



Universidade Federal do ABC

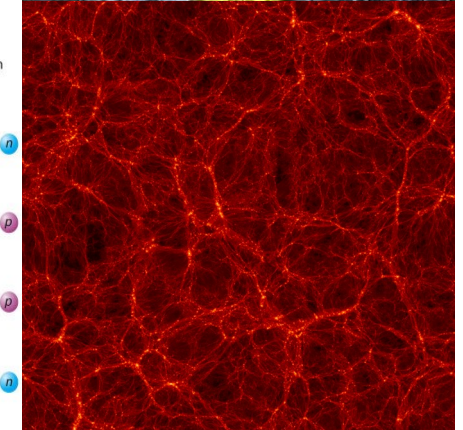
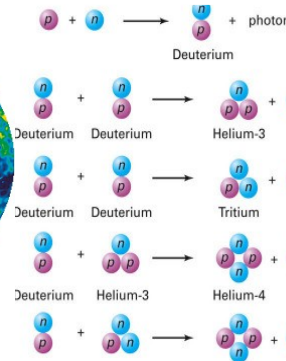
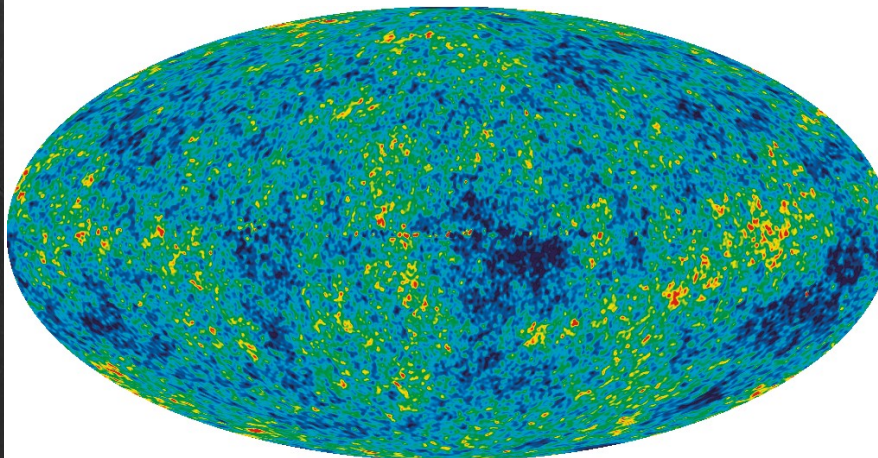
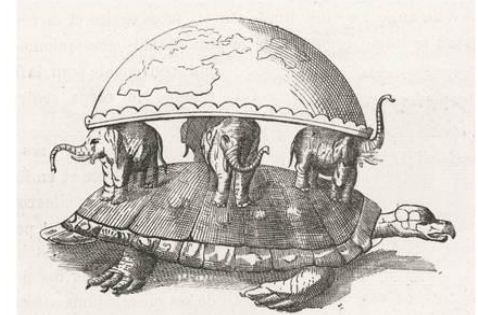
# Introdução à Cosmologia

## 15. Matéria Escura

Prof. Pieter Westera

[pieter.westera@ufabc.edu.br](mailto:pieter.westera@ufabc.edu.br)

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Cosmo.html>



# Evidências para a Matéria Escura

L: O mapa das **sobre-densidades** de **matéria visível** na época da "re-combinação",

vista na **RCF** e

mostrando sobre-densidades

**insuficientes**

para te-

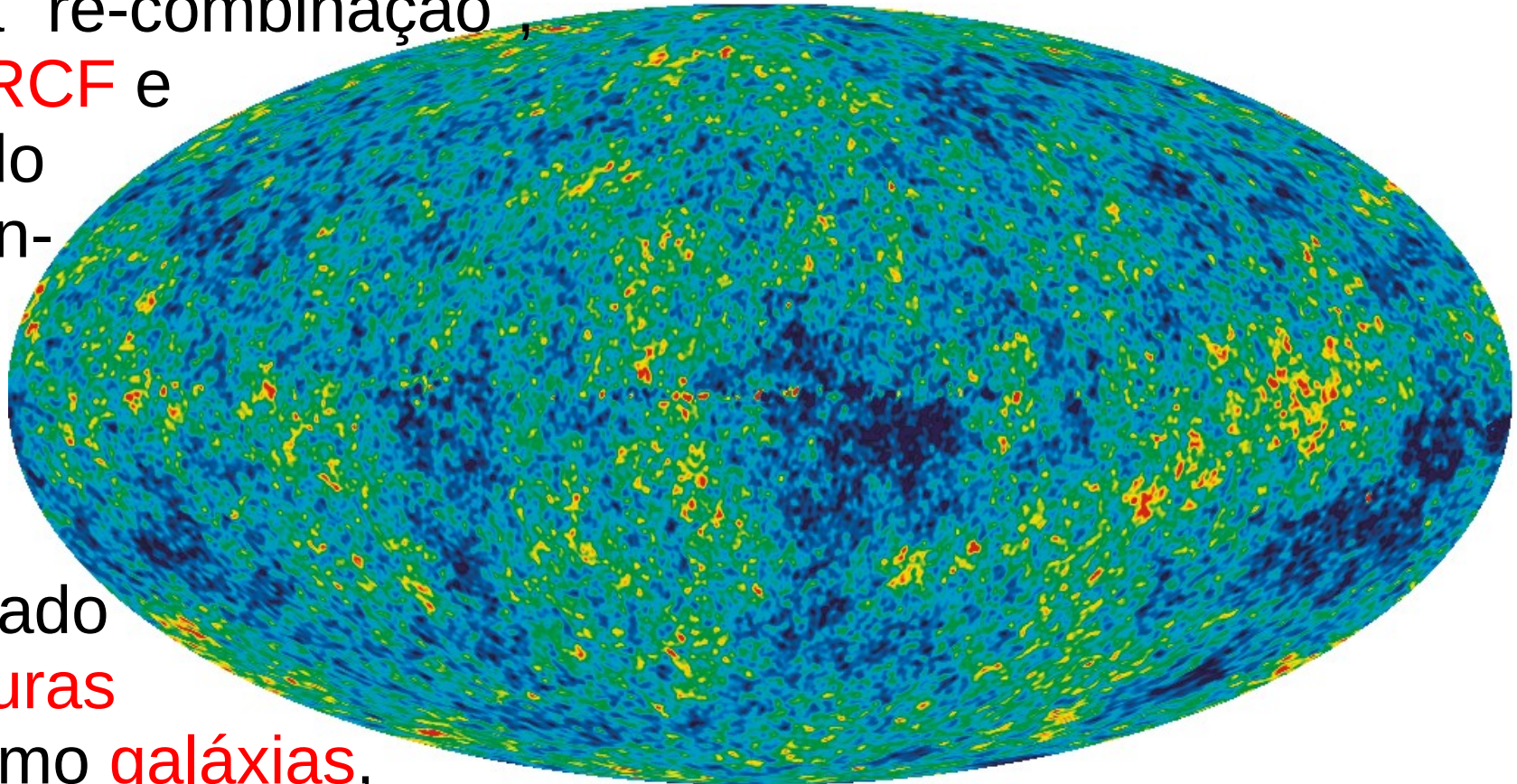
rem formado

as **estruturas**

**atuais** como **galáxias**,

**aglomerados** e **super-aglomerados**.

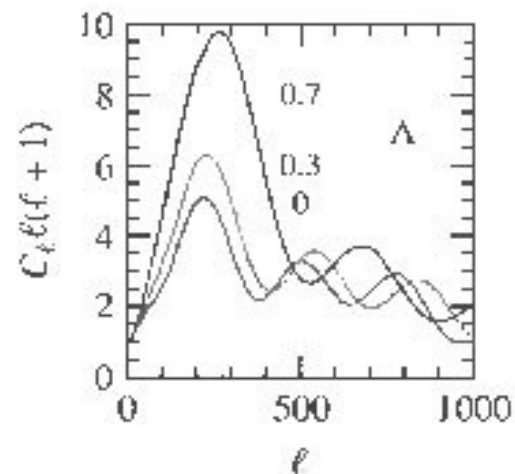
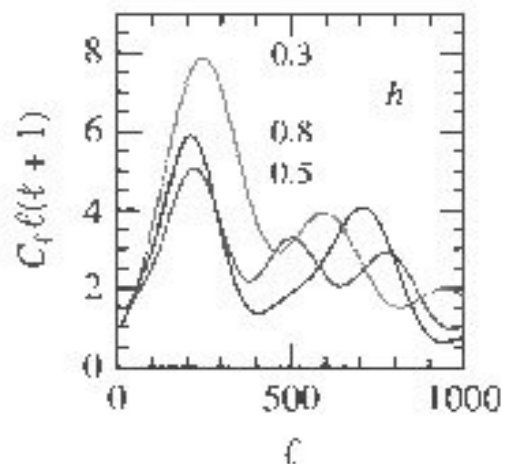
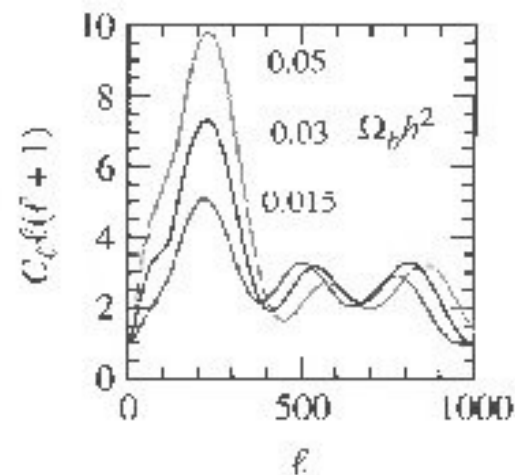
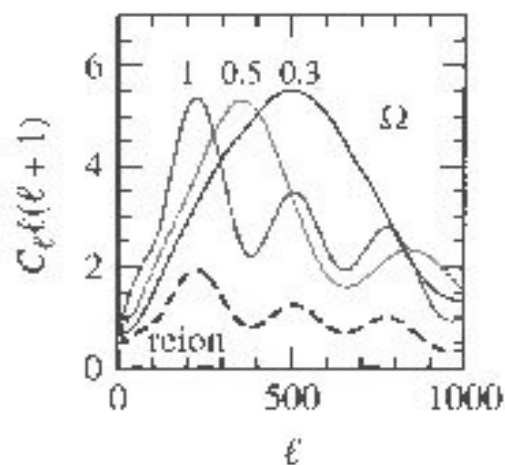
=> Estruturas se formaram nos poços de potencial gravitacional devidos às sobre-densidades de matéria "não-visível" já existentes.



# Radiação Cósmica de Fundo

## Espectro Angular

Altura do terceiro pico:  
sensível à densidade  
de **Matéria Escura**.



Variando vários parâmetros do modelo

# Outras Evidências para a Matéria Escura

Primeira Dica: Espessura do Disco da Via Láctea

Dinâmica das galáxias

Jan Oort, 1932:

Primeira indicação, inspirado por uma sugestão do orientador dele, Jakobus Kapteyn (1922) e uma publicação de Knut Lundmark (1930):

A **espessura** do **disco** da **Galáxia** depende da **massa** do disco, mas as **estrelas** têm **apenas 10%** da massa necessária.



Antes já tinha tido hipóteses sobre *matière obscure* por Lord Kelvin (1884) e Henri Poincaré (1906).

# Outras Evidências para a Matéria Escura

Massas de Aglomerados de galáxias

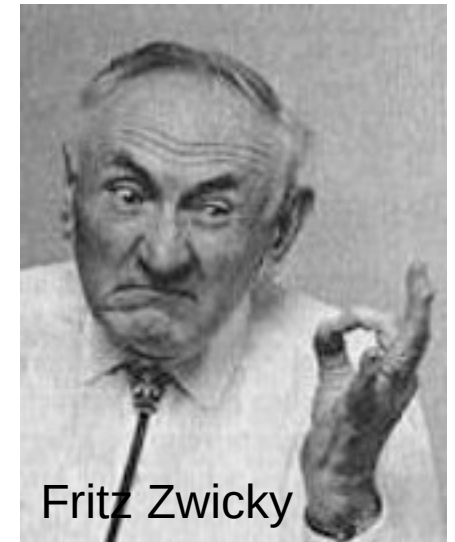
Dinâmica das galáxias

1933: Zwicky postulou **Matéria Escura** no **Aglomerado de galáxias Coma**

(massa estimada pelo **teorema de virial**, já volto neste método)

pois ele tinha determinado **massa  $\sim 400 \times$  maior** que a contabilizada pelas **estrelas**.

Contabilizando o **gás** se chega numa massa 10 vezes **maior**, mas ainda **não o suficiente**.



Fritz Zwicky



Aglomerado de Coma

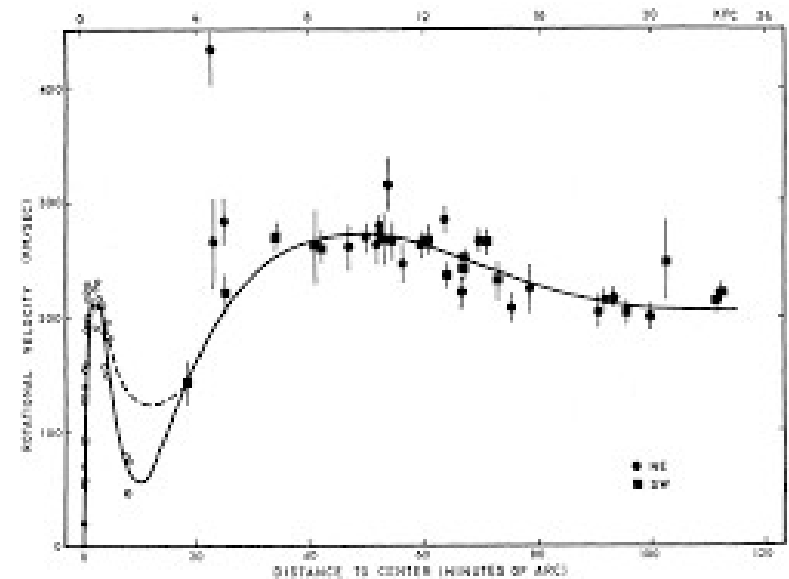
# Outras Evidências para a Matéria Escura

Massas de Aglomerados de galáxias

Dinâmica das galáxias

1970: Vera Rubin:

**Curva de rotação** da **galáxia** de **Andrômeda** (Horace Babcock já tinha observado isto em 1939, mas atribuído o efeito a outras causas)

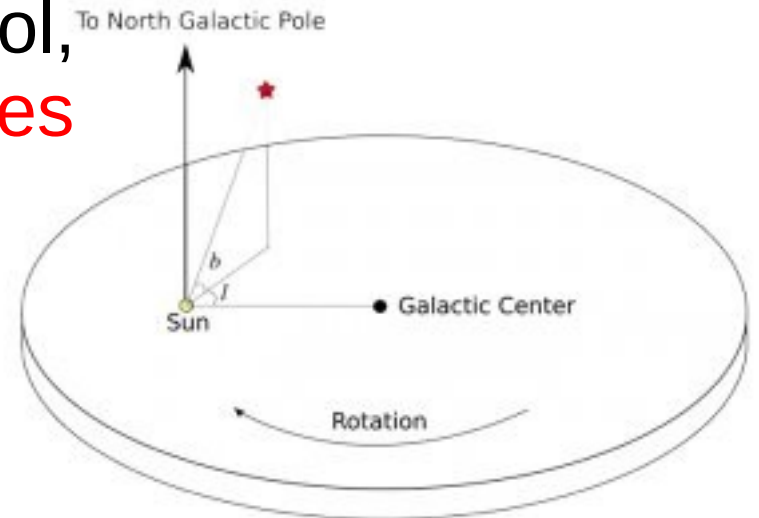


# A Curva de Rotação da Via Láctea

As **estrelas** da Via Láctea, p. e. o Sol, se movimentam em **órbitas circulares** em torno do **Centro Galáctico** (e o gás também).

