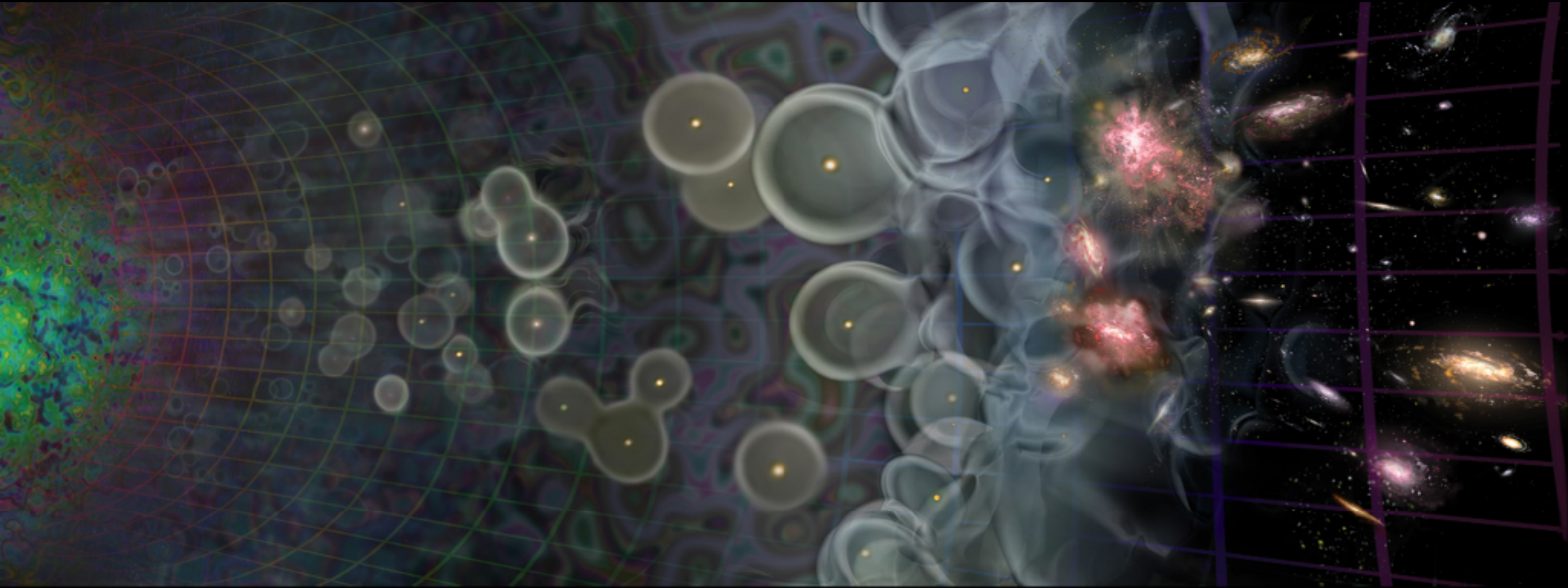


Introdução à Cosmologia Física

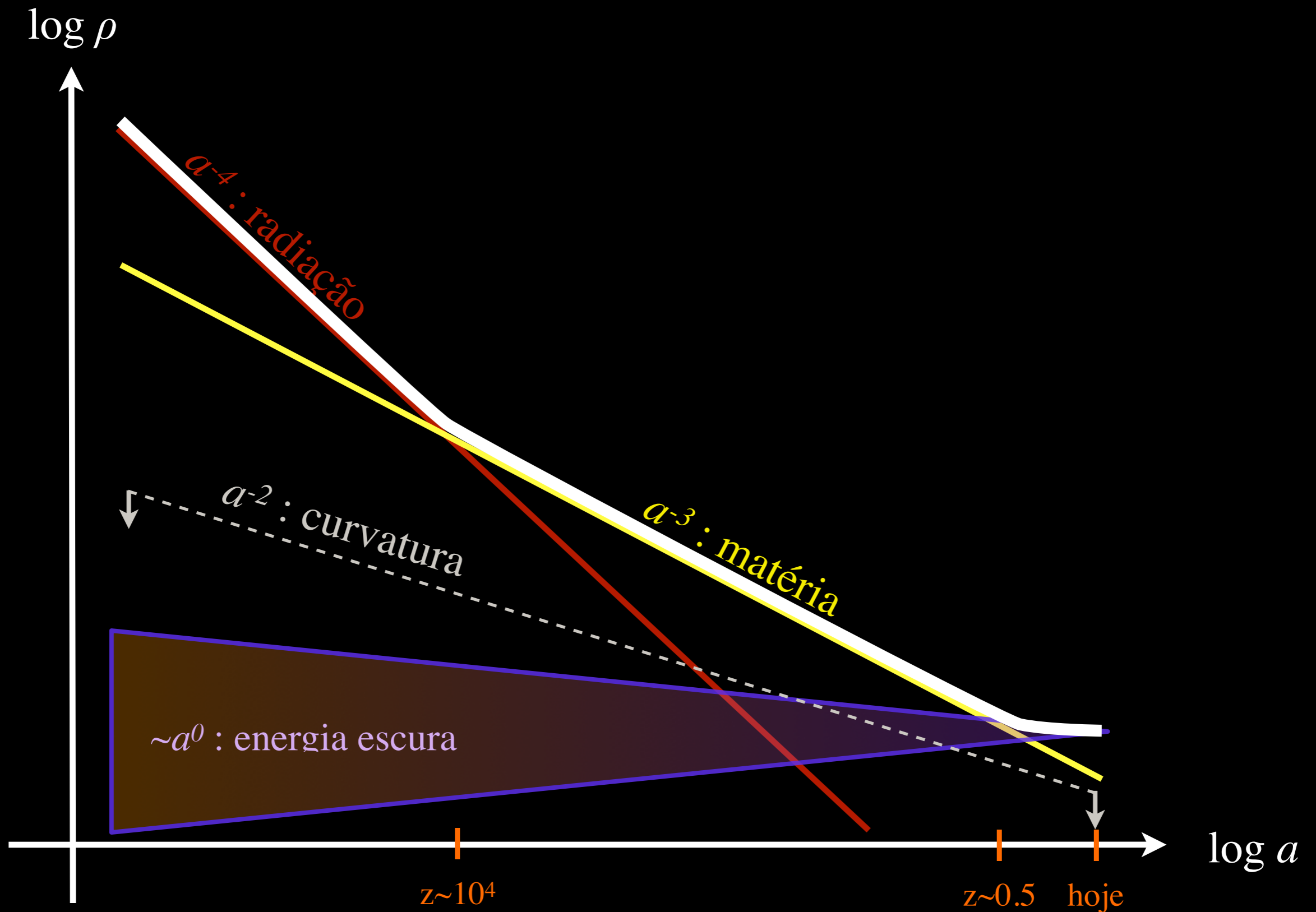


4 - Matéria Escura

- * 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



Introdução à Cosmologia Física

Números úteis

- Idade do universo 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: $H_0 = 100 h \text{ Km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
 $h = 0.67 - 0.74$
- Barions (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 (barions + escura): $\Omega_m = 0.31 \pm 0.02$
- Curvatura $|\Omega_k| < 0.01$

Introdução à Cosmologia Física

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

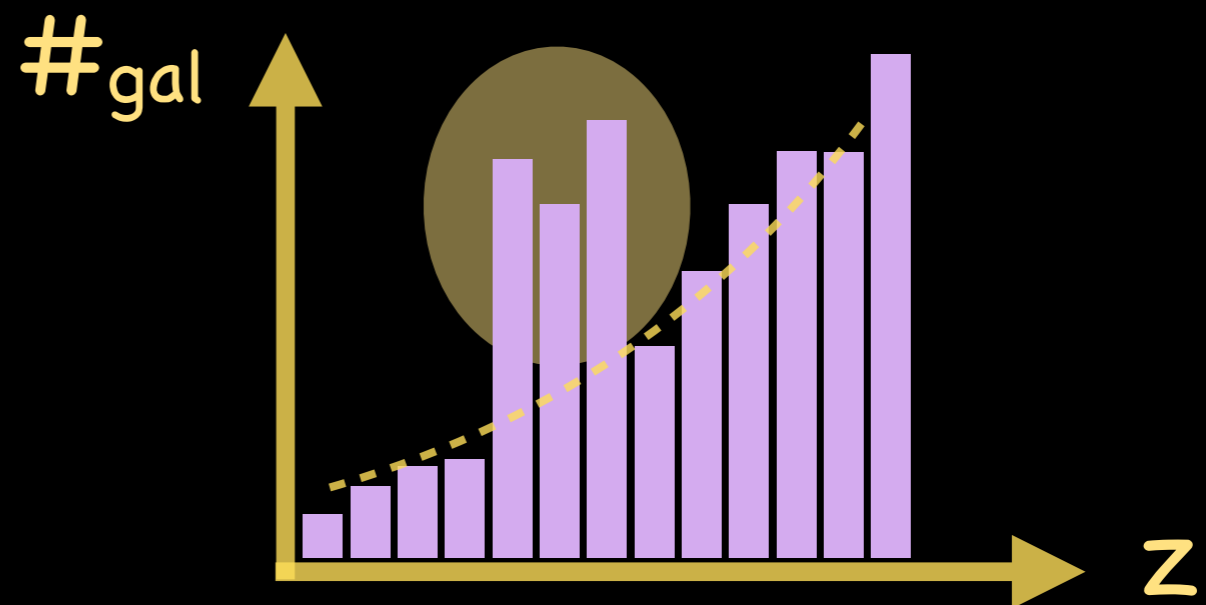
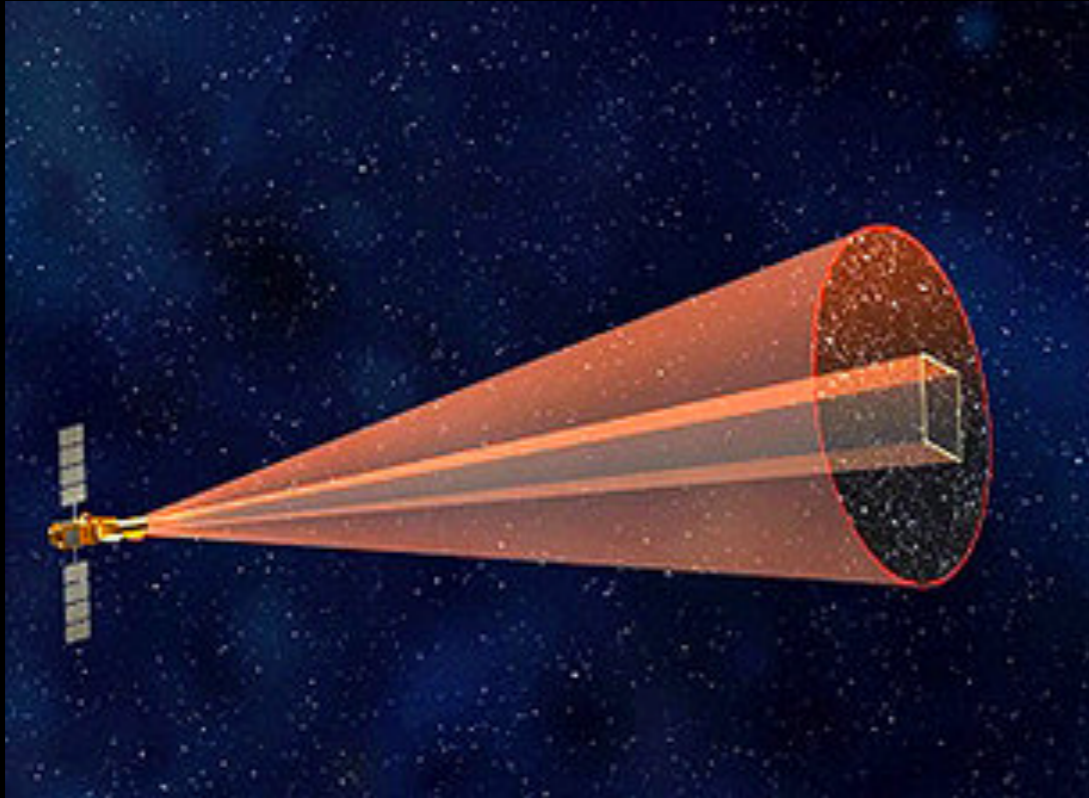
Como pode ser que a matéria total é bem maior que a matéria bariônica (átomos)?

