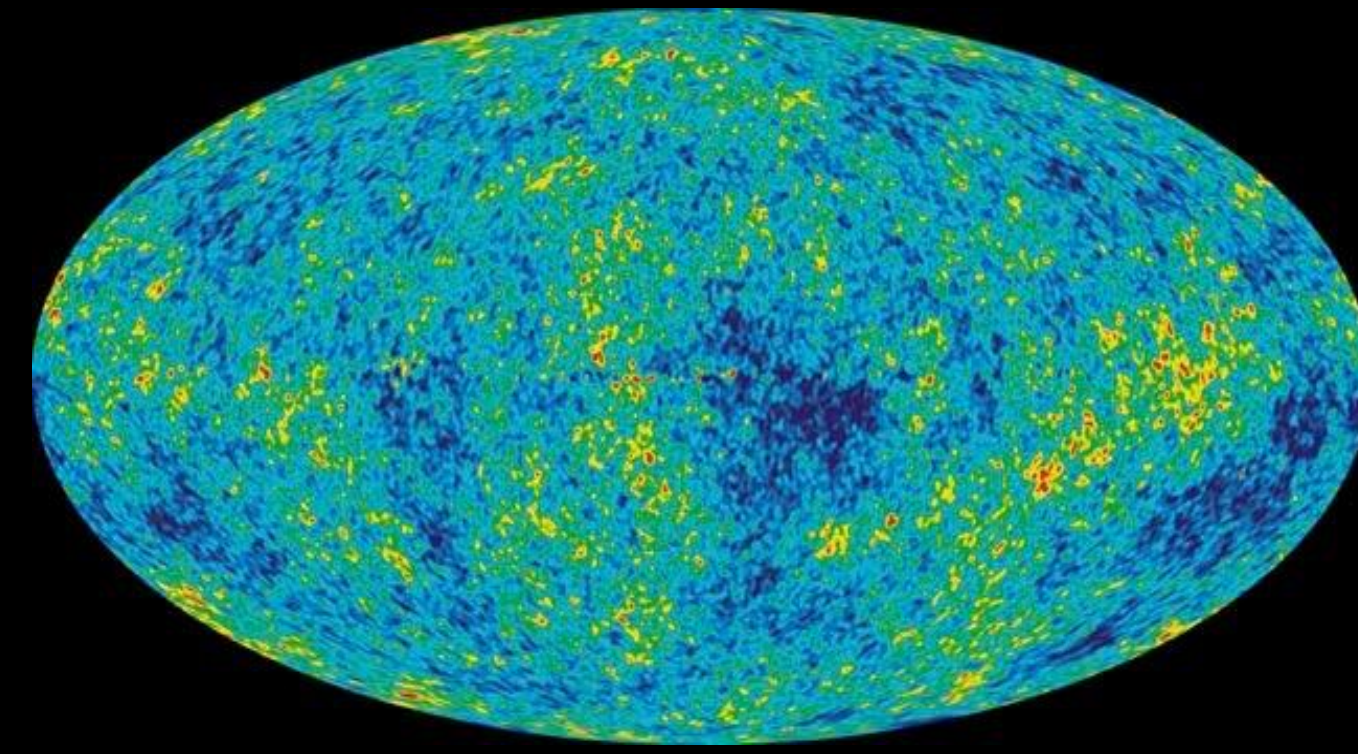


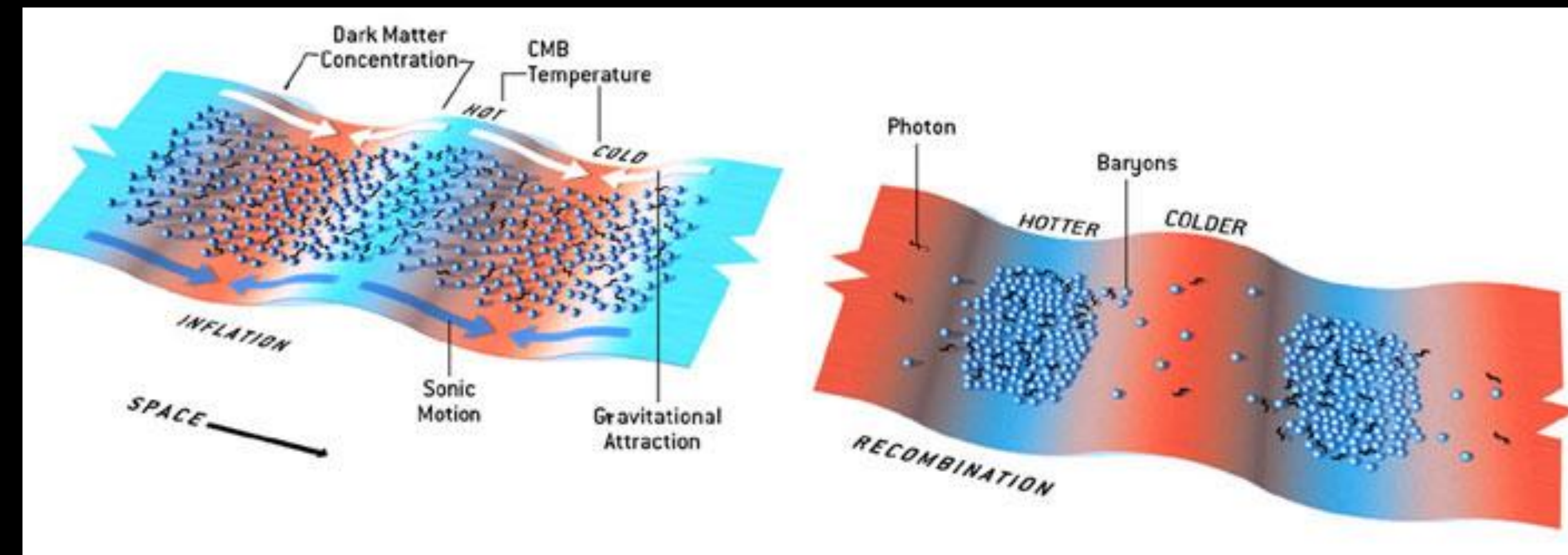
# Materia Oscura: non WIMP (es. neutrini)

Vincoli molto forti da  
Formazione di Strutture Cosmiche



Nel 1992 vengono scoperte dal satellite COBE fluttuazioni del fondo cosmico (**Nobel 2006 a Smoot e Mather**).

Corrispondono a piccolissime disomogeneità (1/100000) della materia da cui hanno avuto origine le galassie e le strutture cosmiche.



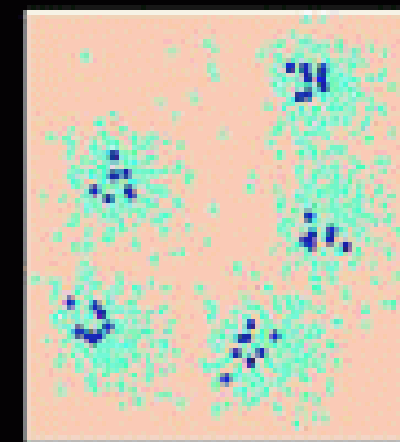
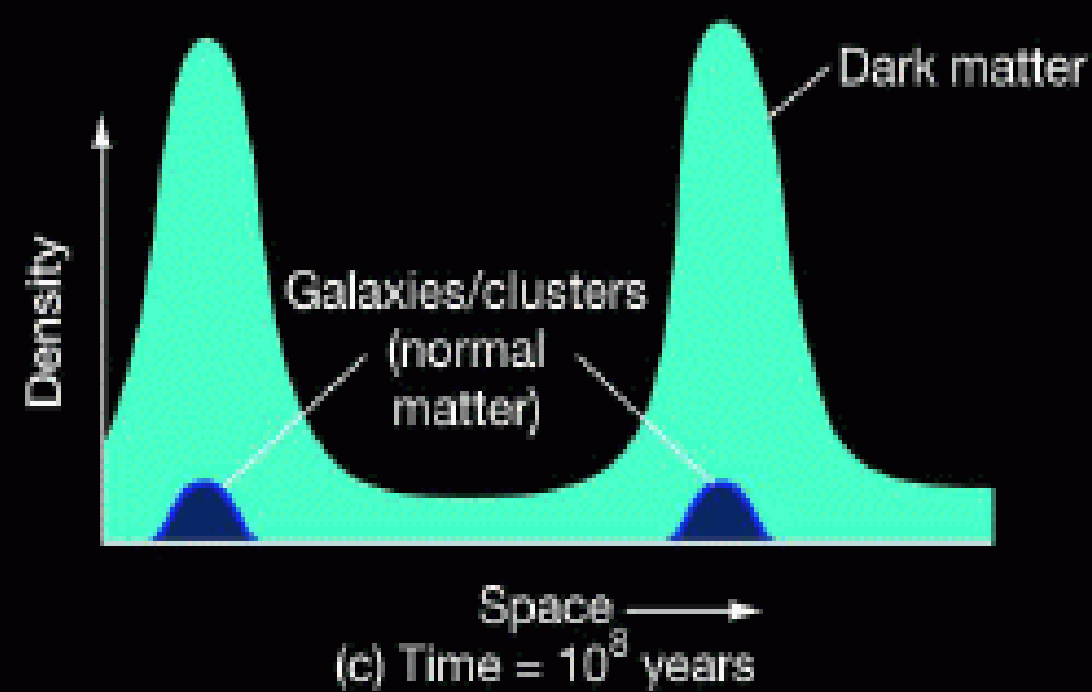
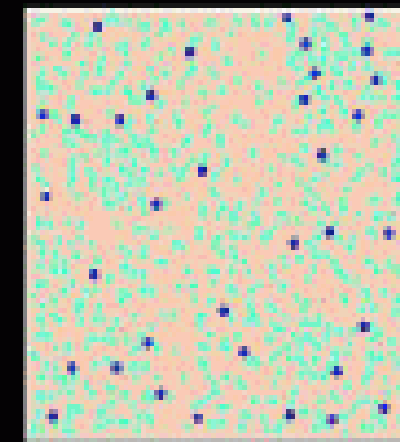
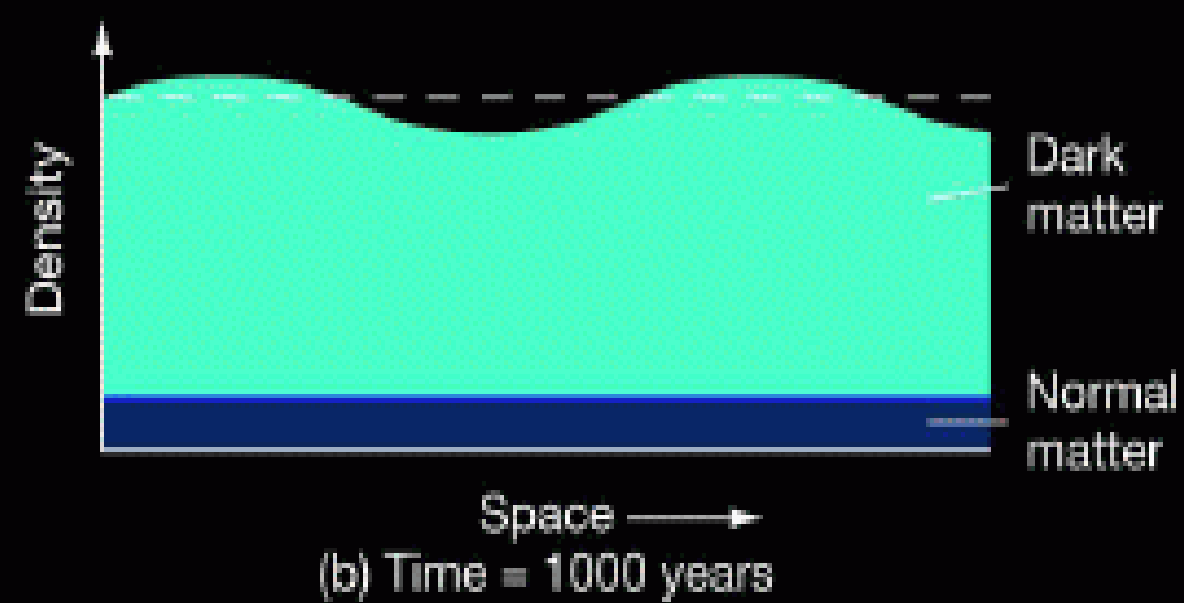
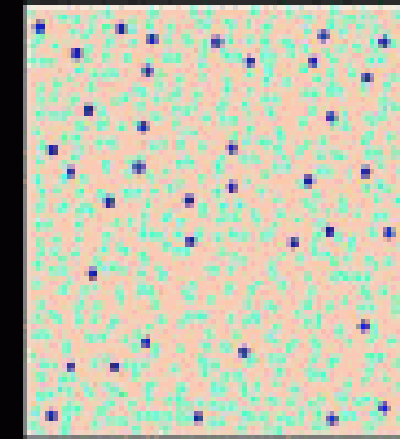
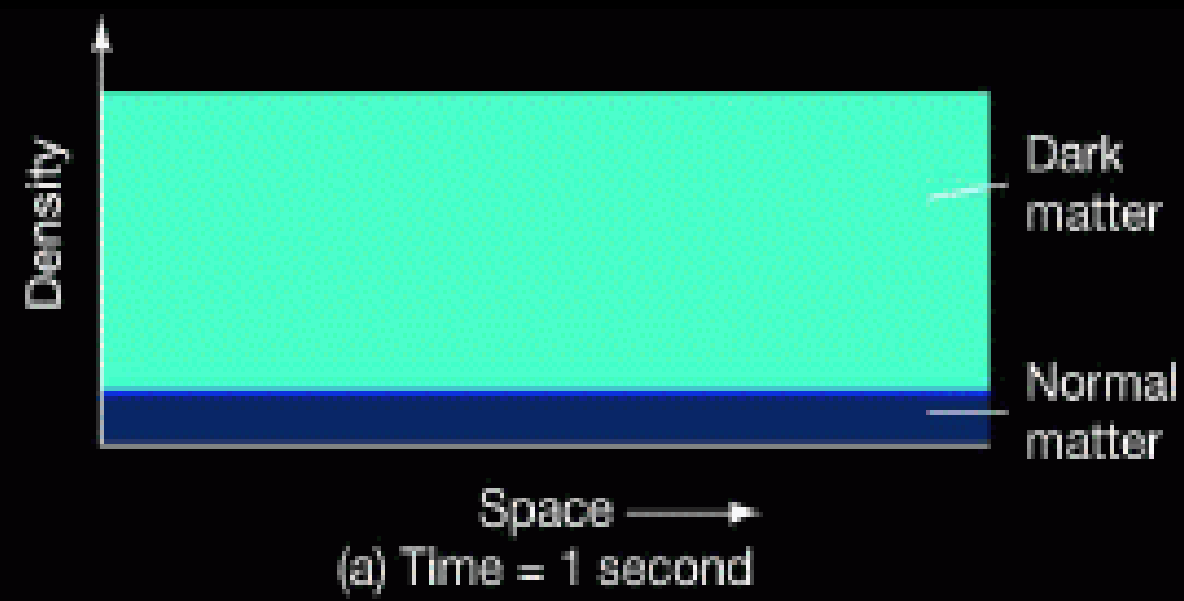
Materia Oscura: non WIMP (es. neutrini)

Vincoli molto forti da Formazione di Strutture Cosmiche

# Da Universo quasi disomogeneo a Universo molto disomogeneo

Contrasto densita' 1/10000

Contrasto densita'  $\sim 1000$



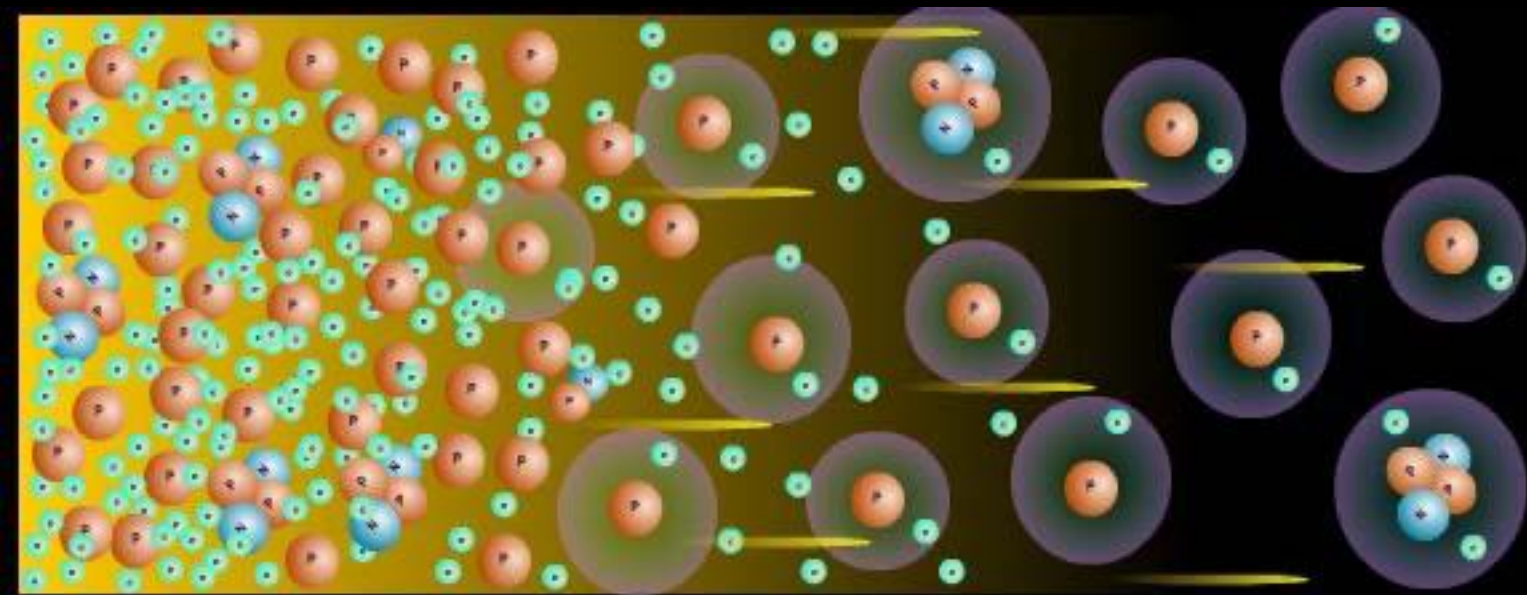
Instabilita' gravitazionale: regioni sovradense aumentano progressivamente la densita'

Formazione di strutture da perturbazioni inizialmente piccole

La presenza di strutture cosmiche con alto contrasto di densità' costituisce *per se* una forte evidenza di materia oscura

SE IL PLASMA PRIMORDIALE FOSSE STATO SOLO COMPOSTO DA MATERIA VISIBILE L'INTERAZIONE CON LA RADIAZIONE AVREBBE CANCELLATO QUESTE PERTURBAZIONI

LA PRESENZA DI MATERIA OSCURA, CHE NON INTERRAGISCE CON LA RADIAZIONE AGISCE COME UNA BUCA DI POTENZIALE RENDENDO POSSIBILE LA FORMAZIONE DELLE STRUTTURE



Densita'

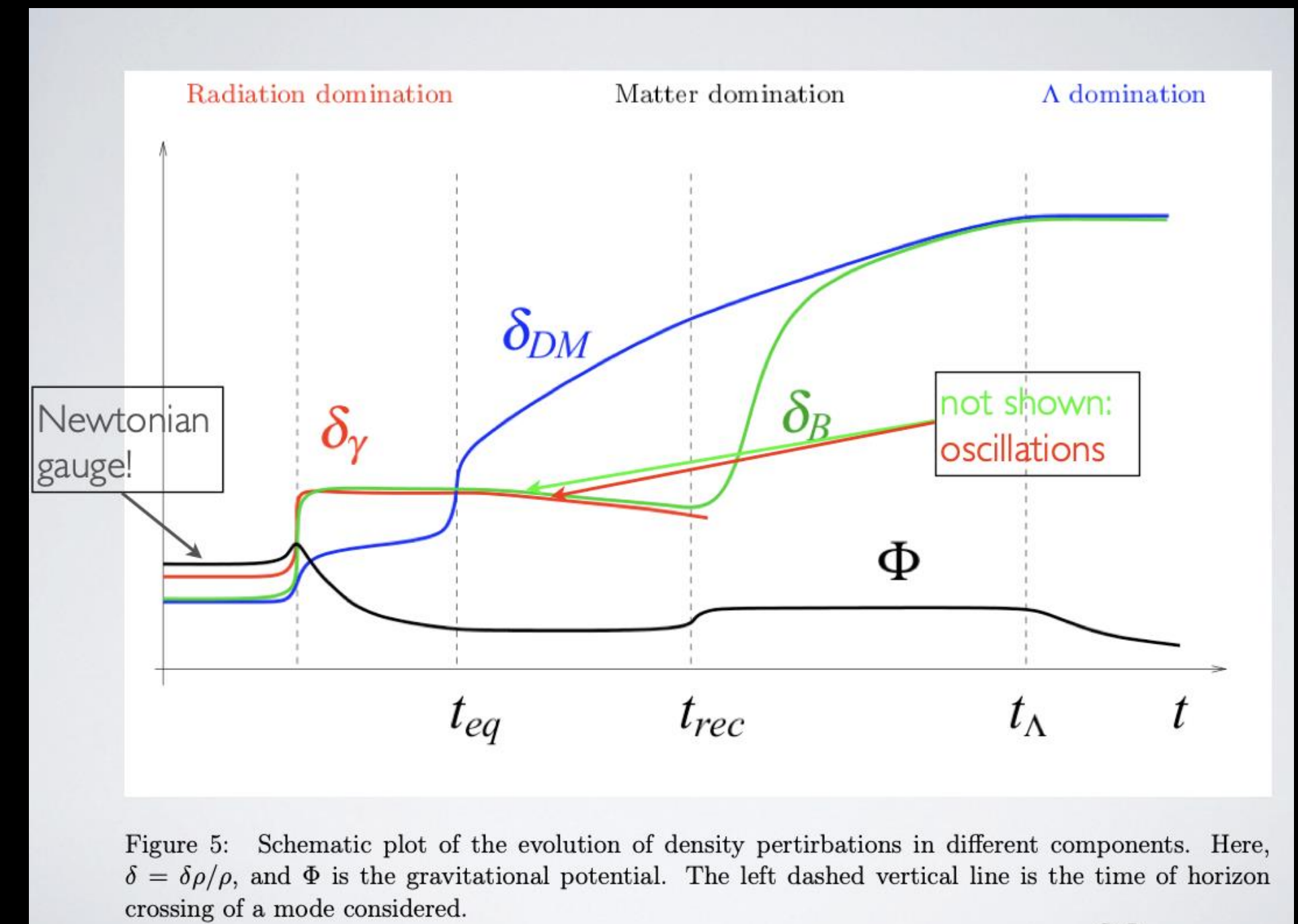
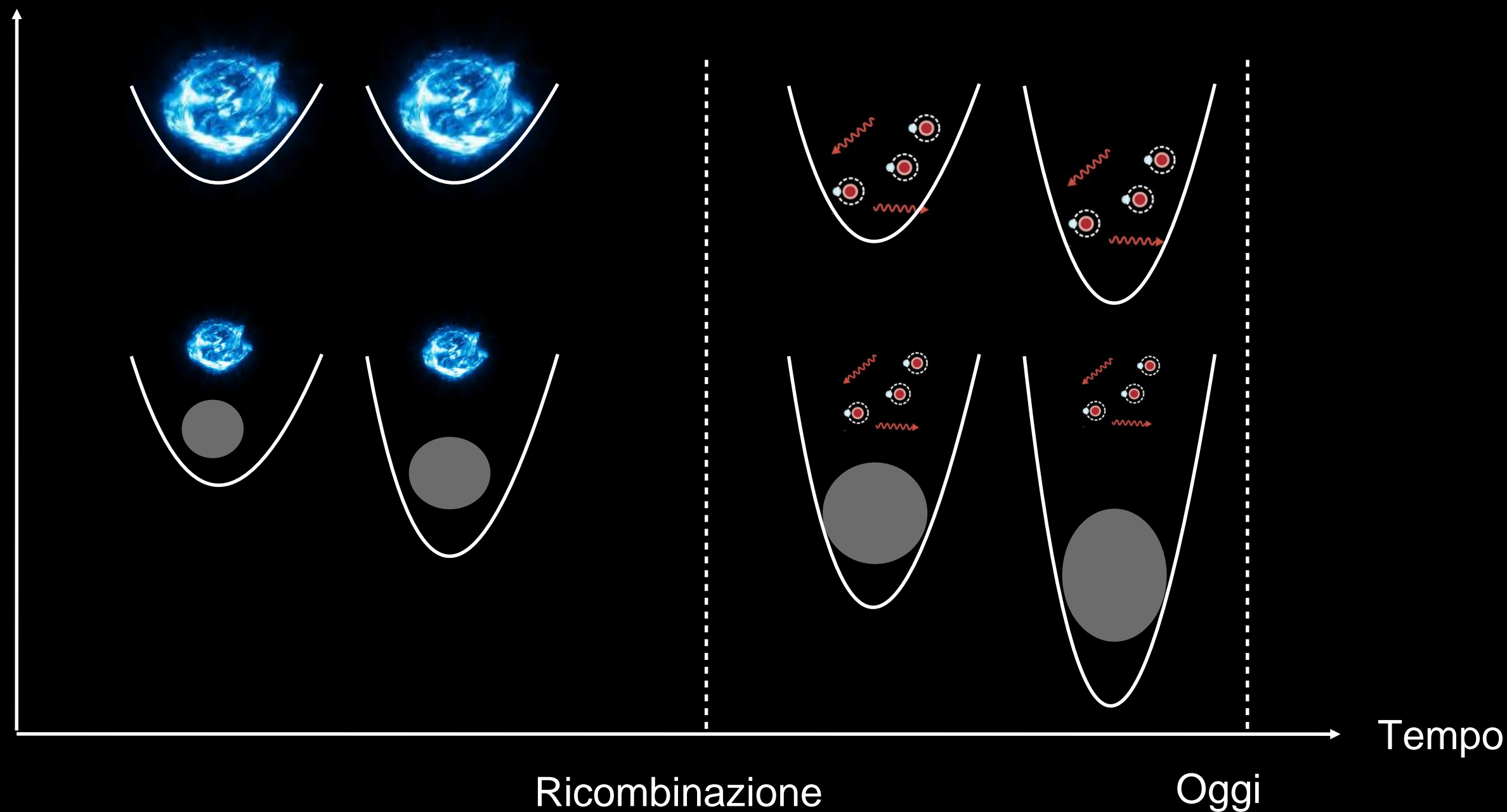
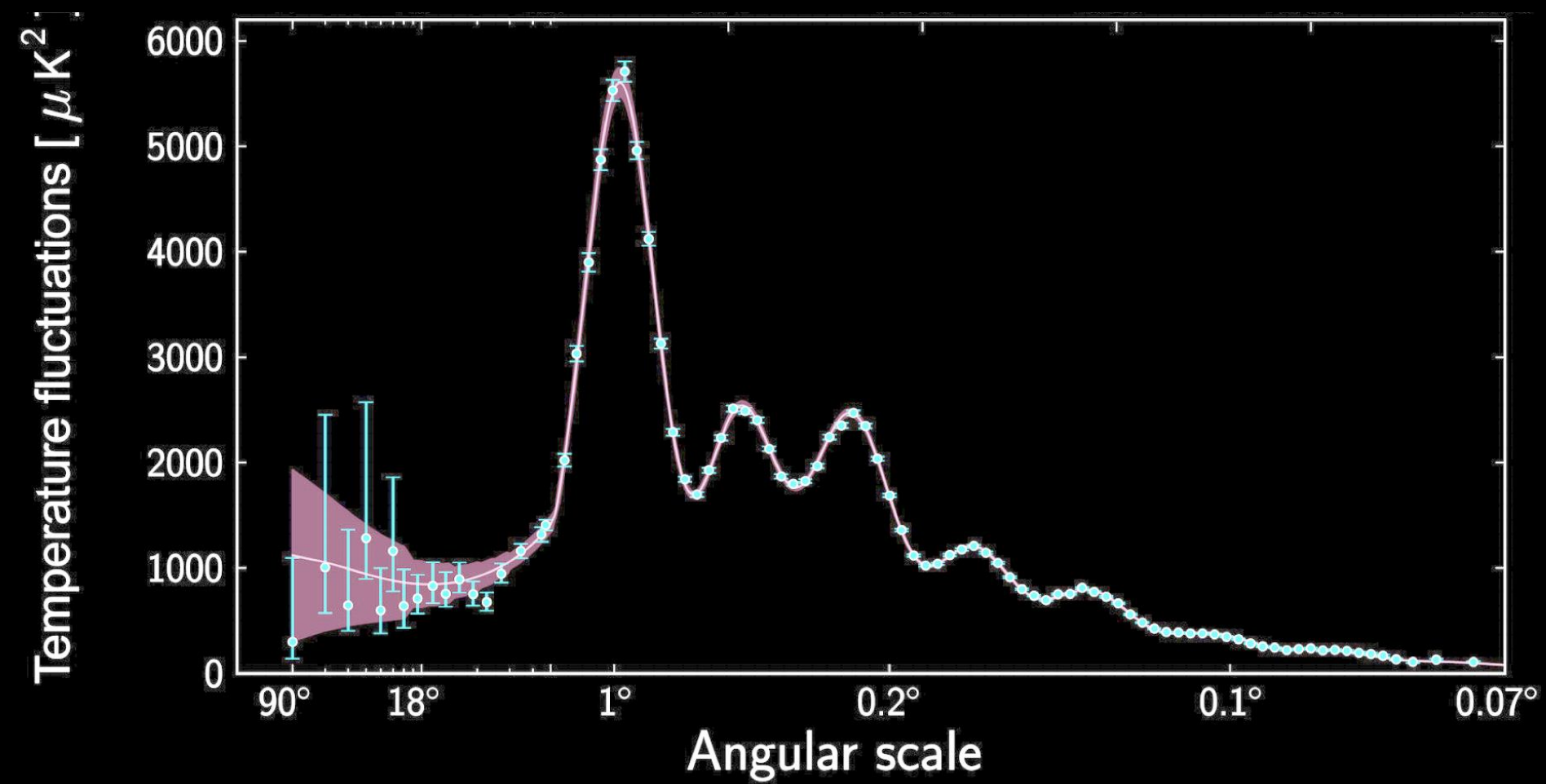
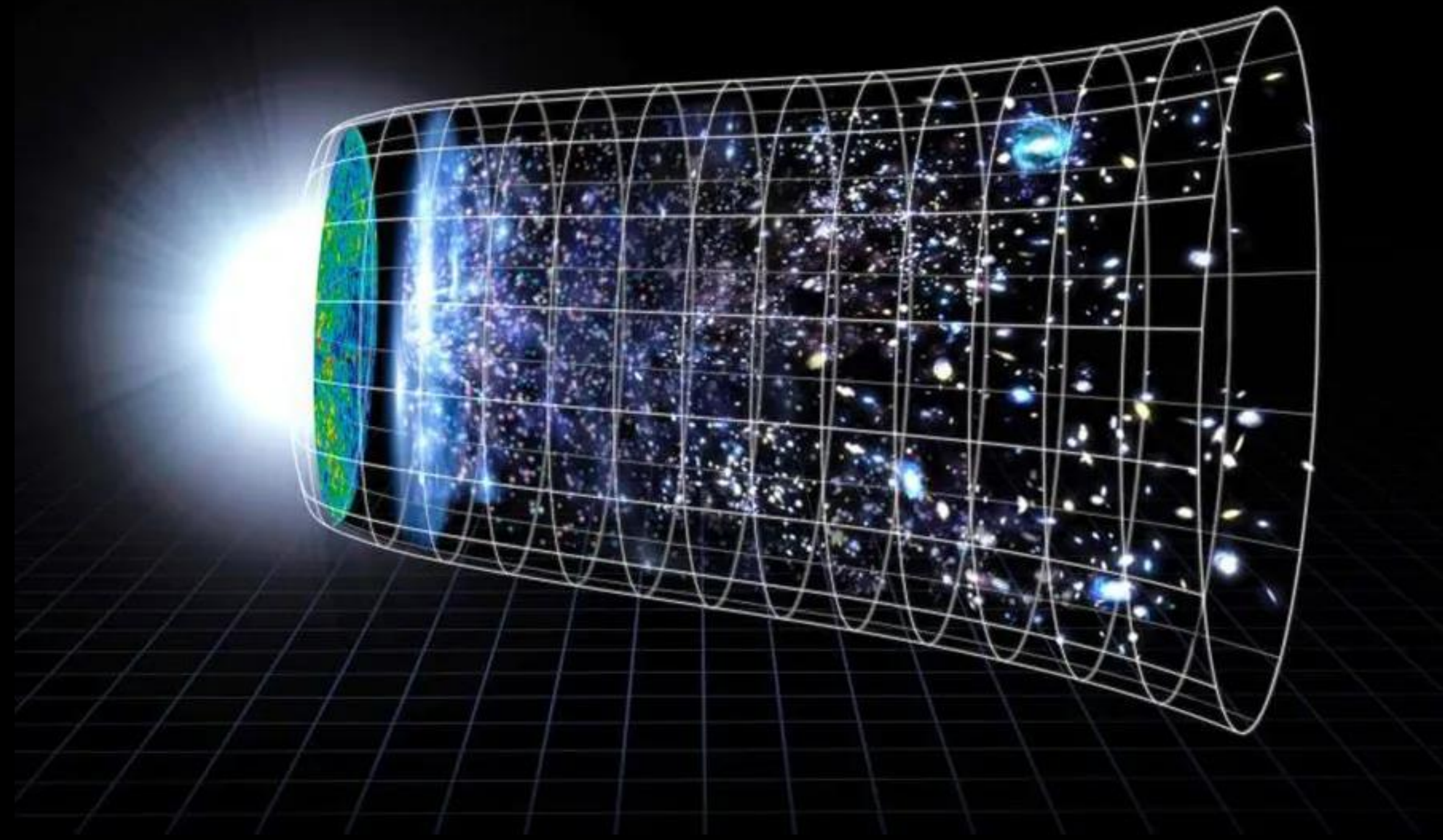
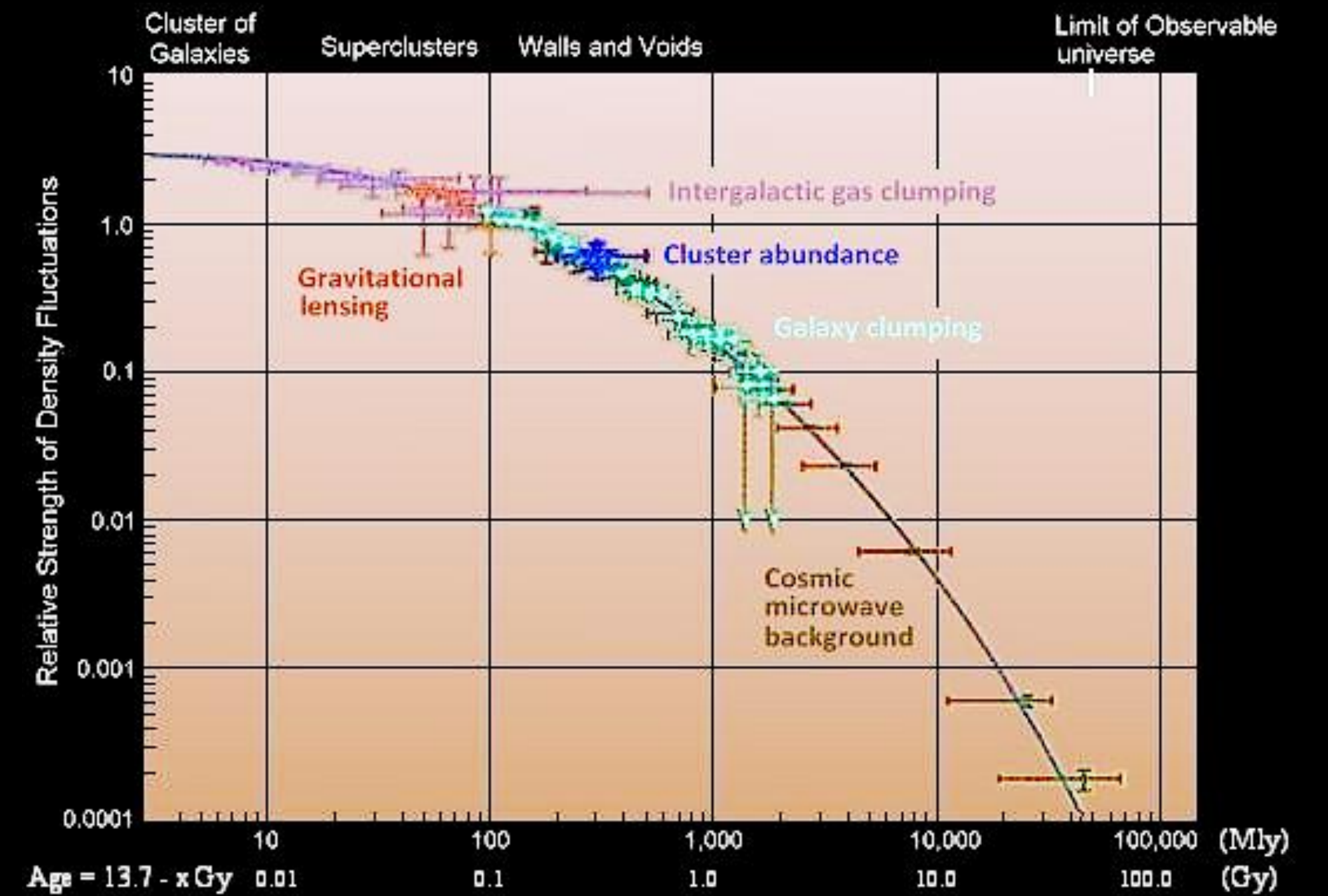


