

INTRODUCCIÓN A LA ASTROFÍSICA RELATIVISTA

Gustavo E. Romero
Cursada 2020, FCAyG/UNLP

Cosmología

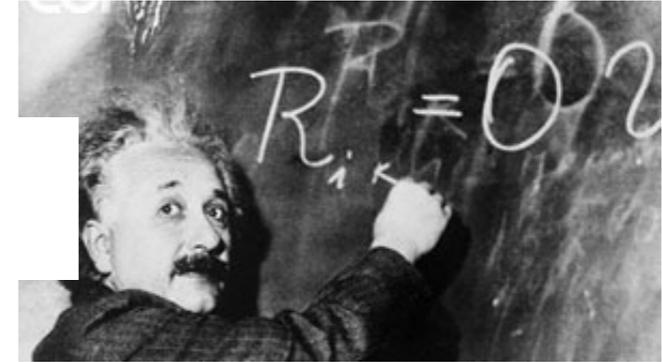
La **cosmología** es la rama de la física que trata de modelar el universo y su evolución. Investiga sus propiedades físicas.

El **universo** es el sistema físico que forman todas las cosas.

La cosmología es “megafísica”, o sea, la forma más extrema de la macrofísica.

La **cosmogonía**, en cambio, es el intento de explicar del origen del universo. En general la cosmogonía recurre al pensamiento mágico postulando la existencia de cosas fuera de la totalidad de las cosas...lo que es absurdo.

Cosmología relativista.

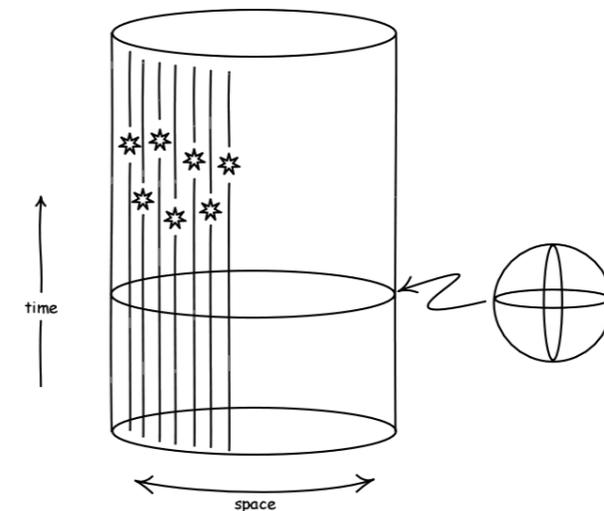


- ▶ En 1915 Albert Einstein formula la teoría general de la relatividad: una nueva teoría del campo gravitacional.
- ▶ La teoría describe la gravitación como efecto de la curvatura del espacio-tiempo, cuya geometría es pseudo-Riemanniana.
- ▶ La curvatura, en última instancia, es determinada por el contenido de energía de los objetos cuyos cambios forman el espacio-tiempo

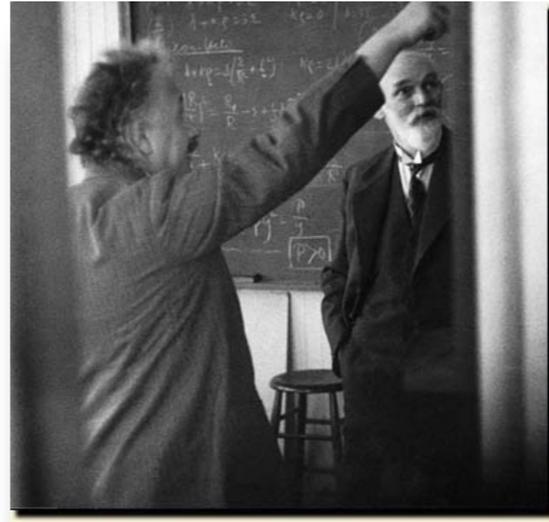
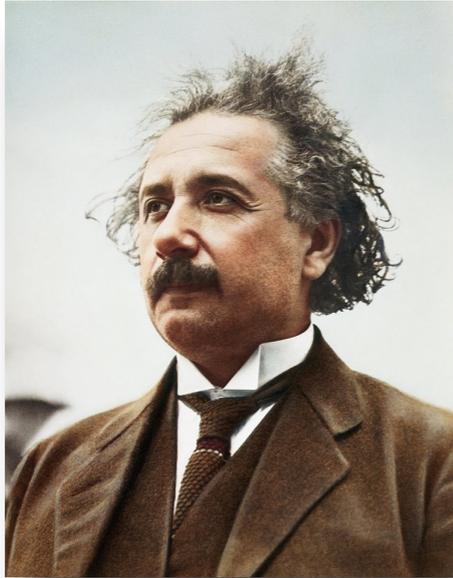
Cosmología relativista.

- Einstein fue el primero en aplicar su teoría de la gravitación al Universo, en 1917
- Consideró un Universo homogéneo, isótropo, e inmutable, de acuerdo con lo conocido en su época.
- Llegó a la conclusión que tal Universo no sería estable sino que debería estar en un estado dinámico y modificó sus ecuaciones para incluir repulsión gravitacional:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = -(8\pi G/c^4)T_{\mu\nu}.$$

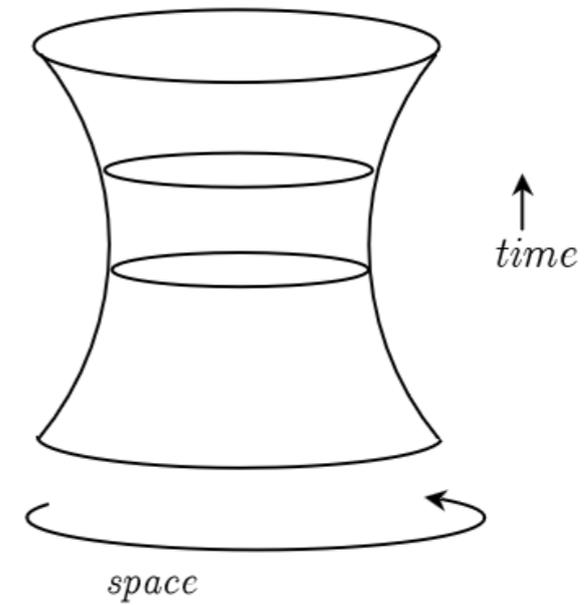
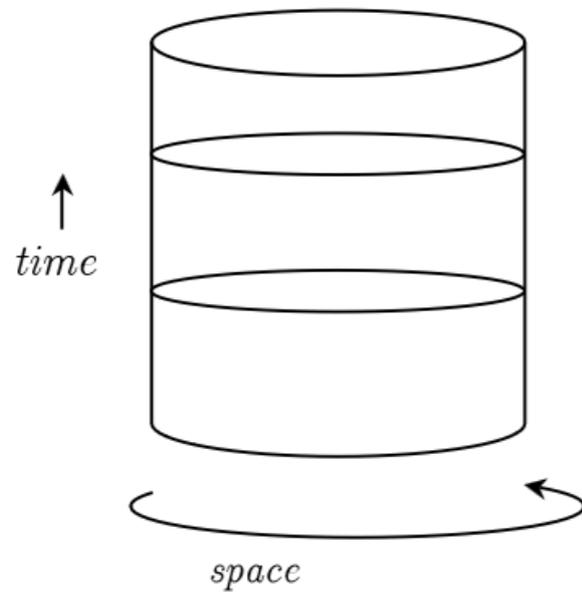


Λ = constante cosmológica.



3a. Einstein Universe (1917)

3b. de Sitter Universe (1917)

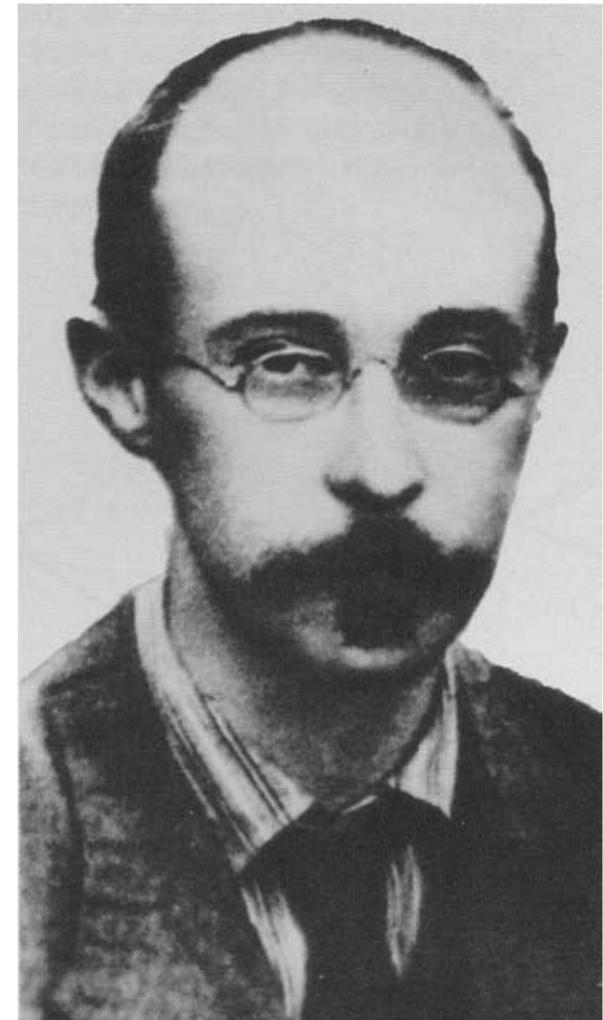


Cosmología relativista.

- Alexander Friedman supuso que el universo podía ser descrito por un gas dinámico, homogéneo e isotrópico.
- Obtuvo modelos dinámicos de universos, que podían estar en expansión o contracción de acuerdo con las condiciones iniciales.
- Métrica de FRWL:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta)^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2 \right].$$

a(t)=factor de escala del Universo



Ecuación dinámica del universo

acceleration

gravity

cosmological constant

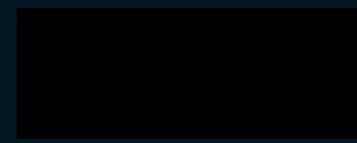
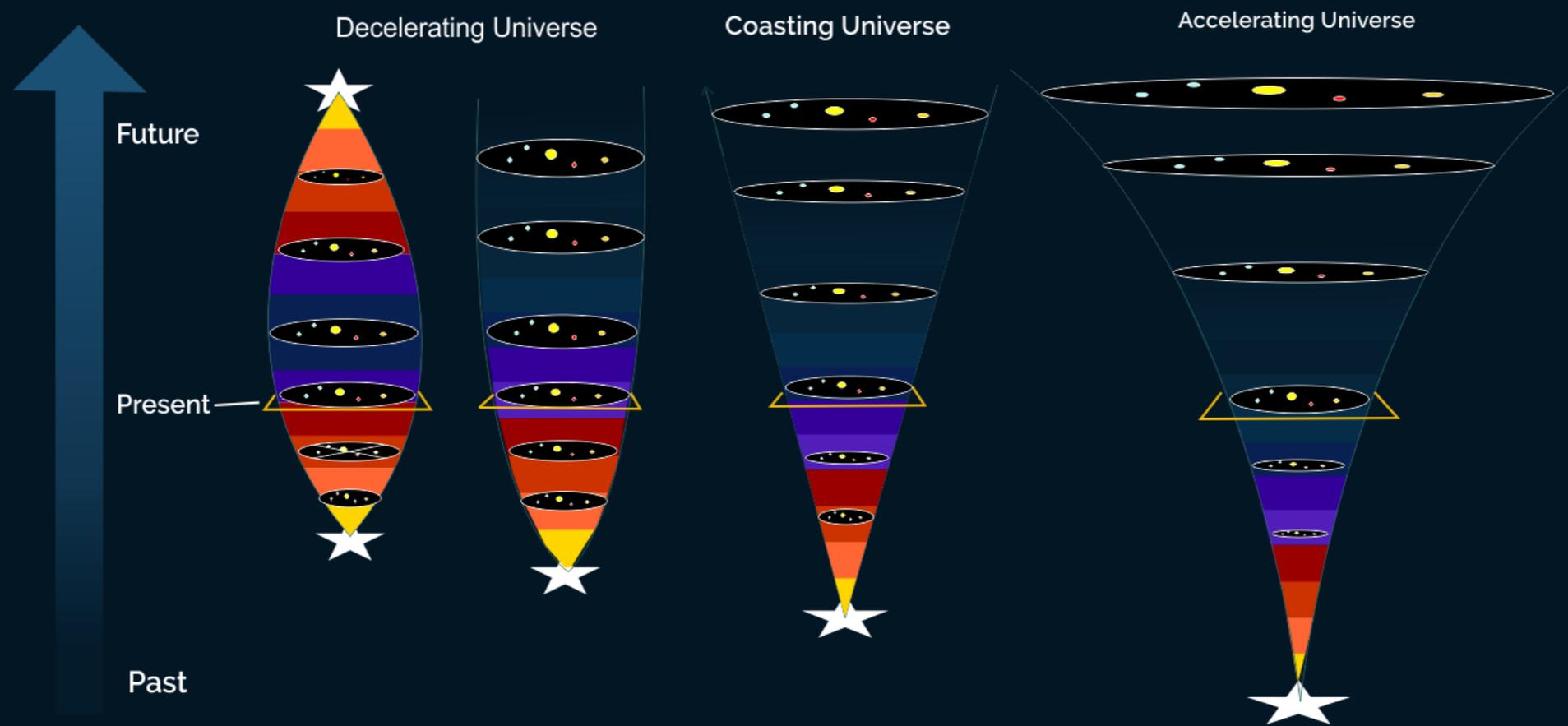
$$\frac{\ddot{a}}{a} = - \frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$

slows down expansion

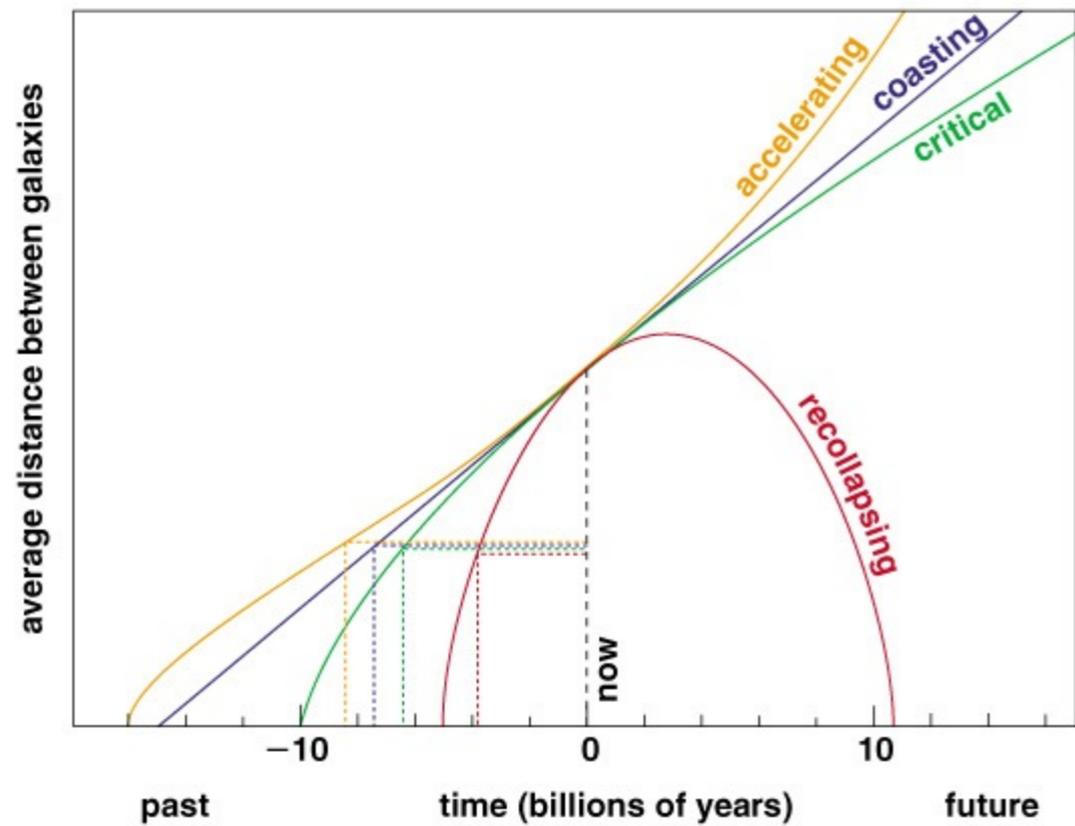
speeds up expansion

The diagram illustrates the dynamic equation of the universe. It features three main terms in the equation, each enclosed in a colored box and labeled above. The first term, $\frac{\ddot{a}}{a}$, is in a purple box and labeled 'acceleration'. The second term, $-\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)$, is in a green box and labeled 'gravity'. The third term, $+\frac{\Lambda}{3}$, is in a red box and labeled 'cosmological constant'. Below the equation, two arrows point upwards: a green arrow points to the negative sign and the gravity term, labeled 'slows down expansion'; a red arrow points to the plus sign and the cosmological constant term, labeled 'speeds up expansion'.

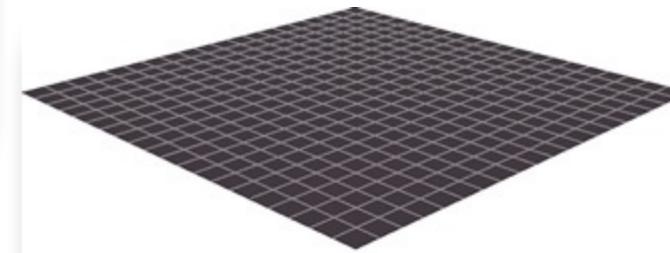
Expansion of the Universe



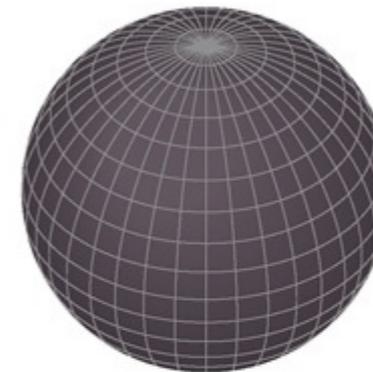
$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_{crit}}$$



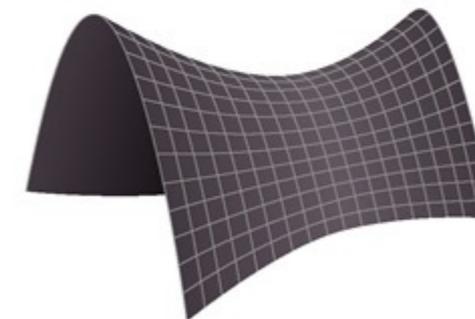
Copyright © Addison Wesley.



flat (critical) geometry



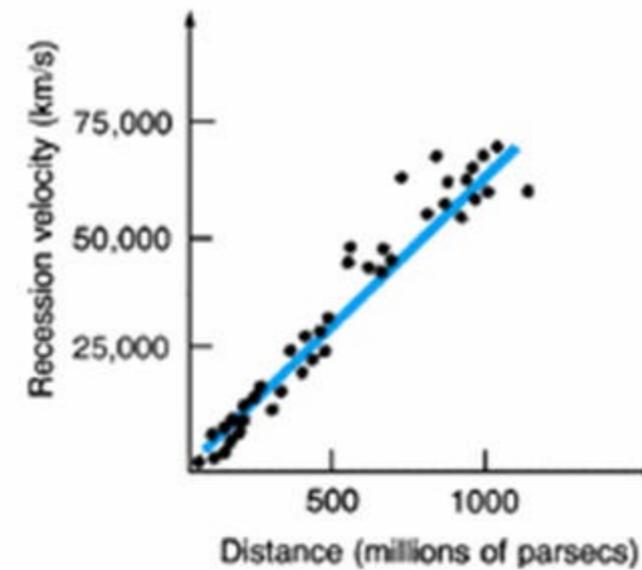
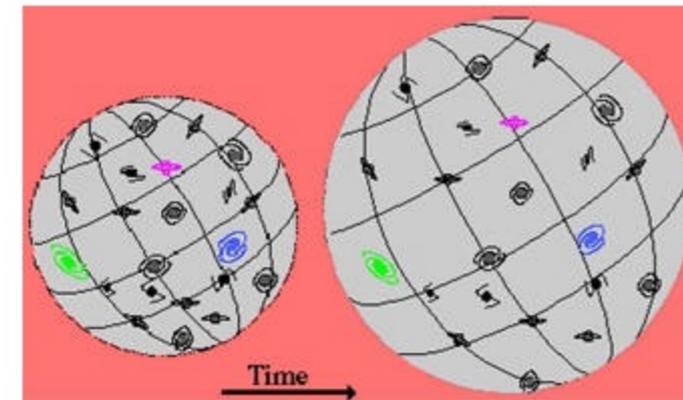
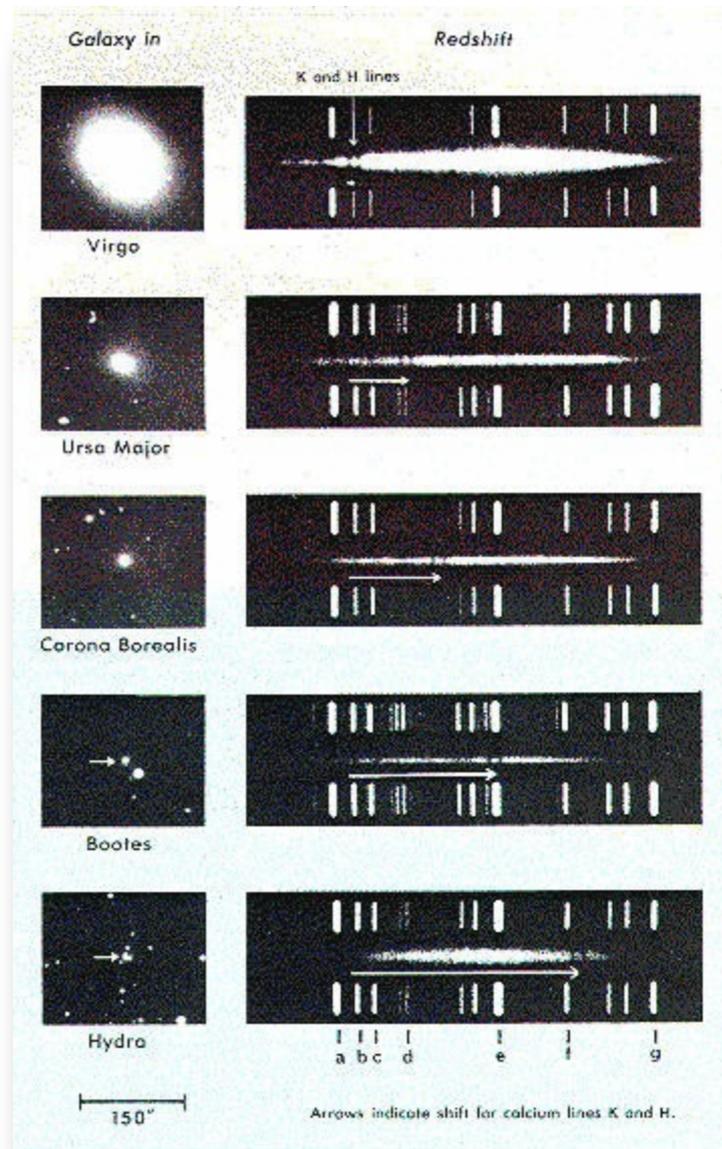
spherical (closed) geometry



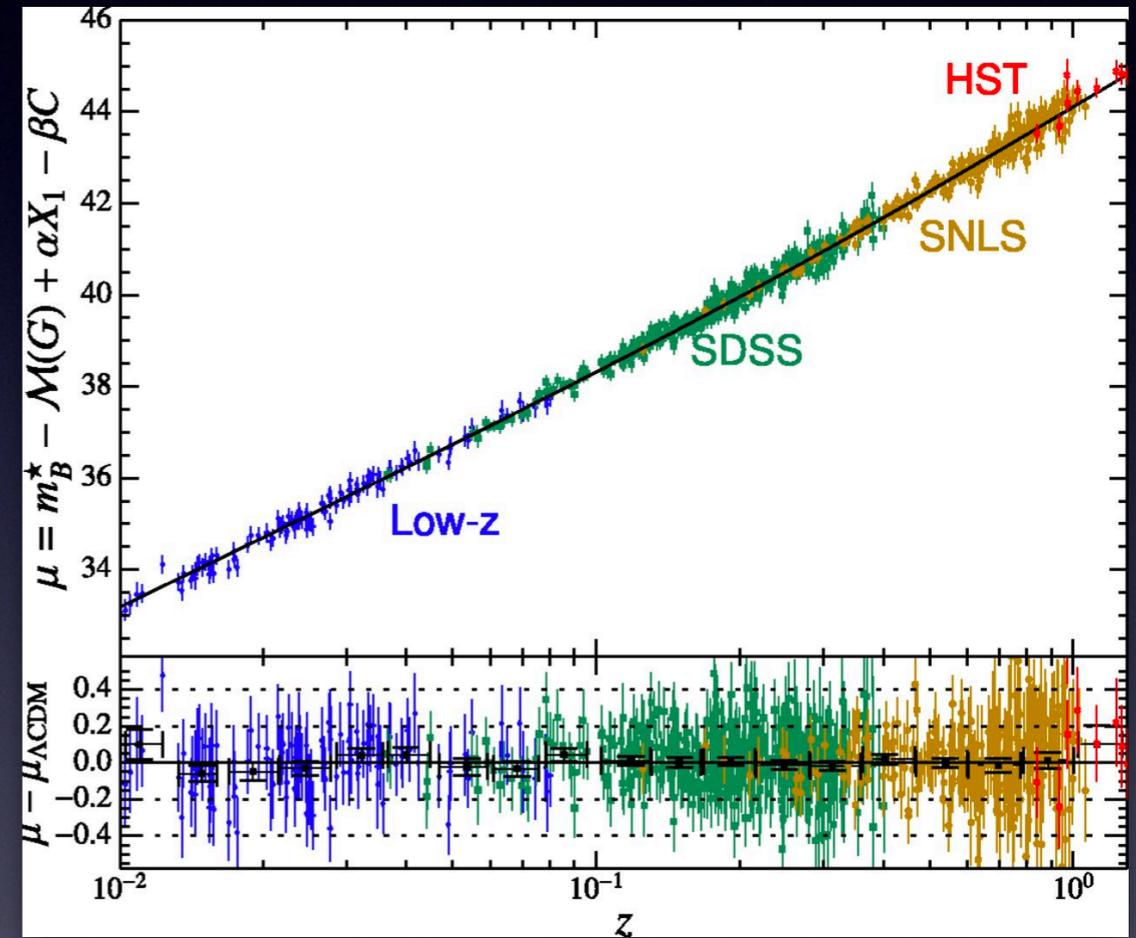
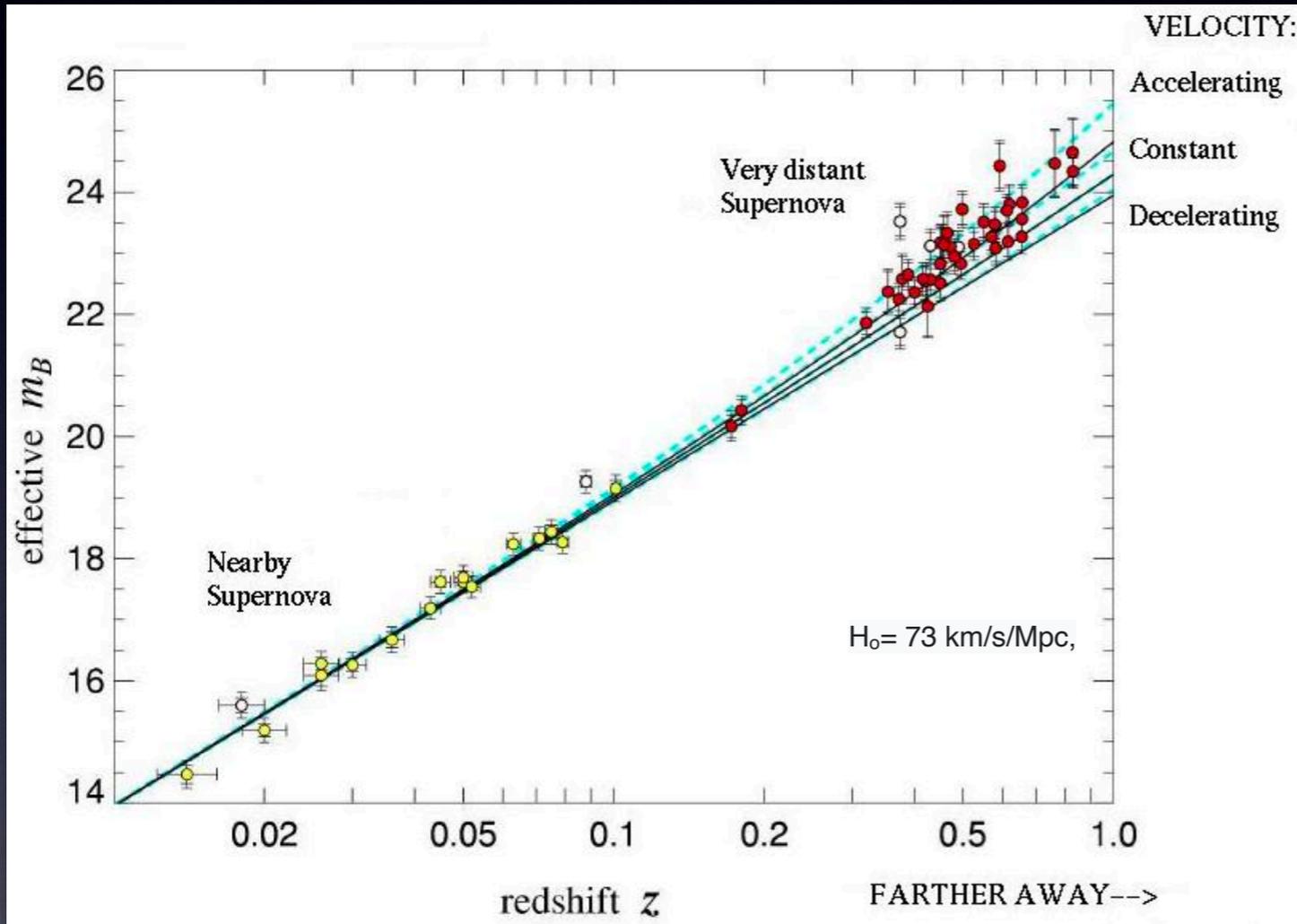
saddle-shaped (open) geometry

© 2005 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley

¿Cuál es el estado dinámico del universo?



El universo se expande aceleradamente



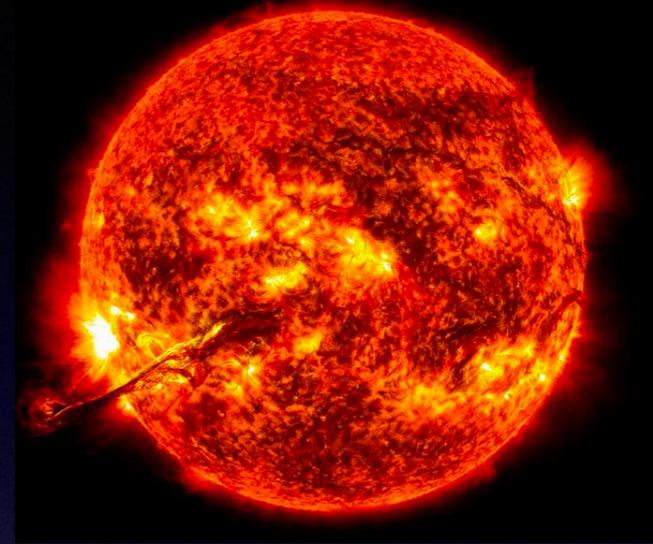
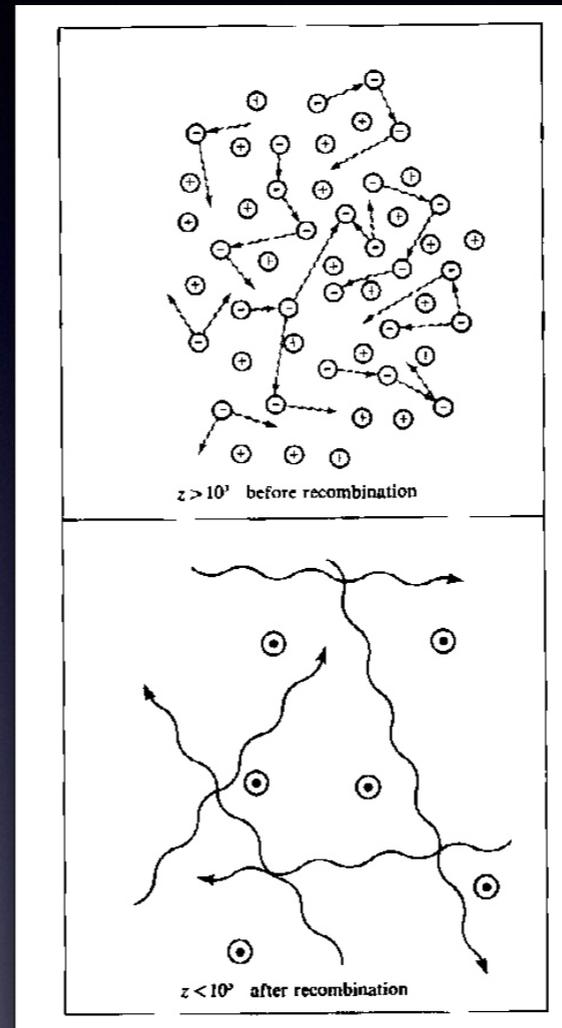
Si el universo se expande
y la energía se conserva,
antes estaba más
caliente...

