

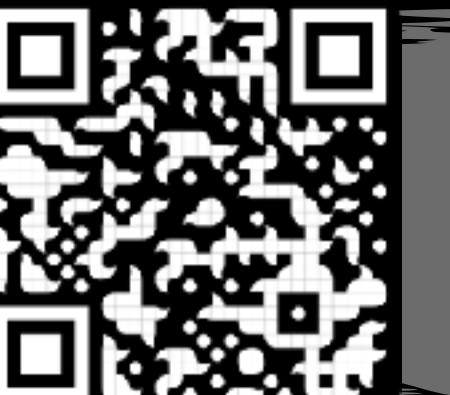


Colisões Cósmicas:

Como Aglomerados de Galáxias Revelam os Segredos da Matéria Escura

Escola de Inverno em Astrofísica
Rio de Janeiro, 25 de julho de 2025

Rogério Monteiro-Oliveira, Ph.D.
Pesquisador Adjunto (ON/MCTI)



rmo@on.br
monteiro-oliveira.com

Ao final desta conversa, você deverá...

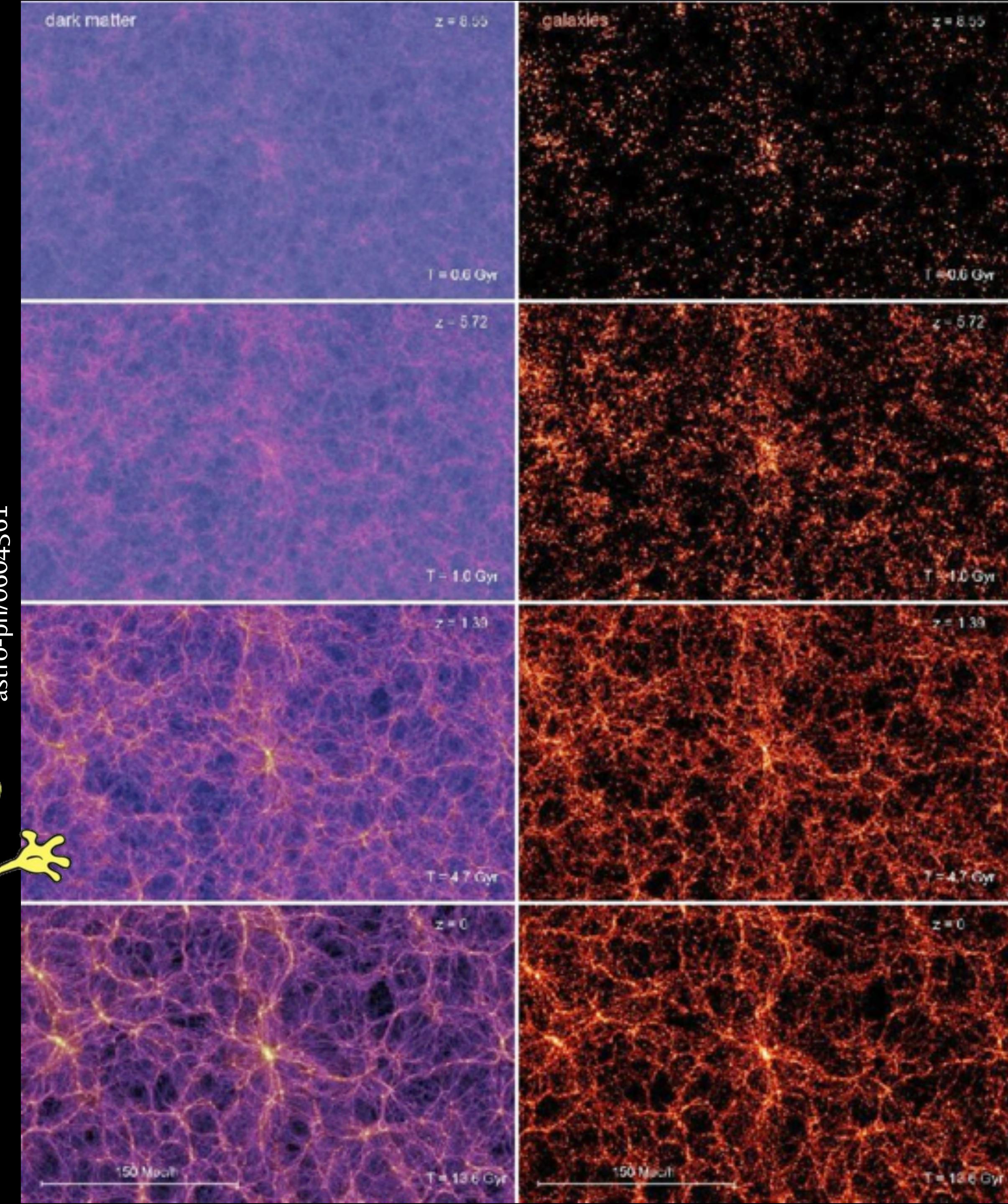
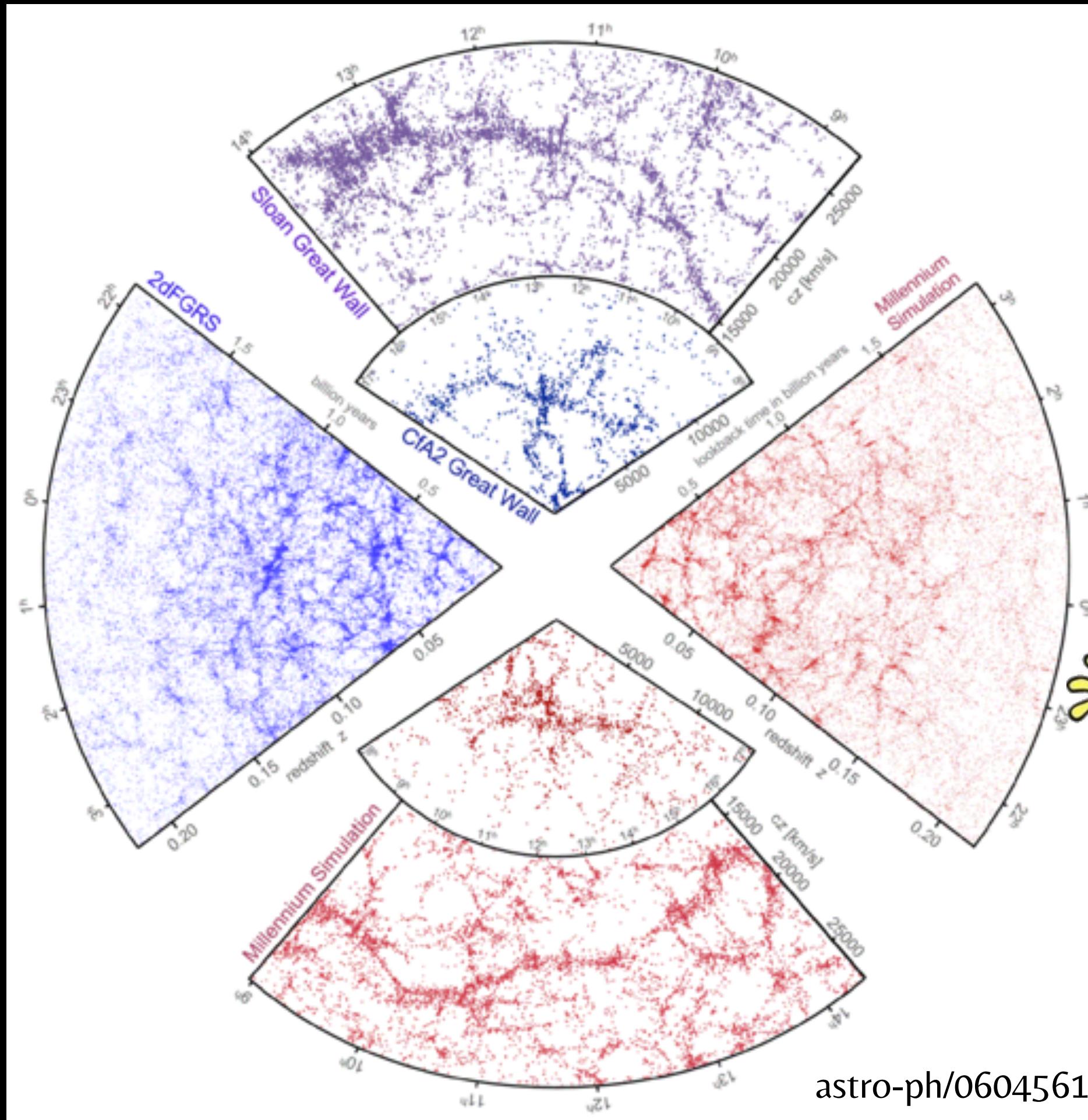
- **Compreender** o papel dos aglomerados de galáxias como laboratórios cósmicos.
- **Reconhecer** como colisões entre aglomerados ajudam a investigar a matéria escura.
- **Conhecer** casos emblemáticos como o Aglomerado Bala e o que eles revelam.
- **Refletir** sobre o papel da observação astrofísica na física fundamental.



Uma colisão cósmica de grandes proporções acaba de acontecer aqui...

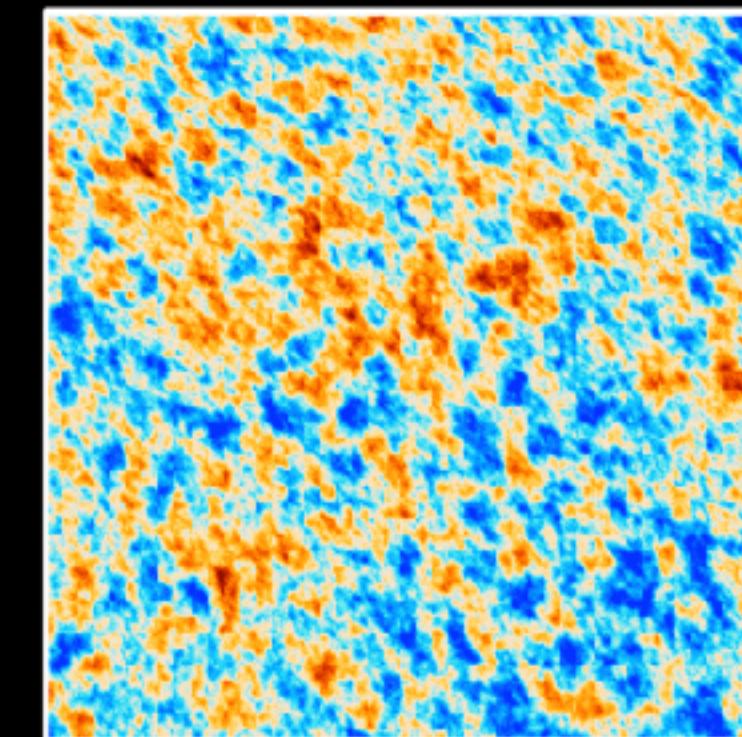
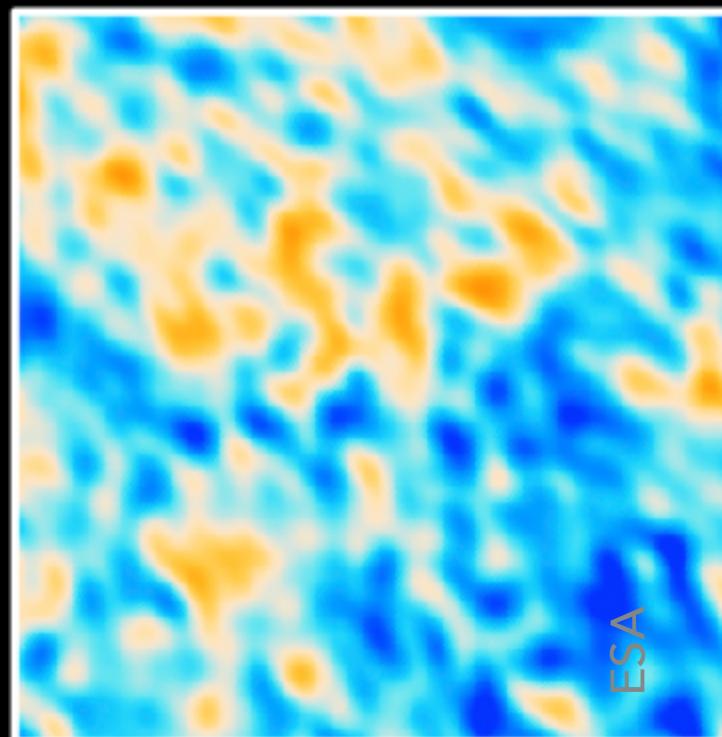
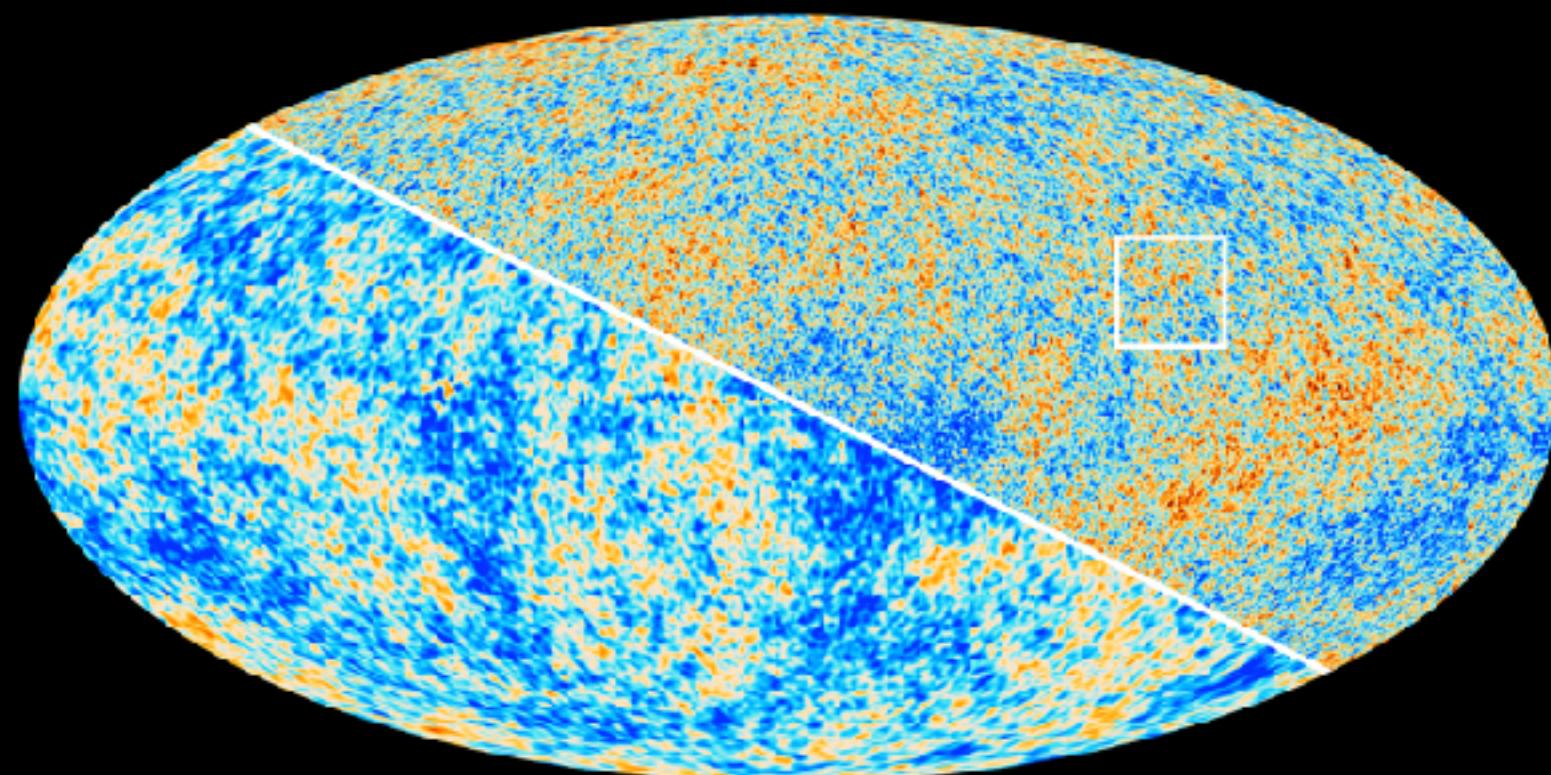
Você consegue perceber os sinais?

Estrutura em larga escala do Universo



Como se formaram as estruturas em larga escala?