Figure 5: Schematic plot of the evolution of density perturbations in different components. Here,  $\delta = \delta\rho/\rho$ , and  $\Phi$  is the gravitational potential. The left dashed vertical line is the time of horizon crossing of a mode considered.

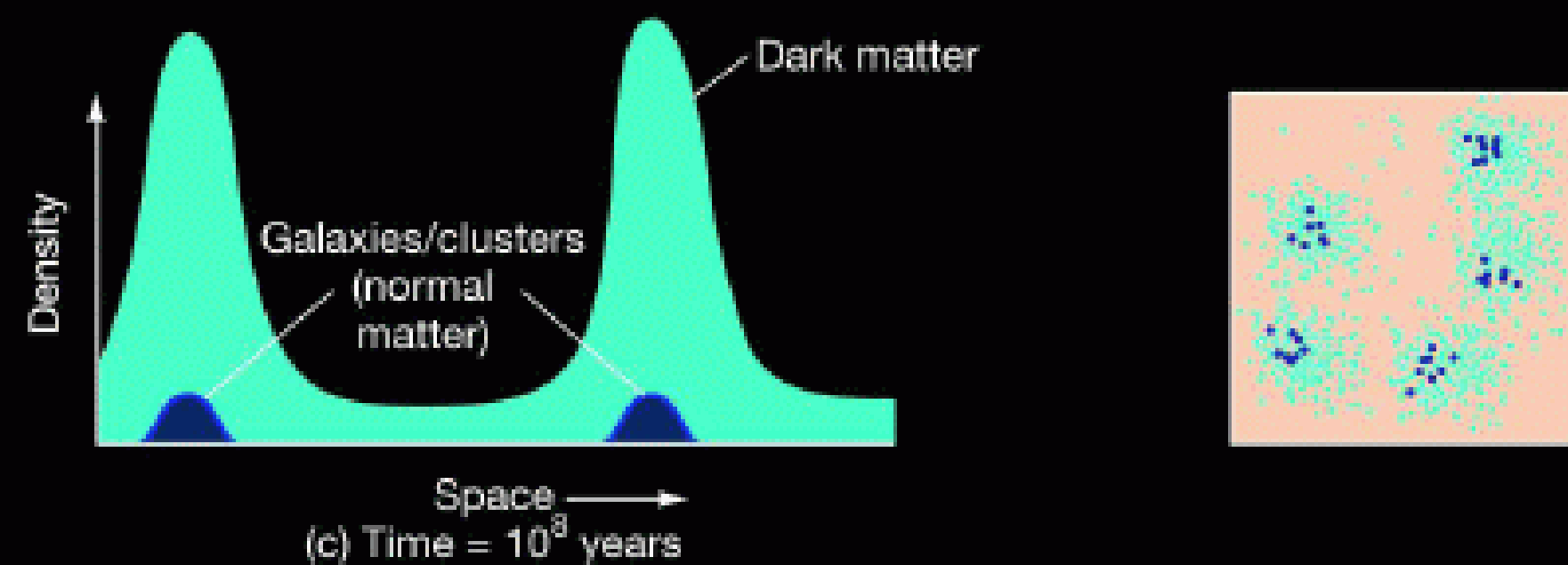
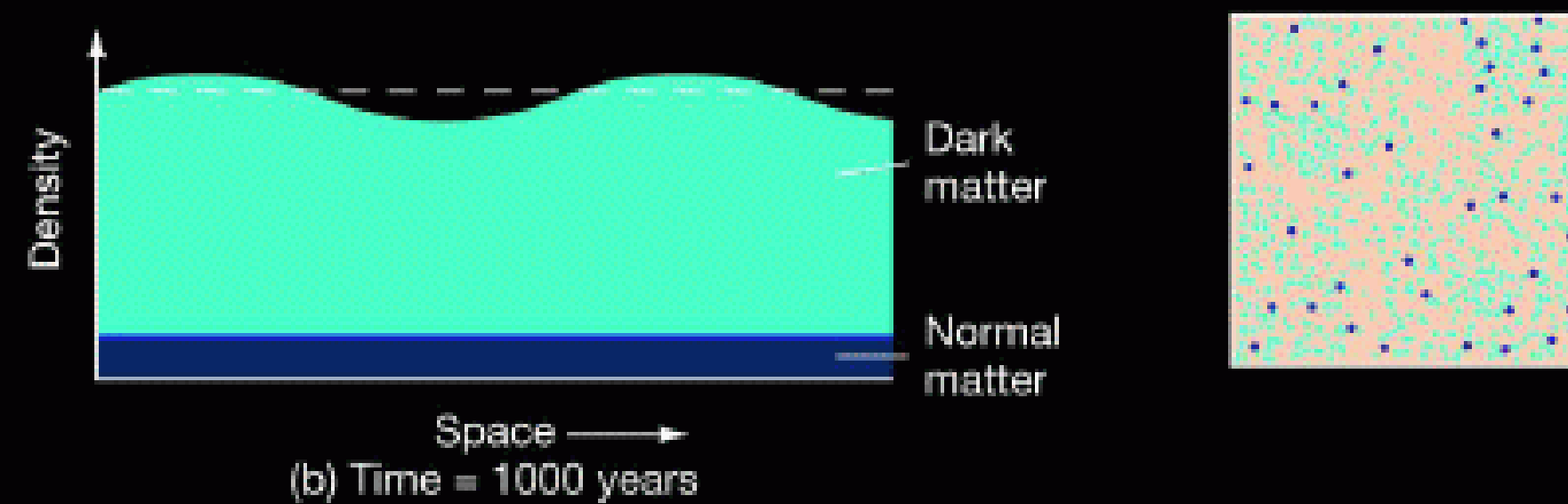
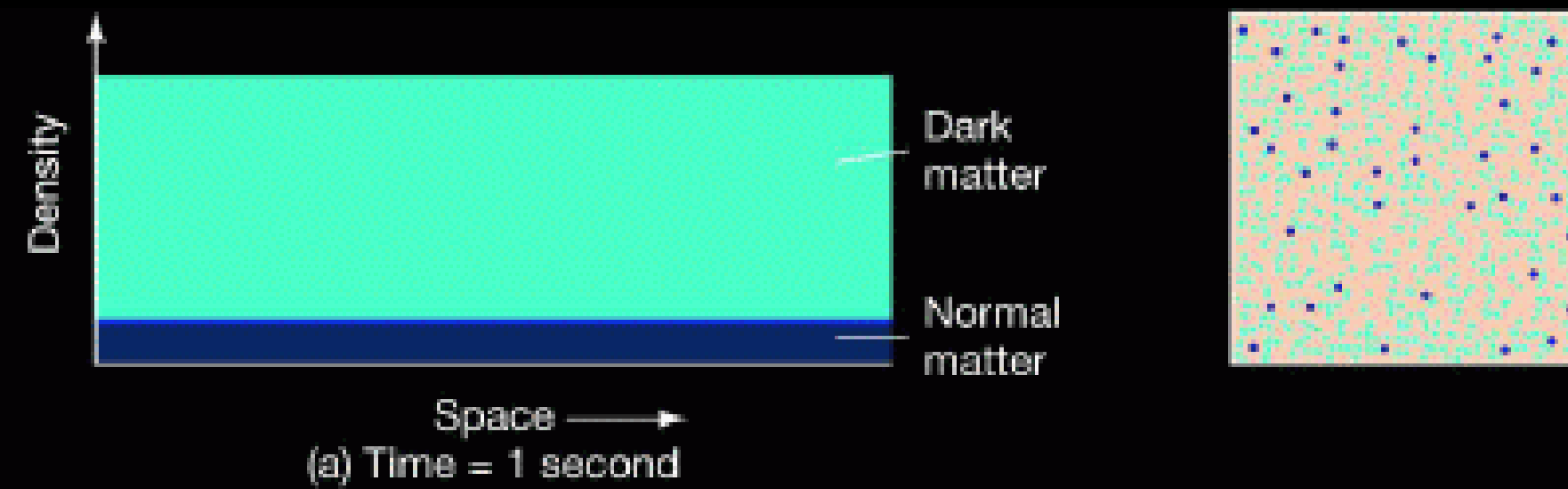
# Formazione delle strutture cosmiche : simulazioni



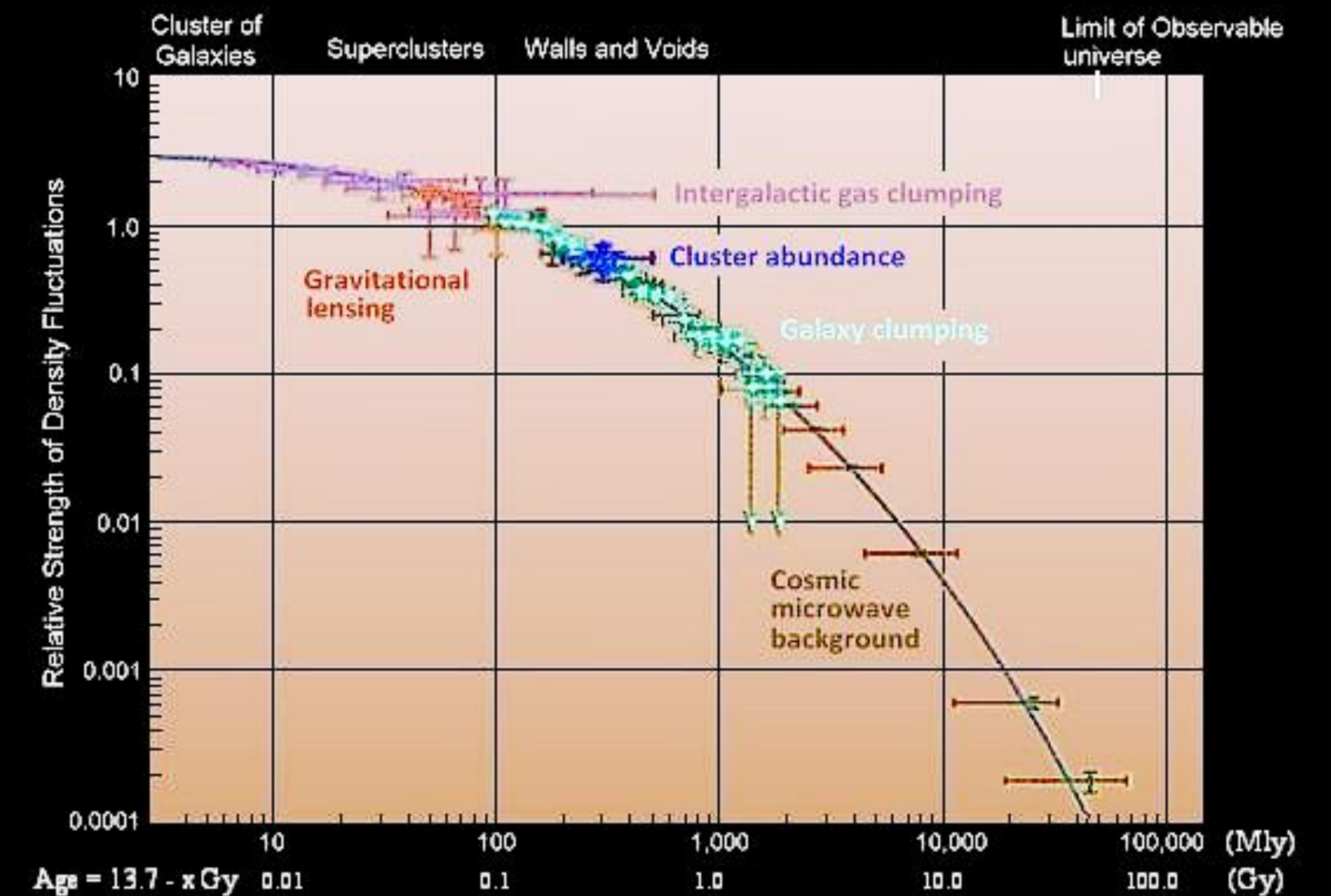
La ampiezza delle perturbazioni decresce all'aumentare della massa coinvolta



