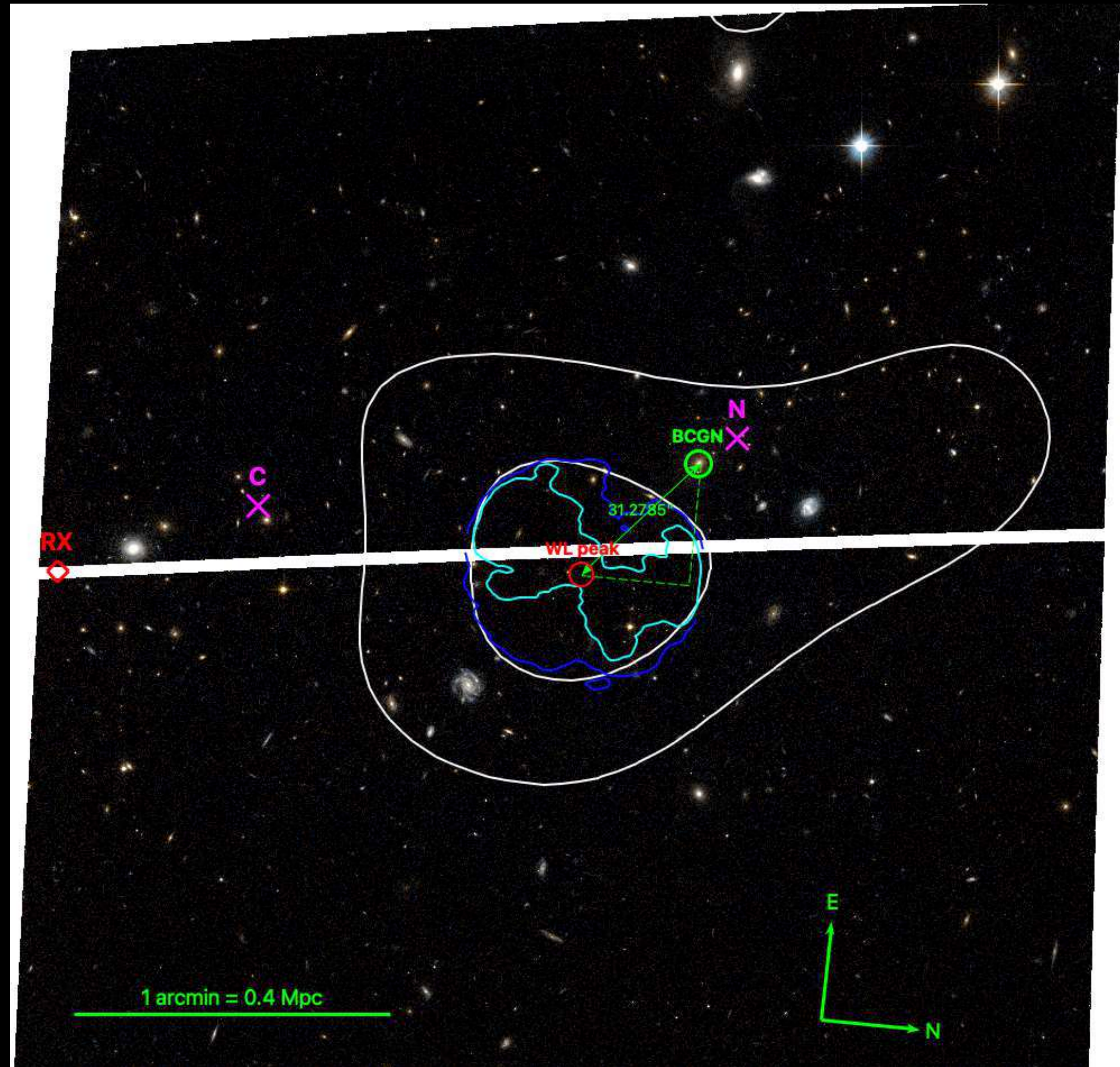
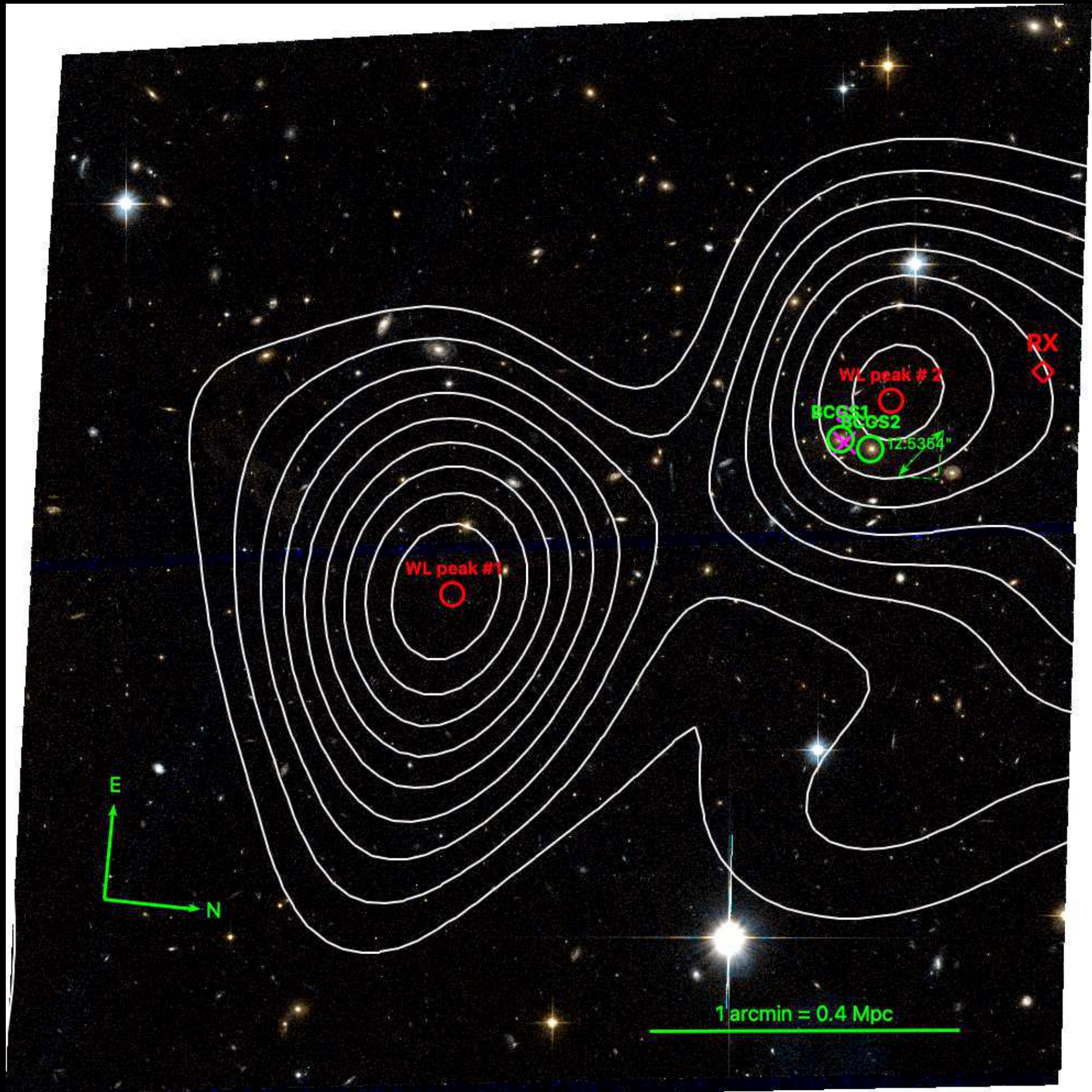


arXiv:1705.02358

Aglomerado A3376



Aglomerado SPT-CL J0307-6225



Síntese da aula

- **Vimos** o que é o fenômeno de lentes gravitacionais e como ele nos ajudar a reconstruir a distribuição da massa (essencialmente escura) da estrutura em larga escala do universo.
- **Aprendemos** que aglomerados em colisão são excelentes laboratórios astrofísicos, tanto para testes da matéria babilônica quanto (principalmente) para a matéria escura.
- **Descobrimos** um pouco da ciência de aglomerados que é feita aqui no Observatório Nacional .