Onde está toda essa matéria no universo?

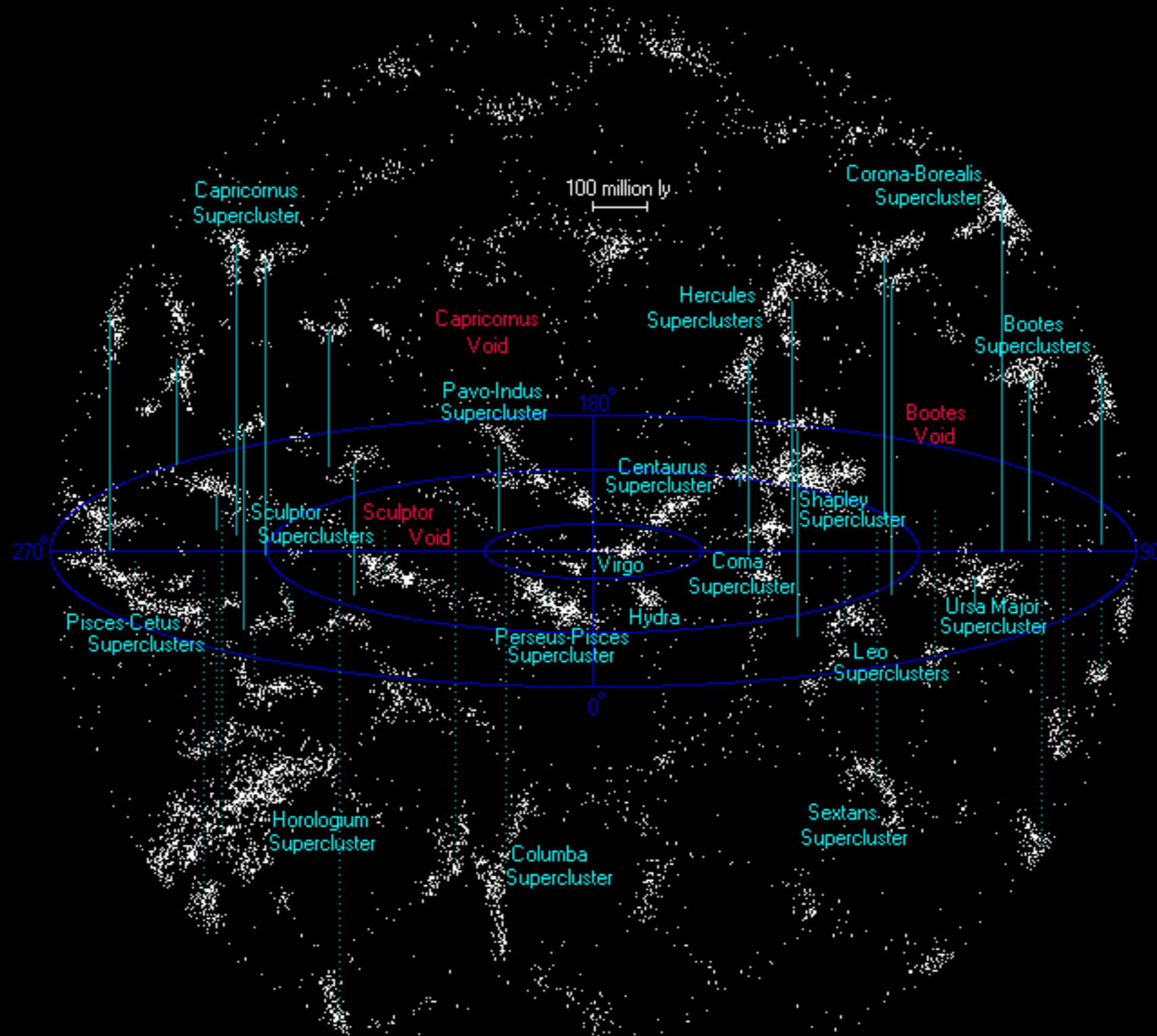
O que é essa matéria?

Uma novelinha em 5 capítulos

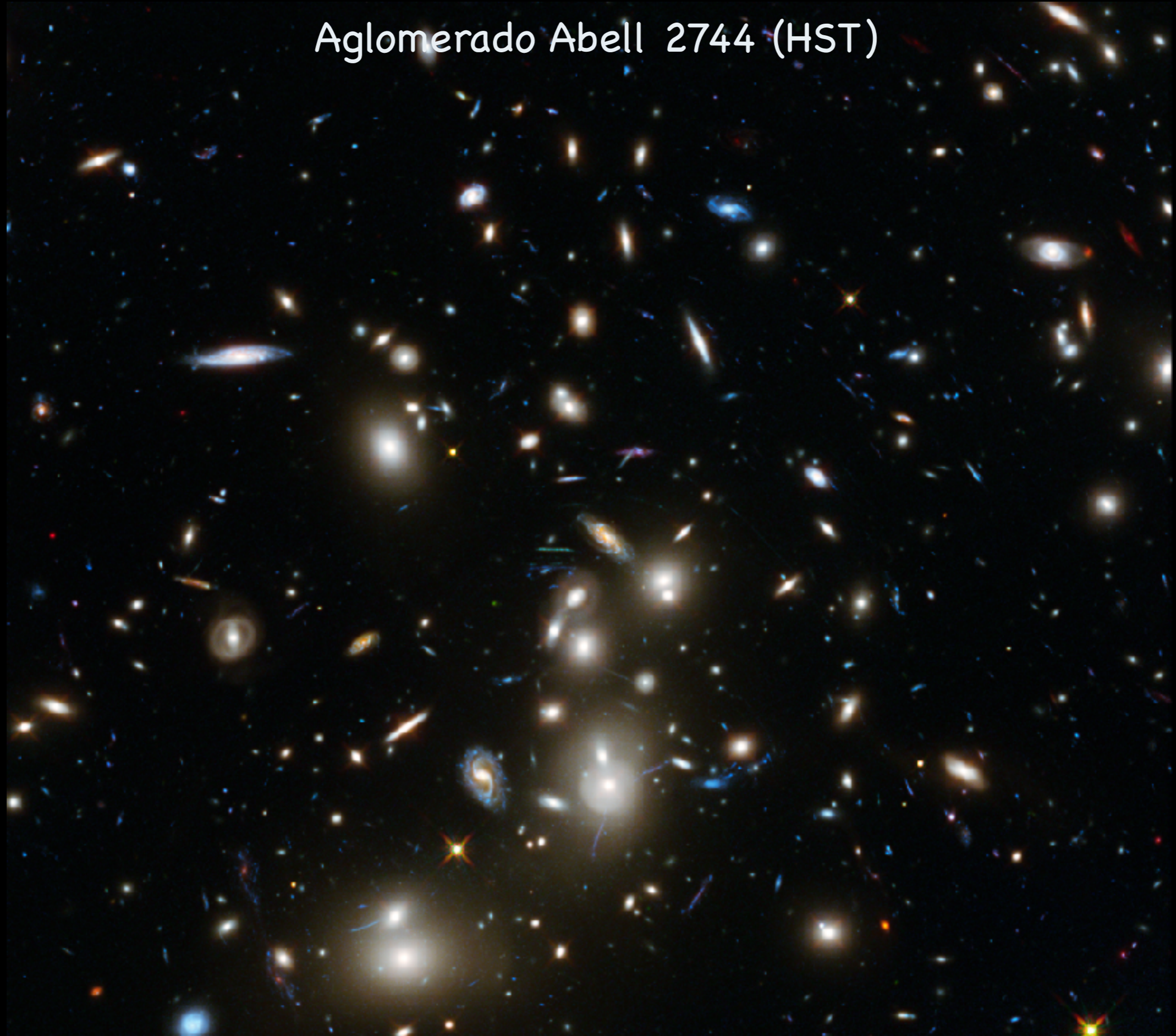
- Por volta de 1935, o astrônomo Fritz Zwicky começou a observar grupos e aglomerados de galáxias.