# Formazione delle strutture cosmiche : simulazioni

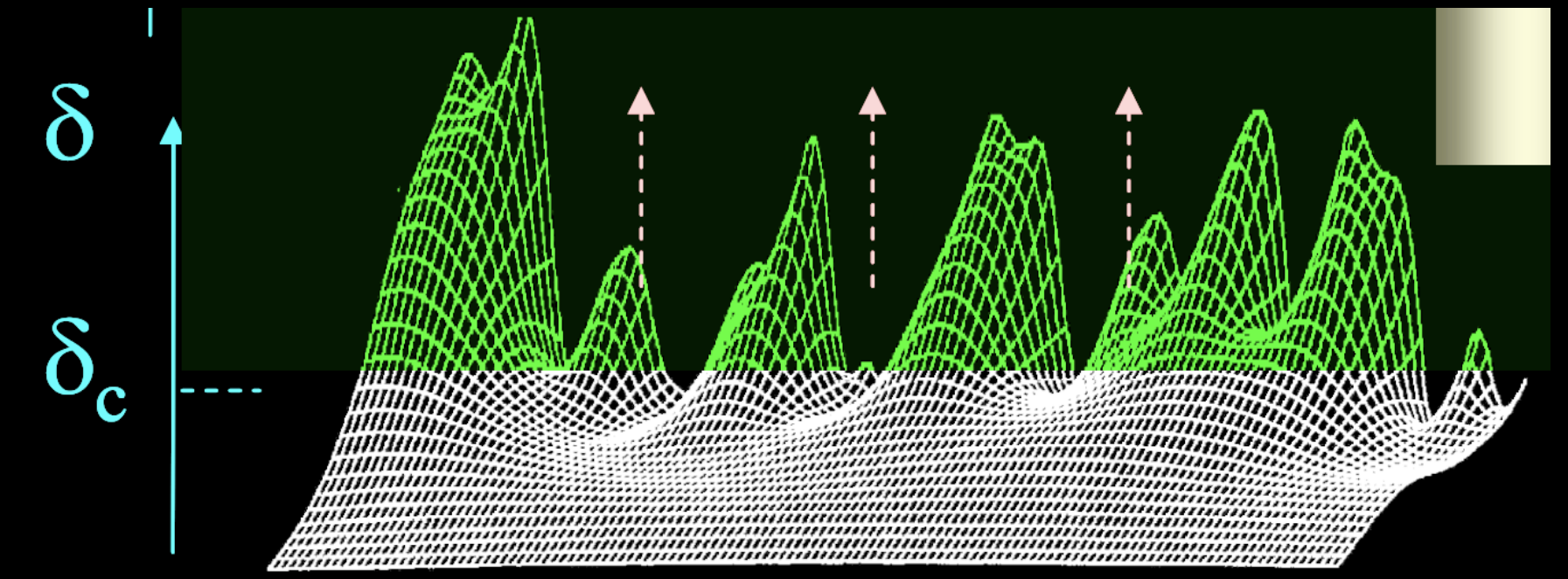


La ampiezza delle perturbazioni decresce all'aumentare della massa coinvolta

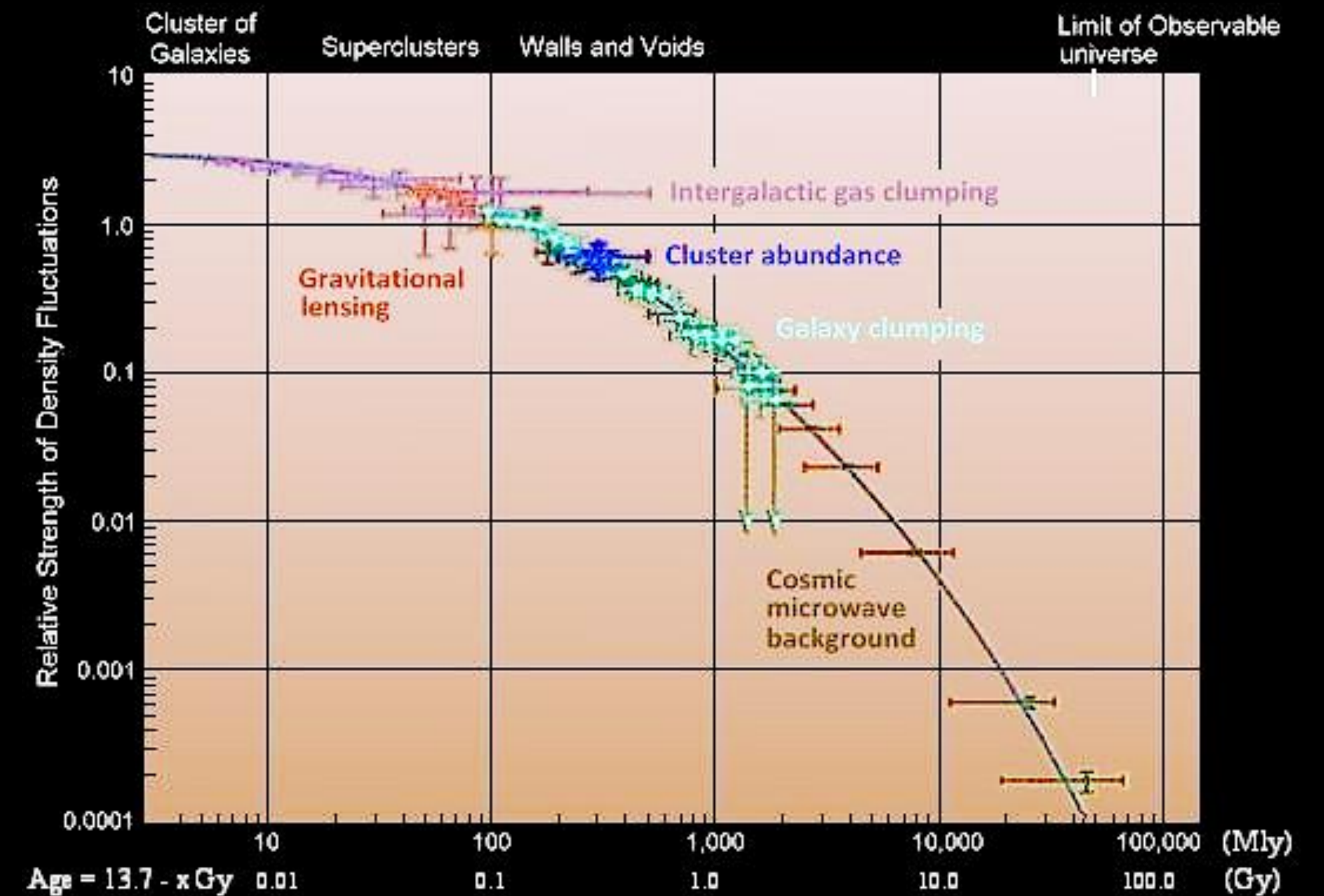
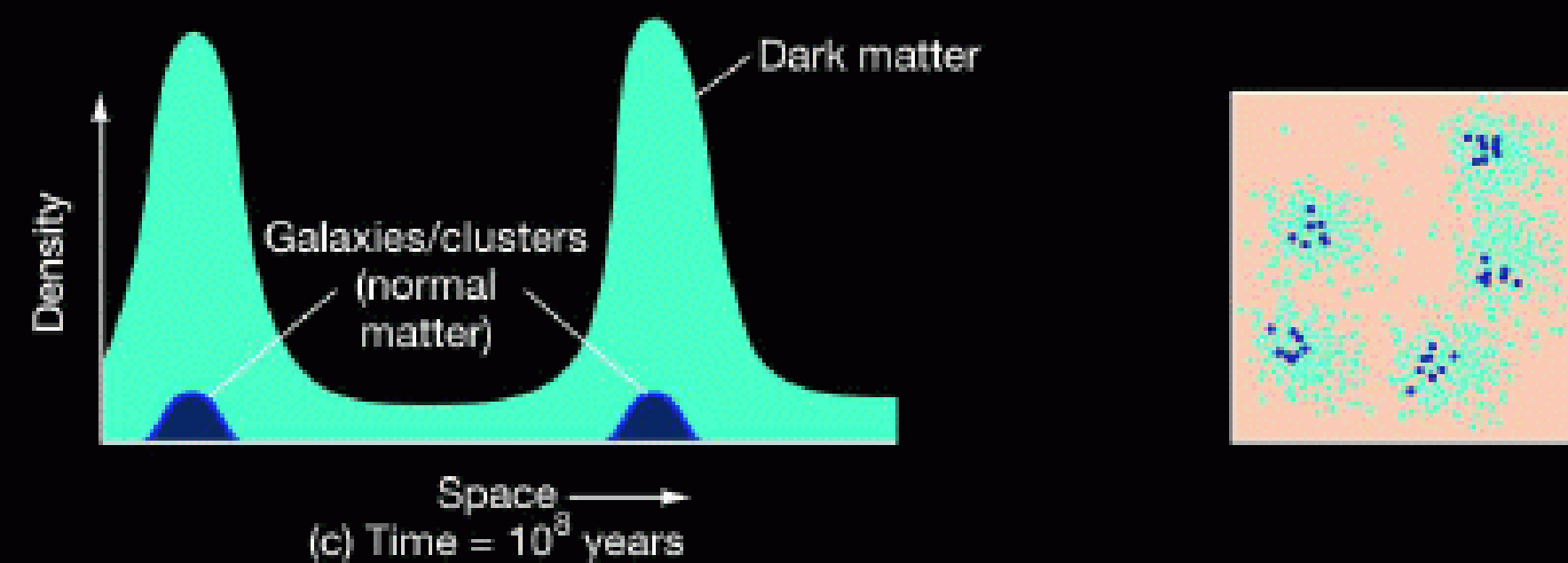
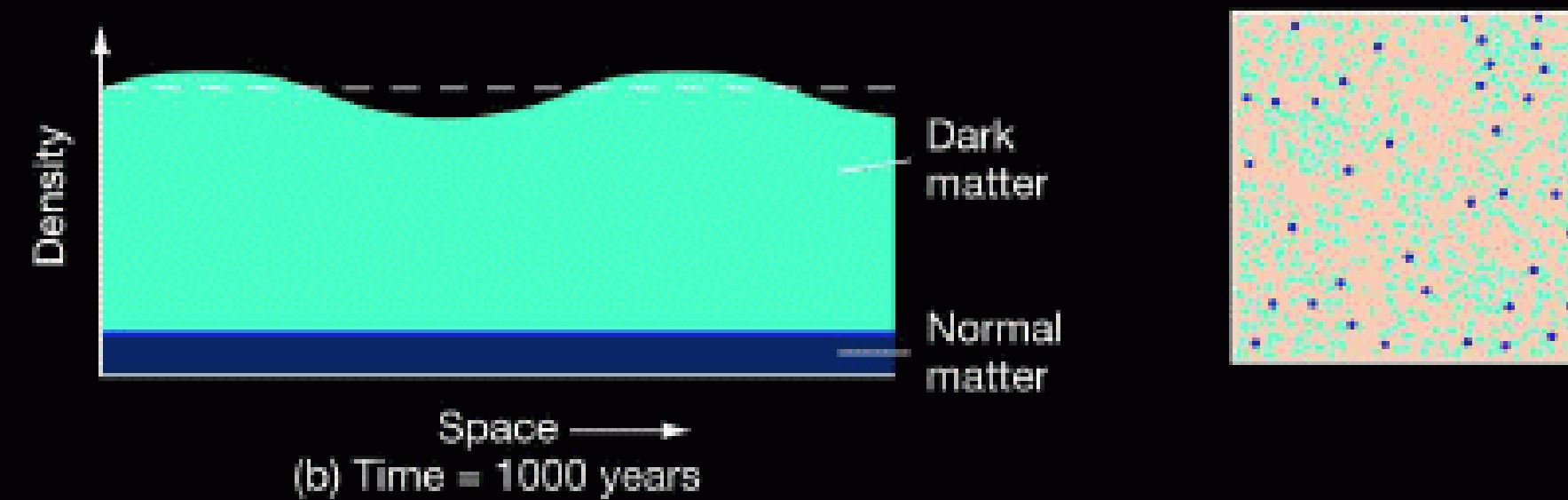
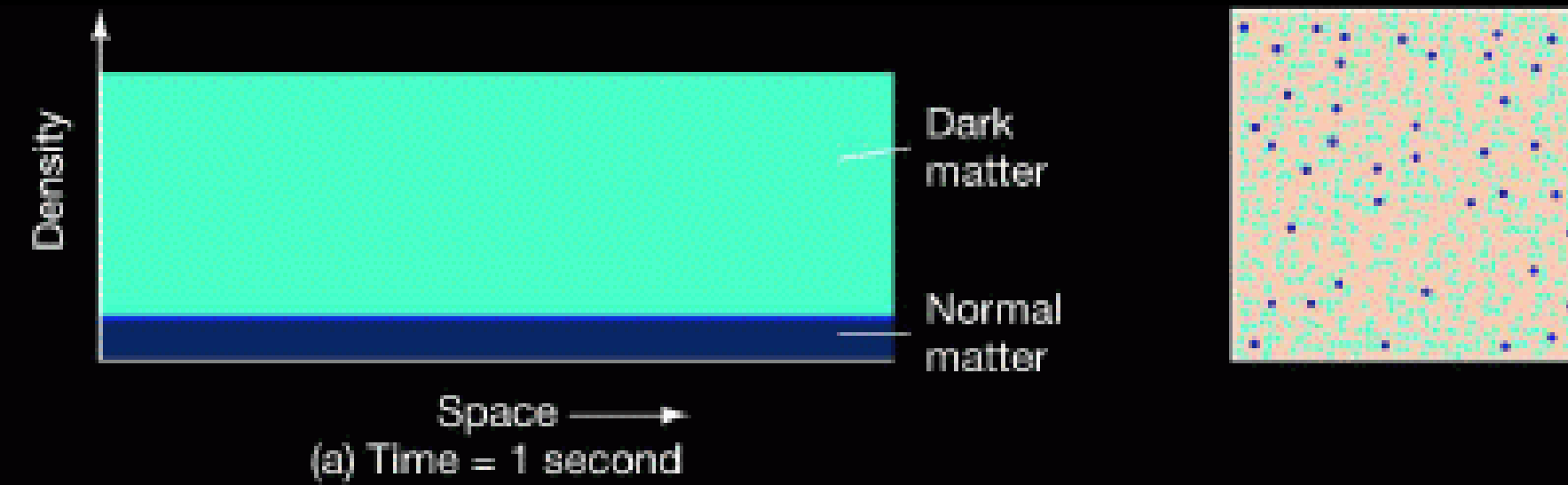


# Formazione delle strutture cosmiche : simulazioni

Le prime perturbazioni che raggiungono la densità critica per il collasso sono quelle su piccola scala (masse piccole)



La ampiezza delle perturbazioni decresce all'aumentare della massa coinvolta



$$z = 48.4$$

$$T = 0.05 \text{ Gyr}$$

## Numerical Simulations

Initial conditions: tiny density fluctuations like those inferred from the Cosmic Background Radiation

$$\Omega_b=0.04$$

$$\Omega_{DM}=0.25$$

500 kpc

Aquarius Project  
Virgo Consortium 2009  
F. Springel et al.



$z = 22.489$   
 $t = 0.150 \text{ Gyr}$

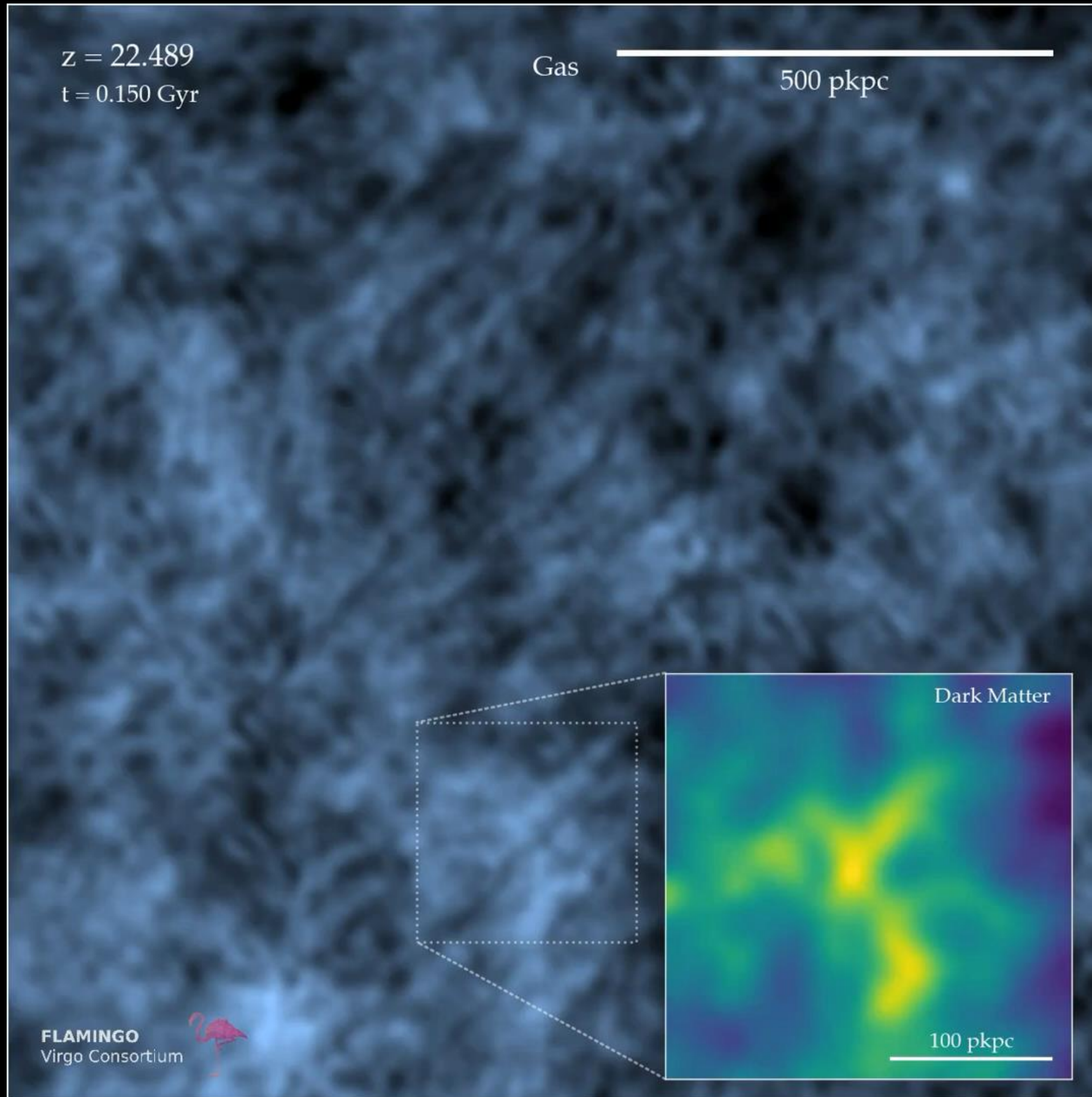
Gas

500 pkpc

Dark Matter

100 pkpc

FLAMINGO  
Virgo Consortium



# Galaxy Formation in a Nutshell

Durante la aggregazioni di condensazioni via via piu' grandi si ha:

Rapido raffreddamento del gas a causa dell'irraggiamento  $L_{rad}$  dovuto a processi atomici

- eccitazione collisionale
- Bremsstrahlung

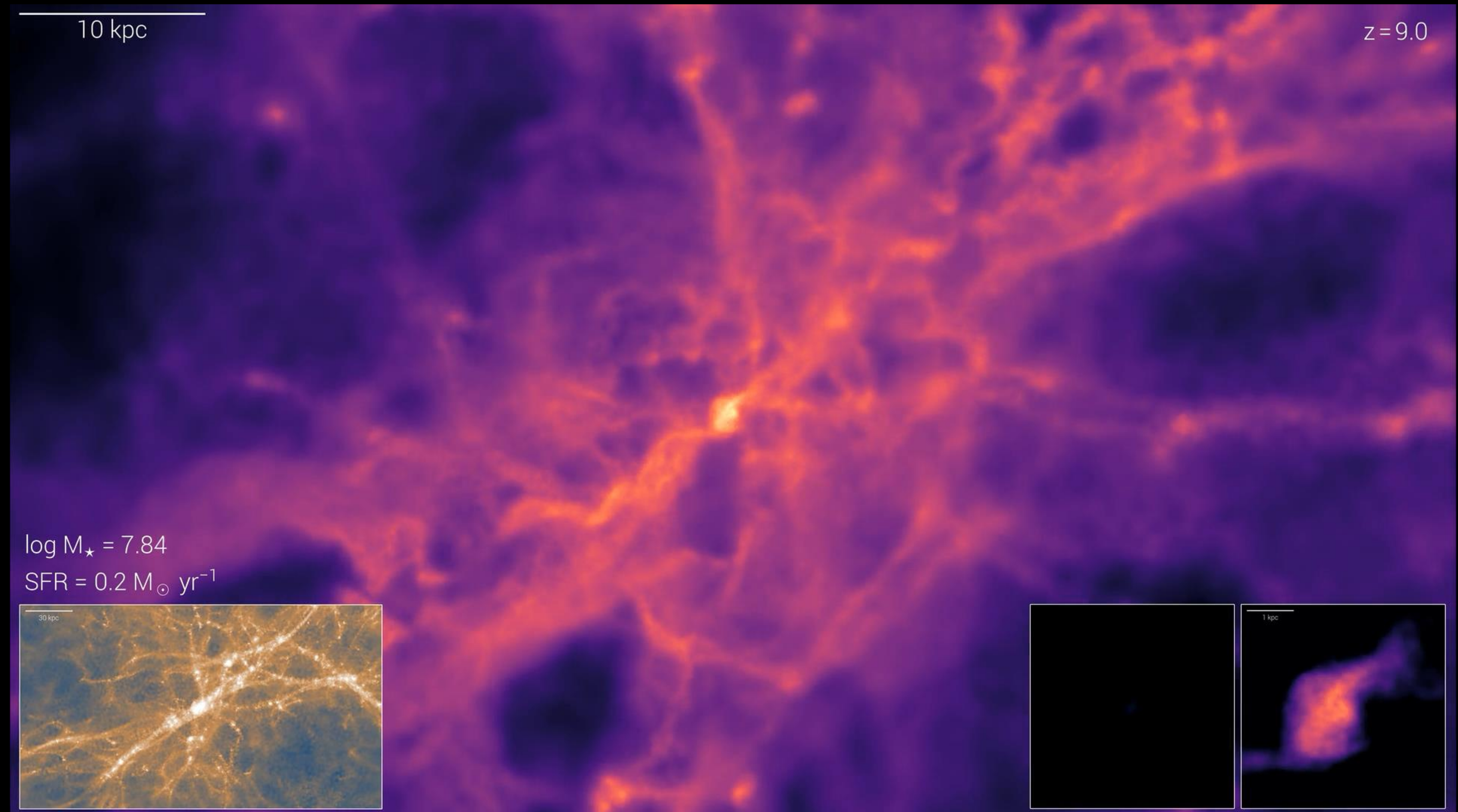
Raffreddamento rapido ad alto redshift  
quadrato della densità'  $L_{rad} \propto \rho_{gas}^2$

conservazione del momento angolare  
durante la caduta del gas  $\rightarrow$   
formazione dei dischi

Le stelle si formano dal gas  
raffreddato in tempi scala  $\tau_* \sim Gyr$   
Il tasso di formazione e'

$$\dot{m}_* \sim m_{gas} / \tau_*$$

Una parte delle stelle esplode come  
supernova e riemette energia nel gas



# Galaxy Formation in a Nutshell

Durante la aggregazioni di condensazioni via via piu' grandi si ha:

Rapido raffreddamento del gas a causa dell'irraggiamento  $L_{rad}$  dovuto a processi atomici

- eccitazione collisionale
- Bremsstrahlung

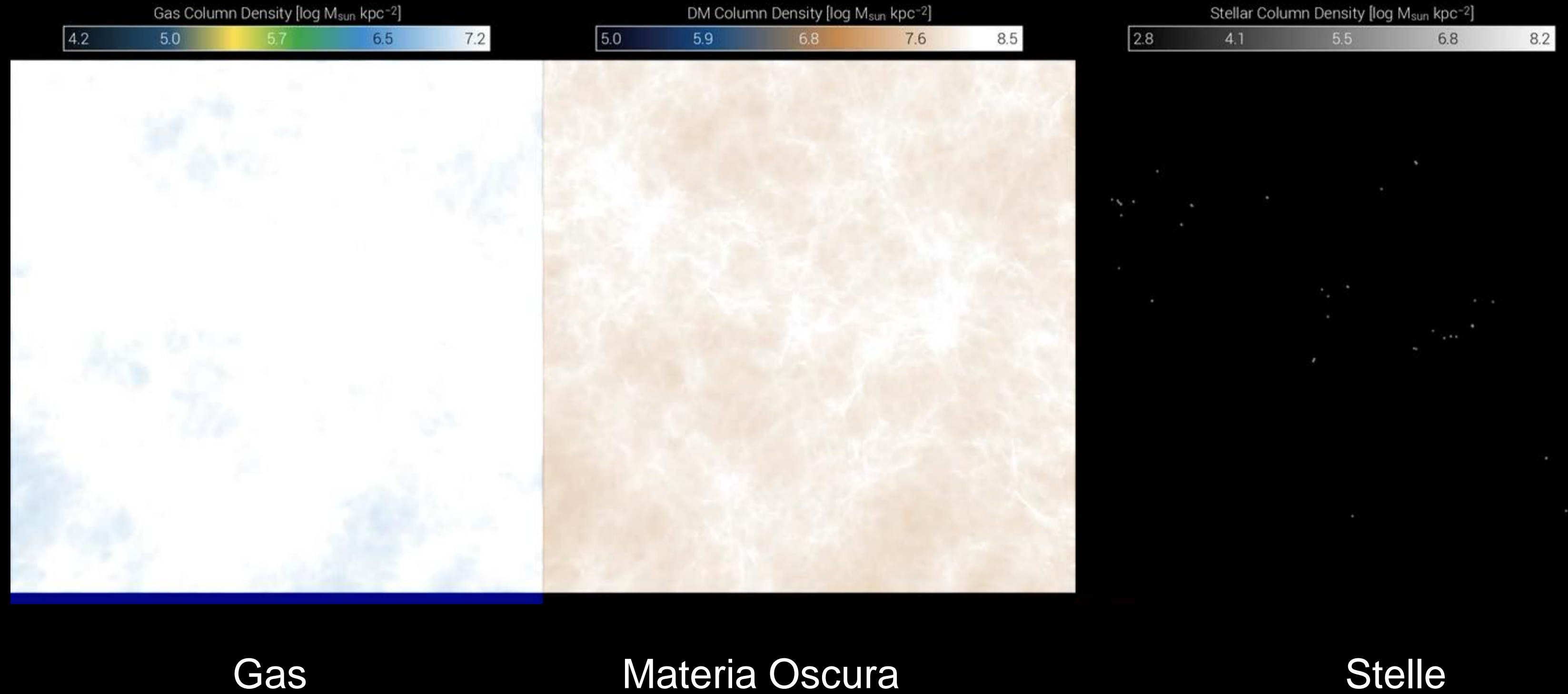
Raffreddamento rapido ad alto redshift  
quadrato della densità'  $L_{rad} \propto \rho_{gas}^2$

conservazione del momento angolare  
durante la caduta del gas  $\rightarrow$   
formazione dei dischi

Le stelle si formano dal gas  
raffreddato in tempi scala  $\tau_* \sim Gyr$   
Il tasso di formazione e'

$$\dot{m}_* \sim m_{gas} / \tau_*$$

Una parte delle stelle esplode come  
supernova e riemette energia nel gas



# Galaxy Formation in a Nutshell

Durante la aggregazioni di condensazioni via via piu' grandi si ha:

Rapido raffreddamento del gas a causa dell'irraggiamento  $L_{rad}$  dovuto a processi atomici

- eccitazione collisionale
- Bremsstrahlung

Raffreddamento rapido ad alto redshift quadrato della densità'  $L_{rad} \propto \rho_{gas}^2$

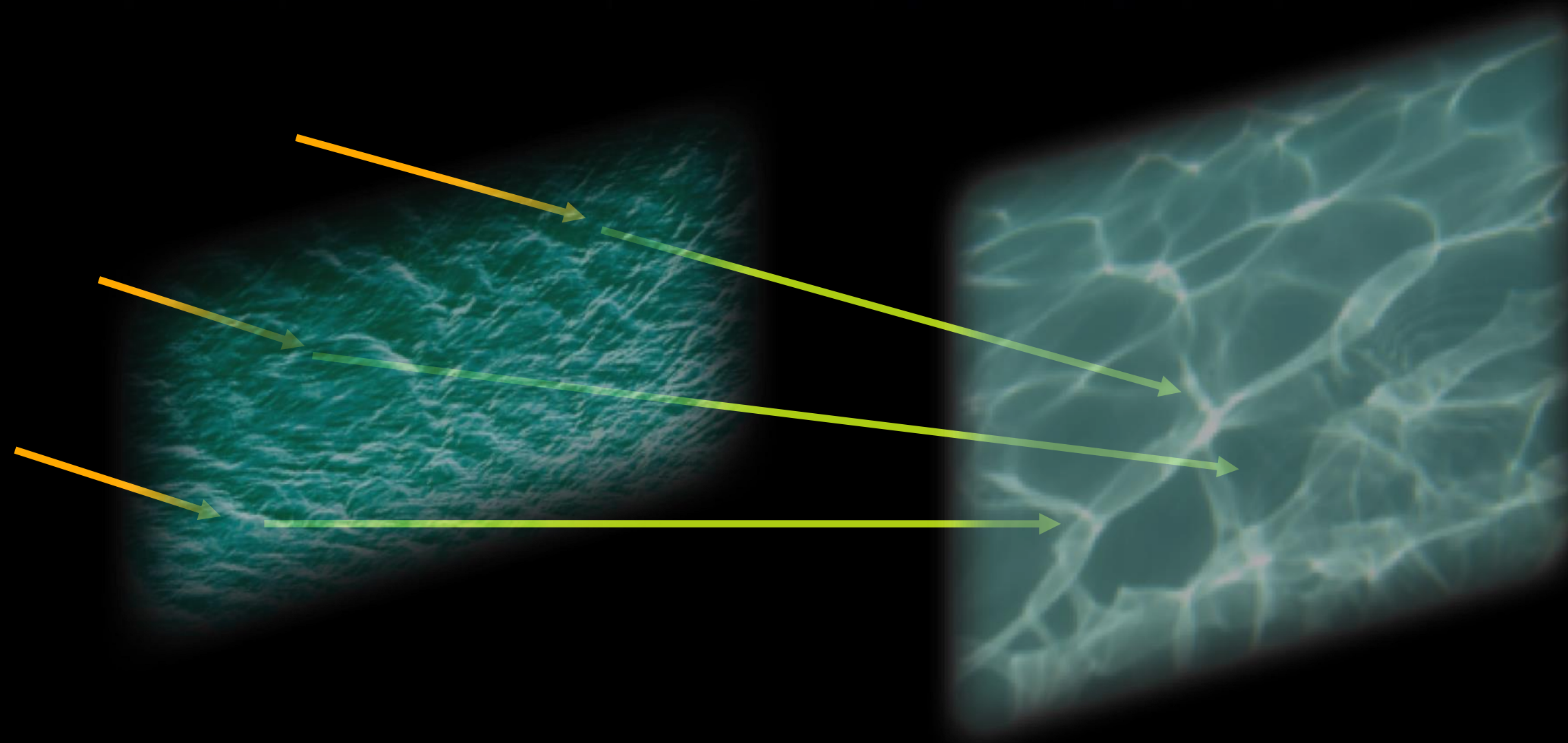
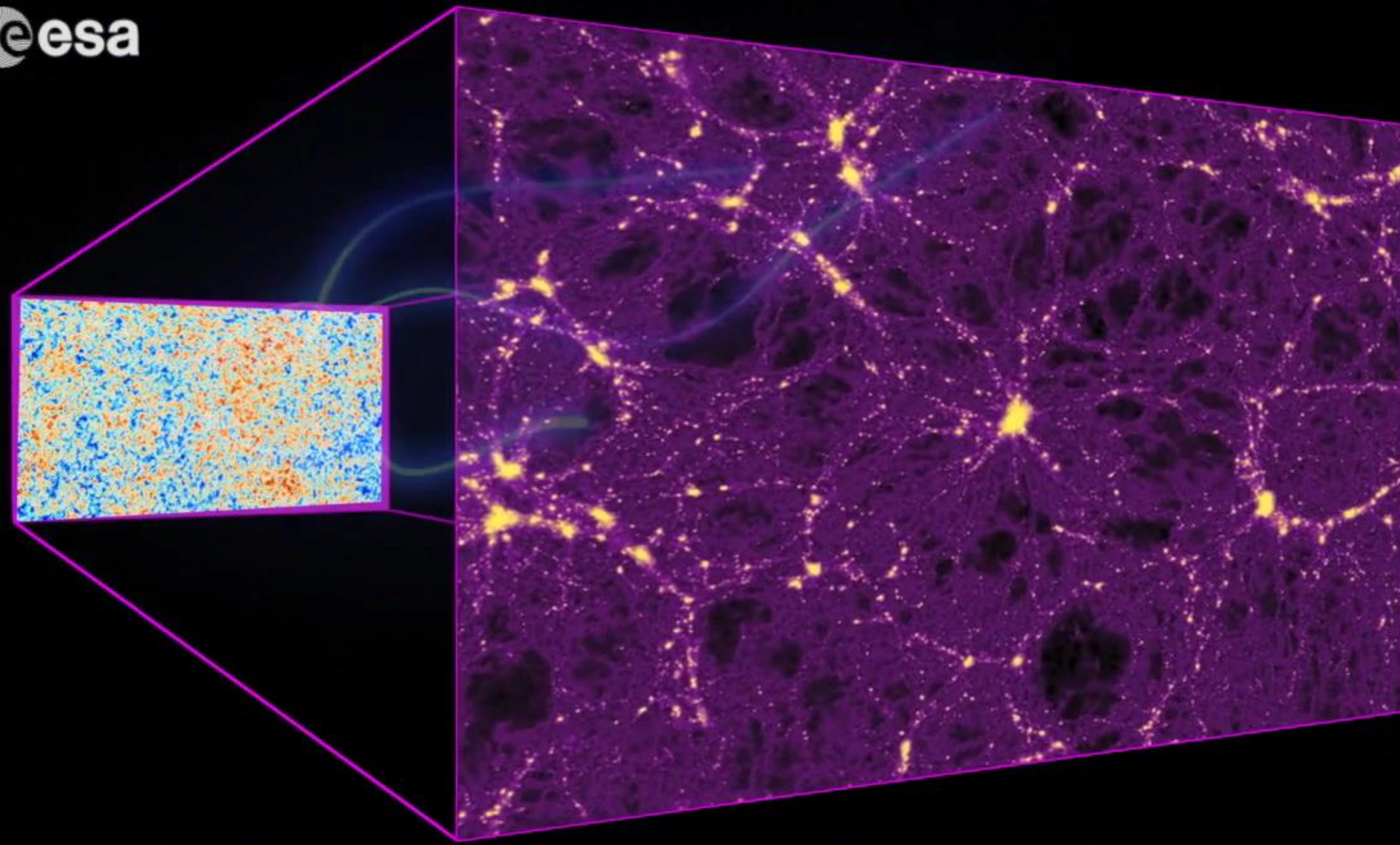
conservazione del momento angolare durante la caduta del gas → formazione dei dischi

Le stelle si formano dal gas raffreddato in tempi scala  $\tau_* \sim Gyr$   
Il tasso di formazione e'

$$\dot{m}_* \sim m_{gas}/\tau_*$$

Una parte delle stelle esplode come supernova e riemette energia nel gas

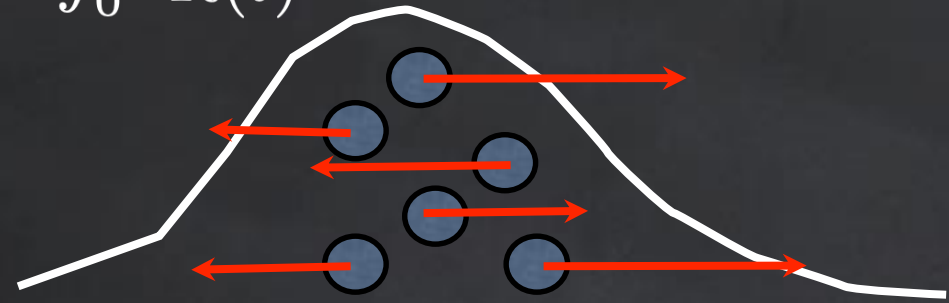




Se la materia oscura fosse costituita da neutrini non si avrebbero strutture di piccola massa

### Dissipazione, free-streaming

$$r_{fs} = \int_0^t \frac{v(t)}{R(t)}$$



$$\sigma_\chi \propto a^{-1} m_\chi^{-1/2}$$

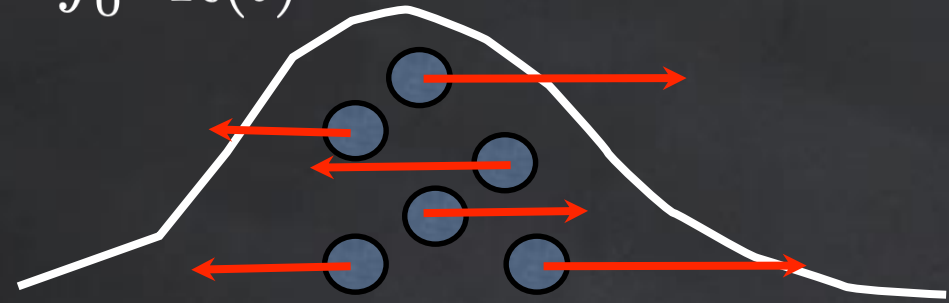
$$M_{fs} = 4 \times 10^{15} \left( \frac{m_\nu}{30 \text{ eV}} \right)^{-2} M_\odot$$

Particelle più leggere e veloci sfuggono dalle perturbazioni di densità più piccole.