300,000 anos após Big Bang



WMAP

Planck

$$\delta = 10^{-5}$$

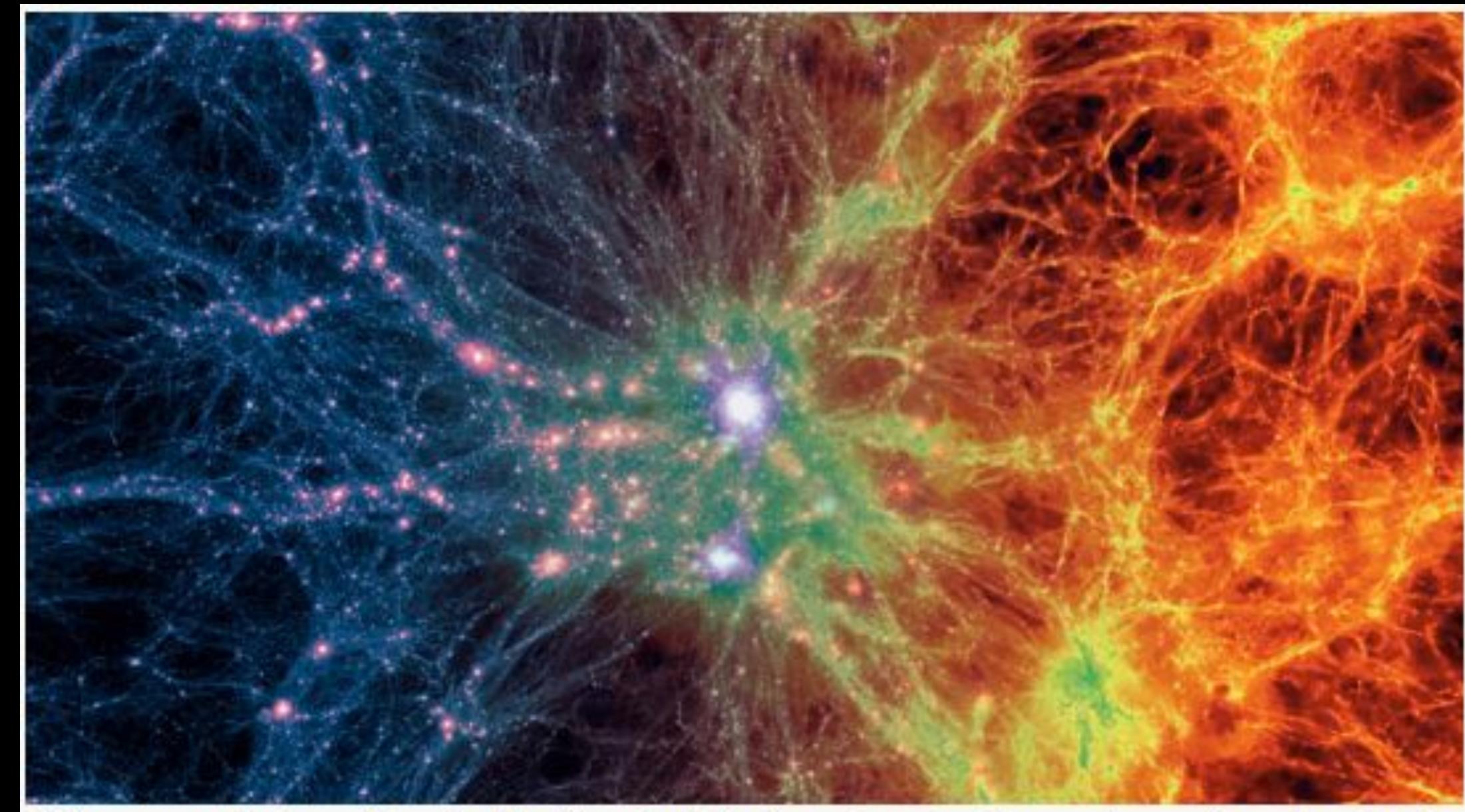
$$\delta = \frac{\delta\rho}{\rho_0}$$

parâmetro de contraste
de densidade



Illustris project

13.8 bilhões de anos após o Big Bang



galáxias: $\delta \sim 10^5-10^6$

aglomerados de galáxias: $\delta \sim 100$

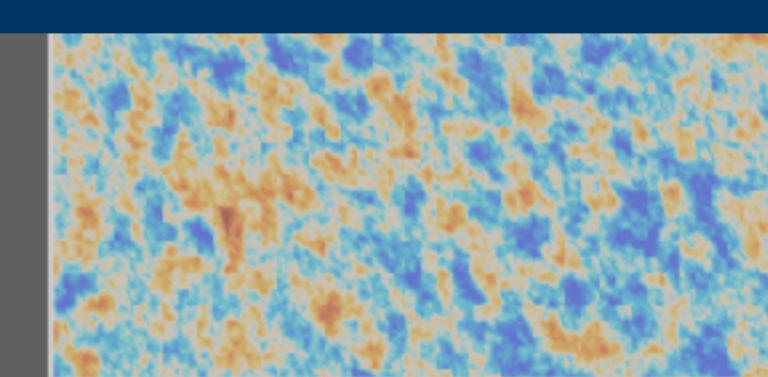
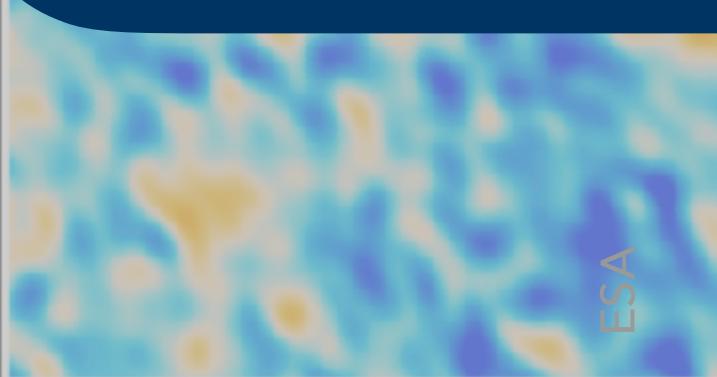
superaglomerados de galáxias: $\delta \sim 1$

Como se formaram as estruturas em larga escala?

300,000 anos após Big Bang

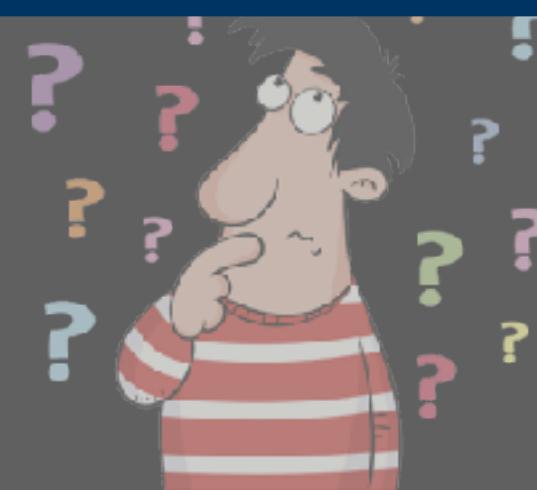
13.8 bilhões de anos após o Big Bang

cold dark matter (CDM)



ESA

$\delta = 10^{-5}$



Ilustr



6

galáxias: $\delta \sim 10^5-10^6$

aglomerados de galáxias: $\delta \sim 100$

superaglomerados de galáxias: $\delta \sim 1$

Por que a CDM é tão importante para a Cosmologia?

300,000 anos após o Big Bang

com CDM

sem CDM

13.8 bilhões de anos após o Big Bang

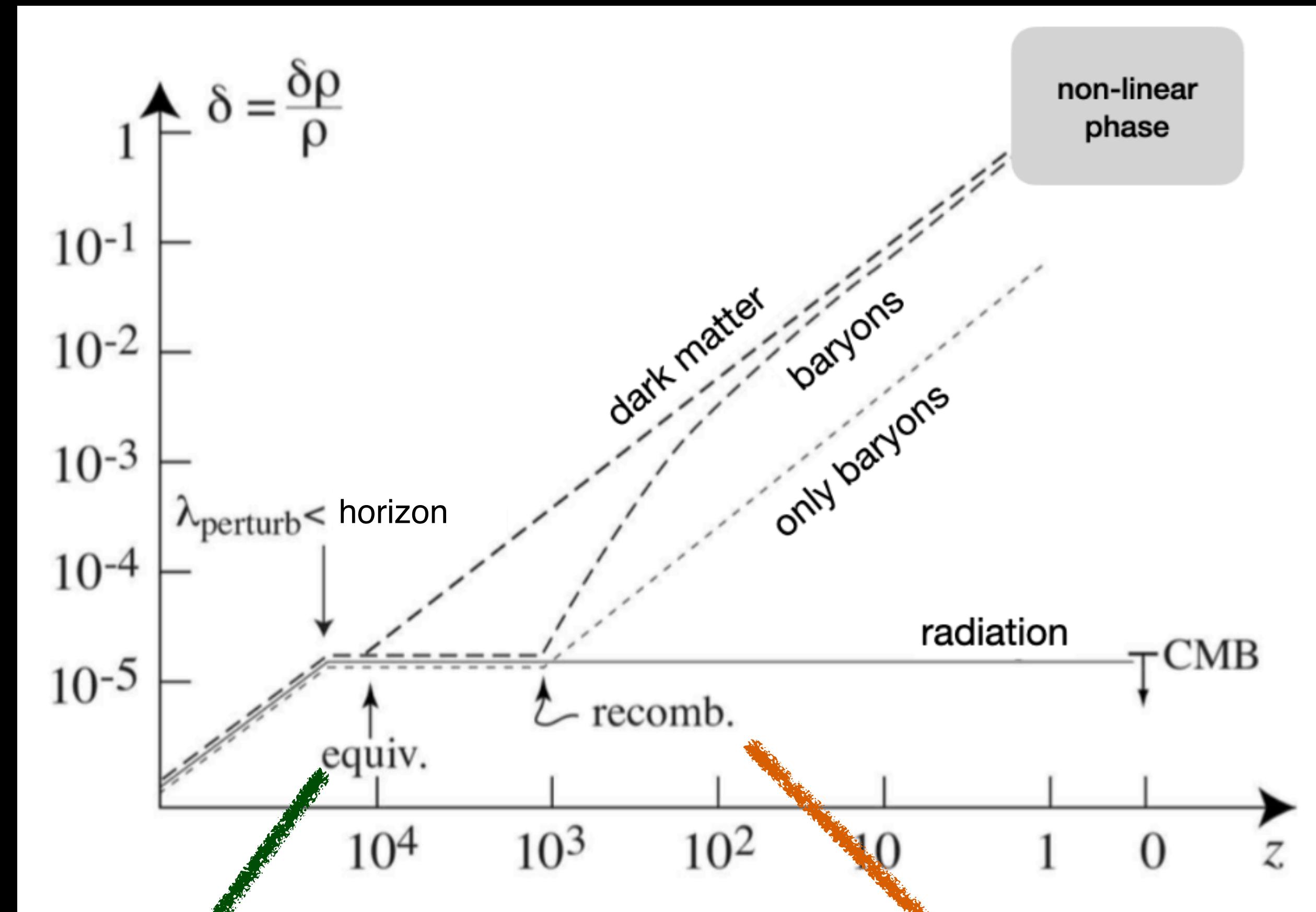


o Universo como visto hoje

o Universo aparentaria ser bem mais jovem

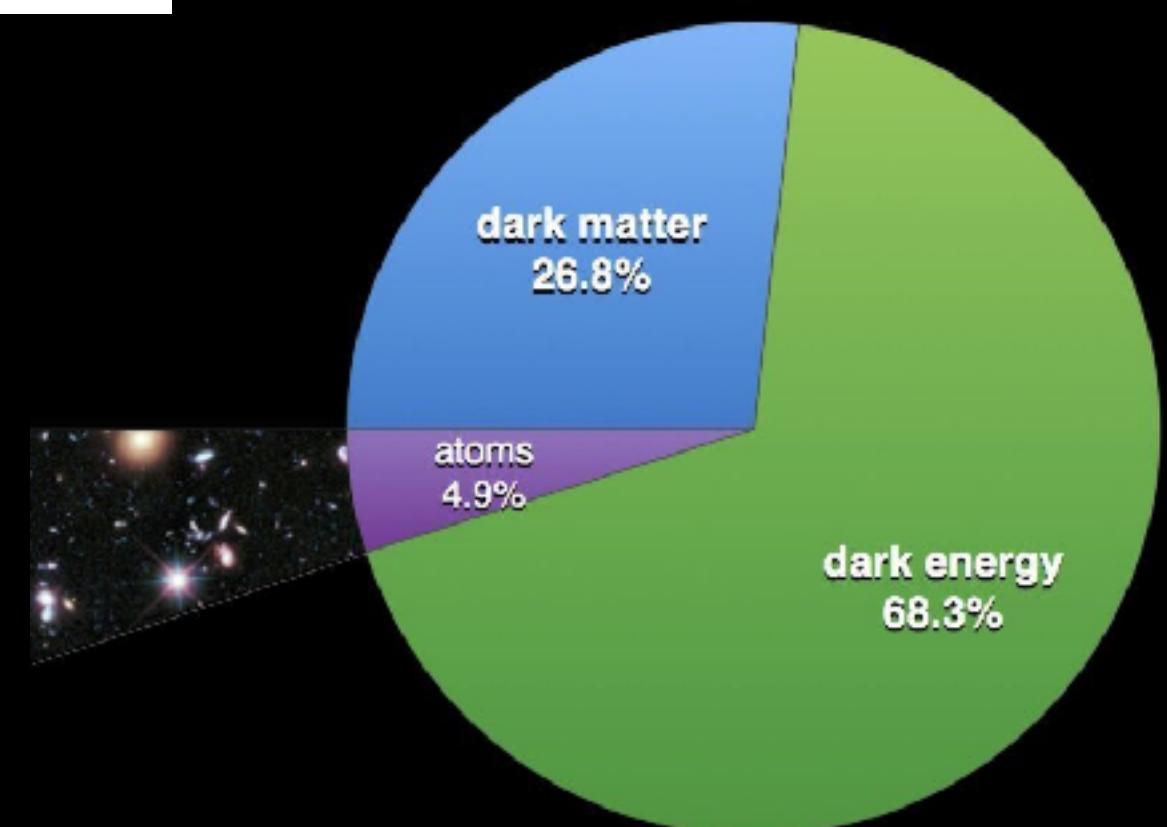
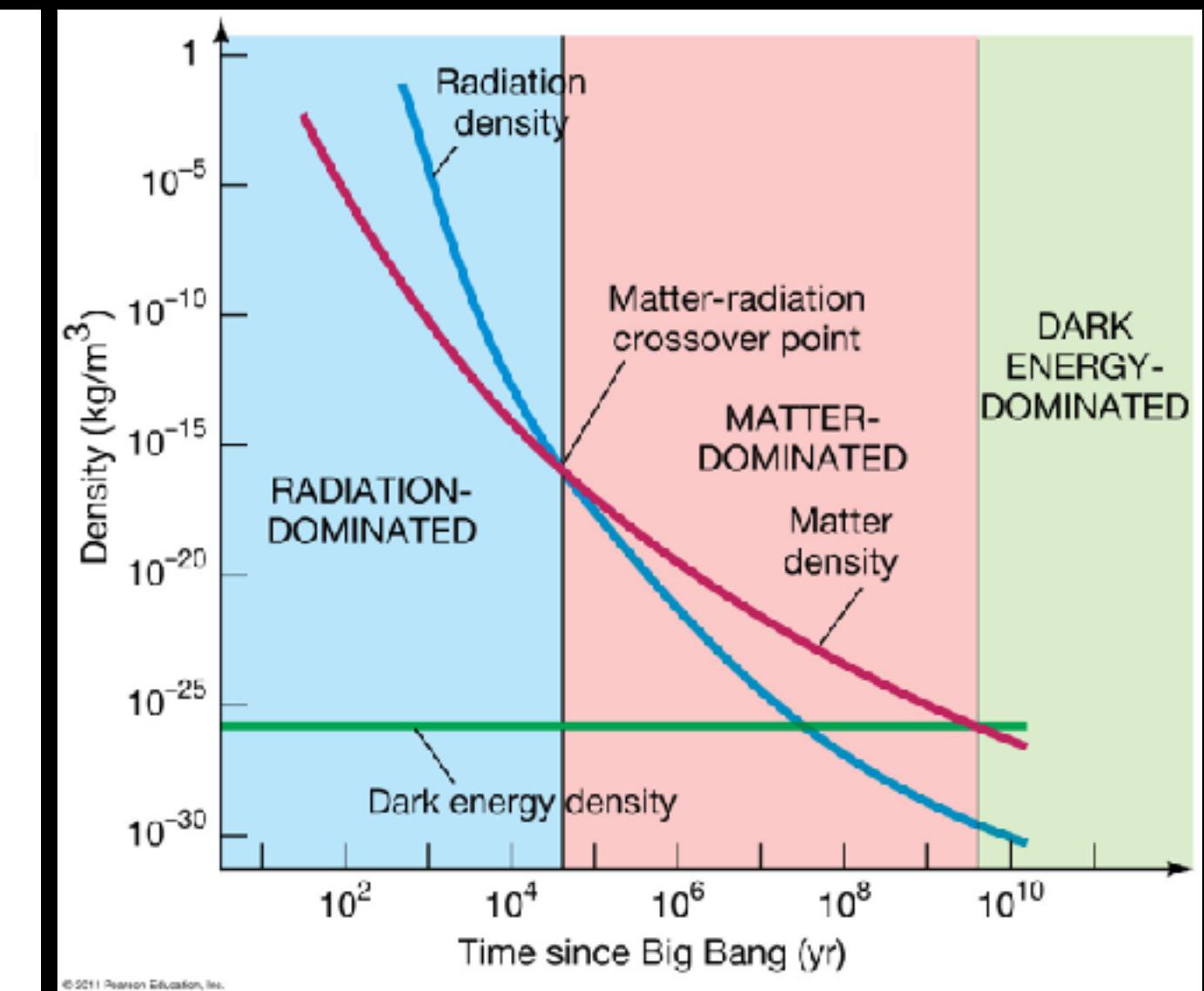


Evolução das perturbações de densidade iniciais



equivalência matéria-radiação
(~50,000 anos após B.B.)

recombinação
(300,000 anos após B.B.)



modelo Λ CDM

Até aqui, tudo bem...