Época dominada por la radiación
Acoplamiento materia - radiación

“Recombinación”
desacople materia - radiación



Debería existir una radiación
universal de fondo, con un
espectro de cuerpo negro



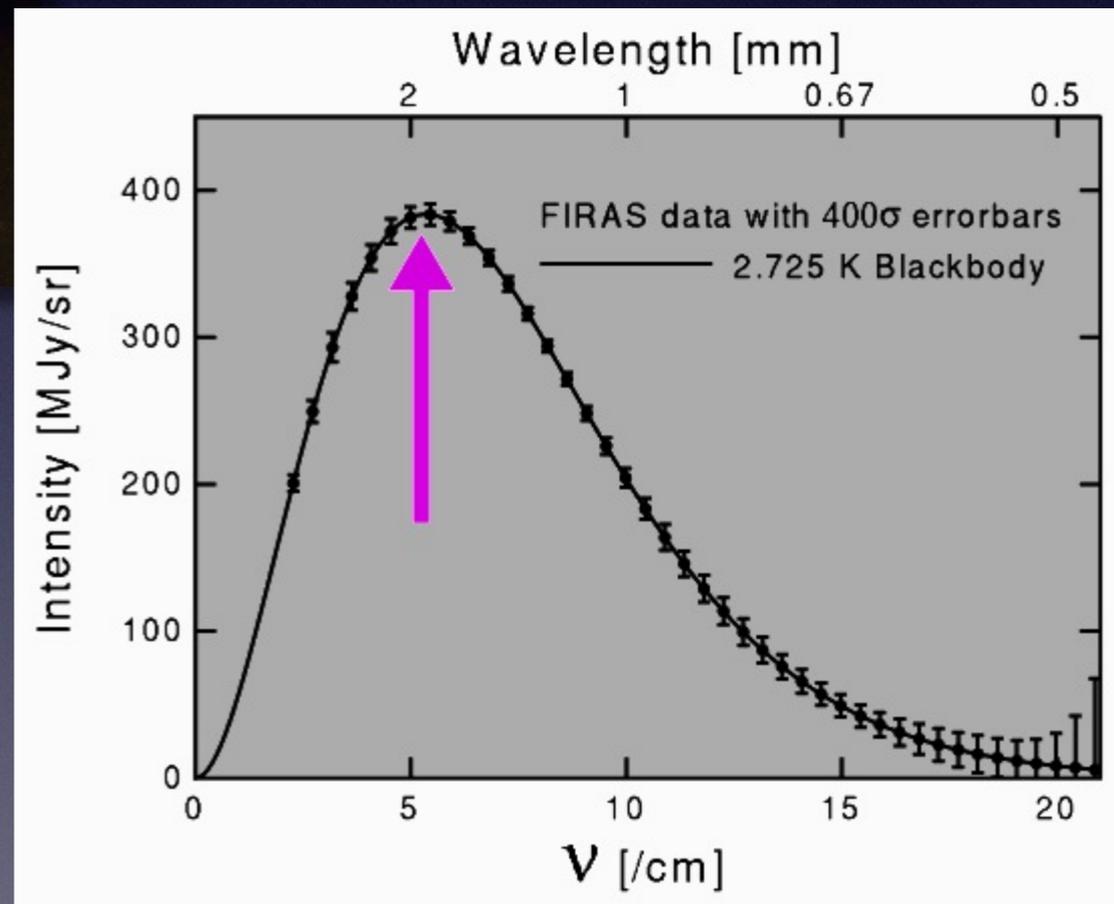
Plasma $T \sim 3000 \text{ K}$

H + He

$z \sim 1000$



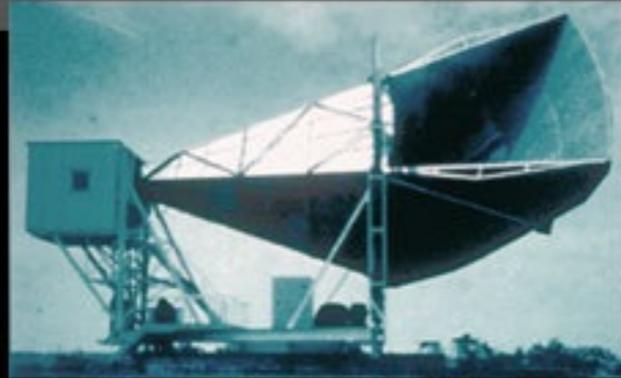
COBE satellite



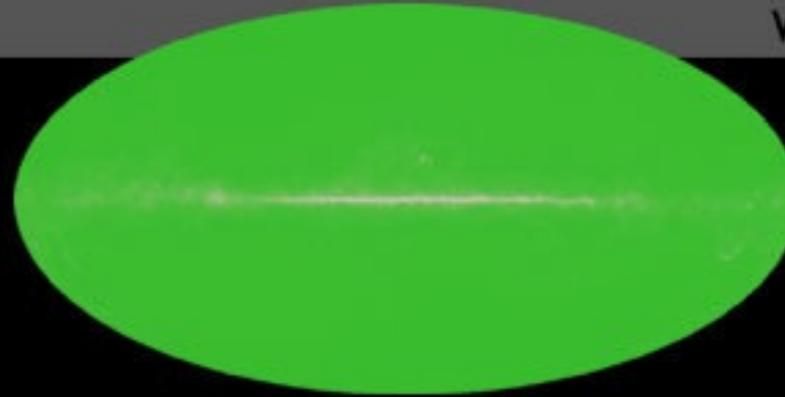
¿Qué es el modelo Λ CDM?

- Un modelo de “6 parámetros” que incorpora la gravedad de Einstein con Λ , bariones, neutrinos, fotones, materia oscura fría y un “big bang” caliente.
- Supone isotropía y homogeneidad (métrica FLRW).
- El desarrollo temporal del sistema se obtiene asumiendo la validez de la física nuclear y de partículas junto con las ecuaciones de Friedman.

1965



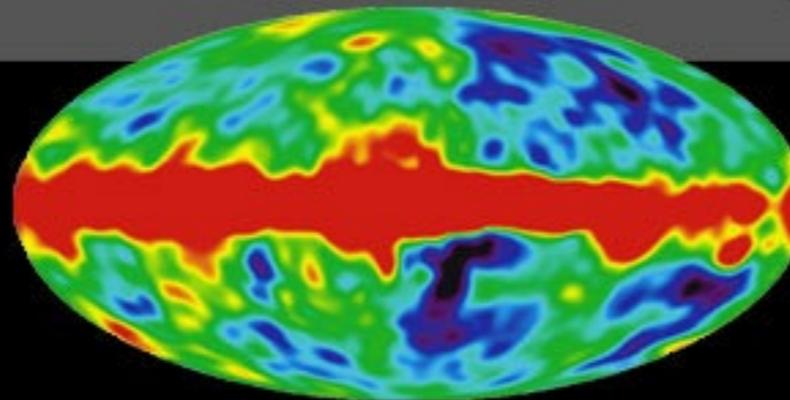
Penzias and
Wilson



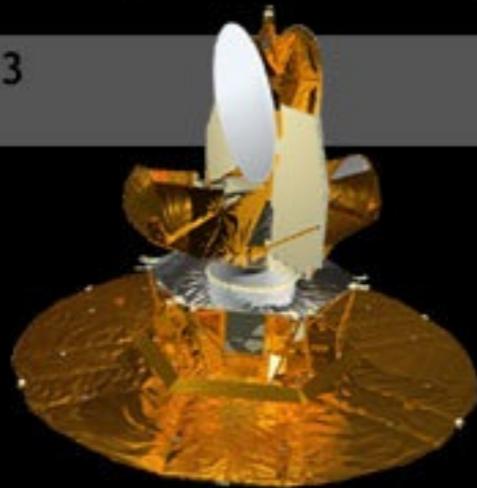
1992



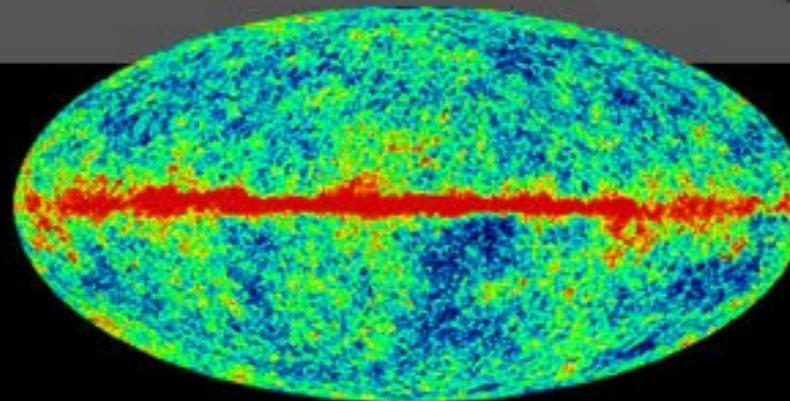
COBE



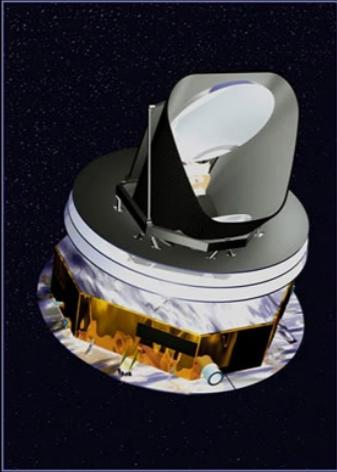
2003



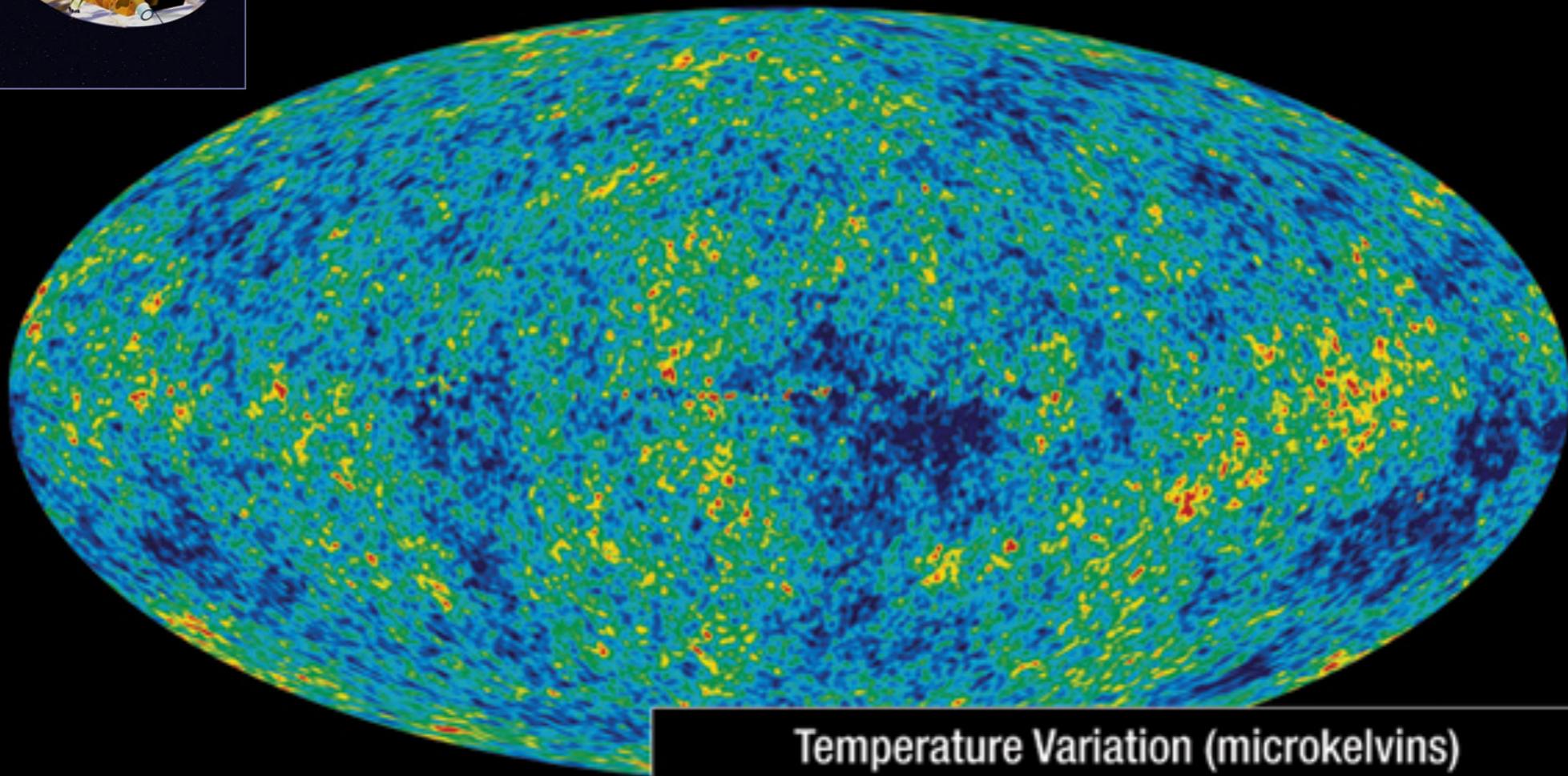
WMAP



Planck



MICROWAVE BACKGROUND



Temperature Variation (microkelvins)

-200

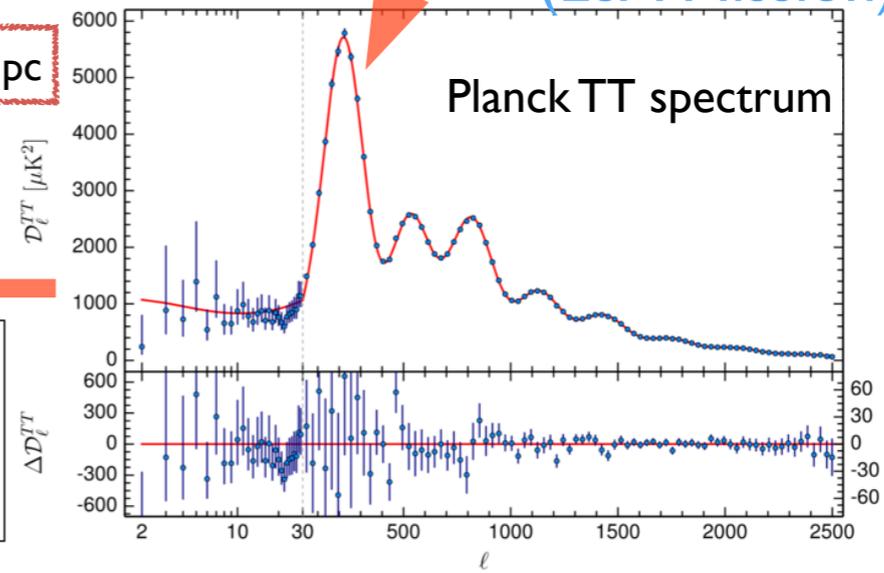
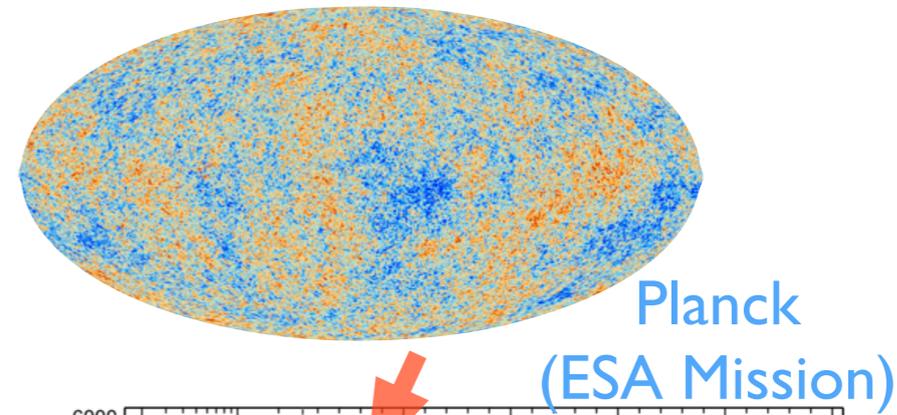
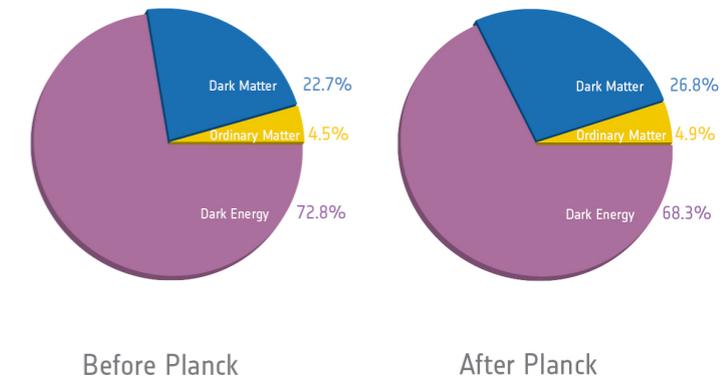
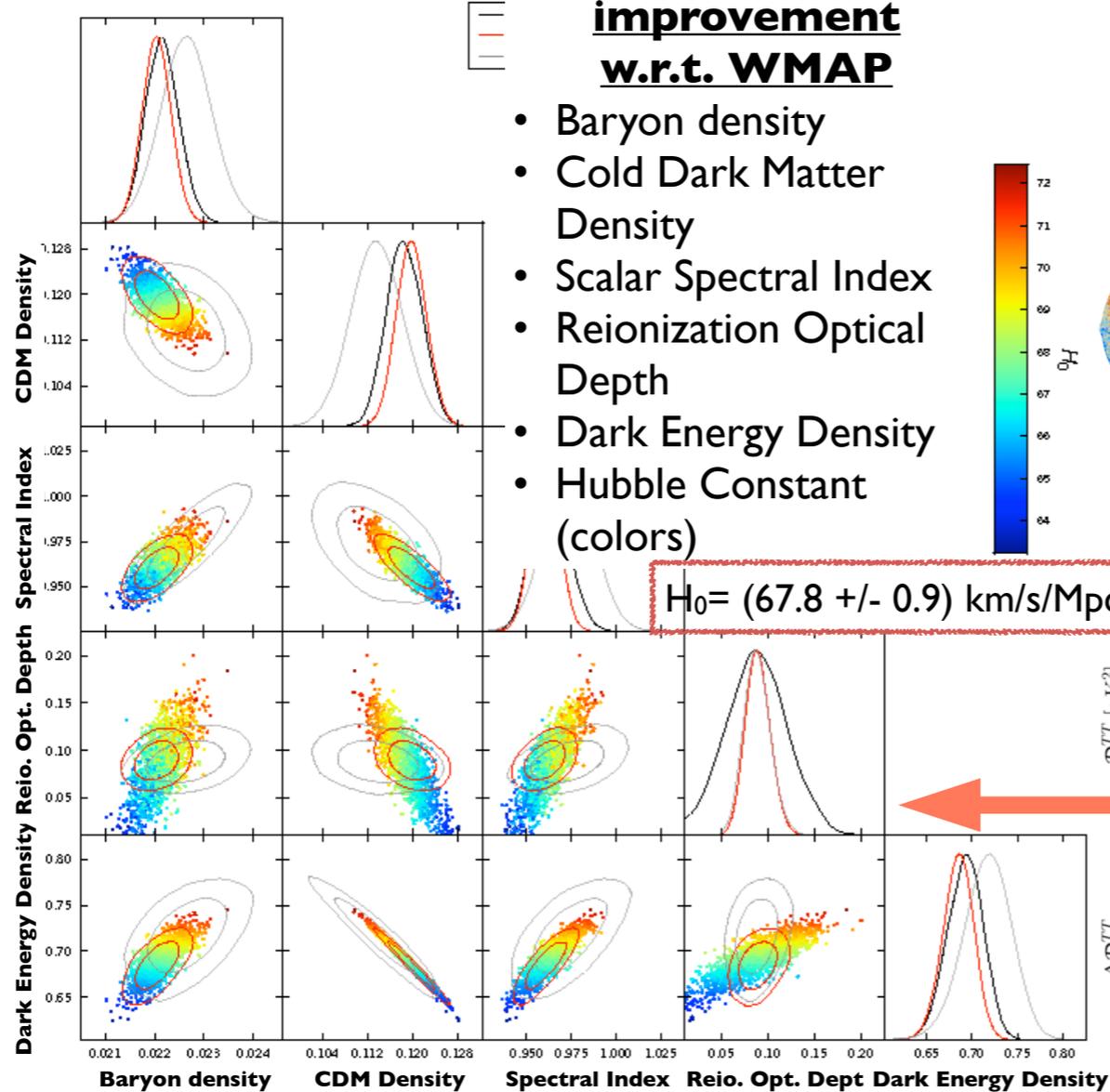
+200

Resultados del satélite Planck

Planck 2015 results. XIII.
Cosmological parameters, A&A

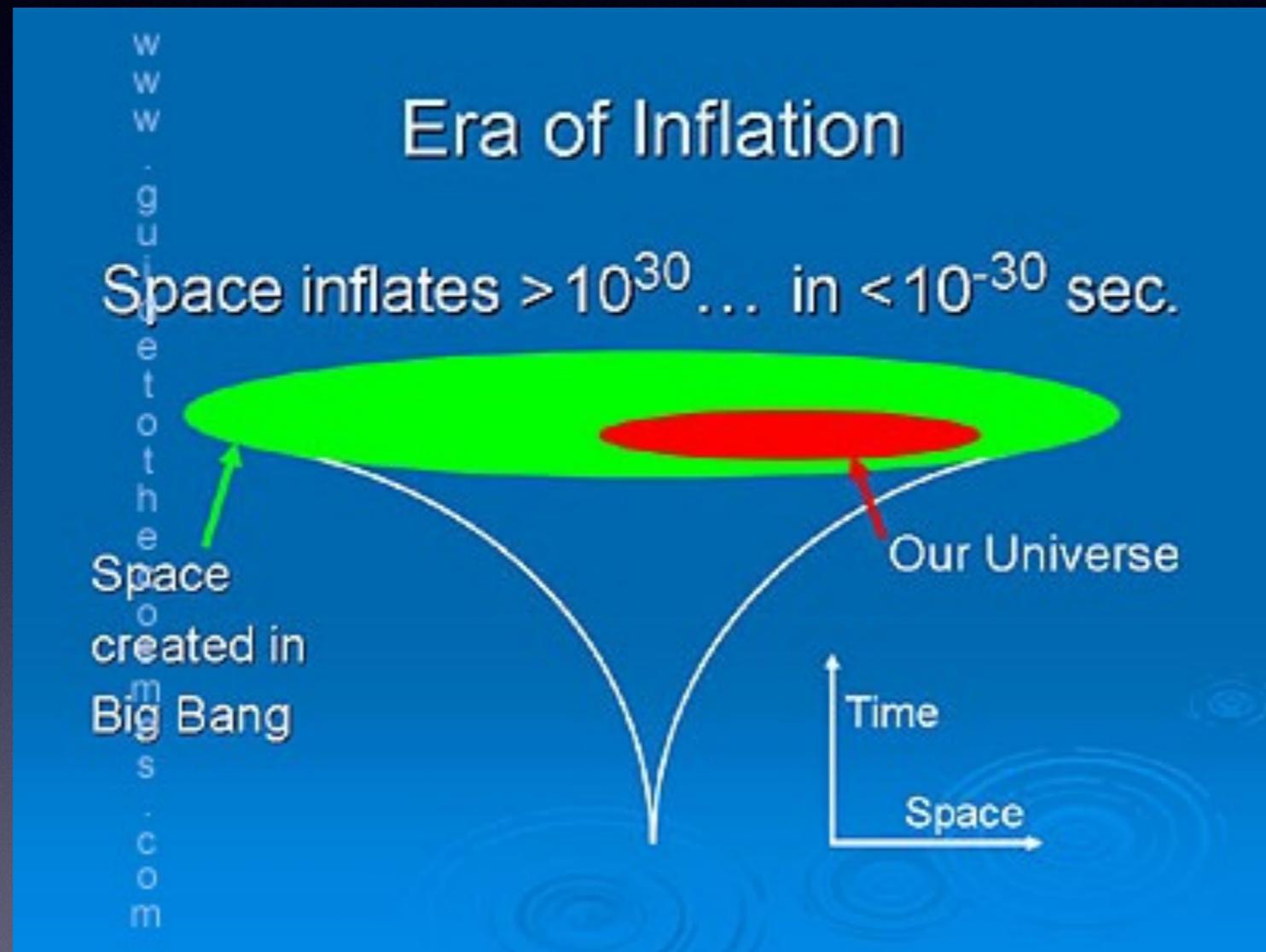
Factor 3 improvement w.r.t. WMAP

- Baryon density
- Cold Dark Matter Density
- Scalar Spectral Index
- Reionization Optical Depth
- Dark Energy Density
- Hubble Constant (colors)



Sin embargo, el modelo Λ CDM no está exento de problemas: Homogeneidad del CMB, chatura espacial, origen de las fluctuaciones, tensión de Hubble...

¿Inflación?

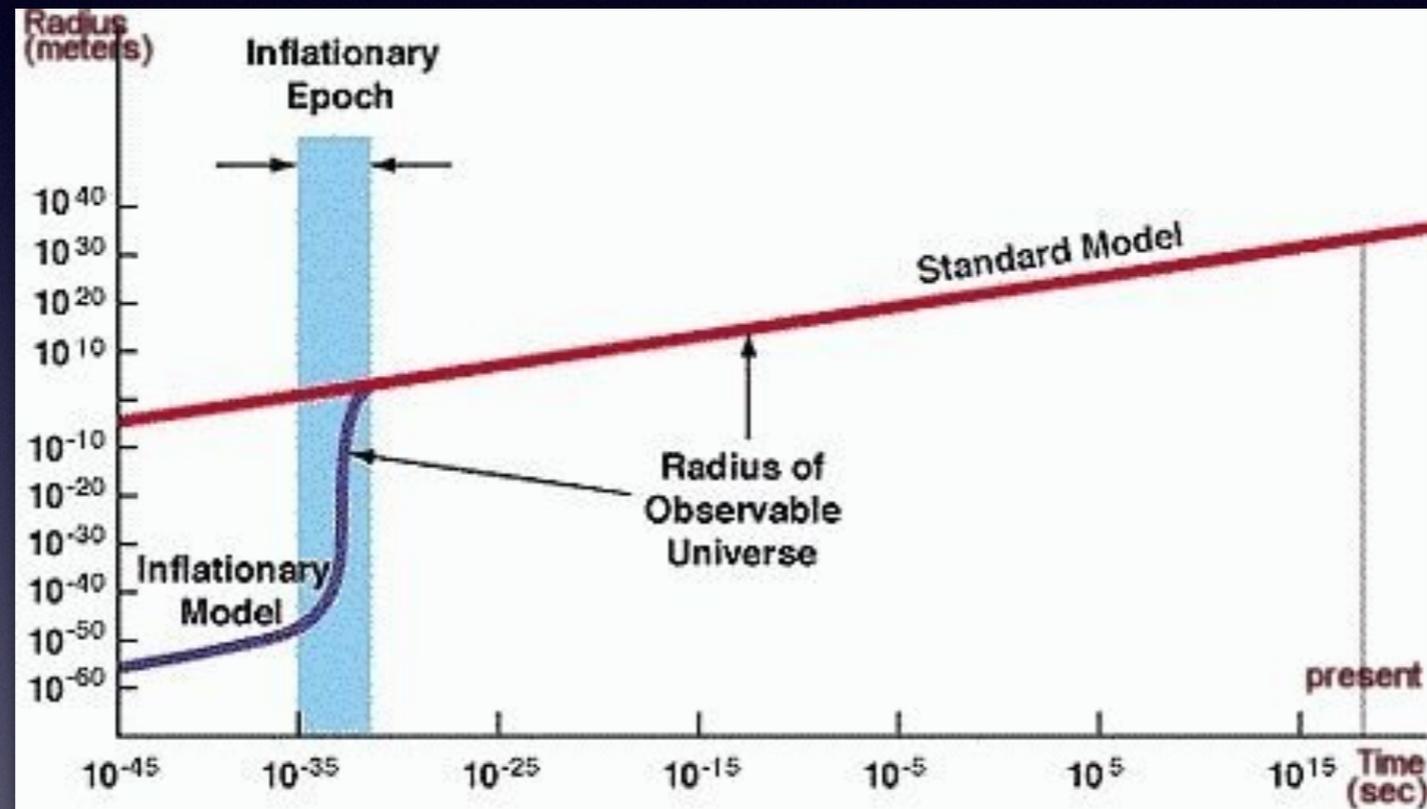


La **inflación** es una hipotética expansión exponencial del universo al final de la época de la gran unificación, 10^{-36} segundos después del Big Bang, impulsada por un estado de densidad de energía negativa.

Inflación cósmica

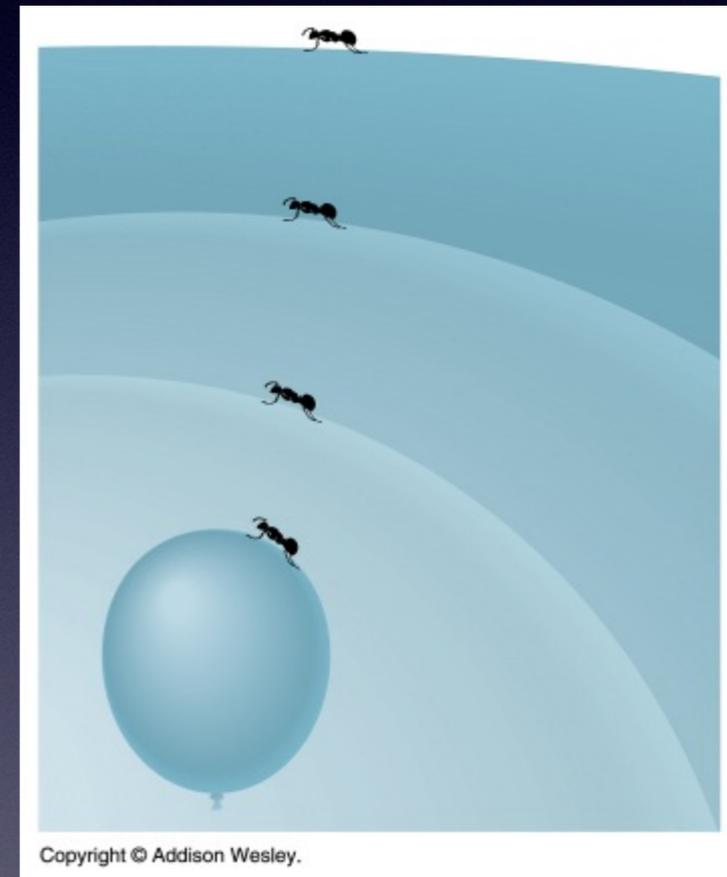
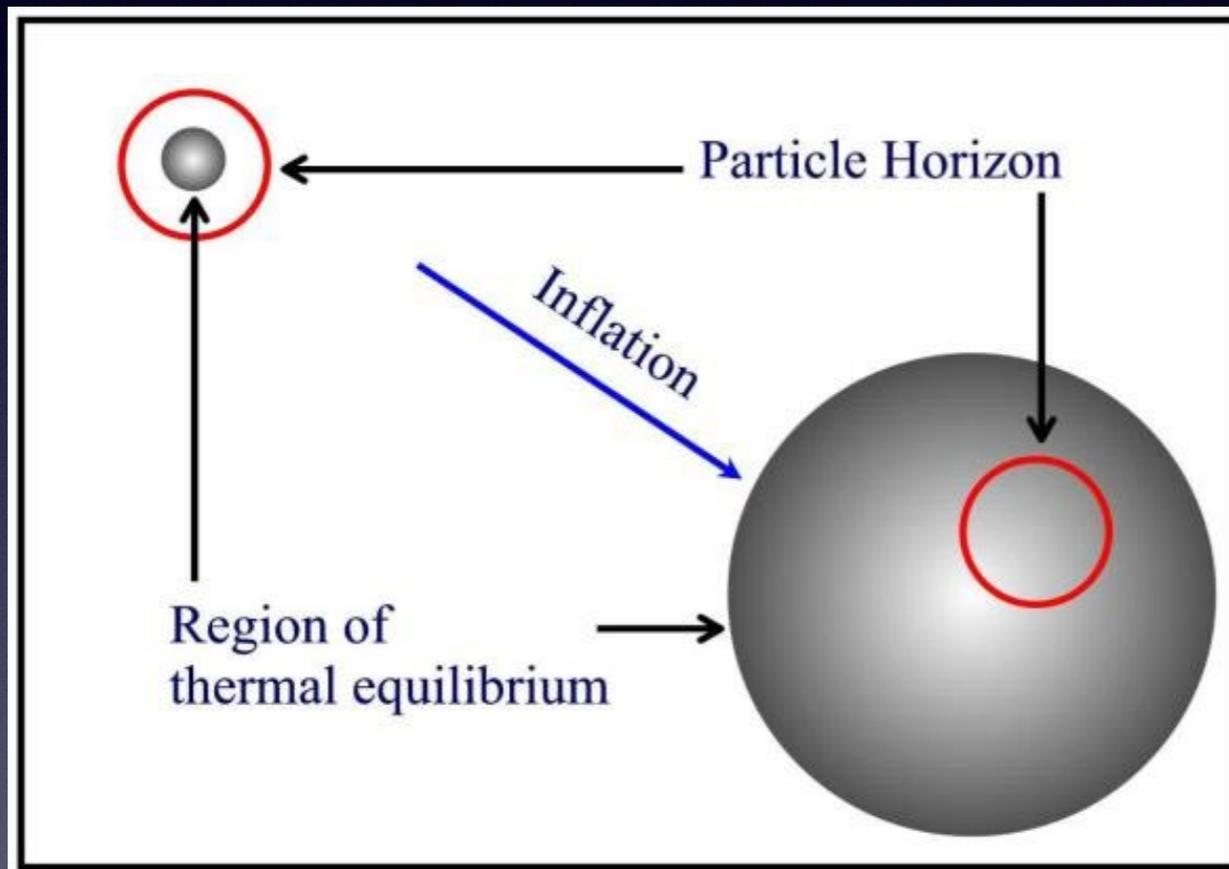
- El universo comienza tal vez como una pequeña fluctuación en el espacio-tiempo. Un campo escalar (el inflatón) llena el espacio de la fluctuación. El campo tiene una densidad de energía negativa, por lo que se expande exponencialmente, duplicando su tamaño cada 10^{-37} segundos más o menos.
- El inflatón era inestable y decae, terminando la inflación después de unos 10^{-33} segundos. Su desintegración produce las partículas del modelo estándar, formando una "sopa primordial" caliente y densa.
- Al final de la inflación, la región destinada a convertirse en el universo actualmente observado era aproximadamente del tamaño de una bolita. La "sopa primordial" coincide con el supuesto punto de partida del Big Bang estándar, por lo que la descripción estándar del Big Bang es válida a partir de este momento.
- El universo continúa expandiéndose y enfriándose hasta nuestros días.