COLD DARK MATTER: limite in cui la massa di free-streaming e'  $\ll$  di masse di interesse cosmologico

### Dissipazione, free-streaming

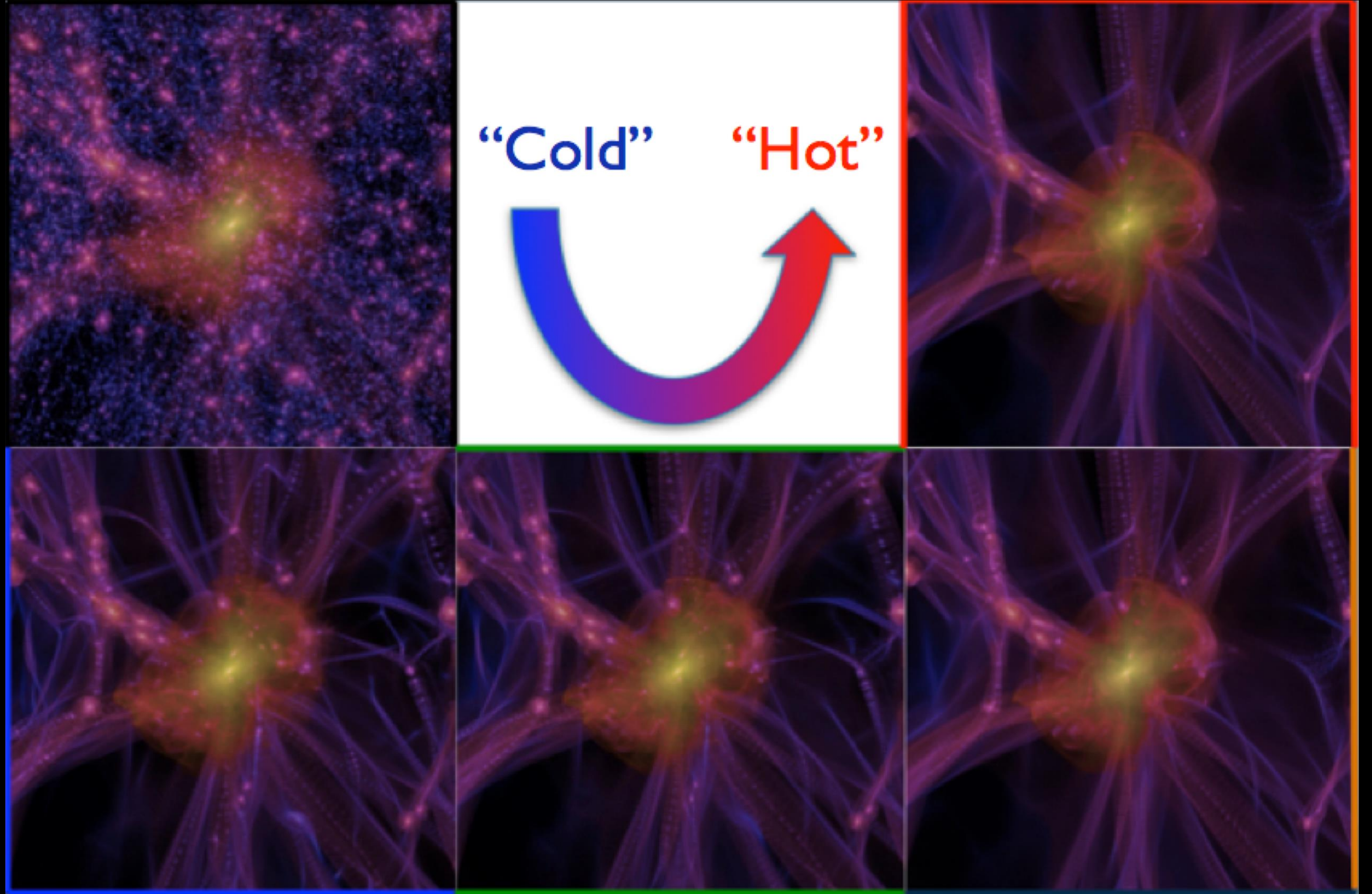
$$r_{fs} = \int_0^t \frac{v(t)}{R(t)}$$



$$\sigma_\chi \propto a^{-1} m_\chi^{-1/2}$$

$$M_{fs} = 4 \times 10^{15} \left( \frac{m_\nu}{30 \text{ eV}} \right)^{-2} M_\odot$$

Particelle piu' leggere e veloci sfuggono dalle perturbazioni di densita' piu' piccole.



## Scenario “Fiduciale” attuale

- Curvatura nulla
- Costante cosmologica  $\Omega_{\Lambda} \approx 0.7$
- Materia Oscura Fredda (CDM)  $\Omega_{DM} \approx 0.26$
- Contributo minoritario materia ordinaria  $\Omega_b \approx 0.04$

## Implicazioni per gli scenari di formazione delle galassie

Abbiamo visto i problemi concettuali che questo scenario pone

Esaminiamo ora come si confronta con osservazioni astronomiche relative alla formazione di strutture

- DATI recenti da JWST
- Programmi cosmologici “ultima generazione” DESI .. e EUCLID



Le galassie primordiali sono molto diverse da quelle attuali

Morfologie irregolari

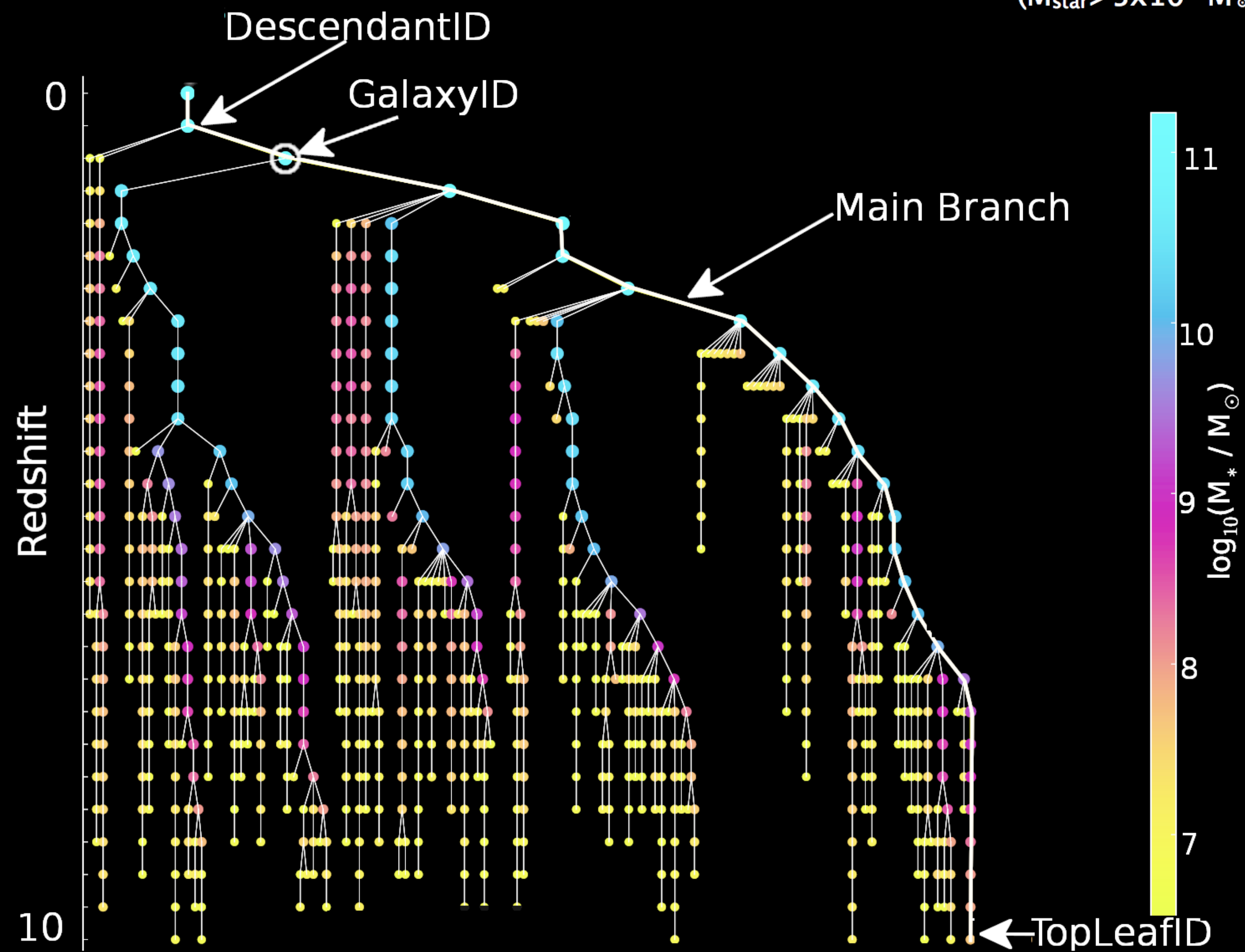
Interazioni

Intensa formazione stellare

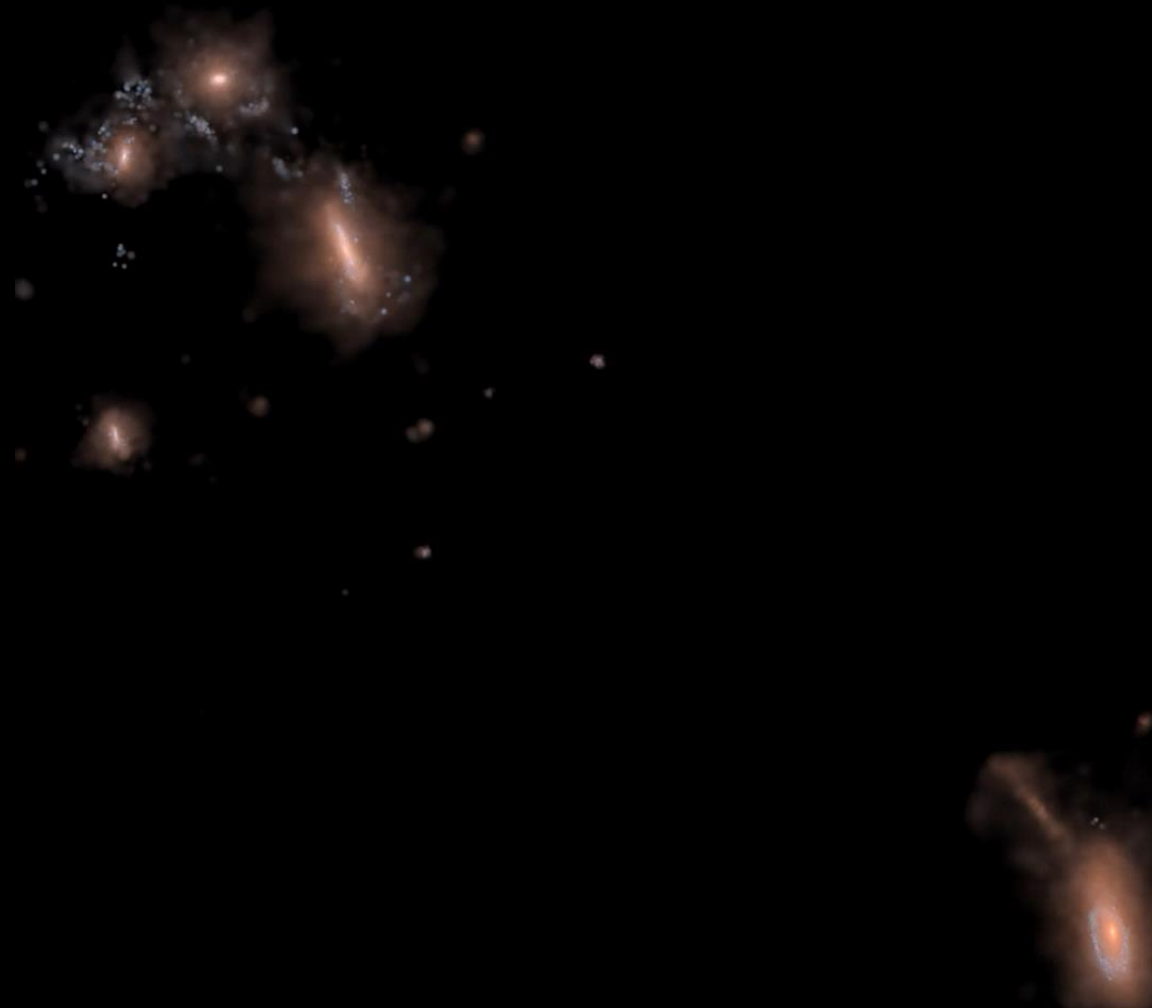
Enorme numero di piccole galassie irregolari

Le galassie sono sistemi che evolvono fortemente

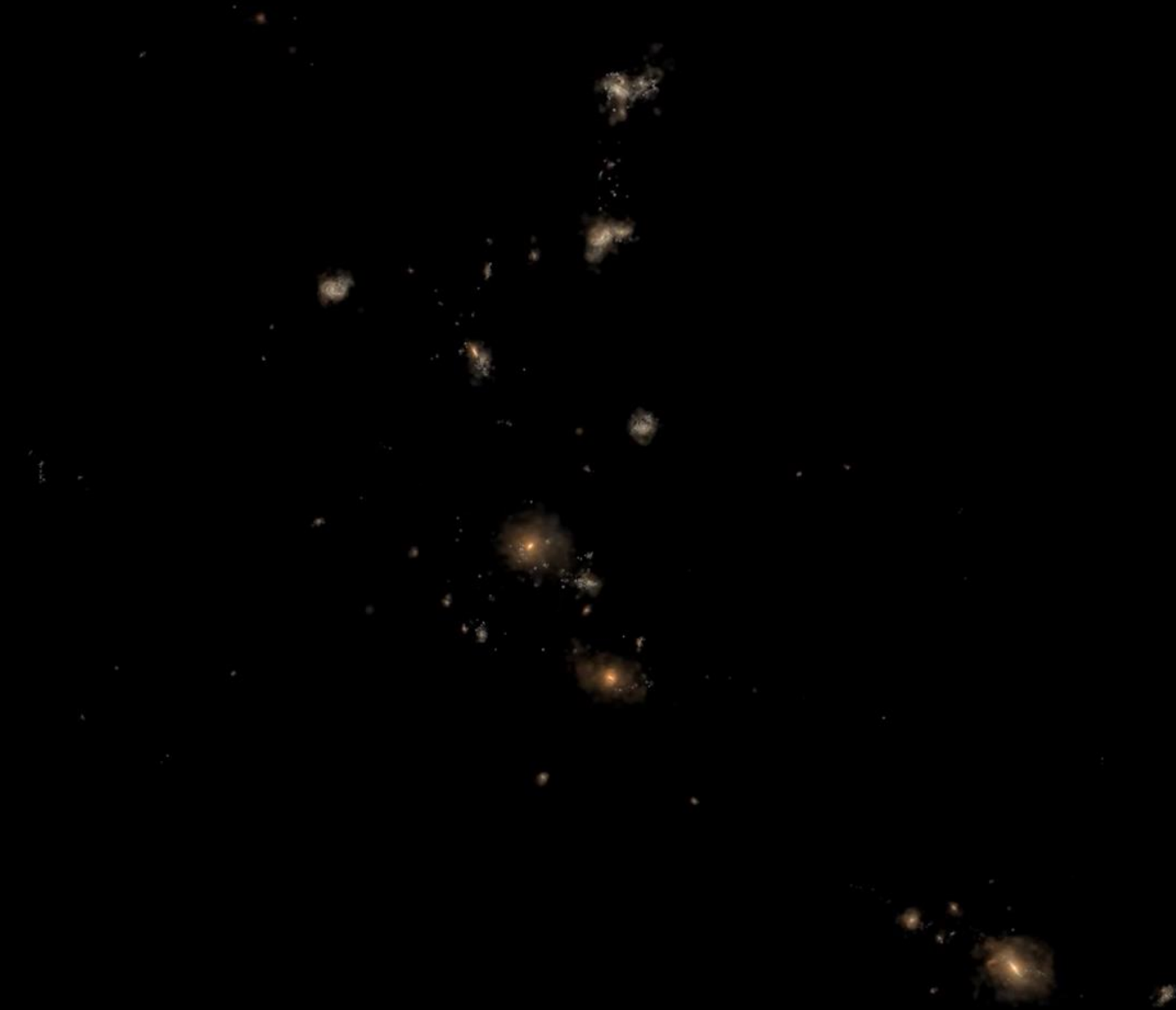
# subhalo merger tree ( $M_{\text{star}} > 5 \times 10^6 M_{\odot}$ )



$z=1.29$      $\log_{10}(M_*)=11.5$      $\text{SFR}=37.1$      $\text{sSFR}=0.13\text{Gyr}^{-1}$



$z=1.82$      $\log_{10}(M_*)=11.2$      $\text{SFR}=66.9$      $\text{sSFR}=0.42\text{Gyr}^{-1}$



## HDF N

150 orbits,  
exposure time: 10 days  
(around Christmas 1995)

blu, red and infrared  
(F450W, F606W, F814W)

## HDF S

10 days in 1998

## UHDF – at the centre of HDF S

exposure time 11.3 days

January 2004

More than 10000 galaxies in the deepest  
view of the Universe

- HDF chose as to be distant from know nearby  
souces

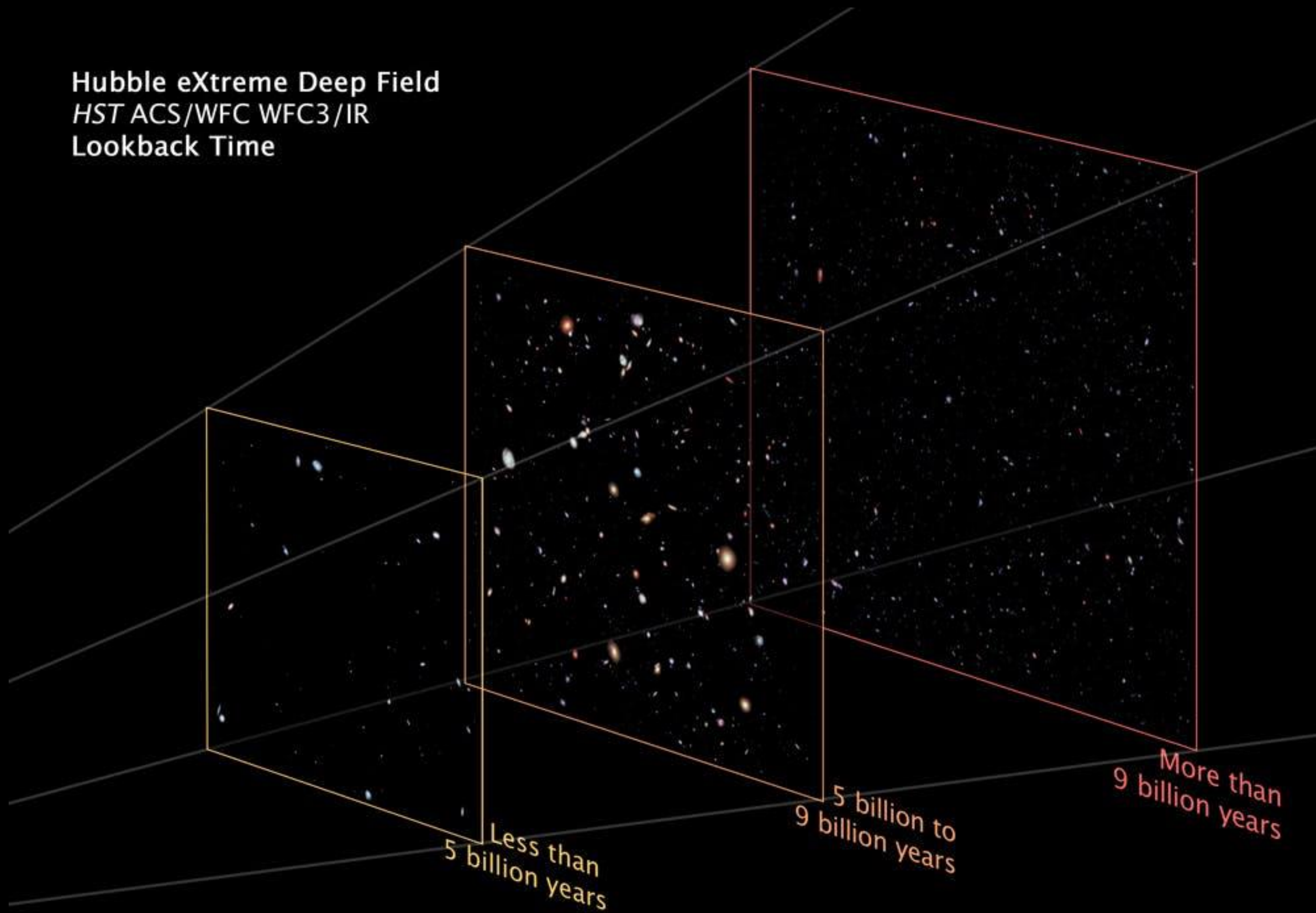
- Low galactic extinction

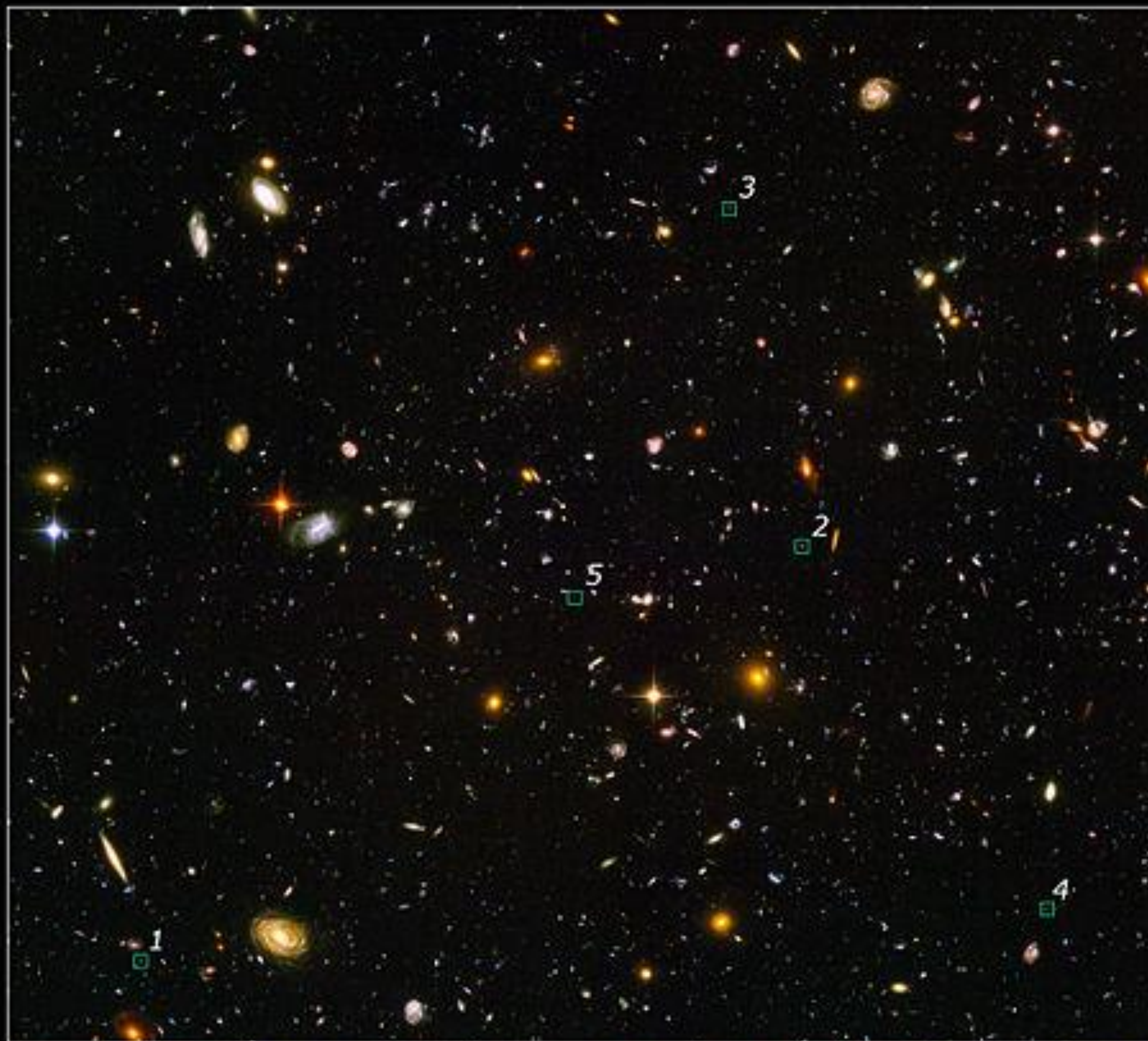


Hubble Extreme Deep Field 2012



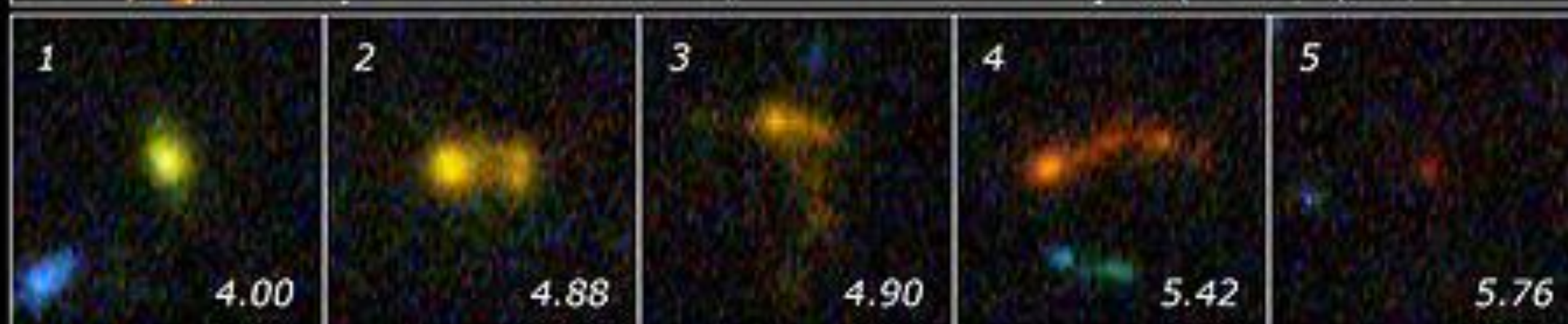
Hubble eXtreme Deep Field  
HST ACS/WFC WFC3/IR  
Lookback Time





Le galassie primordiali sono migliaia di volte piu' piccole della Via Lattea

Morfologie disturbate, la maggior parte mostra segni di interazione con galassie vicine



**Galaxy Building Blocks in the Hubble Ultra Deep Field**  
*Hubble Space Telescope • ACS/WFC*

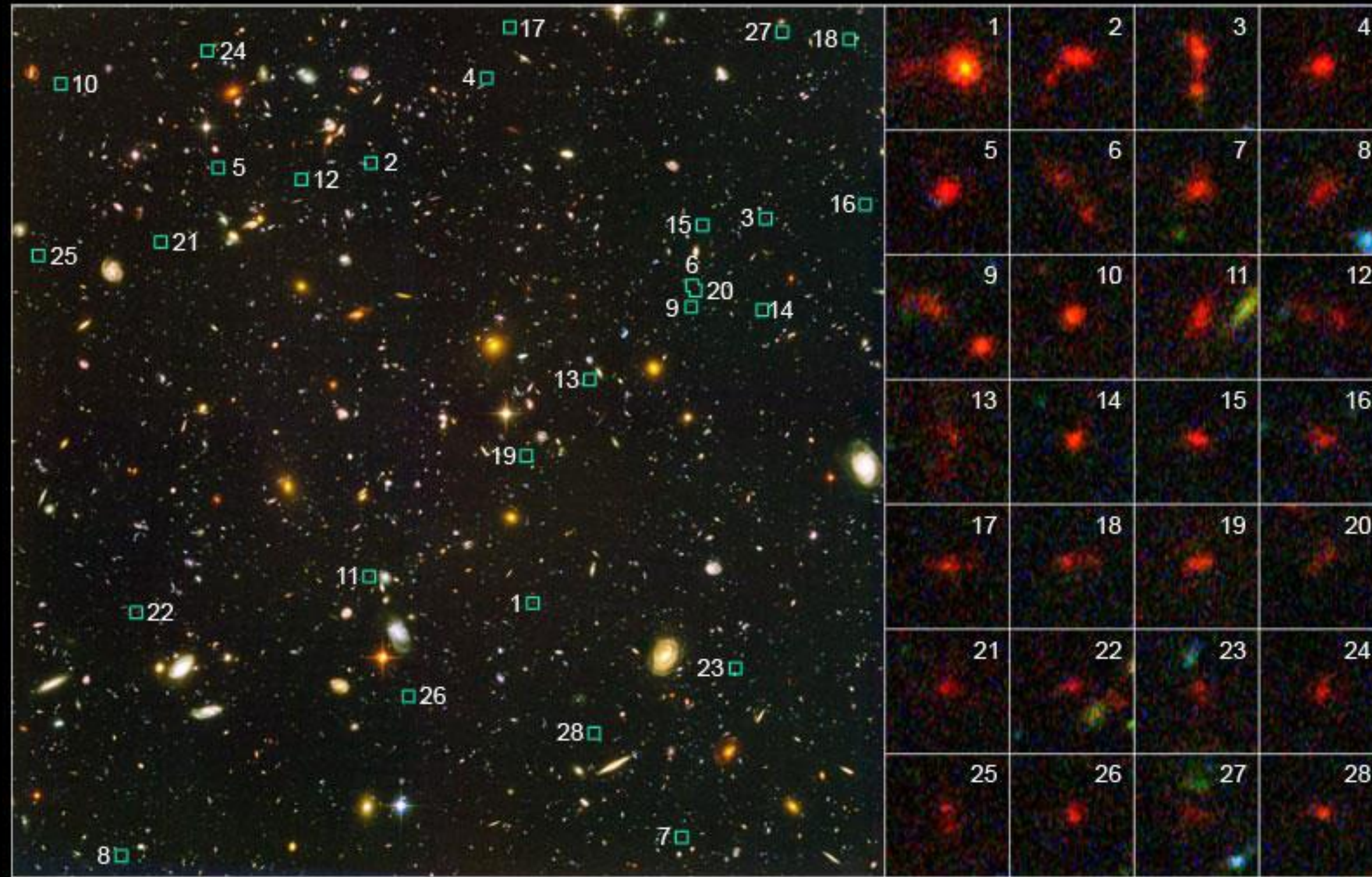
# Hubble Legacy Field: Galaxies Across Time



Bly = billion light-years

# Distant Galaxies in the Hubble Ultra Deep Field

HST ■ ACS/WFC



Le galassie scoperte da Hubble sono **più' piccole di quelle presenti** e con tasso di formazione stellare più' elevato, decine di volte quello tipico nell' Universo presente

“Finding so many of these dwarf galaxies, but so few bright ones, is evidence for galaxies building up from small pieces -- merging together”

said astronomer Rychard Bouwens who led the Hubble study.