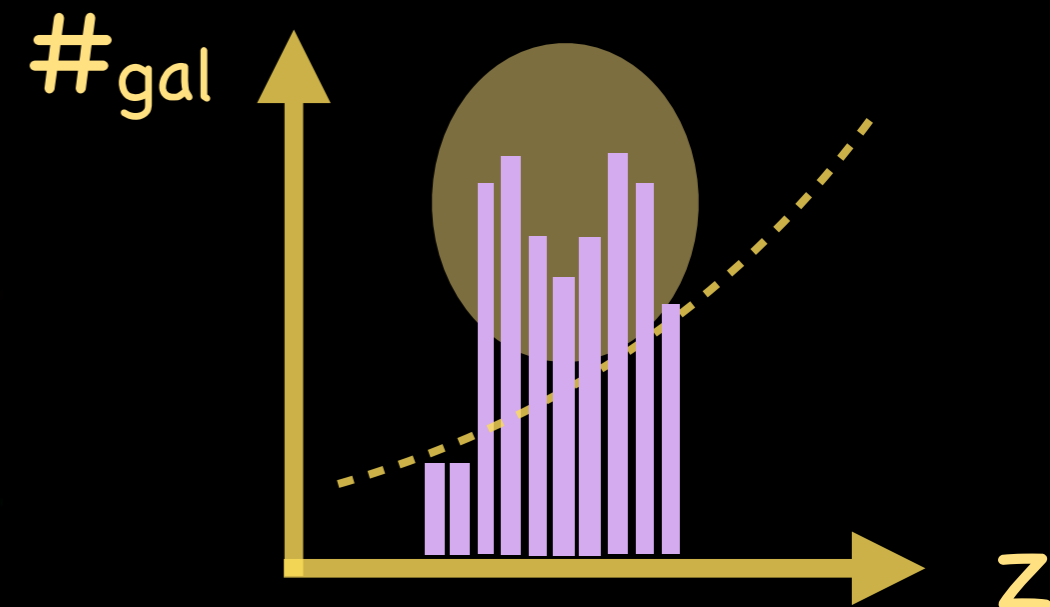
- Aglomerados e super-aglomerados em um raio de 1 bilhão de anos-luz



Aglomerado Abell 2744 (HST)

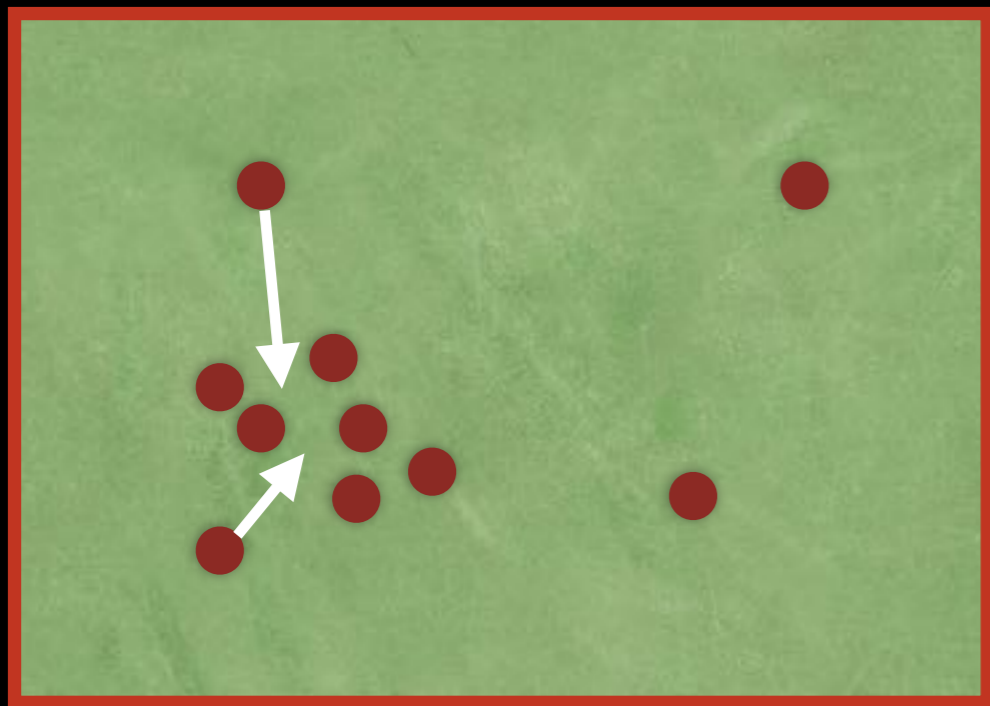


- Zwicky observou com muito cuidado vários aglomerados, em particular o **Aglomerado de Coma**
- Ele mediu os redshifts das galáxias do aglomerado, e descobriu algo muito curioso: as velocidades dessas eram muito altas!

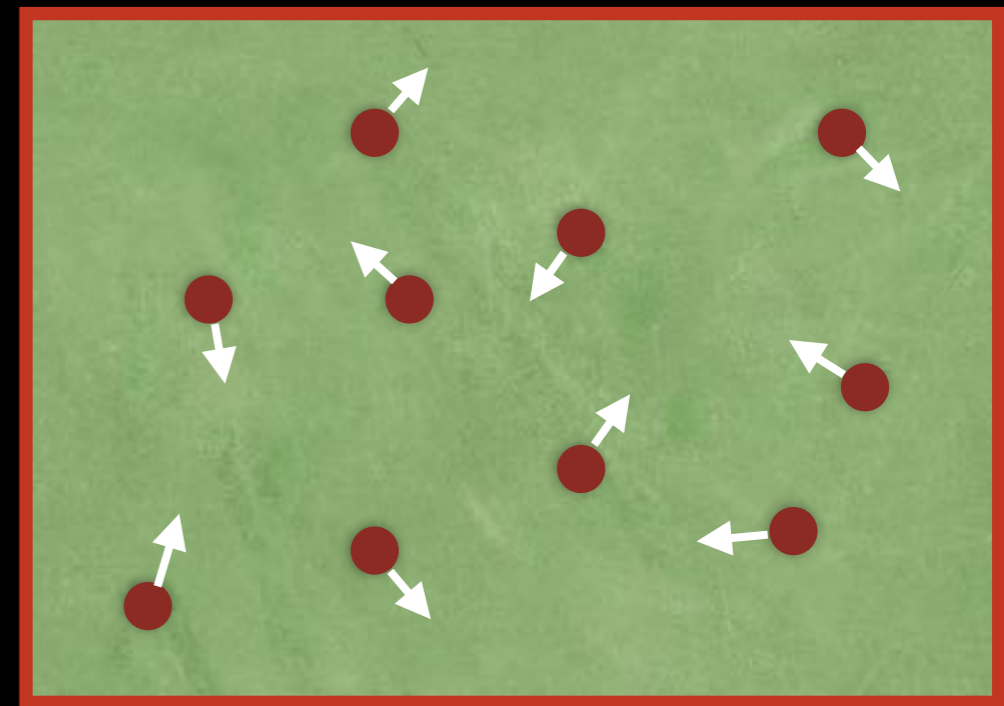


Introdução à Cosmologia Física

- Como assim "velocidades muito altas"?... Altas com relação a quê?...
- Teorema do Virial

