

Introdução à Cosmologia Física - Aula 12

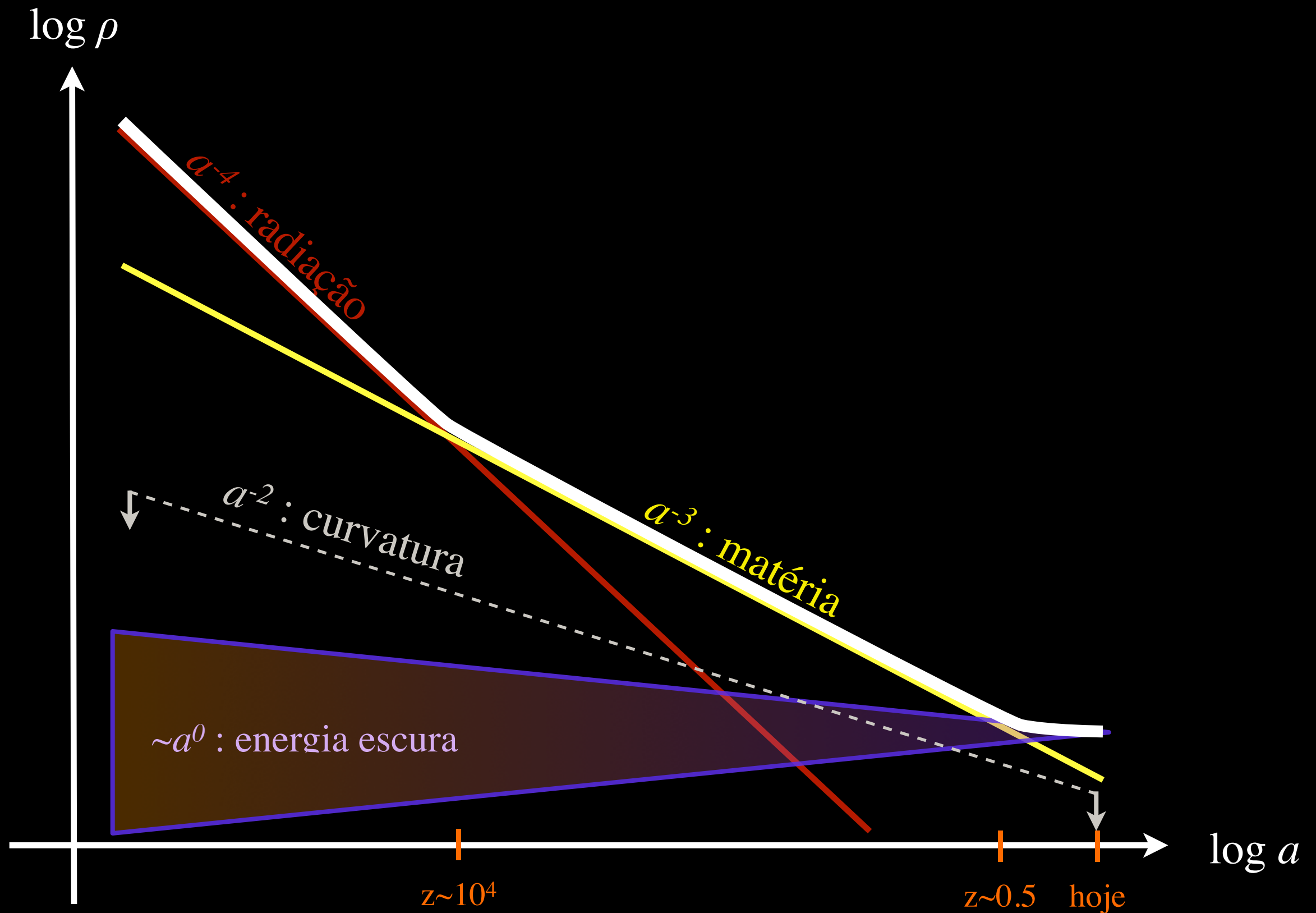


Matéria Escura

- * A “matéria ausente” de Fritz Zwicky
- * Vera Rubin e a rotação das galáxias
- * Raios-x de aglomerados de galáxias
- * Lentes gravitacionais
- * A “bala na agulha”: o Bullet Cluster

→ Ryder, Cap. 8

História da dominação cósmica



Números úteis

- Idade do universe hoje: $t_0 = (13.8 \pm 0.1) \text{ Gy}$
- Densidade: $\rho_0 = (1.9 \pm 0.15) h^2 \times 10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$
- Parâmetro de Hubble: $H_0 = 100 h \text{ Km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
 $h = 0.68 \pm 0.02$
- Baryons (densidade física): $\Omega_b h^2 = (\rho_b / \rho_{\text{tot}}) h^2 = 0.0221 \pm 0.0003$
- Radiação
(fótons e neutrinos sem massa): $\Omega_r = 1 \times 10^{-4} h^{-2}$
- Matéria (baryons + escura): $\Omega_m = 0.31 \pm 0.02$
- Curvatura: $|\Omega_k| < 0.01$

$$\Omega_m \sim 0.3, \text{ mas } \Omega_b \sim 0.04 ???$$

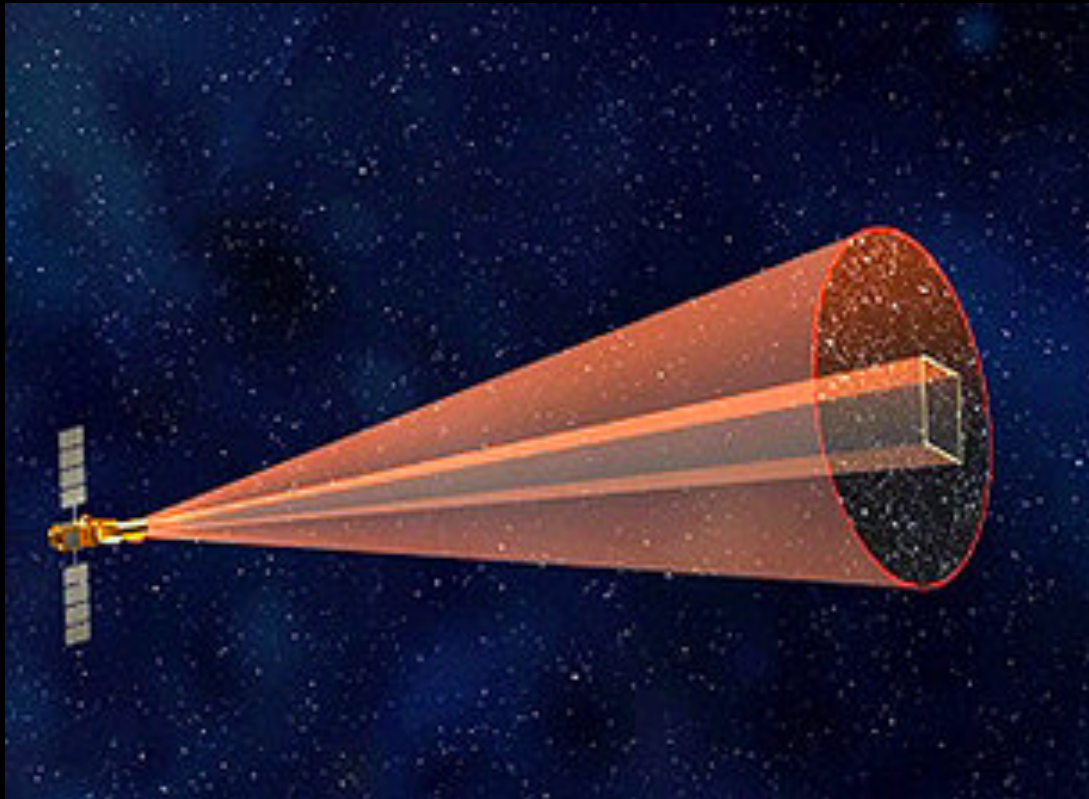
Como pode ser que a matéria total é bem maior que a matéria bariônica (átomos)?

Onde está toda essa matéria no universo?

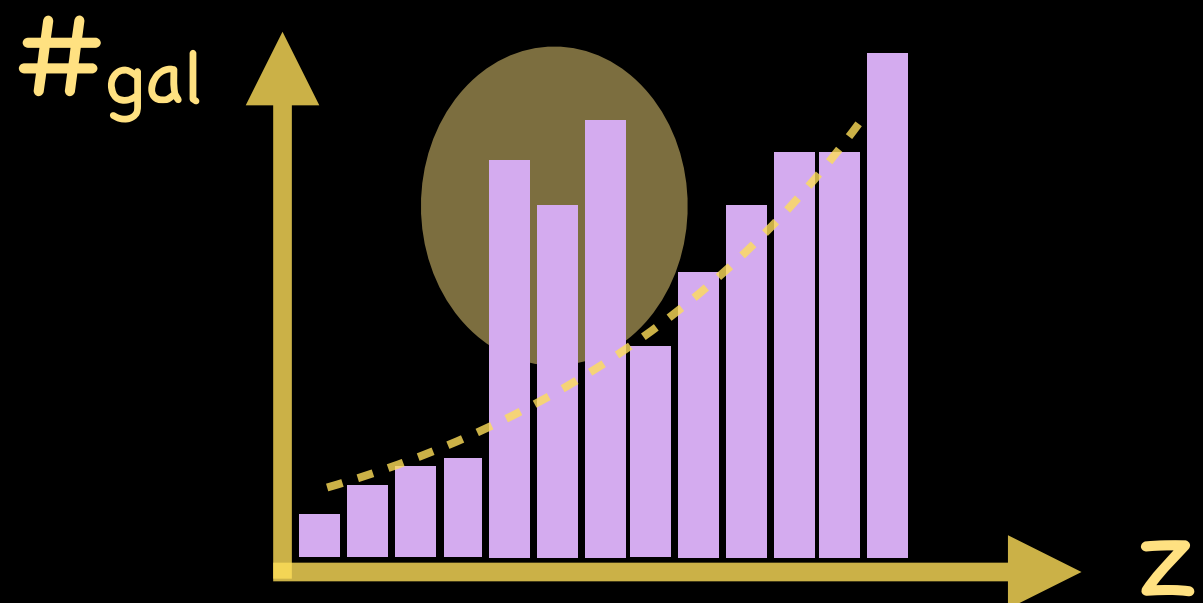
O que é essa matéria?