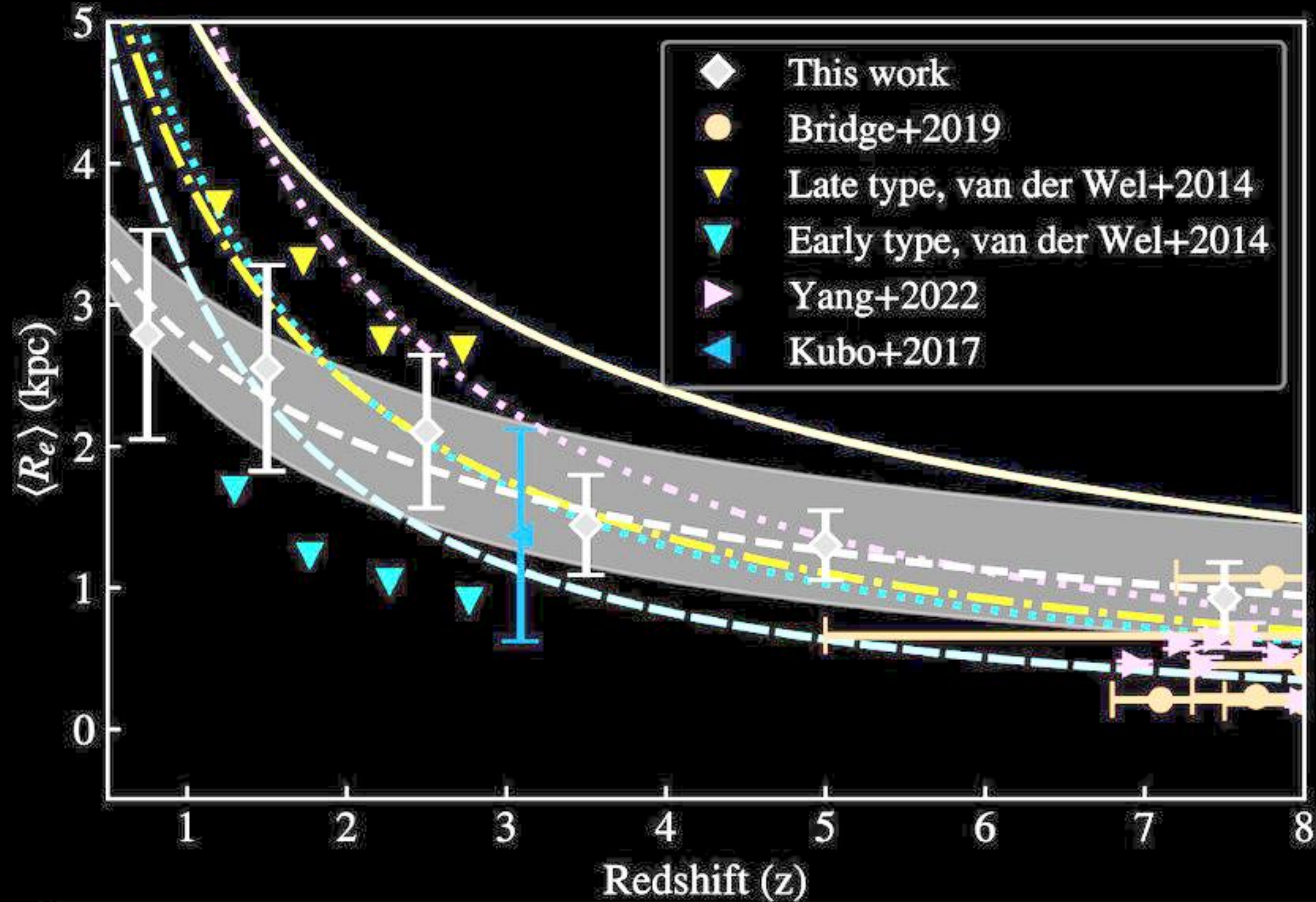
NASA, ESA, R. Bouwens and G. Illingworth (University of California, Santa Cruz)

STScI-PRC06-13



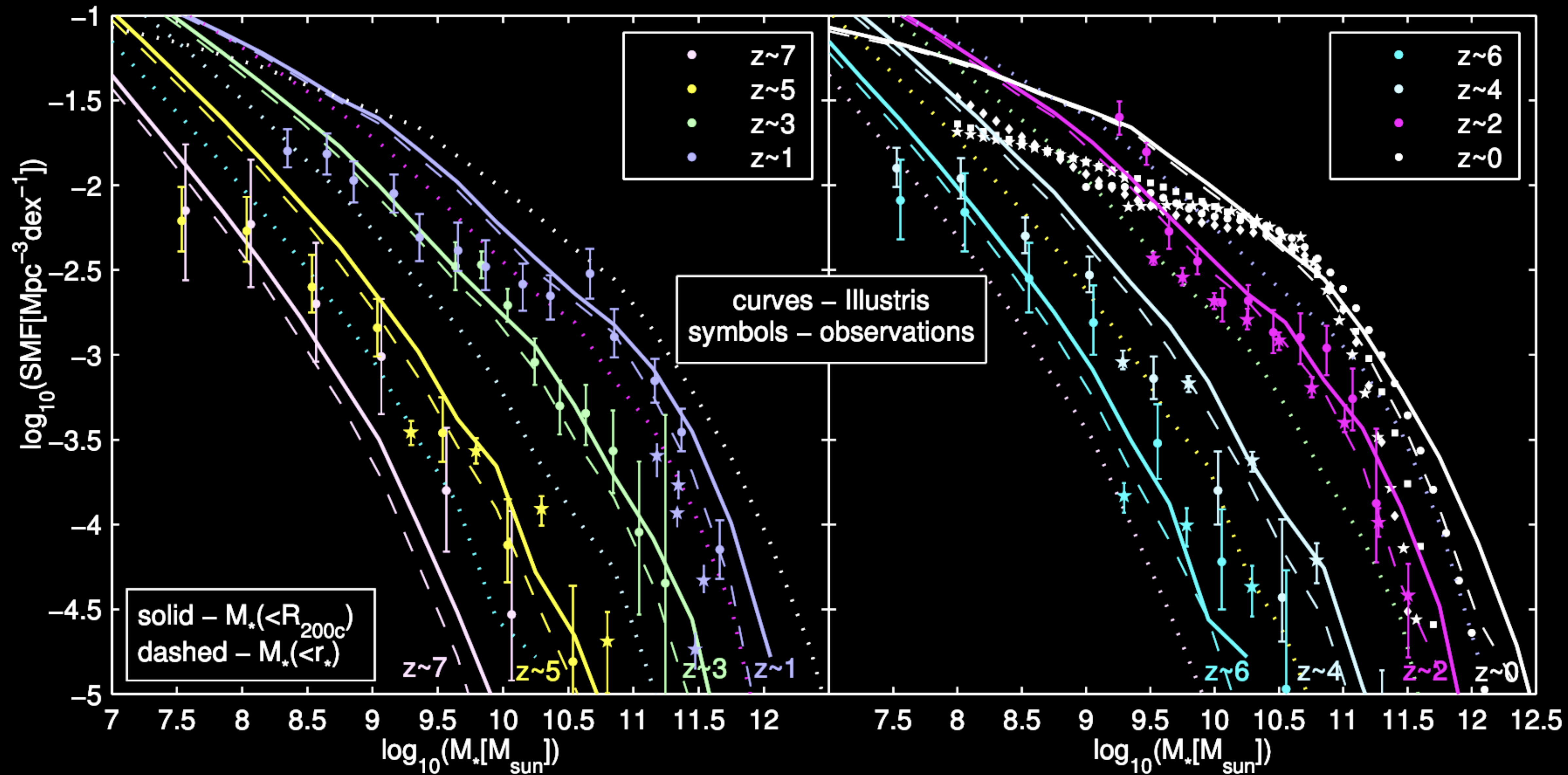
# Evoluzione delle dimensioni medie delle galassie

Ormerod et al. 2023

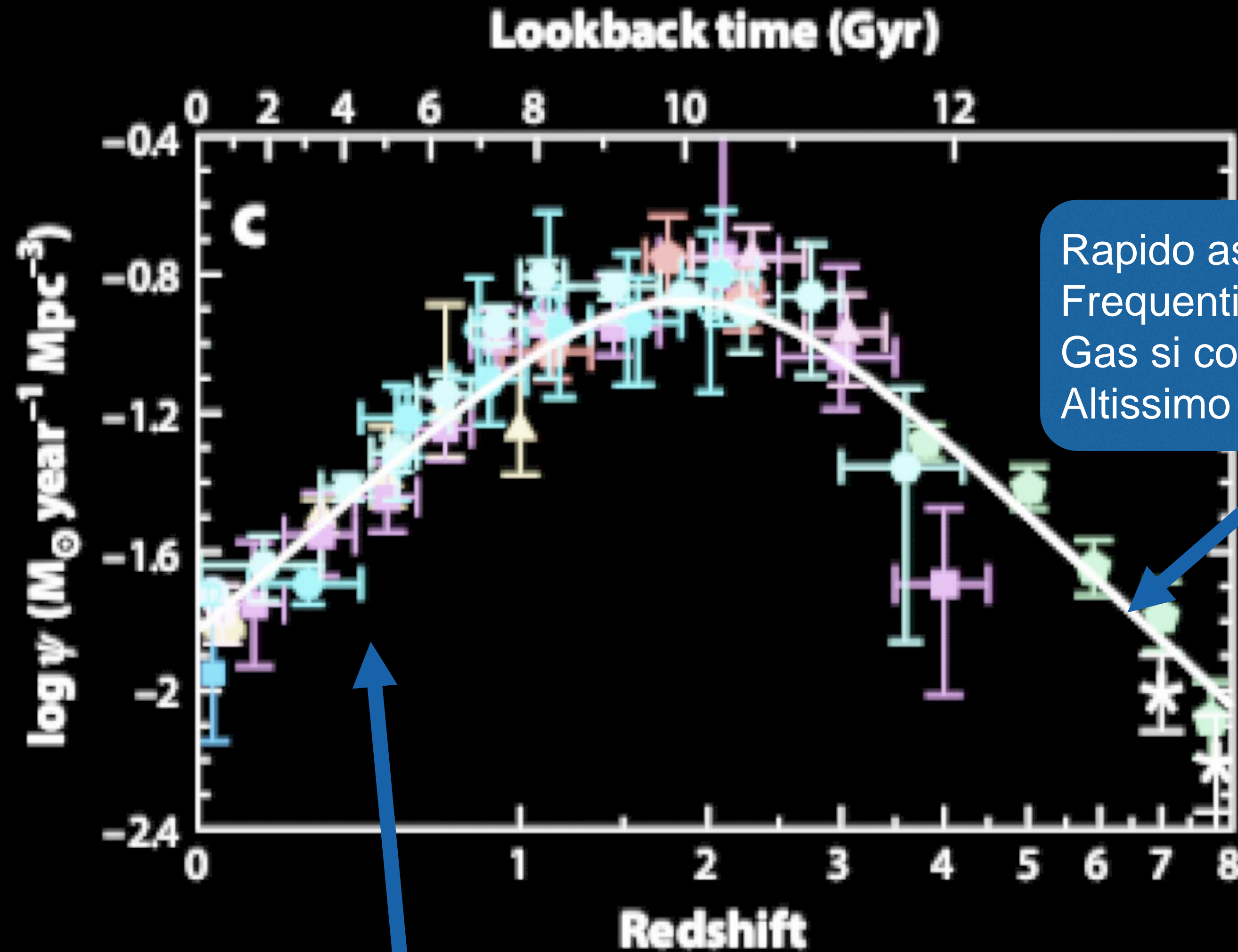


# Evoluzione della distribuzione di massa delle galassie

Genel et al. 2014



# Tasso medi di formazione stellare (per unit cosmic Volume)

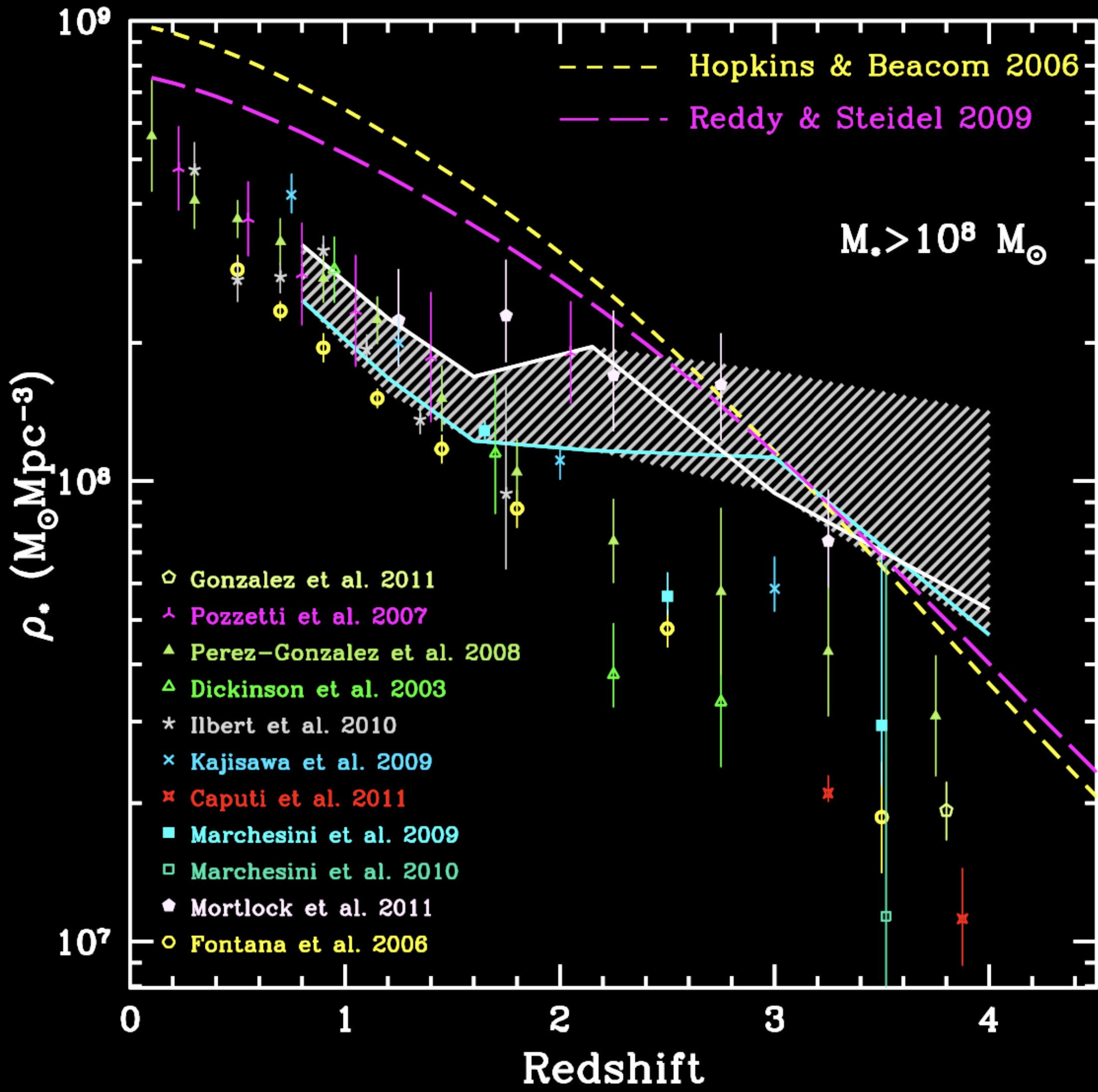


Rapido assemblaggio delle galassie  
Frequenti interazioni  
Gas si condensa nella galassie  
Altissimo tasso di formazione stellare

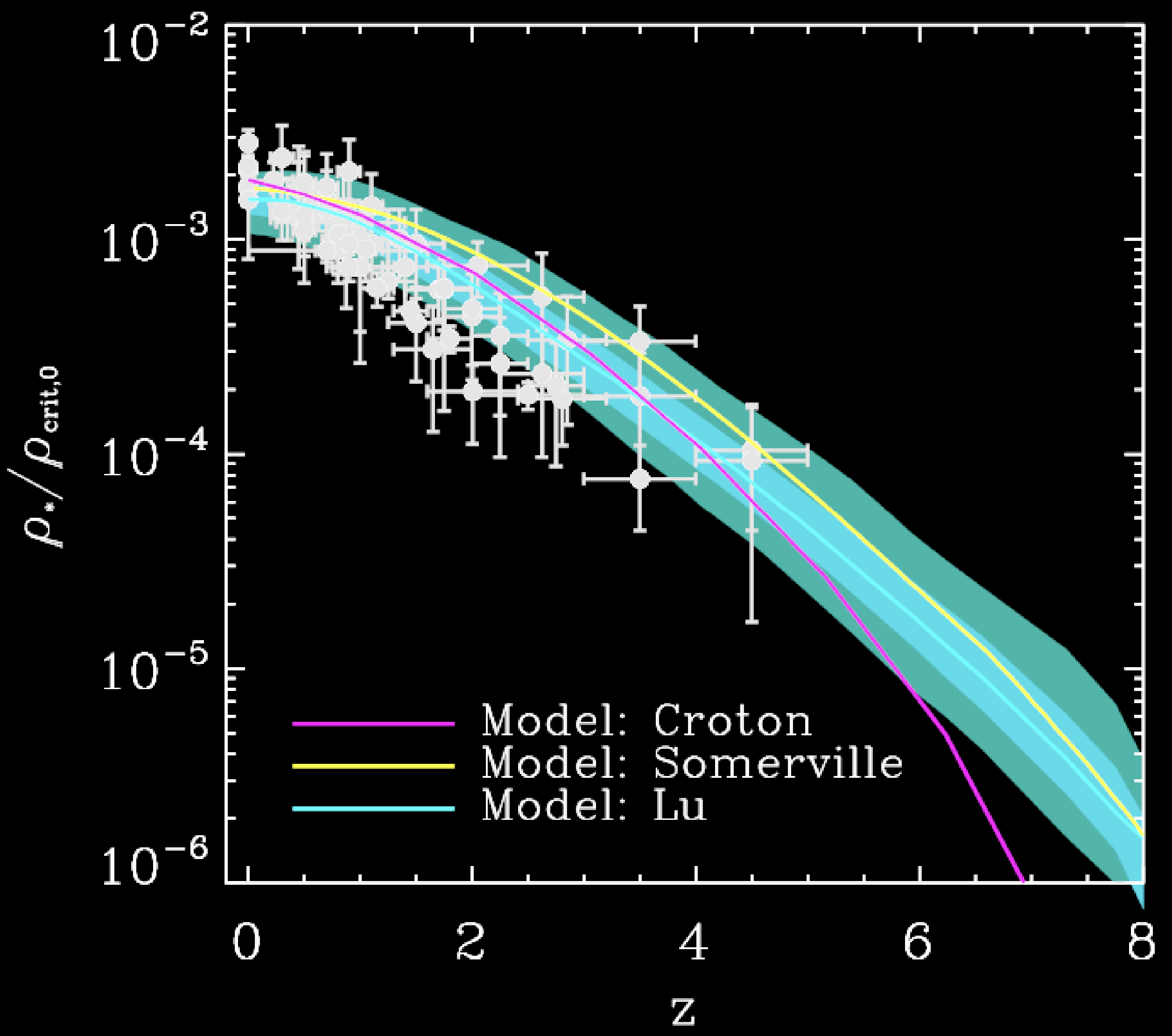
Decline del tasso di interazione  
Gas gas gradualmente convertito in stelle  
Progressivo esaurimento del gas

# Massa un stelle per unita' di volume dell'Universo

Santini et al. 2012



Lu et al. 2013



# Le proprietà finali delle galassie possono essere fatte risalire alla loro storia di formazione

## In regioni sovra-dense

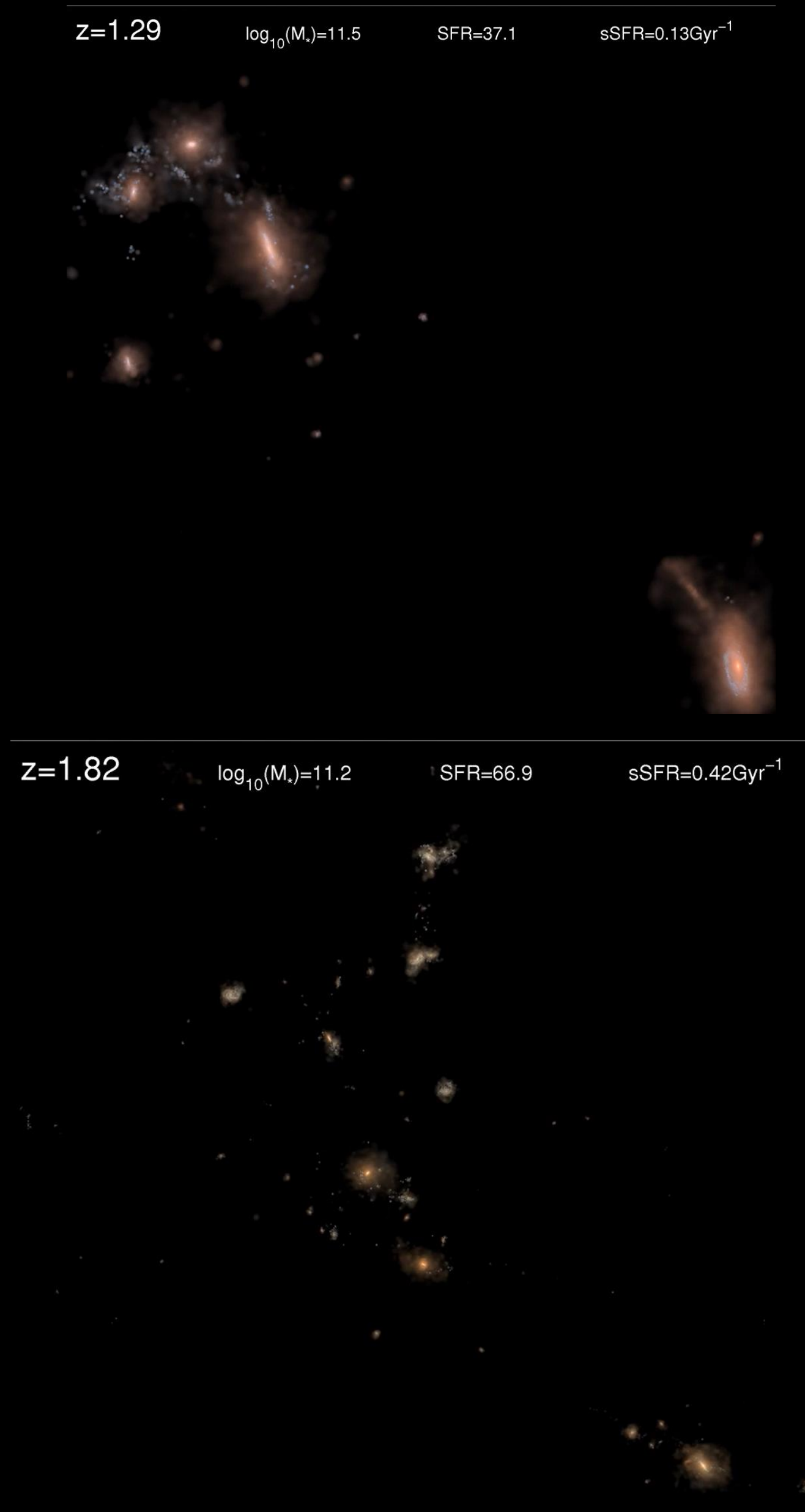
- rapida condensazione di gas e formazione stellare
- Rapido esaurimento del gas
- Espulsione del gas residuo dovuto al feedback da Supernovae
- Svuotamento della riserva di gas e successiva evoluzione passiva

Questo processo porta alla formazione di una **galassia ellittica** (povera di gas, basso tasso di formazione stellare, popolazioni stellare evolute)

## In regioni meno dense

- Graduale condensazione e raffreddamento del gas
- Graduale formazione stellare
- Eventi di feedback meno intensi permettono la conservazione di riserva di gas

Questo processo porta alla formazione di una **galassia a spirale** galaxy (ricca di gas, alta formazione stellare, stelle giovani)



## Scenario “Fiduciale” attuale $\Lambda$ CDM

- Curvatura nulla
- Costante cosmologica  $\Omega_\Lambda \approx 0.7$
- Materia Oscura Fredda (CDM)  $\Omega_{DM} \approx 0.26$
- Contributo minoritario materia ordinaria  $\Omega_b \approx 0.04$

### Implicazioni per gli scenari di formazione delle galassie

Abbiamo visto i **problemi concettuali che questo scenario** pone

Dal punto di vista del confronto con i dati :

All'interno delle incertezze relative ai processi fisici di formazione delle galassie, le **osservazioni sono consistenti con il quadro del  $\Lambda$ CDM**