Ou talvez não...

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,†}

¹Department 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 Gaite and Antonaldo Diaferio

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

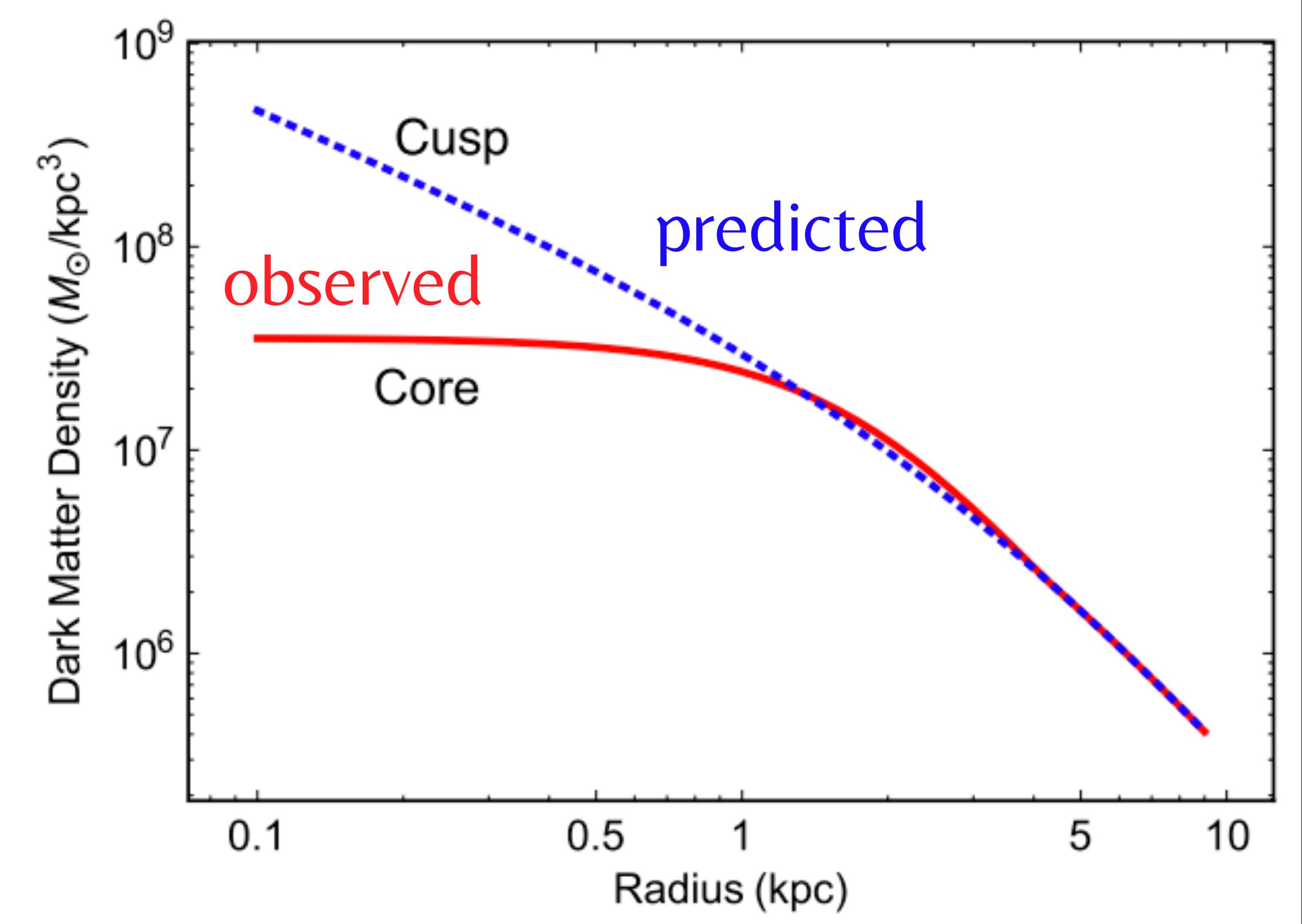
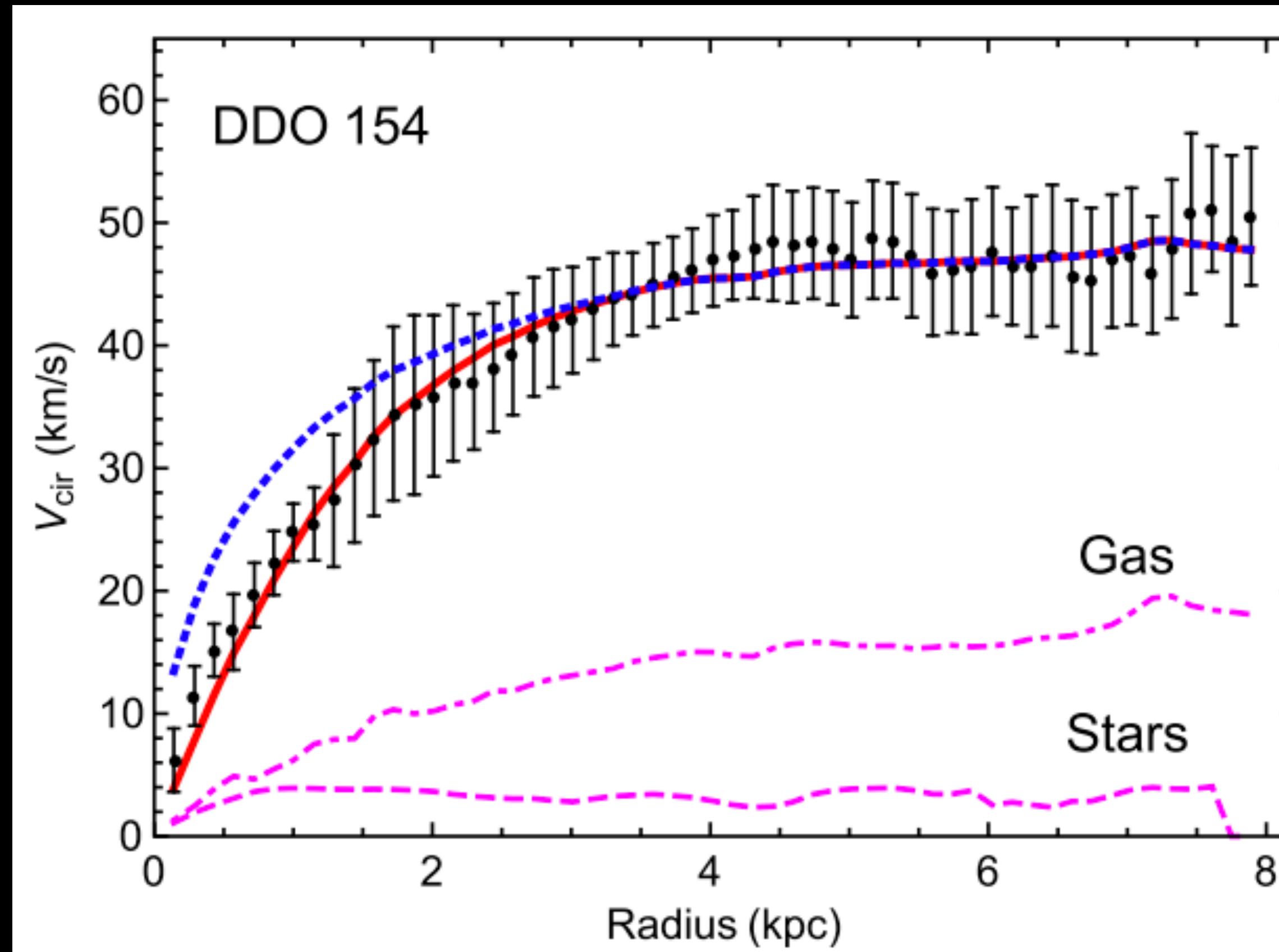
arXiv:1606.07790

Problemas nas pequenas escalas

O modelo Λ CDM tem se mostrado limitado em pequenas escalas

- Distribuição central de matéria (Core-cusp)
- Diversidade
- Too-big-too-fail
- ...?

Problema Core-cusp



Solução?

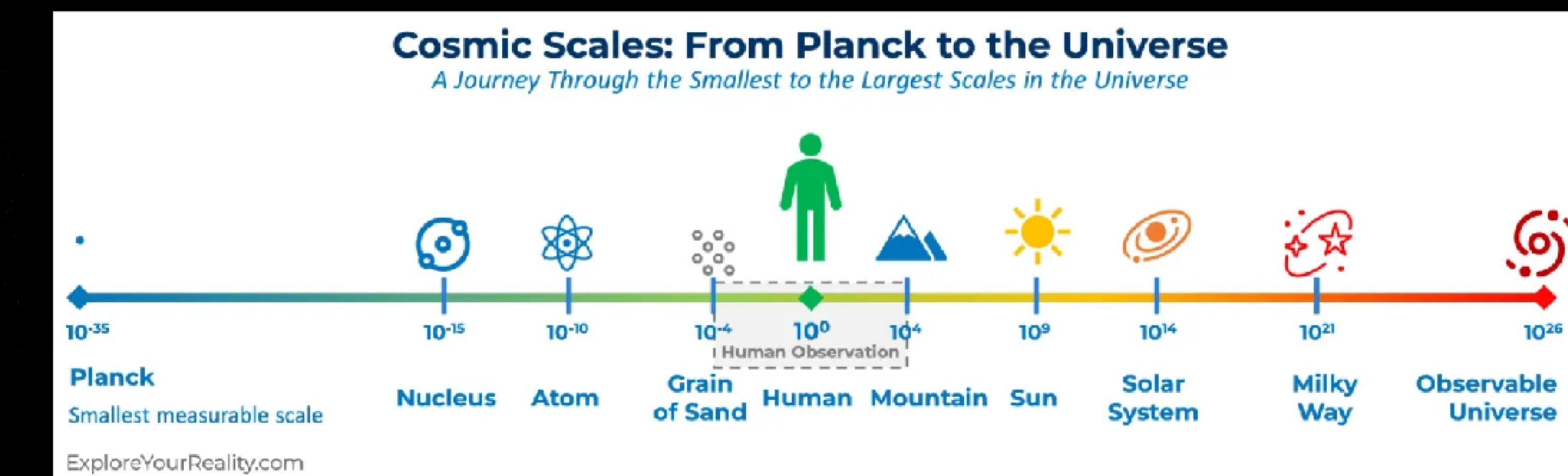
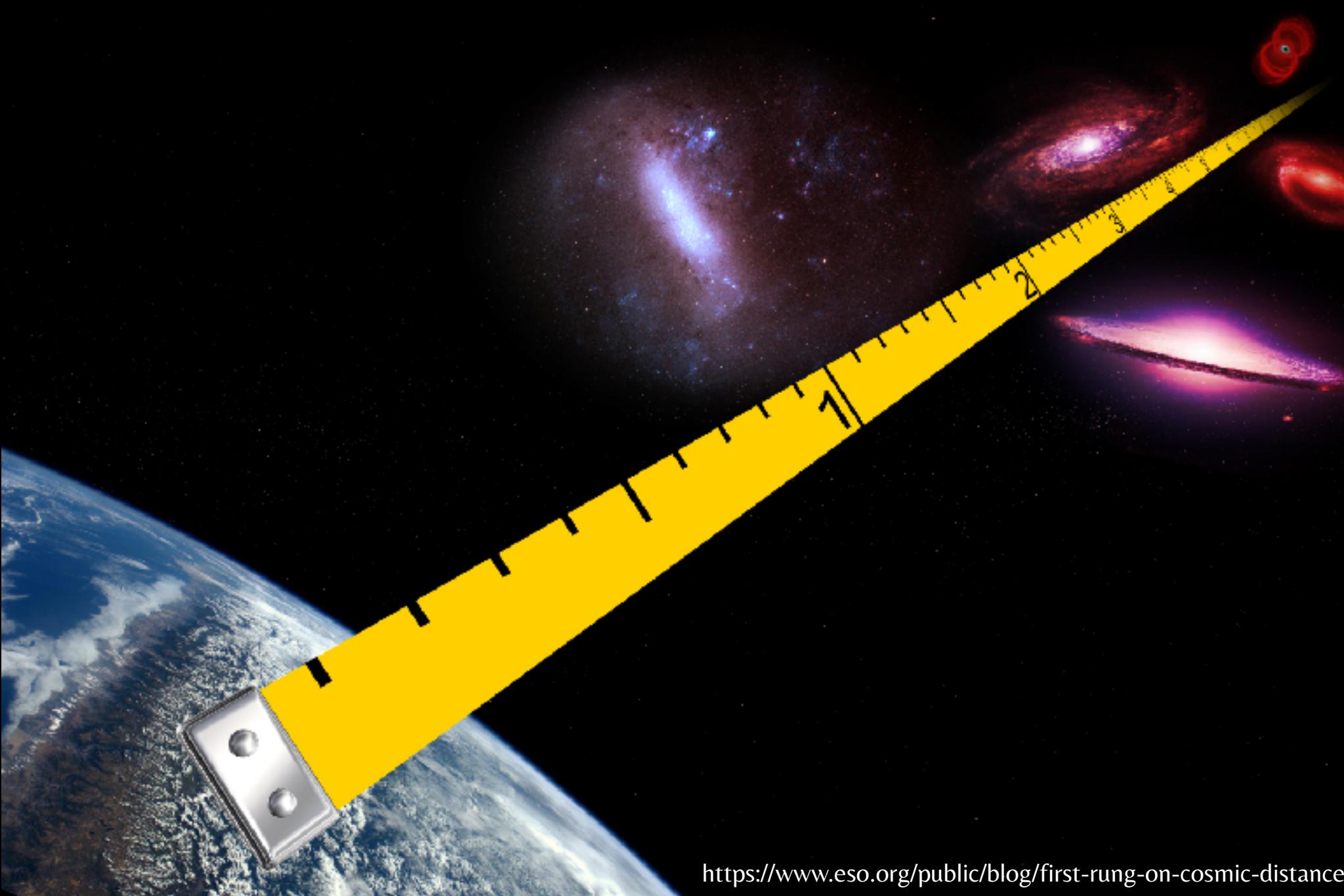
- Fatores astrofísicos: redistribuição de bárions (e.g., AGN feedback).
- Mais geral (resolve todos os problemas): **rever o paradigma da CDM**
- Candidato: **SIDM** (matéria escura auto-interagente / self-interacting dark matter)

Mas como podemos testar o modelo da SIDM se não a temos aqui na Terra?



O Universo como Laboratório

- Escalas impossíveis de reproduzir em Terra.
- Aglomerados de galáxias como ambientes extremos naturais.