¿Inflación?



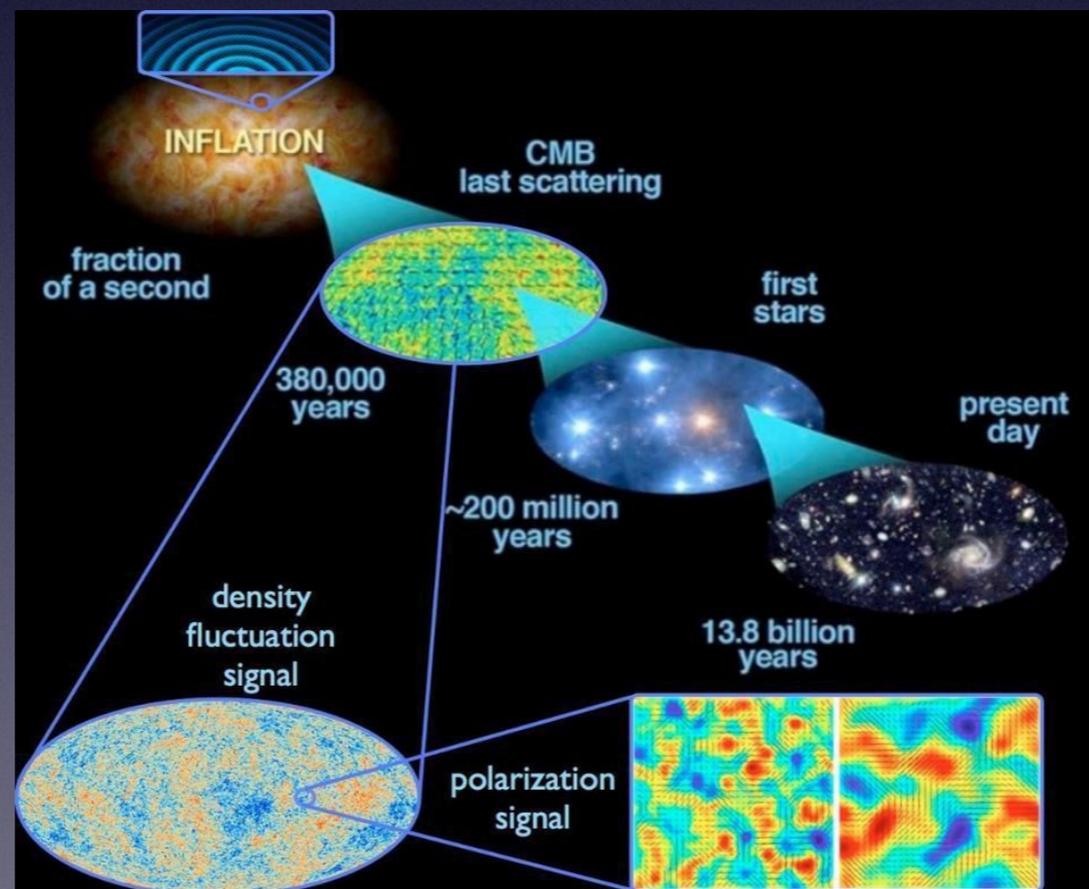
Inflación

Resuelve los problemas de la “chatura” y del “horizonte”

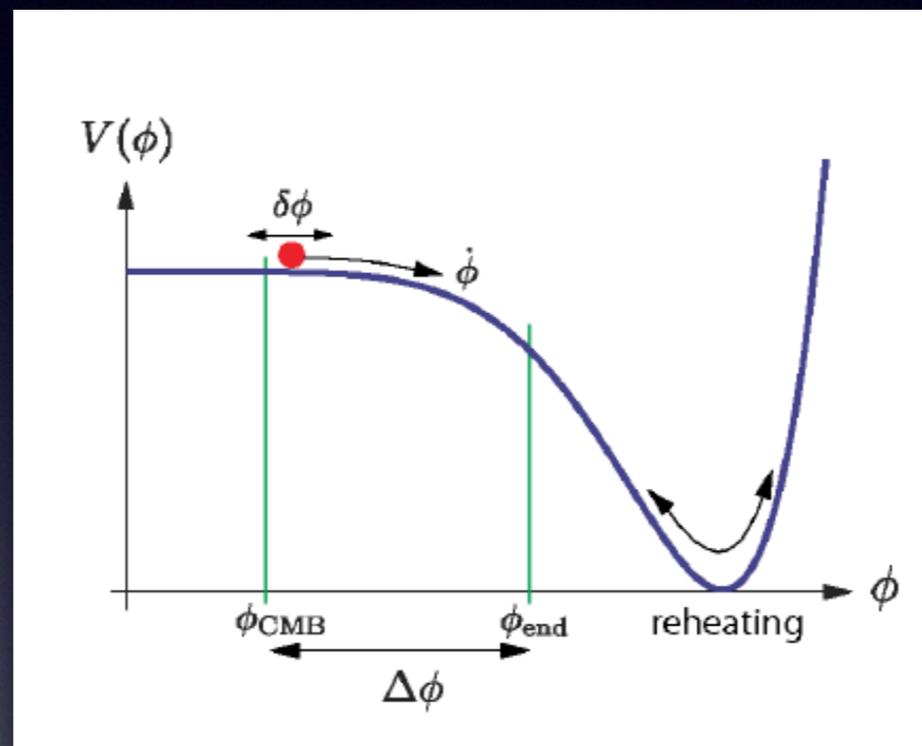


Inflación

También “resuelve” el problema del origen de las inhomogeneidades del CMB: son consecuencia de fluctuaciones cuánticas del inflatón congeladas durante la expansión (fluctuaciones de densidad).



¿Porqué se produjo la inflación?

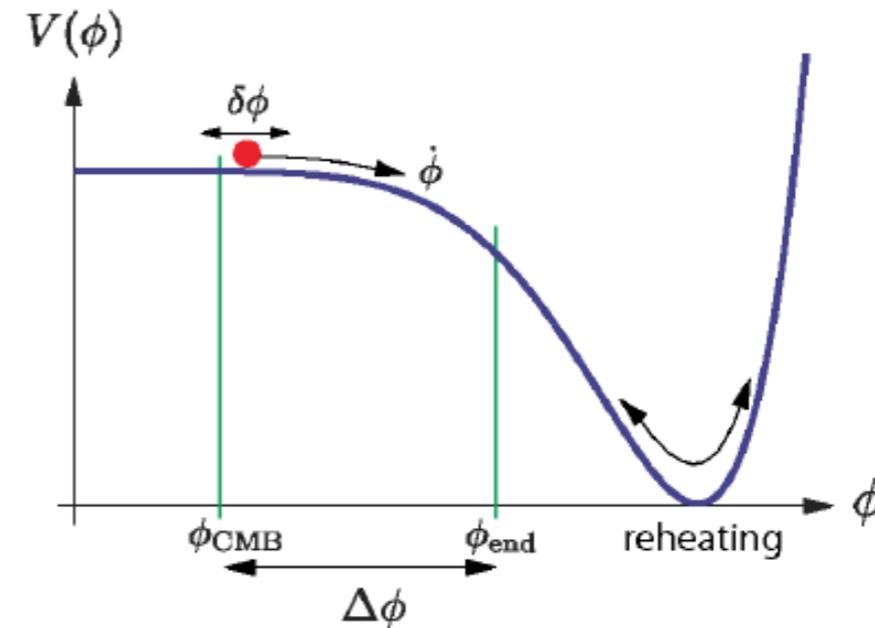


Se requieren condiciones muy especiales sobre el potencial del inflatón.

¿Cómo funciona?

Se necesita un campo escalar llamado **inflaton** que tiene un potencial muy suave por el cual el campo evoluciona

$$L = \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - V(\phi)$$



$$T_\mu^\nu = -\partial_\mu \phi \partial^\nu \phi + \delta_\mu^\nu \left(\frac{1}{2} \partial_\lambda \phi \partial^\lambda \phi - V(\phi) \right)$$

$$T_\mu^\nu \approx -V_0 \delta_\mu^\nu$$

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} V_0$$

$$\rho \approx -p \approx V_0$$

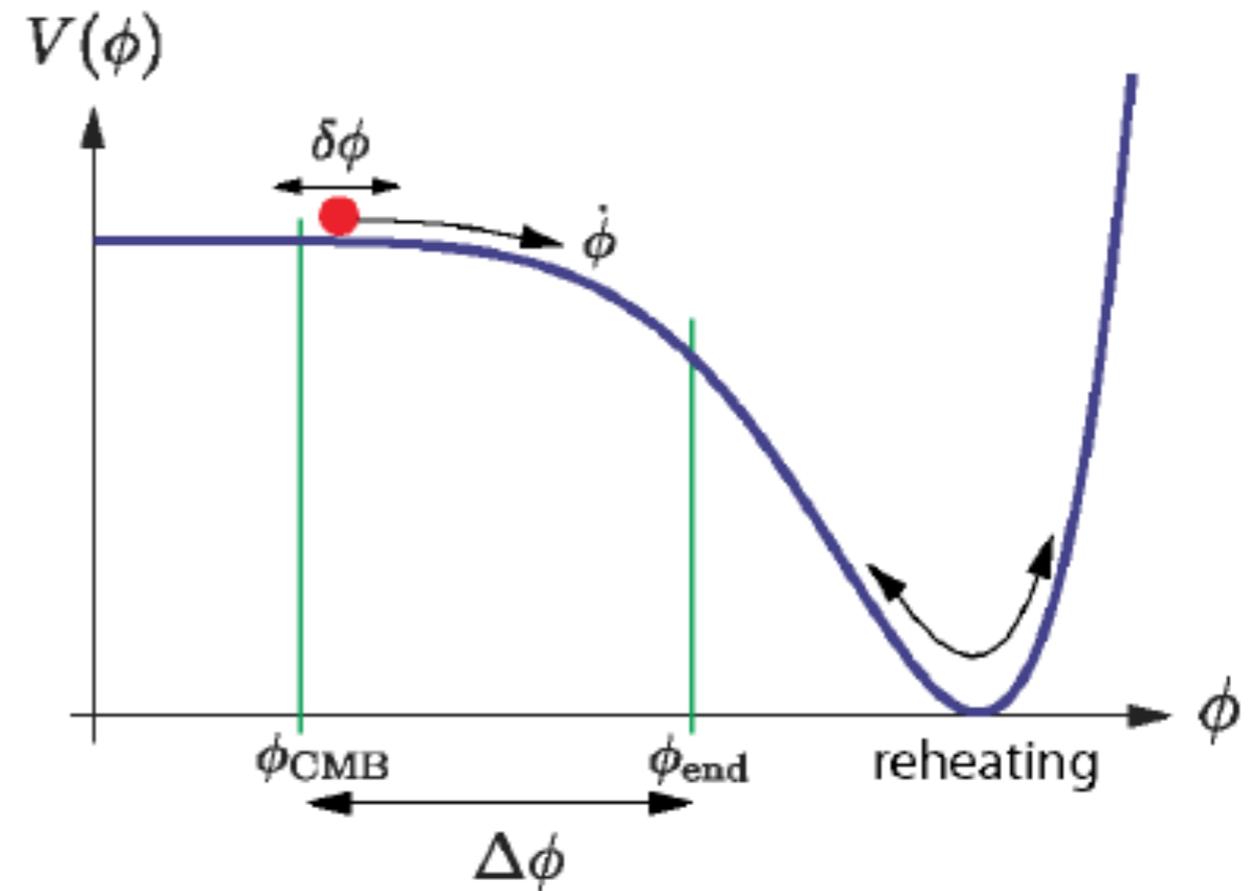


$$\frac{a(t_f)}{a(t_i)} = \exp H(t_f - t_i) \equiv \exp H\tau$$

El potencial puede producir la inflación si se cumplen las llamadas condiciones “slow-roll”, o sea que parámetros ϵ y η sean mucho menores que la unidad.

$$\epsilon = \frac{M_P^2}{2} \left(\frac{1}{V} \frac{dV}{d\phi} \right)^2$$

$$\eta = M_p^2 \left(\frac{1}{V} \frac{d^2V}{d\phi^2} \right)$$



La inflación es la situación en la que $\ddot{\phi}$ es subdominante respecto al término de fricción $3H\dot{\phi}$

Las perturbaciones del inflatón son casi invariantes de escala:

$$A_S^2(k) \propto k^{n_S-1}$$

El índice espectral se relaciona con los parámetros de “slow-roll” por medio de:

$$n_S = 1 - 6\epsilon + 2\eta$$

Las observaciones apuntan a que: $0.9 < n_S < 1.0$

El **inflatón** no es el único campo que podría haber existido. Si la gravitación es interpretable como un campo y es cuantificable, entonces existió el **gravitón**. Las perturbaciones de la gravitación producen un espectro de ondas gravitacionales. Son perturbaciones tensoriales.

La amplitud de estas perturbaciones se relaciona con la escala de energías del inflatón.

$$A_T^2(k) \propto k^{n_T}$$

$$n_T = -2\epsilon$$



$$r \equiv \frac{A_T^2}{A_S^2} = 16\epsilon = -8n_T$$

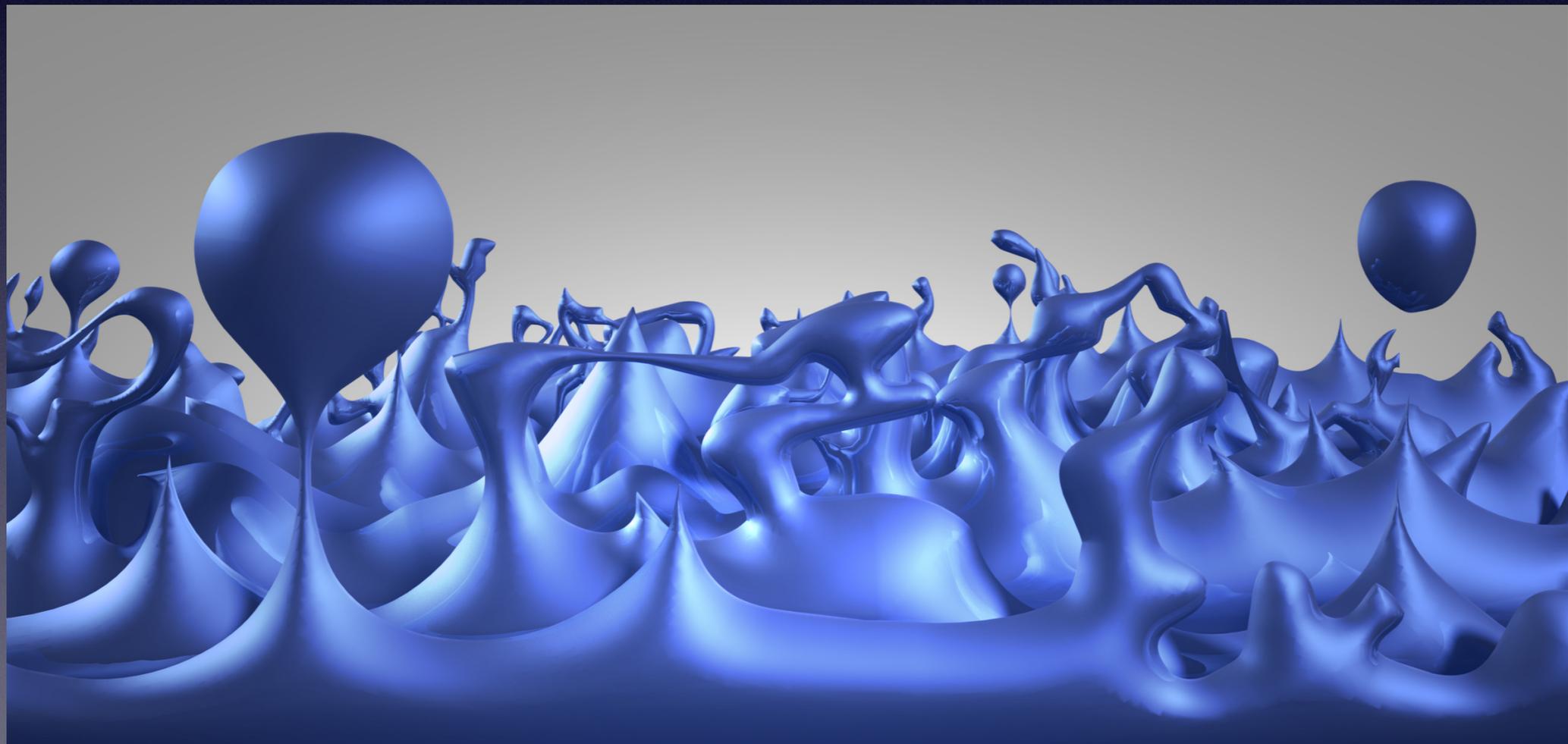
$$V_{\text{inflation}}^{1/4} \sim \epsilon^{1/4} 10^{16} \text{ GeV}$$

Algunos problemas con la inflación:

- ¿Qué es el inflatón?
- ¿Pueden acomodarse sus propiedades con una teoría fundamental bien formulada de la física de partículas?
- Ajuste fino de las condiciones iniciales.
- La inflación no resuelve el problema de la singularidad inicial.

Teorías alternativas: Bouncing cosmologies (see, e.g., Pinto-Neto, Astron. Nachr. 2014), varying c , etc.

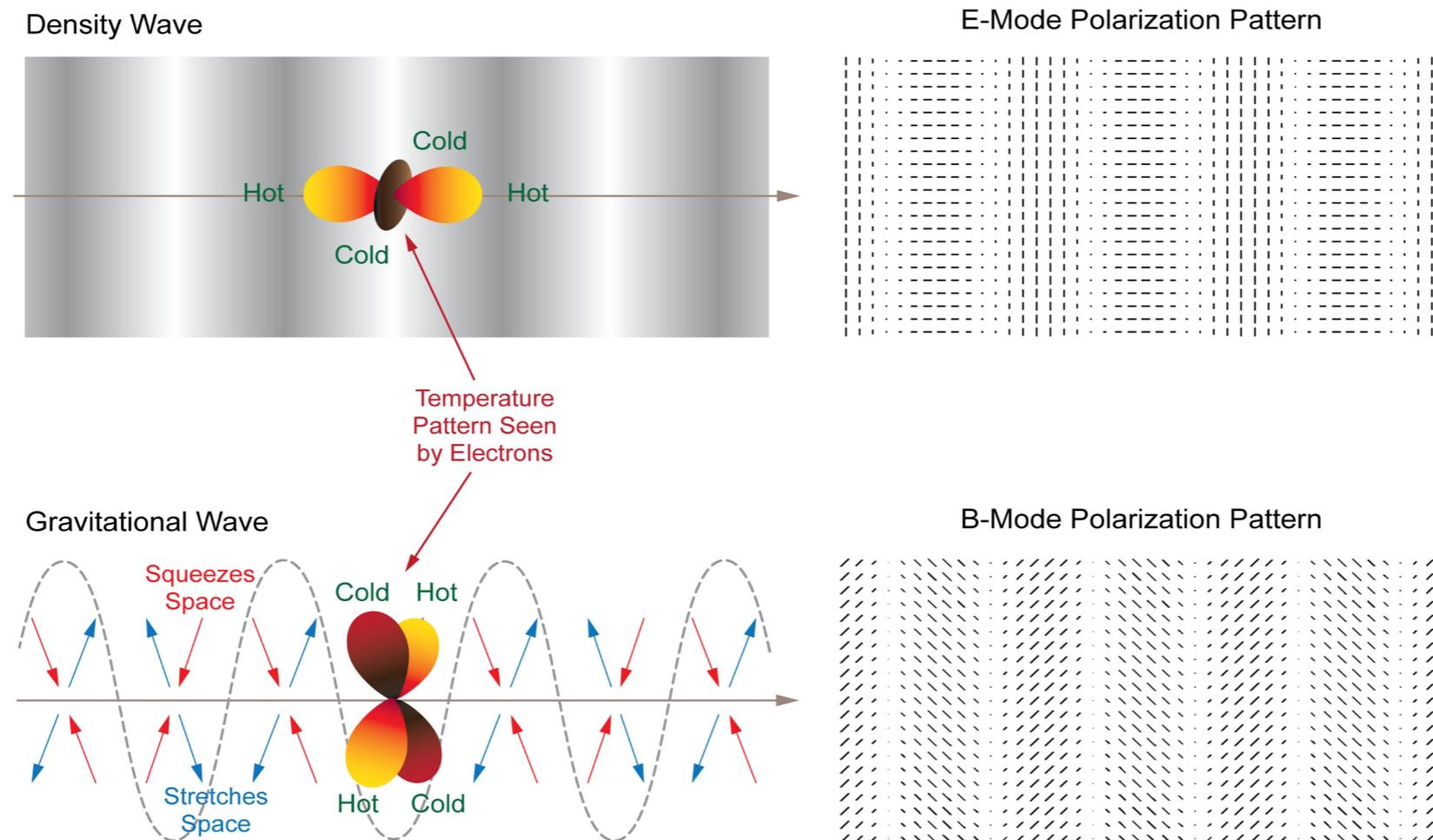
Si en efecto existió la inflación cósmica, las fluctuaciones cuánticas del campo gravitacional debieron producir ondas gravitacionales primordiales. Deberían haber dejado su huella en el CMB.



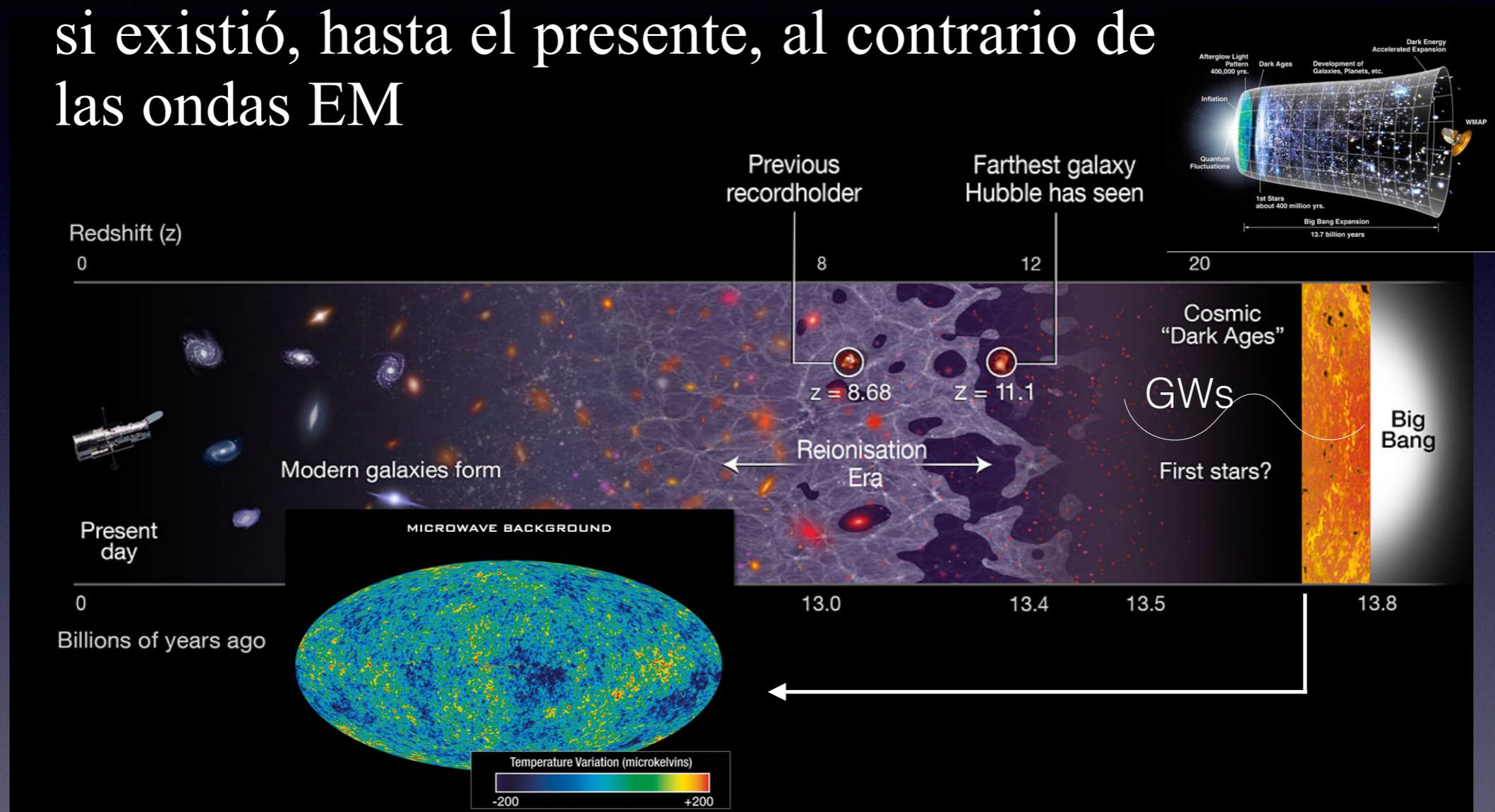
La polarización del CMB es producida por fluctuaciones de densidad (escalares) y ondas gravitacionales (perturbaciones tensoriales)

Las mediciones de los modos de polarización E y B permiten distinguir entre ondas de densidad y ondas gravitacionales. Las últimas se produjeron en la "época inflacionaria".

Zaldarriaga, Seljak (1997)



Las ondas gravitacionales pueden propagarse desde el período inflacionario, si existió, hasta el presente, al contrario de las ondas EM

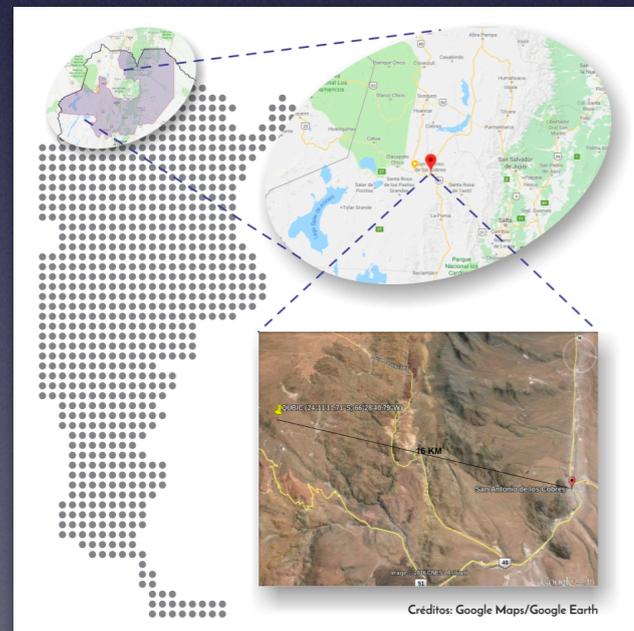


Modos B en la polarización del CMB. E.g. telescopio QUBIC

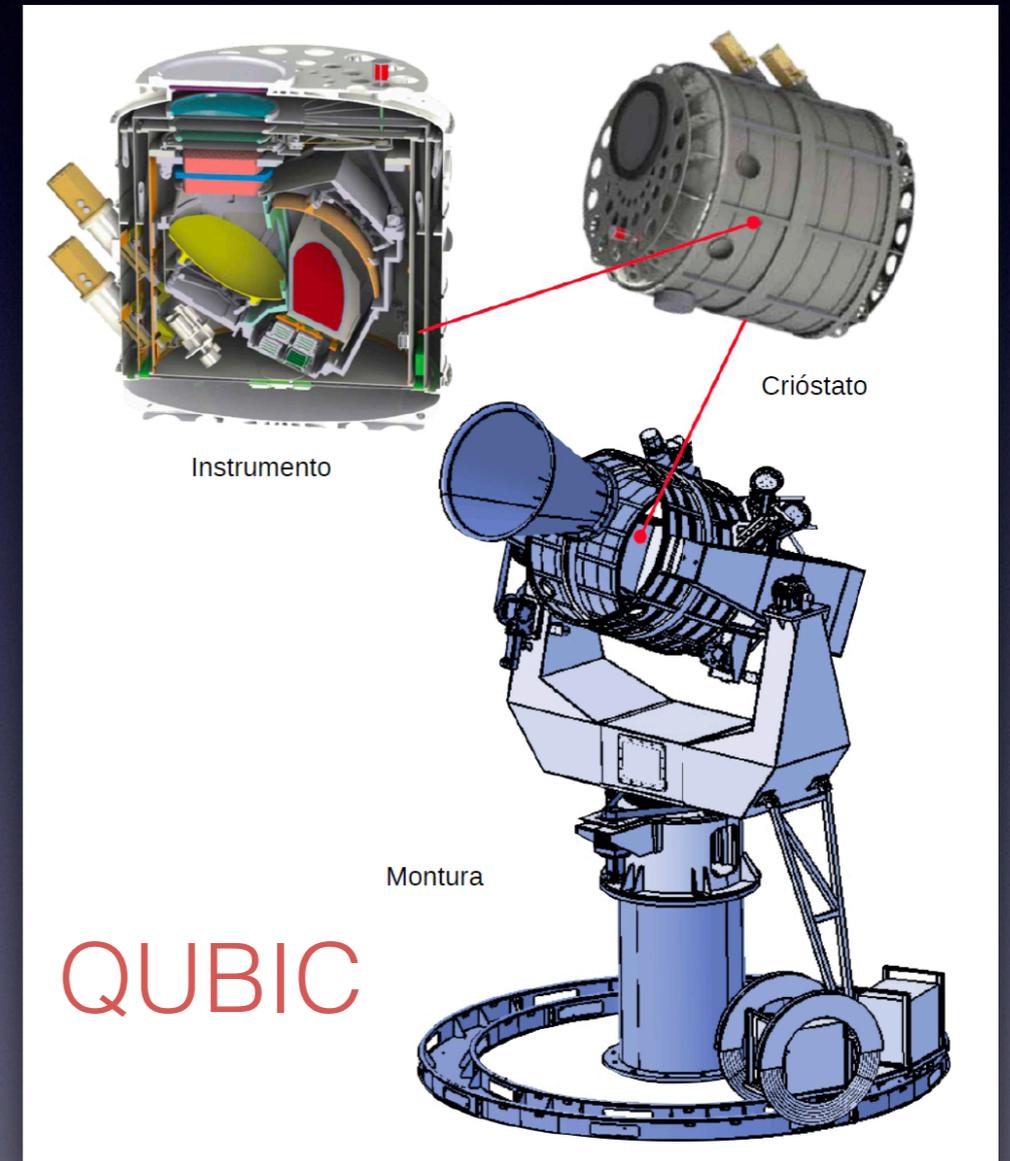
CMB Polarización ($\sim 10\%$, circular $> 1\%$)

La detección de los modos B de polarización es extremadamente difícil debido a su debilidad, y porque se desconoce el grado de contaminación así como los efectos de lentes gravitacionales débiles que mezclan la señal del modo E relativamente fuerte con la señal del modo B.