Uma novela policial em 5 capítulos

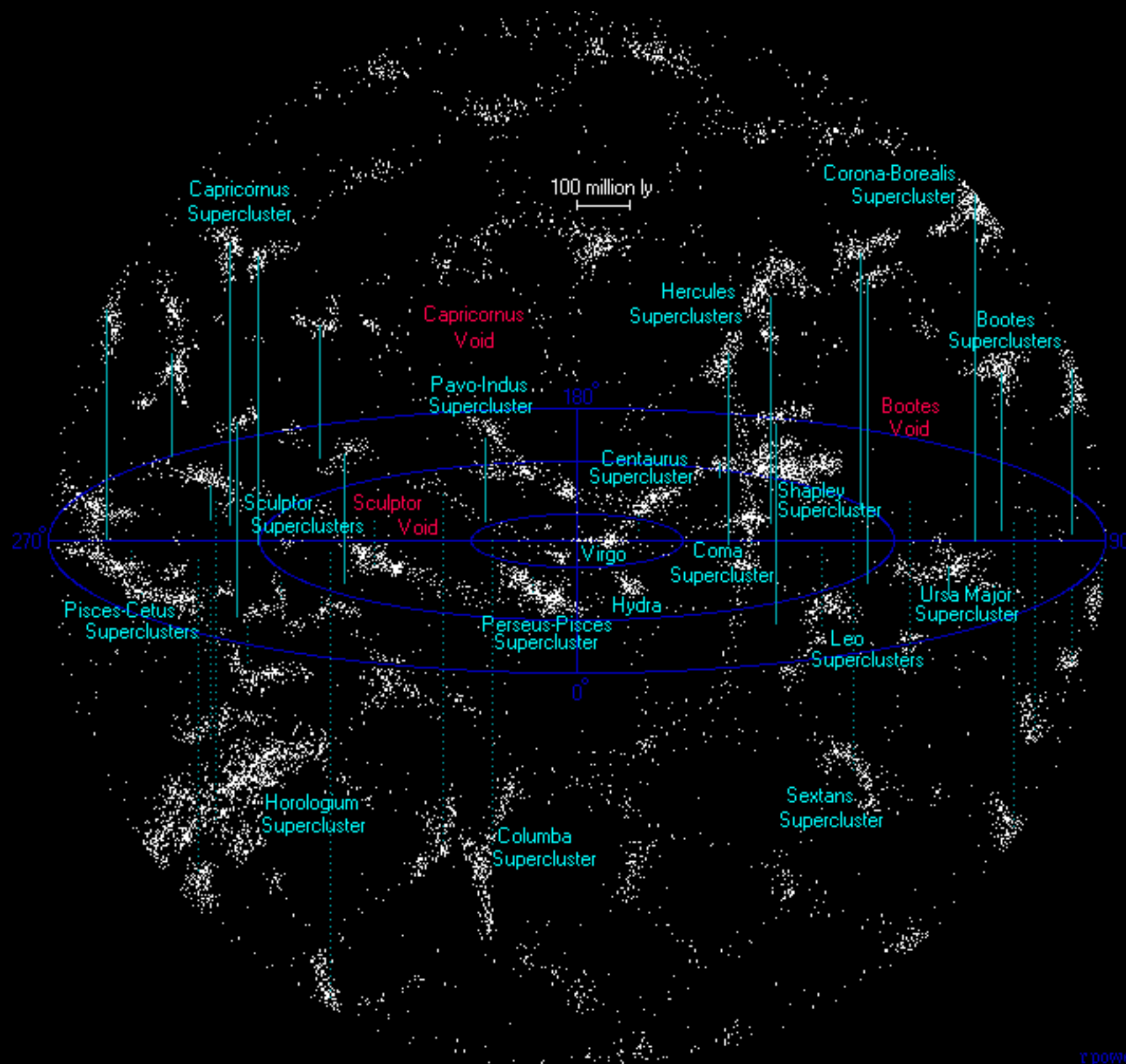
- Por volta de 1935, o astrônomo Fritz Zwicky começou a observar grupos e aglomerados de galáxias.



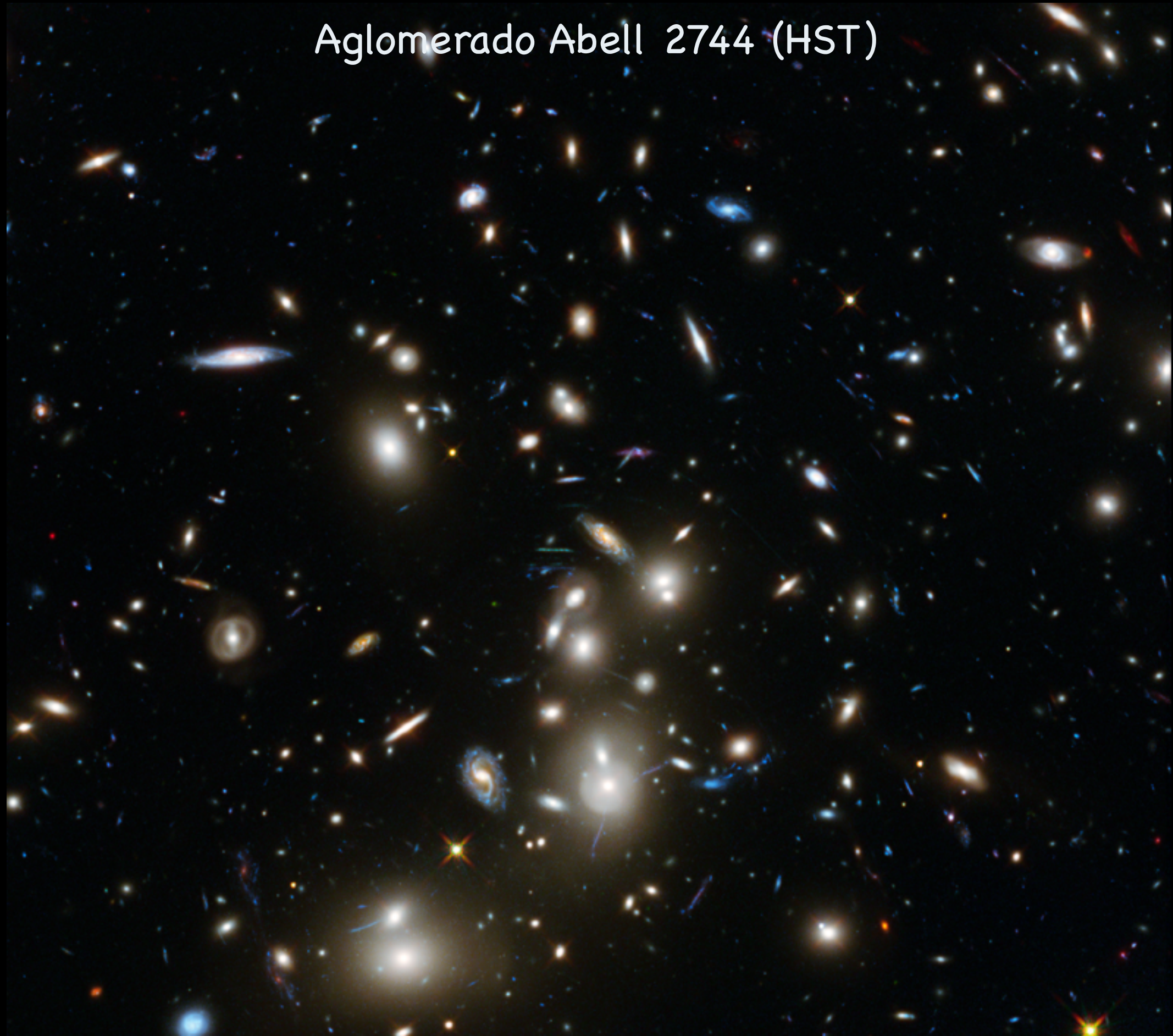
Sexteto de Seyfert (Constelação da Cobra)