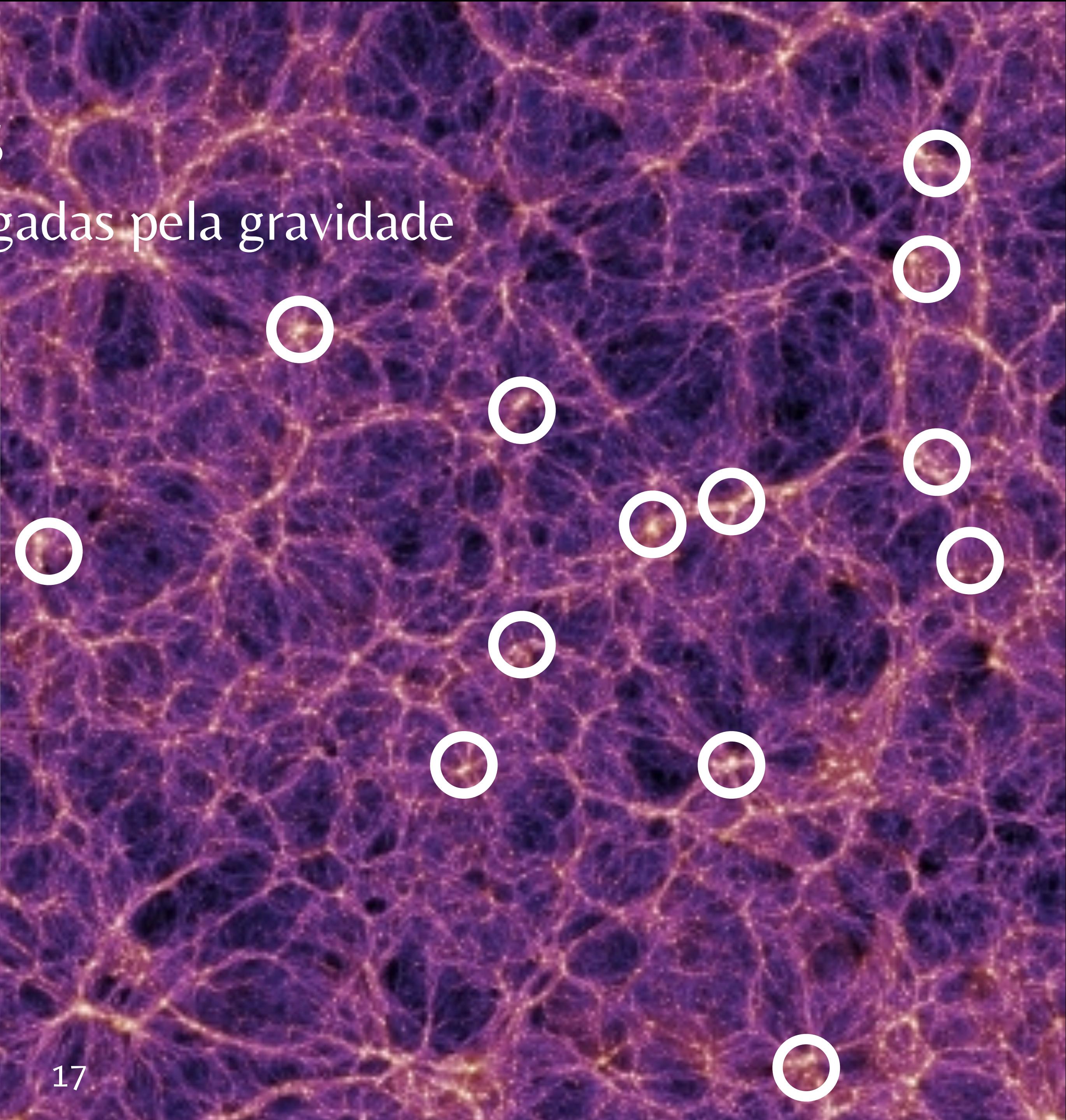


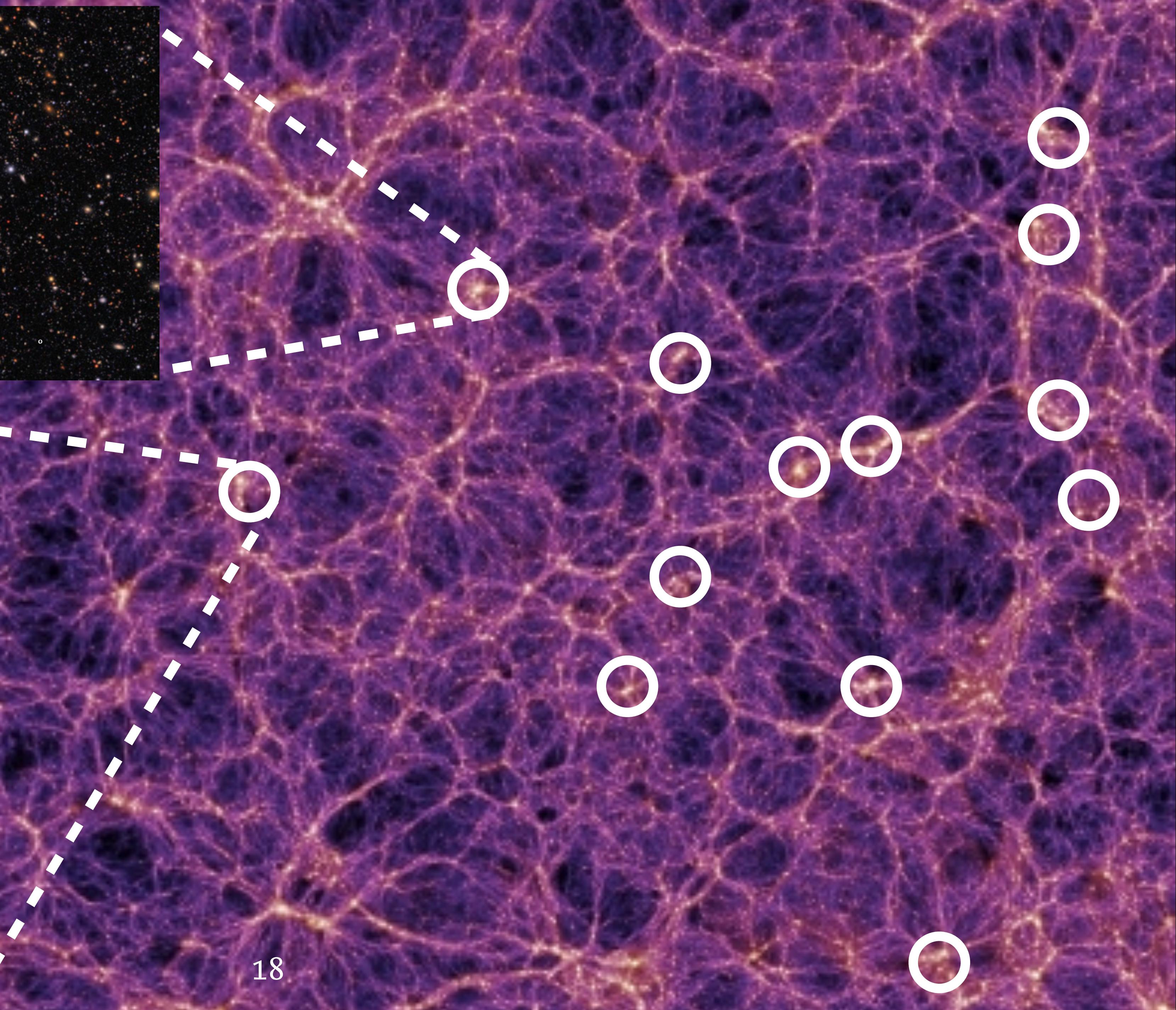
Como aglomerados de galáxias se formam?

Aglomerados de galáxias

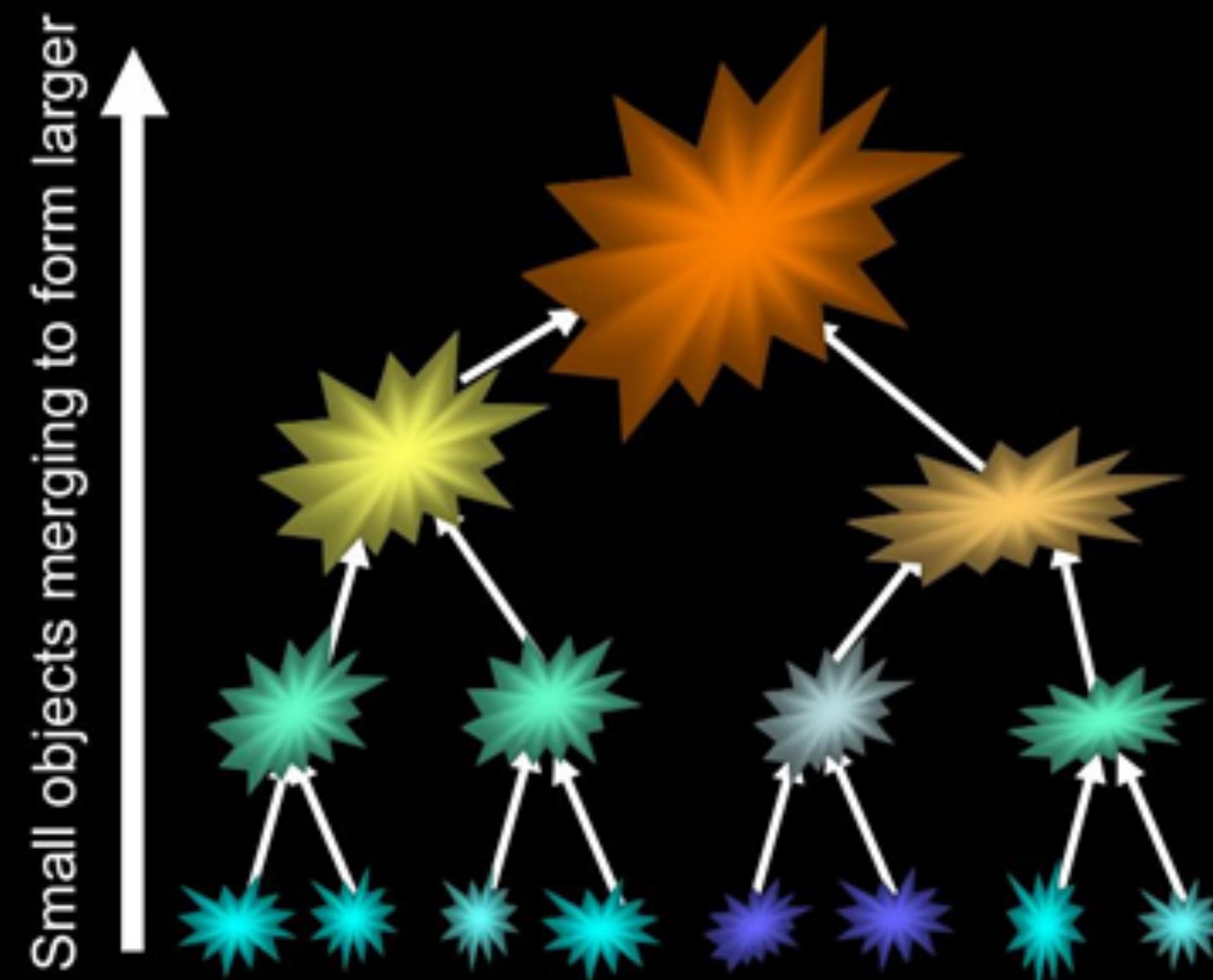
As maiores estruturas do Universo ligadas pela gravidade

- ▶ Massa típica: $M \sim 10^{14-15} M_{\odot}$
- ▶ ~80% matéria escura
- ▶ ~15% gás quente (ICM)
- ▶ ~5% galaxias
- ▶ Formado hierarquicamente a partir da fusão de estruturas menores





Crescimento das estruturas: o cenário hierárquico



https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/*Hierarchical+Clustering

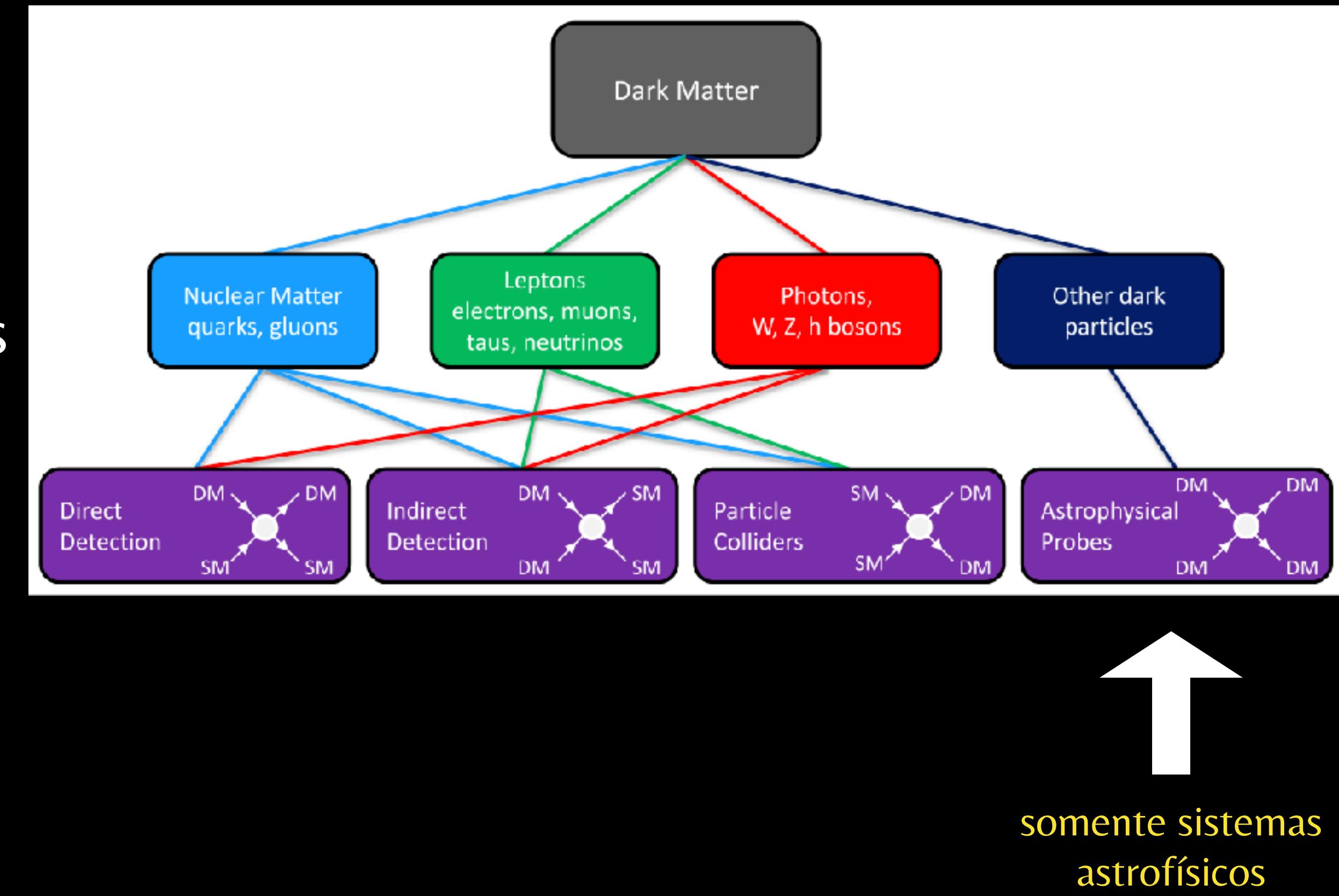
Colisões entre aglomerados de galáxias

Os melhores laboratórios astrofísicos para SIDM

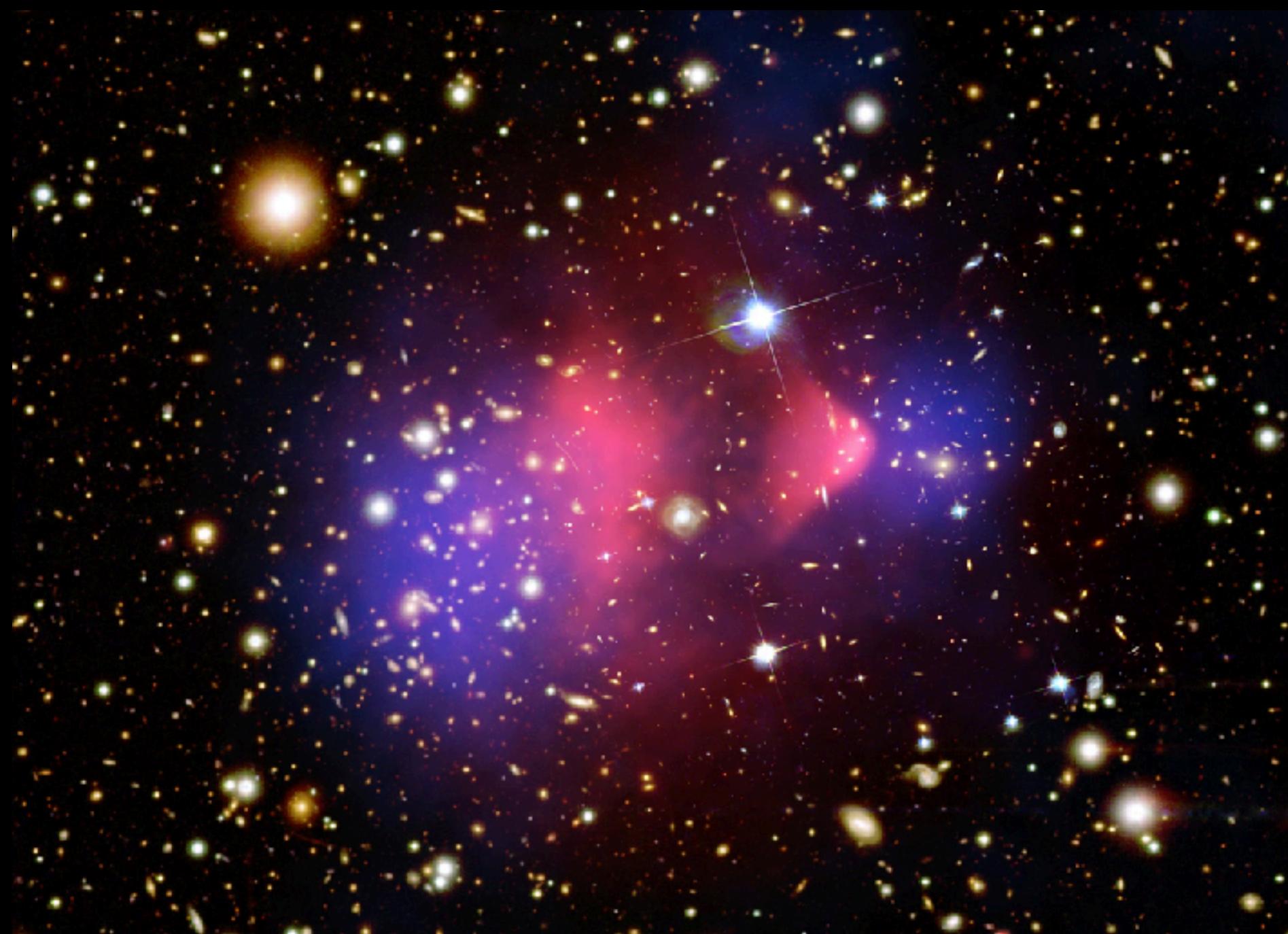
arXiv:1305.1605

- Detalhes do cenários hierárquico
- Estudo dos componentes do aglomerado
- Evolução de galáxias em ambientes extremos
- Natureza da matéria escura