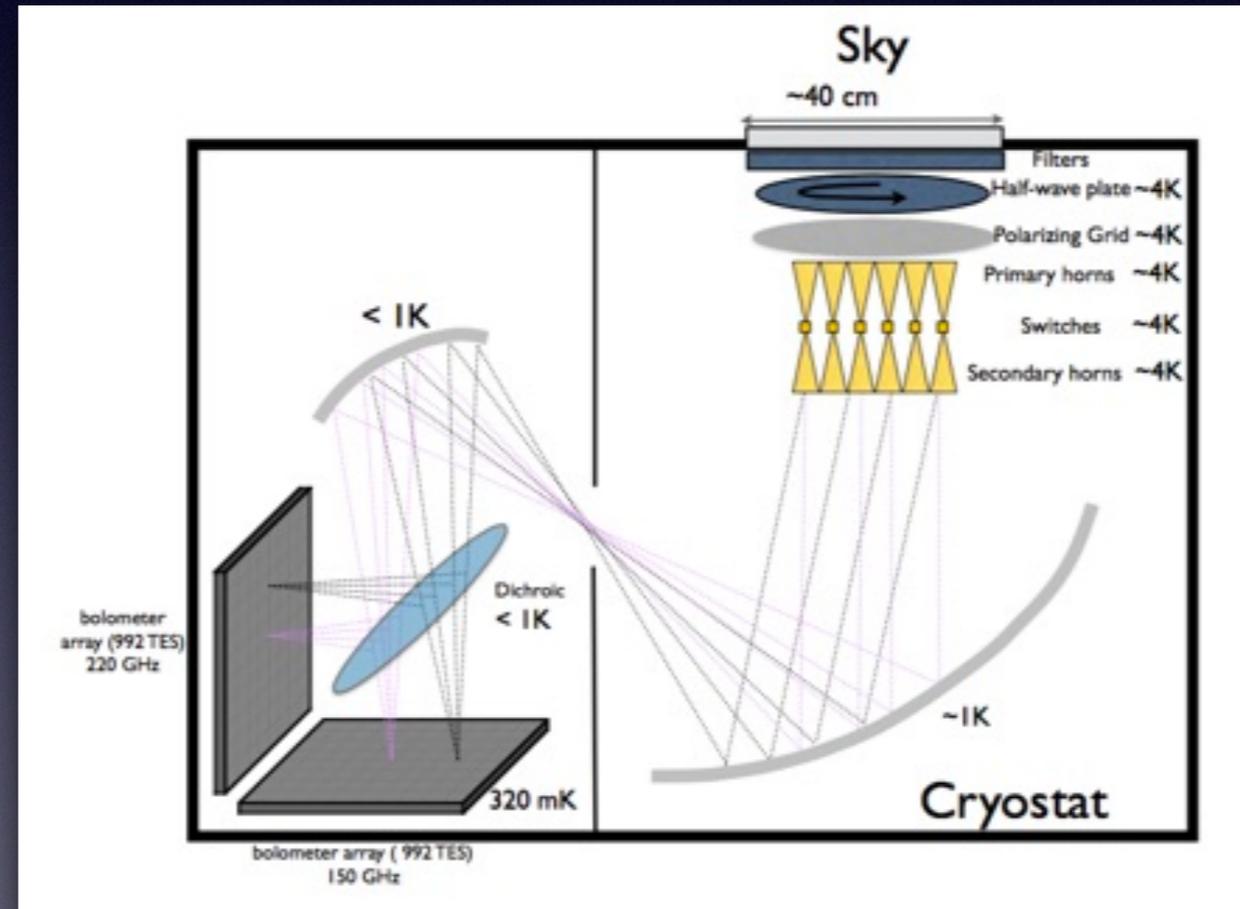
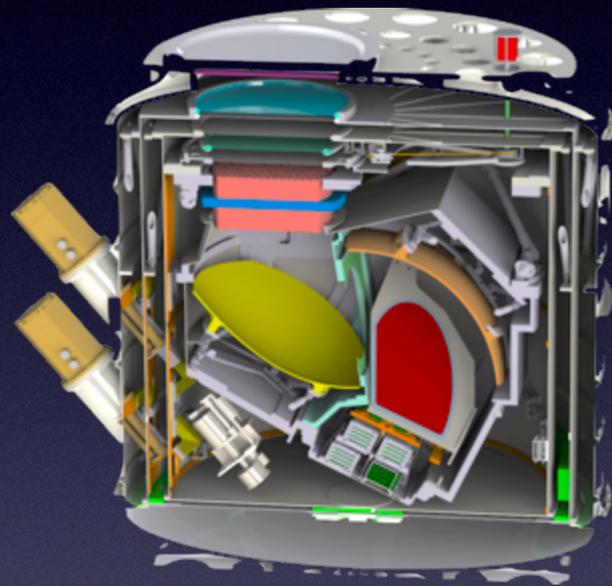
QUBIC: un experimento internacional para medir los modos B del CMB en Salta, Argentina



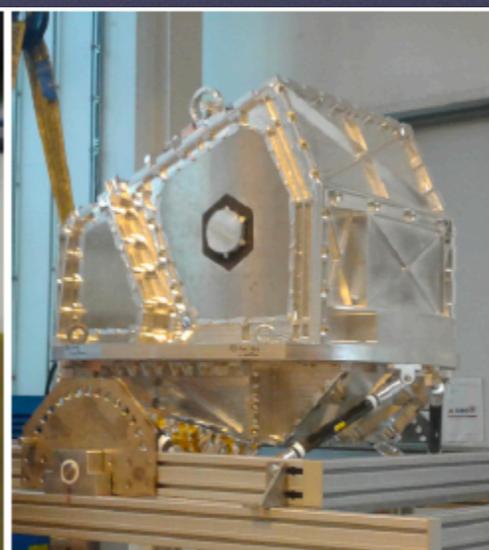
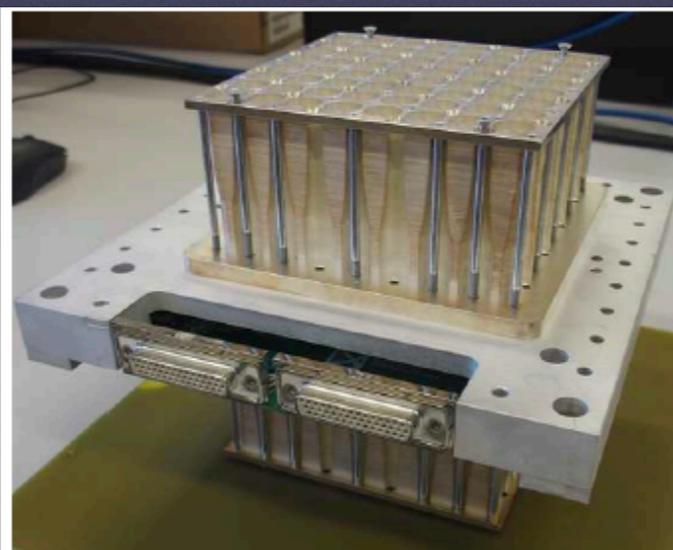
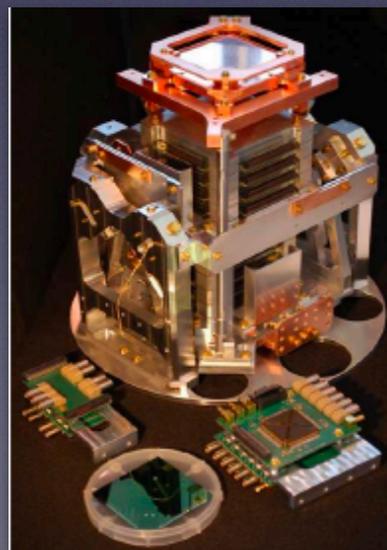
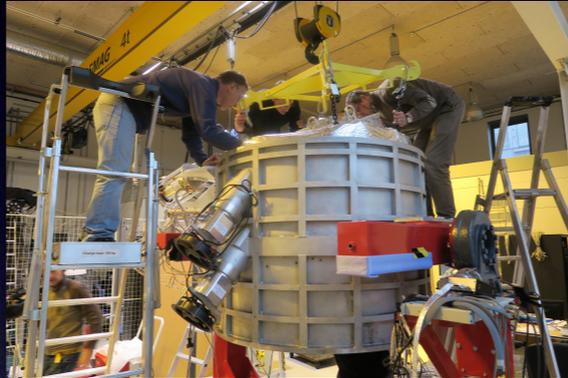
LLAMA



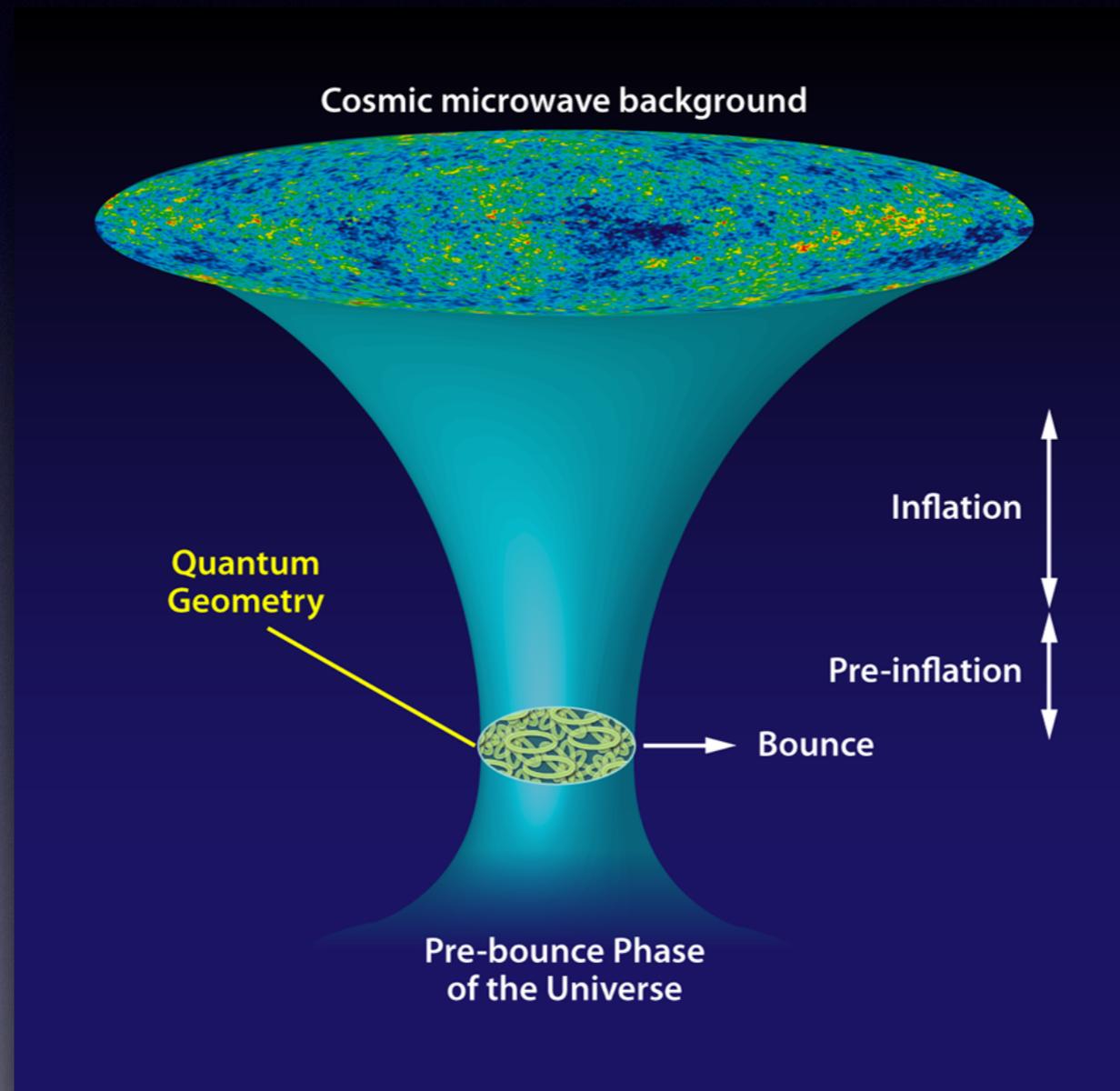
QUBIC: un experimento internacional para medir los modos B del CMB en Salta, Argentina



QUBIC: un experimento internacional para medir los modos B del CMB en Salta, Argentina

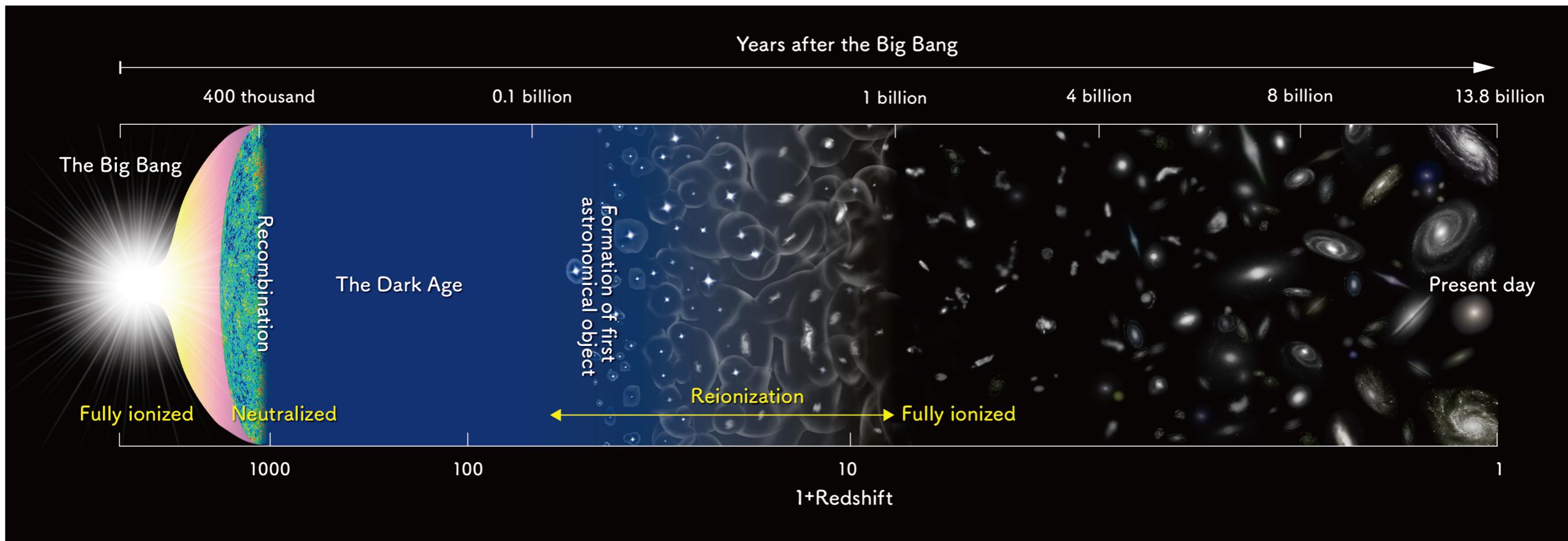


¿Qué sucedió antes del comienzo de la expansión cósmica?



¿Big Bounce?
¿Quantum space-time?
??

Re-ionización



La reionización ocurrió cuando las primeras generaciones de estrellas de población III y quasars emitieron radiación que reionizó el universo, volviendo a hacerlo un plasma ionizado ($6 < z < 20$; 150-1000 millones de años tras el big bang).

Puede inferirse de la no aparición de absorción en el espectro de quásares con un desplazamiento al rojo de (alrededor de 1000 millones de años tras el Big Bang), que gran parte del medio intergaláctico no estaba formado por átomos neutros sino por un plasma ionizado para esa época.



$z=1100$

$z\sim 30$

$z=10$

$z=6$

$z=2$

$z=0$

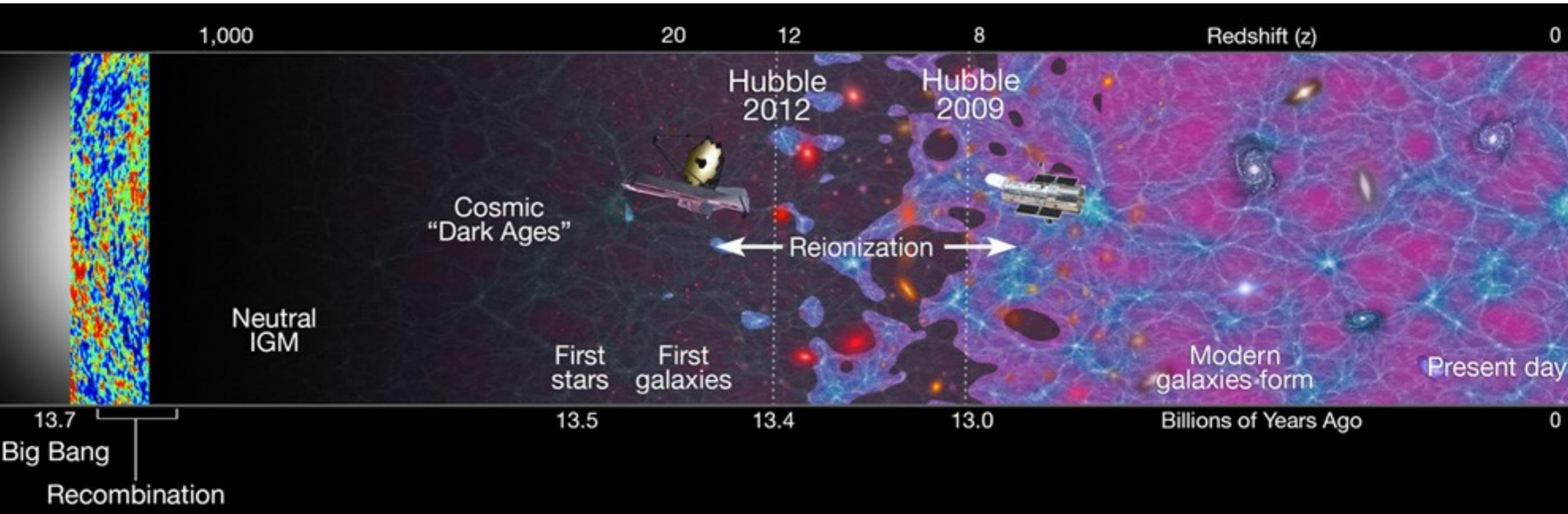
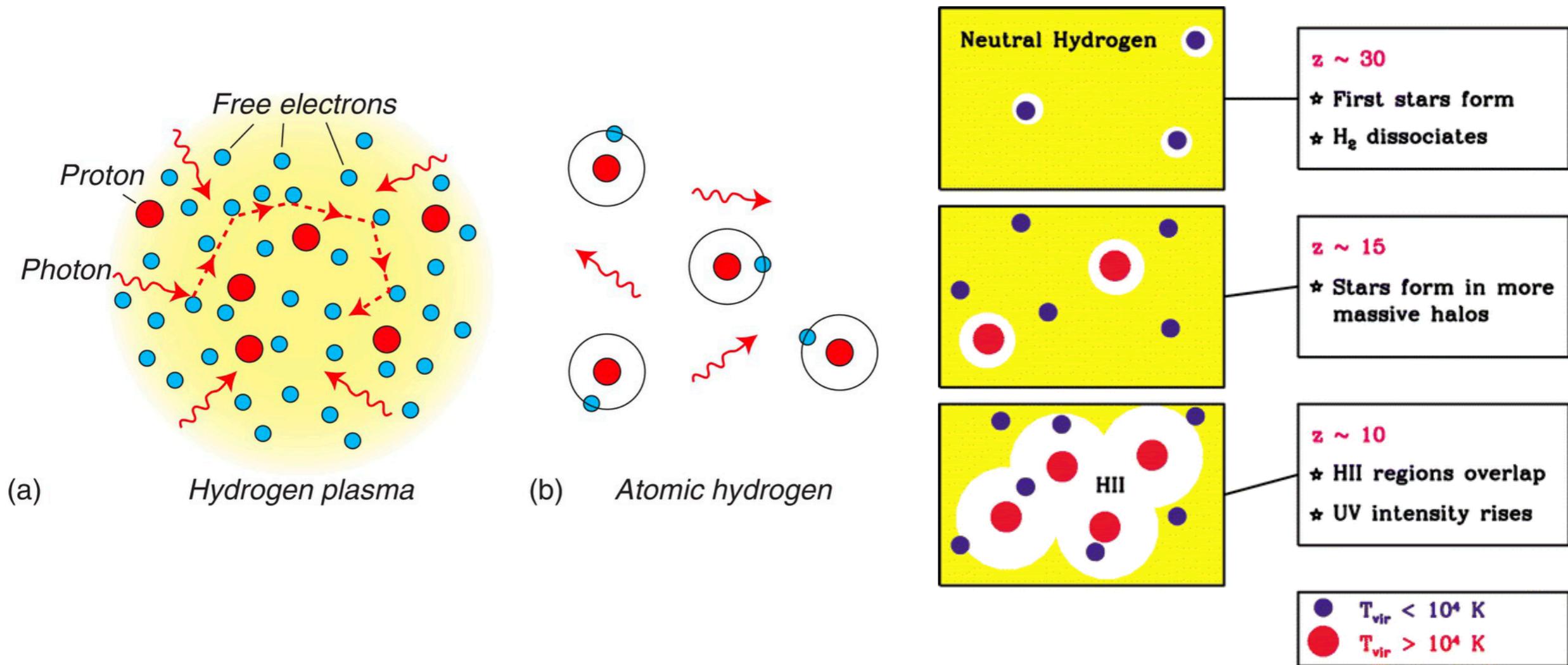
CMB

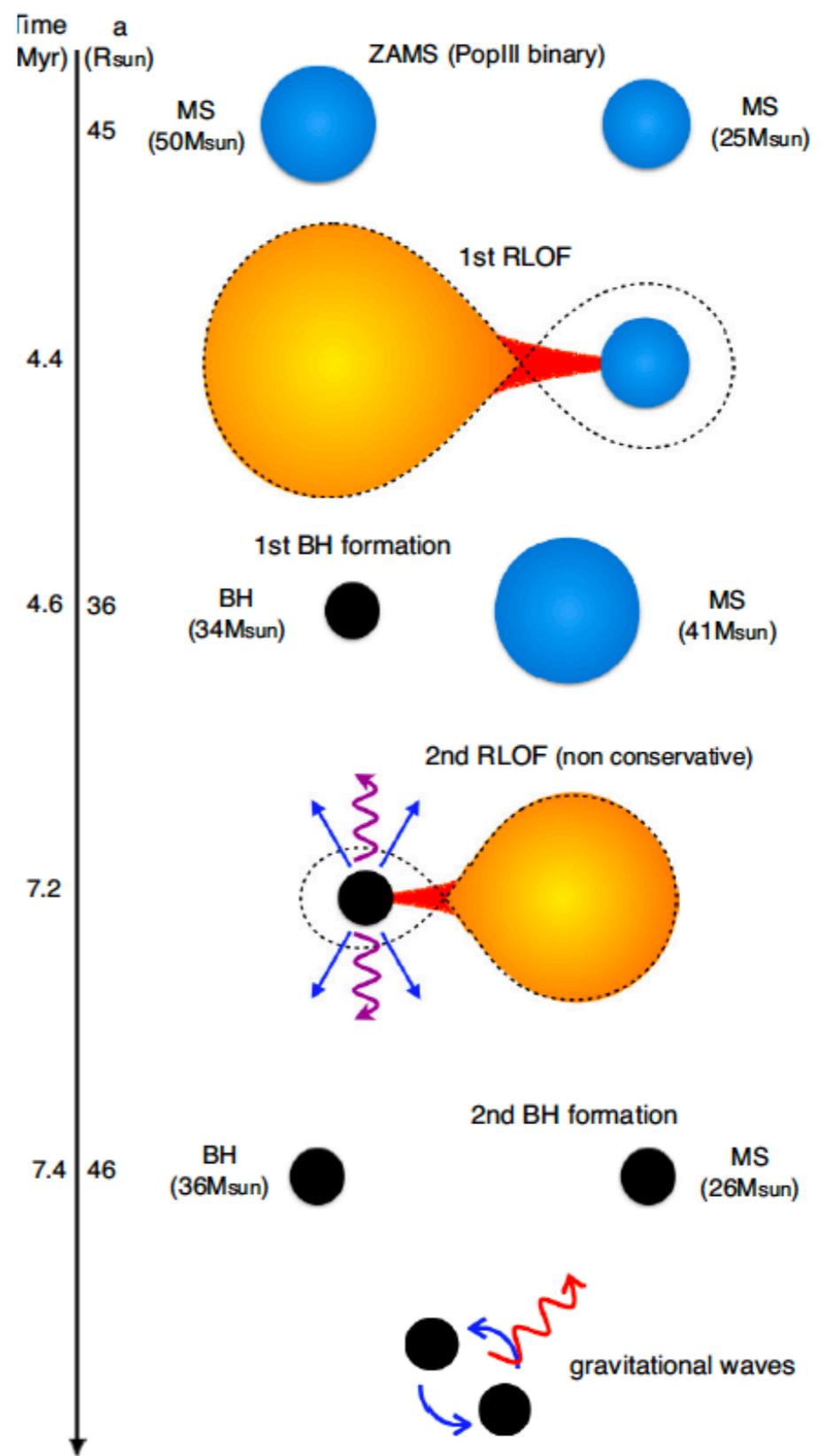
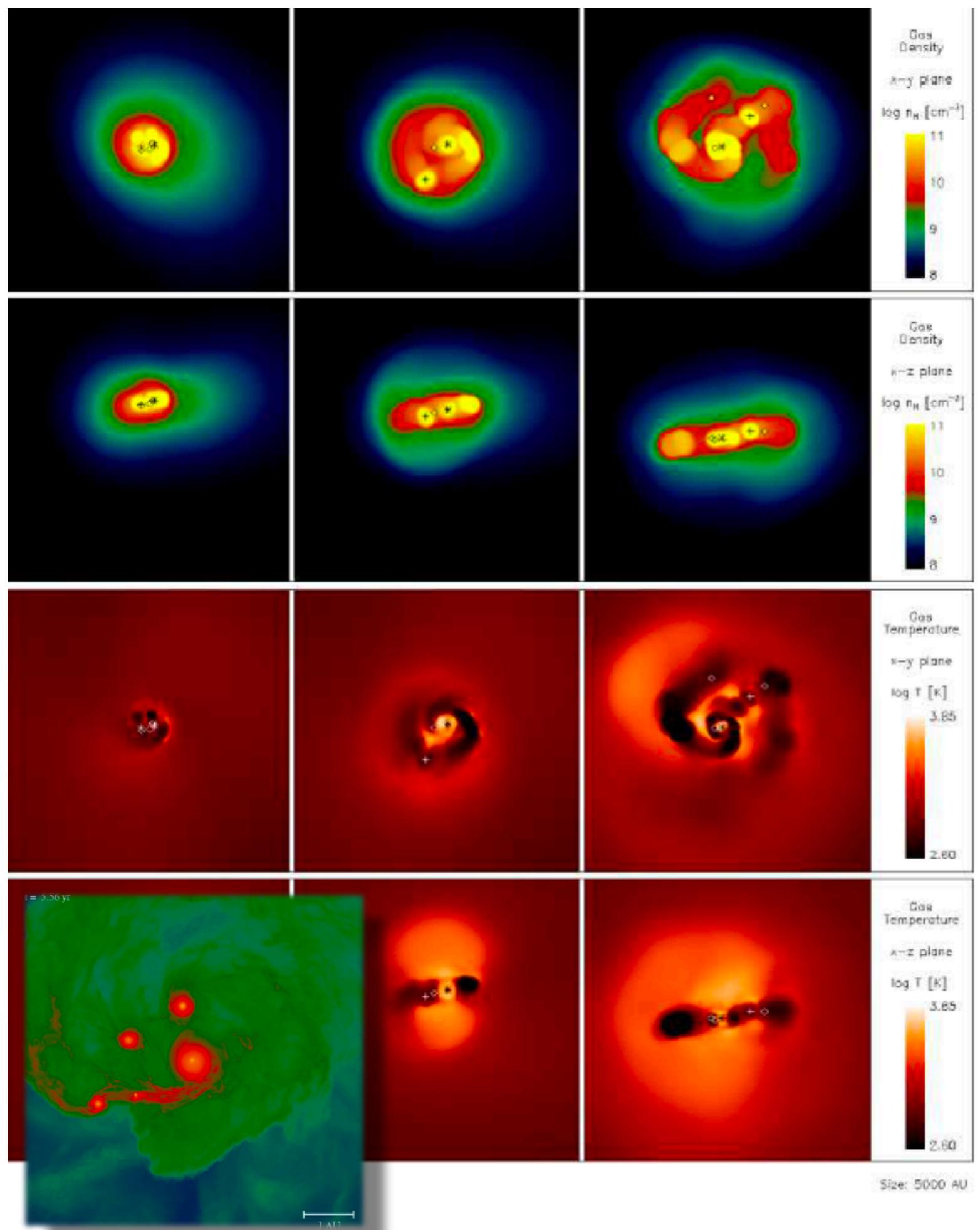
Dark Ages

Epoch of Reionization

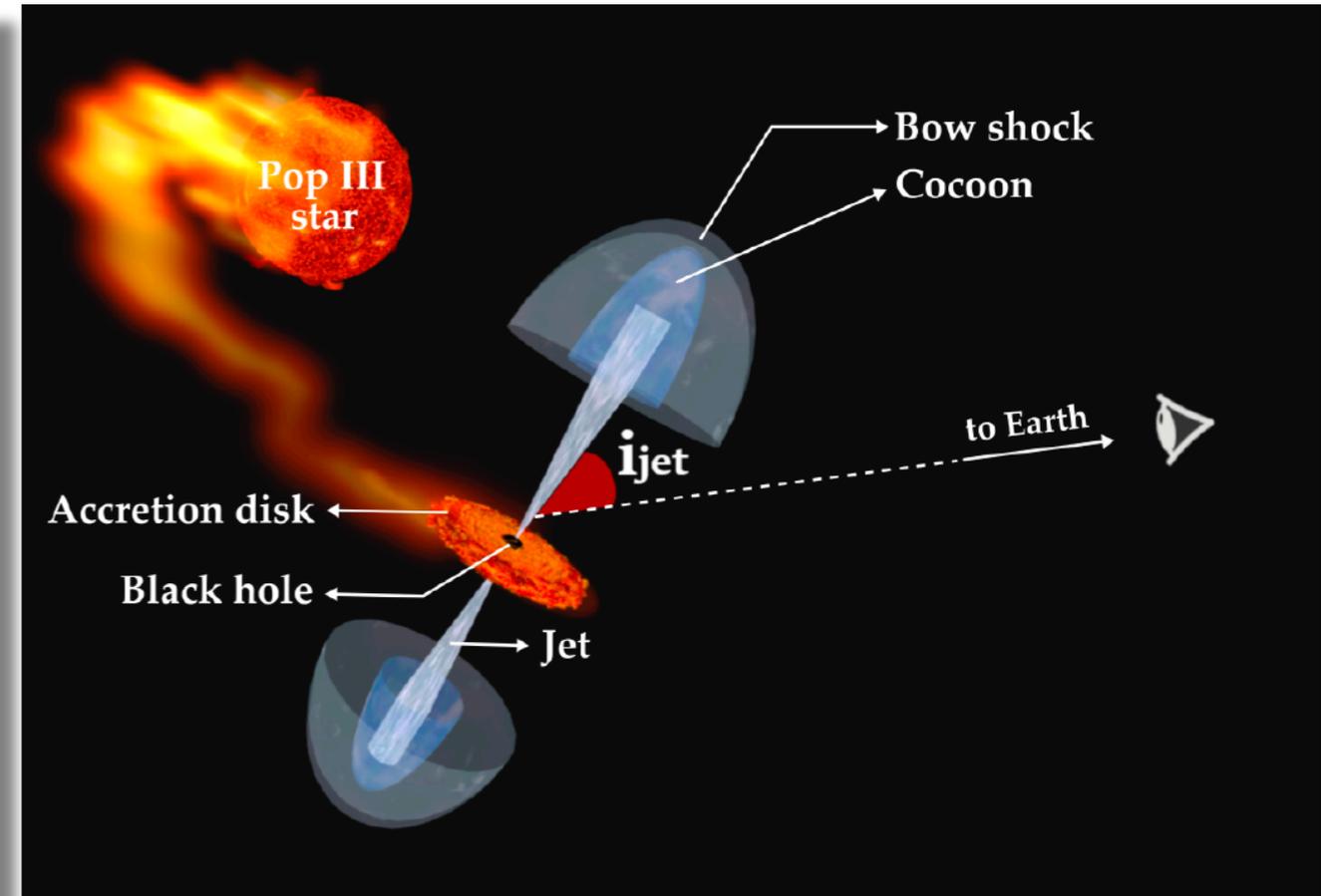
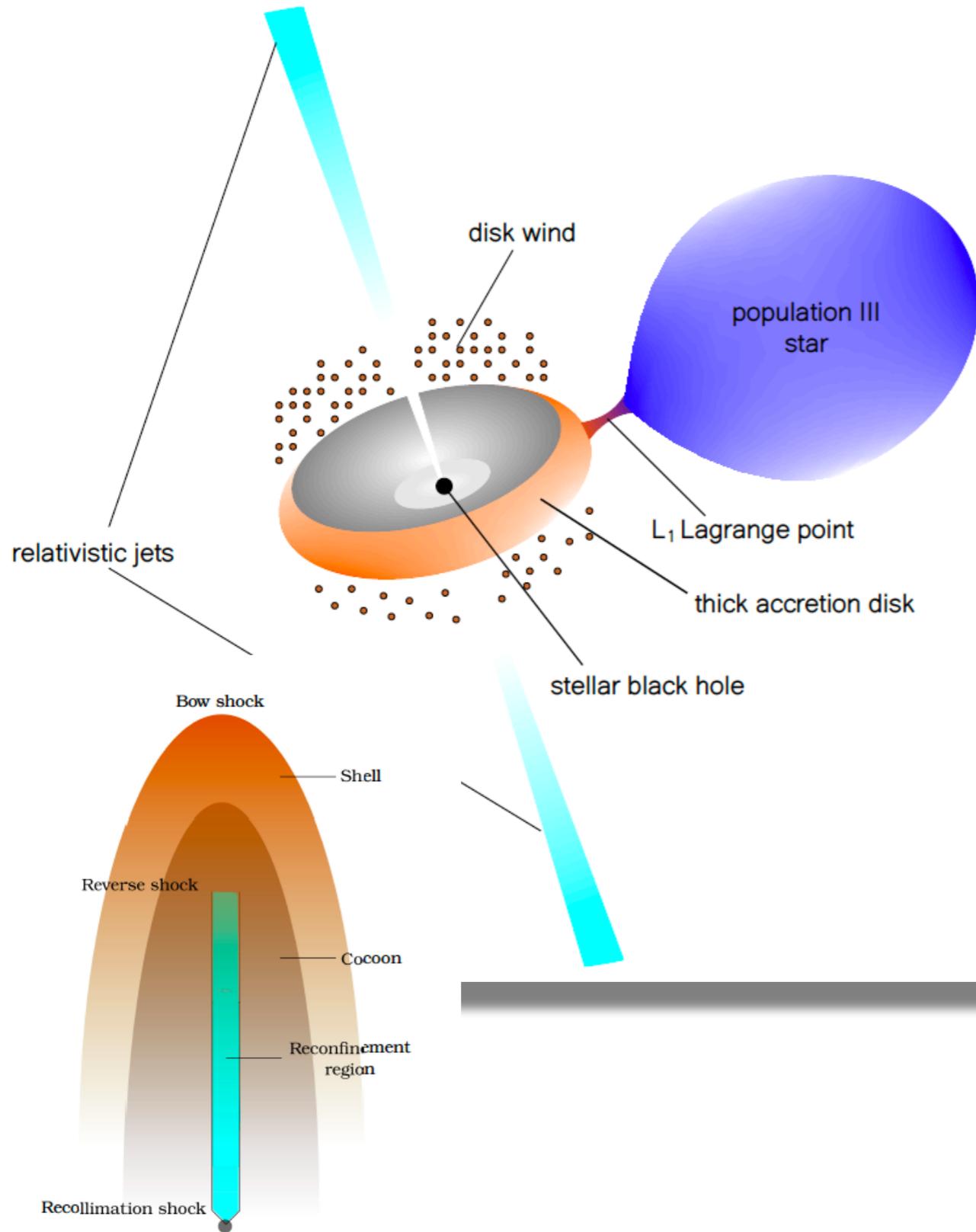
A. Loeb