## Scenario “Fiduciale” attuale $\Lambda$ CDM

- Curvatura nulla
- Costante cosmologica  $\Omega_{\Lambda} \approx 0.7$
- Materia Oscura Fredda (CDM)  $\Omega_{DM} \approx 0.26$
- Contributo minoritario materia ordinaria  $\Omega_b \approx 0.04$

### Implicazioni per gli scenari di formazione delle galassie

Abbiamo visto i problemi concettuali che questo scenario pone

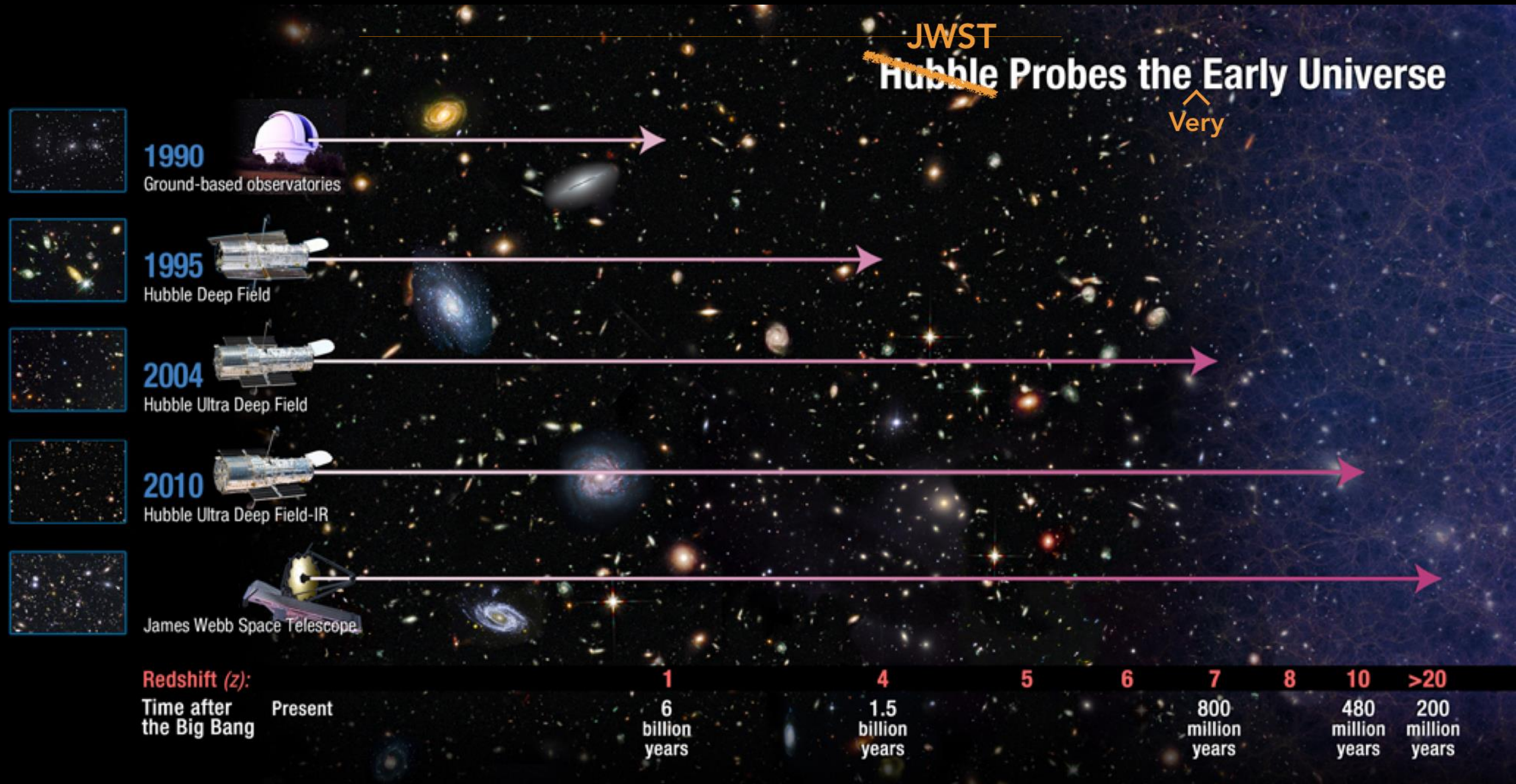
Dal punto di vista del confronto con i dati :

All'interno delle incertezze relative ai processi fisici di formazione delle galassie, le osservazioni sono consistenti con il quadro del  $\Lambda$ CDM

Esaminiamo ora come si confronta con osservazioni astronomiche piu' recenti

- DATI recenti da **JWST**
- Programmi cosmologici “ultima generazione” **DESI** .. e EUCLID in prossimo futuro...

# JWST: The firsts data





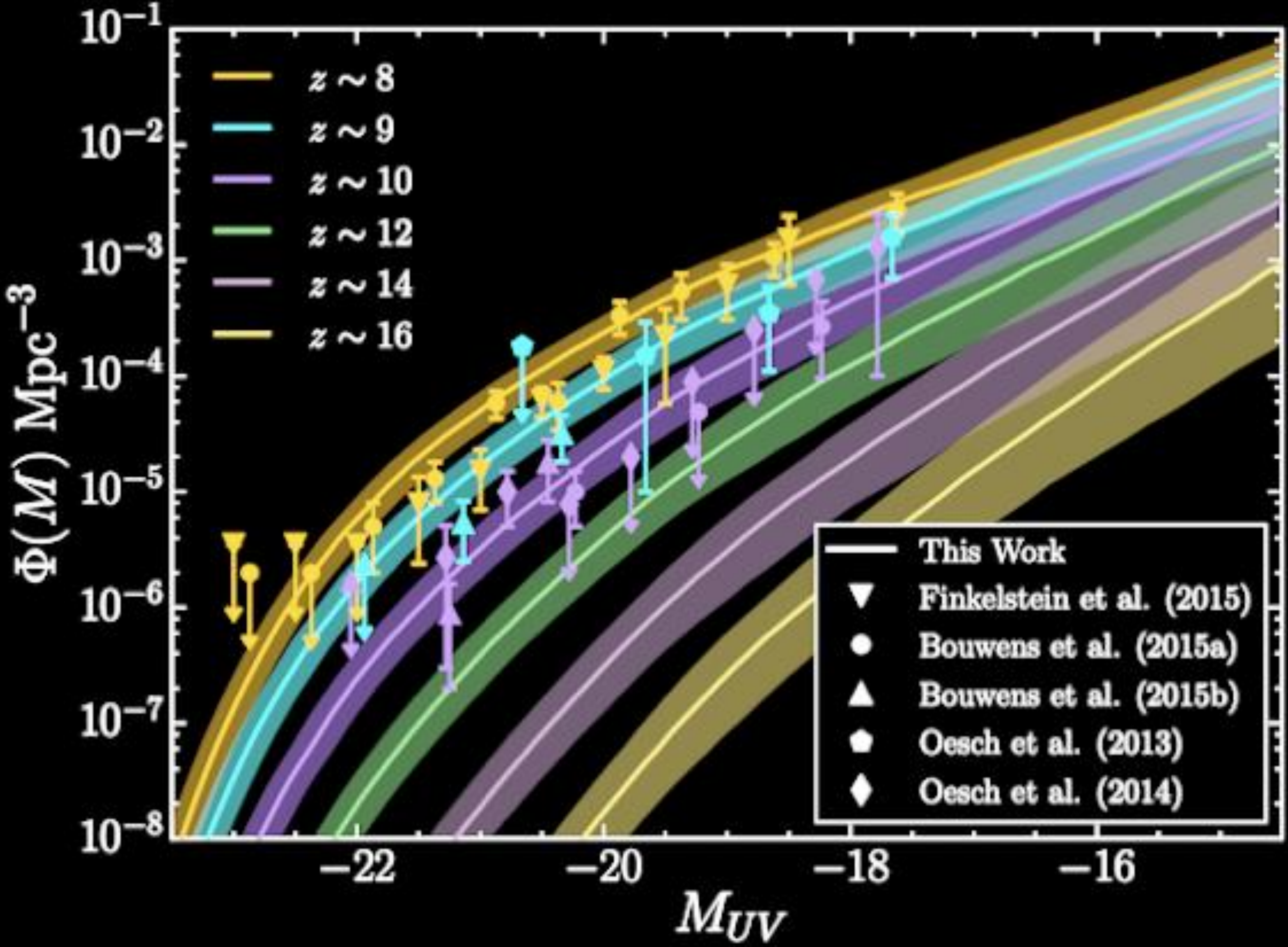
Dimensione del campo: approssimativamente  
come un granello di sabbia alla distanza di un  
braccio



Una abbondanza di galassie brillanti e di galassie massive molto piu' alta di quella aspettata dai modelli

Due Possibilita'

- 1) Ad epoche cosmiche molto remote ( $z \gtrsim 10$ ) i processi fisici coinvolti nella formazione di stelle sono molto differenti da quelli al lavoro in tempi piu' recenti: Brusca Transizione
- 2) Lo scenario cosmologico e' differente: ho bisogno di piu' tempo di quello previsto cdI  $\Lambda$ CDM per formare le galassie



**SCIENTIFIC  
AMERICAN®**

COSMOLOGY

## JWST's First Glimpses of Early Galaxies Could Break Cosmology

The James Webb Space Telescope's first images of the distant universe shocked astronomers. Is the discovery of unimaginably distant galaxies a mirage or a revolution?

By Jonathan O'Callaghan on September 14

**The  
Guardian**

## James Webb telescope detects evidence of ancient 'universe breaker' galaxies

Huge systems appear to be far larger than was presumed possible so early after big bang, say scientists

**SCI NEWS**

## Webb Discovers Impossibly Massive Galaxies in Early Universe

**la Repubblica**

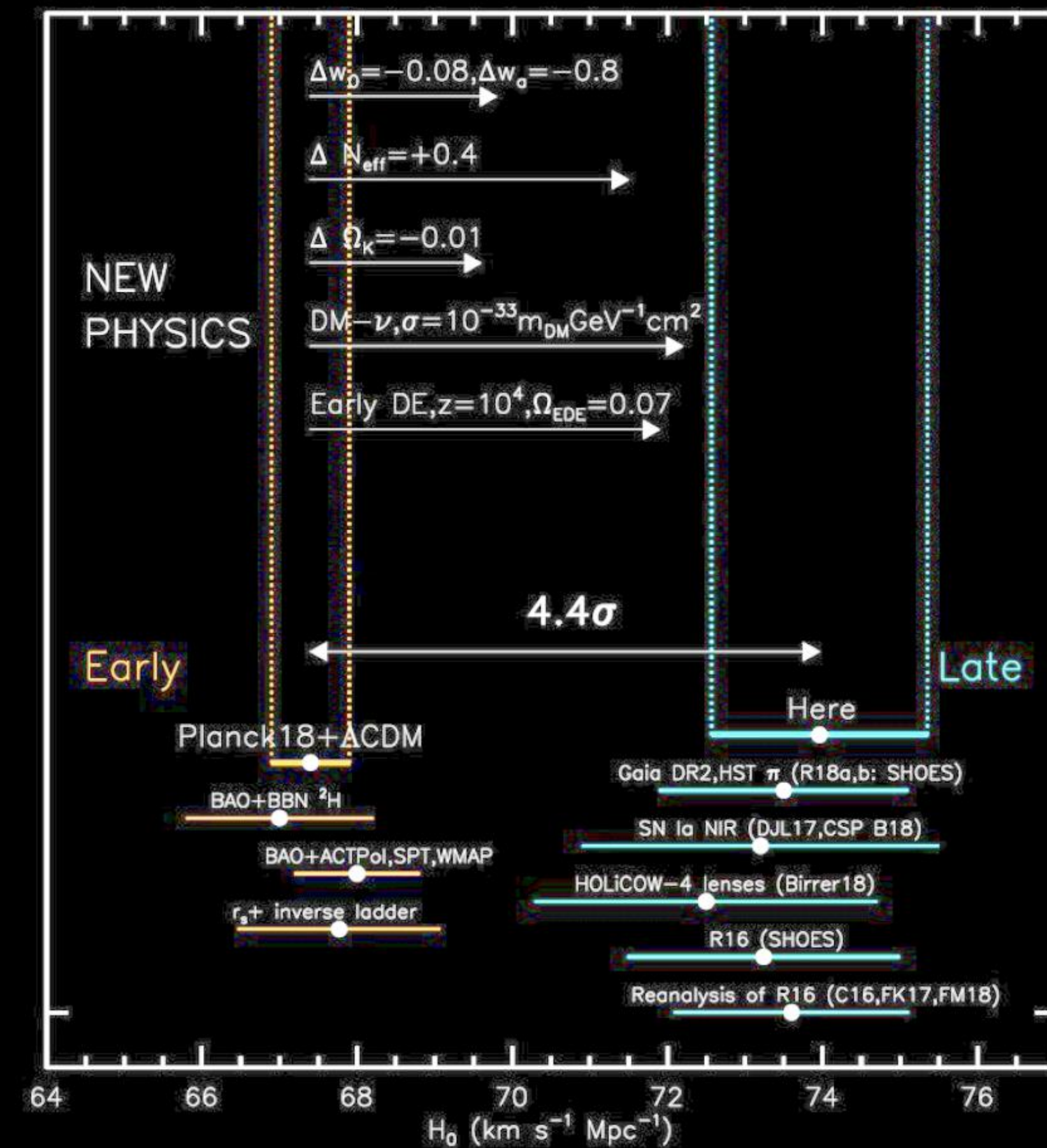
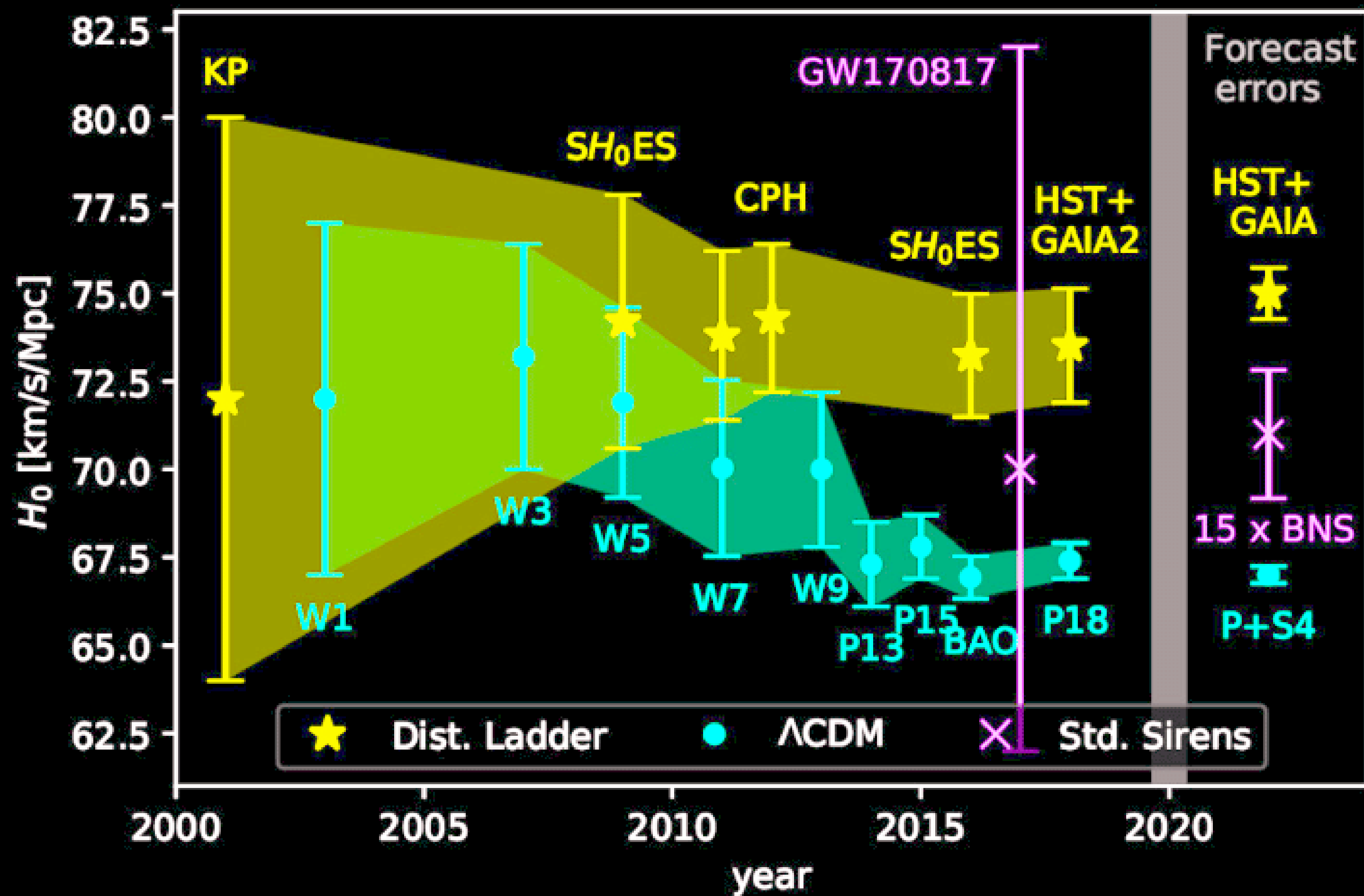
James Webb, osservazioni rivoluzionarie nello studio guidato dall'Italia su due galassie all'origine del Cosmo

**WIRED**

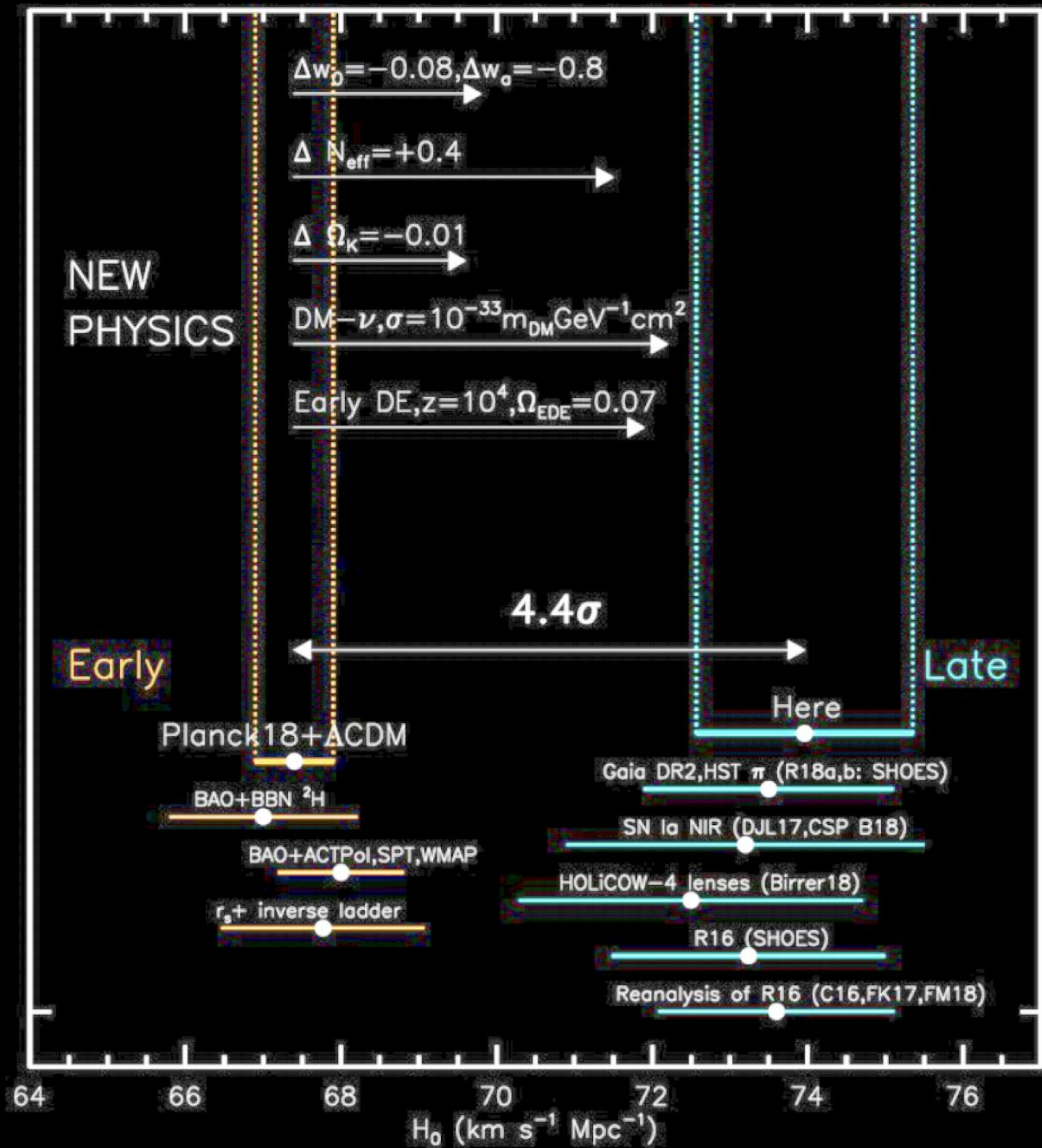
## Il James Webb Telescope ha scoperto galassie che non dovrebbero esistere

Alcuni astrofisici hanno individuato, dai dati raccolti dal telescopio spaziale, potenziali galassie talmente tanto massicce da mettere in discussione le attuali teorie cosmologiche

Allo stesso tempo, misure sempre piu' precise in ambito cosmologico pongono seri problemi allo scenario  $\Lambda$ CDM:  
The Hubble Tension



# Una possibile origine nella evoluzione della Dark Energy



$67 \pm 0.3 \text{ km/s(Mpc)}$   
CMB

$73 \pm 1.3 \text{ km/s(Mpc)}$   
Supernovae Ia

$$\theta = \frac{r_s}{D_A} \quad \begin{array}{l} \text{-Dimensione angolare primo picco CMB misurato} \\ \text{- } r_s \text{ dato} \end{array}$$

$$D_A \propto \frac{c}{H_0} A_{rec}$$

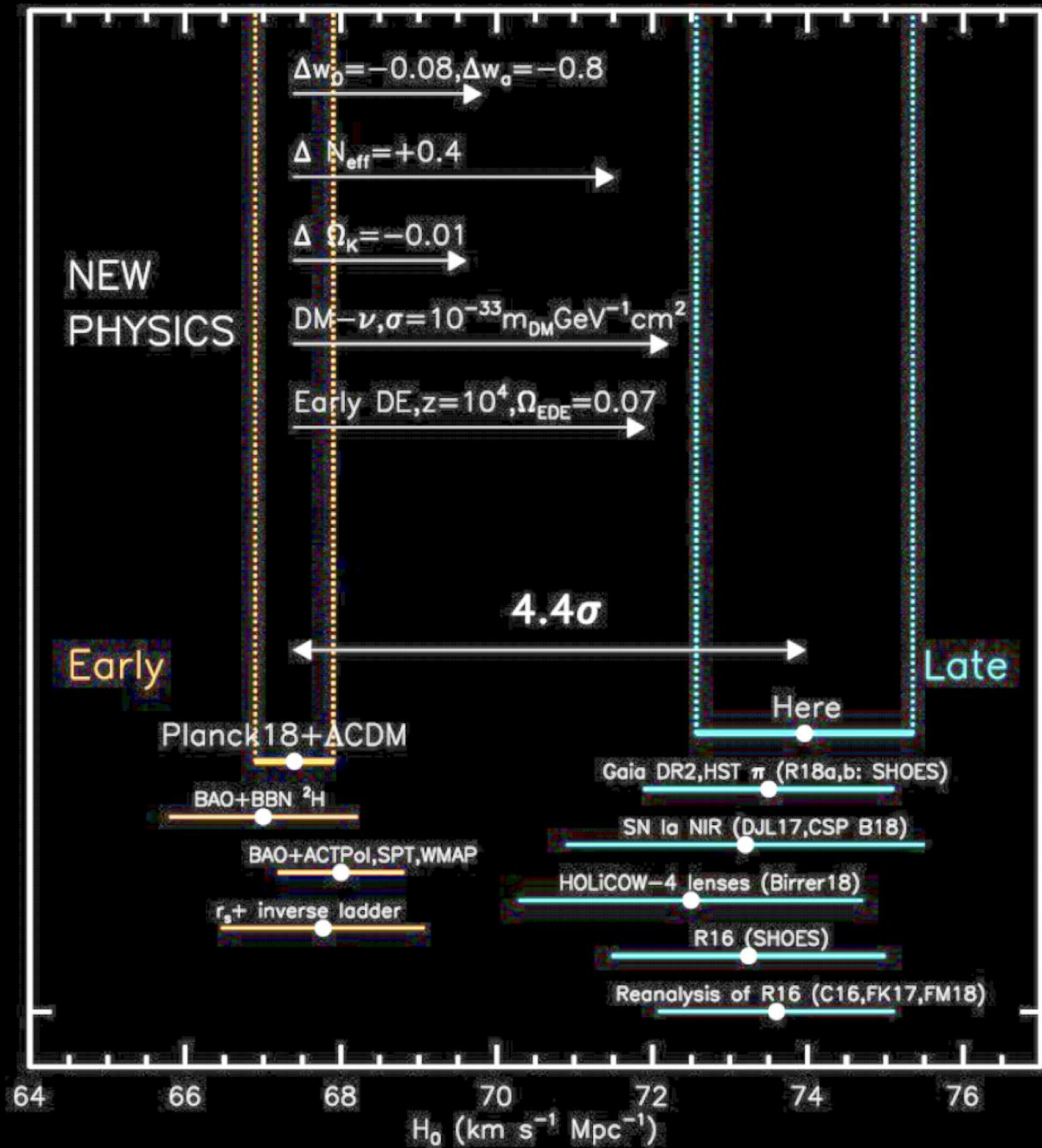
$$A_{rec} \equiv \frac{1}{(1+z_{rec})} \int_0^{z_{rec}} \frac{dz}{E(z)}$$

Mantenendo fissi  $\theta$  e  $r_s$ , un valore piu' alto di  $H_0$  si puo' ottenere facendo variare nel tempo la densità' di energia oscura

$$E(z)^2 = \Omega_m a^{-3} + \Omega_{DE}(a)$$

Una soluzione di questo genere permetterebbe anche una piu' precoce formazione delle stelle nelle galassie