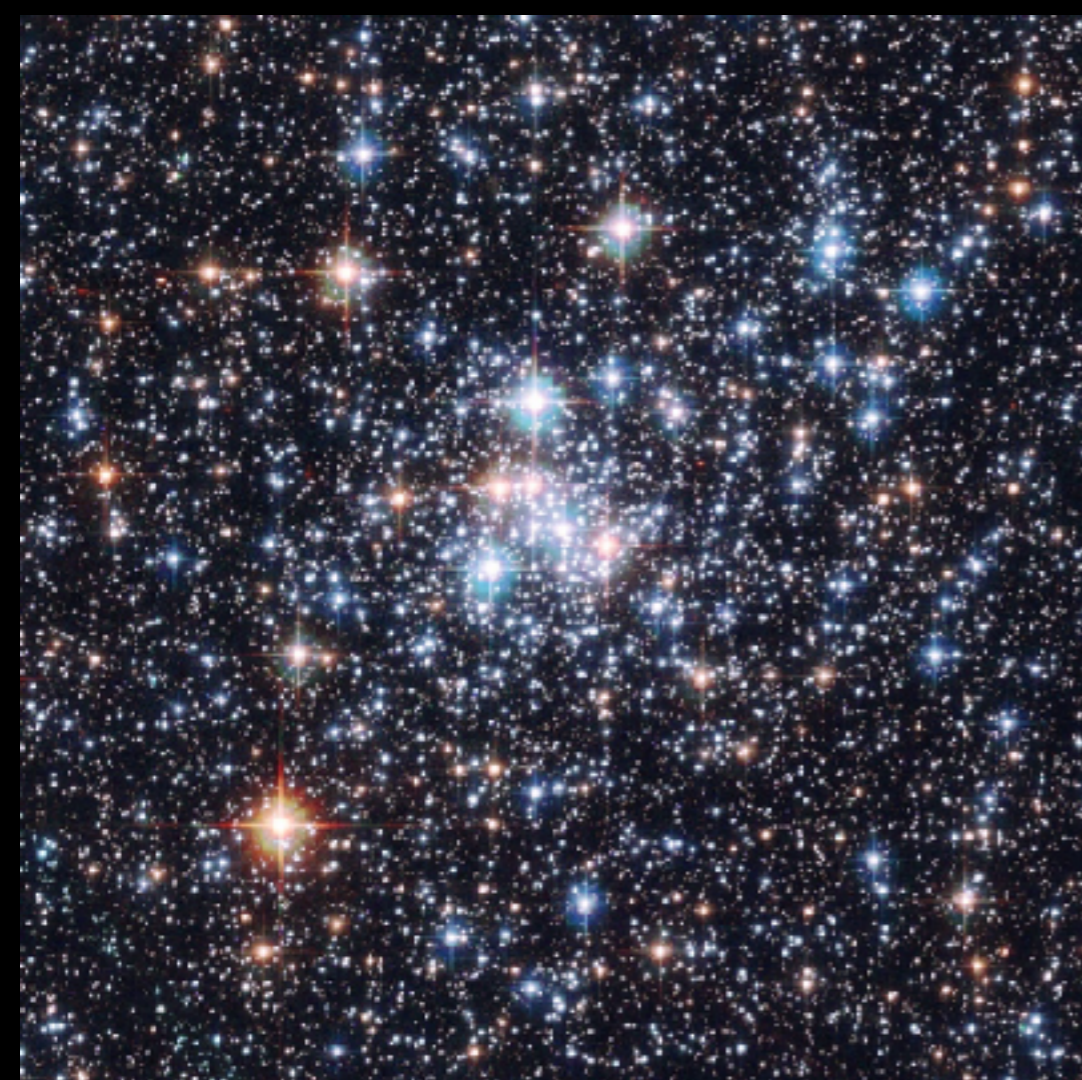


evolução p/
equilíbrio

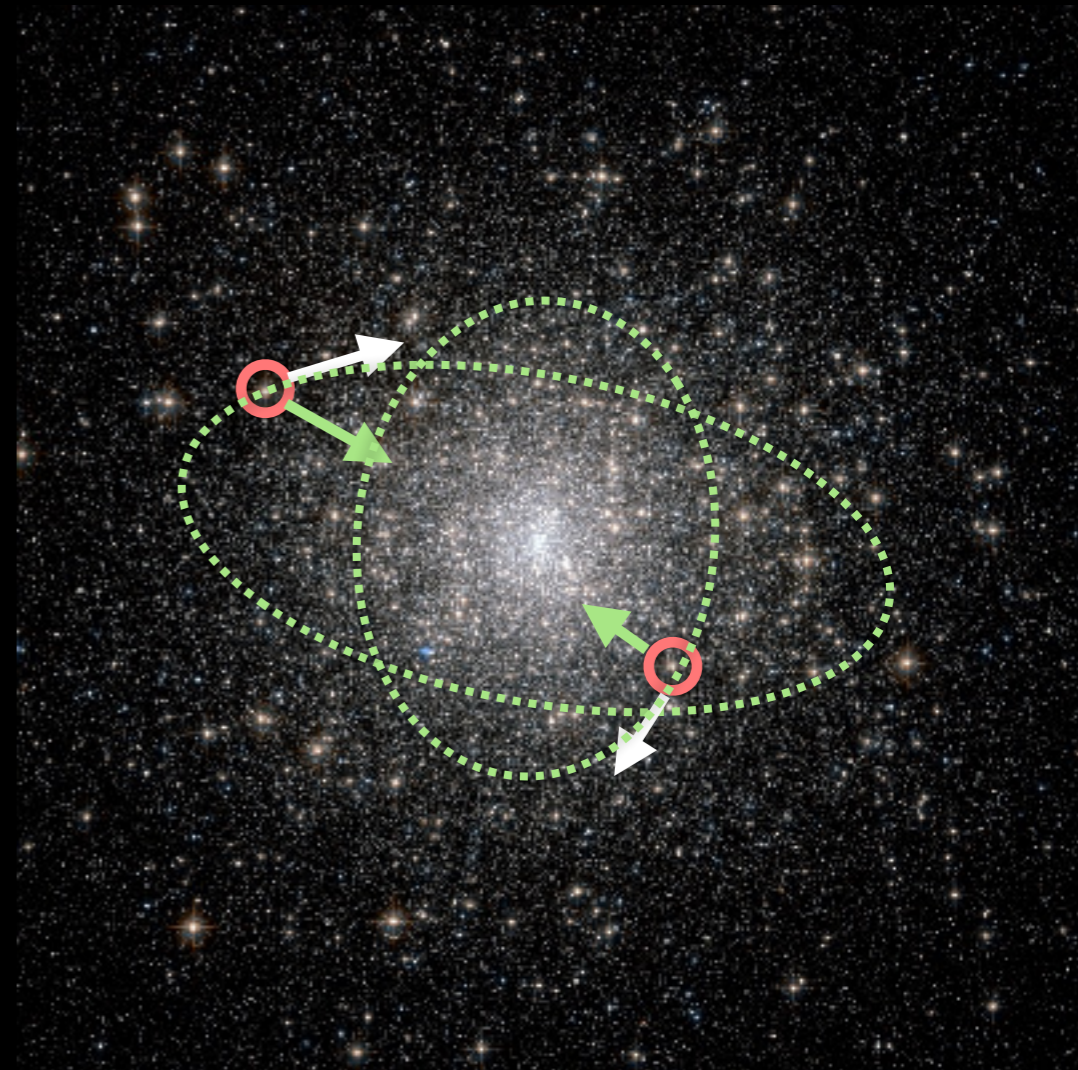


Introdução à Cosmologia Física

- Como assim "velocidades muito altas"?... Altas com relação a quê?...
- Teorema do Virial



evolução p/
equilíbrio



- Teorema do Virial

Vamos definir a seguinte quantidade (relacionada ao momento de inércia):

$$G \equiv \sum_i \vec{p}_i \cdot \vec{r}_i$$

Sua derivada com o tempo é:

$$\begin{aligned} \frac{dG}{dt} &= \sum_i \frac{d\vec{p}_i}{dt} \cdot \vec{r}_i + \sum_i \vec{p}_i \cdot \frac{d\vec{r}_i}{dt} = \sum_i \vec{F}_i \cdot \vec{r}_i + 2K \\ &\Rightarrow = \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} \vec{F}_{ji} \cdot (\vec{r}_i - \vec{r}_j) + 2K \end{aligned}$$

Se G não varia, isso significa que **na média**, é como se as partículas estivessem em órbitas, já que $\vec{p} \perp \vec{r}$.

- Teorema do Virial

Vamos assumir então que G é constante, portanto:

$$\frac{dG}{dt} = 0 = \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} \vec{F}_{ji} \cdot \vec{r}_{ij} + 2K$$

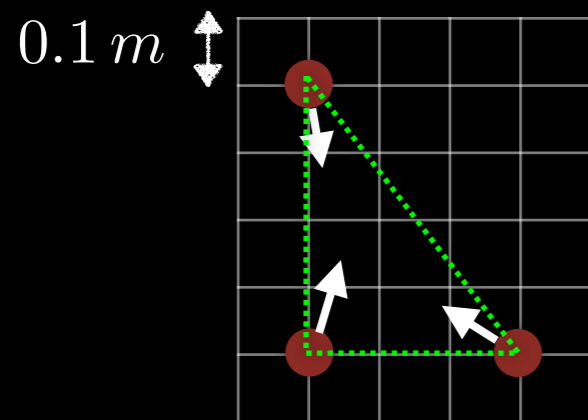
Agora, note que:

$$\vec{F}_{ji} = -\vec{\nabla}\Phi = -G m_i m_j \frac{\vec{r}_{ij}}{r_{ij}^3}$$

Portanto, obtemos que:

$$\Rightarrow K = \frac{1}{2} \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} \frac{G m_i m_j}{r_{ij}} = -\frac{1}{2}V$$

- Exercício simples:



$$M_1 = M_2 = M_3 = M$$

$$\vec{v}_1 = (1 \hat{x} - 3 \hat{y}) m s^{-1}$$

$$\vec{v}_2 = (2 \hat{x} + 5 \hat{y}) m s^{-1}$$

$$\vec{v}_3 = (-3 \hat{x} + 2 \hat{y}) m s^{-1}$$

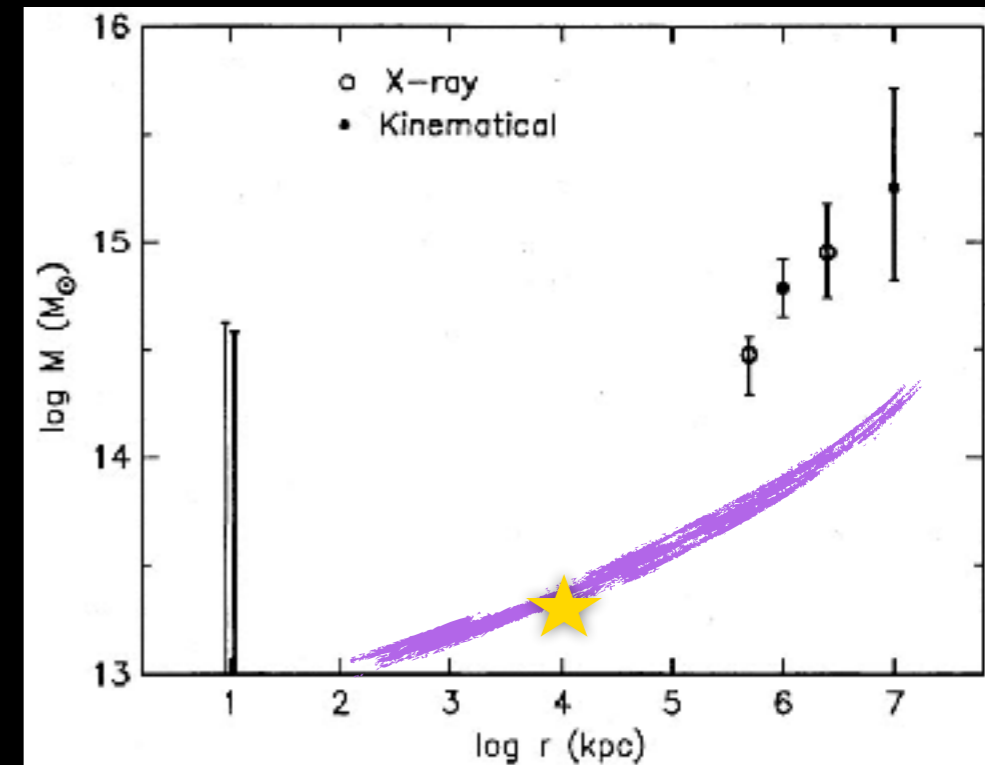
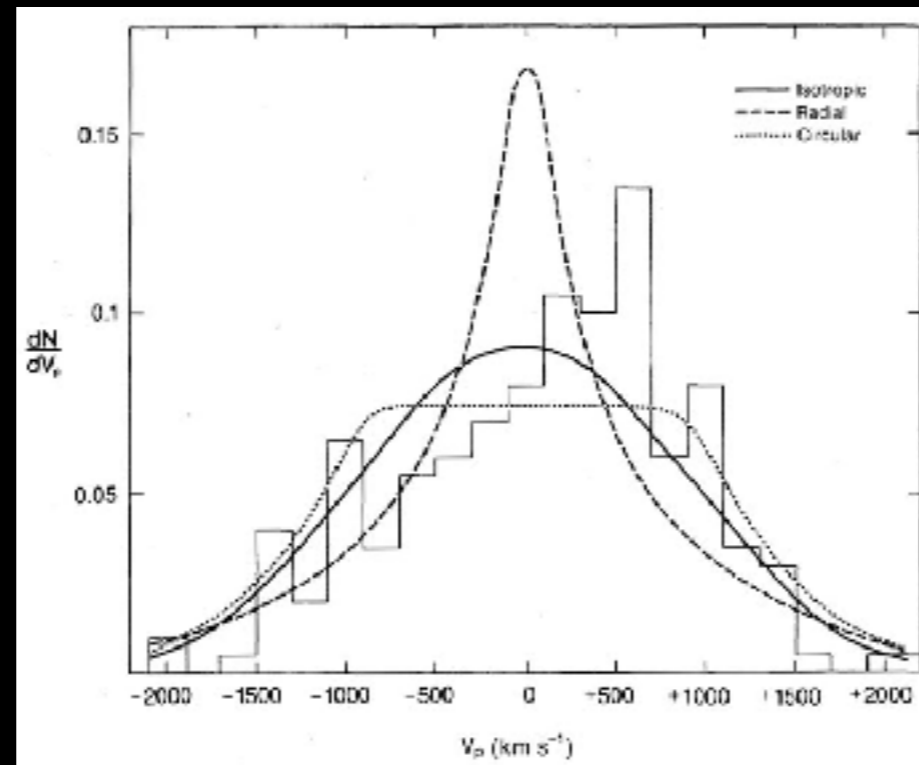
Potencial da força entre as partículas (em CGS): $V_i(r_{ij}) = -60 [M m^3 s^{-2}] \frac{M_i/M}{r_{ij}}$

$$K = \frac{M}{2} \times (10 + 29 + 13) m^2 s^{-2} = 26 M m^2 s^{-2}$$

$$V = -60 \left(\frac{1}{0.3} + \frac{1}{0.4} + \frac{1}{0.5} \right) M m^2 s^{-2} = -47 M m^2 s^{-2}$$

Neste caso, portanto, temos que $K = -0.553 V$ — ou seja, próximo de $K = -0.5 V$!

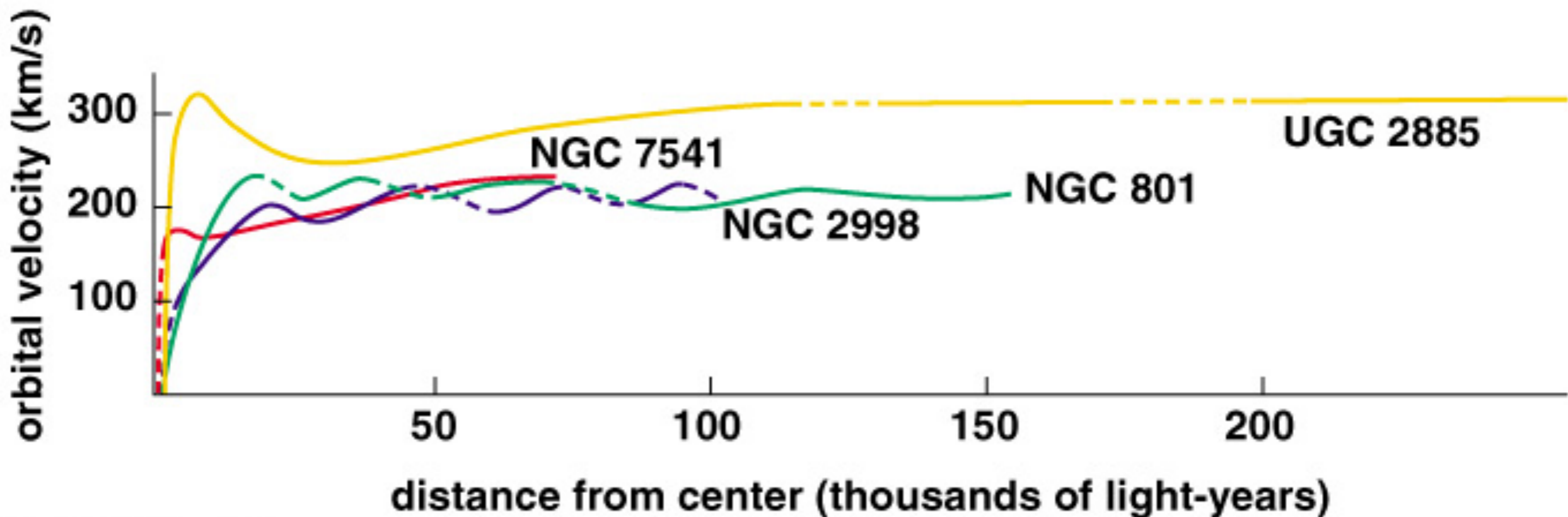
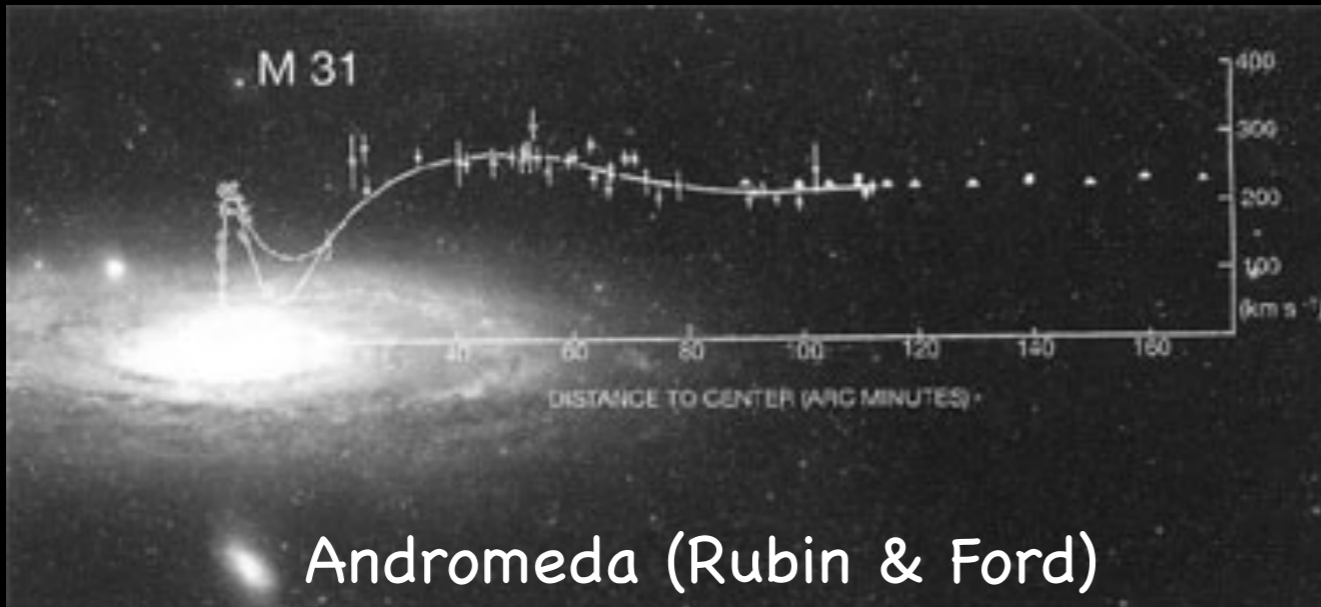
- Através das velocidades (i.e., energia cinética) podemos estimar a massa total do sistema (i.e., energia potencial gravitacional), assumindo o T. Virial (i.e., equilíbrio)