La reionización fue un proceso jerárquico



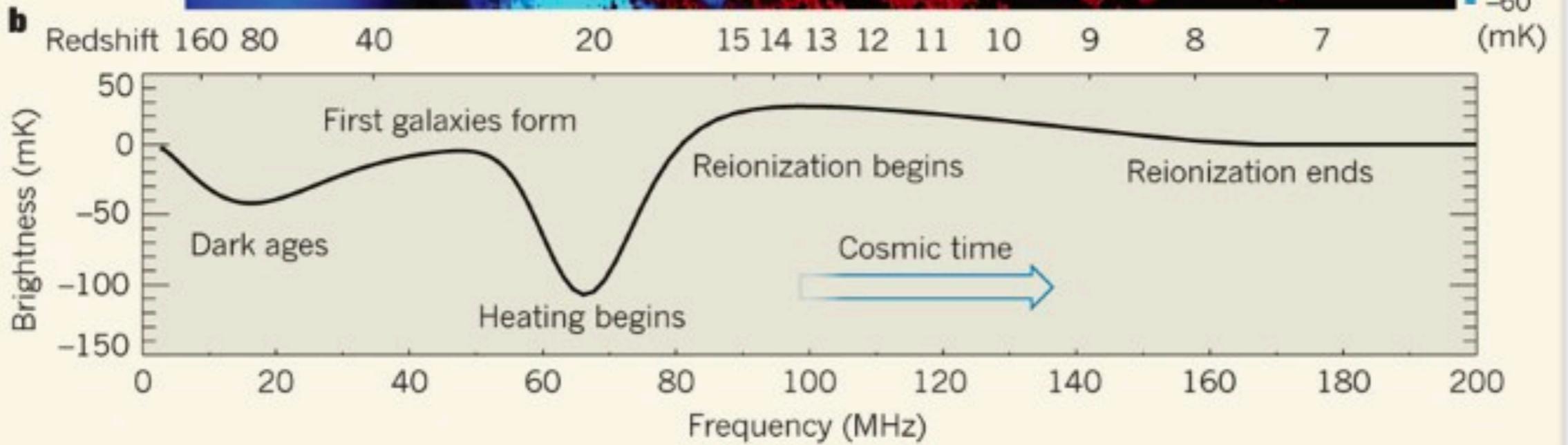
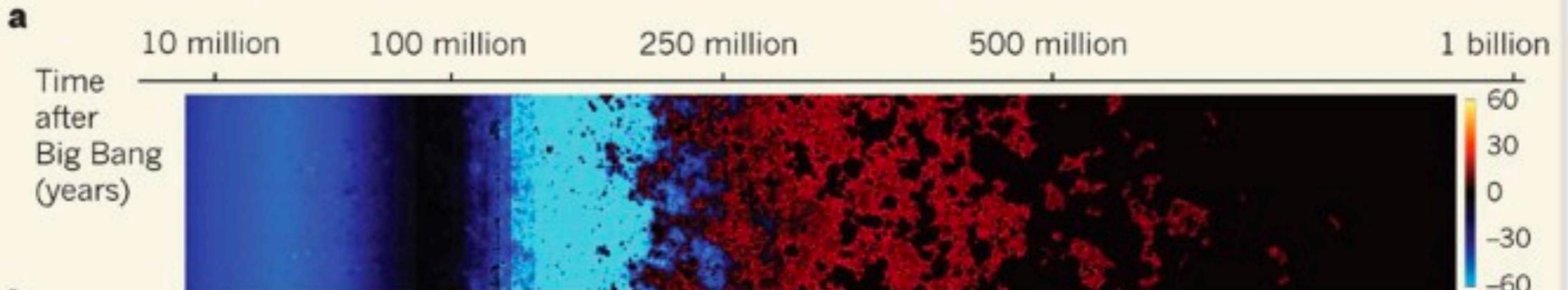
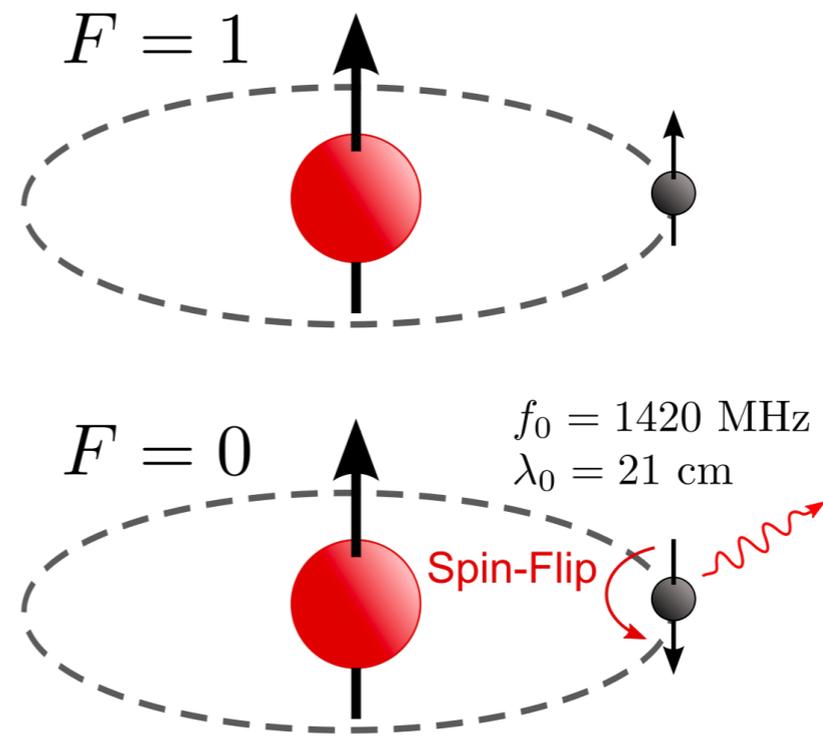
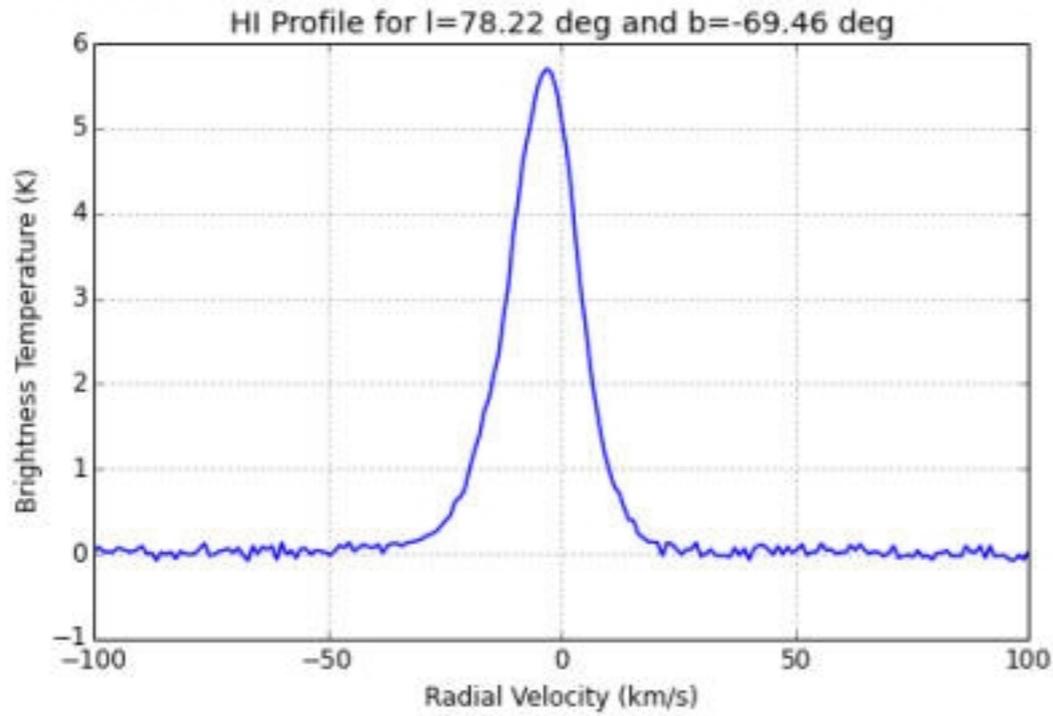


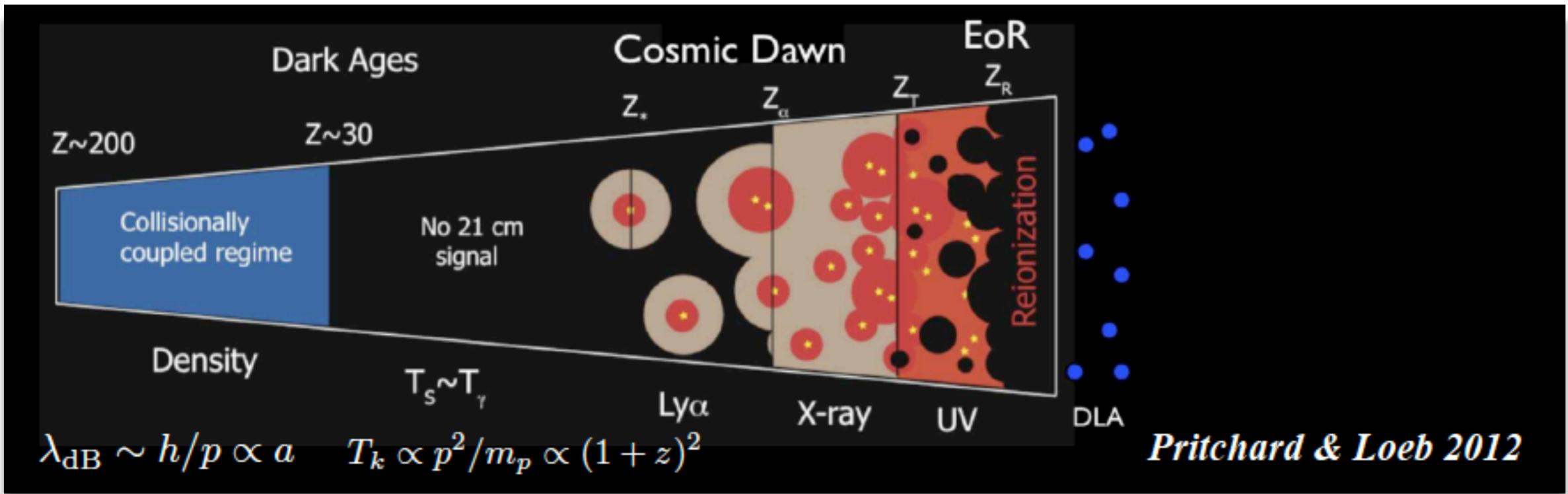
Inayoshi et al (2017)



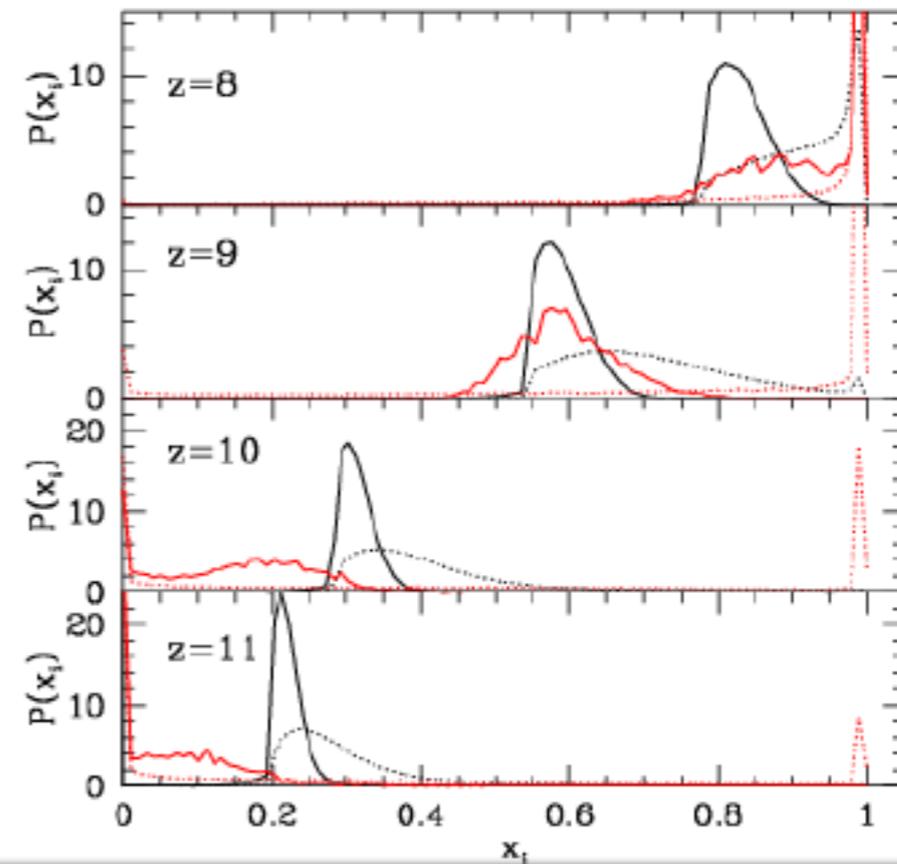
Agustín M. Carulli, M. Reynoso & G.E. Romero (2020?)

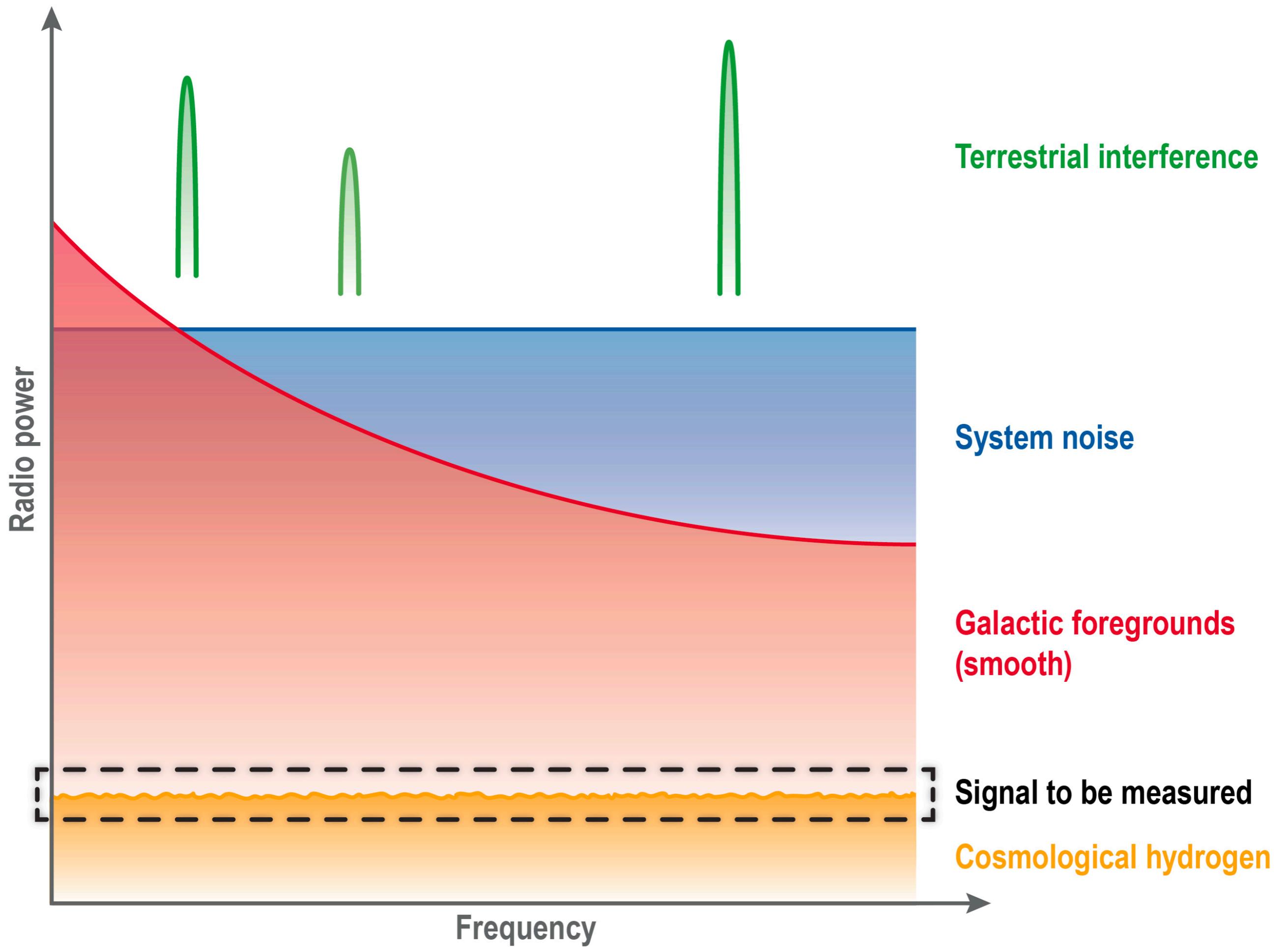
HI Line Background for Beamwidth = 0.6 degrees

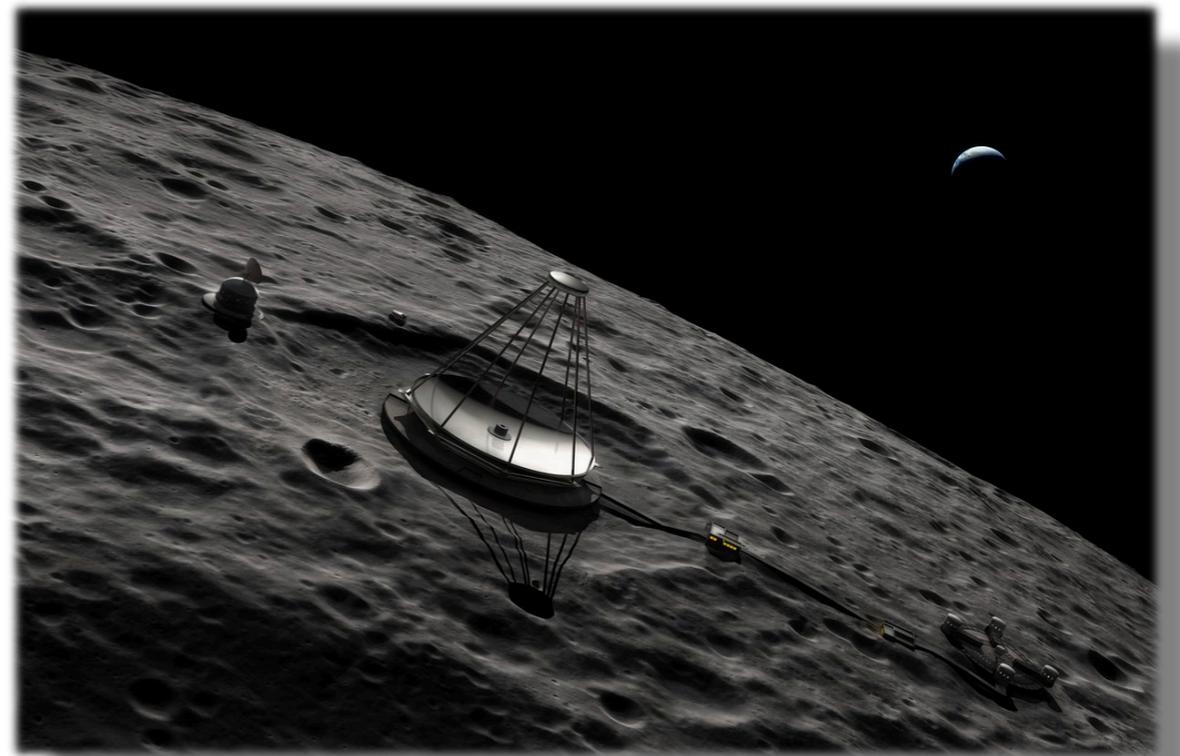
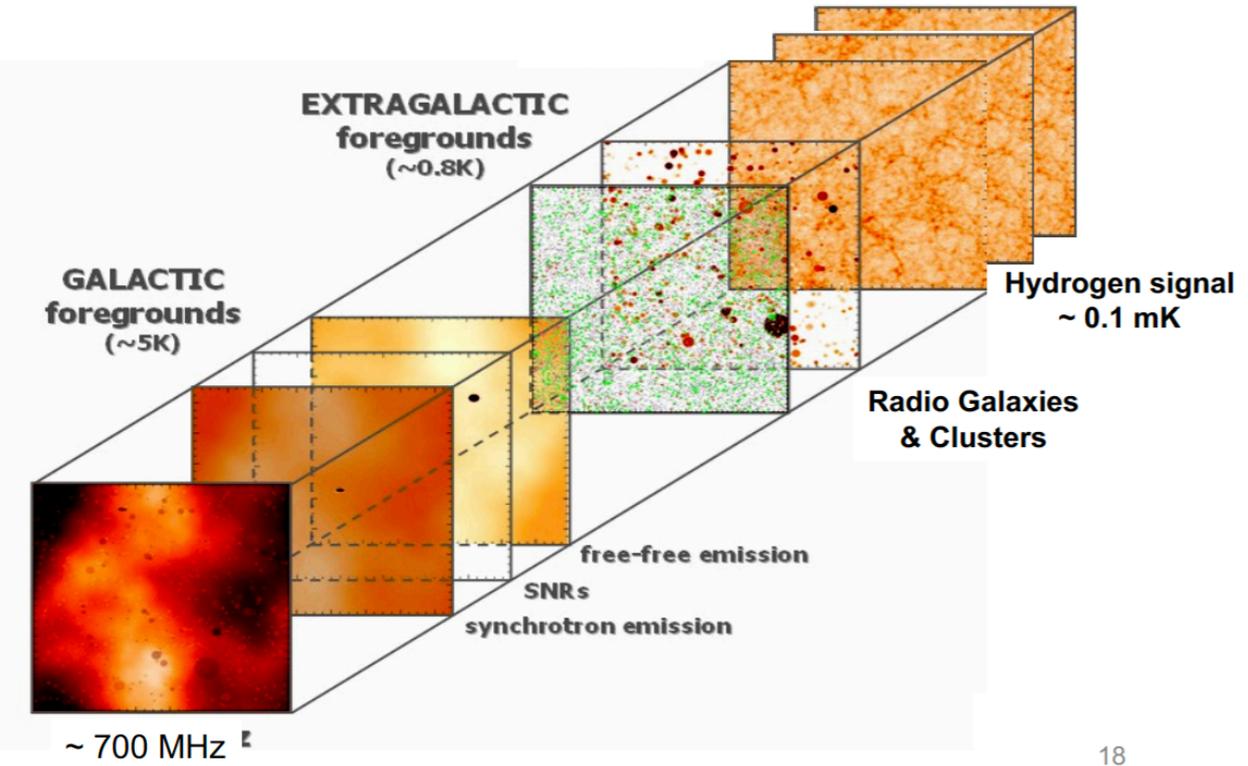
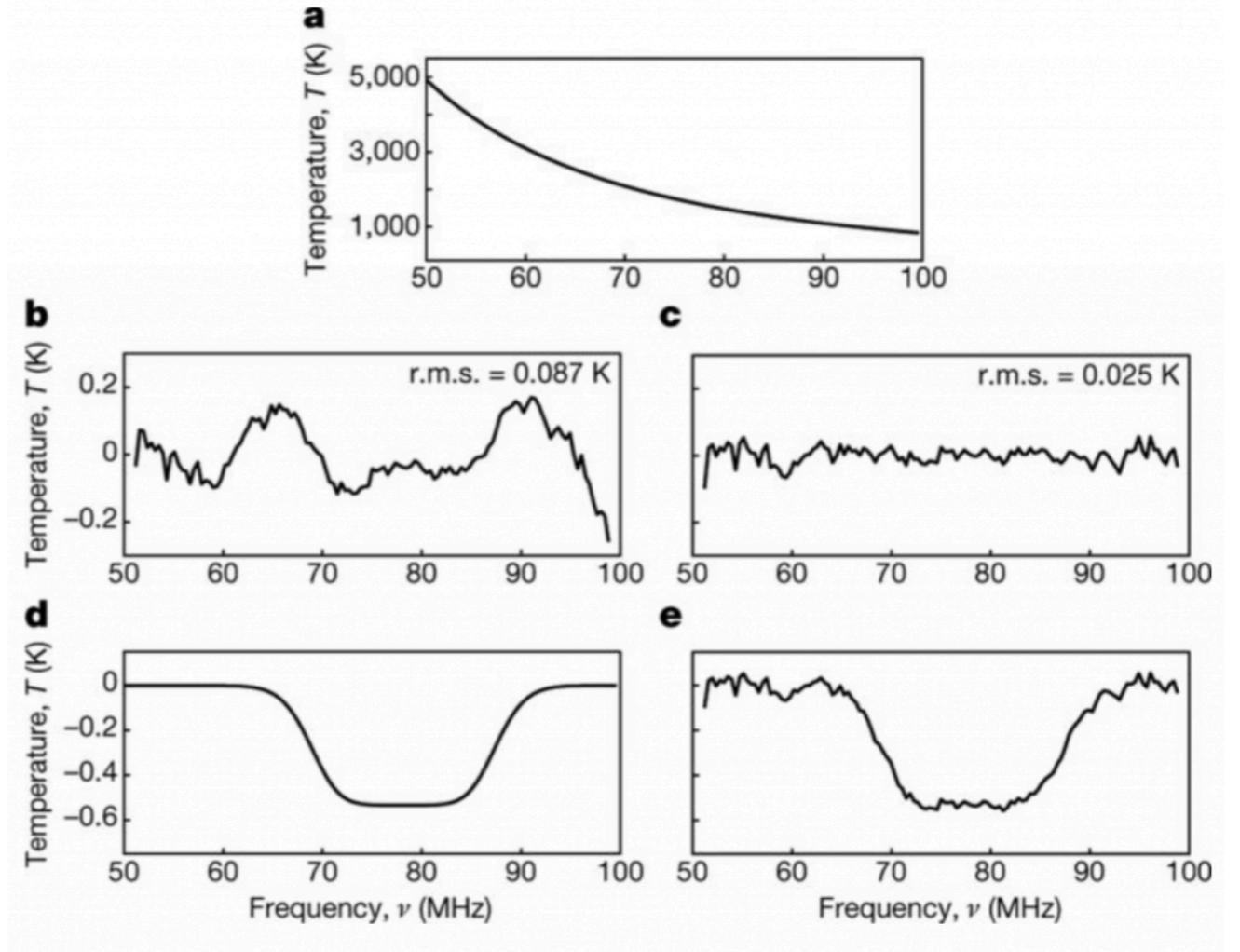




The Experiment to Detect the Global EOR Signature (EDGES)