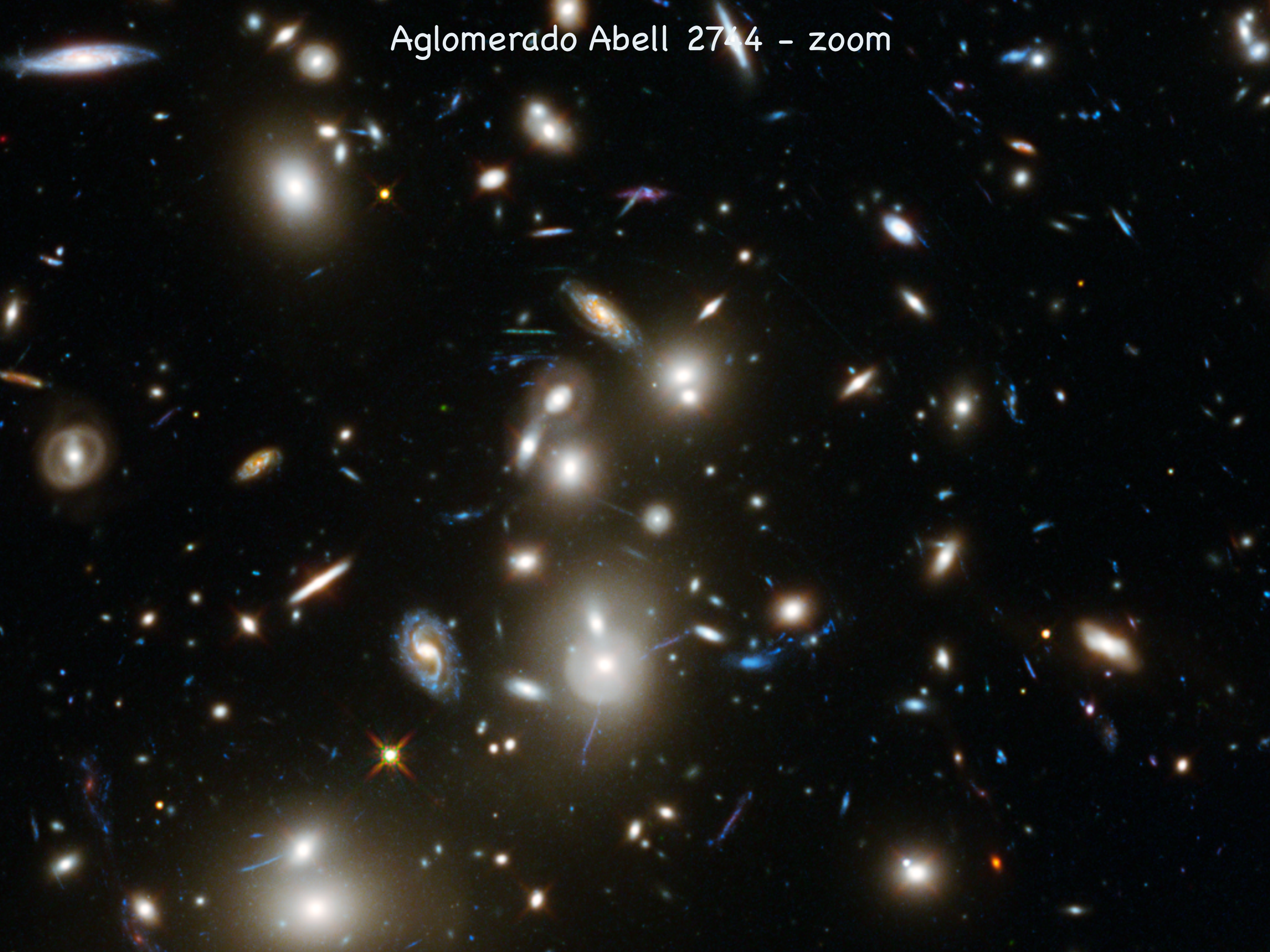
- Aglomerados e super-aglomerados em um raio de 1 bilhão de anos-luz



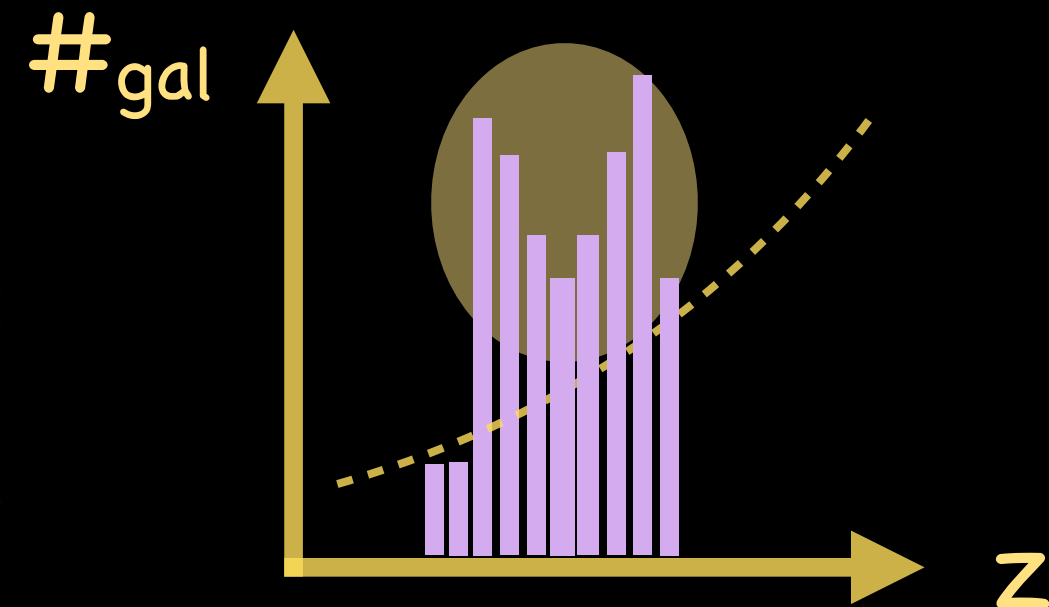
Aglomerado Abell 2744 (HST)



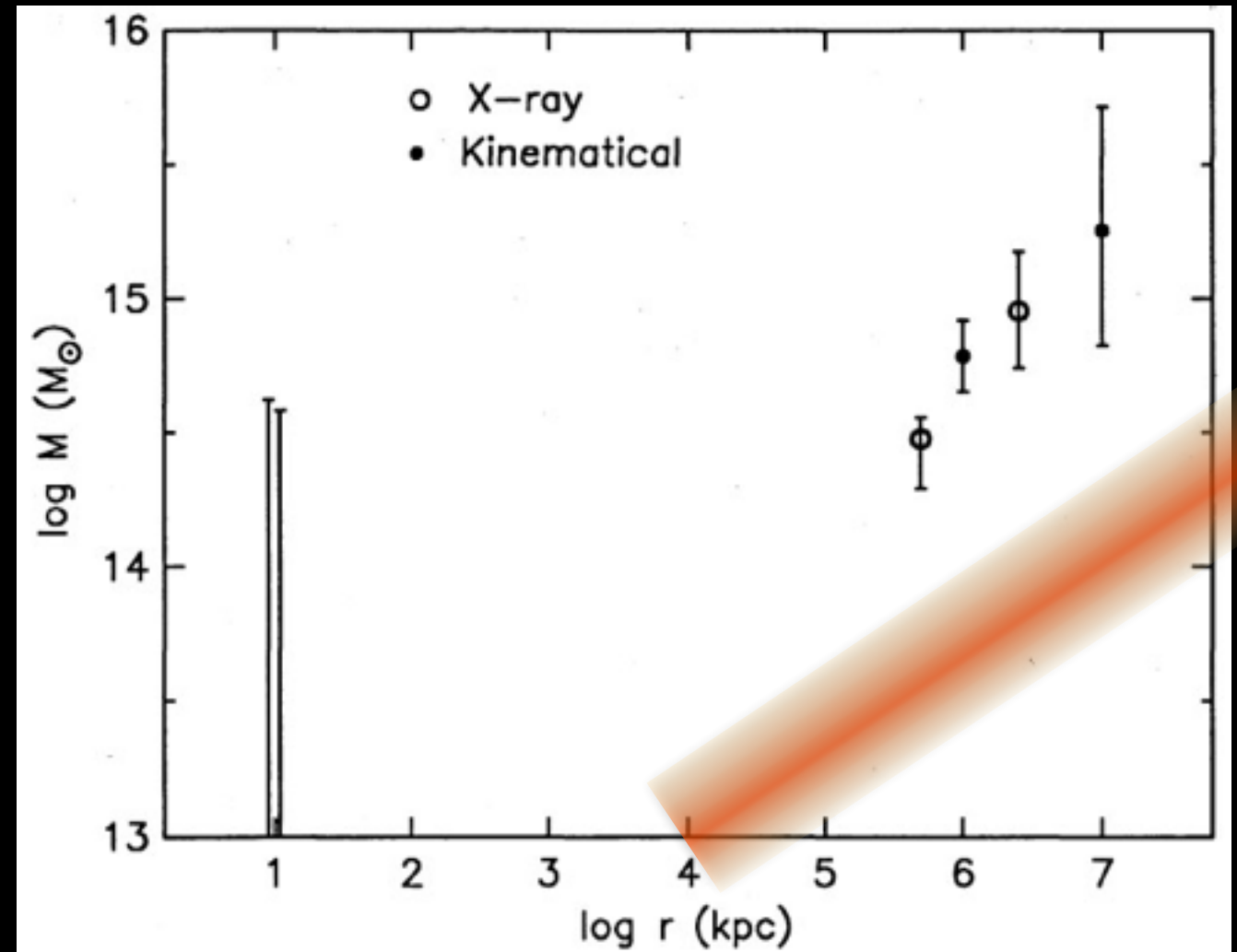
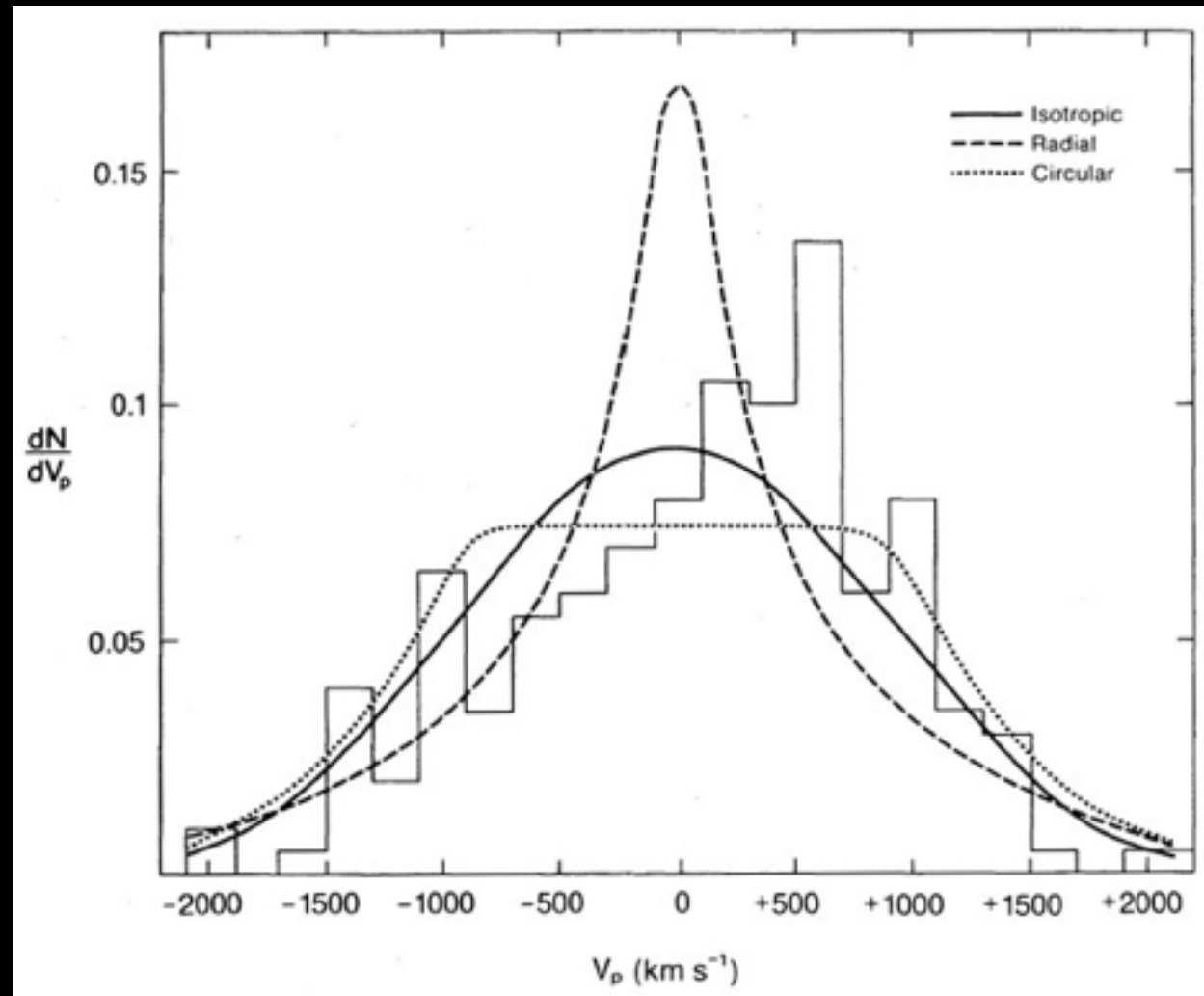
Aglomerado Abell 2744 - zoom