# Una possibile origine nella evoluzione della Dark Energy



$$\theta = \frac{r_s}{D_A} \quad \begin{array}{l} \text{- Dimensione angolare primo picco CMB misurato} \\ \text{- } r_s \text{ dato} \end{array}$$

$$D_A \propto \frac{c}{H_0} A_{rec}$$

$$A_{rec} \equiv \frac{1}{(1+z_{rec})} \int_0^{z_{rec}} \frac{dz}{E(z)}$$

Mantenendo fissi  $\theta$  e  $r_s$ , un valore più alto di  $H_0$  si può ottenere facendo variare nel tempo la densità di energia oscura

$$E(z)^2 = \Omega_m a^{-3} + \Omega_{DE}(a)$$

$$w(a) = w_0 + w_a(1 - a)$$

$$\Omega_{DE}(a) = \Omega_{DE0} a^{-3(1+w_0+w_a)} \exp[-3w_a(1 - a)]$$

# Una possibile origine nella evoluzione della Dark Energy

---

$$\theta = \frac{r_s}{D_A} \quad \begin{array}{l} \text{-Dimensione angolare primo picco CMB misurato} \\ \text{- } r_s \text{ dato} \end{array}$$

$$D_A \propto \frac{c}{H_0} A_{rec}$$

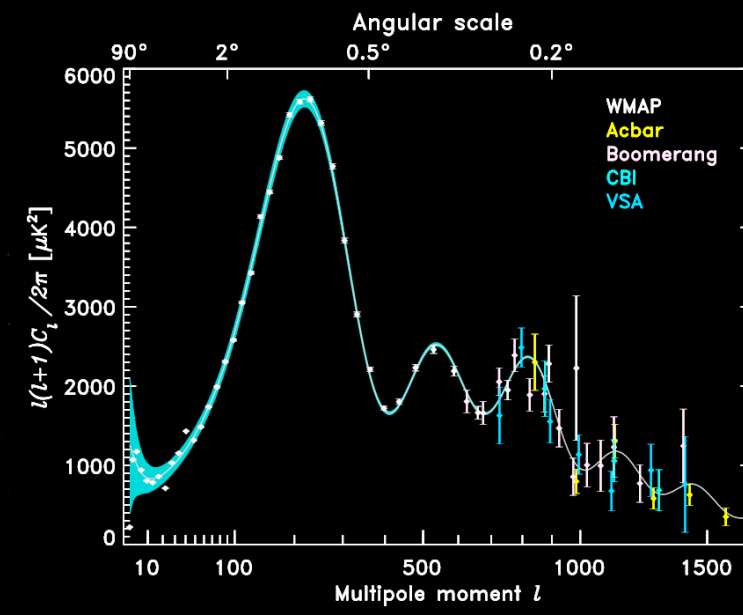
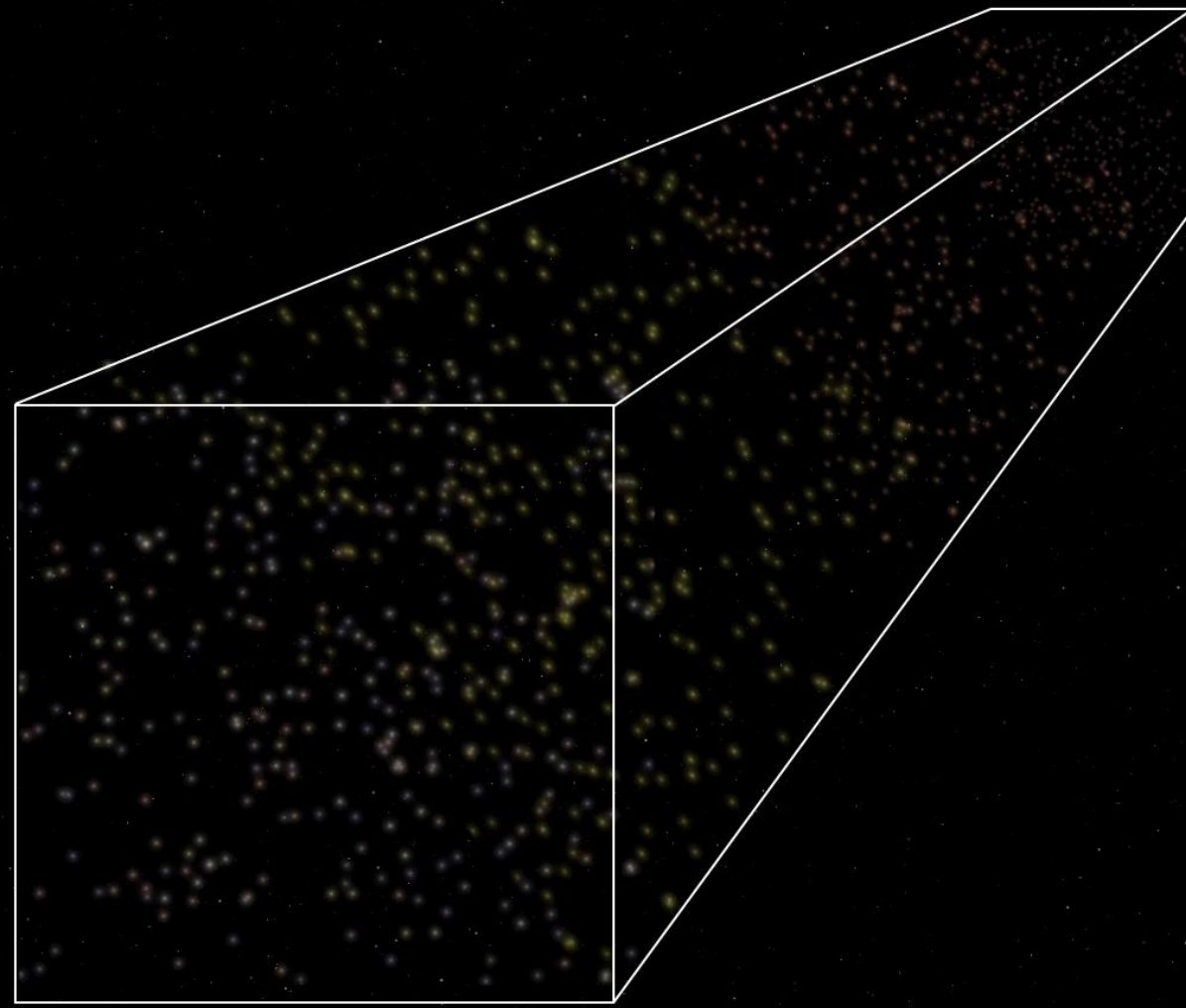
$$A_z \equiv \frac{1}{(1+z)} \int_0^z \frac{dz}{E(z)}$$

$$A_{rec} \equiv \frac{1}{(1+z_{rec})} \int_0^{z_{rec}} \frac{dz}{E(z)}$$

Osservazioni di  $A_z$  a diversi redshift permettono di vincolare la forma di  $E(z)$  e quindi la eventuale evoluzione della Dark Energy

Mantenendo fissi  $\theta$  e  $r_s$ , un valore più alto di  $H_0$  si può ottenere facendo variare nel tempo la densità di energia oscura

$$E(z)^2 = \Omega_m a^{-3} + \Omega_{DE}(a)$$



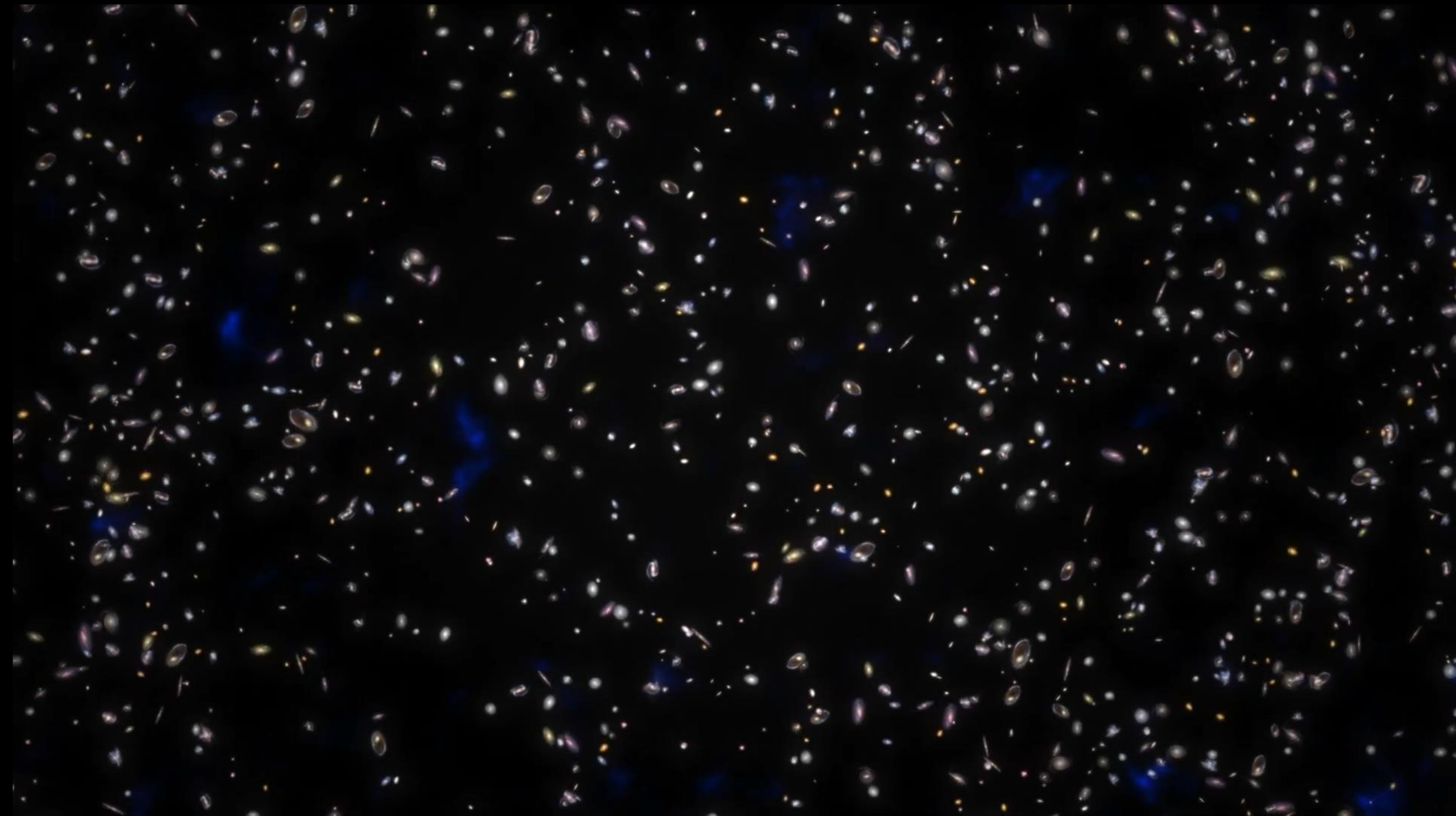
$$D_A \propto \frac{c}{H_0} A_{rec}$$

$$A_{rec} \equiv \frac{1}{(1+z_{rec})} \int_0^{z_{rec}} \frac{dz}{E(z)}$$

$$E(z)^2 = \Omega_m a^{-3} + \Omega_{DE}(a)$$

$$E(z)^2 = \Omega_m a^{-3} + \Omega_\Lambda + \Omega_x f(a)$$

$$f(a) = a^{-3(1+w_0+w_a)} \exp[-3w_a(1-a)]$$





# Una possibile origine nella evoluzione della Dark Energy

$$A_z \equiv \frac{1}{(1+z)} \int_0^z \frac{dz}{E(z)}$$

Osservazioni di  $A_z$  a diversi redshift permettono di vincolare la forma di  $E(z)$  e quindi la eventuale evoluzione della

$$\theta = \frac{r_s}{D_A} \quad \begin{array}{l} \text{-Dimensione angolare primo picco CMB misurato} \\ \text{- } r_s \text{ dato} \end{array}$$

$$D_A \propto \frac{c}{H_0} A_{rec}$$

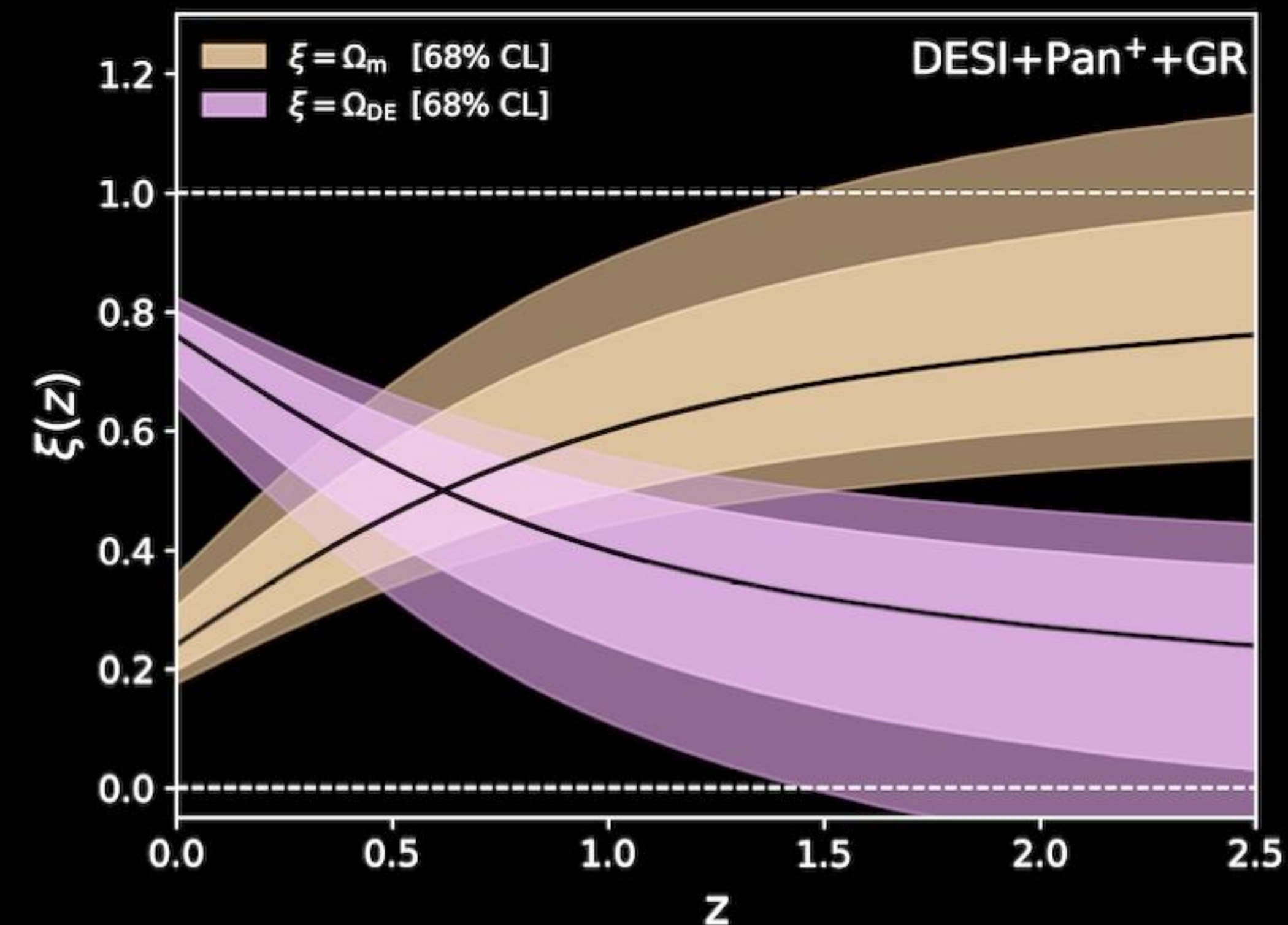
$$A_{rec} \equiv \frac{1}{(1+z_{rec})} \int_0^{z_{rec}} \frac{dz}{E(z)}$$

Mantenendo fissi  $\theta$  e  $r_s$ , un valore piu' alto di  $H_0$  si puo' ottenere facendo variare nel tempo la densità di energia oscura

$$E(z)^2 = \Omega_m a^{-3} + \Omega_{DE}(a)$$

$$w(a) = w_0 + w_a(1 - a)$$

$$\Omega_{DE}(a) = \Omega_{DE0} a^{-3(1+w_0+w_a)} \exp[-3w_a(1 - a)]$$

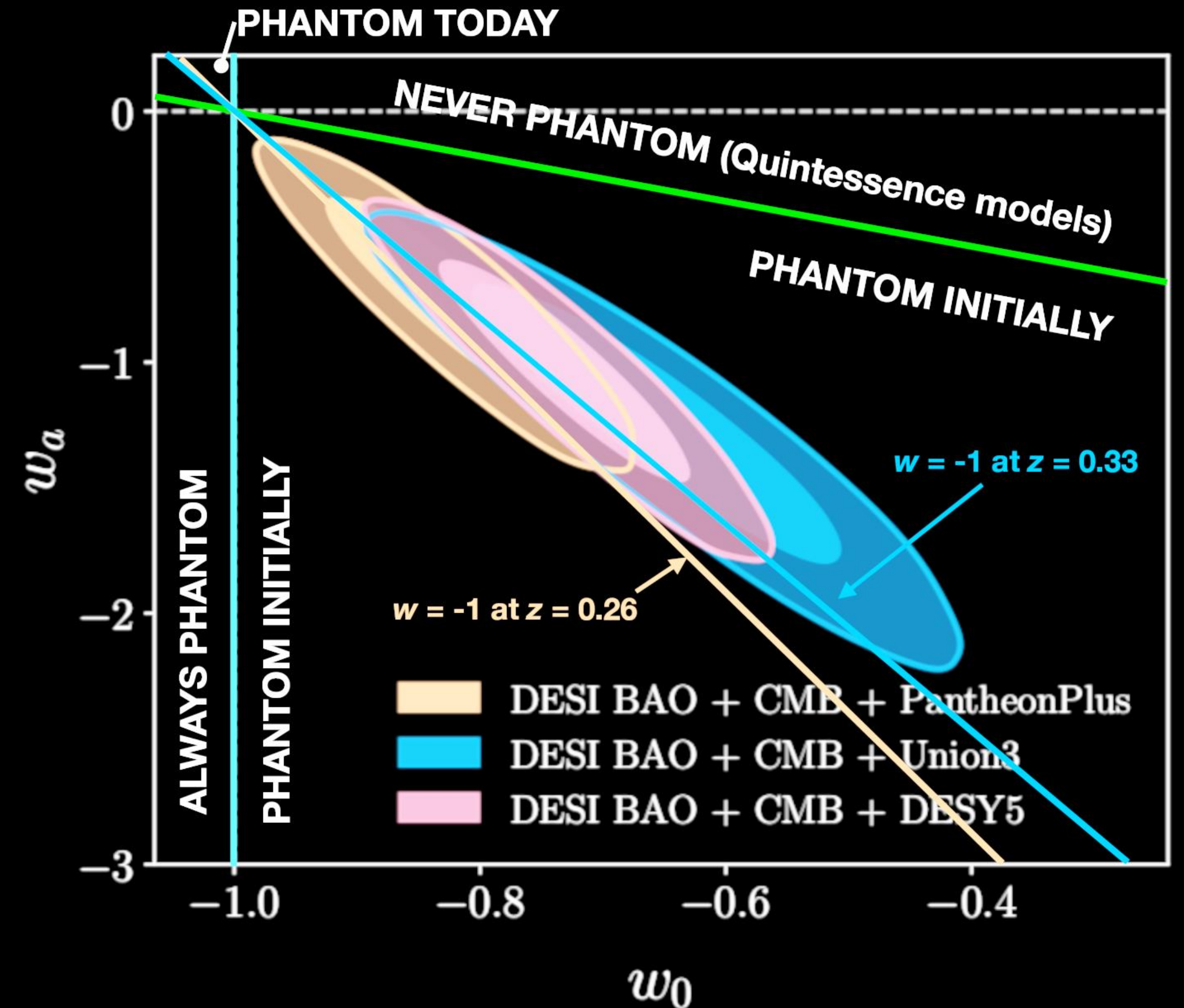


## DESI: Aprile 2024: indicazioni di una Dark Energy che varia con il tempo



Indicazioni di Dark Energy con equazione di stato negativa in una fase Iniziale dell'Universo: problema per scenari di Quintessenza

Il Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) ha prodotto la migliore mappa 3D dell'universo fino redshift  $z = 3$  (corrispondente a 11 miliardi di anni in look-back time) su un'area di 15.000 gradi quadrati. Le sue 5.000 fibre robotiche possono misurare un milione di spettri al mese. I risultati pubblicati nell'aprile 2024 si basano solo sul primo anno di dati (DESI-Y1), quasi 8 milioni di spettri, circa il doppio rispetto al precedente rilevamento spettroscopico completo, lo Sloan Digital Sky Survey.

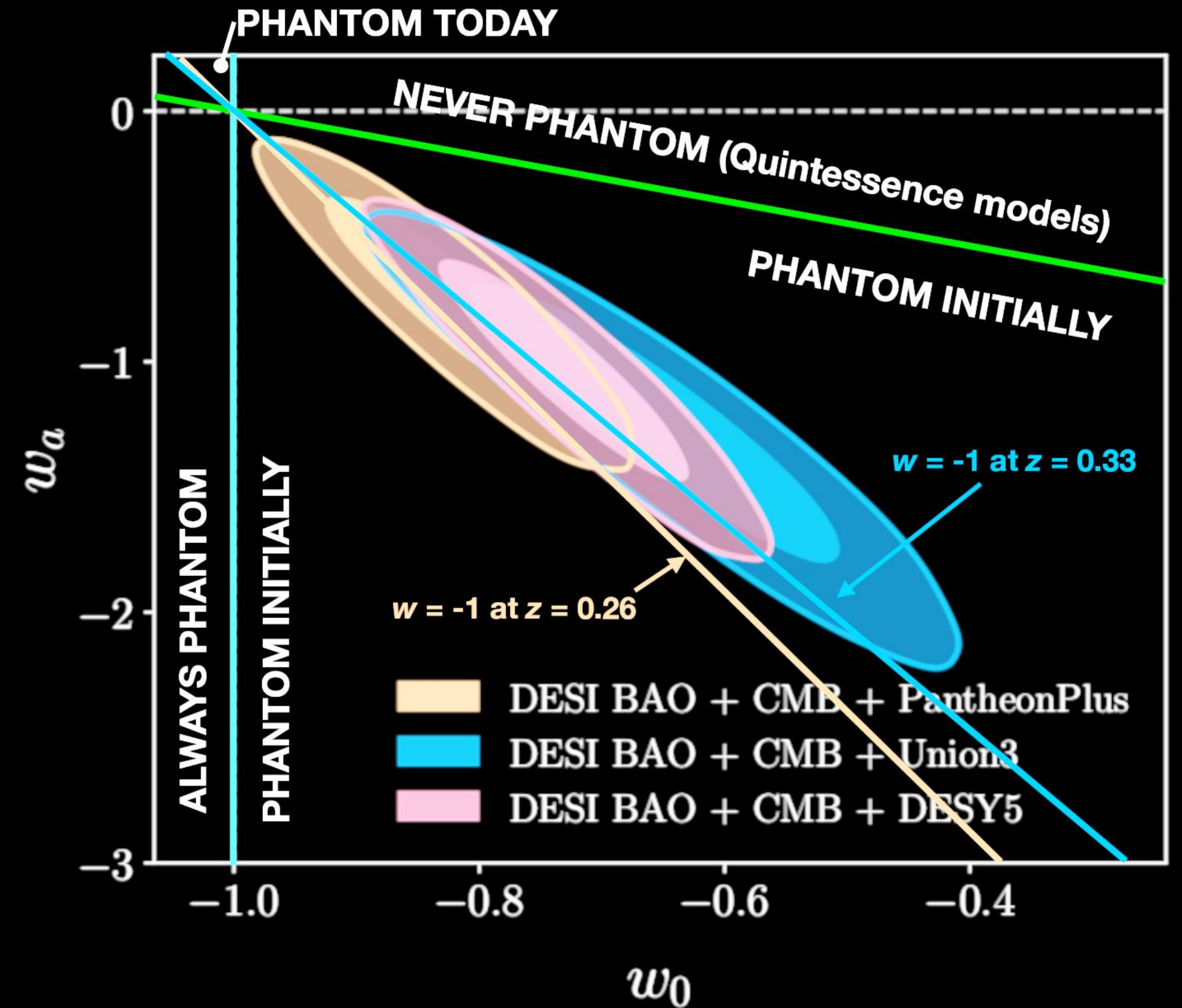


DESI: Aprile 2024: indicazioni di una Dark Energy che varia con il tempo



Indicazioni di Dark Energy con equazione di stato negativa in una fase Iniziale dell'Universo: problema per scenari di Quintessenza

Indicazioni di Dark Energy con equazione di stato negativa in una fase Iniziale dell'Universo: problema per scenari di Quintessenza



$$w(a) = w_0 + w_a(1 - a)$$

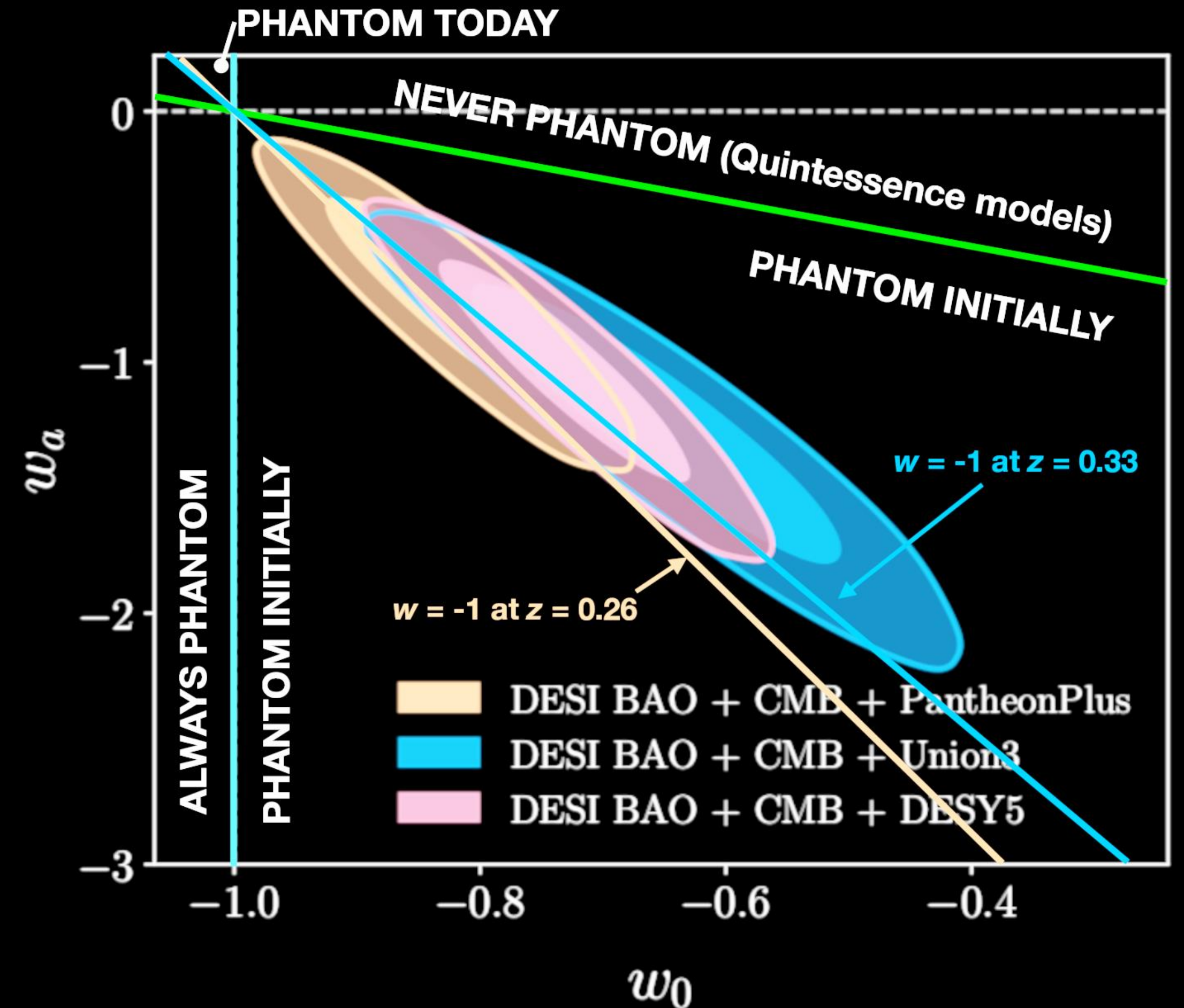
$$w = \frac{(1/2)\dot{\phi} - V(\phi)}{(1/2)\dot{\phi} + V(\phi)}$$