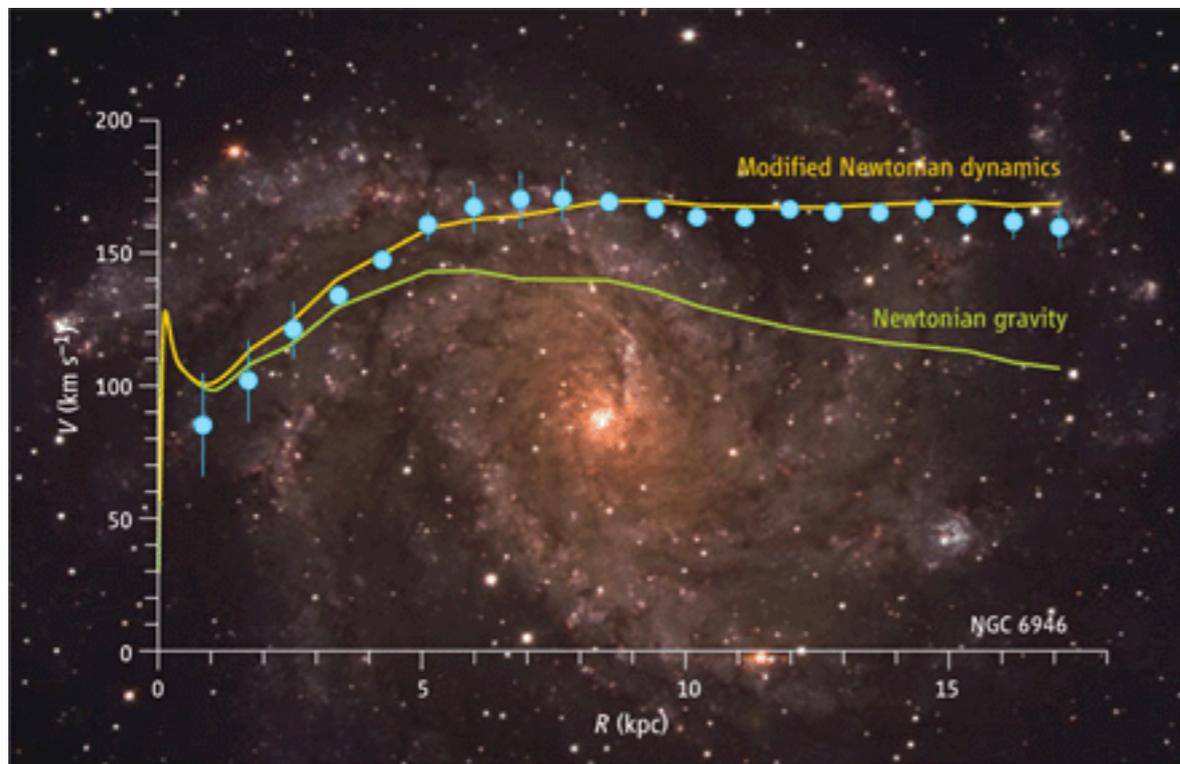




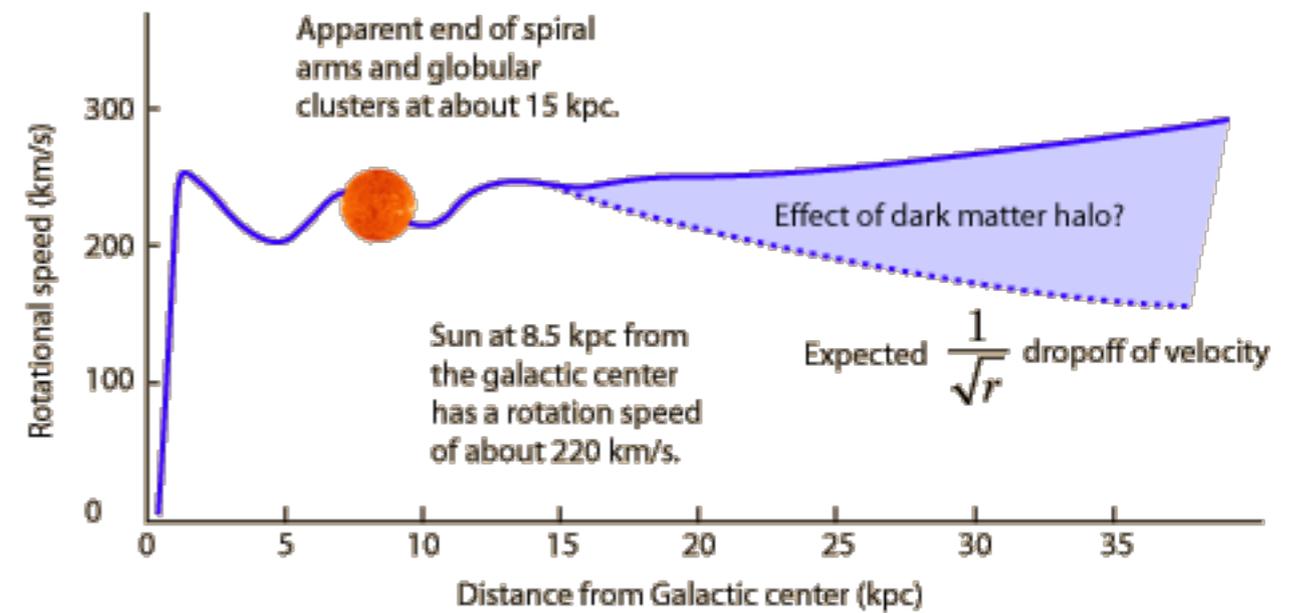
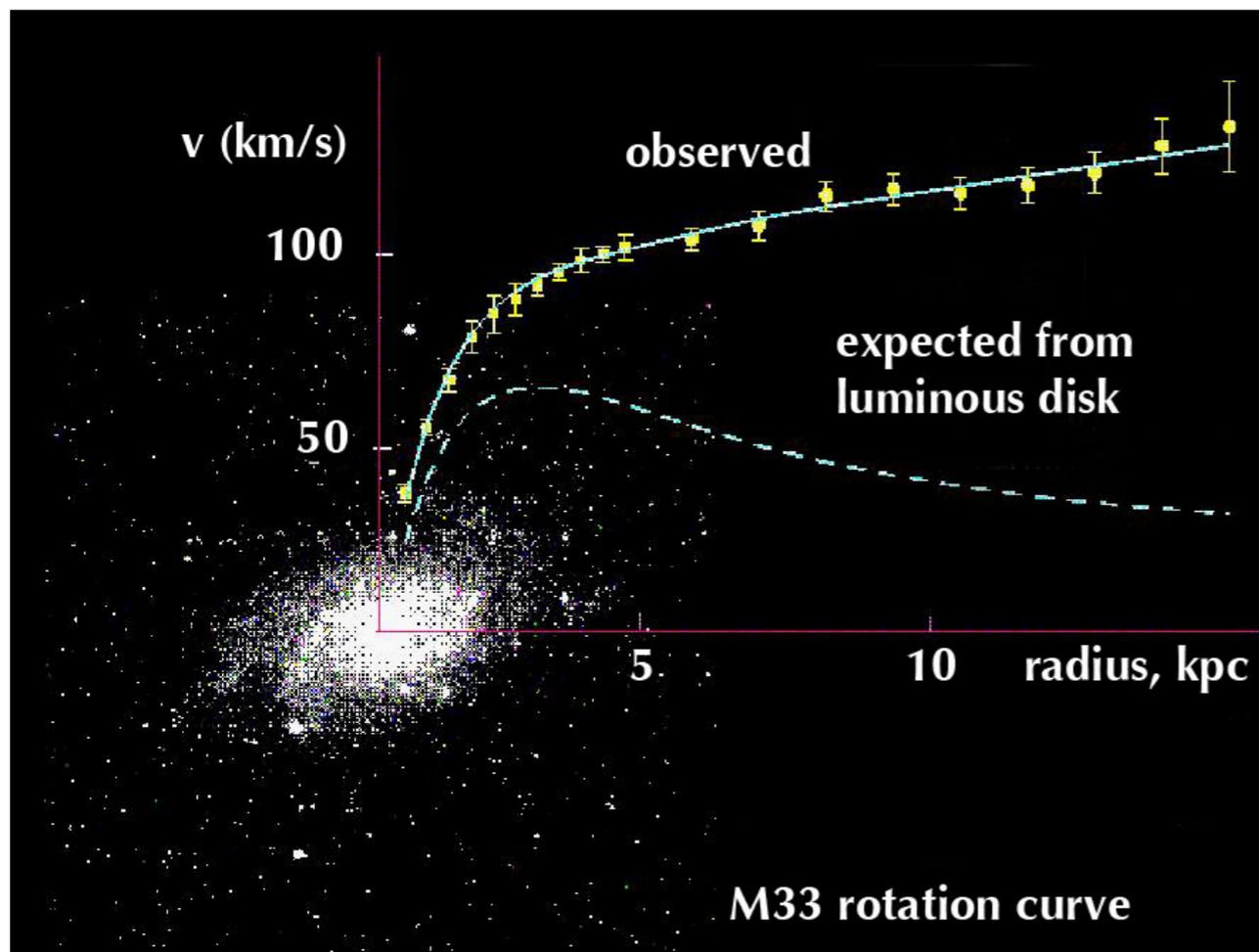
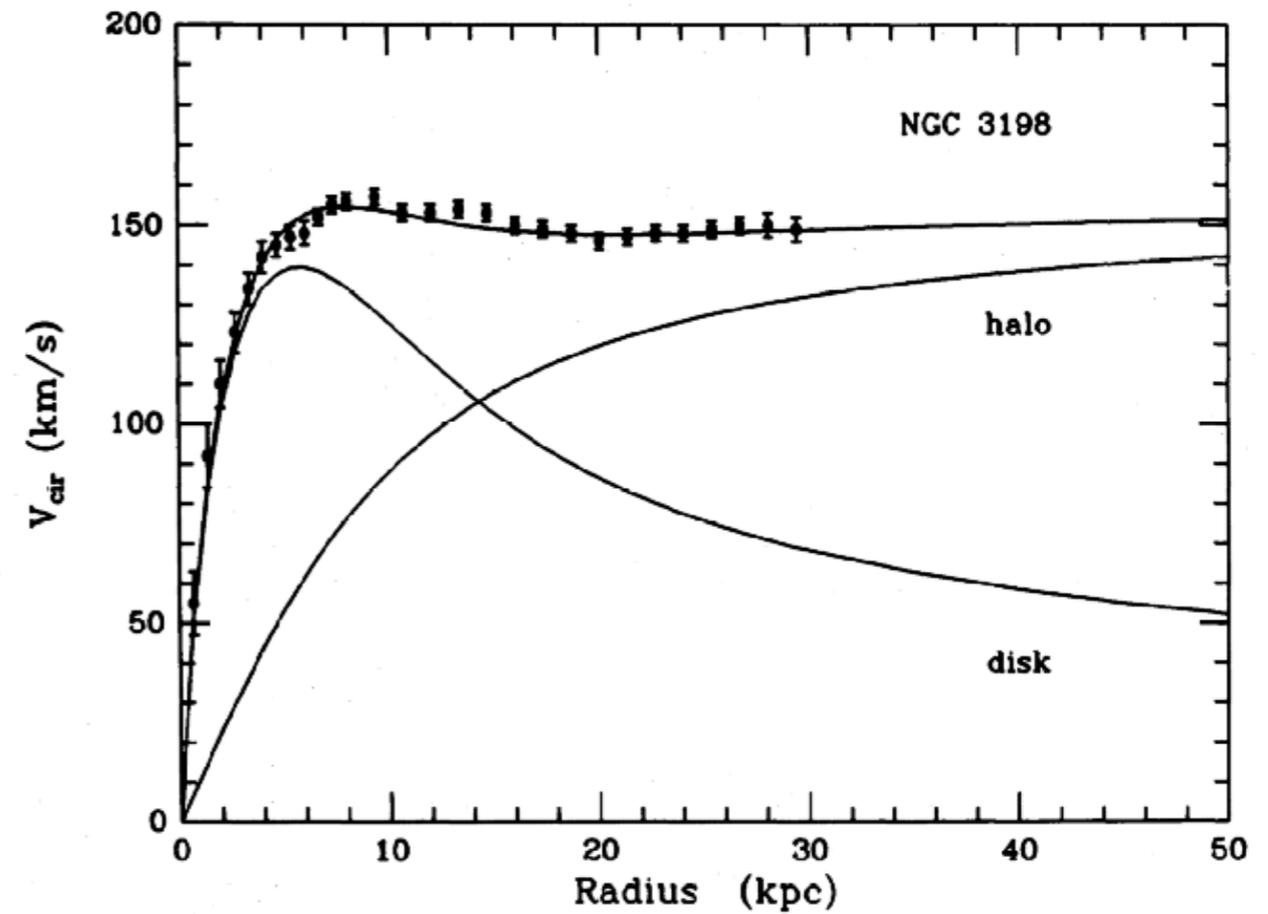
Materia oscura

La materia oscura fue propuesta por Fritz Zwicky en 1933 como una “masa no visible” que influía en las velocidades orbitales de los cúmulos en las galaxias. Posteriormente, otras observaciones han indicado la presencia de materia oscura en el universo: estas observaciones incluyen la velocidad de rotación de las galaxias, los lentes gravitacionales de los objetos por los cúmulos de galaxias, y la distribución de la temperatura del gas caliente en galaxias, cúmulos de galaxias y nebulosas.

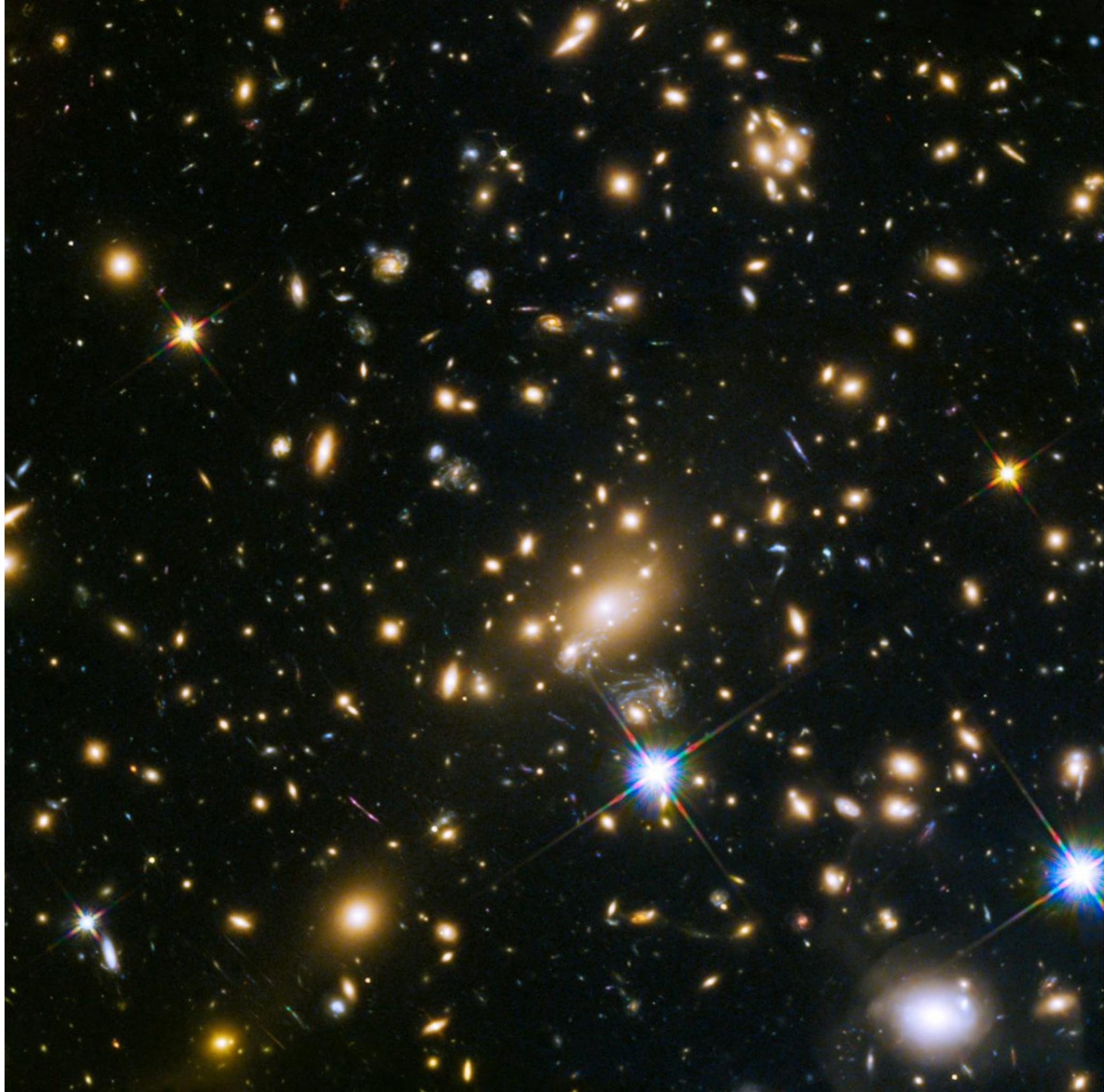
La composición de la materia oscura se desconoce. Algunos de los candidatos a materia oscura pueden ser neutrinos ordinarios y pesados, partículas elementales recientemente postuladas como los WIMPs y los axiones, cuerpos astronómicos como las estrellas enanas, los planetas (colectivamente llamados MACHO) y las nubes de gases no luminosos.



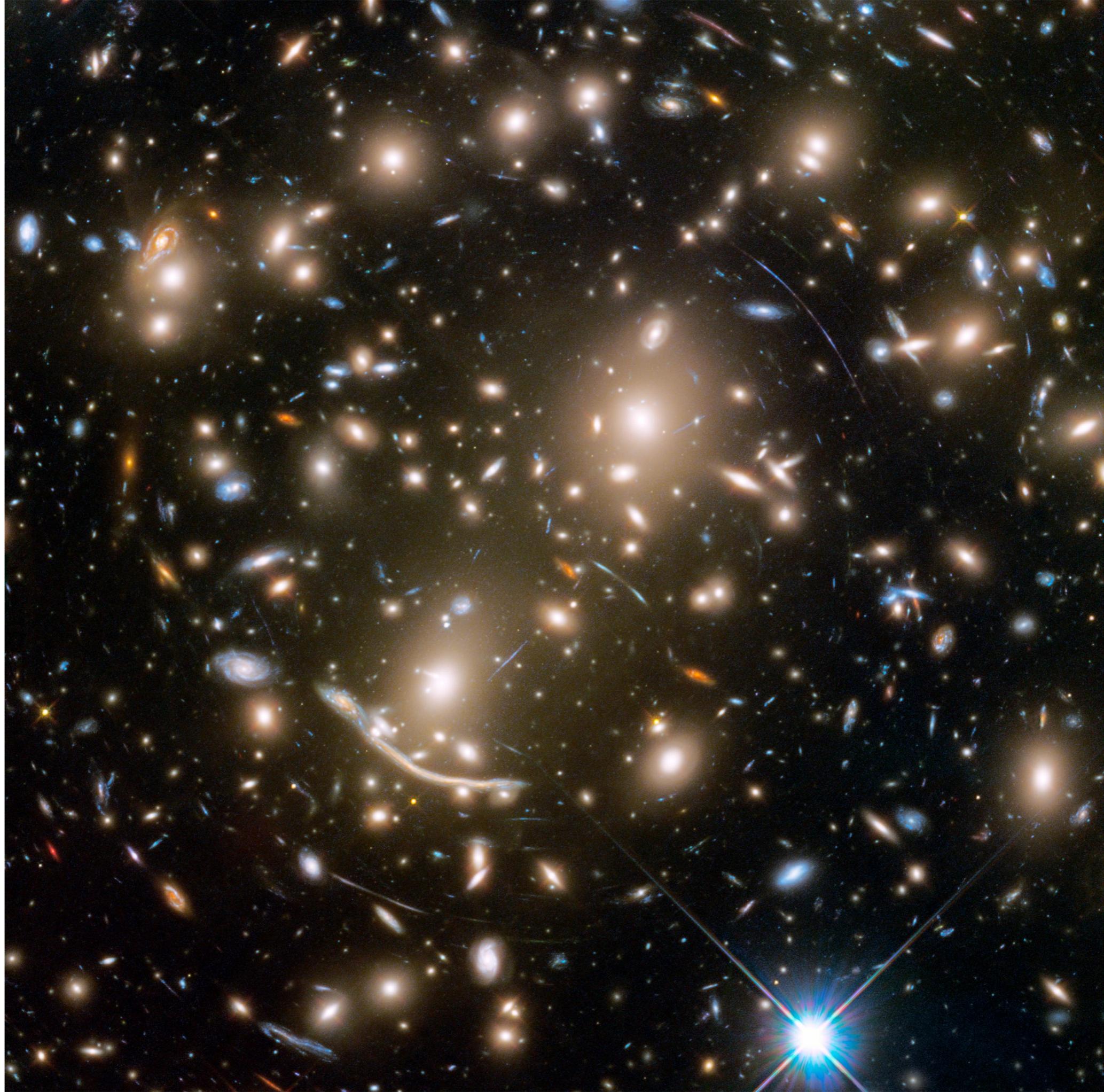
DISTRIBUTION OF DARK MATTER IN NGC 3198



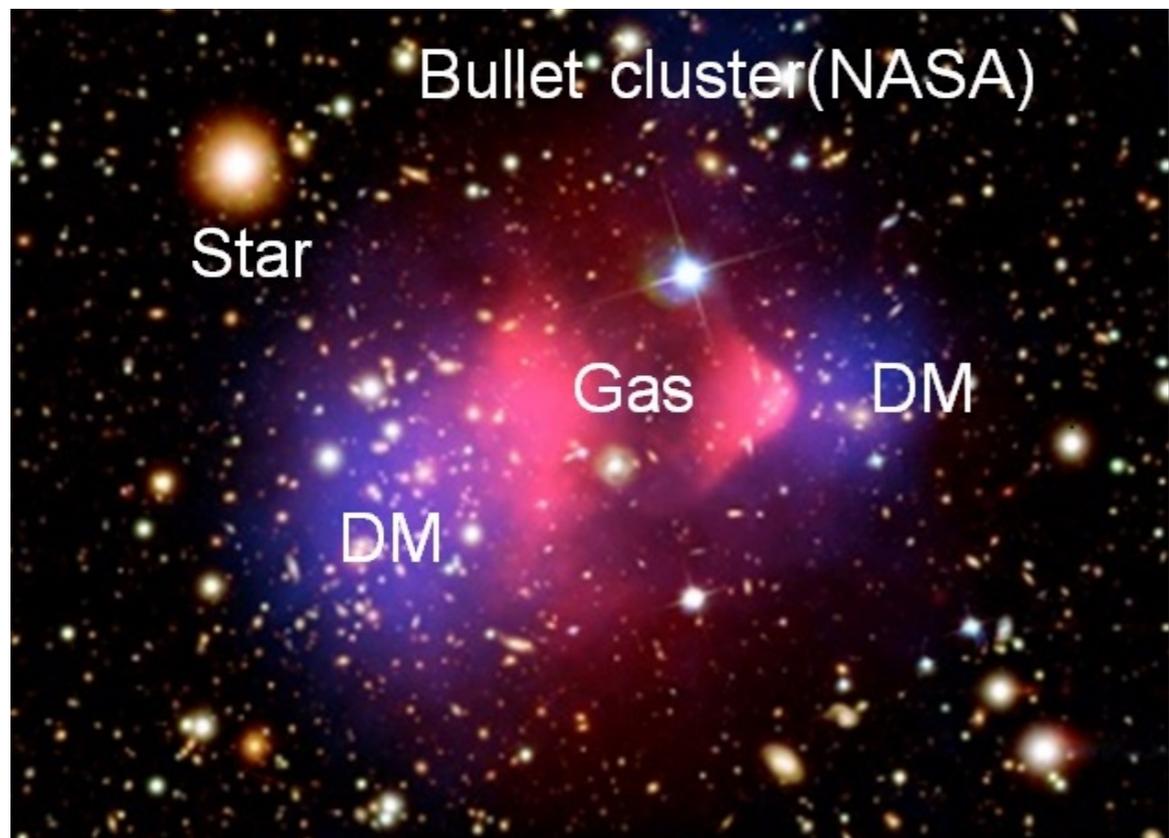
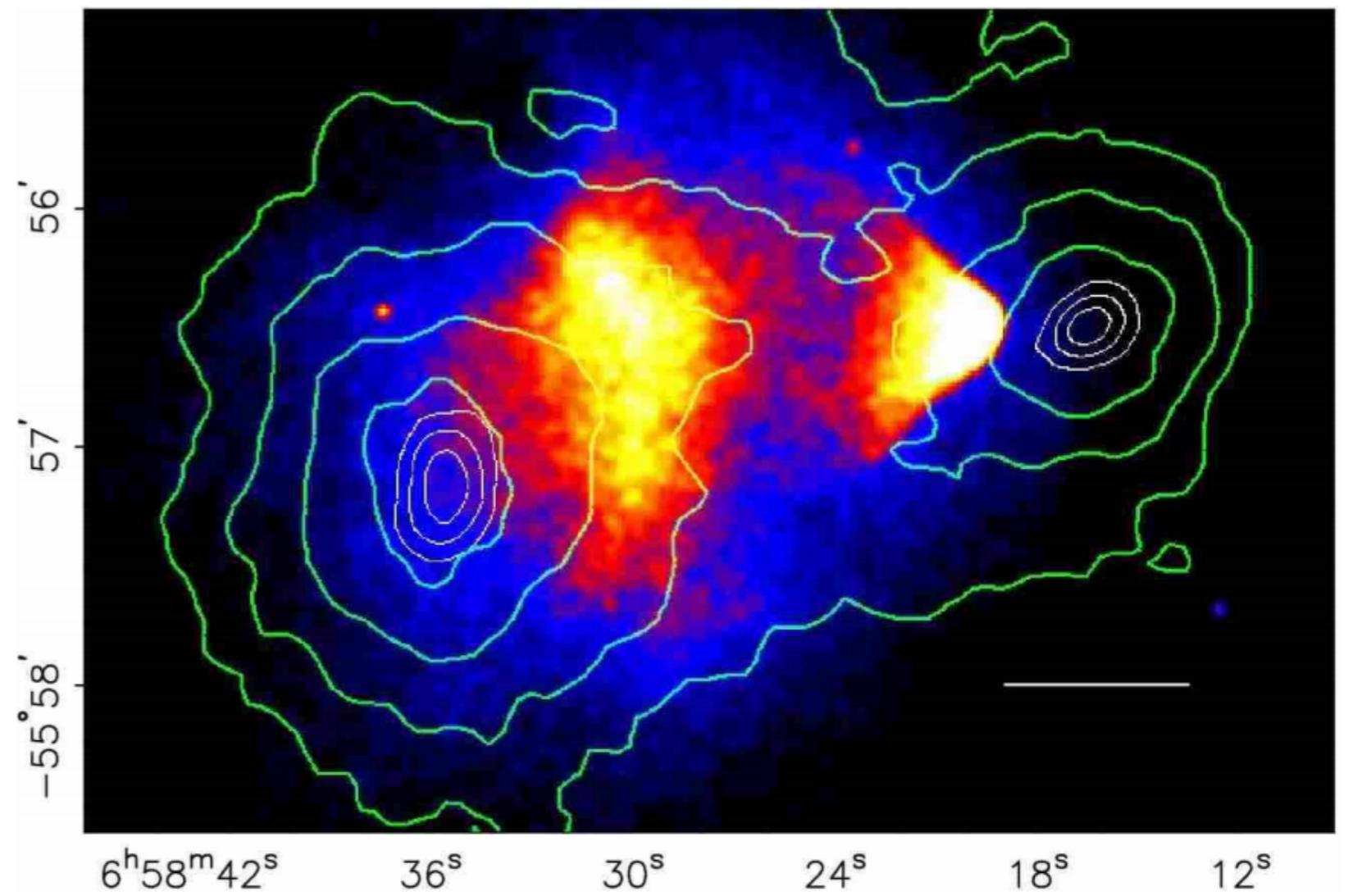
Cluster
de
galaxias



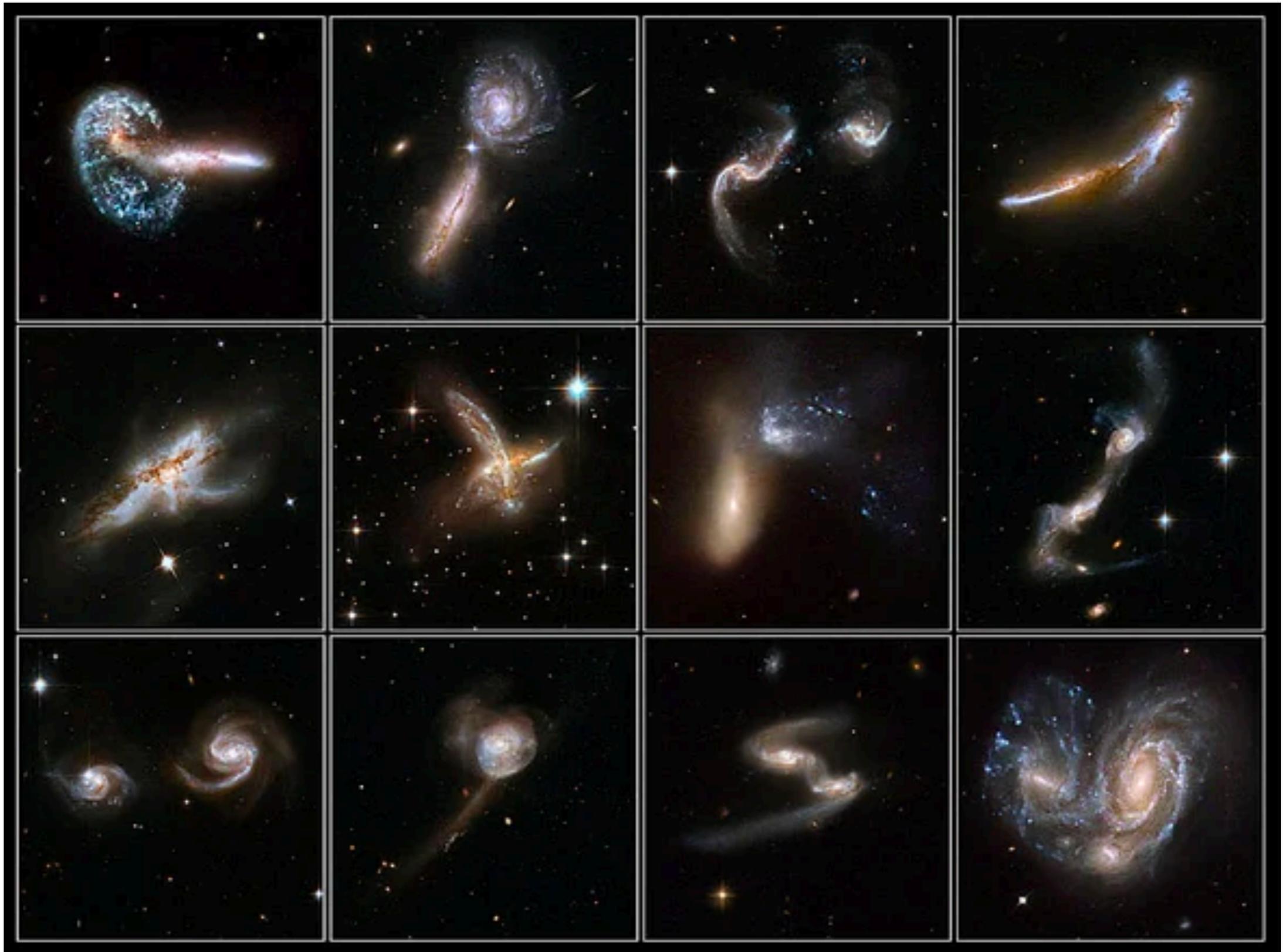
Lensing
de
galaxias



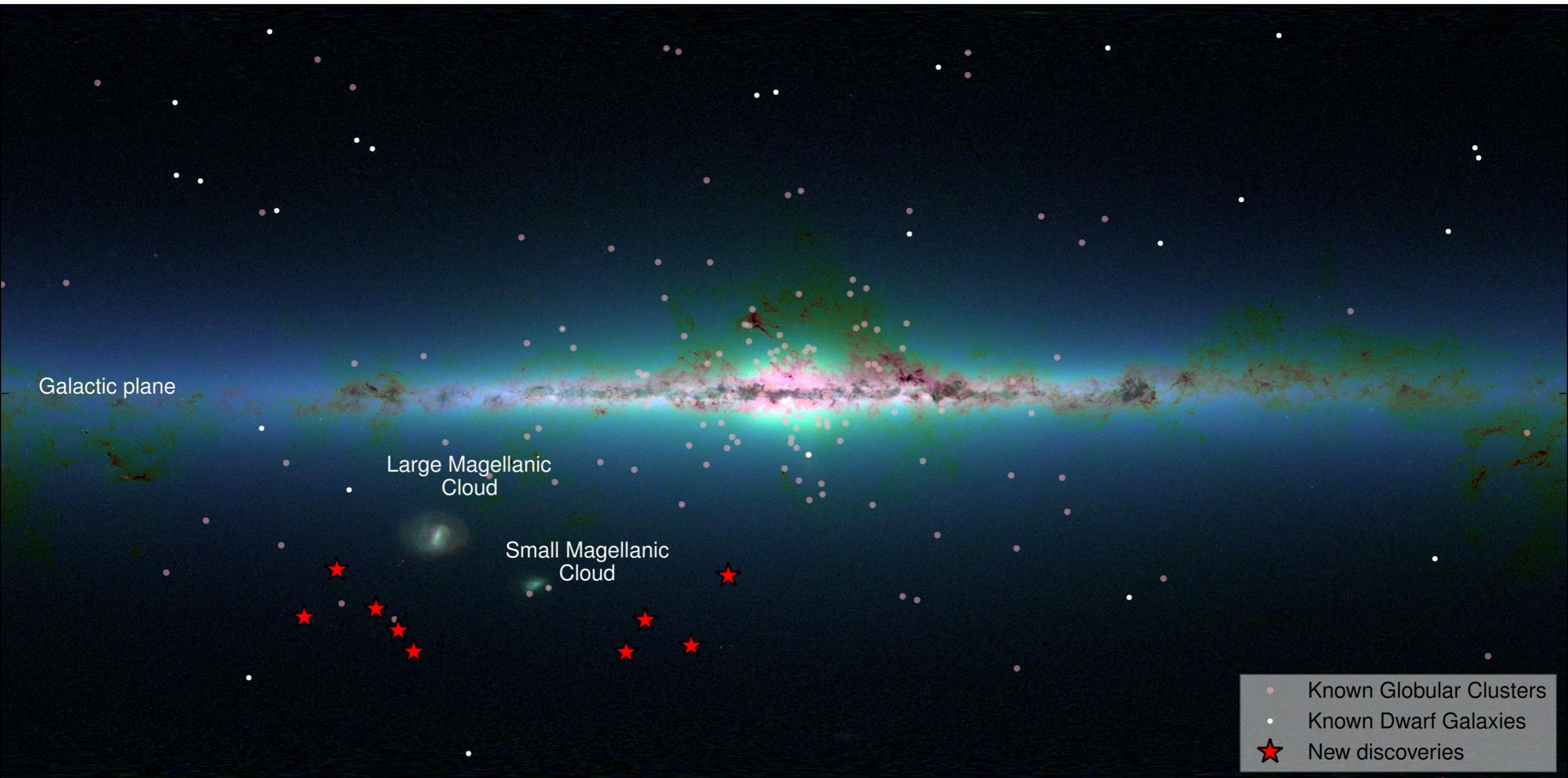
Bullet Cluster



Colisiones de galaxias

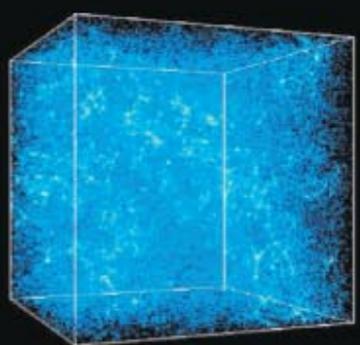


Galaxias enanas



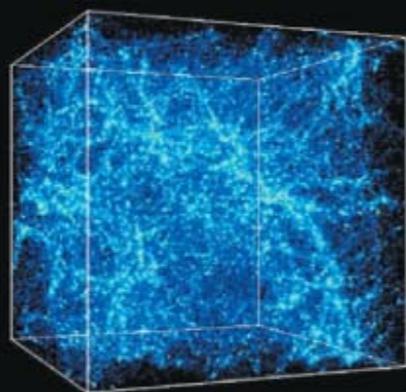
Formación de estructura

0.5 billion years



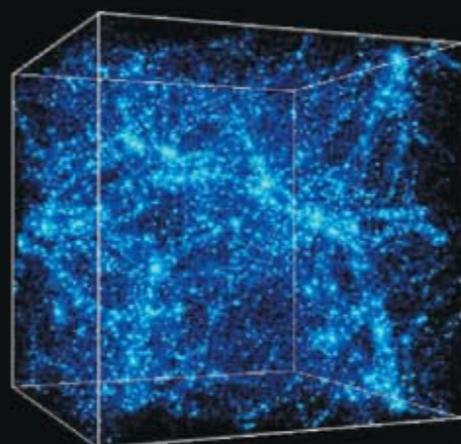
13 million light-years

2.2 billion years



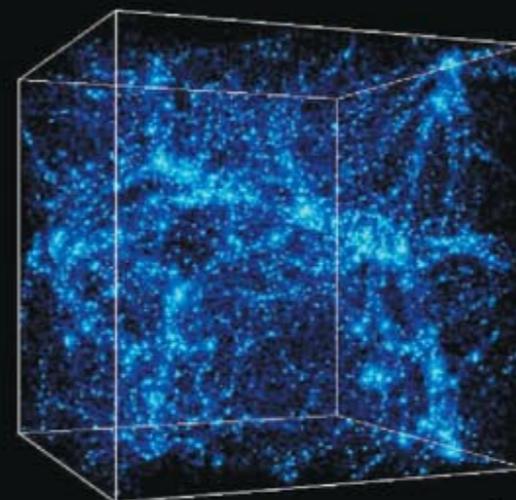
35 million light-years

5.9 billion years



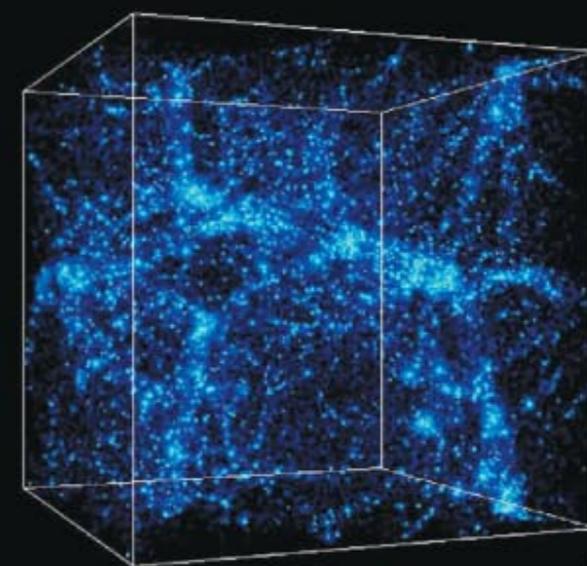
70 million light-years

8.6 billion years



93 million light-years

13.7 billion years

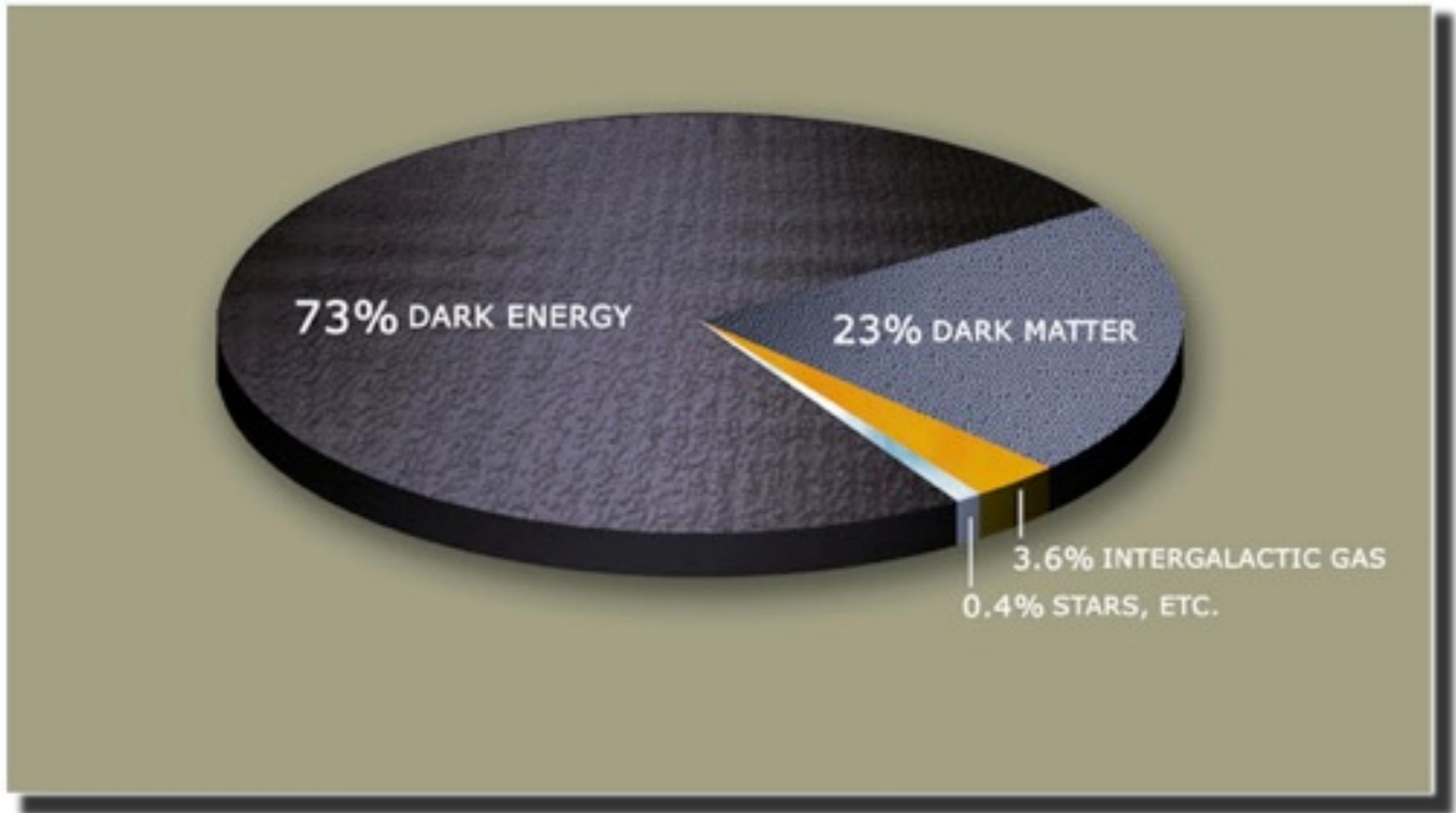


140 million light-years

As the universe expands over time, denser regions draw in more and more matter, creating a "lumpy" distribution.