- Zwicky observou com muito cuidado vários aglomerados, em particular o **Aglomerado de Coma**
- Ele mediu os redshifts das galáxias do aglomerado, e descobriu algo muito curioso: as **velocidades** dessas eram **muito altas!**



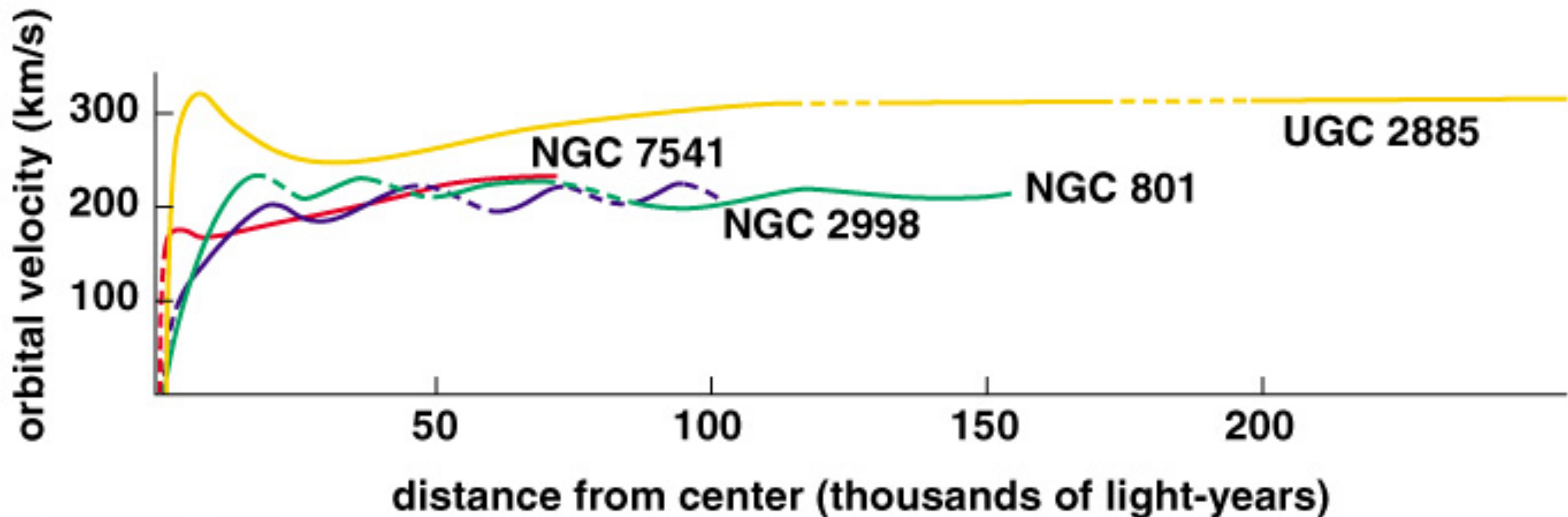
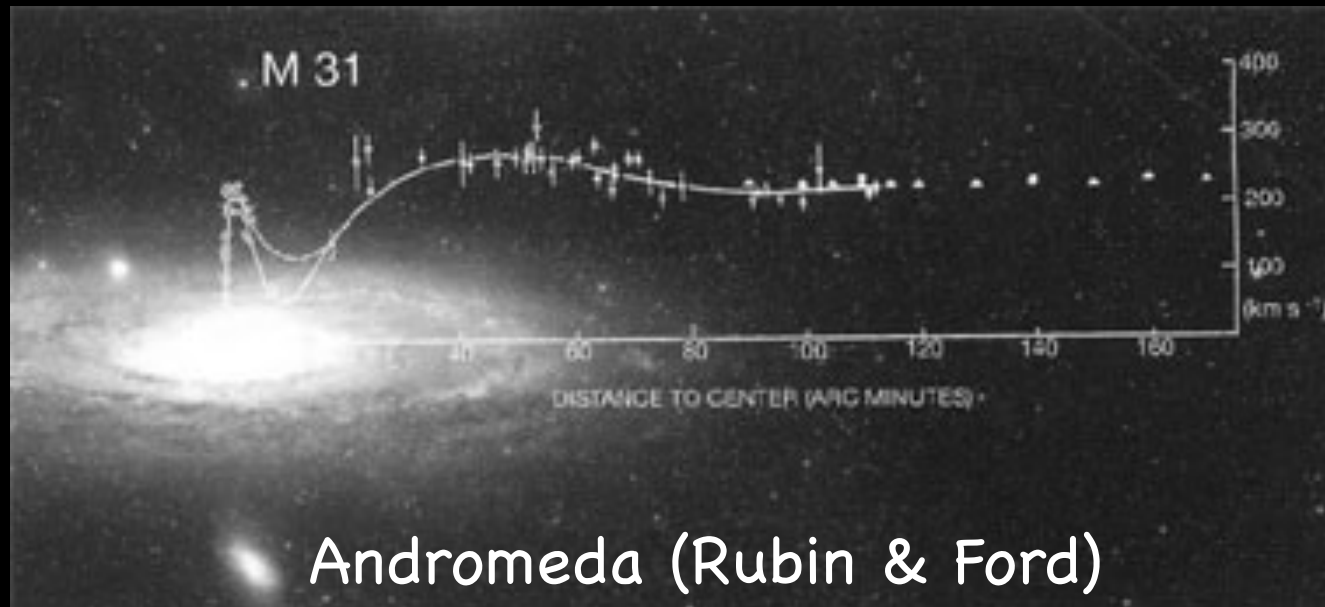
- Através das velocidades (i.e., energia cinética) podemos estimar a massa total do sistema (i.e., energia potencial gravitacional)...