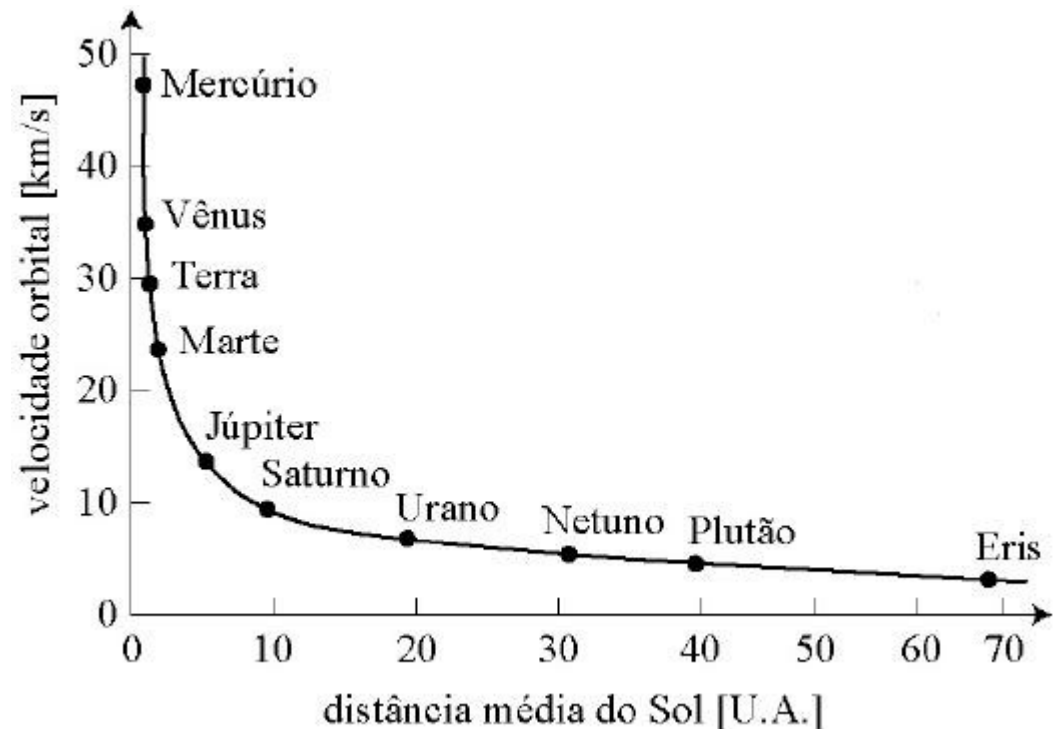
A **velocidade** de rotação de uma estrela na **distância  $r$**  do **Centro** depende da **massa** da Galáxia **contida** no espaço no **interior** da sua **órbita**,  $M_r^*$ :  $v(r) = \sqrt{G \cdot M_r / r}$

\*Já que  $F_{\text{grav.}} = GM_r m / r^2 = F_{\text{centrip.}} = mv(r)^2 / r$ , onde  $m$  = massa da estrela / "de teste"



# A Curva de Rotação da Via Láctea

No caso que **toda a massa** está **concentrada** no **centro**, como no **Sistema Solar**,  $M_r = M_\odot = \text{const.}$ , isto dá numa curva de rotação **kepleriana**,  $v(r) \propto r^{-1/2}$ .



# A Curva de Rotação da Via Láctea

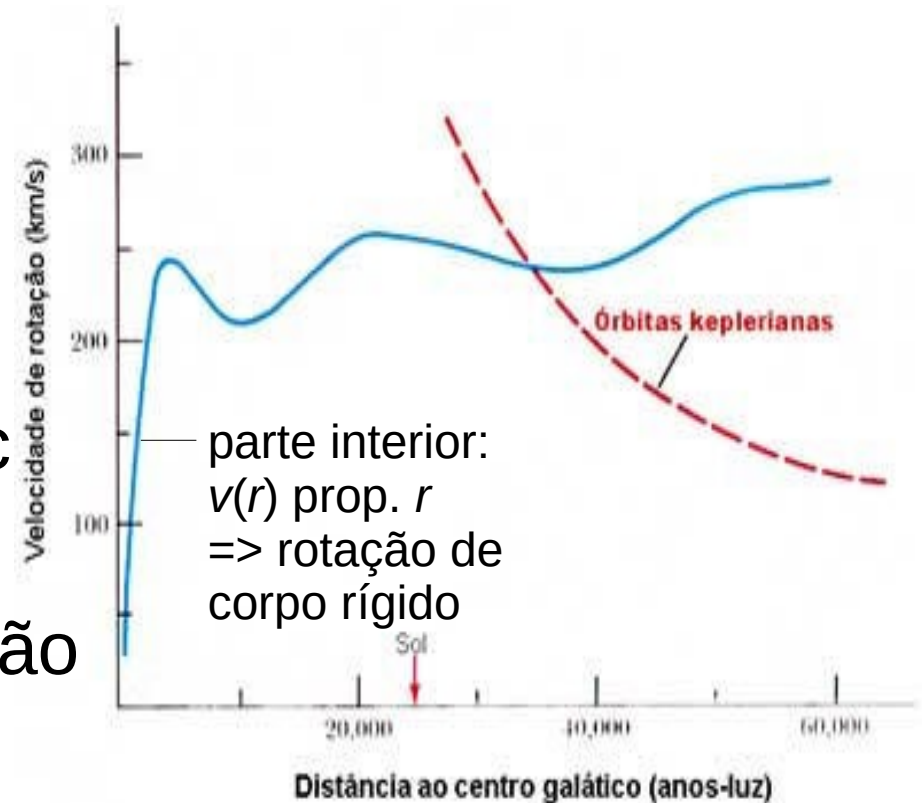
Medindo as **velocidades** das **estrelas** da nossa Galáxia, chega-se numa **curva de rotação** nada kepleriana, ela é, em primeira ordem, **constante**, para  $r >$  poucos kpc  $v(r) \approx 225 \text{ km/s} \approx \text{const.}$

Para obter uma curva de rotação constante:  $M_r/r = \text{const.}$

$$\Rightarrow M_r = \int_0^r \rho(r') dV = \int_0^r \rho(r') \cdot 4\pi r'^2 dr' = \text{const.} \cdot r$$

$\Rightarrow \rho(r) \cdot r^2 = \text{const.} \Rightarrow \rho(r) \propto r^{-2}$ , que é justamente o perfil de um "gás" **relaxado (isotérmico)**.

Fazendo o cálculo com todas as constantes:  $\rho(r) = \frac{v(r)^2}{4\pi G r^2}$



# A Curva de Rotação da Via Láctea

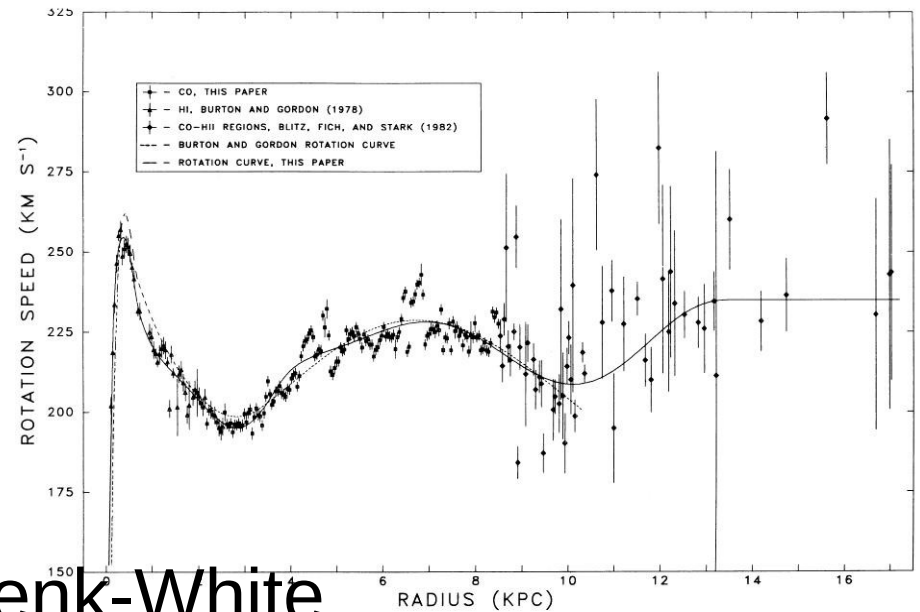
Levando em conta um pouco melhor os detalhes da **curva de rotação**, chega-se no seguinte **perfil de densidade** para a **Via Láctea**:

$$\rho_{\text{NFW}}(r) = \rho_0 / [(r/a)(1+r/a)^2],$$

chamado perfil de Navarro-Frenk-White, onde  $\rho_0$  é a **densidade central** e  $a$ , o **raio de escala**.

Este perfil **cai** muito **menos rápido** com  $r$  aumentando, do que sugerido pelos **componentes observados** da **Galáxia** (estrelas, gás interestelar, ...).

=> Deve ter um **componente** extra, **invisível**, na Via Láctea, chamado **Halo de Matéria Escura**.



# O Halo de Matéria Escura

$M = 5.4 \cdot 10^{11} M_{\odot}$  até 50 kpc,  
e  $1.9 \cdot 10^{12} M_{\odot}$  até 230 kpc.  
=> **95%** da **massa total** da  
**Via Láctea!**

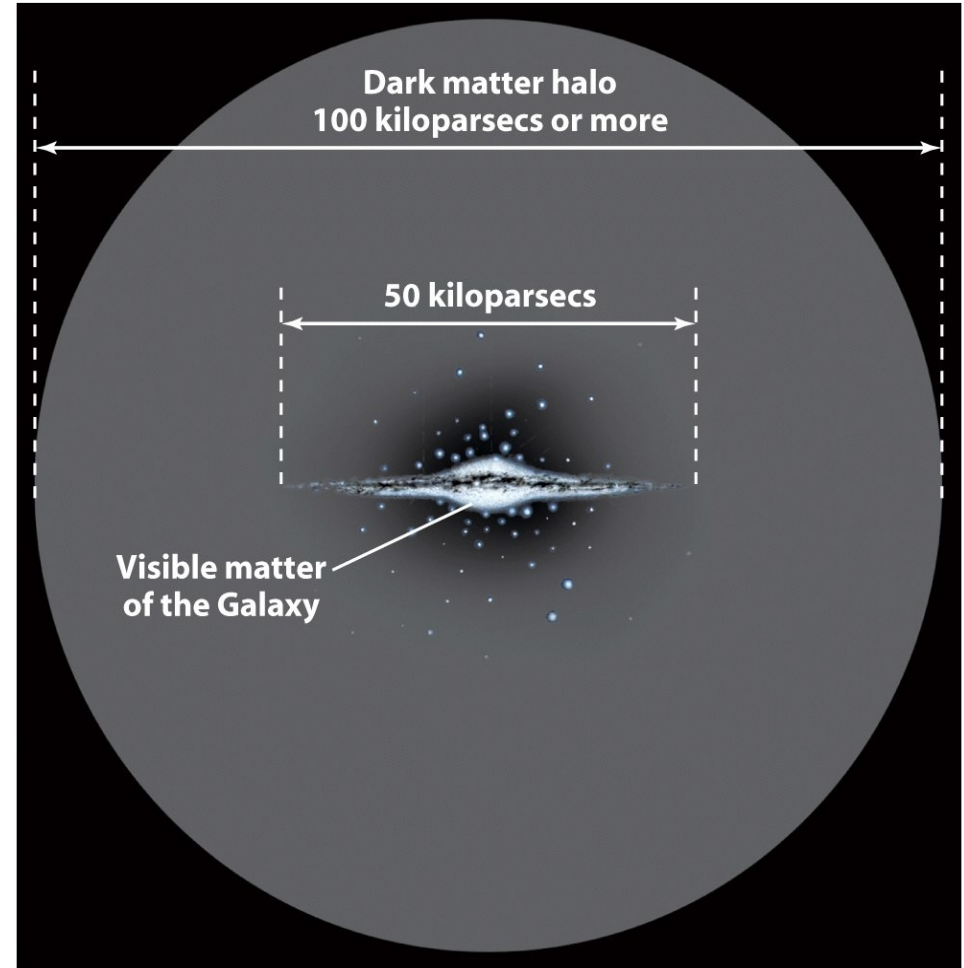
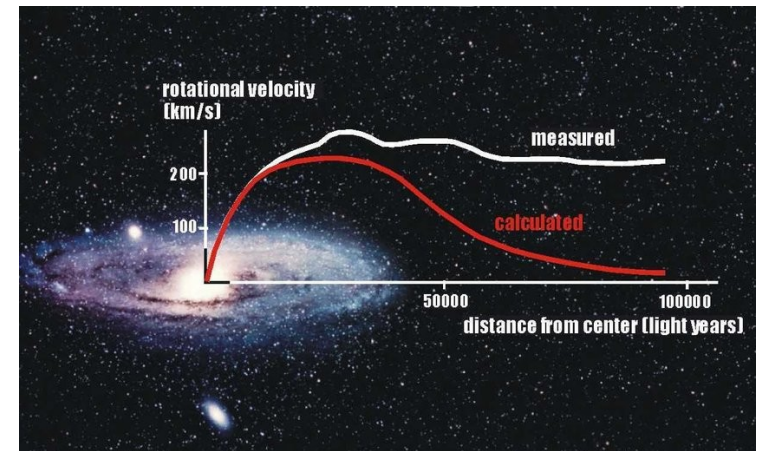


Figure 23-19  
*Universe, Eighth Edition*  
© 2008 W.H. Freeman and Company

# Evidências para a Matéria Escura

## Curvas de Rotação de outras galáxias discos

A já mencionada descoberta de Vera Rubin ...