QUARKS		GAUGE BOSONS	
masses \rightarrow	$\sim 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\sim 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\sim 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge \rightarrow	2/3	2/3	0
spin \rightarrow	1/2	1/2	1/2
up	u	charm	c
down	d	strange	s
top	t	bottom	b
gluon	g	photon	γ
Higgs boson	H		Z boson
electron	e	muon	μ
tau	τ		τ
electron neutrino	ν_e	muon neutrino	ν_μ
tau neutrino	ν_τ		ν_τ
			W boson



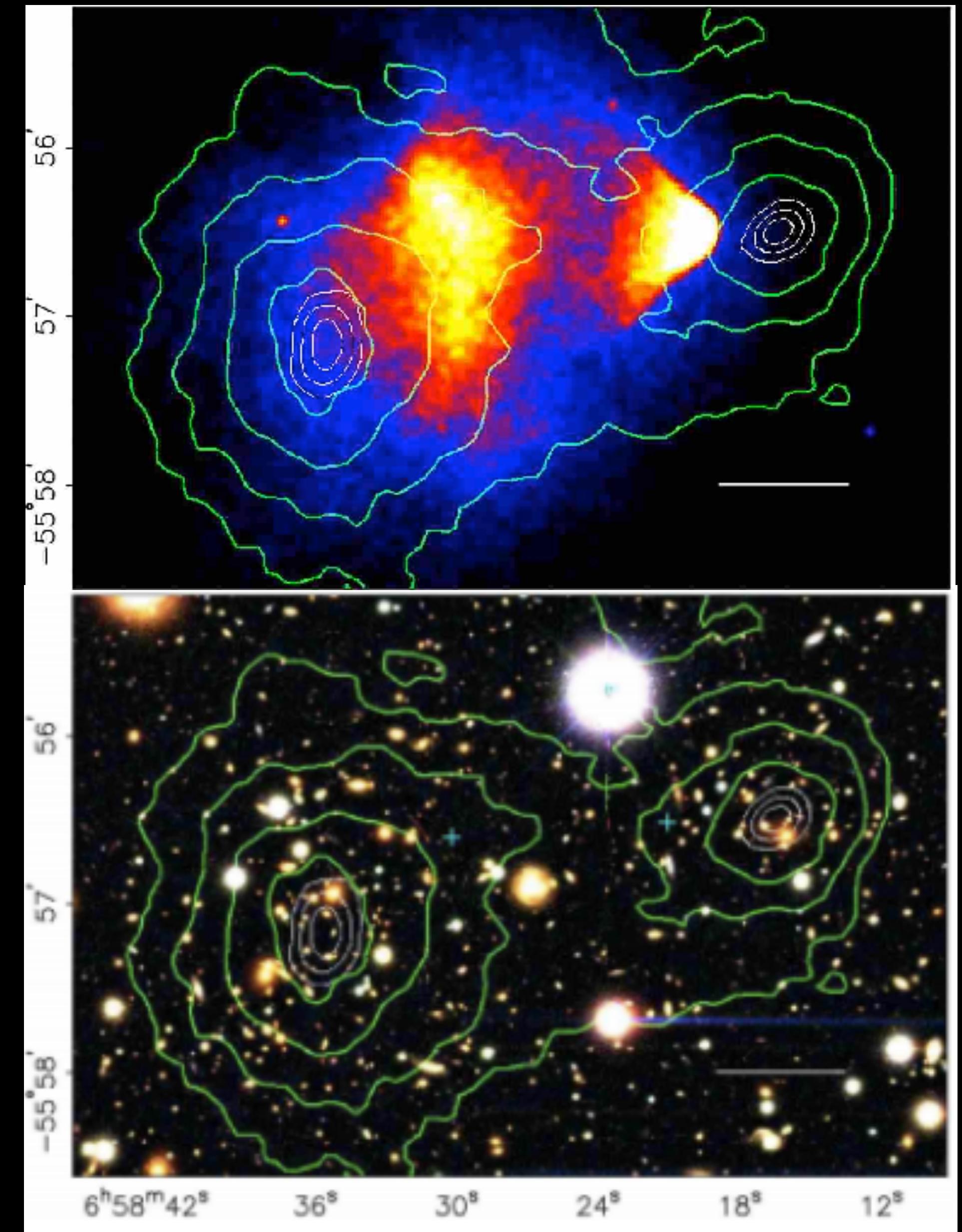
O aglomerado Bala



DM ↗ azul (lentes gravitacionais)

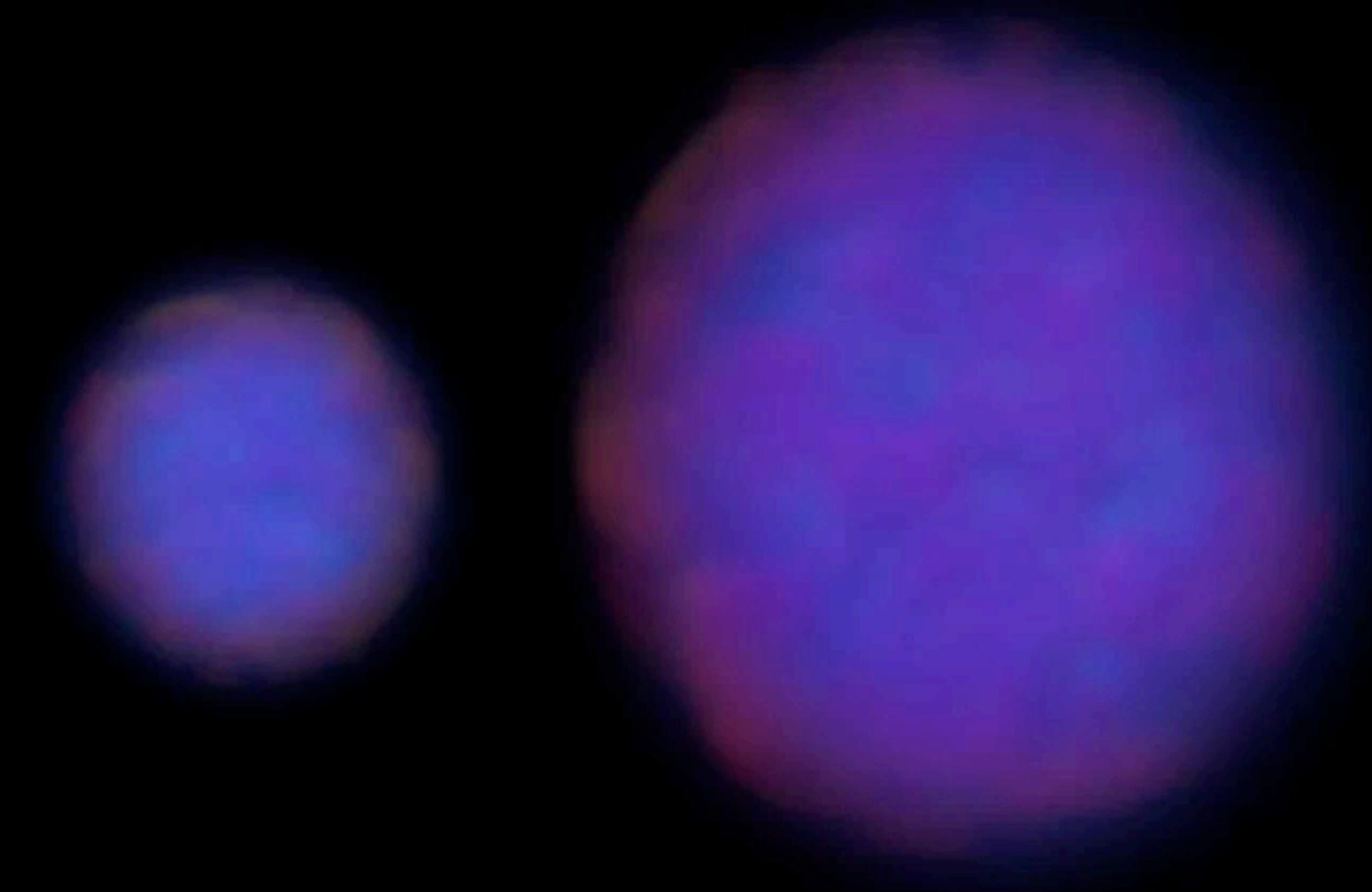
ICM ↗ magenta (raios-X)

galaxies ↗ visível (telescópios ópticos)



Colisões entre aglomerados de galáxias

Os melhores laboratórios astrofísicos para SIDM

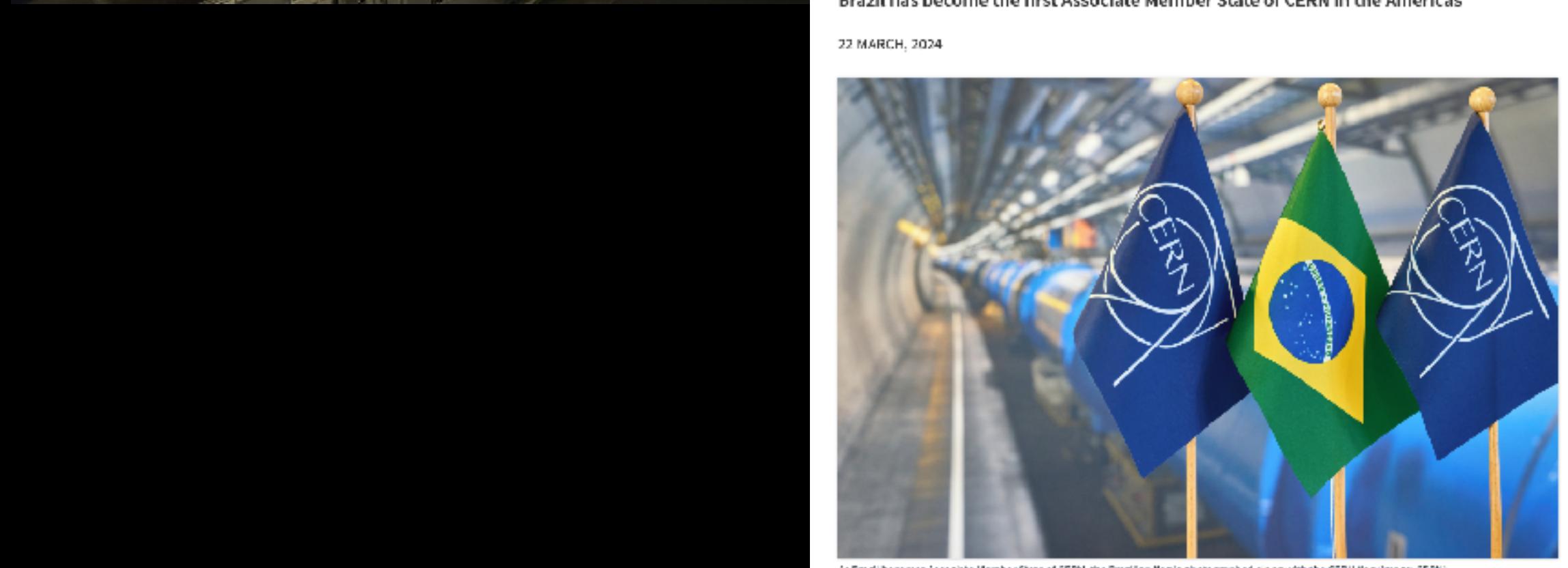


Aglomerados em colisão como aceleradores de partículas

- **con**: energia por partícula: $\frac{\text{merging cluster}}{\text{LHC}} \sim 10^{-6}$
- **pro**: $\sim 10^{70}$ partículas de DM

σ/m

seção de choque de auto-interação da SIDM

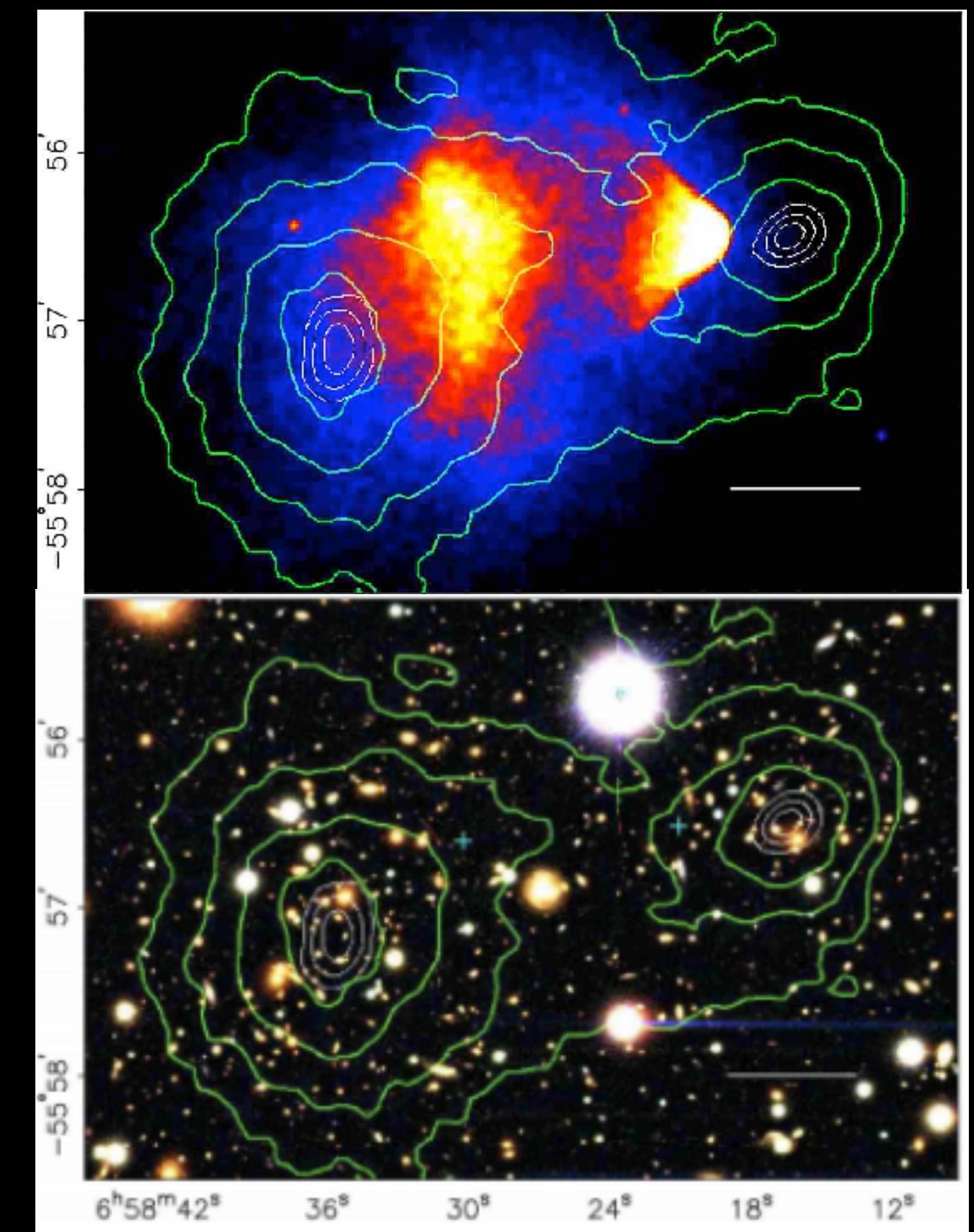


Aglomerados em colisão como aceleradores de partículas

Como podemos estimar, ao menos, uma ordem de grandeza?

σ/m

seção de choque de auto-interação da SIDM



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

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

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

$$\sigma/m ?$$



Uma colisão cósmica de grandes proporções acaba de acontecer aqui...



Uma colisão cósmica de grandes proporções acaba de acontecer aqui...

Sem chance!