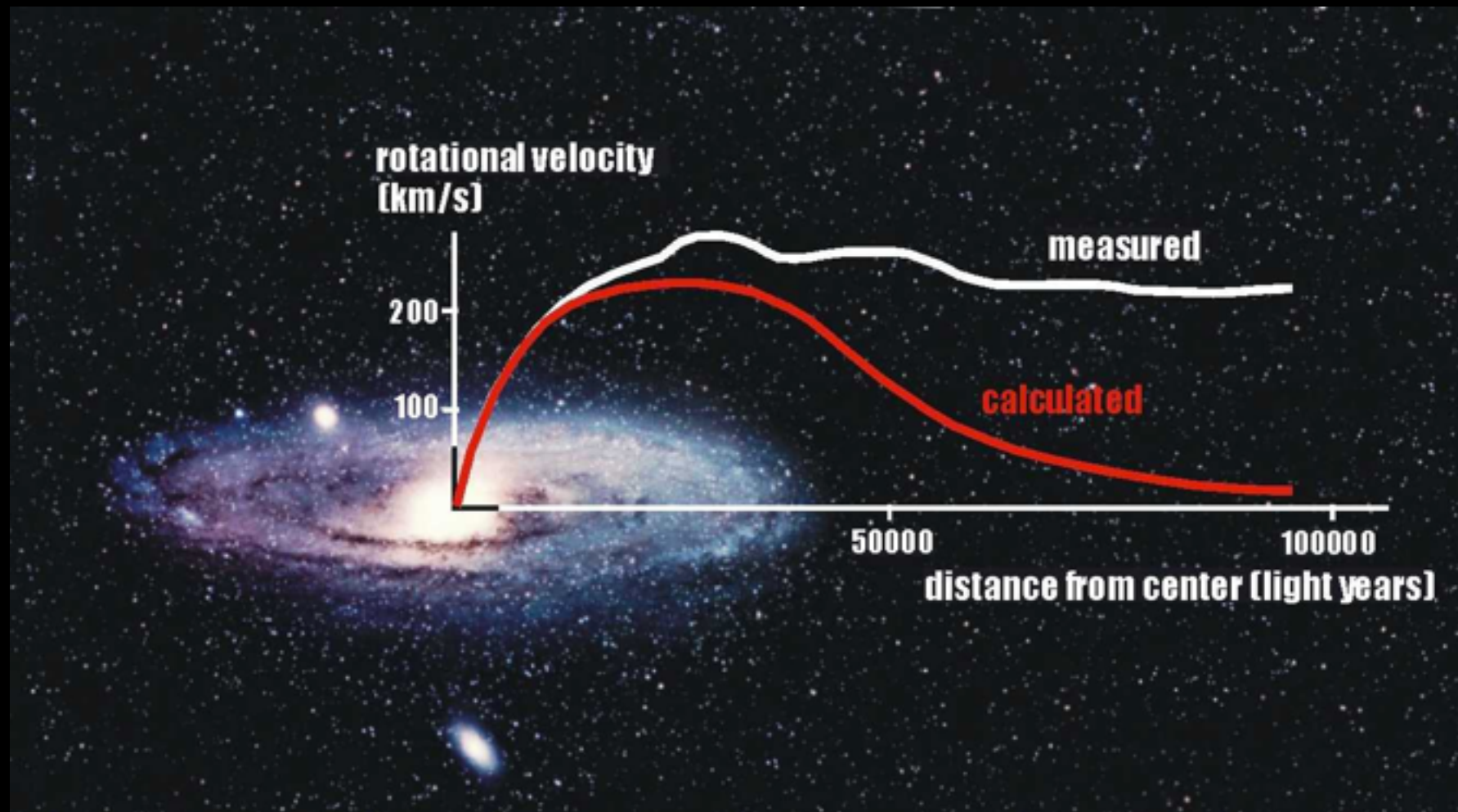
Aglomerado de Coma [Merritt, Ap. J. 313, 121 (1987)]

- Porém, a massa em **estrelas** de Coma é da ordem de $2 \cdot 10^{13} M_\odot$, e a massa em **gás** no meio inter-galáctico de Coma é da ordem de $2 \cdot 10^{14} M_\odot$...!

- Durante os anos 60 e 70, a astrônoma **Vera Rubin** observou centenas de **galáxias espirais**, procurando mapear suas velocidades de rotação.

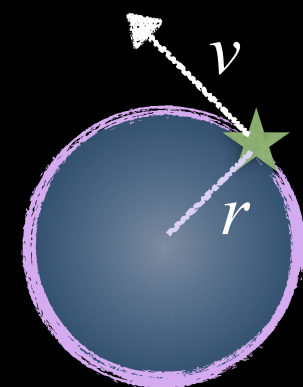


- Ali, verificou-se a mesma história: as regiões mais externas das galáxias pareciam girar muito mais rápido do que o permitido pela força da gravidade gerada pelas estrelas e gás daquelas galáxias ("Lei de Kepler")!

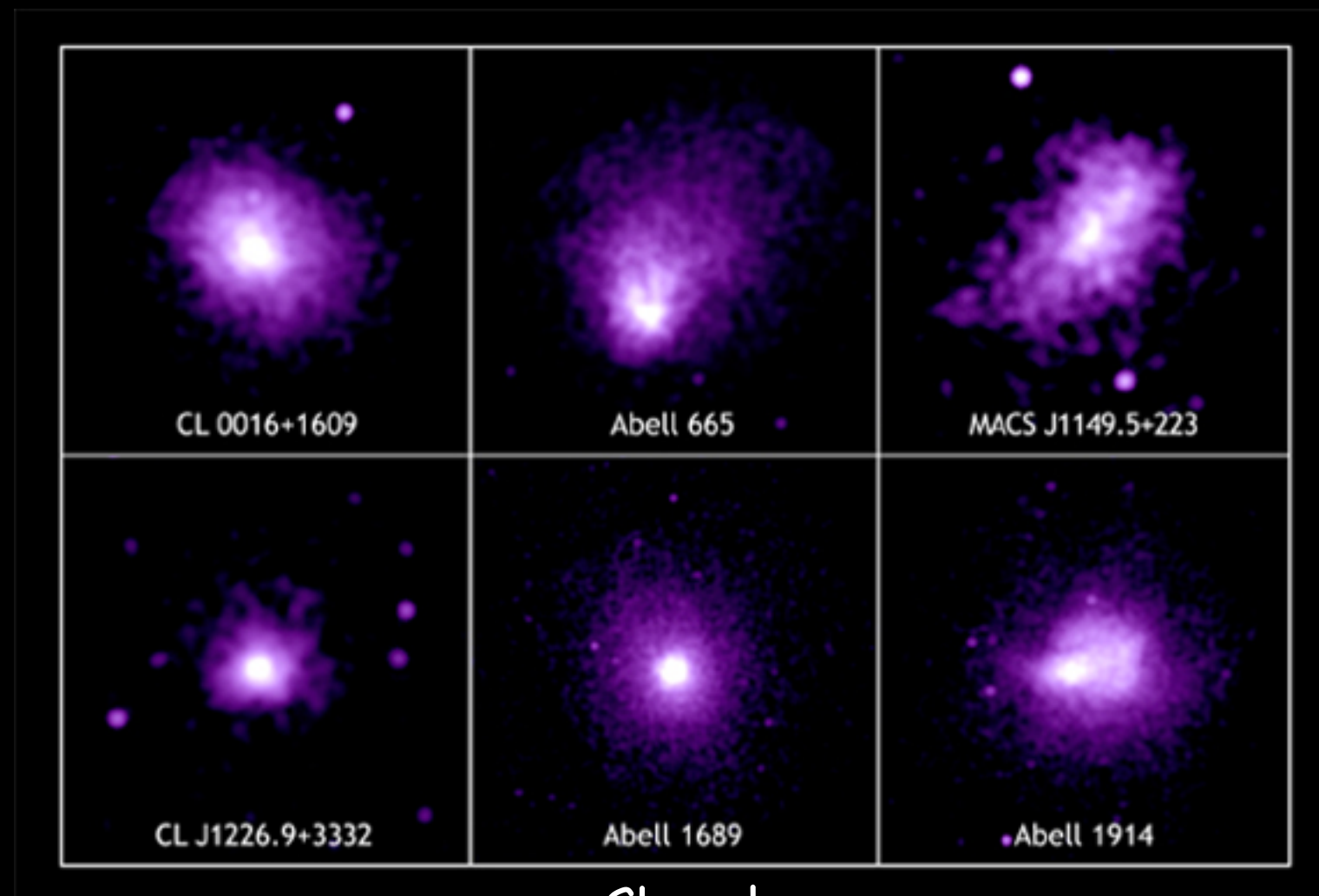
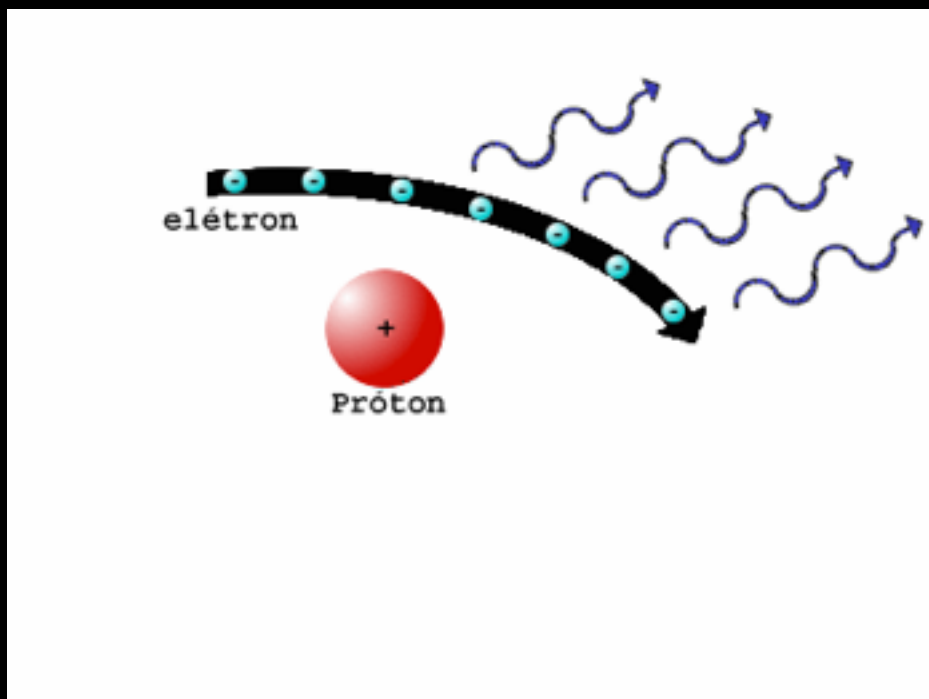