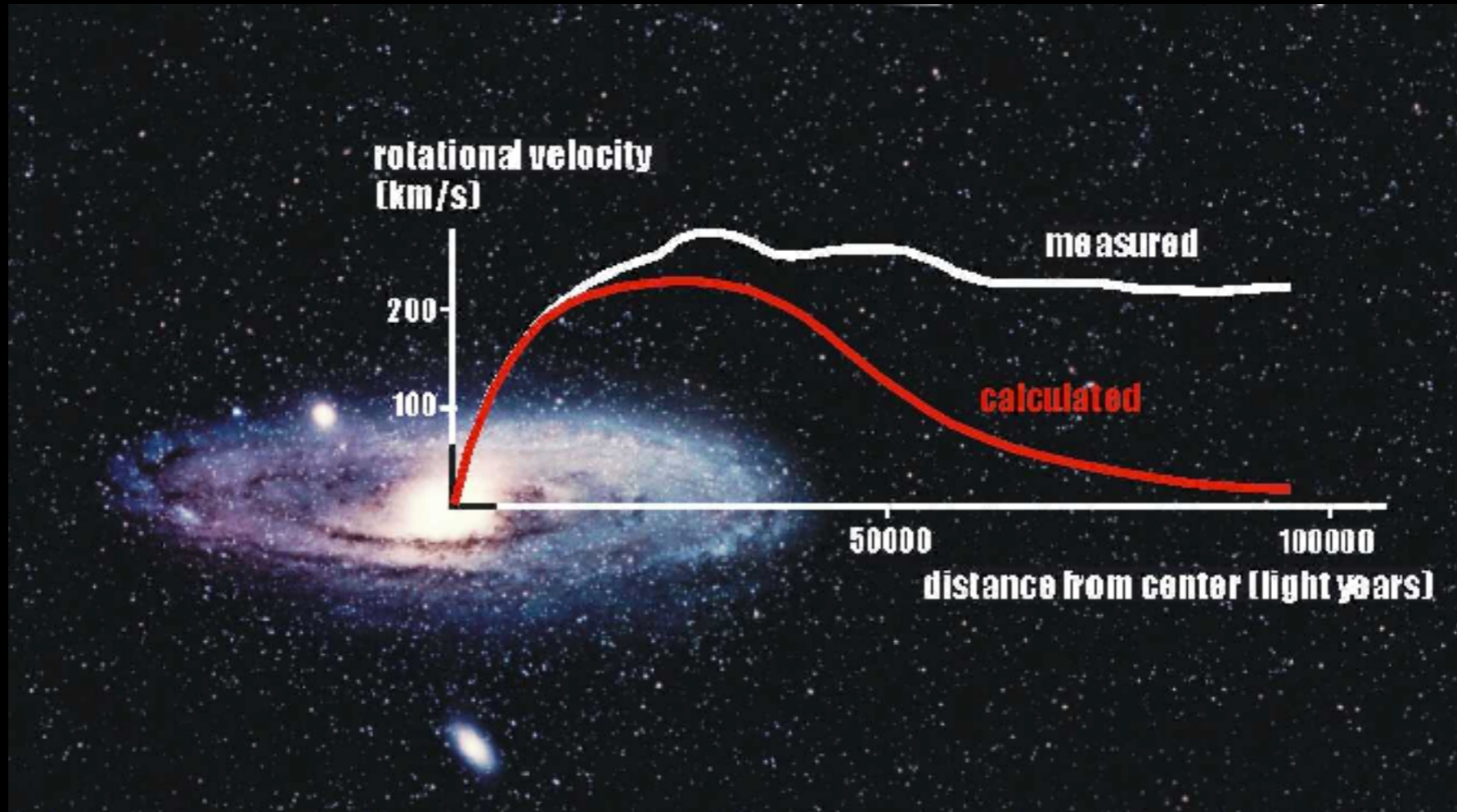
Aglomerado de Coma [Merritt, Ap. J. 313, 121 (1987)]

- 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.



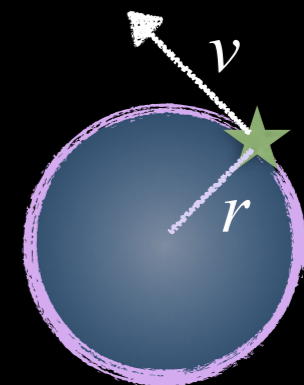
- Ali, verificou-se a mesma história: as regiões mais externas das galáxias pareciam girar muito mais rápido do que o permitido pela força da gravidade gerada pelas estrelas e gás daquelas galáxias ("Lei de Kepler")!



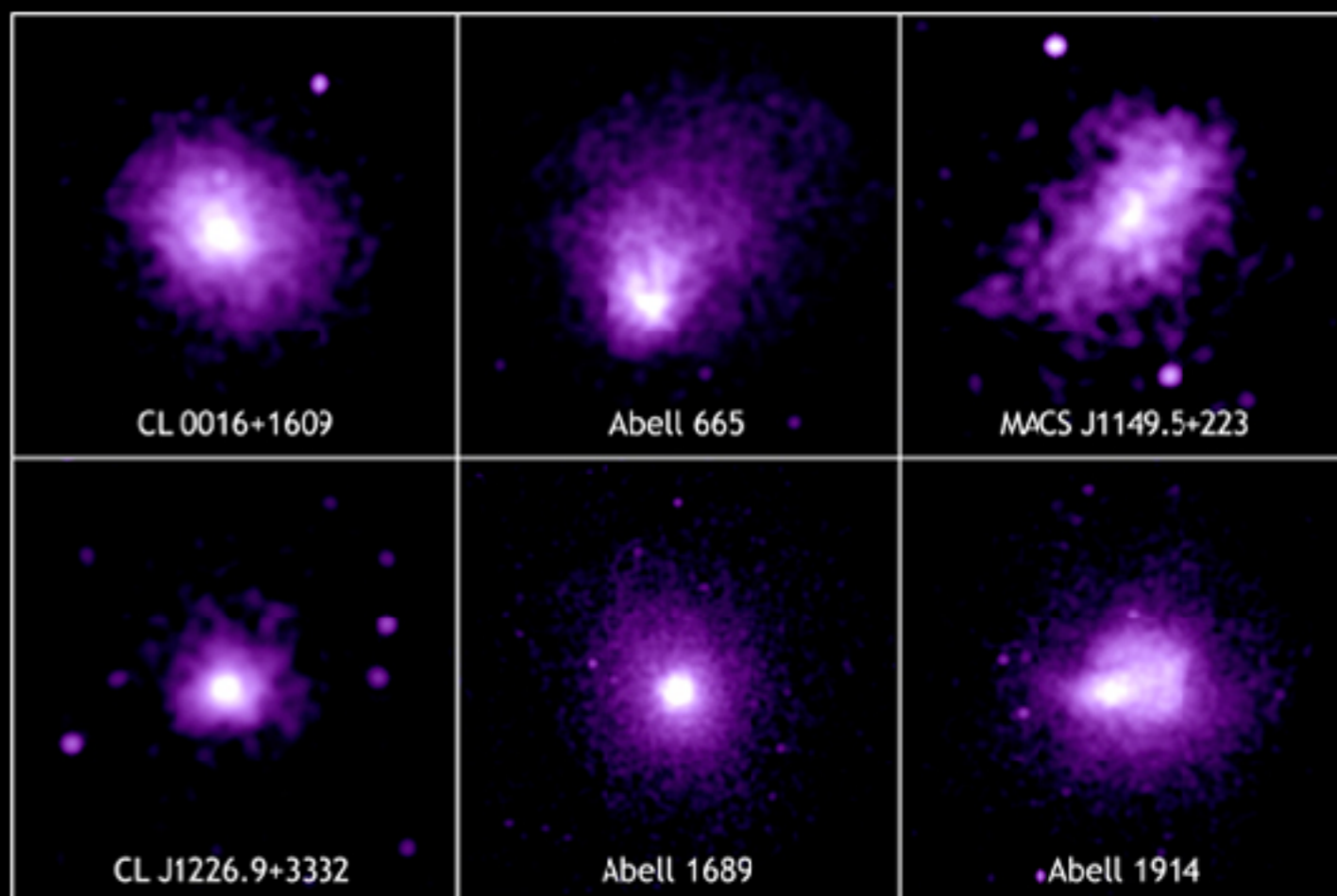
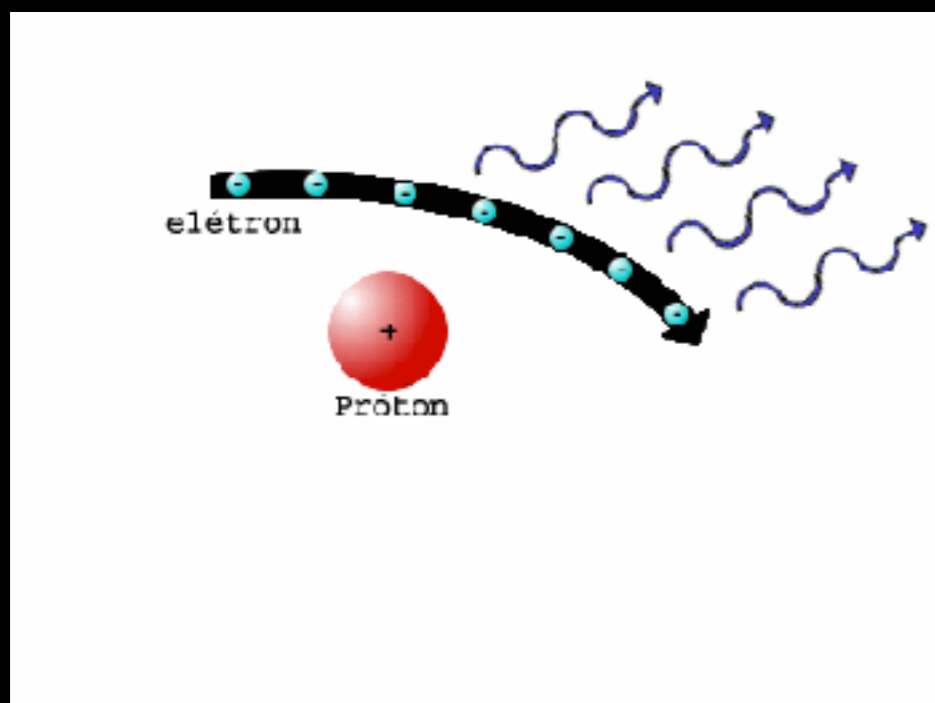
Órbita "Kepleriana":