Not to scale!

Materia oscura



**Currently, the two main theories explaining
Dark Matter are:**

WIMPs
(invisible heavy particles)

and

MACHOs
(hard to detect heavy objects)

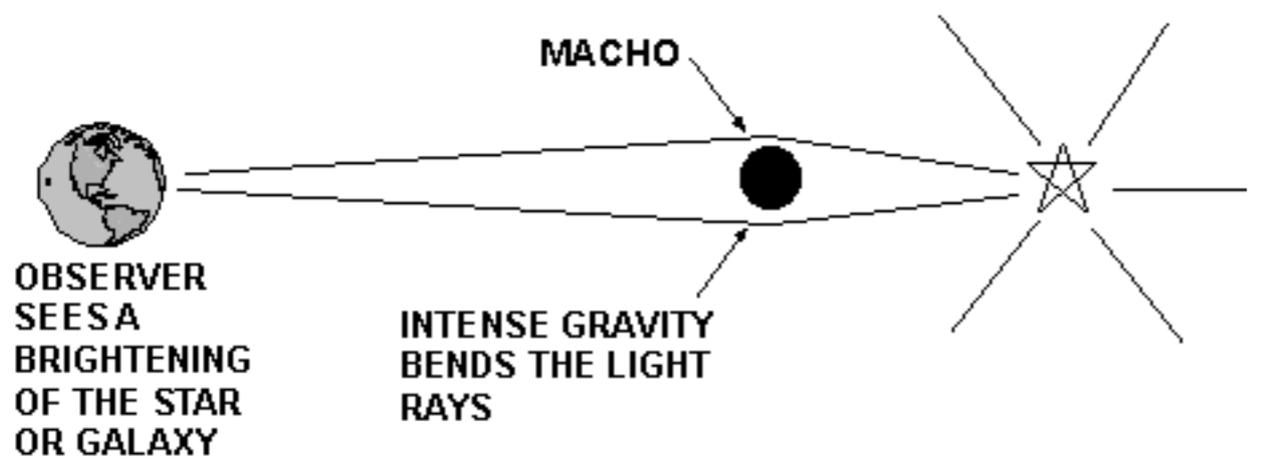
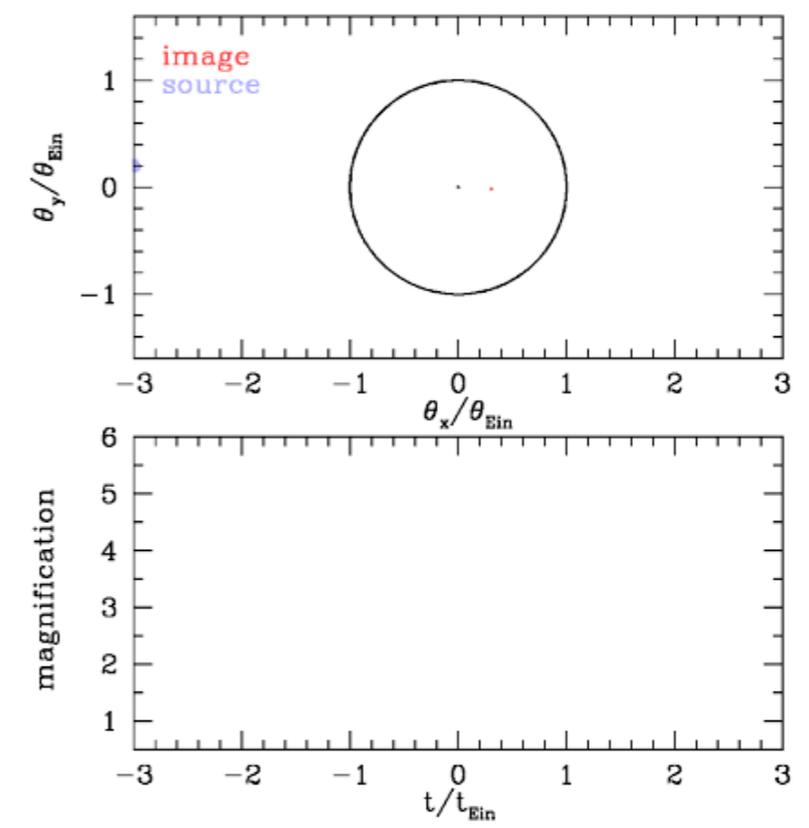
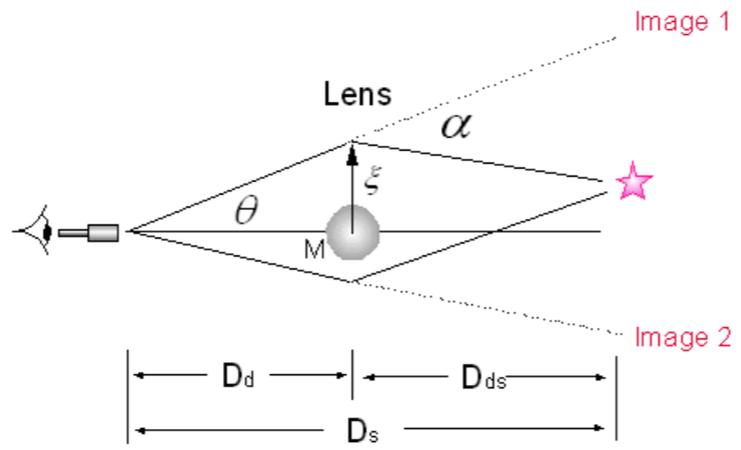
MACHOs

MAssive

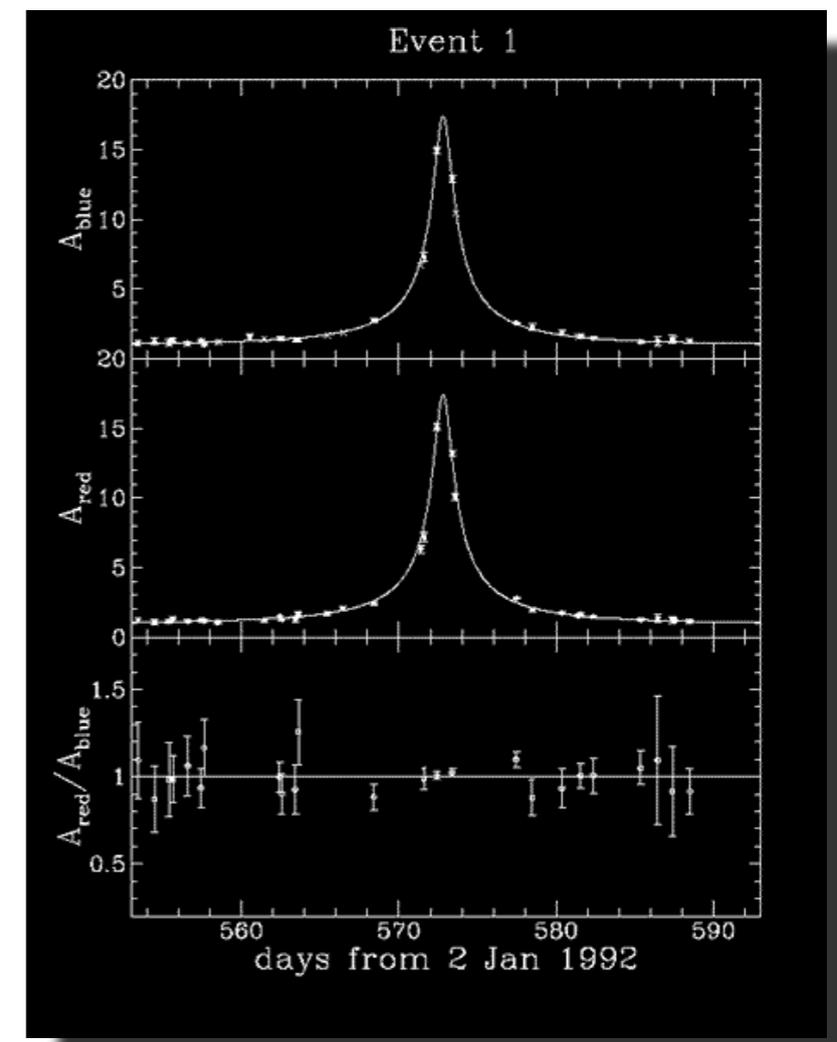
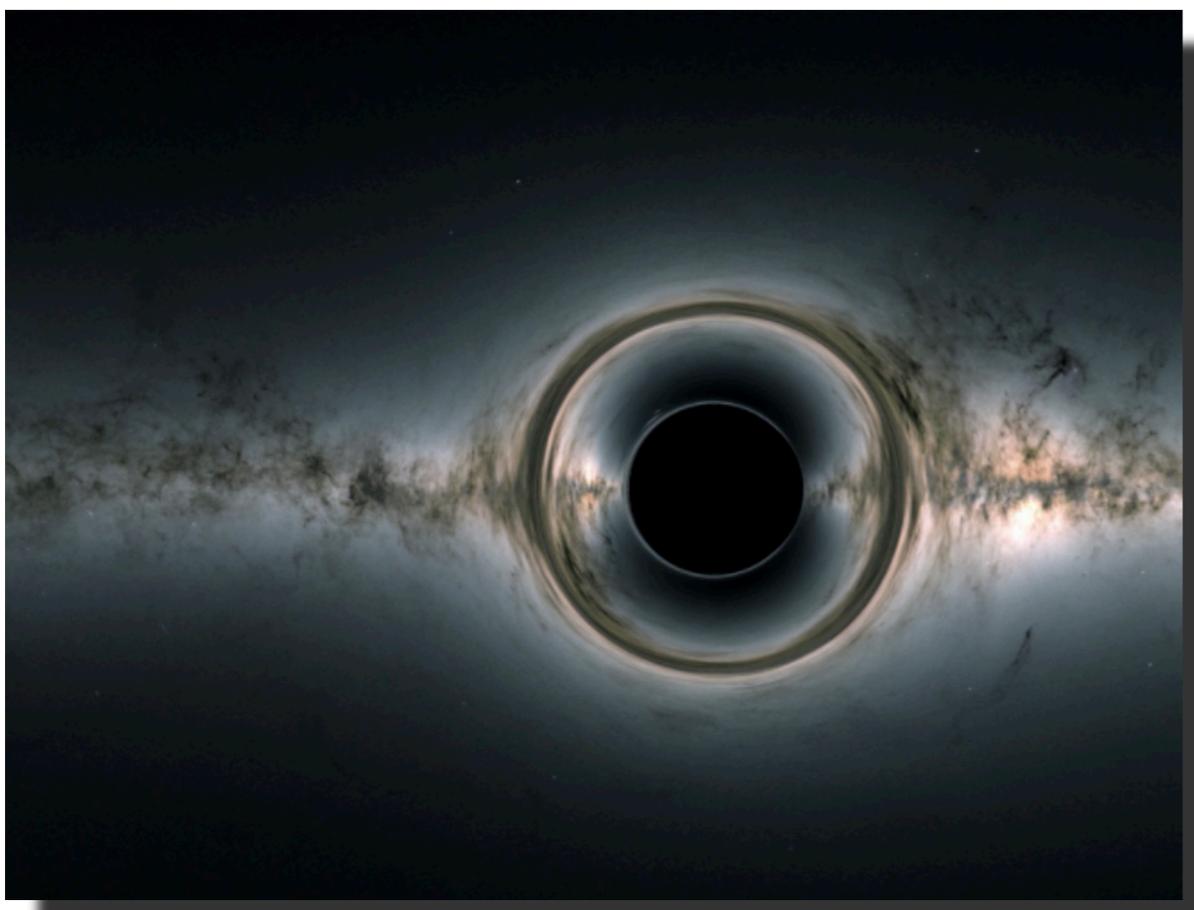
COmpact

HAlo

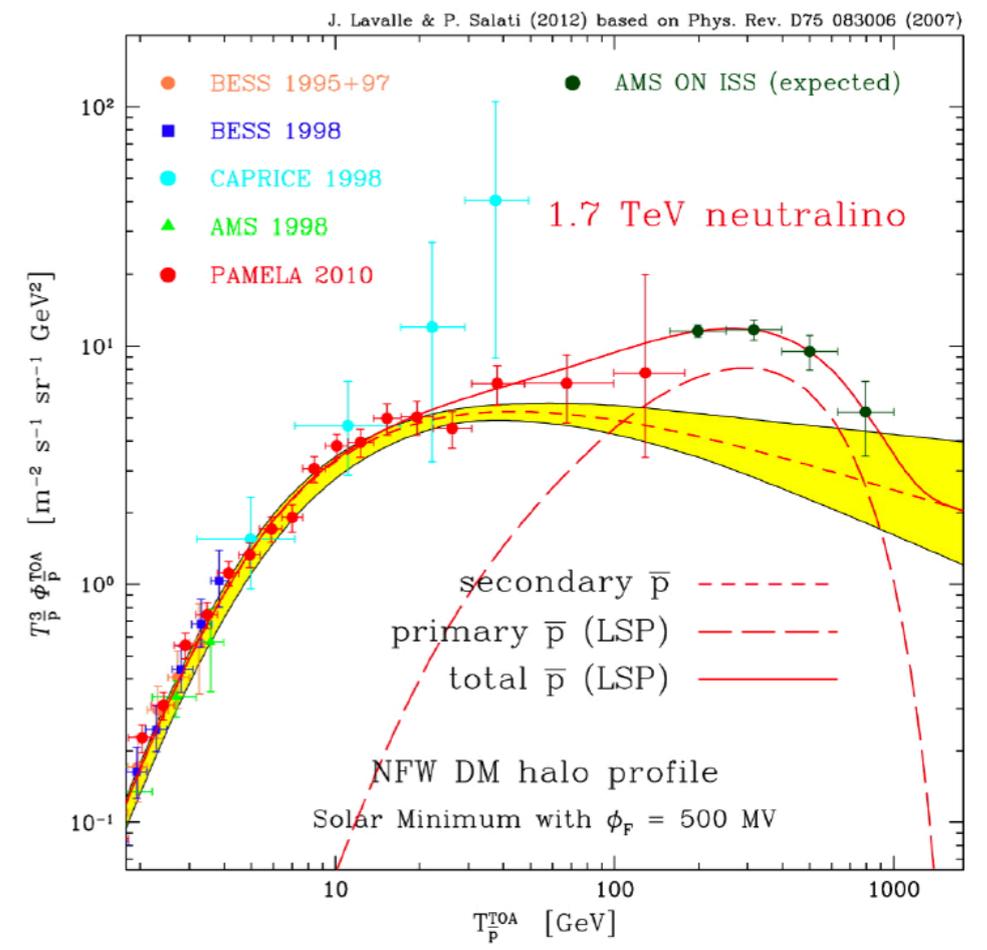
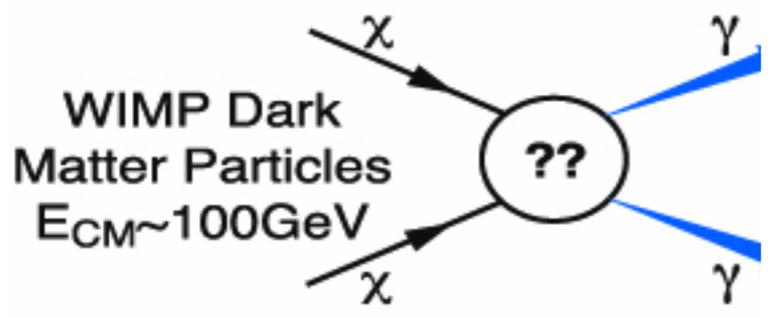
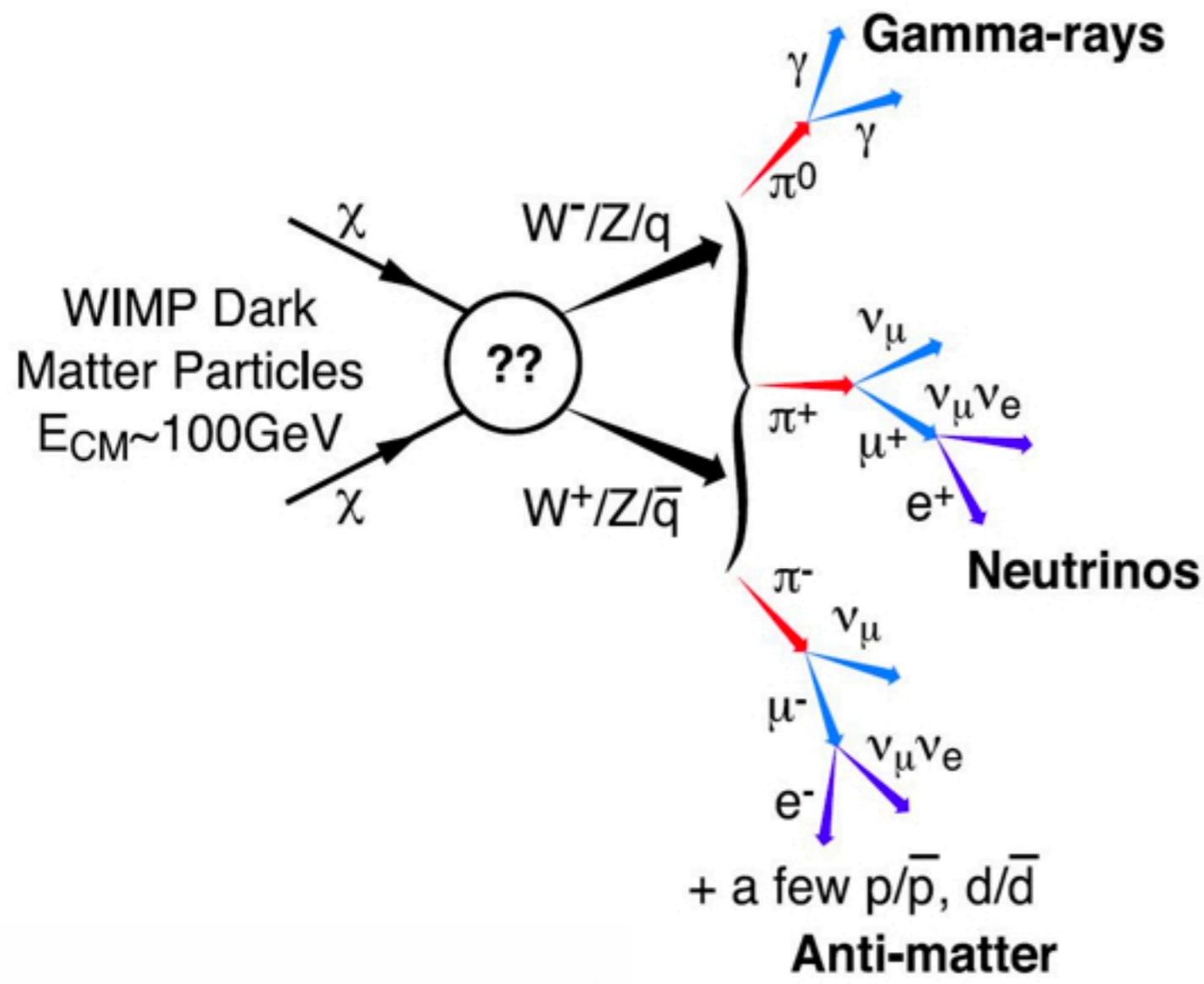
OBjects

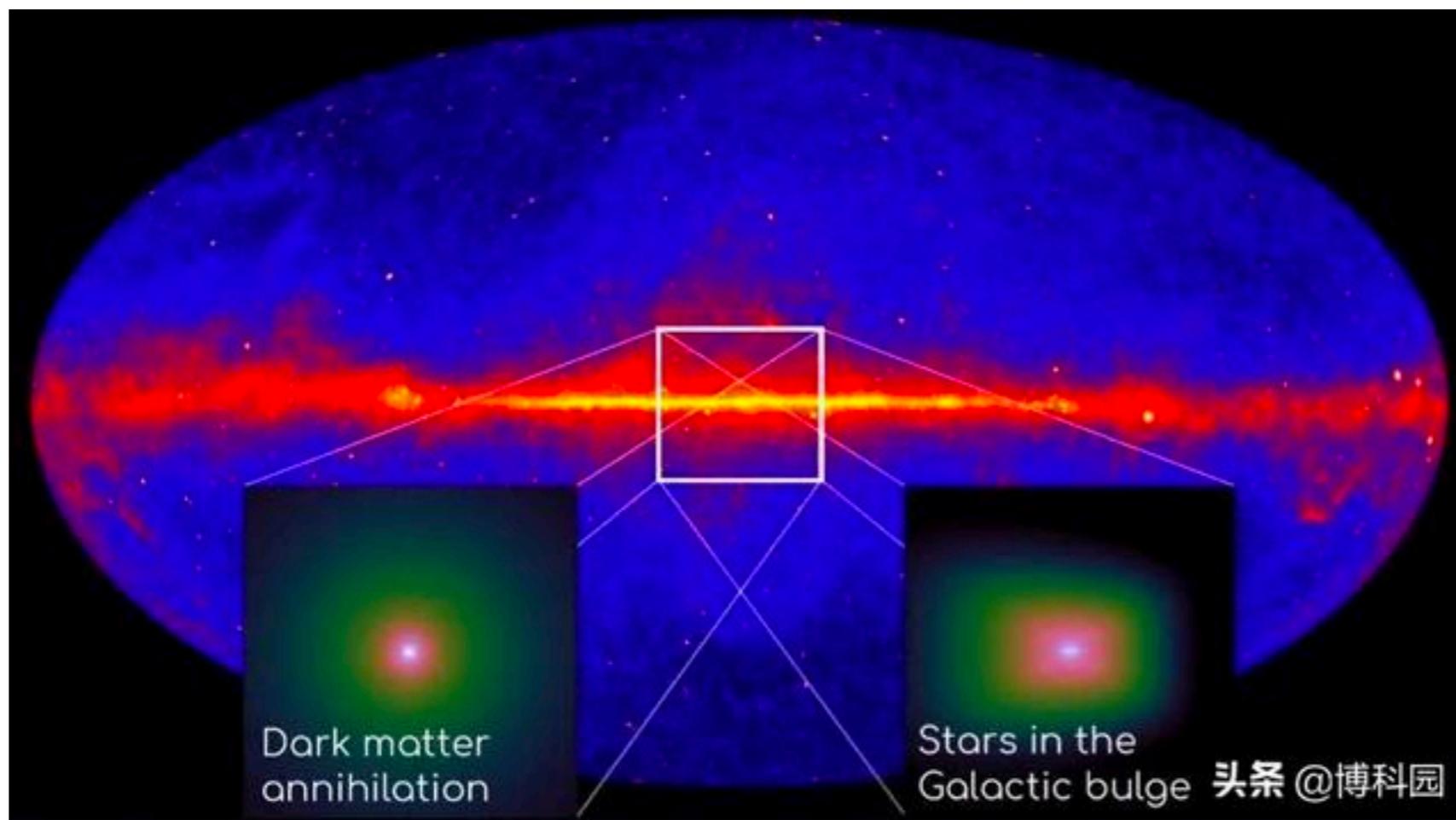


Gravitational Lensing--how MACHOs focus light



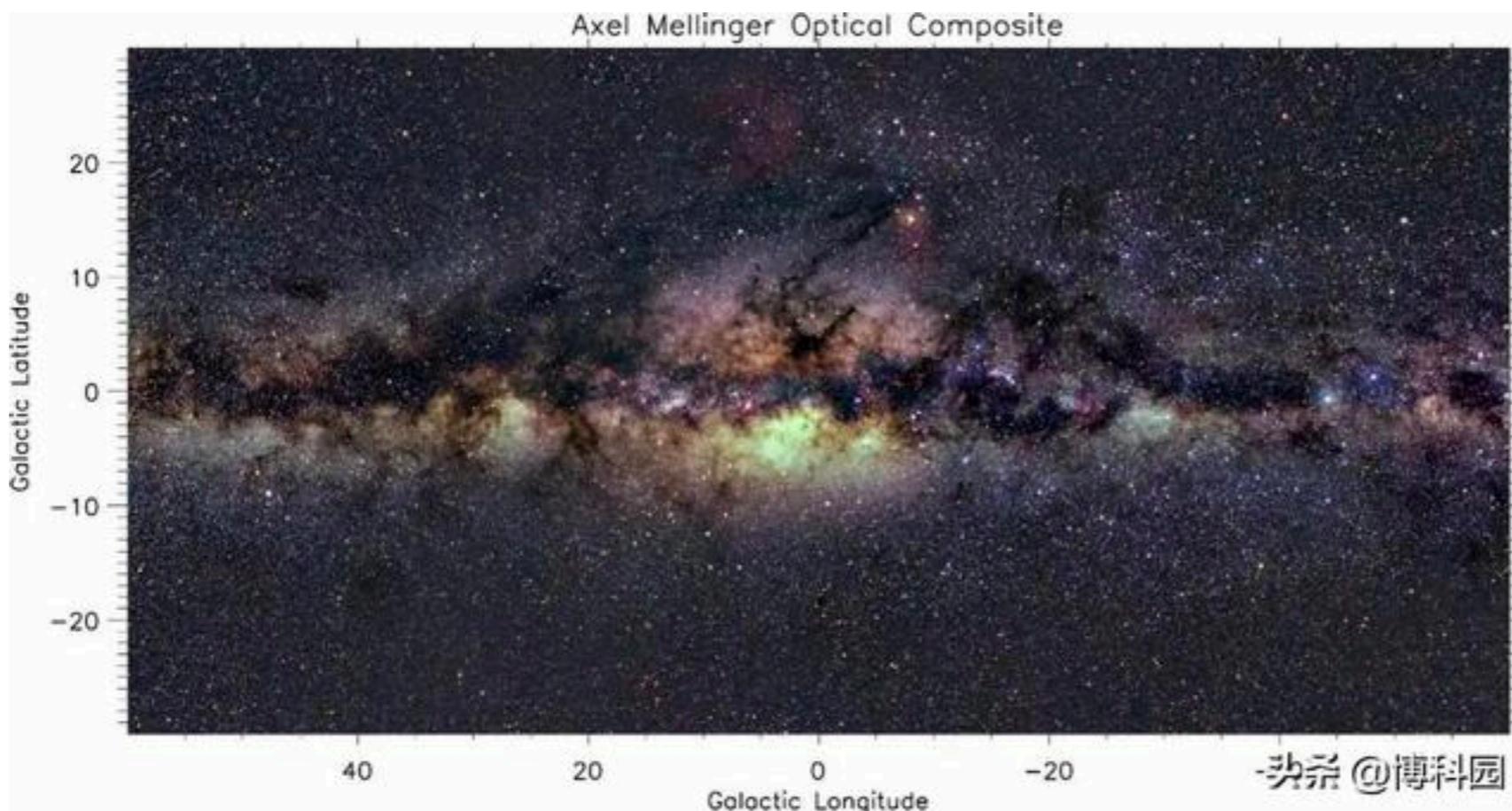
$$\chi + \chi \rightarrow q + \bar{q}, W^+ + W^-, \dots \rightarrow \bar{p}, \bar{D}, e^+ \gamma \text{ \& } \nu .$$