... e confirmado para inúmeras outras galáxias desde então

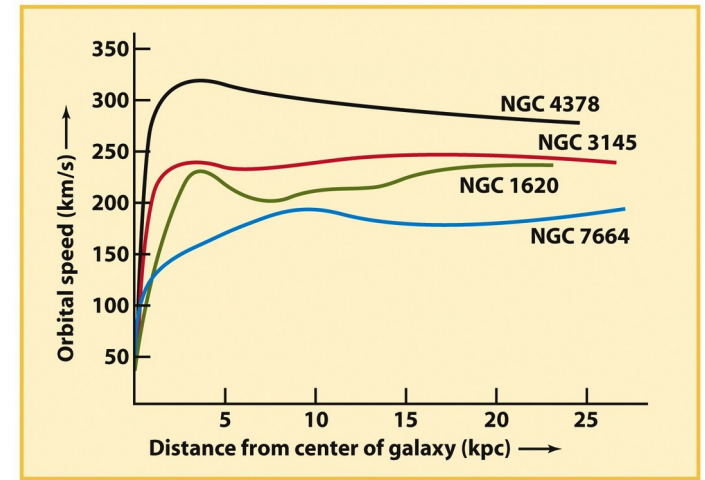
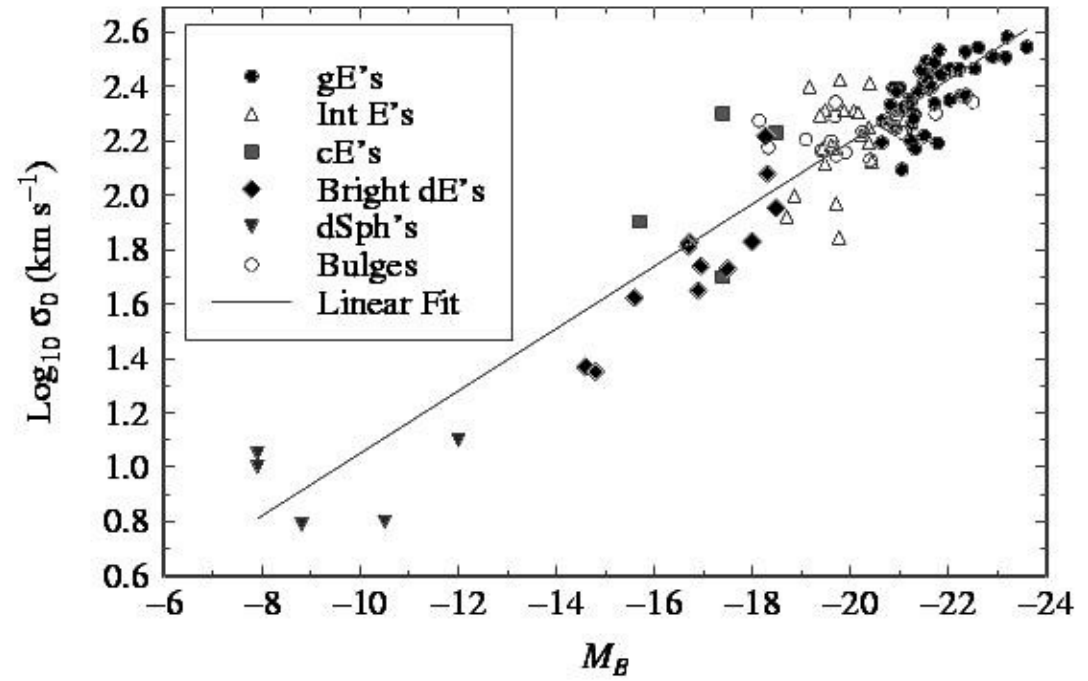


Figure 24-29  
Universe, Eighth Edition  
© 2008 W.H. Freeman and Company

# Evidências para a Matéria Escura

A **dispersão** de **velocidades**  $\sigma_0$  das estrelas em galáxias elípticas depende da **massa** da **galáxia**, que pode, então, ser calculada usando o **teorema** de **virial**:  $M \approx 5\sigma_0^2 R/G$ .



# Outras Evidências para a Matéria Escura

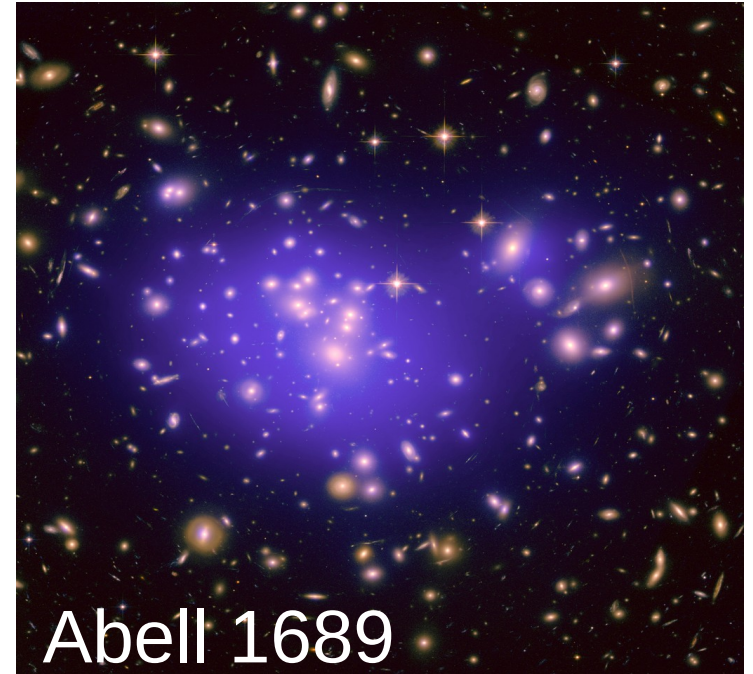
Massas de Aglomerados de galáxias

Dinâmica das galáxias

As galáxias em um Aglomerado se movimentam, com velocidades que podem ser medidas através dos seus espectros, pelo efeito Doppler.

A dispersão de velocidades  $\sigma_r$  depende da massa do Aglomerado, que pode, então, ser calculada da mesma maneira que a de uma galáxia elíptica a partir da dispersão de velocidades das suas estrelas.

=> Massas de  $10^{14}$  a  $10^{15} M_{\odot}$



# Outras Evidências para a Matéria Escura

Massas de Aglomerados de galáxias

Radiação do gás inter-aglomerado

Além de galáxias, os Aglomerados contêm **gás**, de **massa maior** do que as galáxias, que irradia em **raios X** devido a sua **temperatura**.

A **pressão** deste gás está em equilíbrio com a **gravitação** do aglomerado.

Medindo a **radiação** em raios X, pode se **calcular** a **temperatura** e a **pressão** do gás inter-aglomerado, e a **massa** do Aglomerado.

=> Massas de  $10^{14}$  a  $10^{15} M_{\odot}$



Aglomerado Abell 521 em raios X

# Outras Evidências para a Matéria Escura

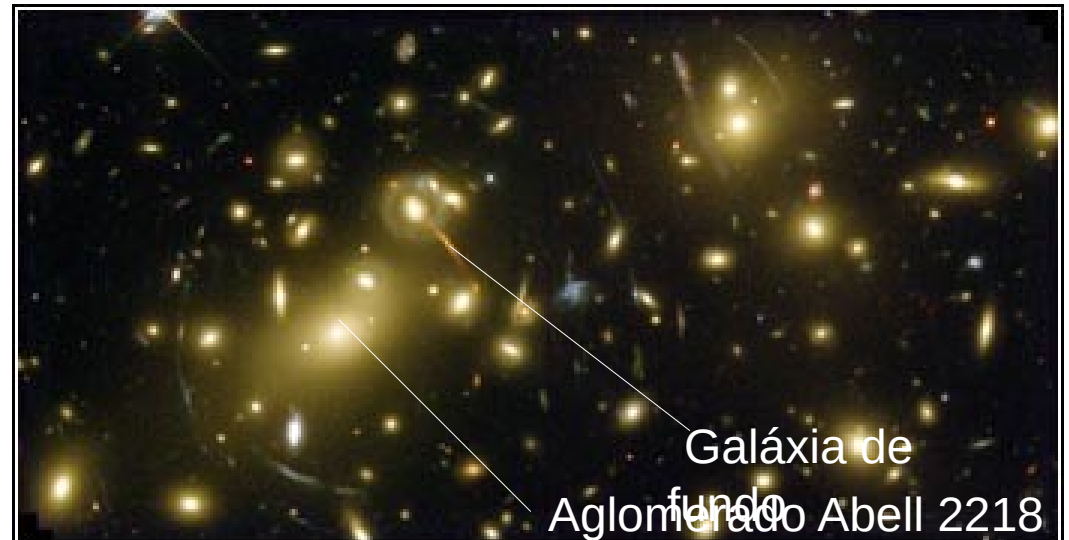
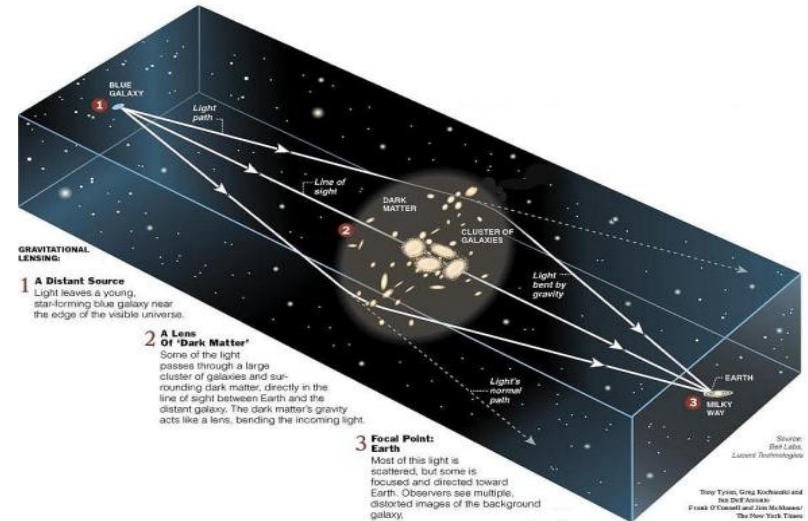
Massas de Aglomerados de galáxias

Efeito de lentes gravitacionais

**Massas altas**, como aglomerados de galáxias, **desviam a luz**, e **distorcem a imagem de objetos atrás** da massa, p. e. **galáxias mais distantes** (=> aula Relatividade Geral).

Medindo a **distorção** das imagens destas galáxias "de fundo", pode se determinar a **massa** do objeto **na frente** (a lente, no caso, o Aglomerado).

=> Massas de  $10^{14}$  a  $10^{15} M_{\odot}$



# Outras Evidências para a Matéria Escura

## Massas de Aglomerados de galáxias

Os métodos **concordam**:  $M_{\text{Aglomerados}} = 10^{14} \text{ a } 10^{15} M_{\odot}$

Porém:

A soma das massas das estrelas nas galáxias é **~50 vezes menor**.

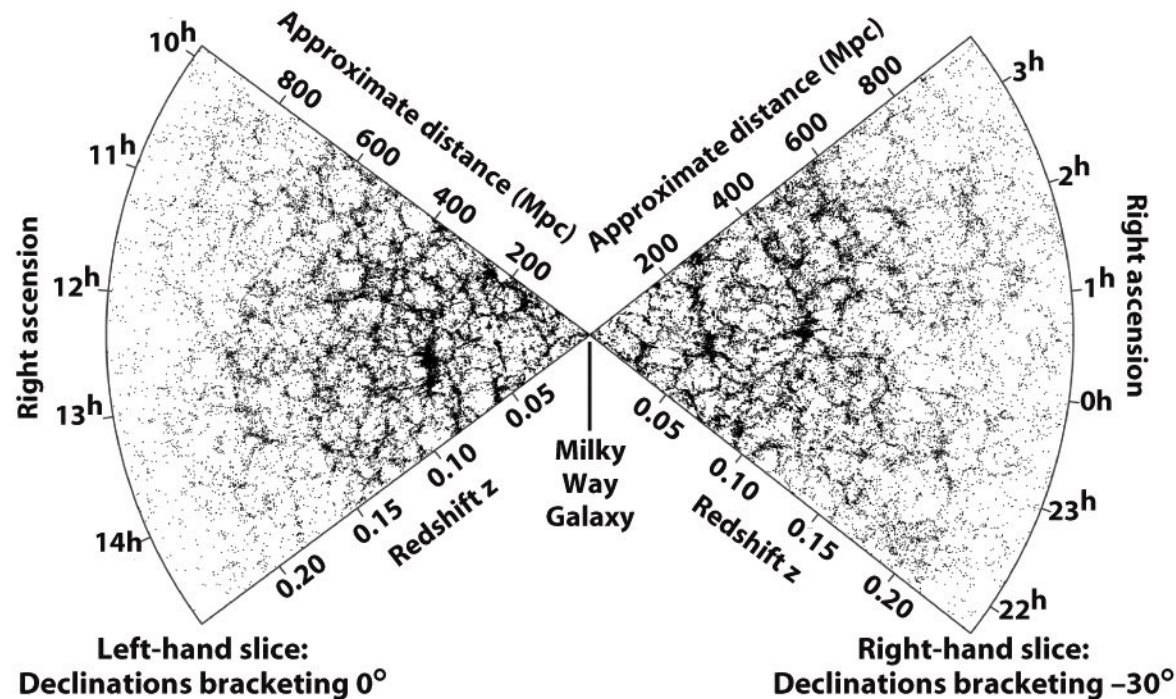
A soma das massas das galáxias mais o gás inter-aglomerado ainda é **5 a 6 vezes menor**.

=> Aglomerados contêm massa além da matéria conhecida (bariônica).

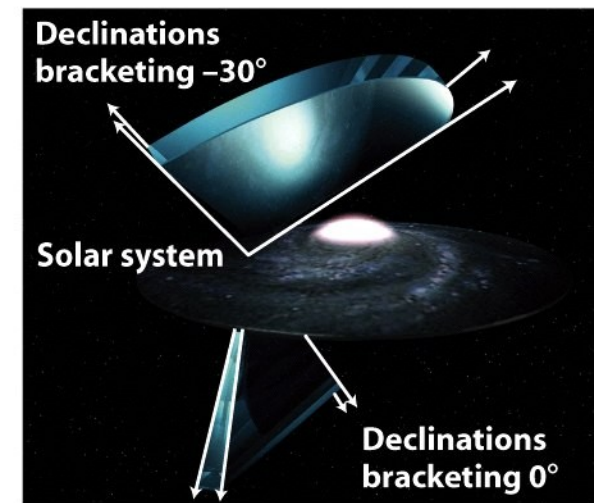
=> **Outra evidência para a Matéria Escura** não-bariônica.

# Outras Evidências para a Matéria Escura

## Amostras de *Redshifts*



(a) The 2dF galaxy survey



(b) Fields of view in the 2dF survey

Medindo os *redshifts* de **galáxias** numa "fatia" do espaço, e usando o *redshift* como **coordenada radial**, obtemos uma **amostra de redshifts**. Já que o *redshift* é proporcional à distância, a amostra reflete a **distribuição espacial** das galáxias na fatia.

# Outras Evidências para a Matéria Escura

## Amostras de Redshifts

No nível **Superaglomerados** acontece um fenômeno chamado **efeito Kaiser**.