Órbita "Kepleriana": $a_{cen} = \frac{v^2}{r} = \frac{F_G}{m} = \frac{GM(r)}{r^2}$

$$\Rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$



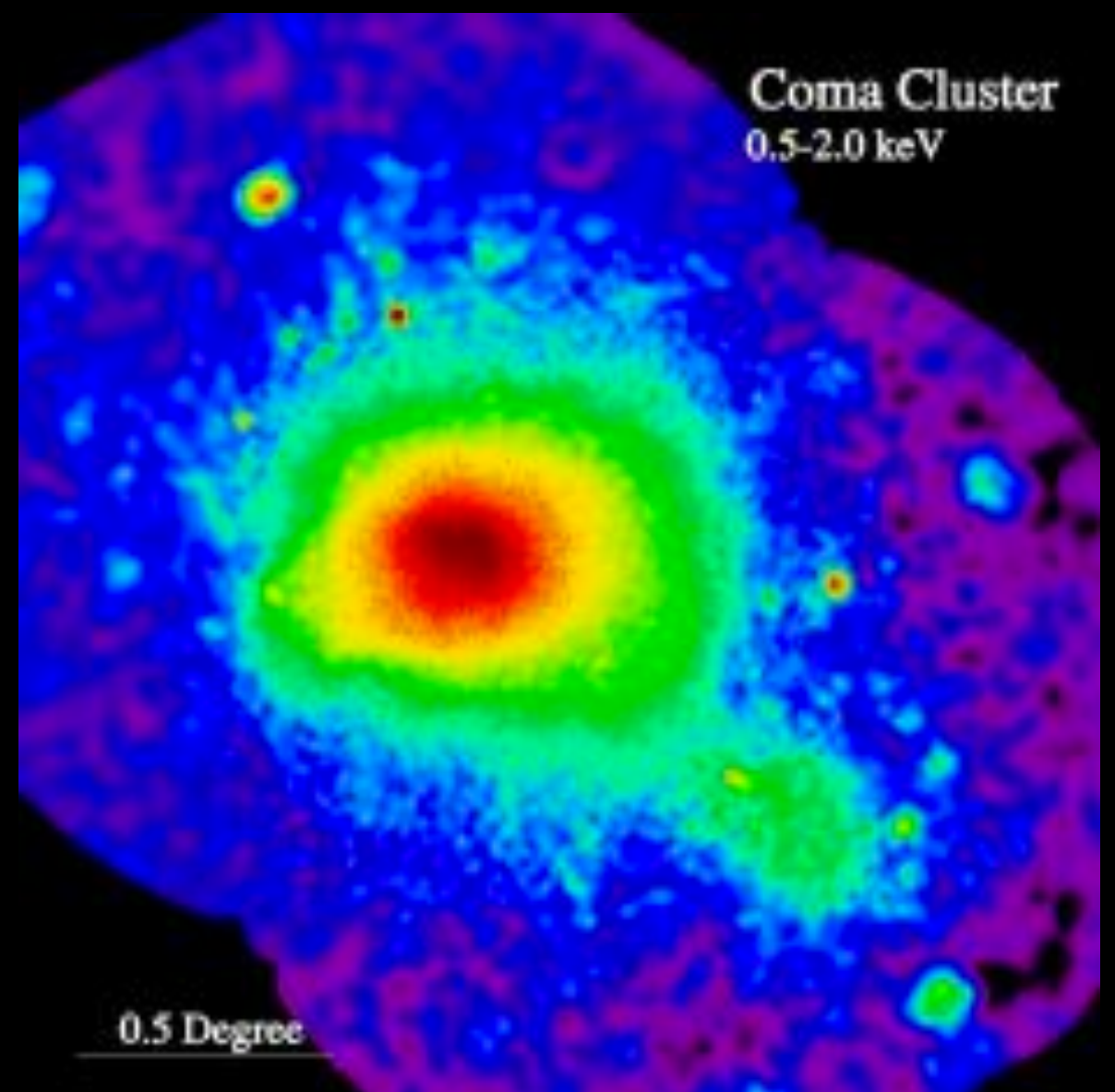
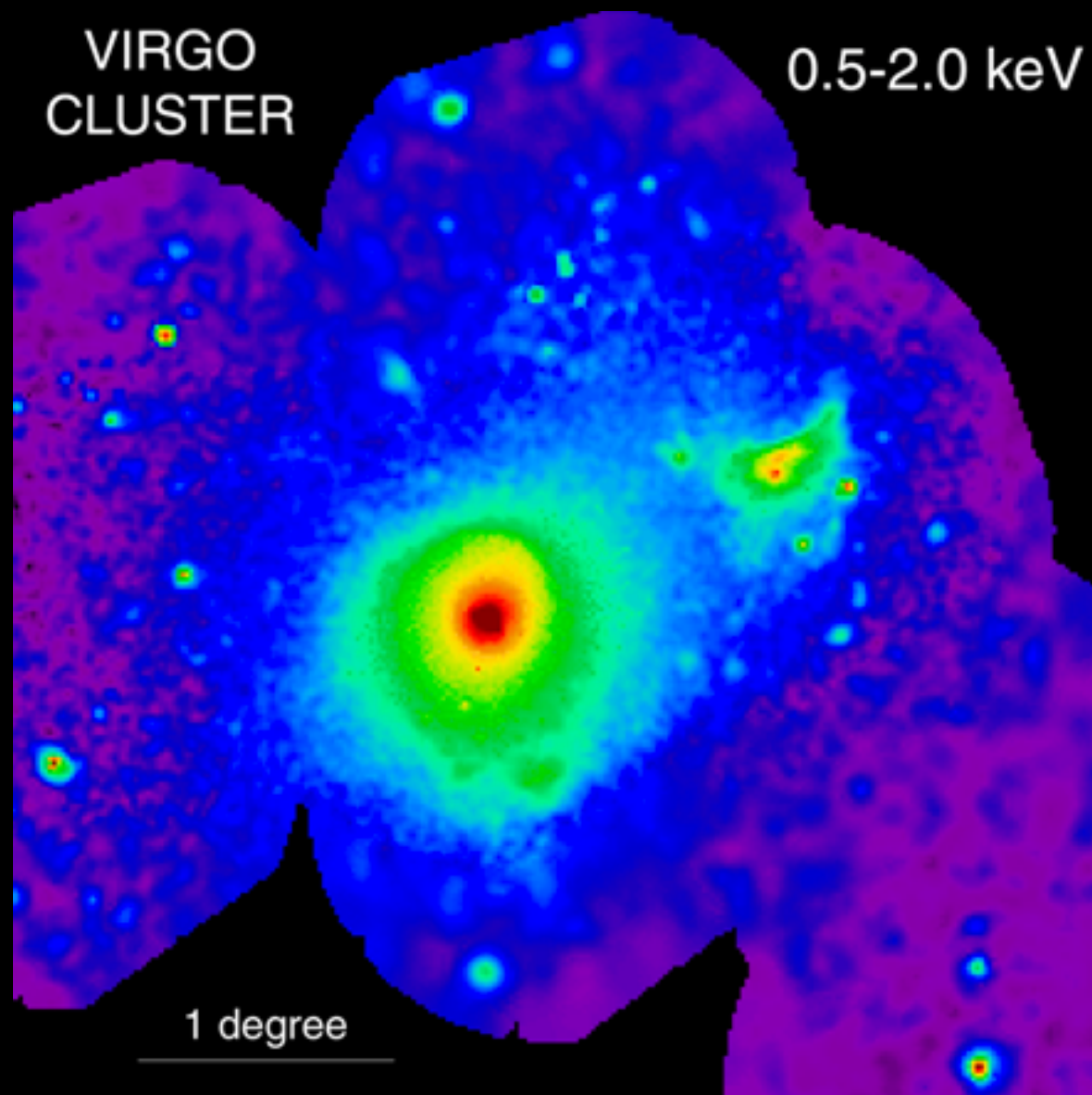
- Independente de Zwicky e Rubin, a partir dos anos 1990 (Chandra, XMM, ROSAT e outros) os astrônomos passaram a observar aglomerados de galáxias através de **raios-X**
- Em aglomerados de galáxias há uma grande quantidade de gás ionizado, a uma temperatura de 10^7 – 10^8 K (1–10 KeV)
- Esse gás (que contém a maior parte da massa bariônica dos aglomerados) emite **radiação Brehmstrahlung** – ou seja, **raios-X**



Chandra

3 Introdução à Cosmologia Física - Aula 12

- A intensidade do raio-X pode ser utilizada para estimar a quantidade de gás e a sua temperatura.
- As altas temperaturas do gás indicam uma massa muito maior do que a massa em gás ou em estrelas



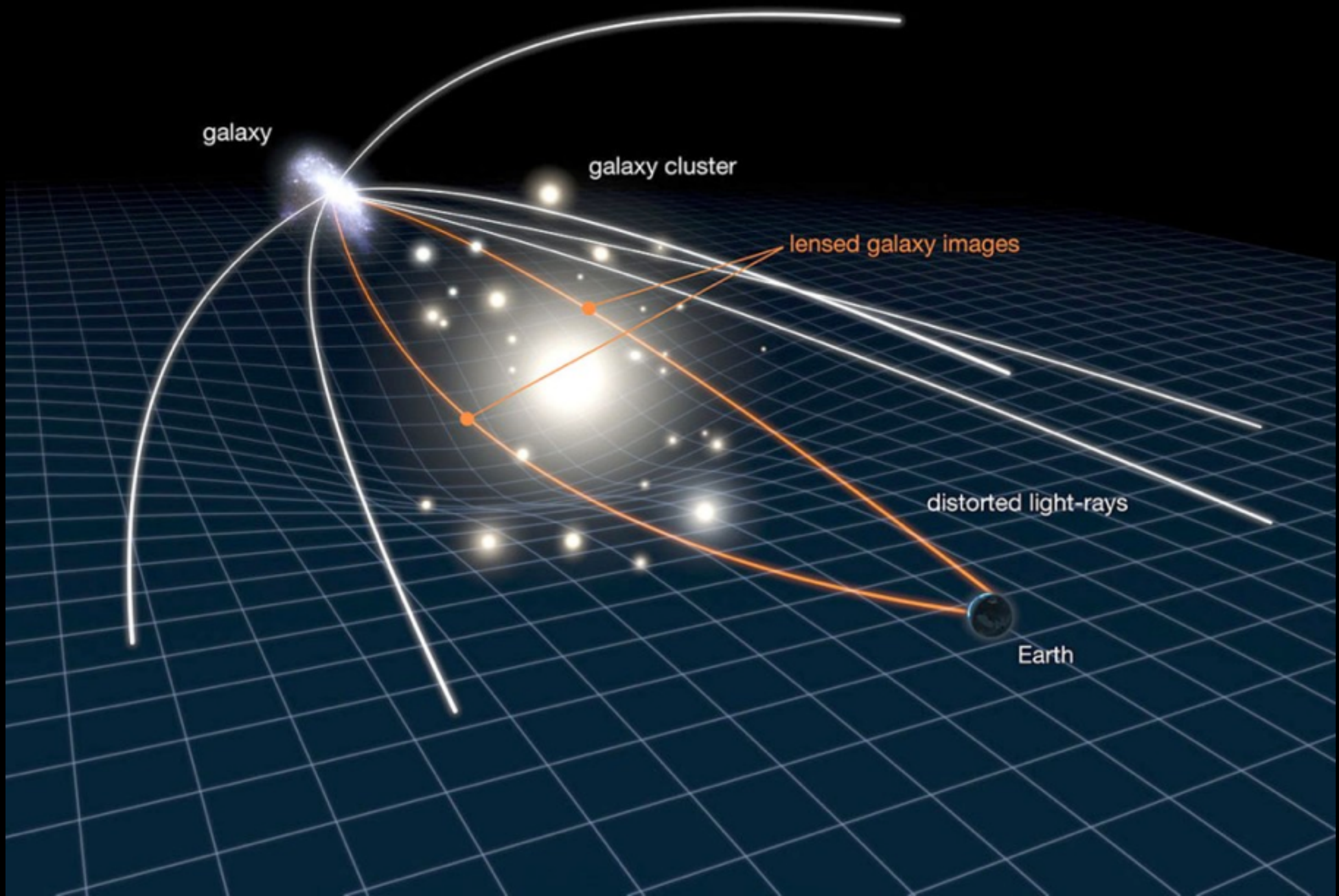
- As massas dos aglomerados podem ser estimadas através das observações de raios-X sob a hipótese de que há **equilíbrio hidrostático**