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

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

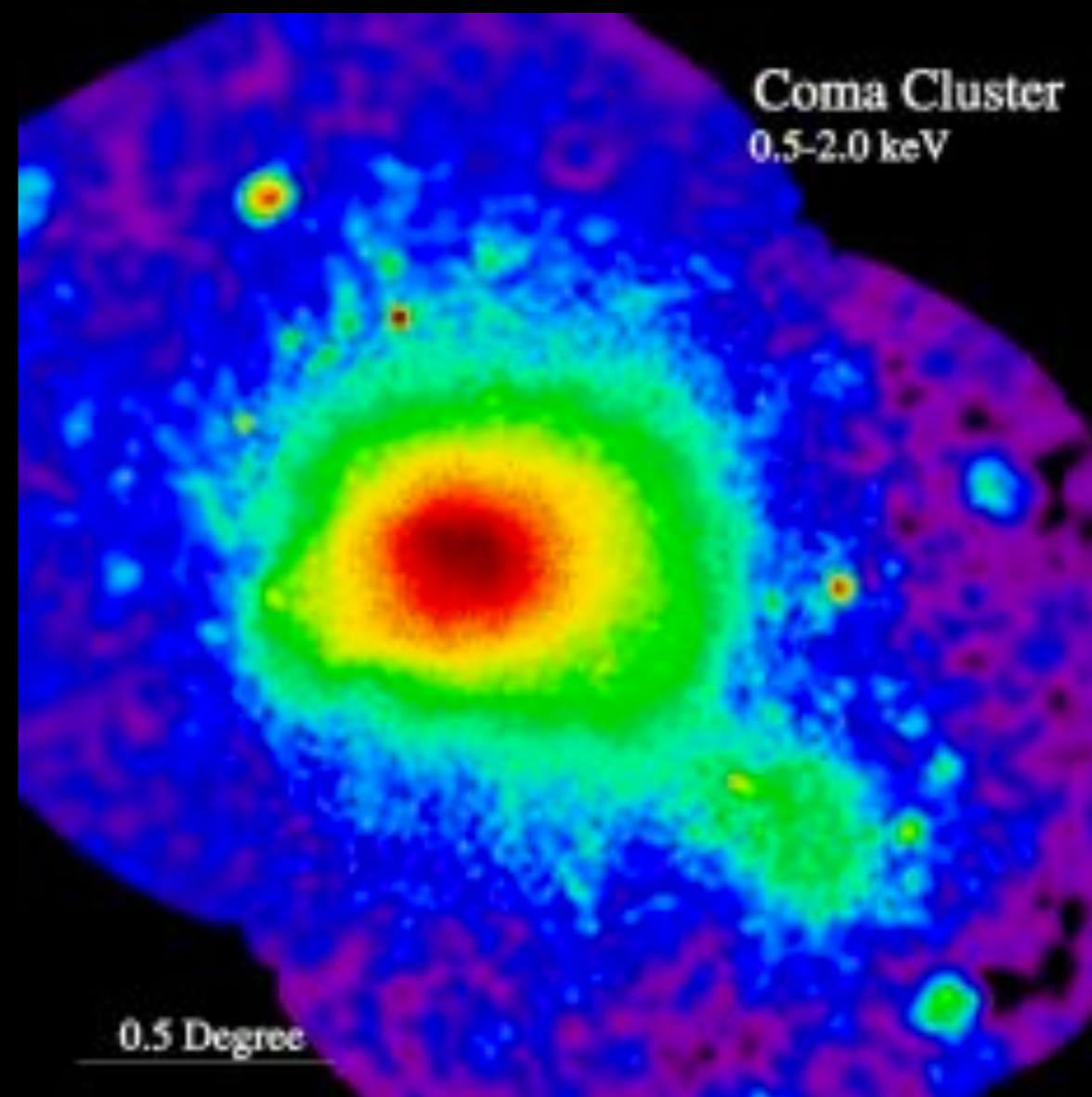
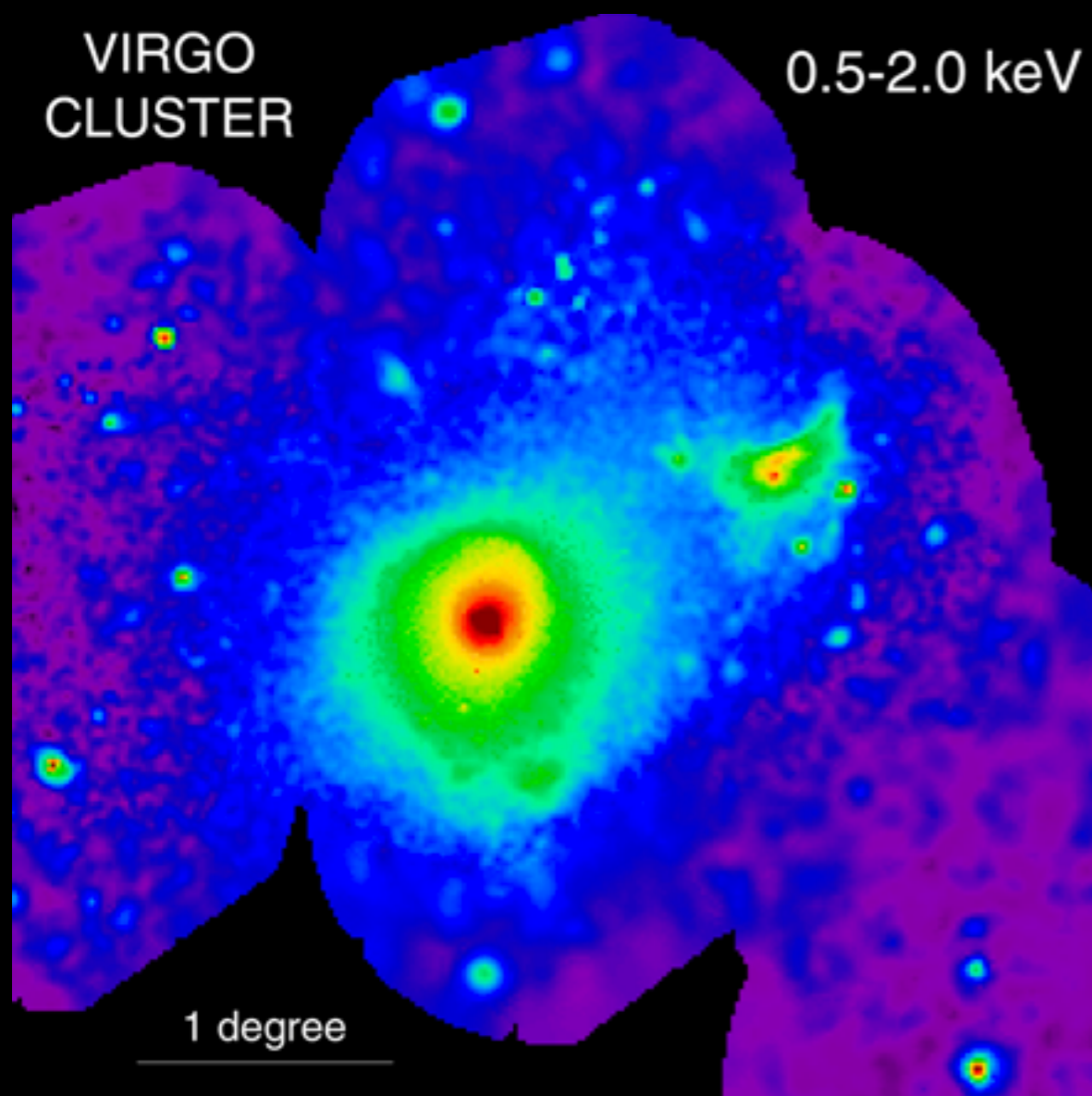


- Independente de Zwicky e Rubin, a partir dos anos 1990 (Chandra, XMM, ROSAT, etc.) começamos a observar aglomerados de galáxias através de **raios-X**
- Em aglomerados de galáxias há uma grande quantidade de **gás ionizado**, a uma temperatura de 10^7 – 10^8 K (1–10 KeV)
- Esse gás (que contém a maior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

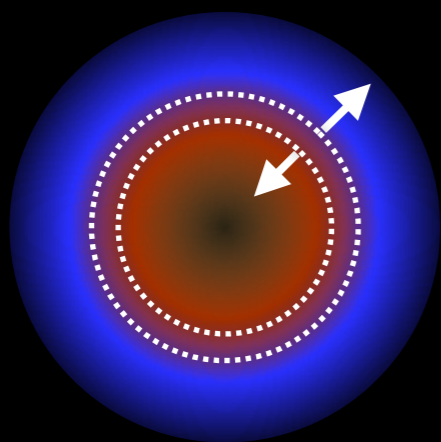


Chandra

- 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**



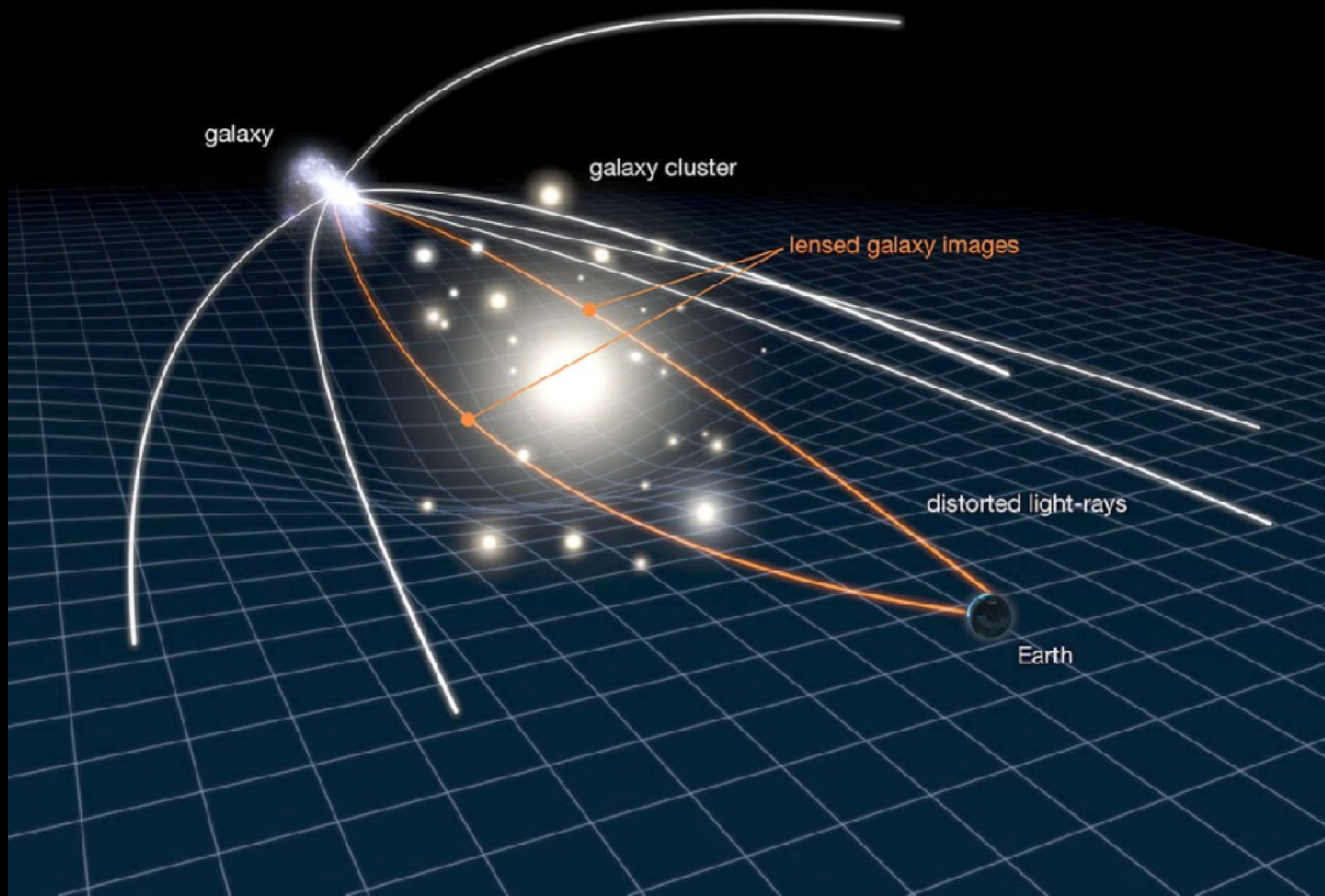
$$P_{baixo} \times A(r) - P_{cima} \times A(r) - \frac{GM(r)}{r^2} \rho_{gas}(r) dV(r) = 0$$