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

Aglomerados em colisão como aceleradores de partículas

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 606:819–824, 2004 May 10
© 2004. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

astro-ph/0309303

DIRECT CONSTRAINTS ON THE DARK MATTER SELF-INTERACTION CROSS SECTION FROM THE MERGING GALAXY CLUSTER 1E 0657–56

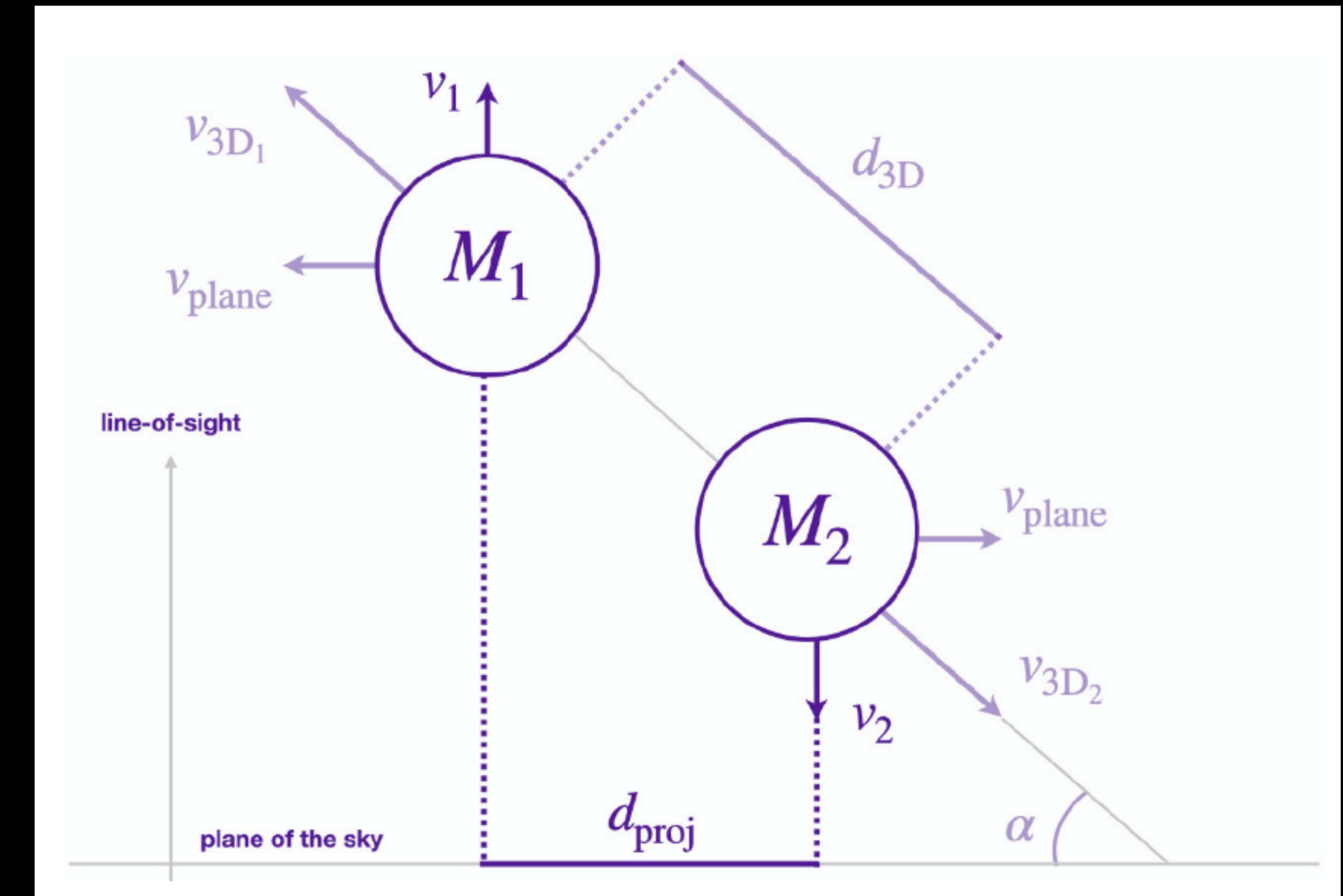
M. MARKEVITCH,¹ A. H. GONZALEZ,² D. CLOWE,^{3,4} A. VIKHLINEV,^{1,5} W. FORMAN,¹ C. JONES,¹ S. MURRAY,¹ AND W. TUCKER^{1,6}

Received 2003 September 11; accepted 2004 January 26

- Analisando a anatomia do Aglomerado Bala, os autores estimaram σ/m baseados em três diferentes abordagens:
 - 1st deslocamento espacial entre SIDM e gás.
 - 2nd Alta velocidade do subaglomerado.
 - 3rd Sobrevivência do subaglomerado: $\sigma/m < 1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

Cuidado

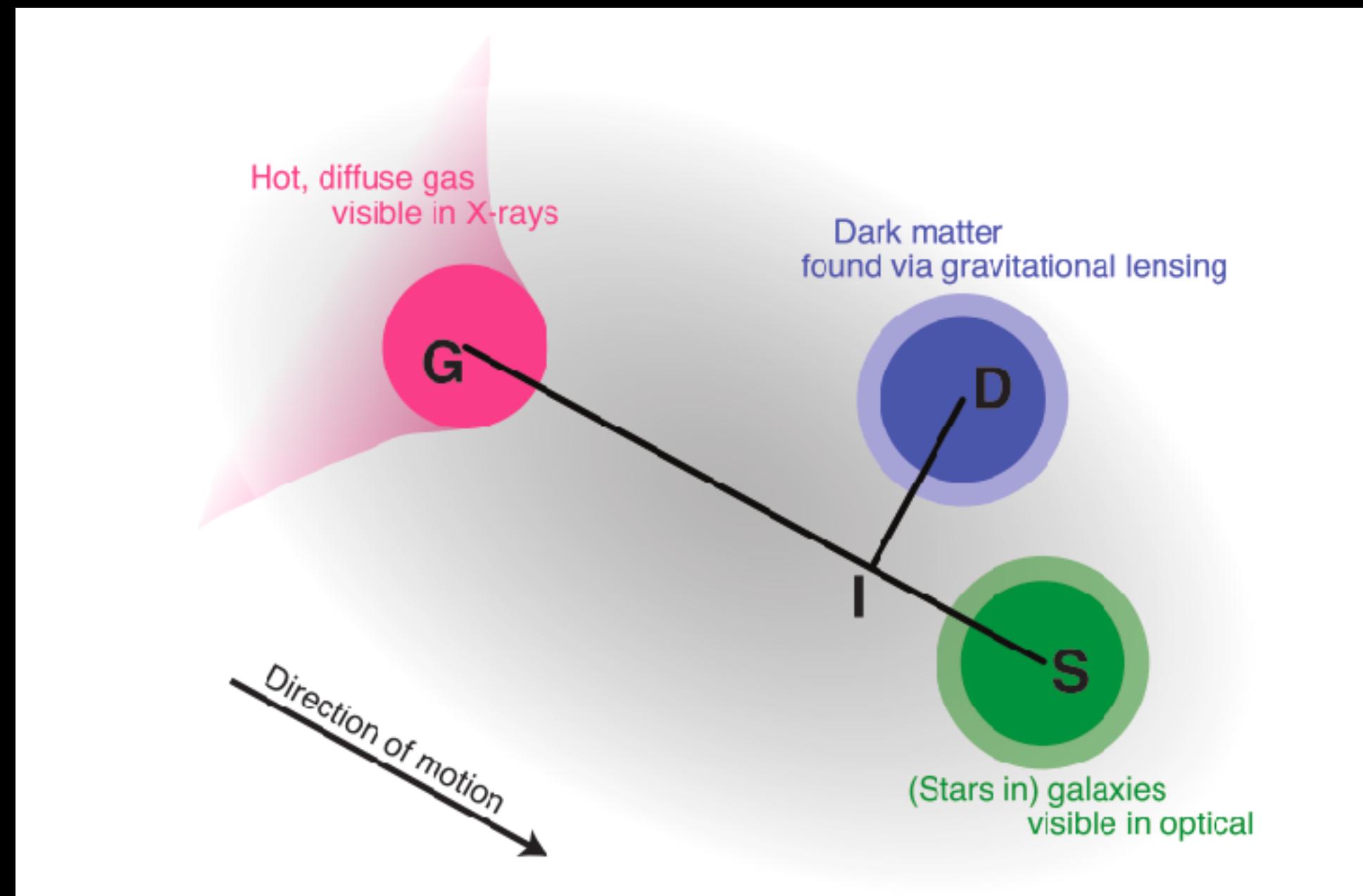
- ⌚ Sistema individual.
- ⌚ Erro na projeção das grandezas.
- ⌚ Resultados dependem da precisão da reconstrução de massa via lentes gravitacionais.



Geometria típica de uma colisão entre dois aglomerados de galáxias

Nova estratégia

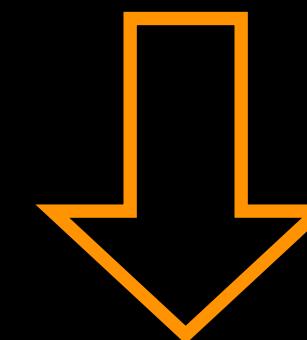
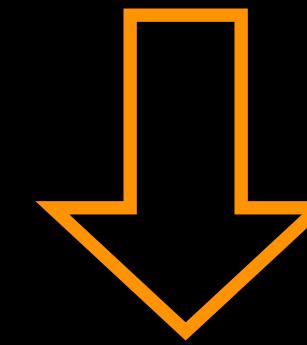
Investigar simultaneamente todos os deslocamentos relativos



deslocamento espacial entre as componentes

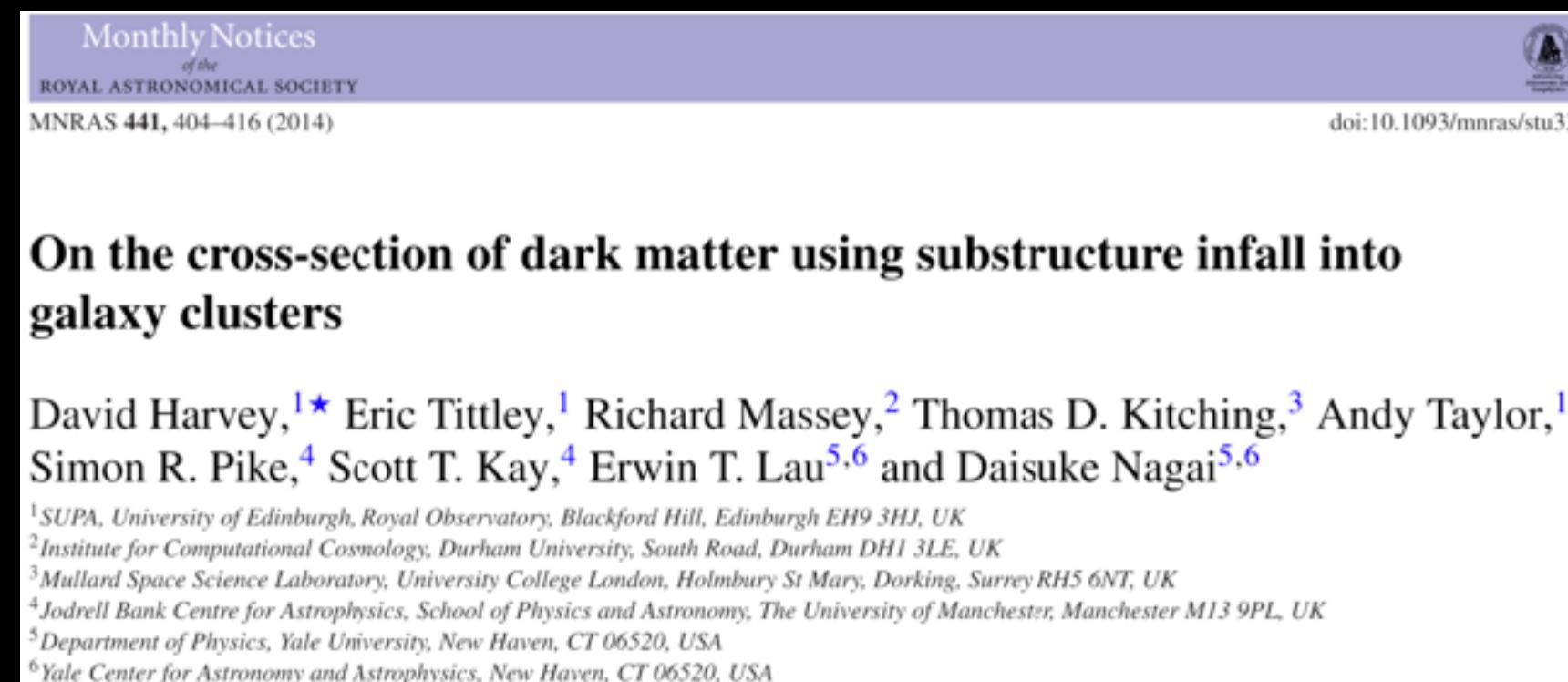
modelo físico para a colisão

$$\sigma/m$$



Aglomerados em colisão como aceleradores de partículas

modelo analítico: arXiv:1310.1731



aplicação: arXiv:1503.07675

The non-gravitational interactions of dark matter in colliding galaxy clusters

David Harvey^{1,2*}, Richard Massey³, Thomas Kitching⁴,
Andy Taylor², Eric Tittley²

¹Laboratoire d'astrophysique, EPFL, Observatoire de Sauverny, 1290 Versoix, Switzerland

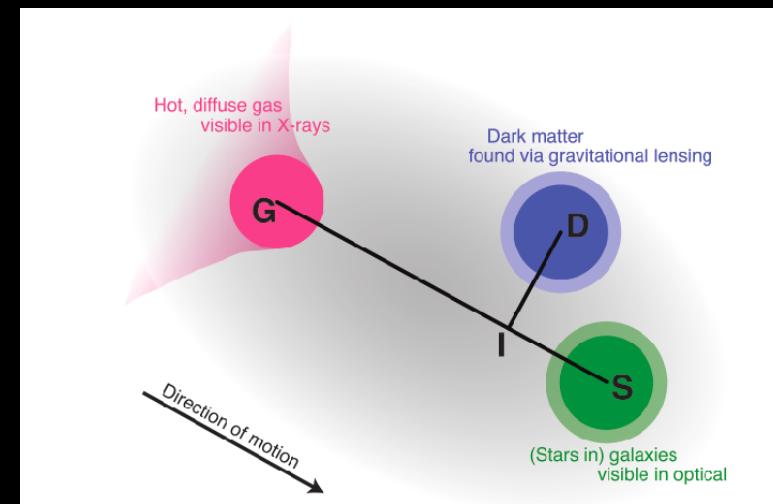
²Royal Observatory, University of Edinburgh, Blackford Hill, Edinburgh EH9 3JL, UK

³Institute for Computational Cosmology, Durham University, South Road, Durham DH1 3LE, UK

⁴Mullard Space Science Laboratory, University College London, Dorking, Surrey RH5 6NT, UK

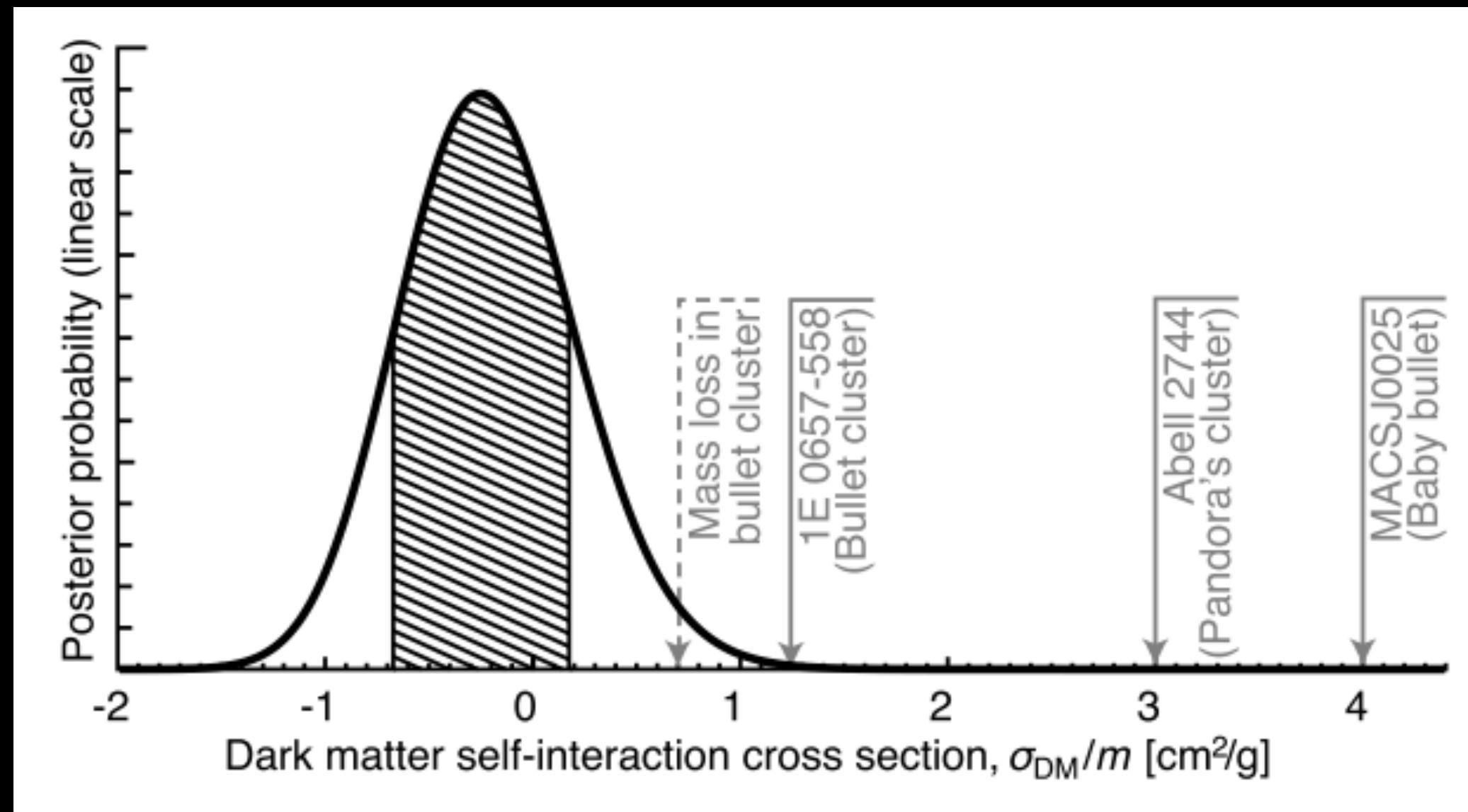
*To whom correspondence should be addressed; E-mail: david.harvey@epfl.ch