Eles aparecem mais achatados na direção radial do que eles são por causa das **velocidades peculiares sistemáticas**:

O Superaglomerado puxa as galáxias do nosso lado para longe de nós

=> velocidade peculiar "recuando"

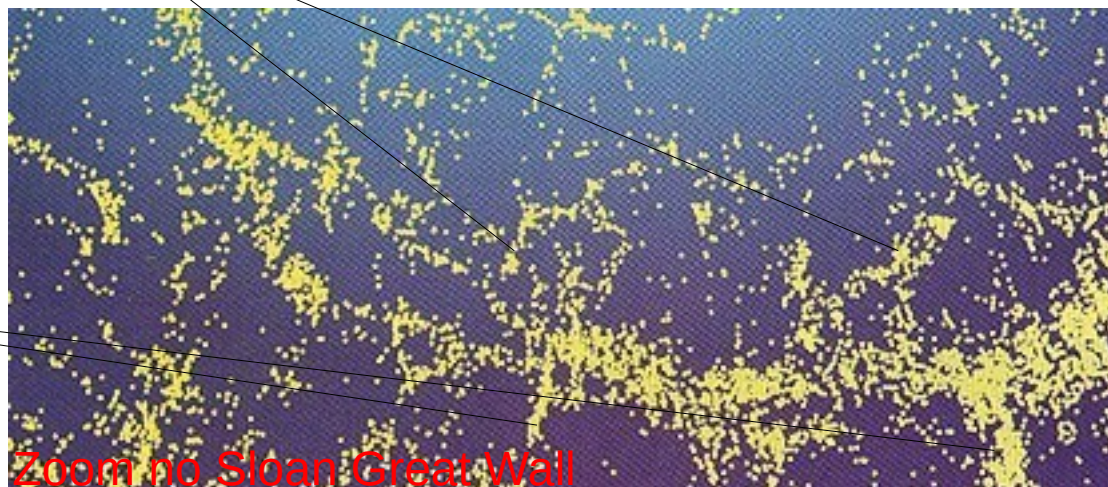
=> *redshift* Doppler coloca os aglomerados mais perto do centro de massa do Superaglomerado

Do outro lado:

*blueshift* de Doppler

também coloca

os Aglomerados mais perto do centro do Superaglomerado



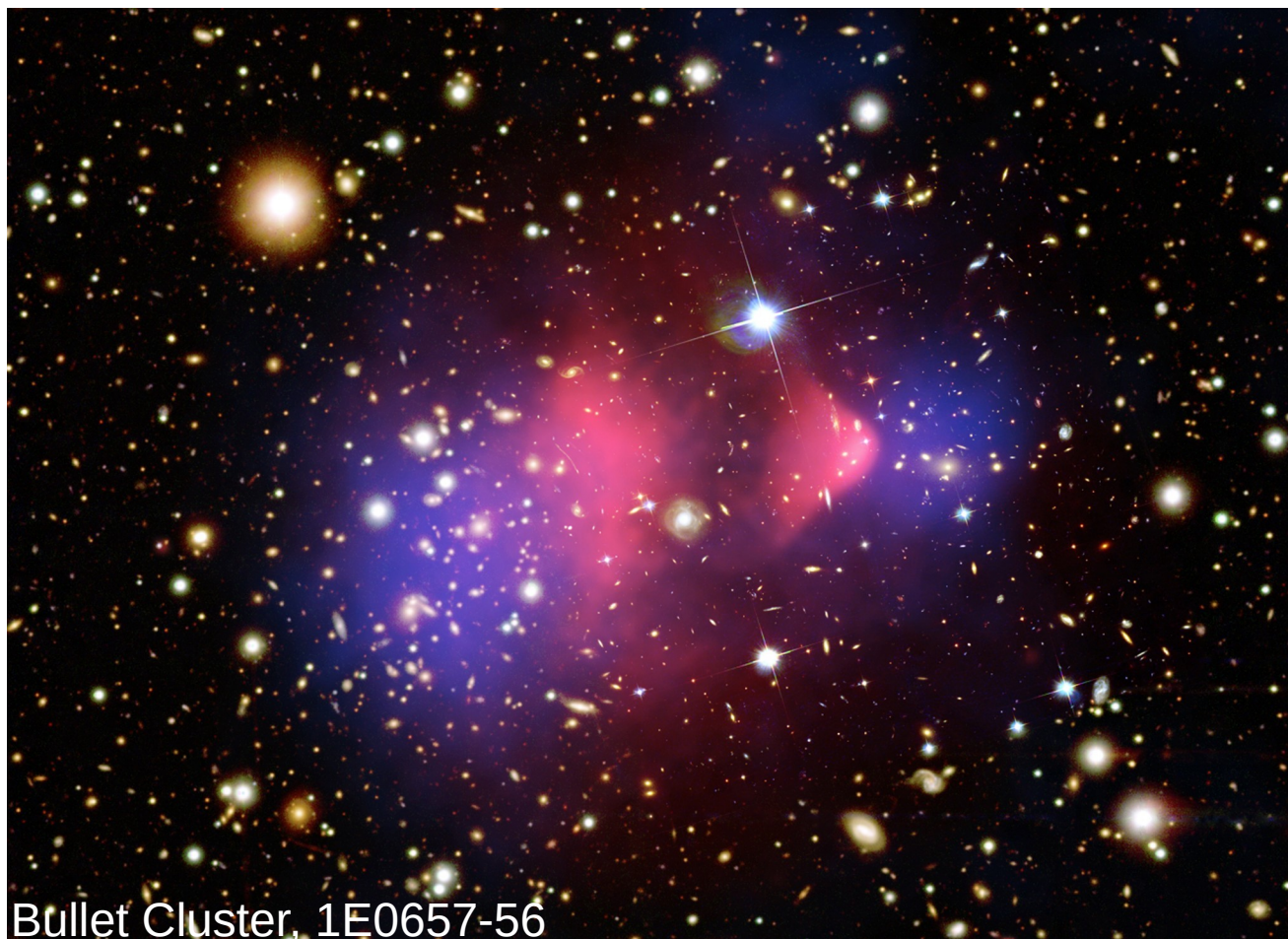
A amplitude do Efeito Kaiser indica **massas maiores** dos **Superaglomerados**, do que esperado pela massa visível deles.

# Outras Evidências para a Matéria Escura

## Distribuição de Massa em Aglomerados de galáxias

O Bullet Cluster ("Aglomerado Bala") é, na verdade, **dois Aglomerados** de galáxias em **colisão**.

Mapeando a **distribuição** de **massa** pelo **efeito lente fraco** (em azul), vê-se que a **Matéria Escura não coincide** com a **visível** (em vermelho: a emissão em raios X do gás intergaláctico).

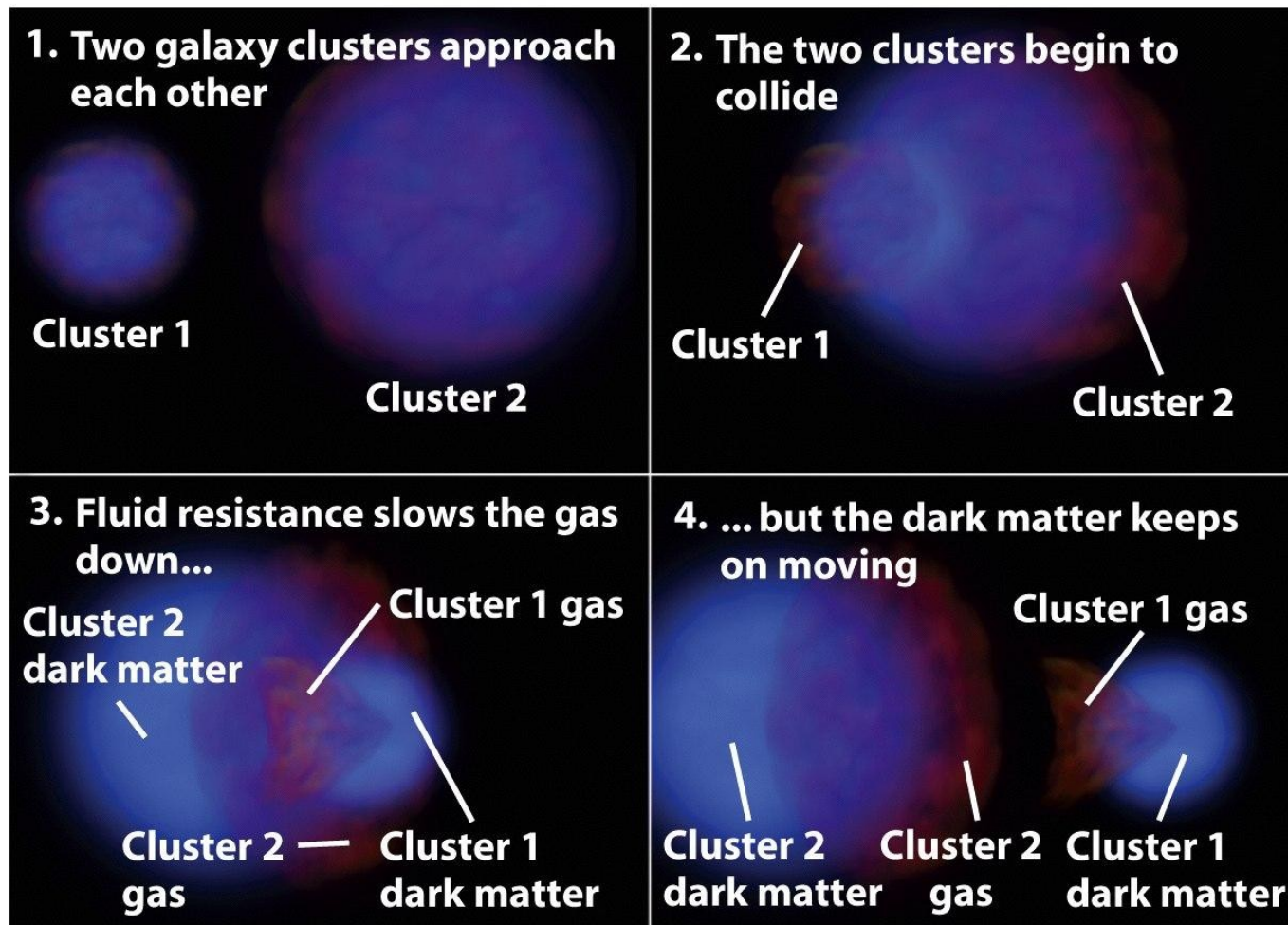


Bullet Cluster, 1E0657-56

A Matéria Escura fica "na frente" por estar menos sujeito à fricção.

# Outras Evidências para a Matéria Escura

## Distribuição de Massa em Aglomerados de galáxias

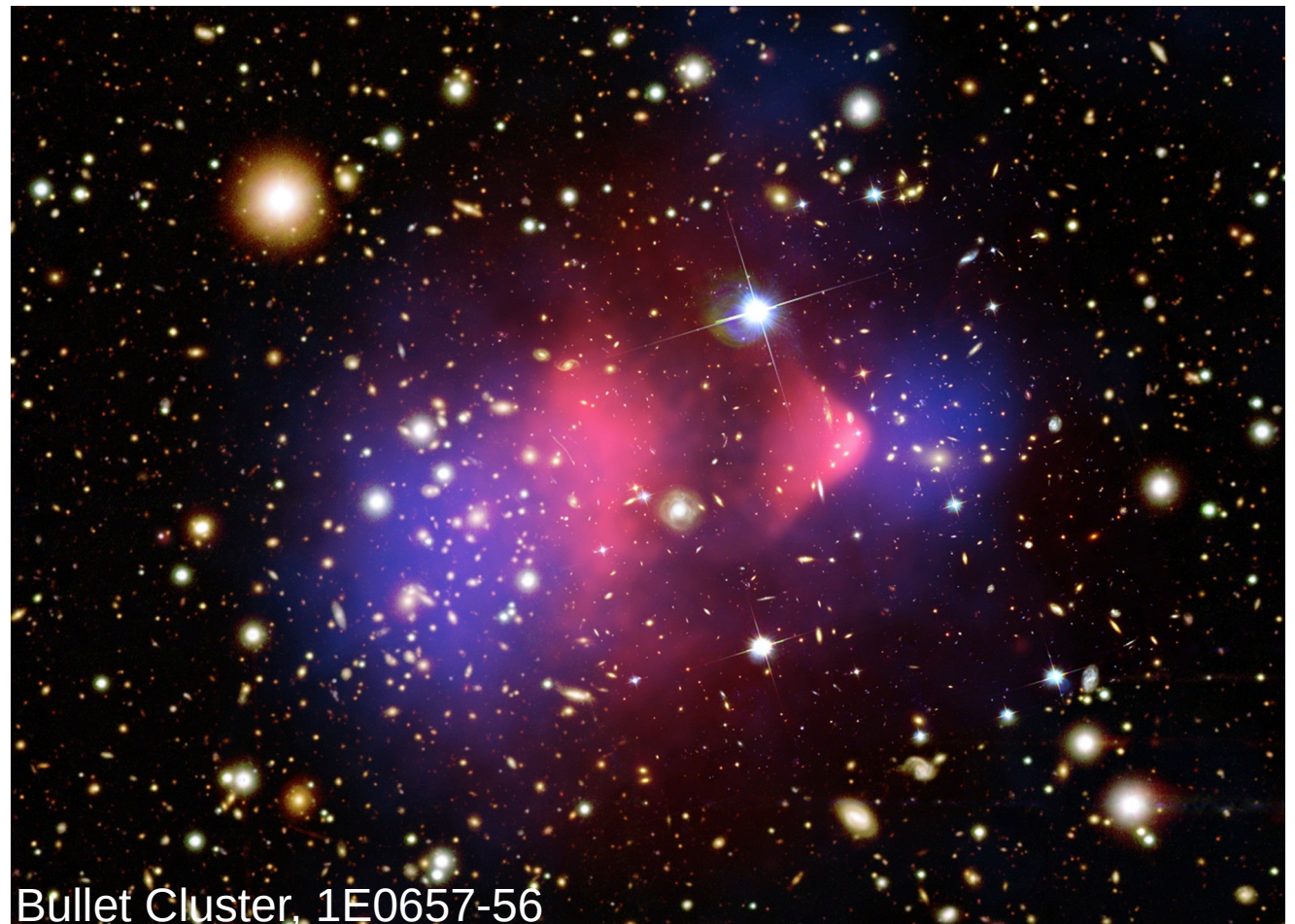


**A model of how the gas and dark matter in 1E0657-56 could have become separated**

# Outras Evidências para a Matéria Escura

## Distribuição de Massa em Aglomerados de galáxias

Isto é visto como uma das melhores **evidências** da **existência** da **Matéria Escura** (A matéria vista pelo efeito lente **não** é simplesmente só a massa visível "sobre-estimada").



# Do que consiste a Matéria Escura?

=> Temos **evidências** para a **Matéria Escura** de **fontes** completamente **diferentes** e **independentes**:  
Radiação Cósmica de Fundo, galáxias, Aglomerados de galáxias, ..., tal que poucos duvidam da existência dela\*,

mas do **que** ela **consiste**?

\*Na verdade, há gente duvidando, sim. Vide a última aula, sobre modelos alternativos.