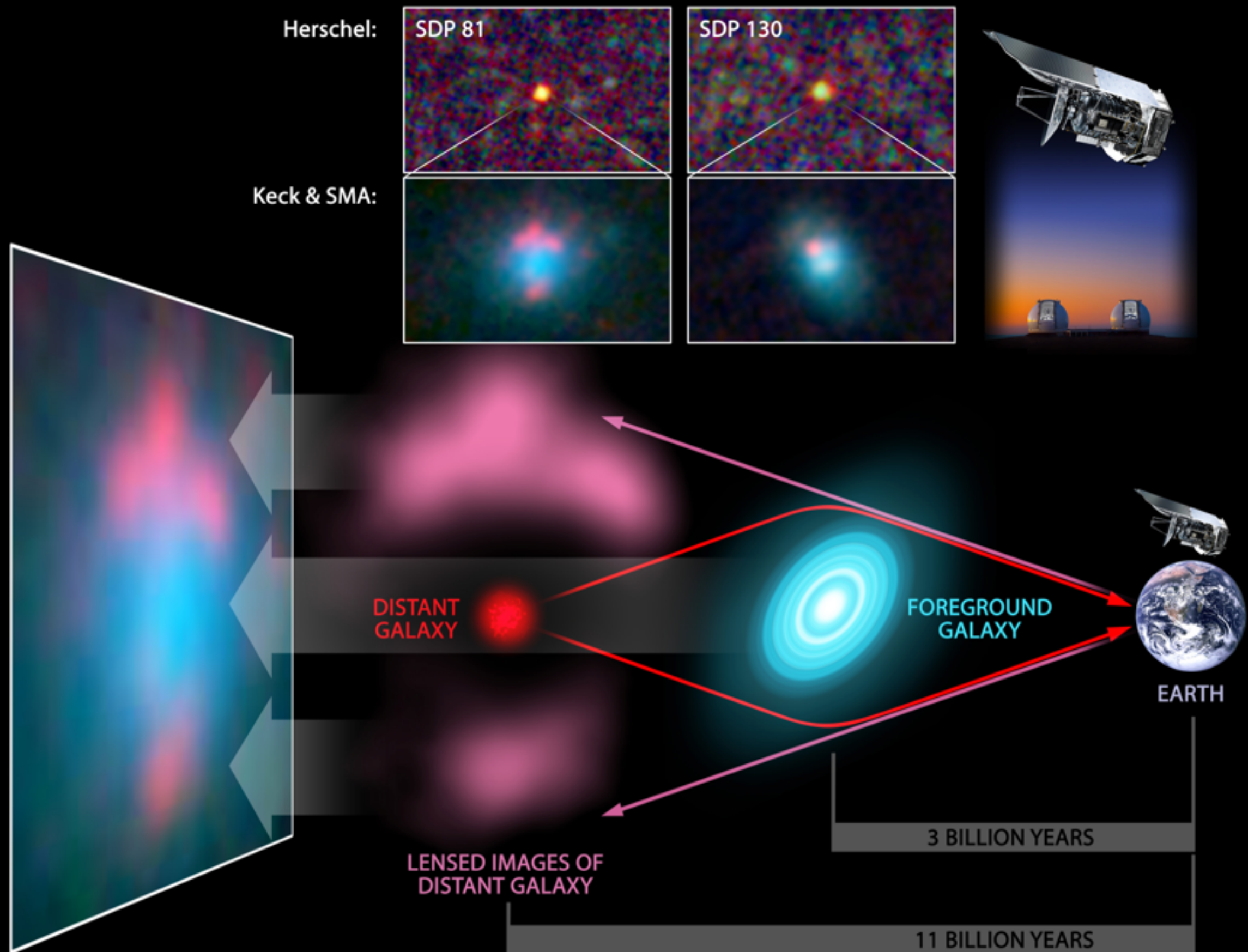
$$F_g \sim p \times A$$

$$\Rightarrow \frac{dp_{gas}}{dr} \sim \frac{G M_{tot}(r) \rho_{gas}(r)}{r^2}$$

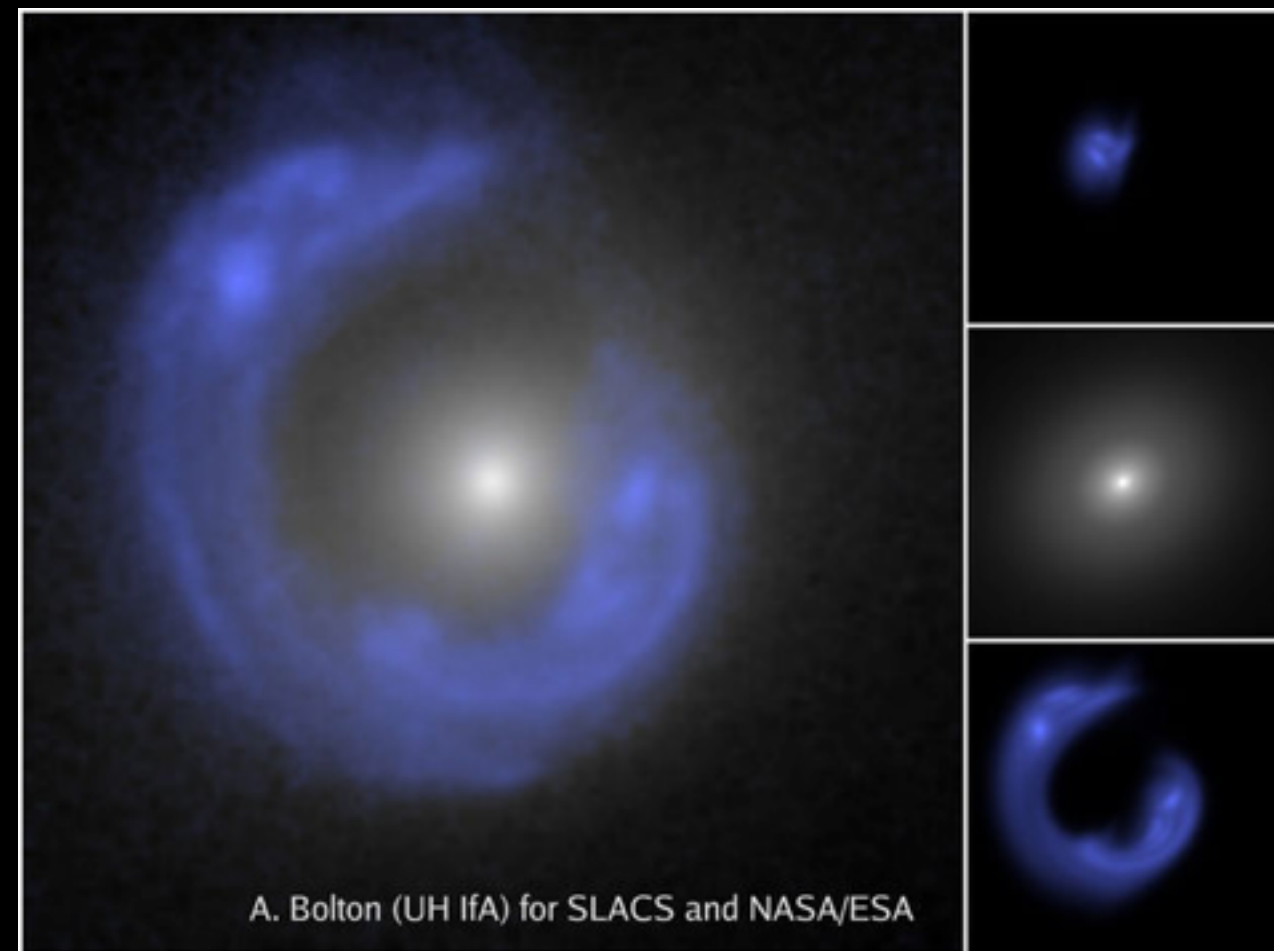
- Assim, as medidas da densidade, temperatura e pressão do gás como função do raio permitem fazer uma **estimativa da massa total** contida naquele raio, $M_{tot}(r)$!