- forças relevantes consideradas:
 - (i) potencial do aglomerado,
 - (ii) potencial do sub-halo,
 - (iii) força de arraste no gás,
 - (iv) efeitos de auto-interação da DM,
 - (v) força de arraste resultante no halo de DM e
 - (vi) empuxo;
- Usando Chandra + Hubble foram estudados 32 sistemas em colisão, totalizando 72 “anatomias”;
- Tratamento estatístico dos deslocamentos.



$$\beta \equiv \frac{\delta_{\text{SI}}}{\delta_{\text{SG}}} = B \left(1 - e^{\left(\frac{-(\sigma_{\text{DM}} - \sigma_{\text{gal}})}{\sigma^*/m} \right)} \right)$$

Aglomerados em colisão como aceleradores de partículas



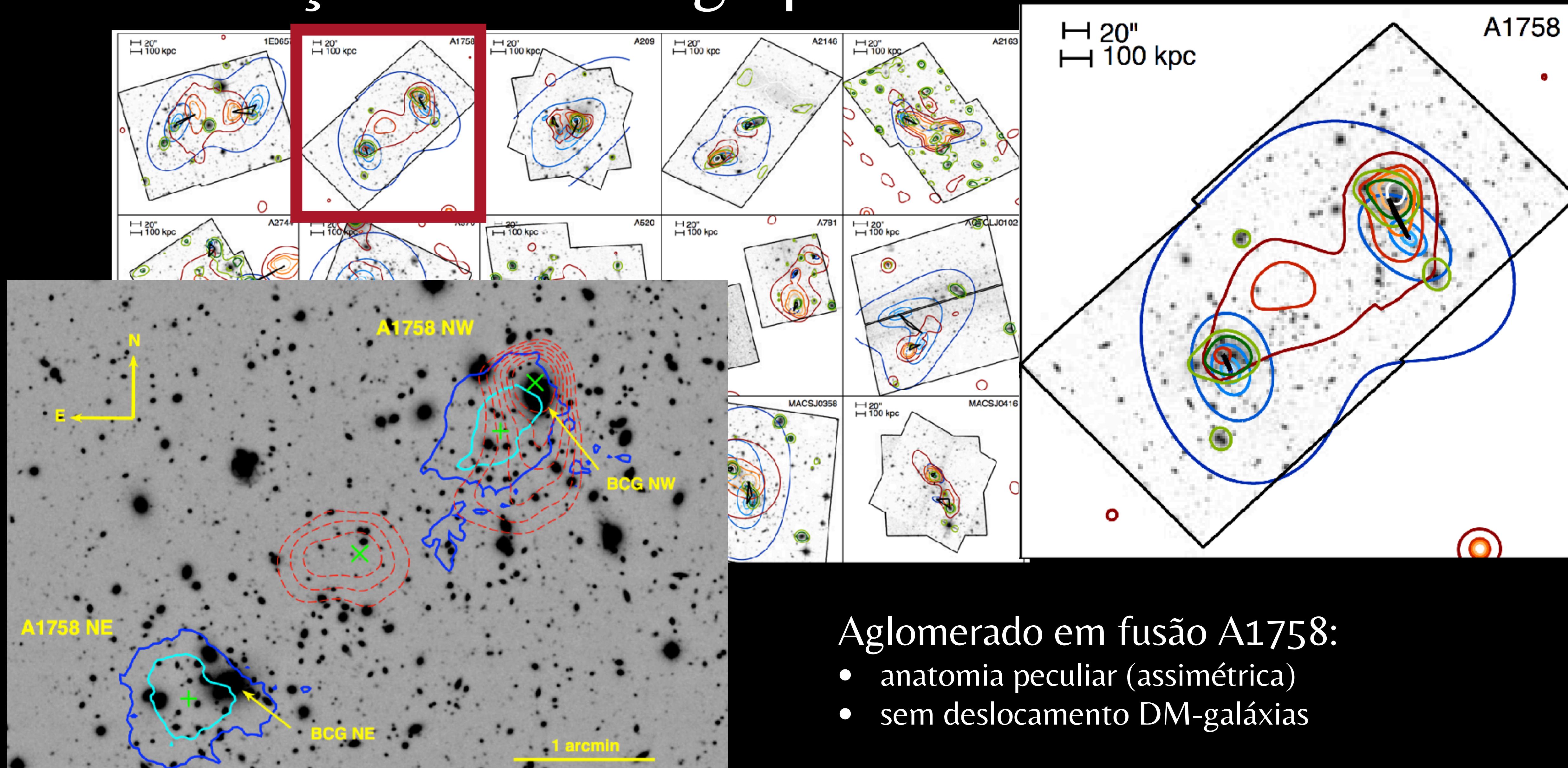
$$\frac{\sigma}{m} = -0.25^{+0.42}_{-0.43} \text{ cm}^2 \text{g}^{-1}$$

$$\frac{\sigma}{m} < 0.47 \text{ cm}^2 \text{g}^{-1}$$

arXiv:1503.07675

Parece um resultado impressionante, mas...

Contribuições do nosso grupo



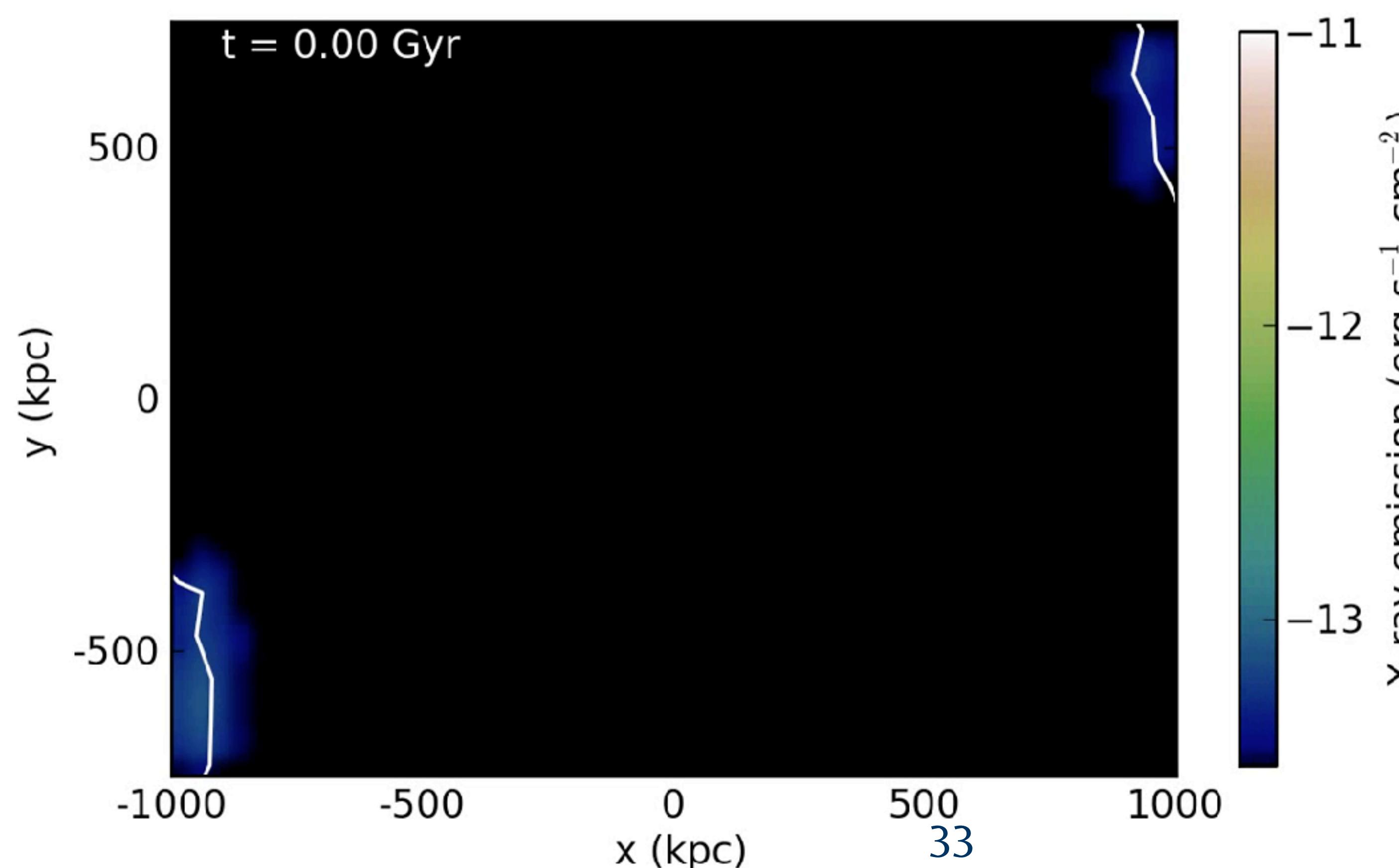
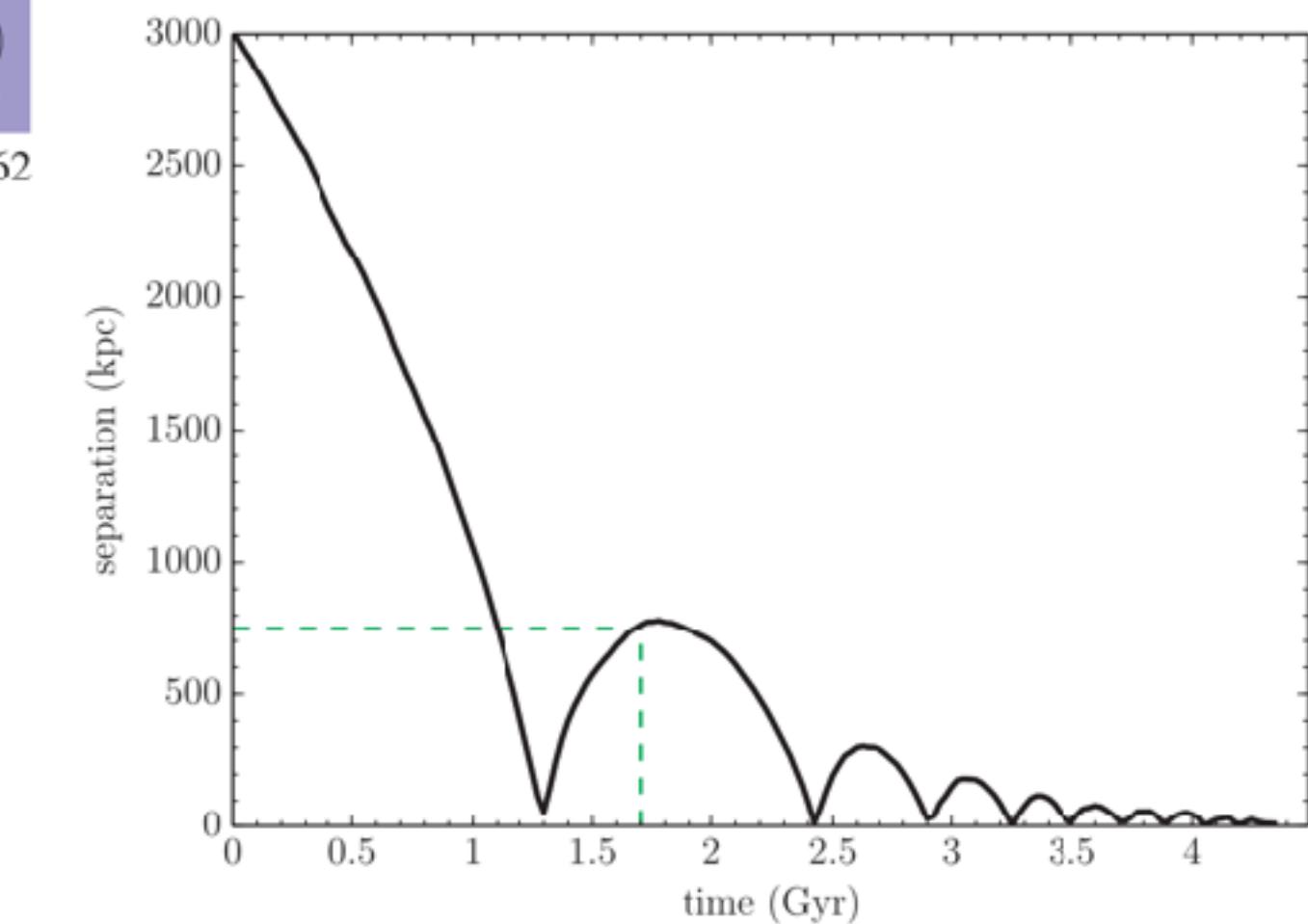
Simulating the shocks in the dissociative galaxy cluster Abell 1758N

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



The merger history of the complex cluster Abell 1758: a combined weak lensing and spectroscopic view

R. Monteiro-Oliveira,¹ E. S. Cypriano,¹ R. E. G. Machado,^{1,2} G. B. Lima Neto,¹
A. L. B. Ribeiro,³ L. Sodré Jr.¹ and R. Dupke^{4,5,6,7}

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*

³*Laboratório de Astrofísica Teórica e Observacional, Universidade Estadual de Santa Cruz, - 45650-000 Ilhéus-BA, Brazil*

⁴*Observatório Nacional, Rua Gal. José Cristino 77, 20921-400 Rio de Janeiro RJ, Brazil*

⁵*Department of Astronomy, University of Michigan, 311 West Hall 1085 South University Ave. Ann Arbor, MI 48109-1107, USA*

⁶*Department of Physics and Astronomy, University of Alabama, Box 870324, Tuscaloosa, AL 35487, USA*

⁷*Eureka Scientific Inc., 2452 Delmer St. Suite 100, Oakland, CA 94602, USA*

Accepted 2016 December 9. Received 2016 November 29; in original form 2016 May 24

arXiv:1605.07595

Merger history of the galaxy cluster A1758 2627

it leads to an upper limit of the dark matter self-interaction cross-section of $5.83 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$. This limit is similar to the one found with the ‘Bullet Cluster’ ($\sigma/m < 5 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$; Markevitch et al. 2004), the ‘Baby Bullet’ ($\sigma/m < 4 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$; Bradač et al. 2008) and Abell 2744 ($\sigma/m < 3 + 1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$; Merten et al. 2011).

Given our analysis, we found that the BCGs and dark matter centre positions are comparable within 95 per cent c.l., in the sense that it is not possible to extract trustworthy constraints to σ/m through the methodology presented by Harvey et al. (2015).

financial support provided by CAPES and CNPq (142219/2013-4) and the project *Casadinho PROCAD* - CNPq/CAPES (552236/2011-0). The authors would also like to acknowledge support from the Brazilian agencies CNPq and FAPESP (*projeto temático* PI:LSJ 12/00800-4; ESC 2014/13723-3; REGM 2010/12277-9; ALBR 309255/2013-9). REGM also acknowledges support from *Ciência sem Fronteiras* (CNPq).