# Do que consiste a Matéria Escura?

Voltando pra **Via Láctea**, a curva de rotação indica que a sua Matéria Escura se distribui num componente esférico (talvez um pouco achatado), o **Halo de Matéria Escura**

$M = 5.4 \cdot 10^{11} M_{\odot}$  até 50 kpc,  
e  $1.9 \cdot 10^{12} M_{\odot}$  até 230 kpc.  
=> **95%** da **massa total** da **nossa Galáxia!**

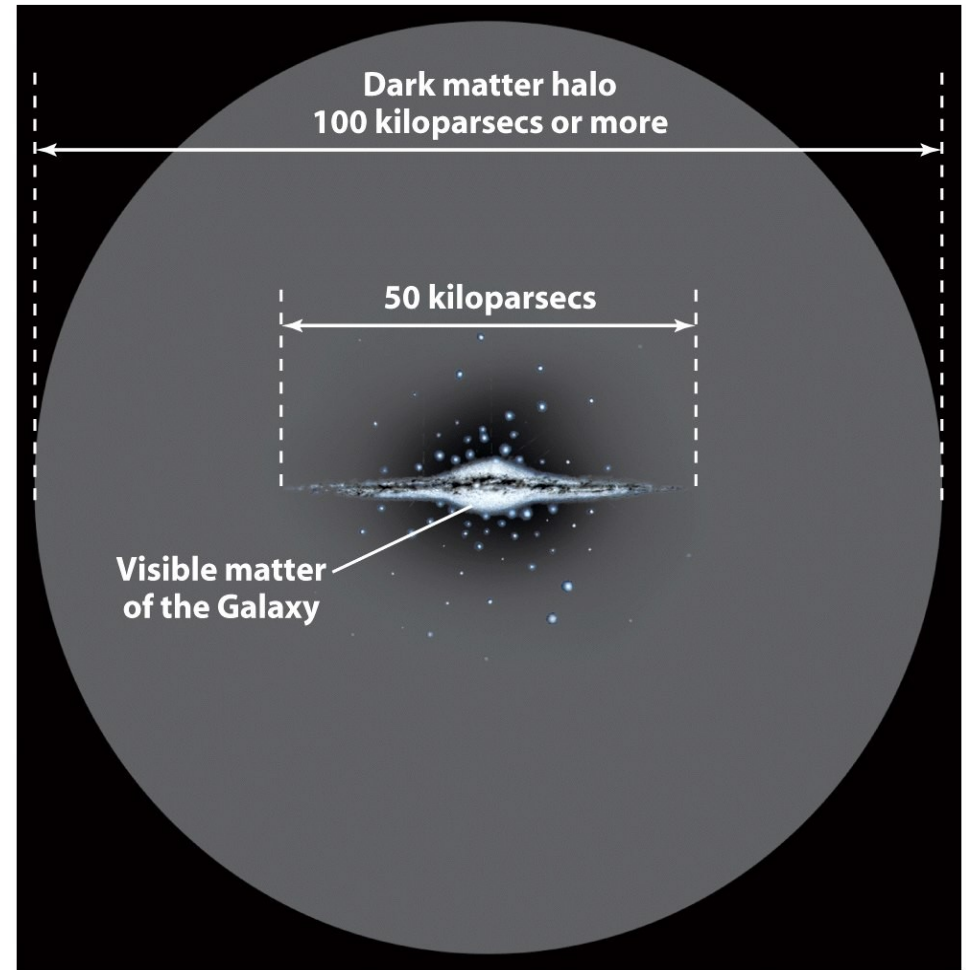


Figure 23-19  
*Universe, Eighth Edition*  
© 2008 W.H. Freeman and Company

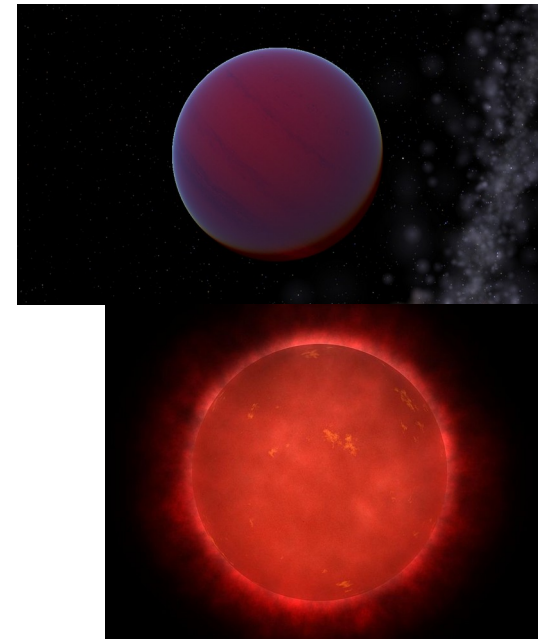
Já que estamos dentre deste, é o lugar mais indicado para procurar e identificar a Matéria Escura.

# Do que consiste a Matéria Escura?

Anos 80: debate MACHOs  $\Leftrightarrow$  WIMPs

- **MACHOs** (ingl. *MA*ssive *C*ompact *H*alo *O*bjects, objetos do halo massivos e compactos, ou machões):
  - **Anãs Marrons**
  - "Júpiters"
  - **Estrelas comuns**, mas de baixo brilho
  - **Anãs Brancas**
  - **Estrelas de Nêutrons**
  - **Buracos Negros**

Exemplos de **Matéria Escura bariônica**.



# Do que consiste a Matéria Escura?

Anos 80: debate MACHOs  $\Leftrightarrow$  WIMPs

- WIMPs: partículas massivas interagindo pela força fraca (do inglês *Weakly Interacting Massive Particles*; a palavra inglesa *wimp* também significa chorão)
- **partículas elementares** interagindo com o resto da matéria só pela **força fraca** e pela **gravitação**, p. e. **neutrinos**, as partículas previstas pela teoria de **supersimetria**, ou outras.  
=> praticamente **invisíveis**.

Era, então um debate machões vs. chorões.

# Do que consiste a Matéria Escura?

Como detectar os MACHOs?

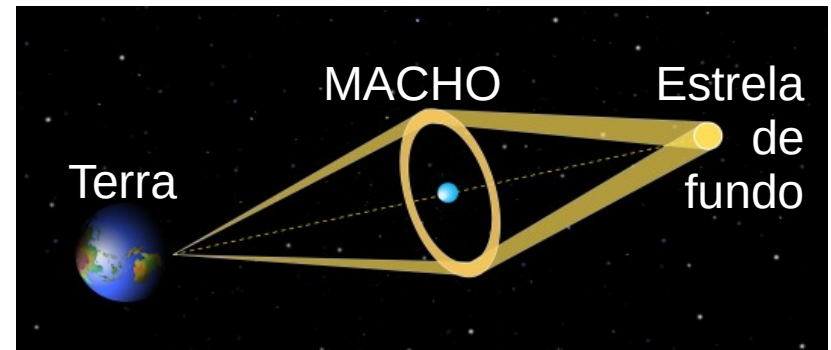
Pelo **efeito lente**, consequência da **Relatividade Geral**:

**Luz é defletida** por **massa**.

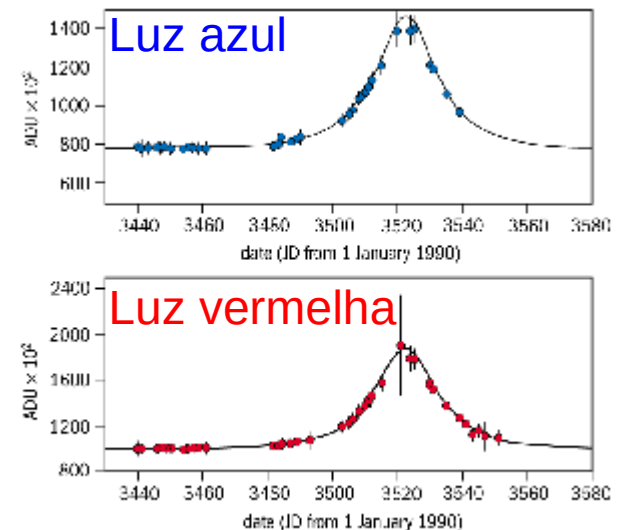
Quando um MACHO passa **na frente** de uma **estrela de fundo**, a **luz da estrela é focada** na Terra => A estrela parece mais brilhante por algumas horas ou dias.

Por ser um efeito fraco (comparado ao efeito devido a galáxias ou aglomerados) se fala de **microlensing**.

Pela **curva de luz** da estrela de fundo pode-se determinar a **massa** do **MACHO**. (mais detalhes na aula sobre Relatividade)



Curvas de luz de uma estrela durante um evento de microlensing



# Do que consiste a Matéria Escura?

## O Projeto MACHO

Observaram **12 mi. estrelas** na Grande Nuvem de Magalhães **de 1992 a 1998** com um telescópio no observatório Mt. Stromlo na Austrália.

Detectaram entre **13 e 17** eventos de microlensing.  
=> **Estimativa** do **número total** de **MACHOs** na **Via Láctea**.

Determinando as **massas** destes MACHOs, consegue-se estimar a **massa total** de **MACHOs** em nossa Galáxia.



# Do que consiste a Matéria Escura?

**MACHOs** ou **WIMPs**, então?

O Projeto e outros, similares, detectaram vários **MACHOs**  
=> eles **existem**,

mas de longe **não** em número/massa **suficiente** para  
explicar a **Matéria Escura** na **Via Láctea**  
(compõem menos de 1% do número suficiente).

=> A **Matéria Escura** deve consistir na maioria de **WIMPs**,  
**partículas elementares** ainda **não detectadas**.

Os chorões derrotaram os machões!

# Do que consiste a Matéria Escura?

E como são estas partículas?

## Anos 80: Duas Possibilidades

- *Hot Dark Matter* (ingl. para Matéria Escura **Quente**):  
Partículas com **velocidades relativísticas**:
  - neutrinos ( $\sim 10^{-36}$  kg)
  - táquions (partículas "superluminares")  
ou outras partículas hipotéticas
- *Cold Dark Matter* (Matéria Escura **Fria**):  
Partículas ou até **objetos** com **massa** mais **alta**,  
e **velocidades baixas**:
  - "axions" ( $\sim 10^{-41}$  kg),
  - Partículas hipotizadas pelas teorias de supersimetria  
ou outras

# Do que consiste a Matéria Escura?

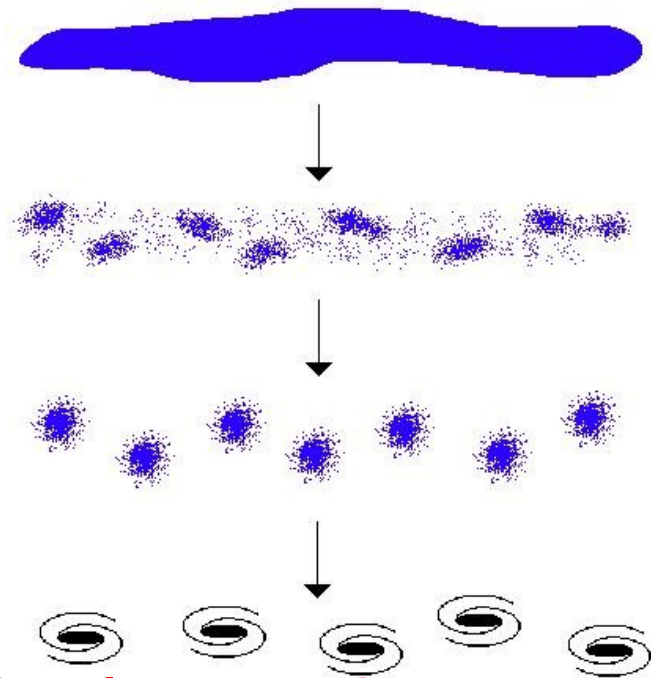
## Como distinguir?

- As partículas do *Hot Dark Matter* têm **velocidades** tão **altas**, que elas **escapam** das concentrações, "pequenas" de massa (no caso, galáxias). Elas **não participam** na **formação** destas **estruturas**.

- **Primeiro** se formariam apenas as **maiores estruturas**, os (**super-**)**aglomerados**
- As **galáxias** se formariam **depois**, por **fragmentação** das maiores estruturas, cenário chamado **top-down** (de cima para baixo)

### Top-Down Structure Formation

in a top-down scenario, large pancakes of matter form first, than fragment into galaxy-sized lumps

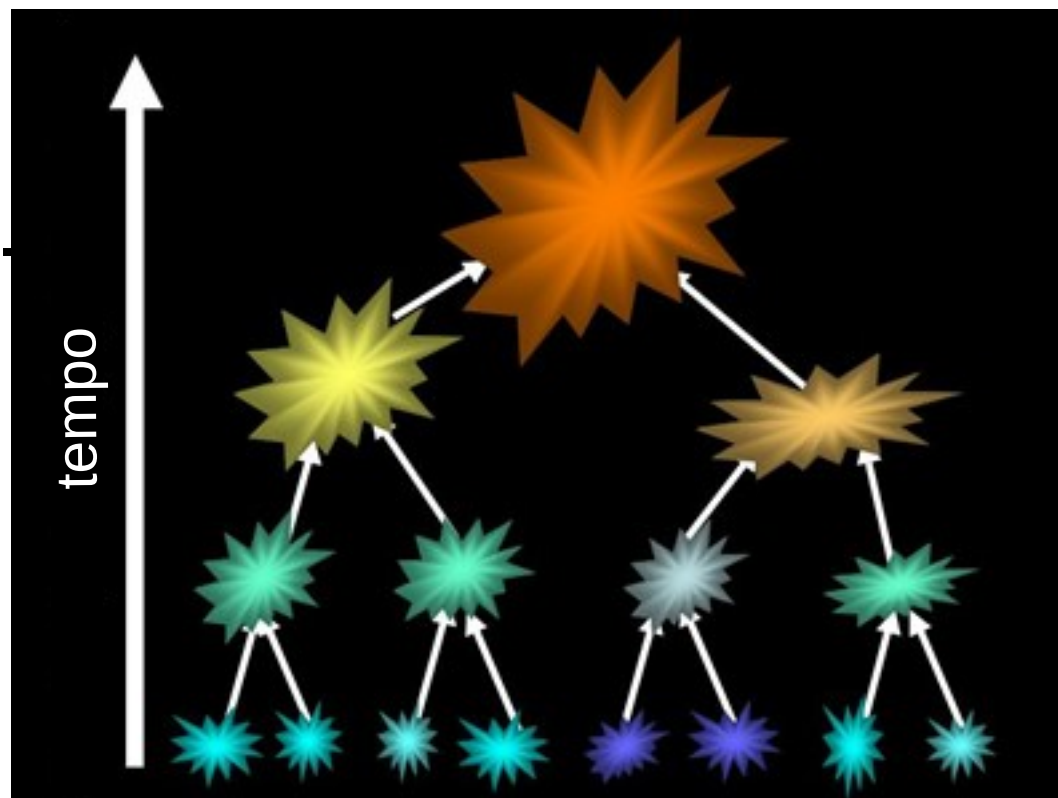


# Do que consiste a Matéria Escura?

## Como distinguir?

- *Cold Dark Matter*, por outro lado, fica **ligada** às estruturas pela **gravitação**. Ela **participa** da **formação** das **estruturas**.

- As **menores estruturas** já conseguem se formar **cedo**, e **depois** se **juntam** para formar as estruturas **maiores**, num cenário *bottom-up* (de baixo para cima)



Mais sobre estes dois cenários na disciplina Noções de Astronomia e Cosmologia nas aulas sobre galáxias

# Do que consiste a Matéria Escura?

## Como distinguir?

=> A **formação das estruturas** se dá **diferentemente** nas duas hipóteses, *top-down* vs. *bottom-up*.

=> A evolução das **formas e tamanhos das estruturas** e da **distribuição** da matéria, incluindo a matéria visível, quer dizer, das **galáxias**, se dá **diferente** nas duas hipóteses

# Do que consiste a Matéria Escura?

## Como distinguir?

- Uma **observação** a favor do cenário **bottom-up** é, que **fusões de galáxias** são observadas.

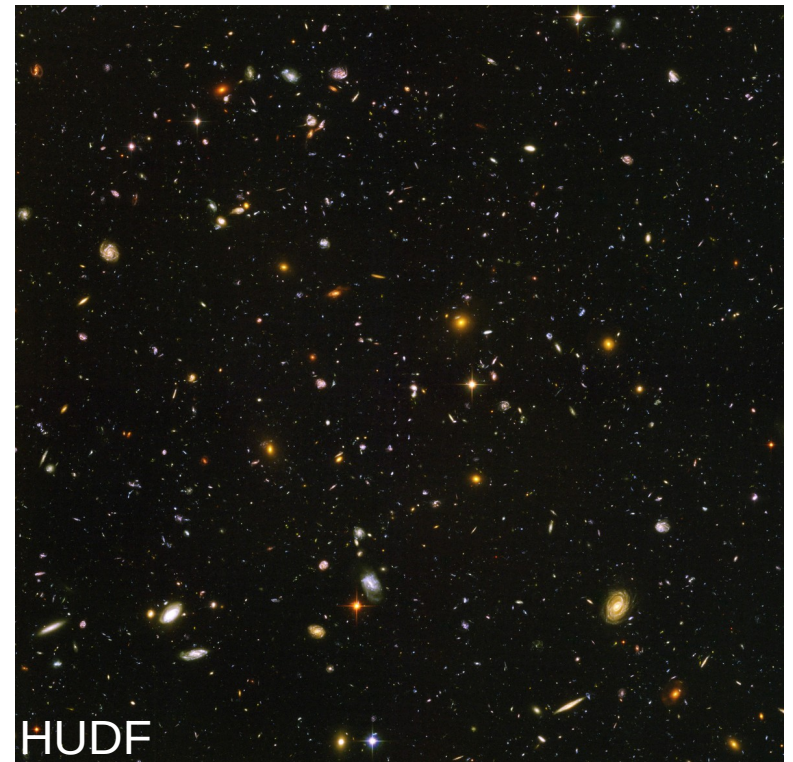


# Do que consiste a Matéria Escura?

## Como distinguir?

Uma das imagens mais **distantes**, quer dizer, mais **antigas**, de **galáxias** que temos à disposição é o *Hubble Ultra Deep Field*, mostrando algumas **galáxias** como eram **400 a 800 Myr** após o *Big Bang*.