- Também em paralelo, nos últimos anos os astrônomos passaram a estudar cada vez melhor o fenômeno das **lentes gravitacionais**





- O HST fez algumas imagens dramáticas desse fenômeno...



- Em todos os casos, a matéria necessária para gerar essas lentes gravitacionais é 5-10 vezes maior do que a matéria bariônica (átomos)

OK, vamos parar um pouco para pensar: o que poderia ser essa matéria “extra”, que não estamos sendo capaz de observar?

- Seriam barions (átomos) escuros — por exemplo, gás muito frio?

Não: 1) a **nucleossíntese primordial** e a **radiação cósmica de fundo** dizem muito claramente que os barions têm $\Omega_b \sim 0.04$; 2) gás frio não **emite** radiação, mas ele **absorve** radiação, e não há nenhuma evidência desse gás

- Seriam partículas tais como neutrinos?

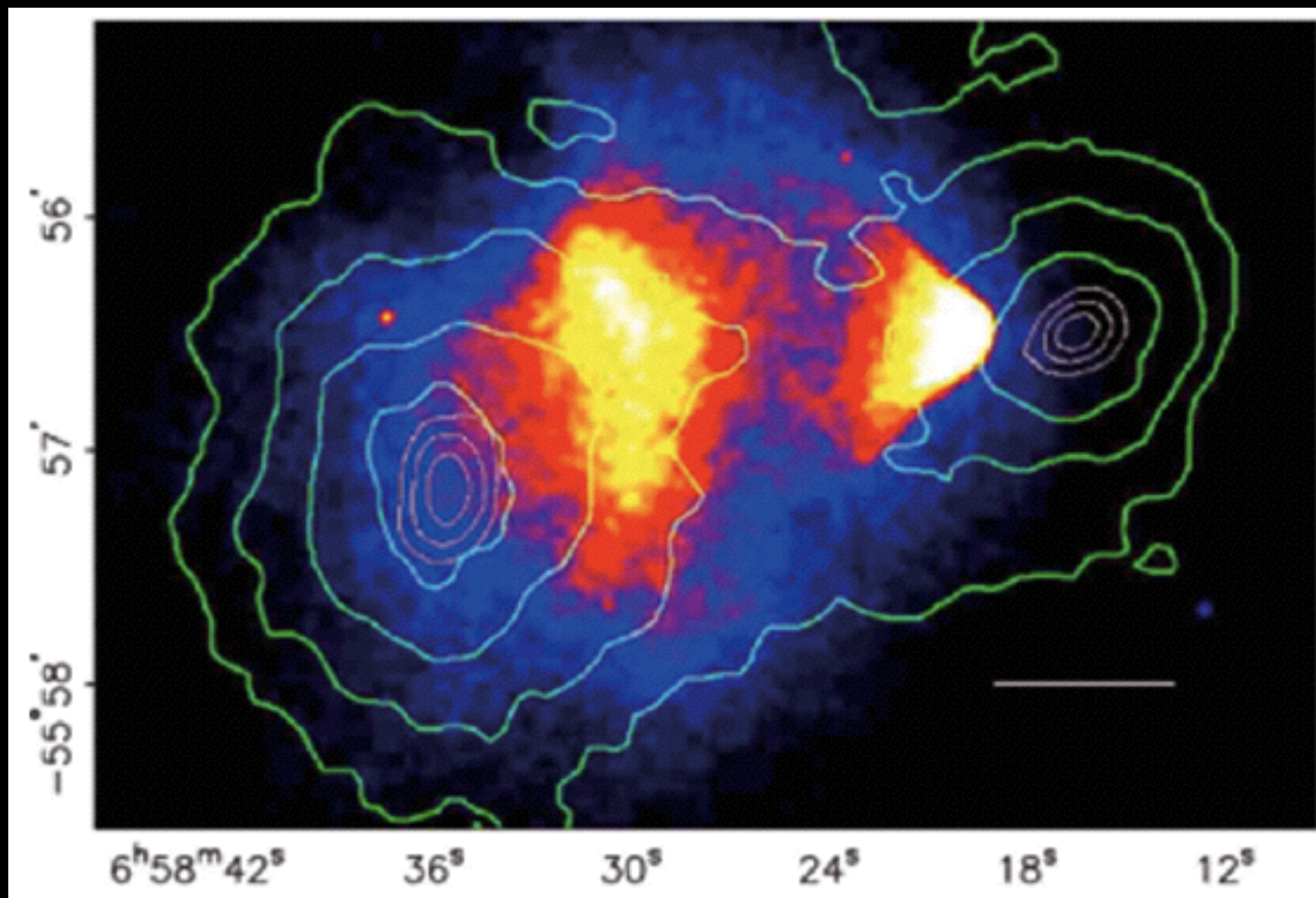
Não: neutrinos são basicamente relativísticos, e partículas “quentes”, elas não ficam ligadas a galáxias e/ou aglomerados de galáxias. Portanto neutrinos não poderiam aumentar essas massas.

- Seriam partículas de algum outro tipo, massivas (e não relativísticas), mas tais que elas não possuem interações eletromagnéticas ou nucleares — talvez possam ter interações nucleares fracas?

Pode ser... Essa opção é chamada matéria escura fria. As partículas com interações fracas são chamadas de WIMPs — Weakly Interacting Massive Particles

- Mas não seria o caso de que, na verdade, a **Lei da Gravidade**, que estamos sempre assumindo ser a Relatividade Geral de Einstein, **está errada???**...

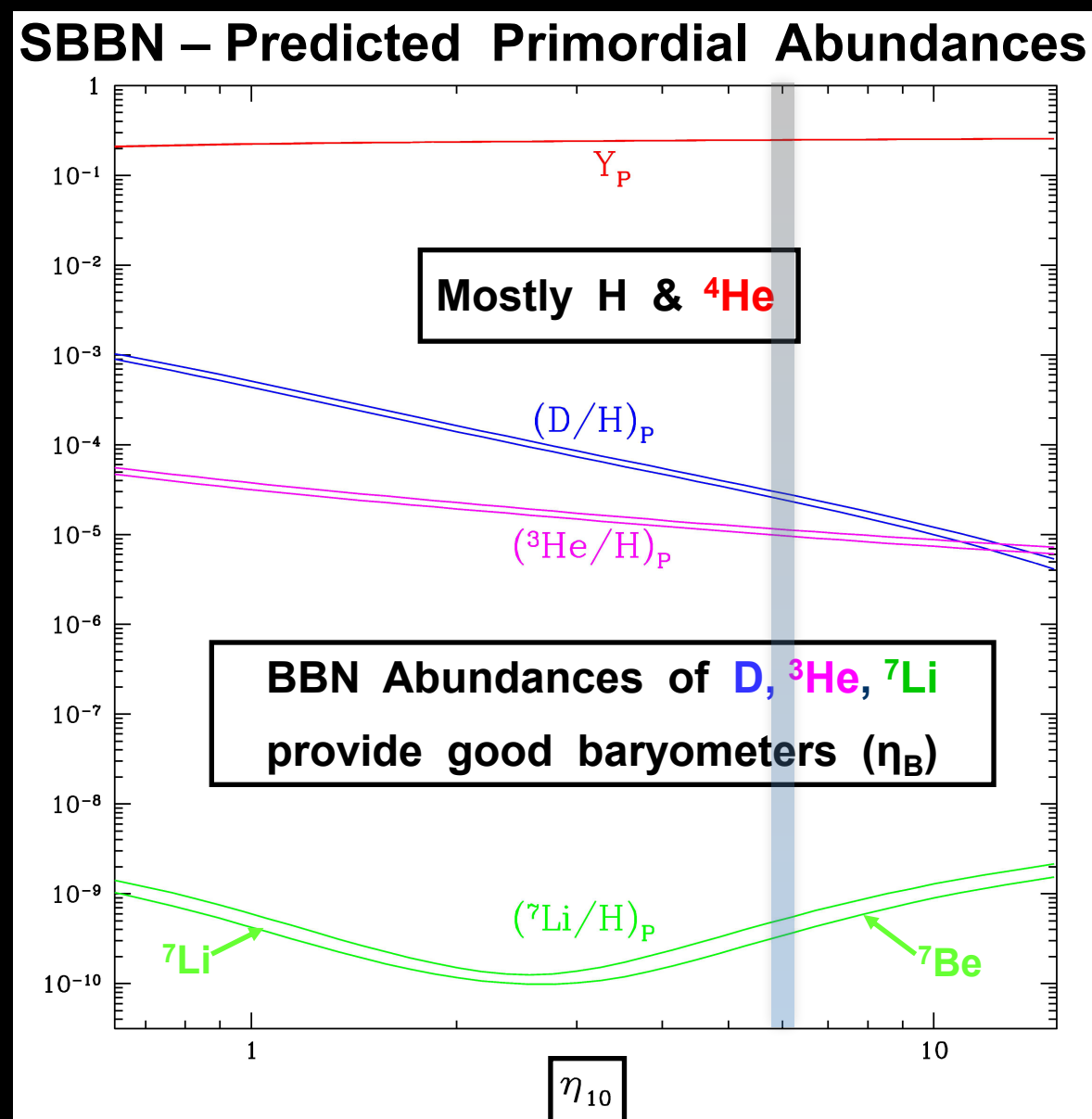
- Todo mundo junto agora: o **Bullet Cluster**

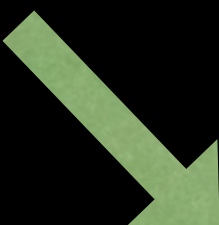


Introdução à Cosmologia Física – Aula 12

Moral da história:

O universo tem de 5-10 vezes mais matéria total do que matéria bariônica.
Essa matéria "extra" é escura e não-bariônica!




$$\Omega_B h^2 = 0.0221 \pm 0.0003 \quad \Rightarrow \quad \eta_{10} = 274 \Omega_B h^2 = 6.05 \pm 0.08$$