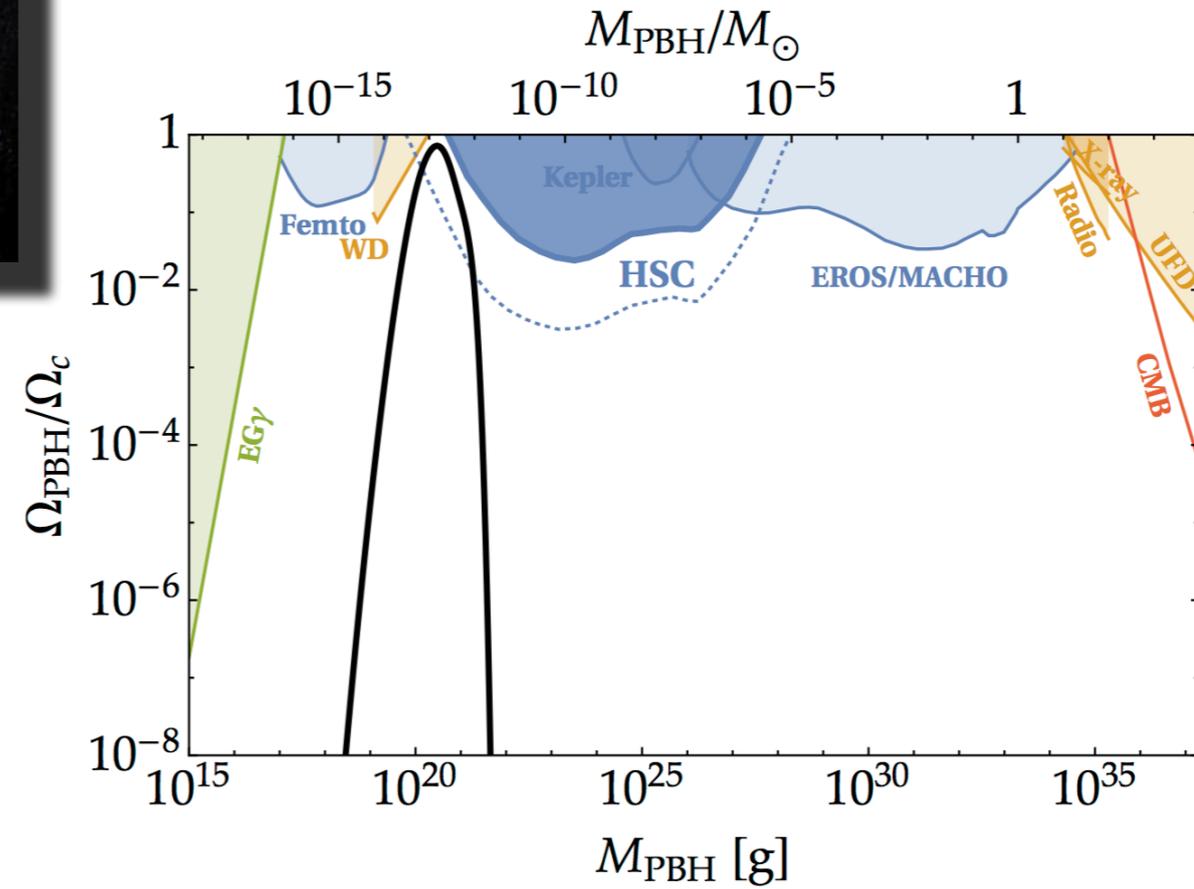
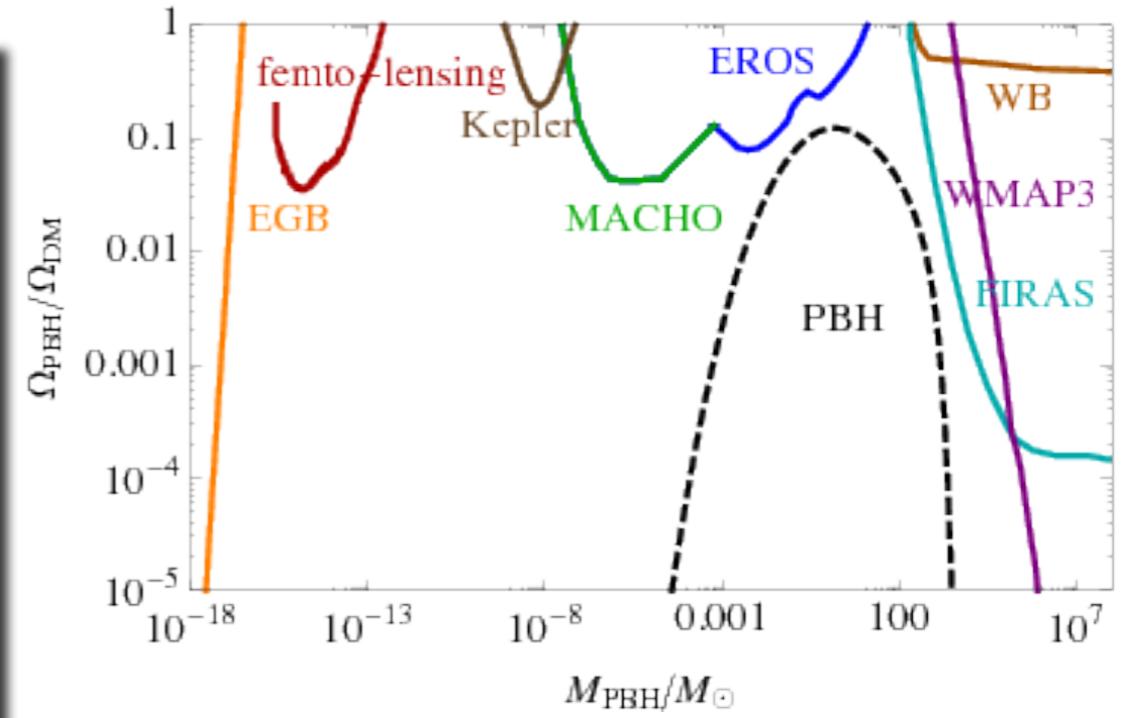
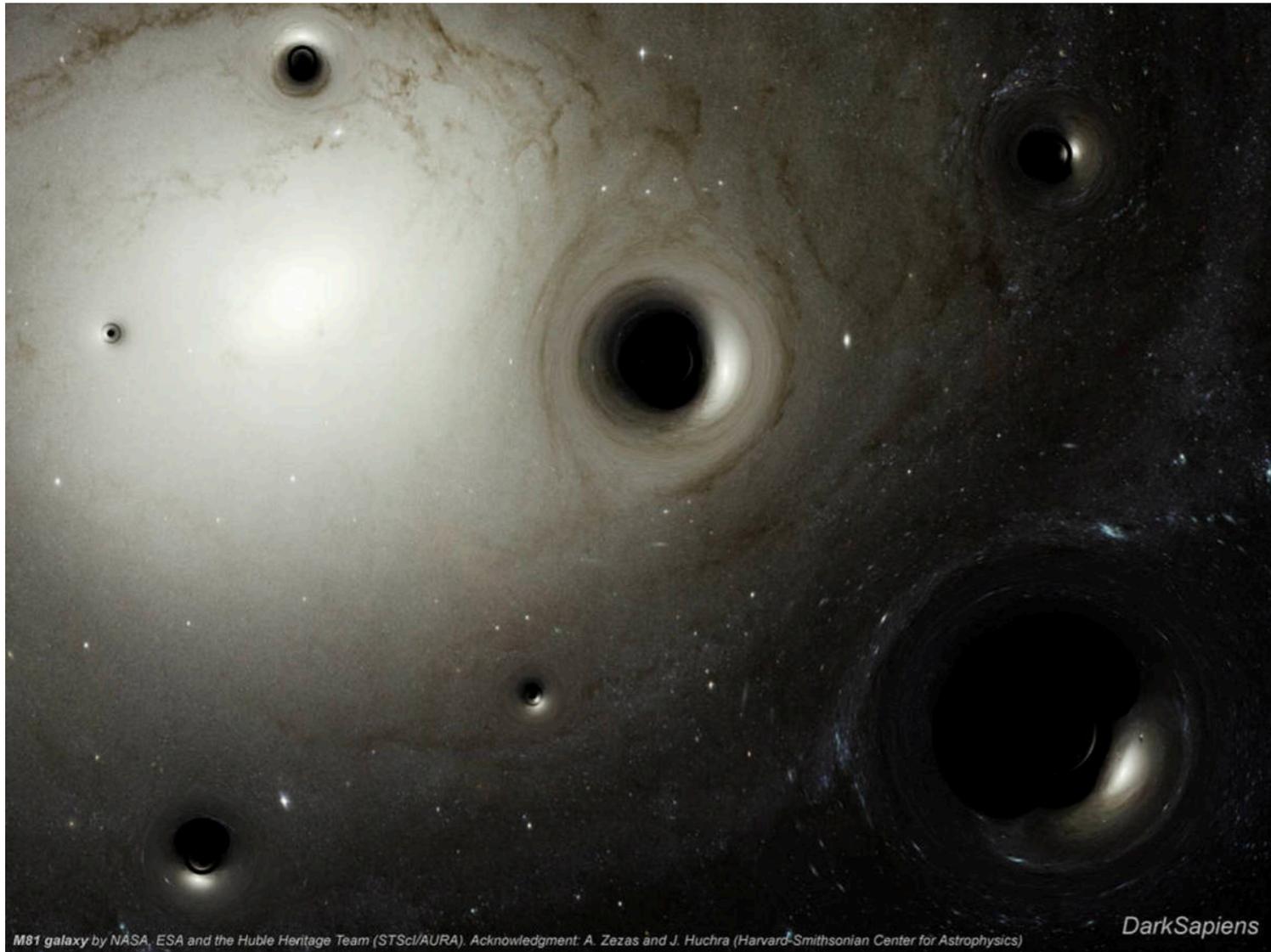


La radiación producida por la aniquilación de materia oscura debe tener forma esférica o elíptica ordenada desde el centro de la Vía Láctea, pero *Fermi* mostró una estructura en forma de varilla triaxial.

La emisión parece provenir de regiones donde también hay una gran cantidad de masa estelar en el bulbo galáctico y el centro. La relación luz-masa en el bulbo galáctico y el centro son mutuamente consistentes, de modo que la emisión de rayos gamma de GeV es un trazador sorprendentemente preciso de la masa estelar en el interior de la galaxia.



Primordial black holes?



La materia oscura y la energía oscura se infieren a partir de los movimientos de la materia visible en un campo gravitacional. Quizás la materia oscura no exista y que la Relatividad General (GR) de Einstein deba modificarse. ¿Es posible? Sí.

Algunas teorías sugeridas:

- Modified Newtonian dynamics (MOND)
- TeVeS
- STVG (MoG)

MOND (Milgrom 1983 ++)

$$m_g \mu(a/a_0) \mathbf{a} = \mathbf{F},$$

$$\mu(x \gg 1) \approx 1, \quad \mu(x \ll 1) \approx x,$$

Por tanto las curvas de rotación tienen velocidad constante

$$\frac{GMm}{r^2} = m \frac{\left(\frac{v^2}{r}\right)^2}{a_0} \implies v^4 = GMa_0, \quad a_0 \approx 1.2 \times 10^{-10} \text{ms}^{-2}$$

La teoría está basada en los ingredientes siguientes:

- Un campo de vector único;
- Un campo escalar dinámico;
- Un campo escalar no-dinámico;
- Un lagrangiano construido utilizando una métrica alternativa;
- Una función sin dimensión arbitraria.

$$S = S_g + S_s + S_v + S_m$$

La métrica usada para la materia es: $\hat{g}^{\mu\nu} = e^{2\phi} g^{\mu\nu} - 2u^\alpha u^\beta \sinh(2\phi)$.

$$S_m = \int \mathcal{L}(\hat{g}_{\mu\nu}, f^\alpha, f^\alpha_{|\mu}, \dots) \sqrt{-\hat{g}} d^4x,$$

Scalar-Tensor-Vector-Gravity (STVG) action takes the form:

$$S = S_G + S_\phi + S_S + S_M.$$

$$S_G = -\frac{1}{16\pi} \int \frac{1}{G} (R + 2\Lambda) \sqrt{-g} d^4x,$$

$$S_\phi = -\int \omega \left[\frac{1}{4} B^{\mu\nu} B_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \mu^2 \phi_\mu \phi^\mu + V_\phi(\phi) \right] \sqrt{-g} d^4x,$$

$$S_S = -\int \frac{1}{G} \left[\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \left(\frac{\nabla_\mu G \nabla_\nu G}{G^2} + \frac{\nabla_\mu \mu \nabla_\nu \mu}{\mu^2} - \nabla_\mu \omega \nabla_\nu \omega \right) + \frac{V_G(G)}{G^2} + \frac{V_\mu(\mu)}{\mu^2} + V_\omega(\omega) \right] \sqrt{-g} d^4x.$$

In addition to the metric $g_{\mu\nu}(x)$, we have a massive vector field $\phi_\mu(x)$, and 3 scalar fields $G(x)$, $\omega(x)$ and $\mu(x)$. $B_{\mu\nu} = \partial_\mu \phi_\nu - \partial_\nu \phi_\mu$ and $V_\phi(\phi)$, $V_G(G)$, $V_\omega(\omega)$ and $V_\mu(\mu)$ denote self-interaction potentials.

The equation of motion of a test particle is given by

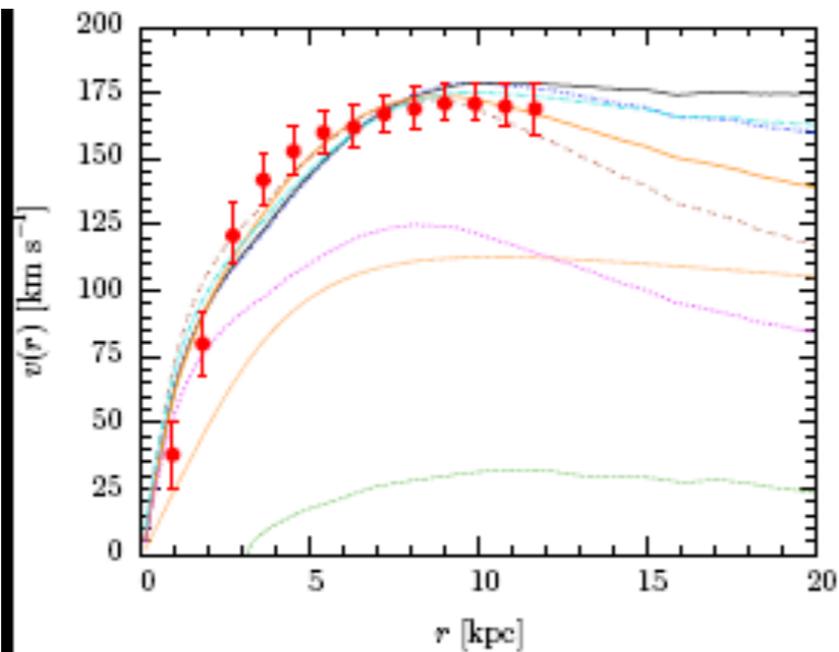
$$m \left(\frac{du^\mu}{ds} + \Gamma_{\alpha\beta}^\mu u^\alpha u^\beta \right) = -\alpha \kappa \omega m B^\mu{}_\nu u^\nu.$$

For weak fields the MOG acceleration law is

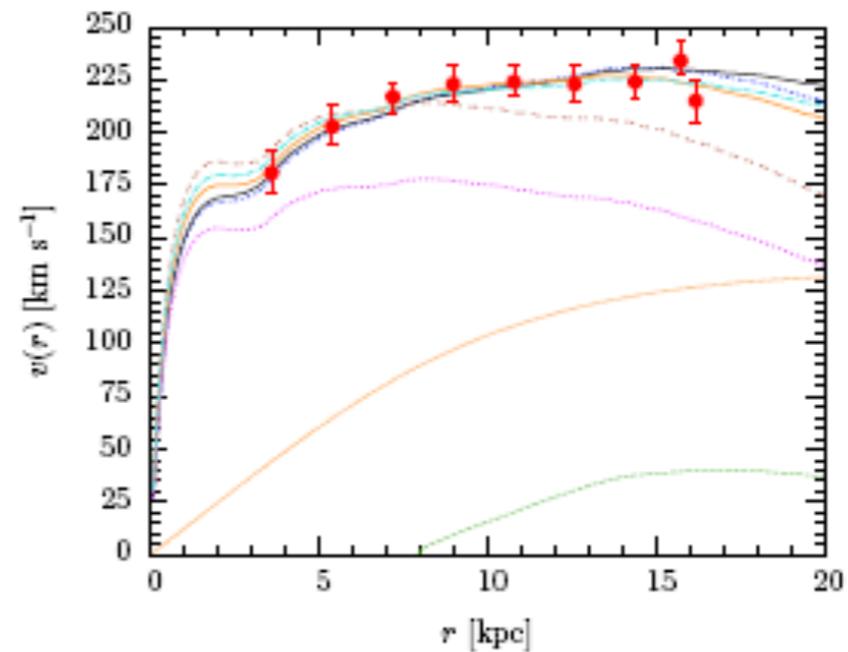
$$\ddot{r} = -\frac{G_N M}{r^2} \left[1 + \alpha - \alpha(1 + \mu r) e^{-\mu r} \right],$$

$$\alpha = \frac{M}{(\sqrt{M} + E)^2} \left(\frac{G_\infty}{G_N} - 1 \right), \quad \mu = \frac{D}{\sqrt{M}}, \quad \begin{aligned} D &\cong 6250 M_\odot^{1/2} \text{kpc}^{-1}, \\ E &\cong 25000 M_\odot^{1/2}, \\ G_\infty &\cong 20 G_N, \end{aligned}$$

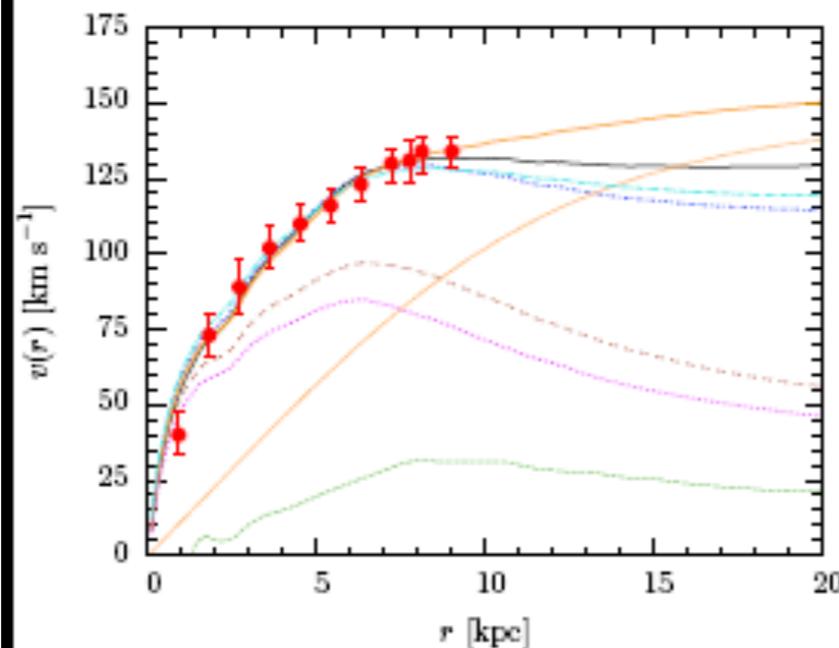
$$\ddot{r} = -\frac{G_{\text{eff}} M}{r^2}, \quad G_{\text{eff}} = G_N \left[1 + \alpha - \alpha(1 + \mu r) e^{-\mu r} \right].$$



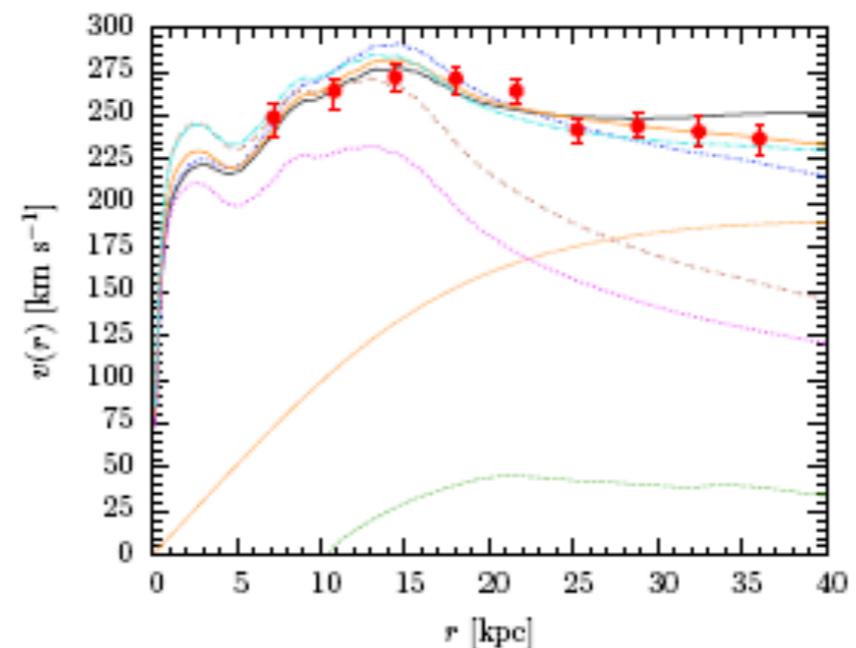
HSB (a) NGC 3877



HSB (b) NGC 3953



HSB (c) NGC 3972

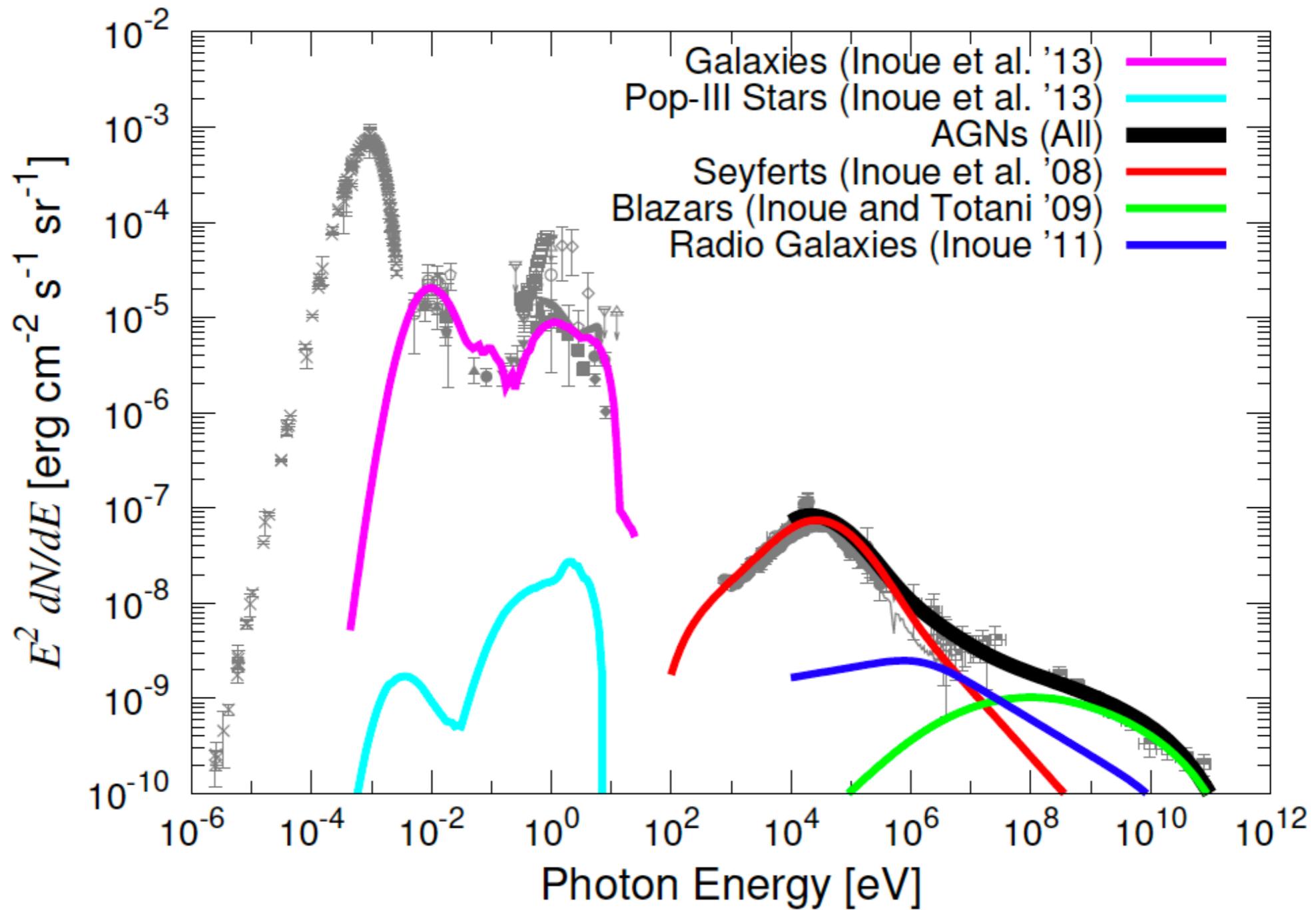


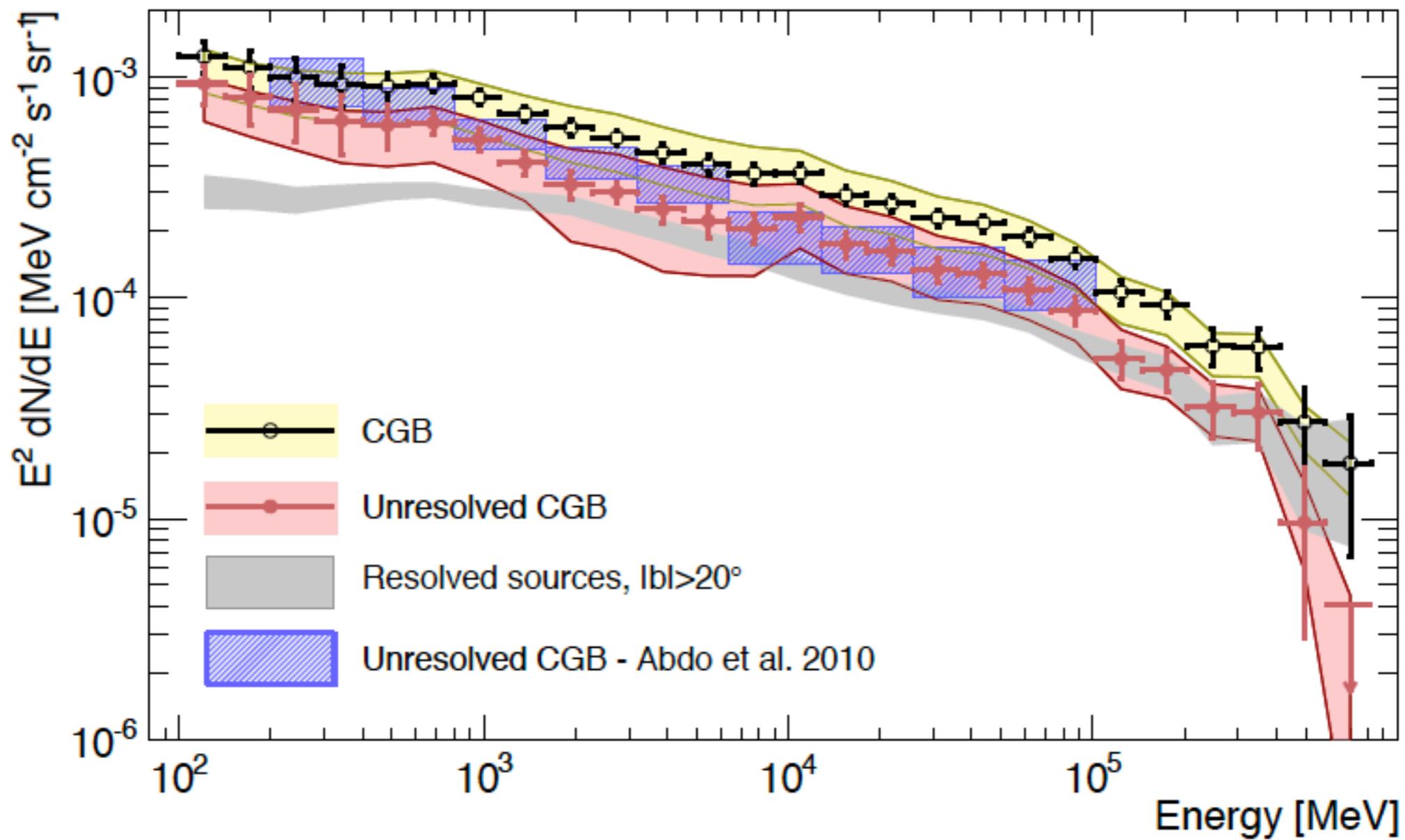
HSB (d) NGC 3992

J. R. Brownstein's doctoral thesis

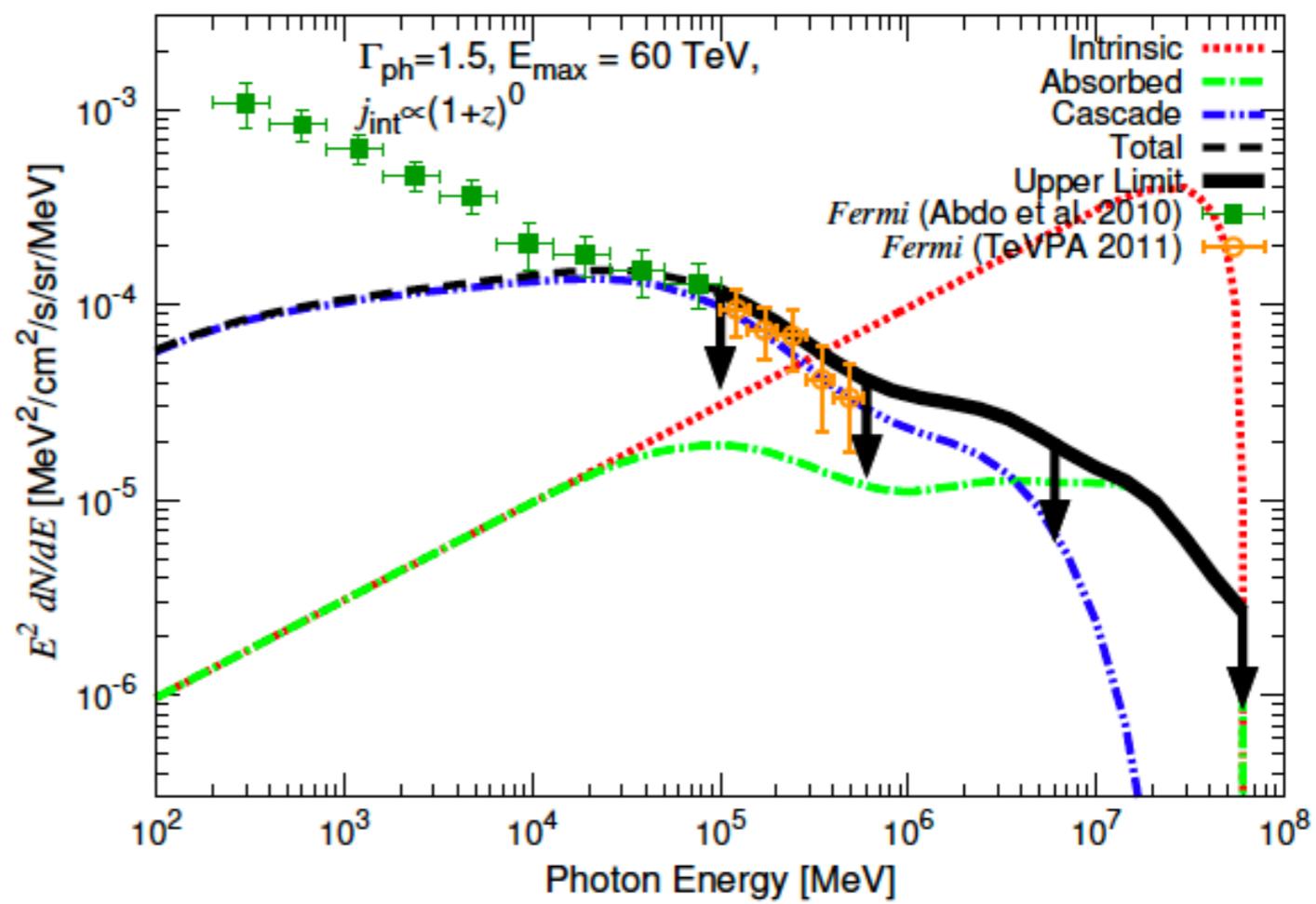
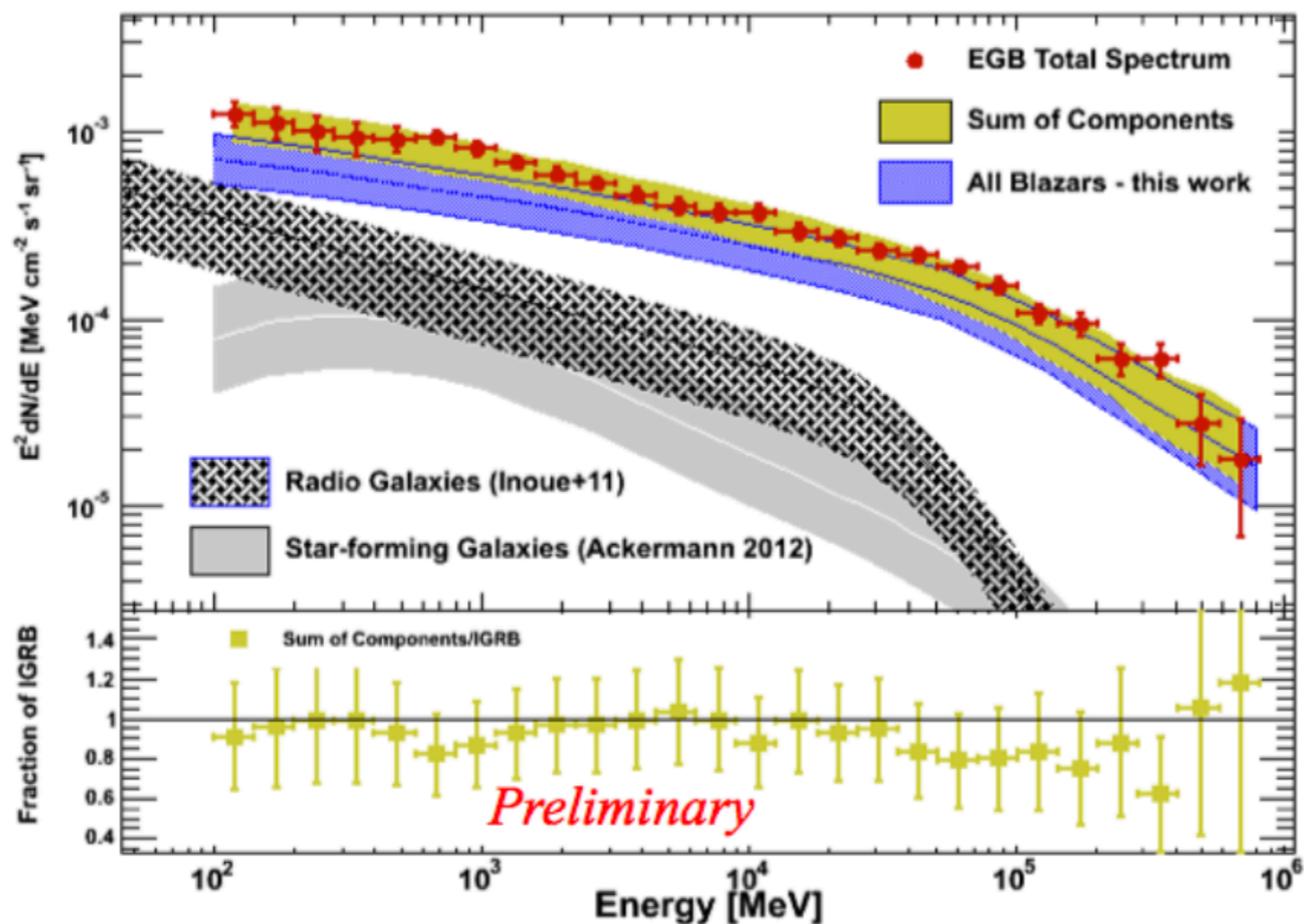
$v(r)$	red filled circles with error bars	Theory	with lines
Component	with lines	Newtonian core	brown dot-dotted line
Actual HI gas	green dashed line	STVG	black solid line
Stellar disk [$\Upsilon = 1$]	magenta dotted line	MSTG	blue short dash-dotted line
Dark matter halo	orange fine-dotted line	MOND	cyan long dash-dotted line
		Dark matter	orange solid line

Fondo de radiación gamma





Fermi





¡Gracias!