This paper is based in part on observations obtained at the Gemini Observatory, which is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under a cooperative agreement with the NSF on behalf of the Gemini Observatory partnership: the National



The Mismeasure of Mergers: Revised Limits on Self-interacting Dark Matter in Merging Galaxy Clusters

David Wittman^{1,2} , Nathan Golovich^{1,3} , and William A. Dawson³ 

¹ Physics Department, University of California, Davis, CA 95616, USA; dwittman@physics.ucdavis.edu

² Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal

³ Lawrence Livermore National Laboratory, P.O. Box 808 L-210, Livermore, CA 94551, USA

Received 2017 January 17; revised 2018 August 21; accepted 2018 September 12; published 2018 December 17

Abstract

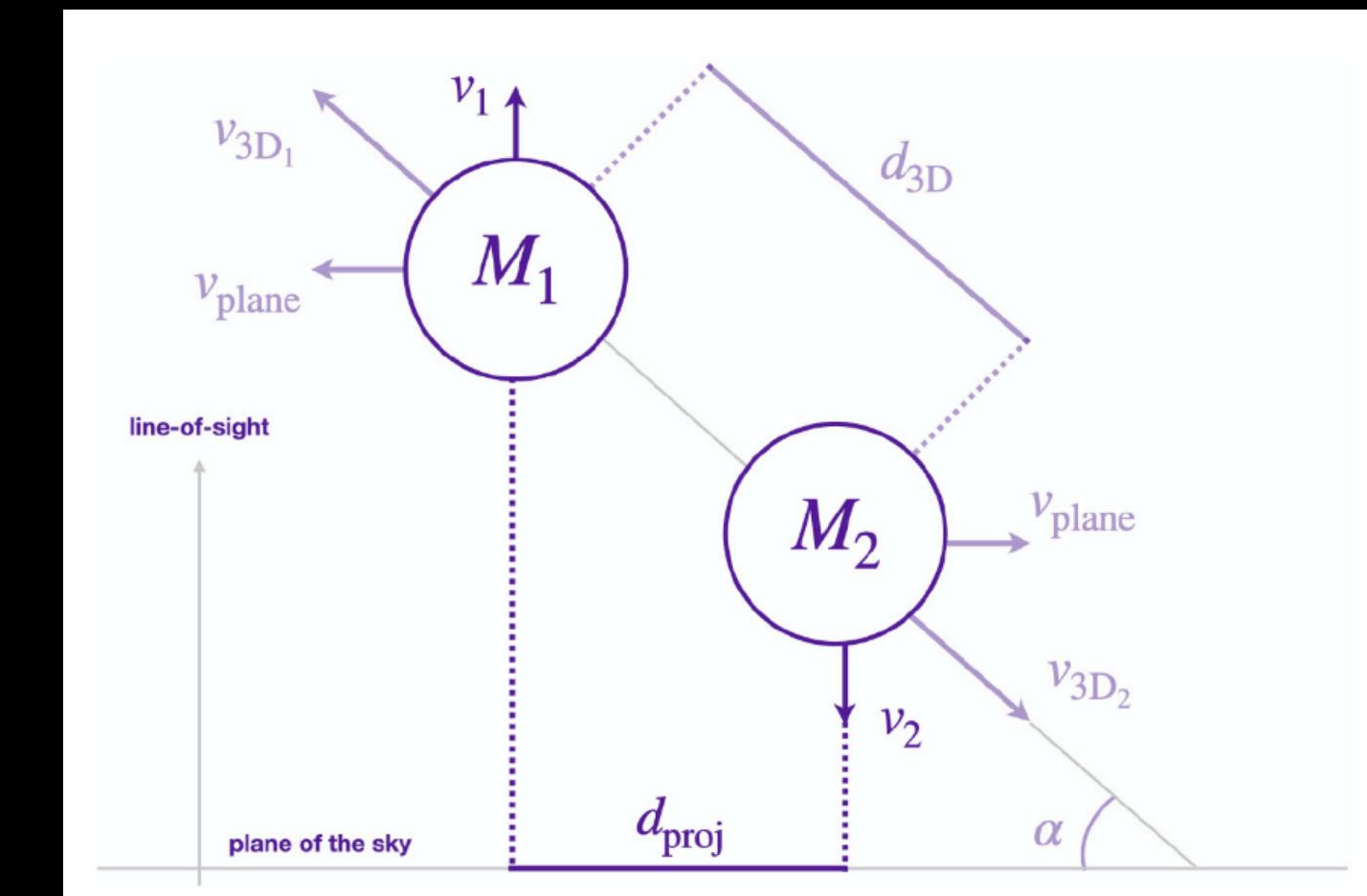
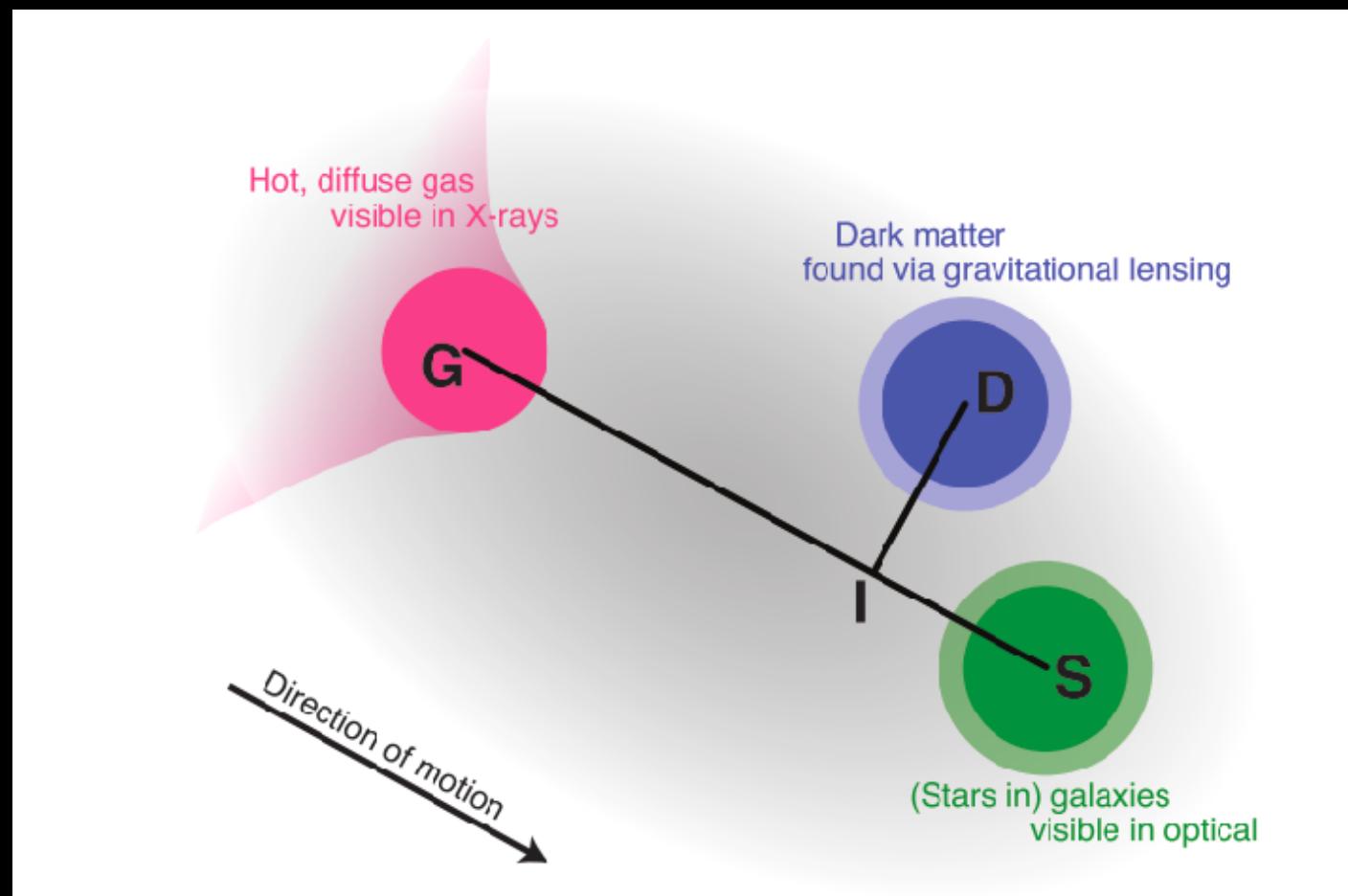
In an influential recent paper, Harvey et al. derive an upper limit to the self-interaction cross section of dark matter (DM) ($\sigma_{\text{DM}}/m < 0.47 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ at 95% confidence) by averaging the DM–galaxy offsets in a sample of merging galaxy clusters. Using much more comprehensive data on the same clusters, we identify several substantial errors in their offset measurements. Correcting these errors relaxes the upper limit on σ_{DM}/m to $\lesssim 2 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$, following the Harvey et al. prescription for relating offsets to cross sections in a simple solid-body scattering model. Furthermore, many clusters in the sample violate the assumptions behind this prescription, so even this revised upper limit should be used with caution. Although this particular sample does not tightly constrain self-interacting DM models when analyzed this way, we discuss how merger ensembles may be used more effectively in the future. We conclude that errors inherent in using single-band imaging to identify mass and light peaks do not necessarily average out in a sample of this size, particularly when a handful of substructures constitute a majority of the weight in the ensemble.

Key words: dark matter – galaxies: clusters: general

arXiv:1701.05877

Desafios para o comissionamento dos aceleradores cósmicos de partículas

- ▶ Transformar grandezas 2D em 3D com acurácia.
- ▶ Determinar a “idade” da colisão (i.e., o tempo desde a última passagem pertinência)
- ▶ Determinação precisa da massa logo após a colisão (weak lensing mass bias).

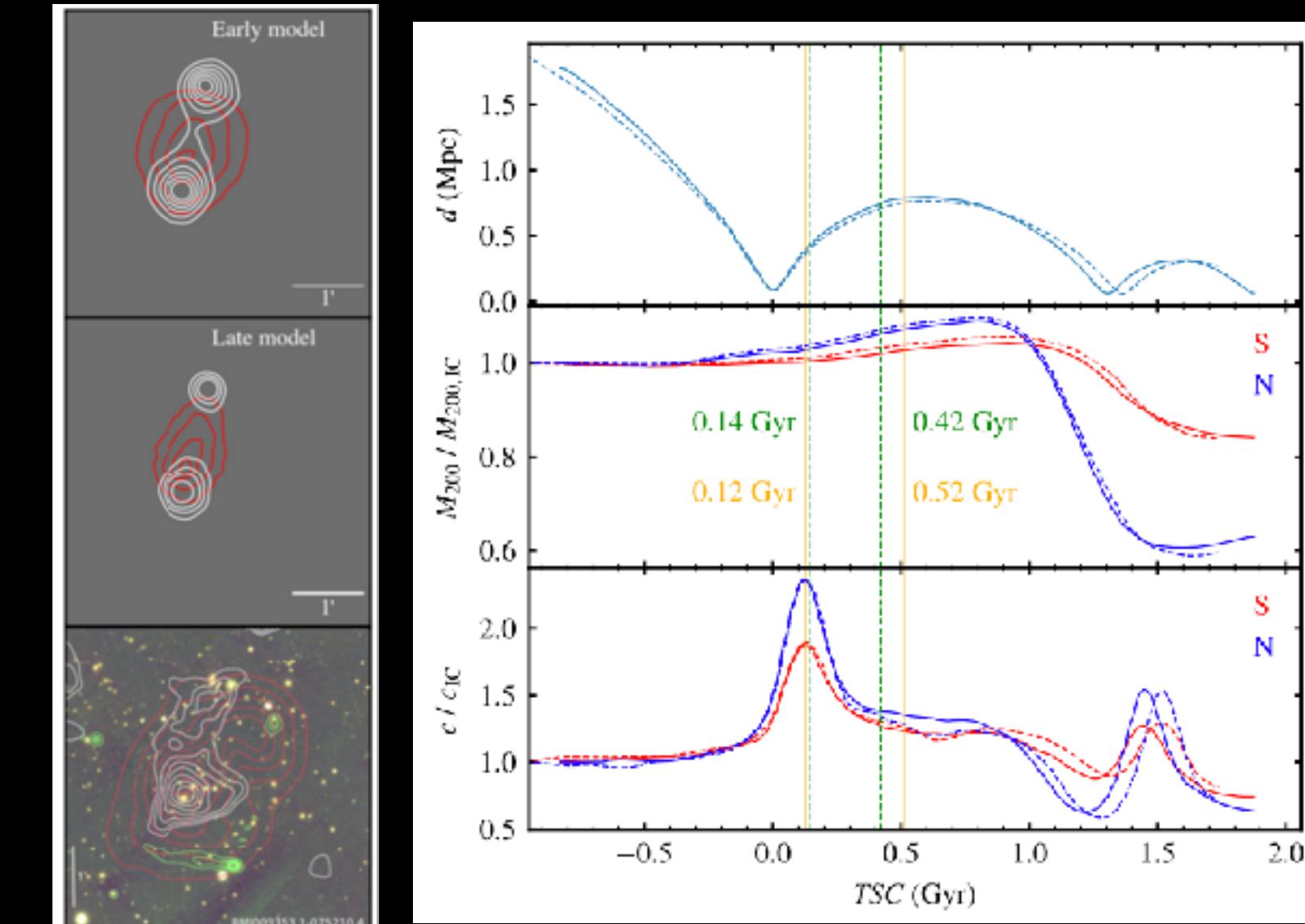
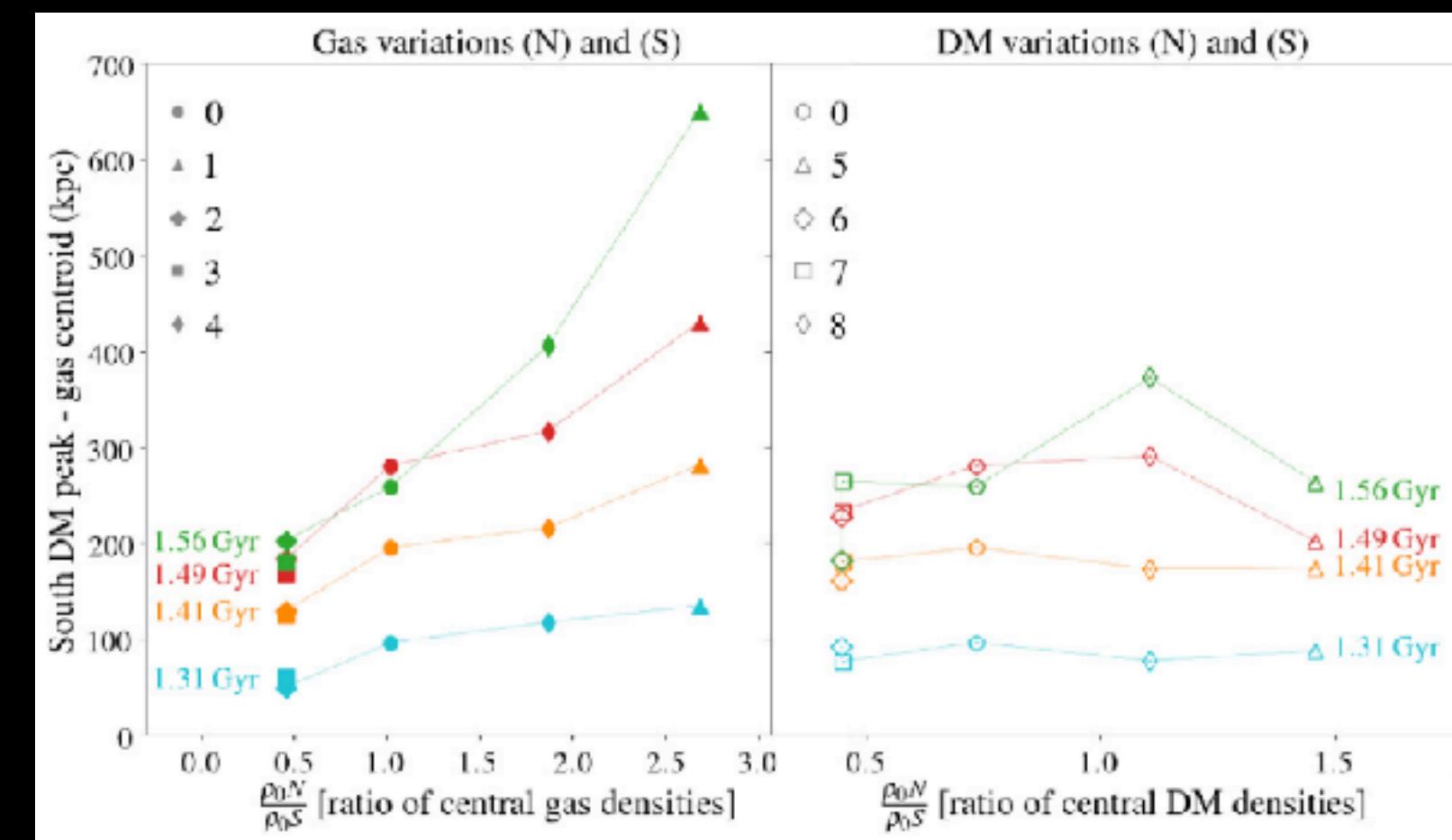


O que temos feito recentemente em nosso grupo?

O modelo Λ CDM sozinho pode explicar o deslocamento gas-DM?



Qual o impacto da acurácia da medida de massa via lentes nas simulações computacionais?



Sumário

📌 Aglomerados de Galáxias

- São as maiores estruturas ligadas gravitacionalmente no universo.
- Contêm matéria escura, gás quente e galáxias: um verdadeiro laboratório cósmico.

💥 Colisões Cósmicas entre aglomerados

- Eventos extremamente energéticos que podem separar gás, galáxias e matéria escura.
- Casos como o Aglomerado Bala sugerem que a matéria escura existem em detrimento a modelos de gravidade modificada.

Sumário



Investigando a natureza da Matéria Escura

- Observações testam modelos alternativos como a Matéria Escura Auto-Interagente (SIDM).
- Por enquanto, ainda não há evidências estatisticamente relevantes para a SIDM.



O que vem pela frente?

- A era da astrofísica de precisão está apenas começando, e você pode fazer parte dela!

Como você pode participar?

- Requisitos: curiosidade, pró-atividade, criatividade, persistência, (entre outros)
- Iniciação Científica (palestra do Dr. Plinio Jaqueto, a seguir)
- Pós Graduação: Mestrado e Doutorado (palestra do Dr Jorge Carvano, amanhã 16:40)

Obrigado!



Rogério Monteiro-Oliveira, Ph.D.
Pesquisador Adjunto (ON/MCTI)

Contato:



rmo@on.br

monteiro-oliveira.com