Elas eram **pequenas**, como previsto no cenário *bottom-up*.

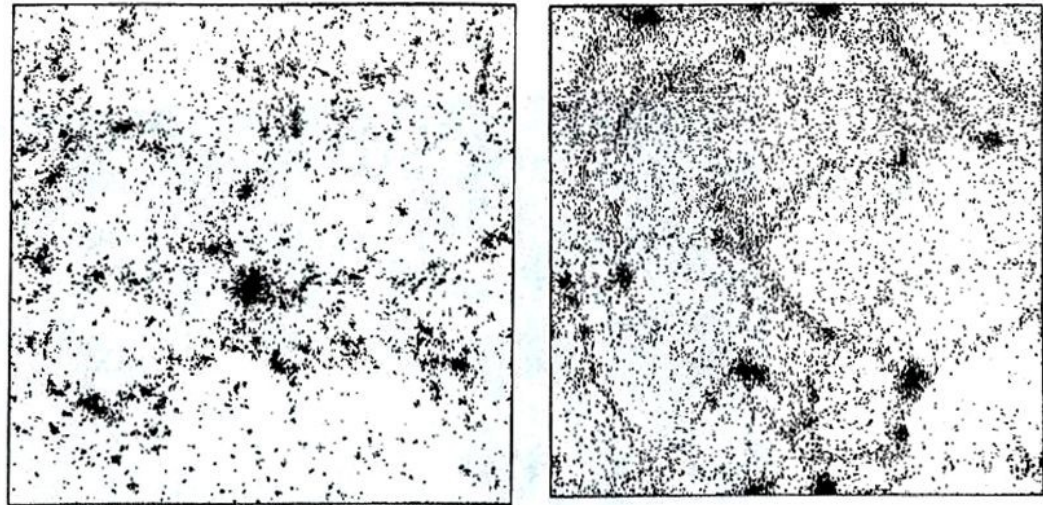


Mas a resposta final deve vir de **simulações** mais sofisticadas.

# Do que consiste a Matéria Escura?

Como distinguir?

Simulações que calculam a evolução das estruturas num Universo contendo CDM ou HDM prevêm distribuições de galáxias diferentes nas duas hipóteses.



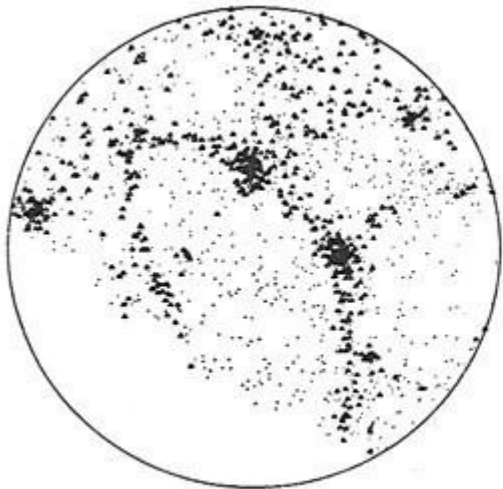
**FIGURE 30.10** The results of numerical simulations of the formation of structure in the universe from the bottom-up clumping of cold dark matter (left), and the top-down fragmentation of hot dark matter (right). Both models assume  $\Omega_0 = 1$  and  $h = 0.5$ . (Figure from Frenk, *Physica Scripta*, T36, 70, 1991.)

# Do que consiste a Matéria Escura?

Simulações da evolução das grandes estruturas no Universo

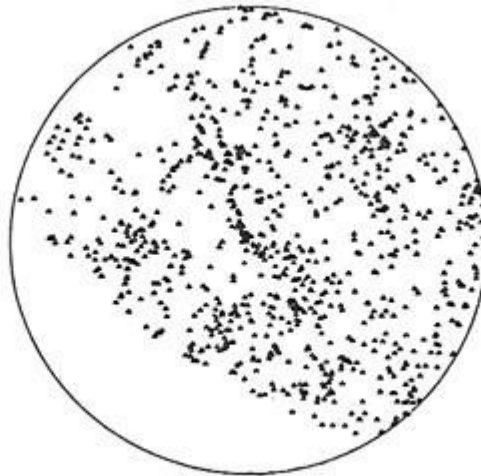
Cada ponto é uma galáxia.

Com Matéria Escura  
Quente



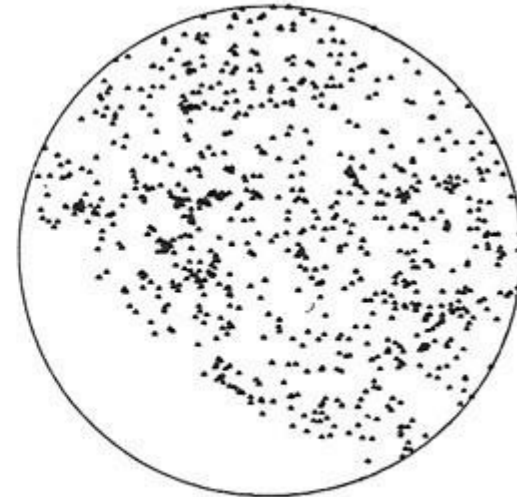
HDM

Distribuição  
Observada



Observed Galaxy Distribution

Com Matéria Escura  
Fria

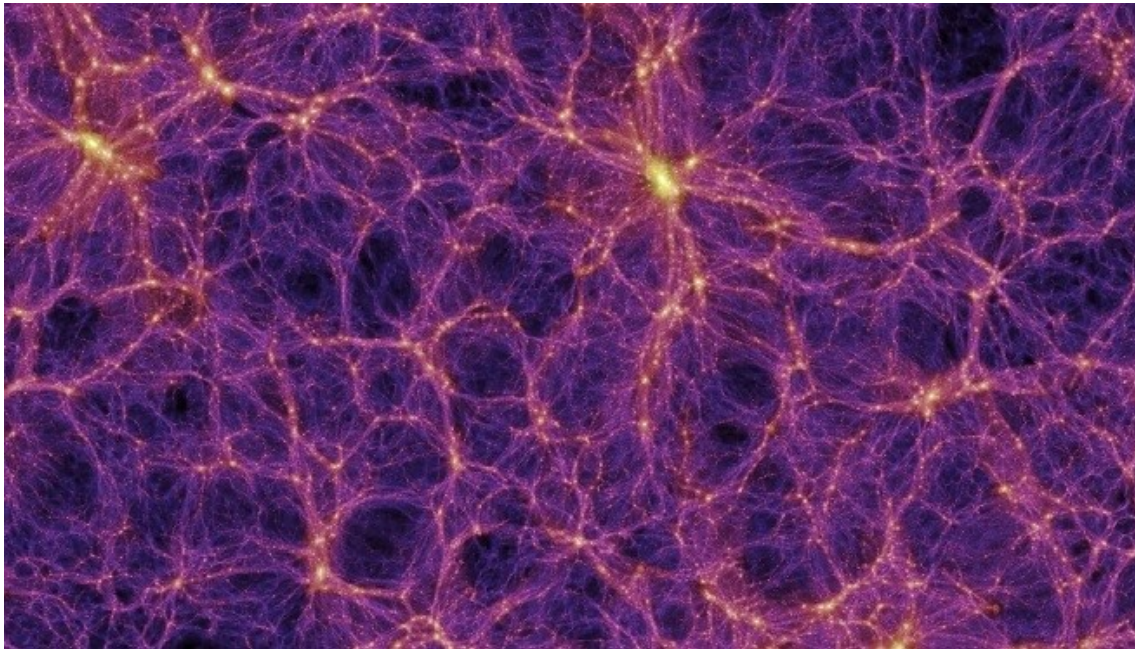


CDM

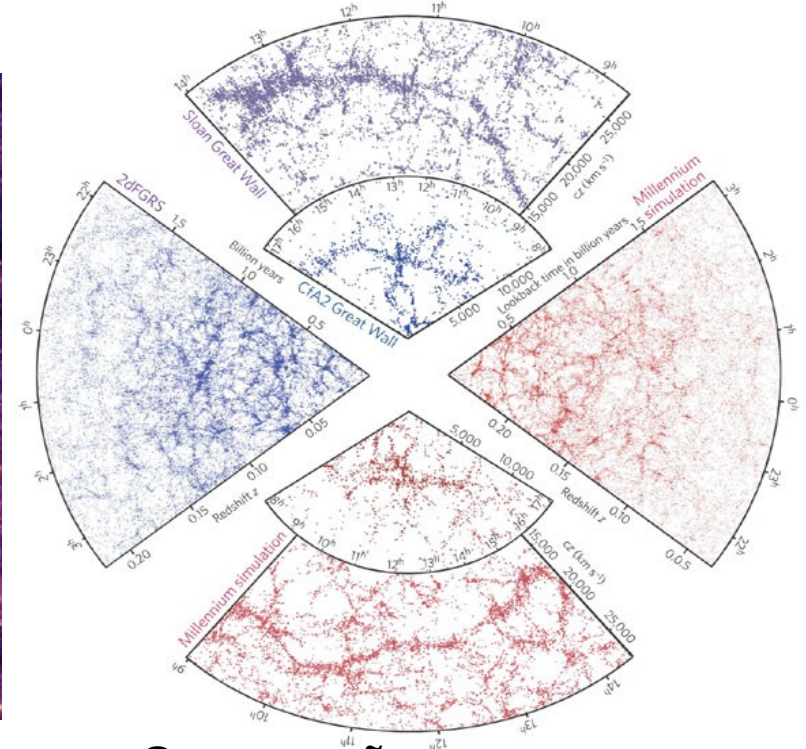
=> A simulação com **Matéria Escura Fria** reproduz a distribuição observada melhor

# Do que consiste a Matéria Escura?

## Simulação mais recente com Matéria Escura Fria



Dark Matter Millenium Simulation  
(Virgo Consortium, 2005)



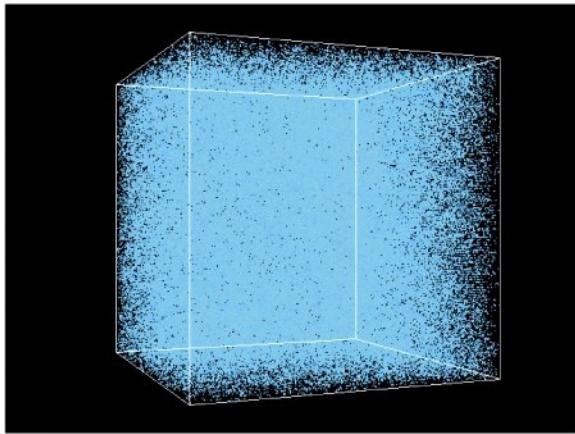
Comparação com uma amostra de redshifts

Reproduz perfeitamente a distribuição observada.

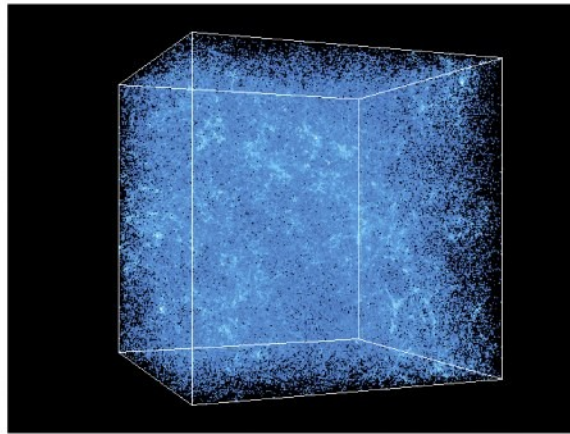
=> A Matéria Escura é **Fria** (CDM)

# Do que consiste a Matéria Escura?

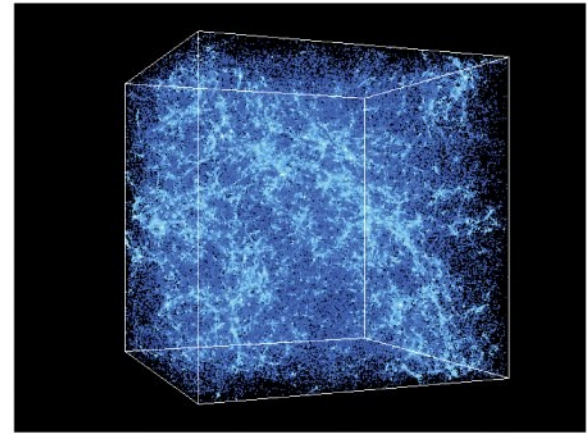
## Evolução de um Cubo Comovente segundo a Simulação



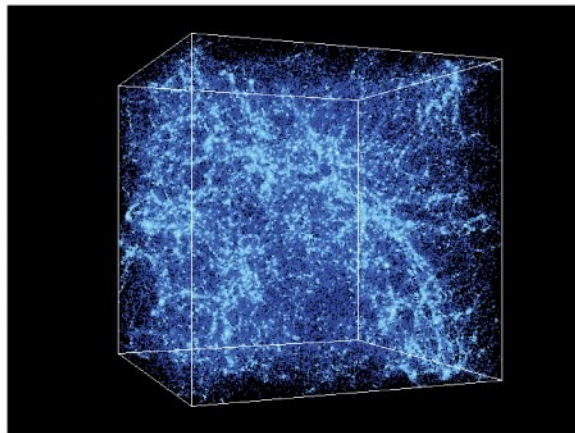
$z = 27.36$  Universe 120 million years old



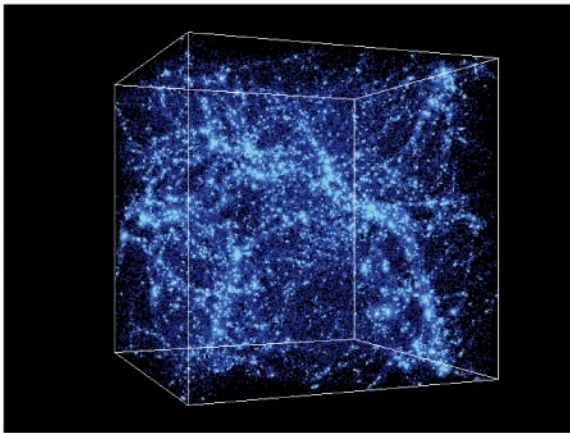
$z = 9.83$  Universe 490 million years old



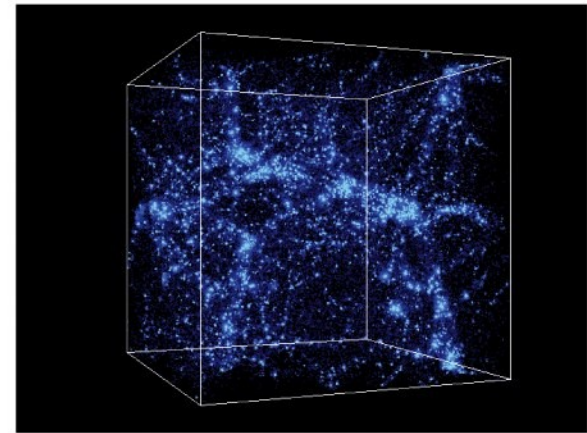
$z = 4.97$  Universe 1.2 billion years old