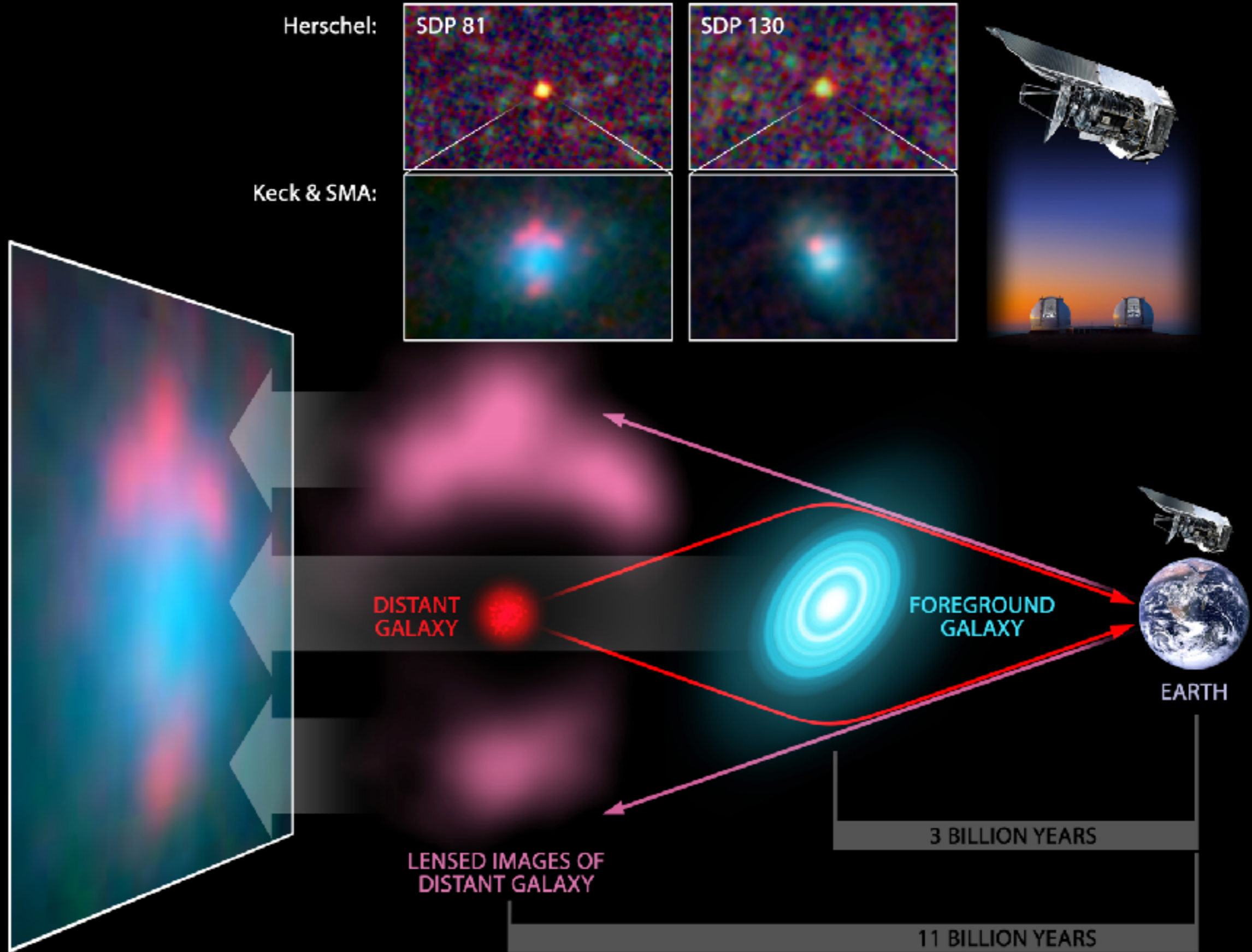
$$dP \times 4\pi r^2 - \frac{GM(r)\rho_{gas}(r)}{r^2} 4\pi r^2 dr = 0$$

$$\frac{dP_{gas}}{dr} = -\frac{GM(r)\rho_{gas}(r)}{r^2}$$

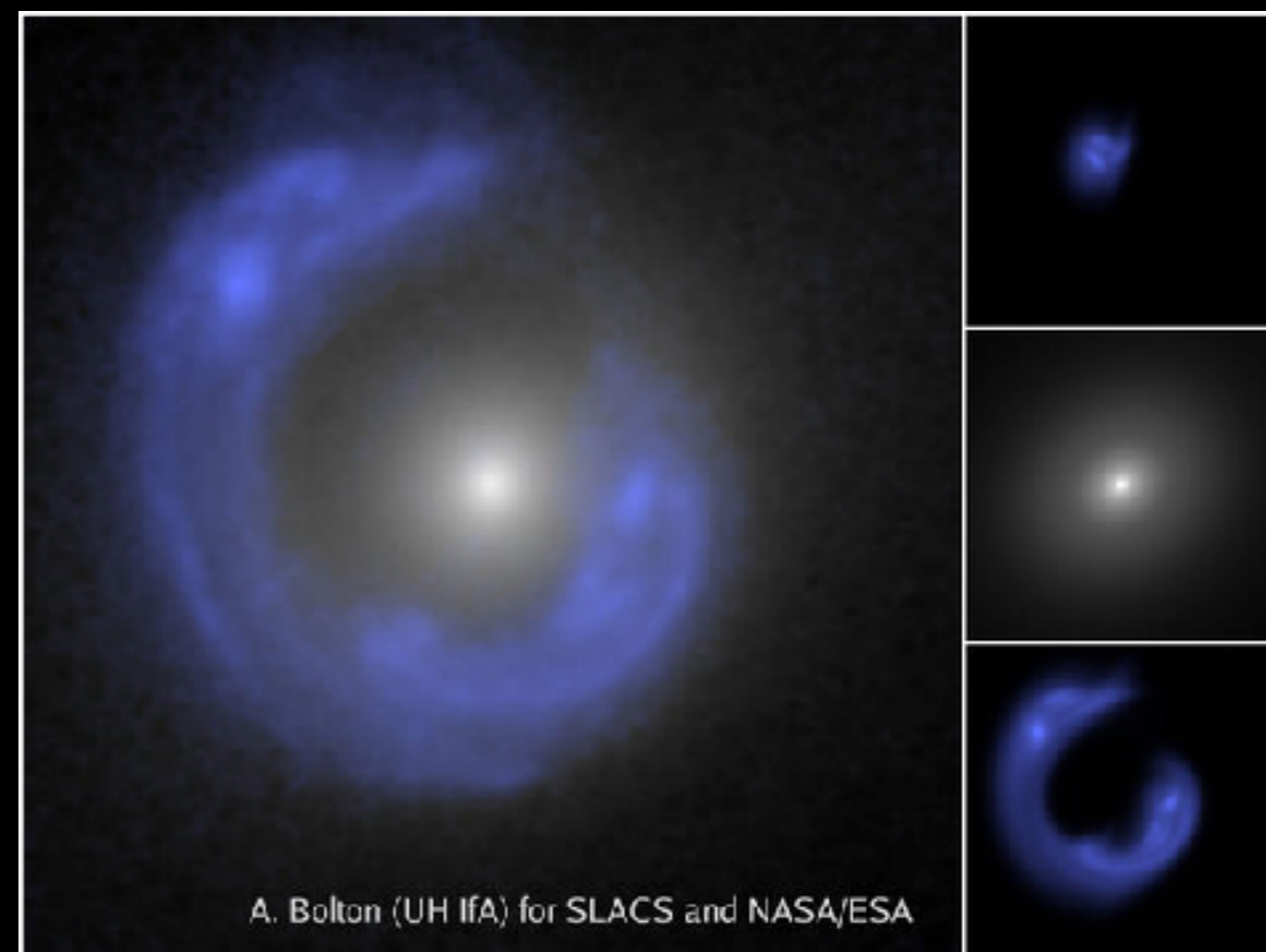
- Medidas da densidade, temperatura e pressão do gás como função do raio permitem fazer uma **estimativa da massa total** contida naquele raio, $M_{tot}(r)$

- 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 são uma fração de no máximo $\Omega_b \sim 0.04$; 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" 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 (cold dark matter, CDM)**. Partículas com interações fracas são chamadas de WIMPs — Weakly Interacting Massive Particles. É uma possibilidade...

- 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**