$z = 2.97$  Universe 2.2 billion years old



$z = 0.99$  Universe 6.0 billion years old



$z = 0.00$  Universe 13.7 billion years old

Figure 27-15

*Universe, Eighth Edition*

© 2008 W. H. Freeman and Company

# Da Recombinação até hoje

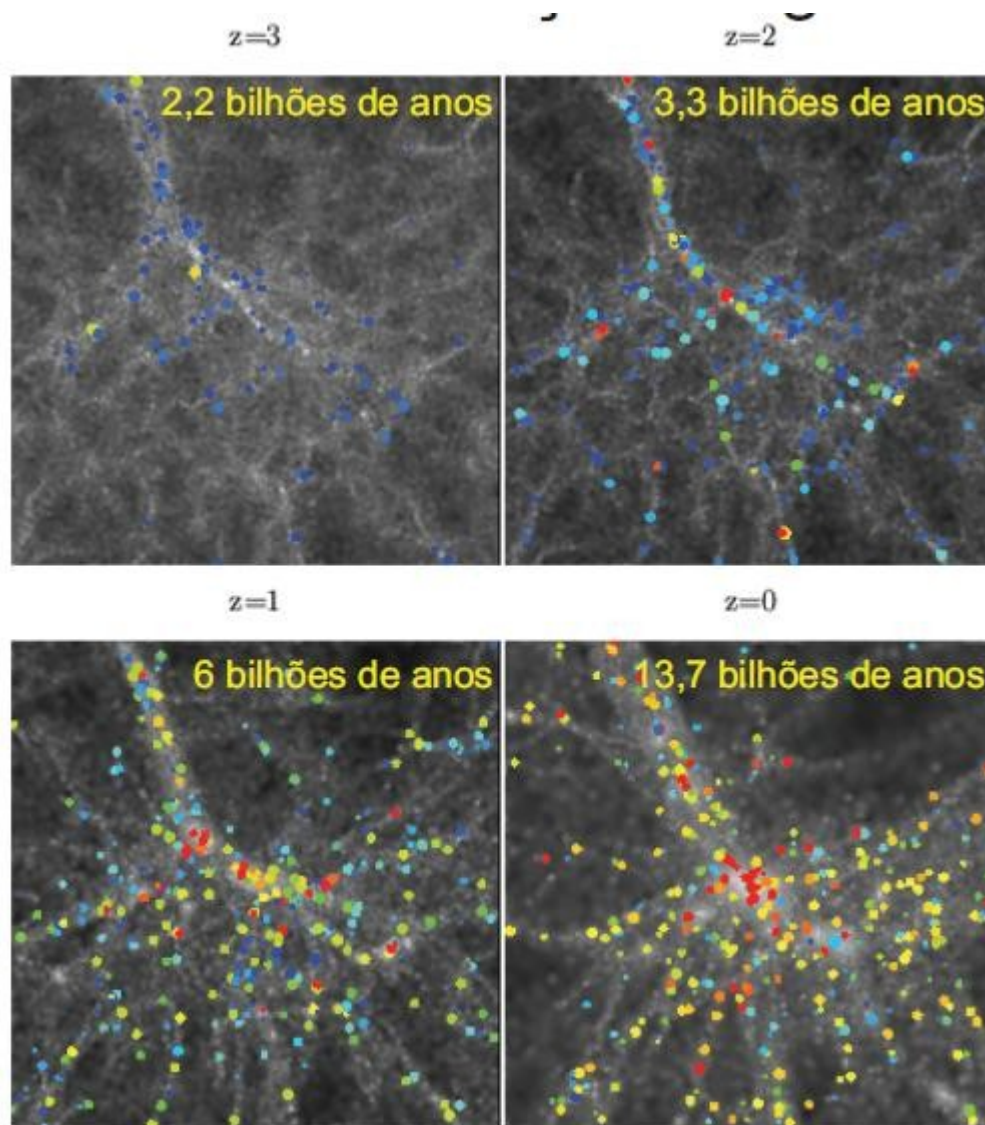
## Projeto *Illustris*

Vermelho: estrelas velhas

Azul: estrelas jovens

Galáxias mais vermelhas estão nas regiões mais densas do Universo (aglomerados de galáxias).

Galáxias mais azuis, com formação estelar contínua (como a Via Láctea) estão nos filamentos e grupos.



# Da Recombinação até hoje

## Projeto *Illustris*

Evolução temporal de uma região de 10 Mpc (comovente) até  $z = 0$ .

O filme alterna entre o campo de densidade de Matéria Escura, temperatura e metalicidade do gás:

[http://www.illustris-project.org/movies/illustris\\_movie\\_rot\\_sub\\_frame.mp4](http://www.illustris-project.org/movies/illustris_movie_rot_sub_frame.mp4)

# Da Recombinação até hoje

## Projeto *Illustris*

De esquerda  
para direita:

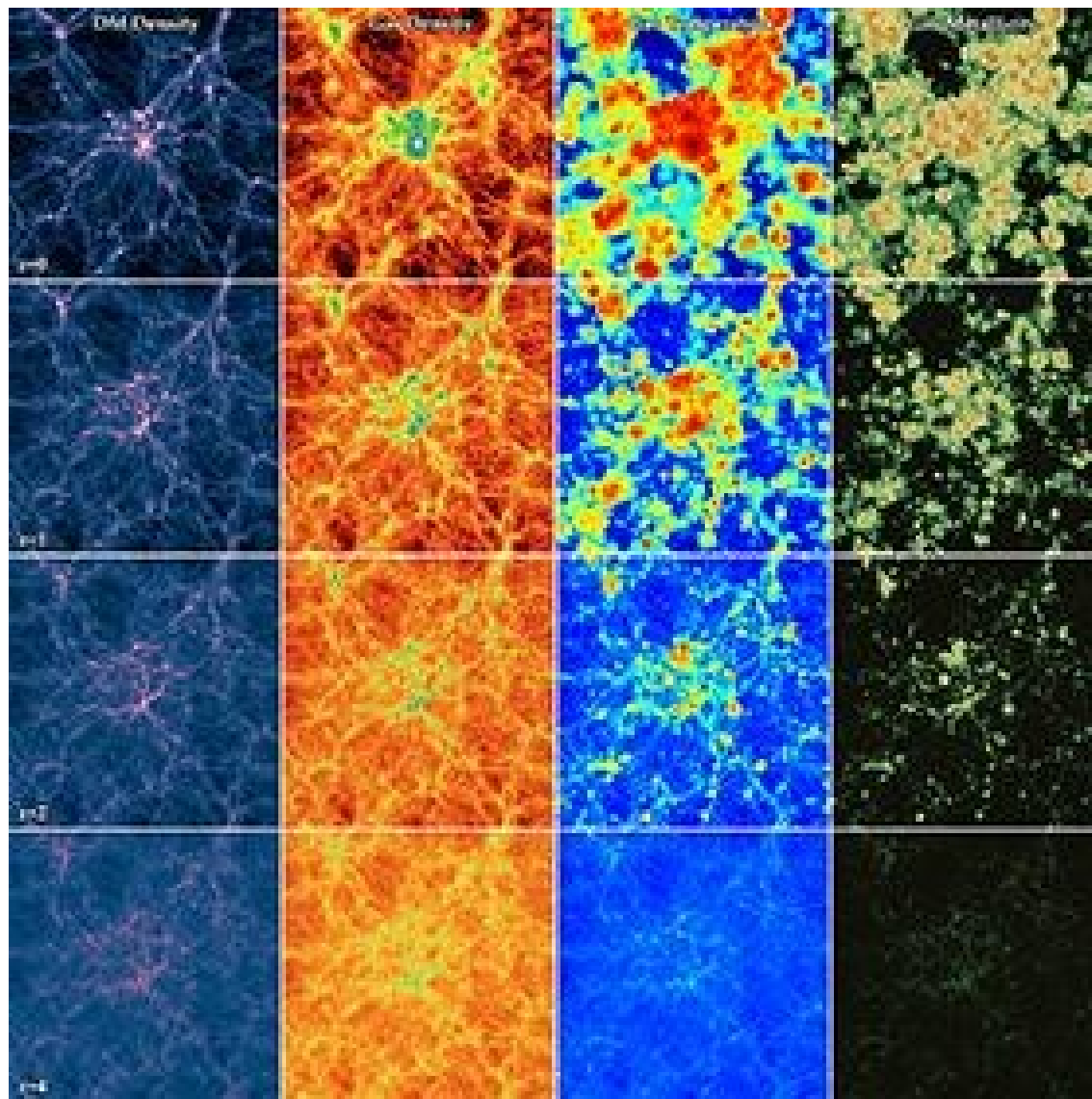
Densidade de  
Matéria Escura,

Densidade de gás,

Temperatura do gás,

Metalicidade,

de  $z = 4$  a  $z = 0$



# Do que consiste a Matéria Escura?

## Matéria Escura Fria (CDM): Problemas

Mas nas **escalas menores**, os modelos com Matéria Escura Fria também não reproduzem a distribuição de galáxias perfeitamente:

Elas prevêm muito **mais** (centenas de) **galáxias anãs** no **Grupo Local**, do que observado.

=> **Problema da galáxia anã**, também conhecido como o **problema dos satélites ausentes**.

Saídas possíveis são, que ainda não detectamos estas galáxias (galáxias anãs podem ser muito difíceis de observar),

ou que elas foram destruídas por forças de maré devido às galáxias grandes.



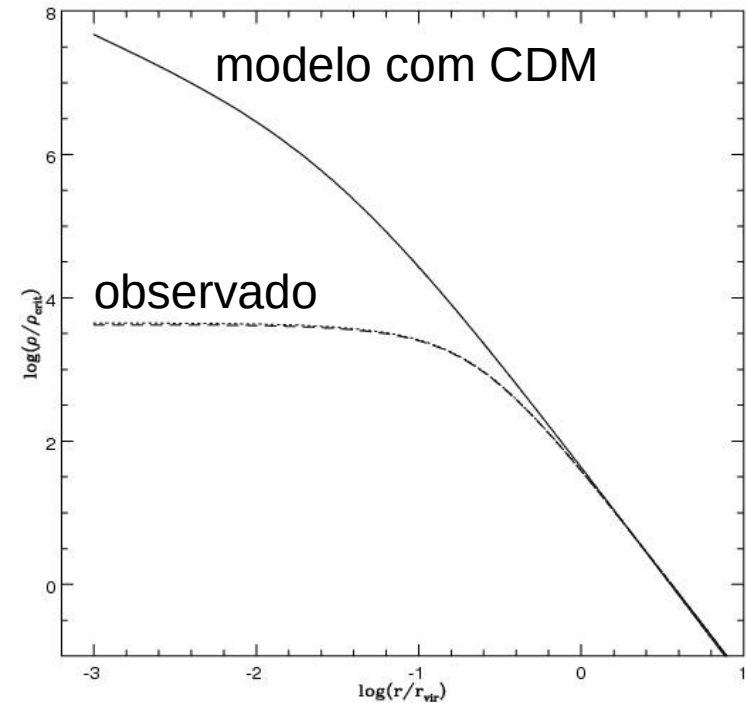
Fornax, uma galáxia dSph

# Do que consiste a Matéria Escura?

## Matéria Escura Fria (CDM): Problemas

O *cuspy halo problem*  
(problema dos halos pontudos?):

As distribuições de densidade em halos de Matéria Escura em simulações CDM são muito mais "pontudas" (concentradas no centro), do que é observado em galáxias investigando as curvas de rotação delas.



# Do que consiste a Matéria Escura?

Matéria Escura Fria (CDM): Problemas

Problema de morfologia galáctica:

Se galáxias cresceram **hierarquicamente**, então **galáxias de alta massa** requerem **muitas fusões**. **Fusões grandes** criam **bojos** inapagáveis.

Porém, ~80% das **galáxias observadas não** contêm **bojos**, e galáxias discos gigantes sem bojos são comuns. A fração de galáxias sem bojos foi quase constante por 8 bilhões de anos.

Tentativas de resolver os problemas incluem usar misturas CDM-HDM, ou até WDM (*Warm Dark Matter*, matéria escura morna, algo entre CDM e HDM).

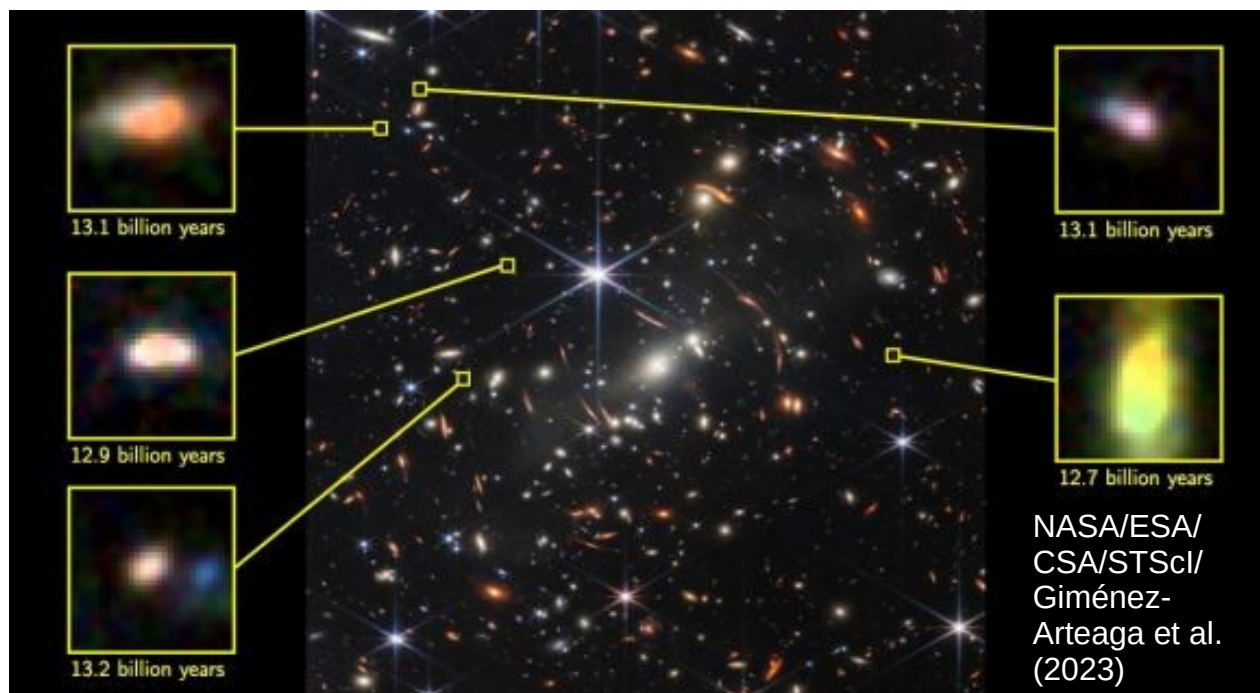
# Do que consiste a Matéria Escura?

## Matéria Escura Fria (CDM): Problemas

### Galáxias massivas em alto *redshift*

O *James Webb Space Telescope* detectou, em uma das suas primeiras imagens, galáxias com *redshifts* 7-10, que parecem ter massas altas demais para baterem com o cenário *bottom-up*.

Mas ainda é cedo para dizer, se realmente é um problema; pode ser um erro na determinação dos *redshifts*, que foram estimadas pela fotometria, e não medidas a partir de linhas espectrais.



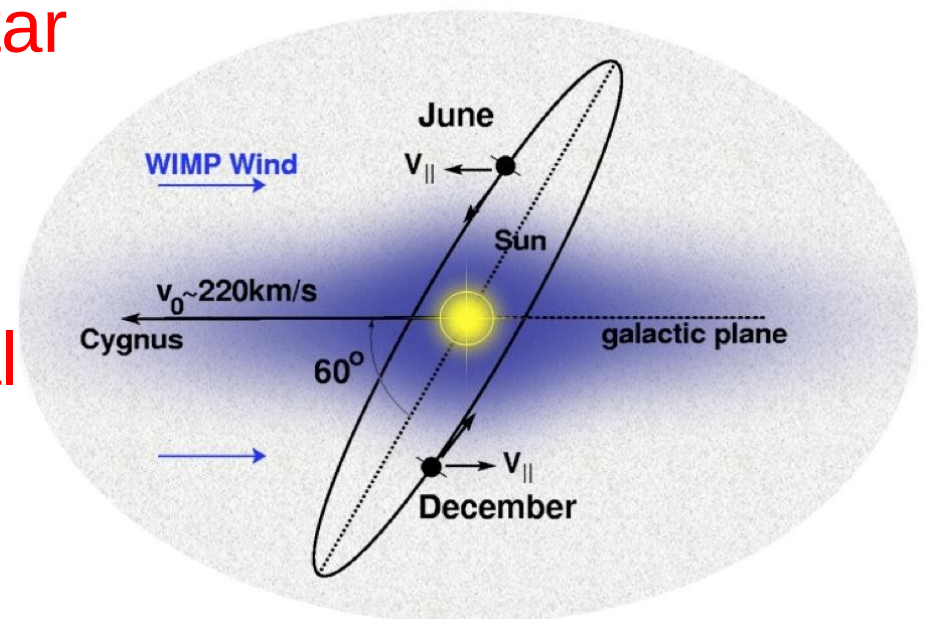
# Tentativas de Detecção

## Detecção Direta

Tentam detectar o **espalhamento** de **partículas** de **Matéria Escura** por **núcleos** de **átomos** em detectores.

O **Sistema Solar** deve sentir um "vento" de milhões a bilhões destas partículas por  $\text{cm}^2$  e s (dependendo da massa delas) ao se **movimentar** pelo **halo** de **Matéria Escura** da **Via Láctea**.

Na **Terra**, este vento deveria mostrar uma **modulação anual** (mais em junho e menos em dezembro).



# Tentativas de Detecção

## Detecção Direta

Quando um WIMP "bate" num **núcleo**, este sofreria um **recuo** de **alguns keV** e emitiria **luz** de **scintillação** ou **fónons**, que poderia ser detectado por um detector hipersensível.

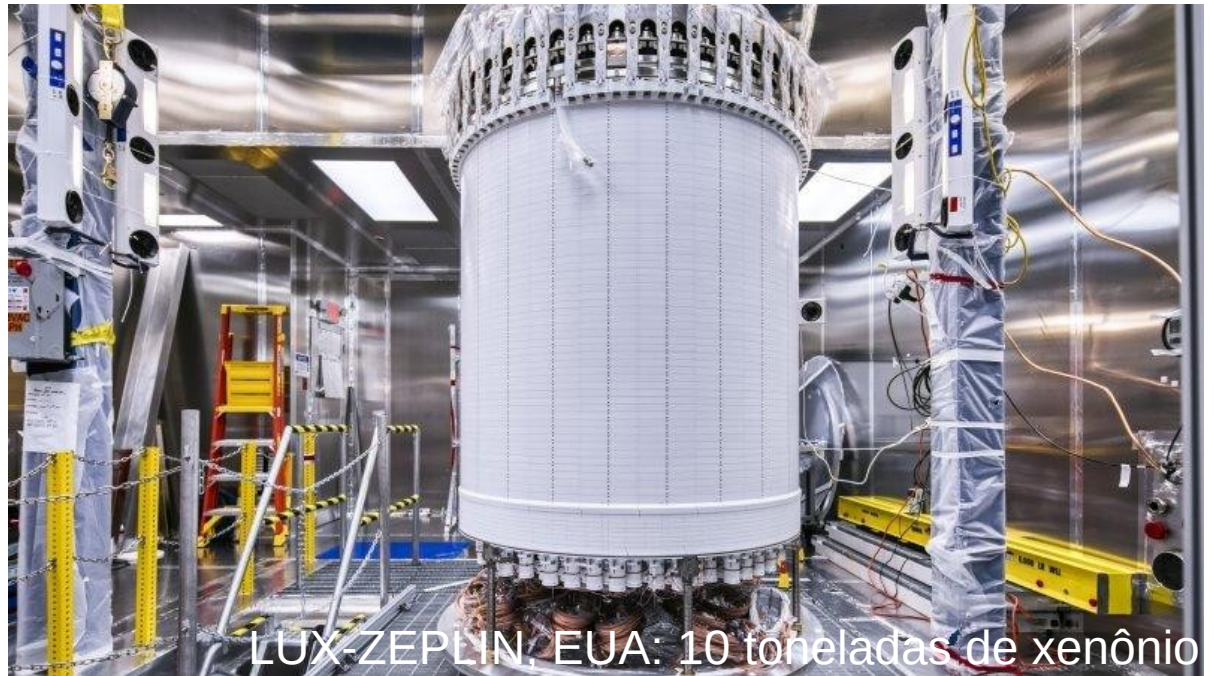
Para isto, o experimento tem que ser feito num lugar **bem debaixo** do **chão** para evitar interferência de raios cósmicos (as minas Stawell e Soudan, laboratórios subterrâneos SNOLAB em Sudbury, Gran Sasso, Canfranc, Boulby, *Deep Underground Science and Engineering Lab.* e *China Jinping Underground Lab.*).

# Tentativas de Detecção

## Detecção Direta

Na maioria usam **cristais** a **temperaturas  $< 100$  mK** (por exemplo Germânio; CDMS, CRESST, EDELWEISS, EURECA)

ou **líquidos nobres** como **xenônio** ou **argônio** (LZ, XENON, DEAP, ArDM, WARP, DarkSide, PandaX, LUX, *Large Underground Xenon experiment*).



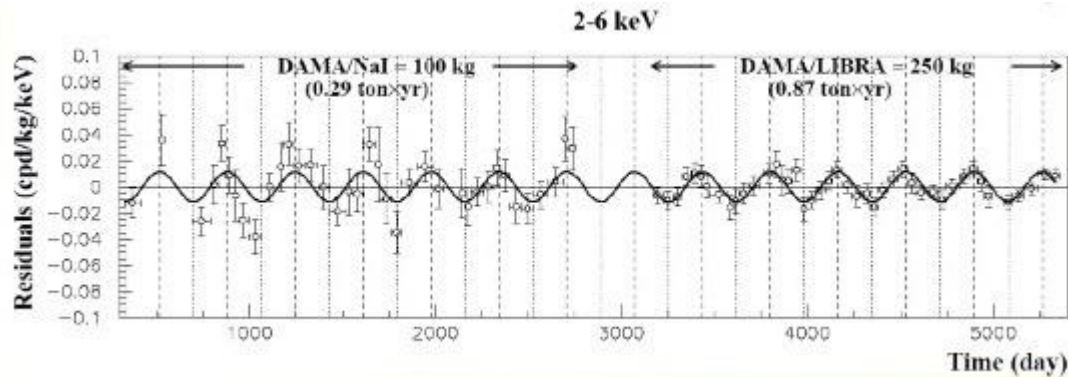
LUX-ZEPLIN, EUA: 10 toneladas de xenônio

E há mais experimentos (SIMPLE, PICASSO; DMTPC, DRIFT, Newage and MIMAC).

# Tentativas de Detecção

## Detecção Direta

Alguns experimentos alegam **detecções**:



- DAMA/LIBRA: sinal claro (8.9 sigma)
- CoGent: pequena modulação
- CRESST e CDMS: alguns eventos acima do ruído

mas **nenhuma** destas detecções é **confirmada** por outros experimentos...

# Tentativas de Detecção

## Detecção Indireta

Tentam detectar os **produtos** de **aniquilação** ou **decaimento** das partículas.

Estes produtos poderiam incluir **raios gama**, **neutrinos**, pares próton-**antipróton** ou elétron-**pósitron**.

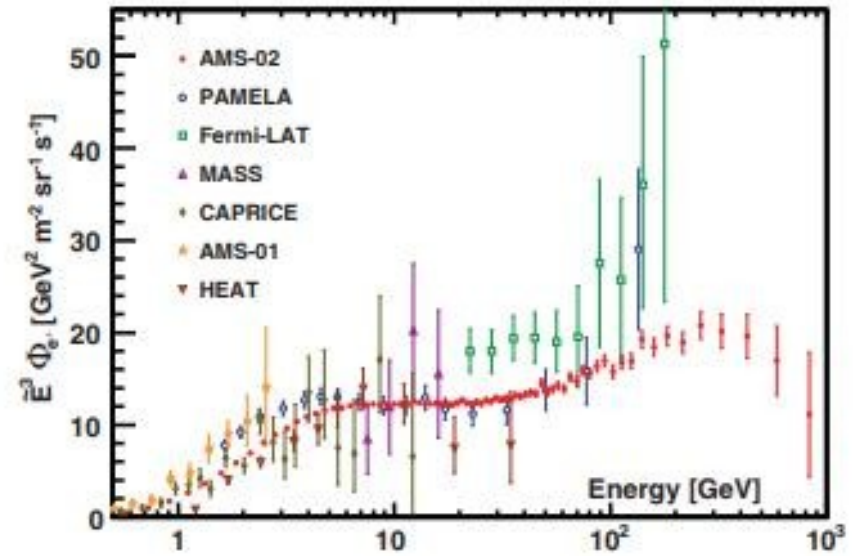
Alguns destes  $e^+$  se aniquilariam de novo com  $e^-$ , resultando em **radiação característica** de **511 keV**.

Vários detectores "olham" para **regiões** de provável **alta densidade** de **Matéria Escura** (regiões **centrais** de **galáxias**, em particular a nossa) por sinais destes produtos (AMANDA, *IceCube* e ANTARES:  $\nu$ ; *Fermi Gamma-ray Space Telescope*, PAMELA, HEAT, INTEGRAL-SPI, ...).

# Tentativas de Detecção

## Detecção Indireta

INTEGRAL-SPI detectou um **sinal intenso** em **511 keV** vindo do **centro Galáctico**, e HEAT, PAMELA e FERMI, um **excesso** de **pósitrons** em **raios cósmicos**!



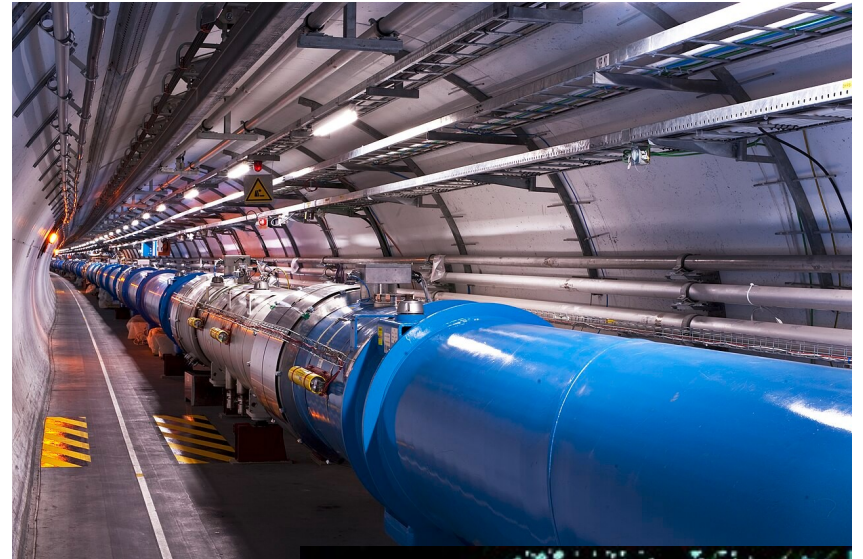
Promissor, mas há vários **outros processos** astrofísicos que **podem** produzir **pósitrons**.

Como saber, se a fonte foi decaimento ou aniquilação de Matéria Escura?

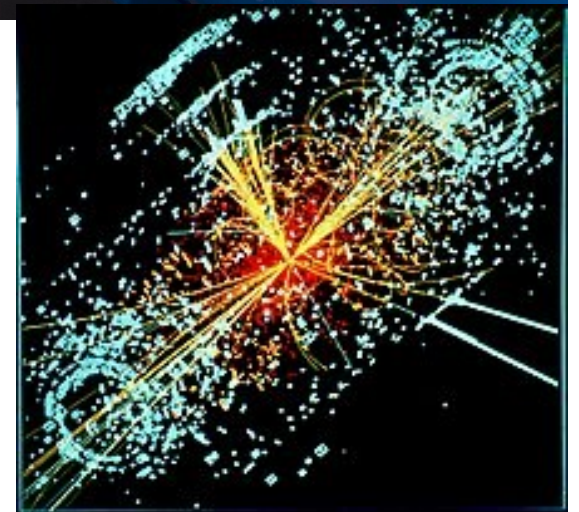
# Tentativas de Detecção

## Criação em Aceleradores de Partículas

Por exemplo, no *Large Hadron Collider* (LHC) no *European Organization for Nuclear Research* (CERN, França/Suíça).



A produção de uma partícula de Matéria Escura se manifestaria como **energia faltante** no "chuveiro" de **produtos** de uma **colisão**.



# Tentativas de Detecção

## Criação em Aceleradores de Partículas

Em 2000 em uma conferência, especialistas apostaram que o LHC teria em 10 anos de operação dados suficientes para confirmar ou negar a existência d(as mais leves)

**partículas supersimétricas** .

=> *SUSY Bet*.

Até agora **não acharam** (mas acharam o bóson de Higgs, o que era esperado).

Quem sabe, em **energias** / massas **mais altas?**

2011 Copenhagen Conference  
**Wager on Supersymmetry**

Question: Do you believe that by noon CET on June 16<sup>th</sup>, 2016, that at least one supersymmetric partner of any of the known particles will be experimentally discovered?

By signing "yes" or "no" you promise to deliver a bottle (75cl) of good cognac at a price not less than \$100, in case you are wrong.

This is an addendum to the 2000 Wager on Supersymmetry. Those who signed the previous wager may either sign again (at a forfeit of two bottles of cognac) or accept they have suffered ignominious defeat.

Yes	No	Abstain
Marius Guedesius MAKEENKO Stella SHIH D. O'Connell Erik Bjarrum-Bør Kim ERLITOFF Simon-Henri Giulio Giganti B. P. (HMAS) Oliver Schlotterer Yang Zhang Hidetaka Shimoda Agnese Pizzi Thomas Spillner (See over.)	f. 't Hooft *) Z. Konaradzki A. Jenkins P.H. Damgaard Alexander Kober Savvas Ntseketis Smau Basso KOSTA ZARENSKI Albano Guffanti Helger Beck-Hacken S. Corum-Huet Henrik J. Song He Kasper Larsen	Neubauer Kinnar John G.H.

\*) But both sides will claim victory

Yes	No	Abstain
COSTAS ZORBO Nicolas Martin Mads Obers D.S. Berman Christoph Kitz R. Rahn	P. Caputa A. Buchwalter Jacobus Verbaarschot G. Korchemsky G. MACOLINI Ettie R. Bock Jiri Ben Peter Orland Richard Ball	



Universidade Federal do ABC

# Introdução à Cosmologia

## FIM PRA HOJE