## DESI: Aprile 2024: indicazioni di una Dark Energy che varia con il tempo



Indicazioni di Dark Energy con equazione di stato negativa in una fase Iniziale dell'Universo: problema per scenari di Quintessenza

combinando DESI BAO con i dati di CMB e le supernovae di tipo Ia provenienti dal catalogo Pantheon-plus, da Union3 o dalle osservazioni quinquennali del Dark Energy Survey (DESy5) si ottiene una **significatività' del risultato: da  $2.5 \sigma$  a  $3.9 \sigma$**



$$w(a) = w_0 + w_a(1 - a)$$

$$w = \frac{(1/2)\dot{\phi} - V(\phi)}{(1/2)\dot{\phi} + V(\phi)}$$

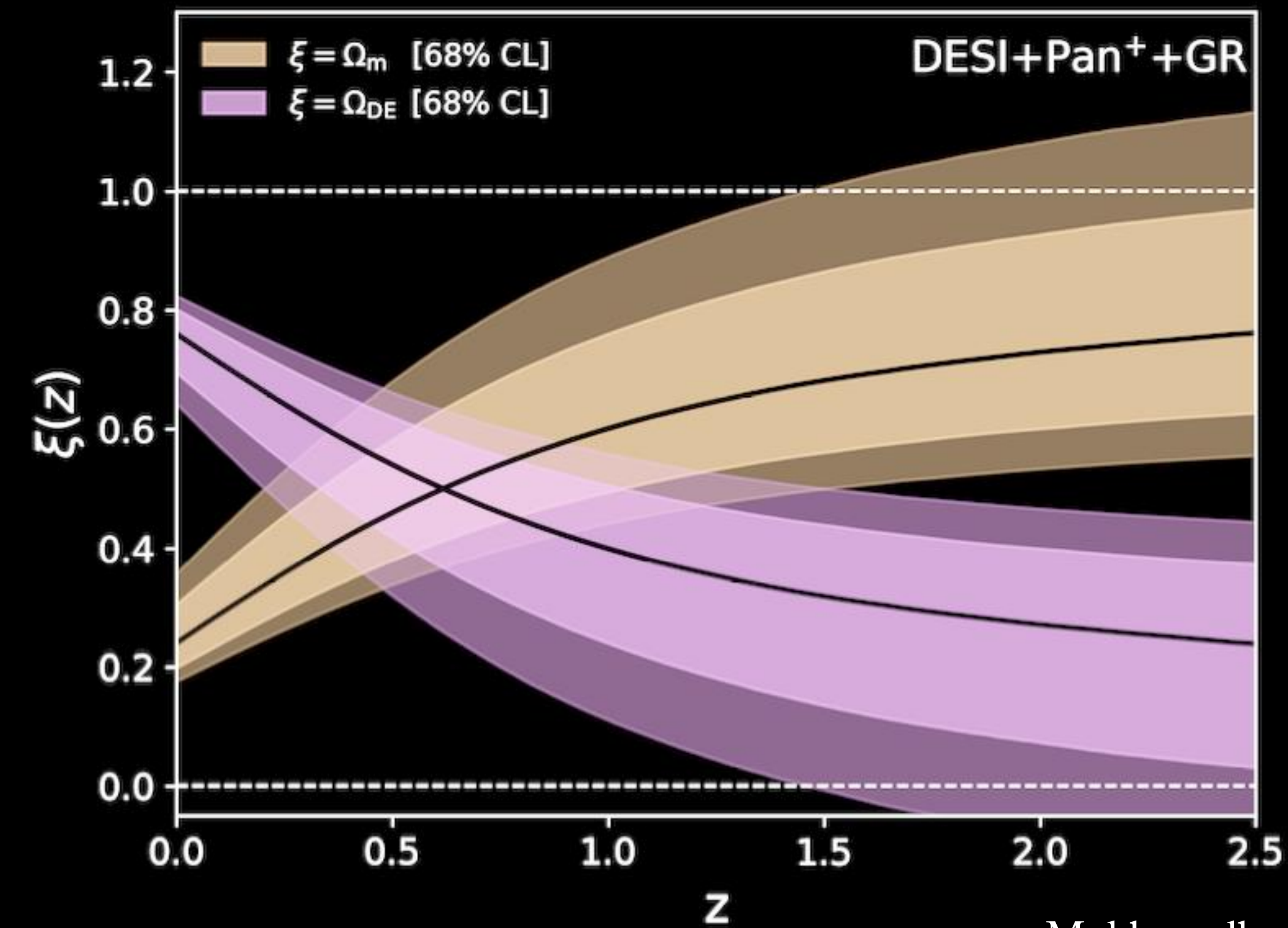
# Una possibile origine nella evoluzione della Dark Energy

$$A_z \equiv \frac{1}{(1+z)} \int_0^z \frac{dz}{E(z)}$$

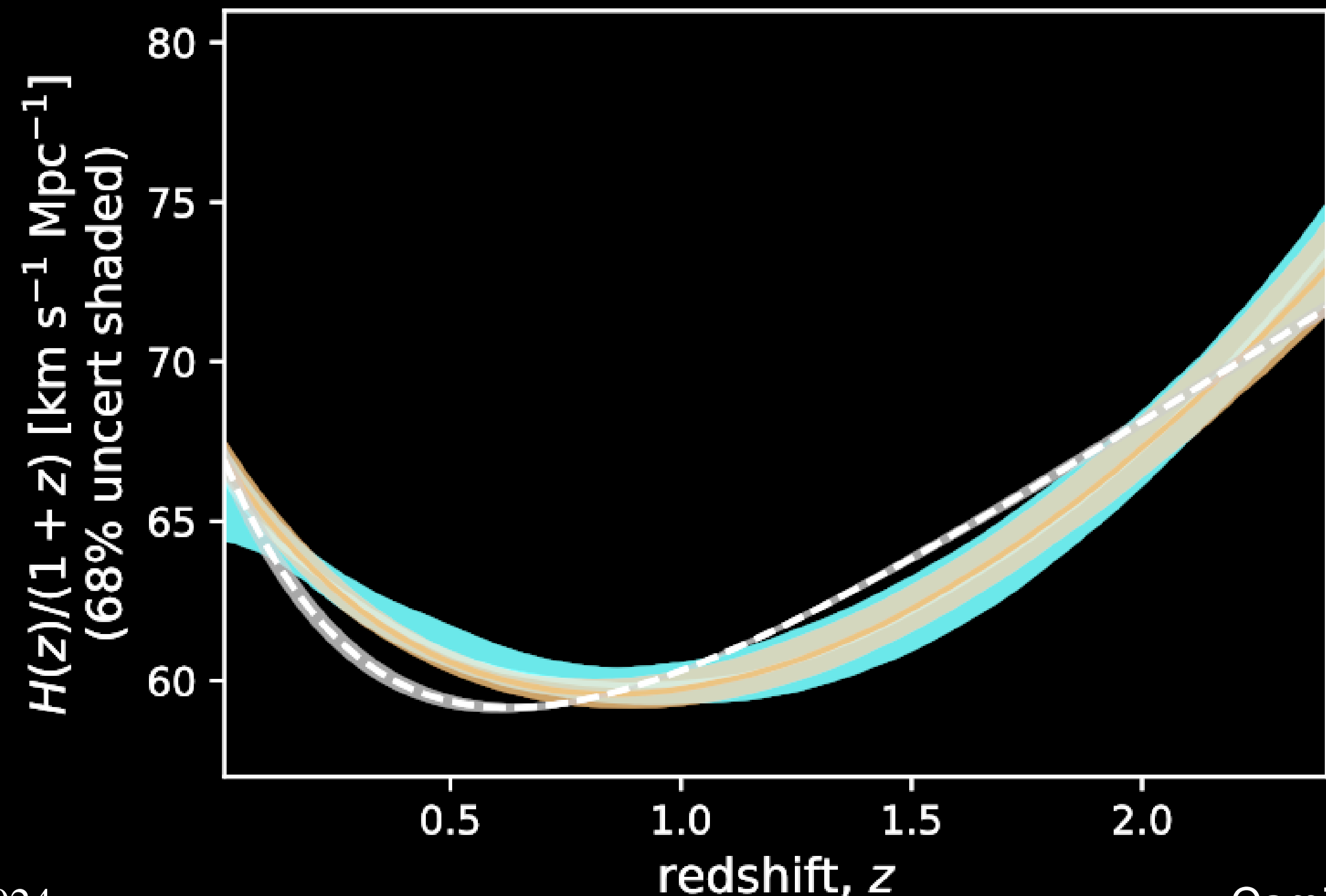
$$\theta = \frac{r_s}{D_A} \quad \begin{array}{l} \text{-Dimensione angolare primo picco CMB misurato} \\ \text{- } r_s \text{ dato} \end{array}$$

Osservazioni di  $A_z$  a diversi redshift permettono di vincolare la forma di  $E(z)$  e quindi la eventuale evoluzione della

$$D_A \propto \frac{c}{H_0} A_{rec}$$



Mukhopadhyay et al. 2024

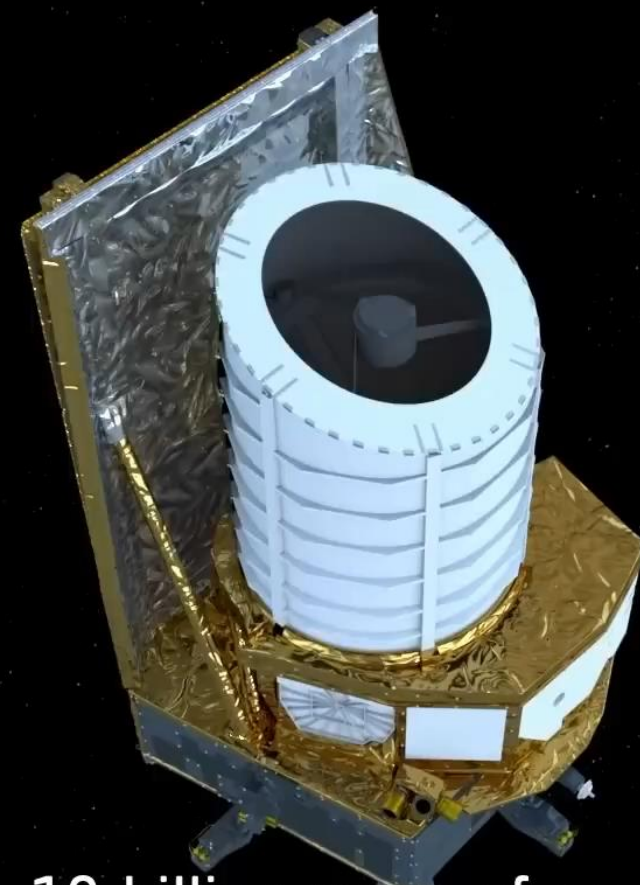
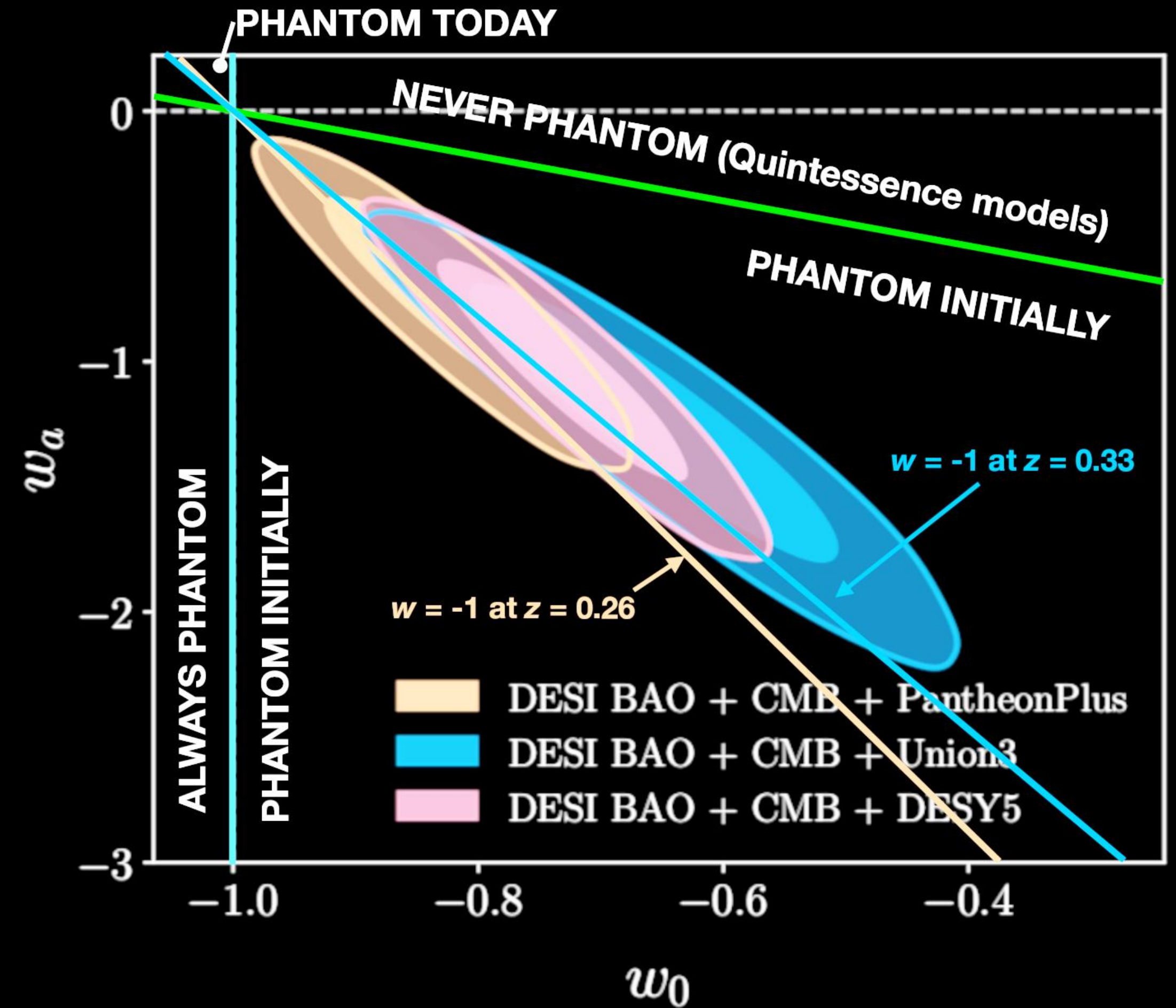


Camilleri et al. 2024

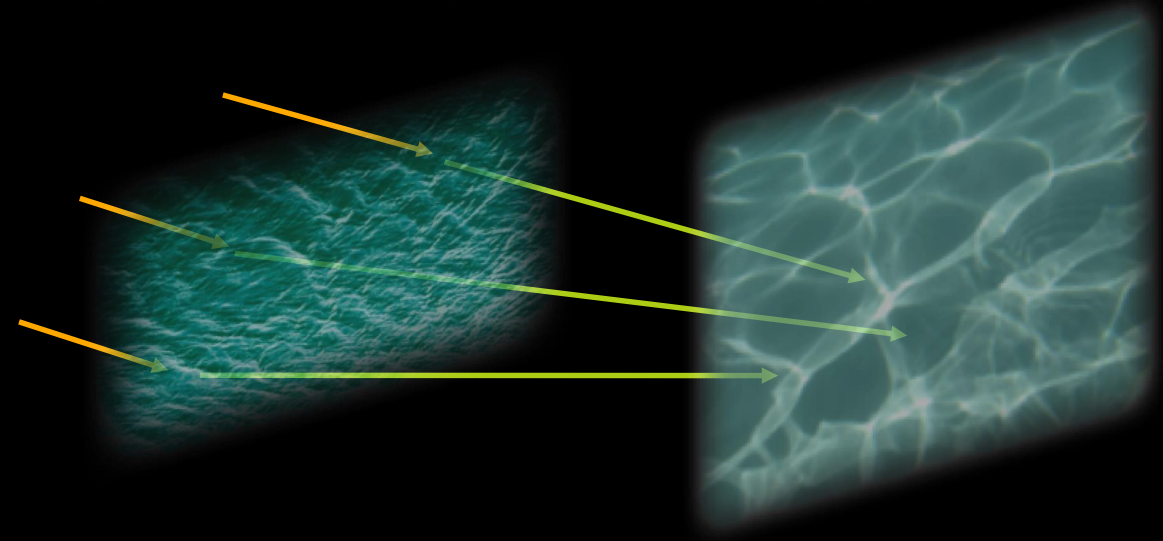
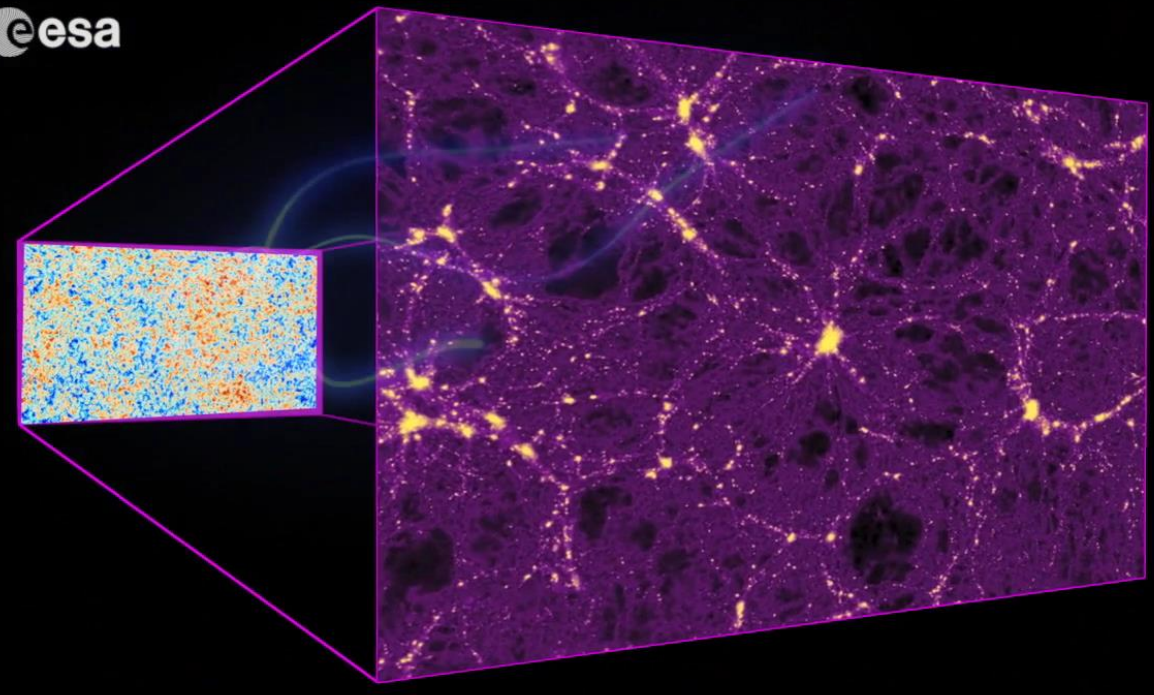
## Dark Energy con un comportamento inizialmente Phantom ( $w < -1$ )

### Phantom ( $w < -1$ )

- 1- Sarebbe in accordo con risultati DESI
- 2- Aiuterebbe a rendere meno grave la tensione sulle misure di  $H_0$
- 3- Favorirebbe la formazione precoce delle galassie



Euclid will examine 10 billion years of cosmic history



Cosmologia ci confronta con problemi legati al fondamento della realtà' fisica

Formazione di sistemi complesso e freccia del tempo sono ricondotte a ricondotta a Past Hypothesis

Richiede un Universo estremamente smooth all'inizio per evitare il collasso in BH  
Extreme fine tuning (*S. Carroll: Is not easy to pack a Universe smoothly inside a cubic cm*)

Il problema della differenza tra passato e futuro e' un problema di cosmologia (part Hypothesis)

Le strutture si formano nel transiente tra uno stato di bassa entropia iniziale e quello di alta entropia finale:  
Le leggi fisiche che conosciamo, in tali condizioni, permettono lo sviluppo di complessità

Natura del vuoto

Relazione tra meccanica quantistica e relatività' generale

Natura dello spazio e del tempo: sono quantità' fondamentali ?

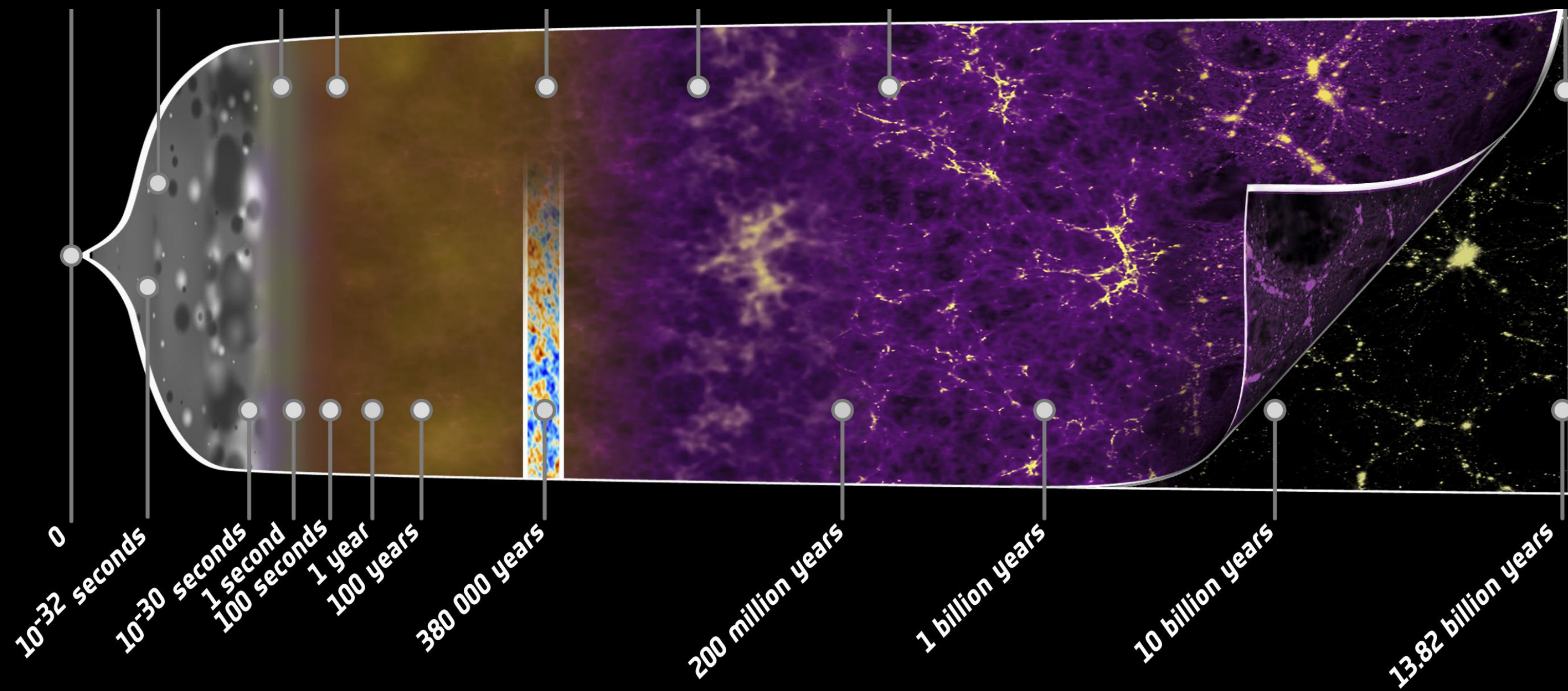
Multiverso - landscape di possibili leggi fisiche

Natura ultima della realtà'



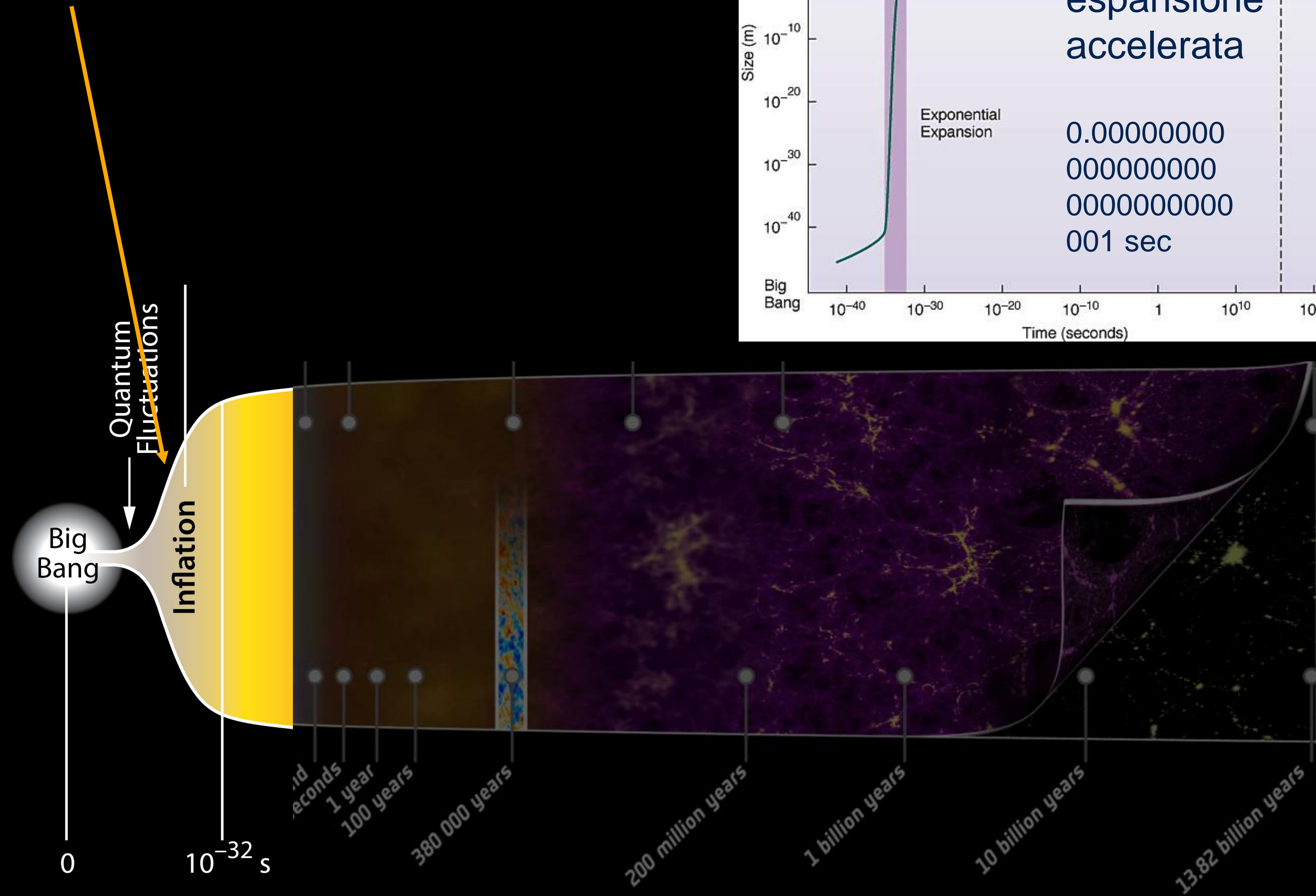
Cosa ha originato le perturbazioni di densita' ?

Cosa ha causato inizialmente l'espansione ?



Cosa ha causato inizialmente l'espansione ?

GRAVITA' REPULSIVA



THE EINSTEIN FIELD EQUATION

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

# Gravita' in Relativita'

Geometria

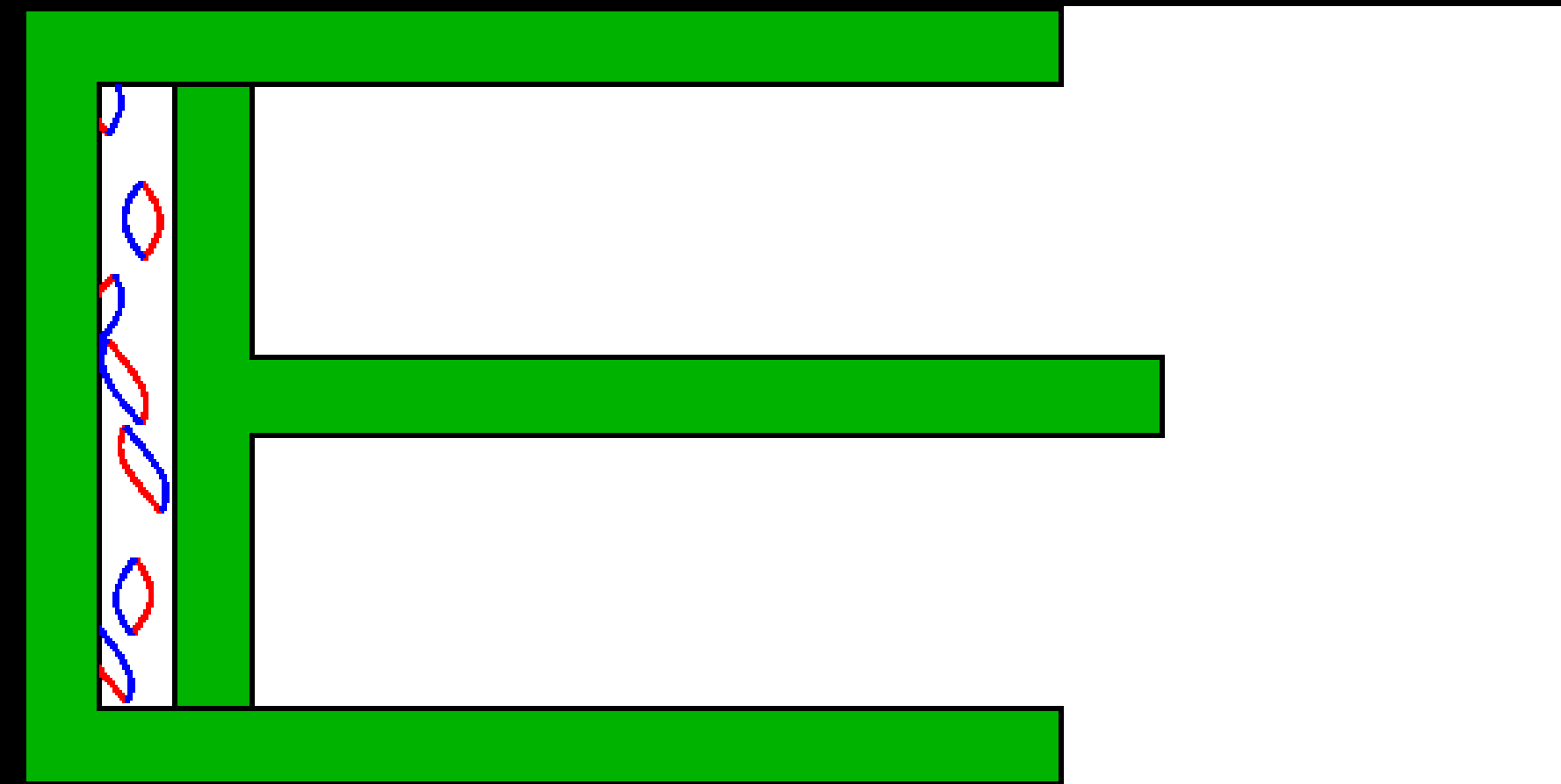
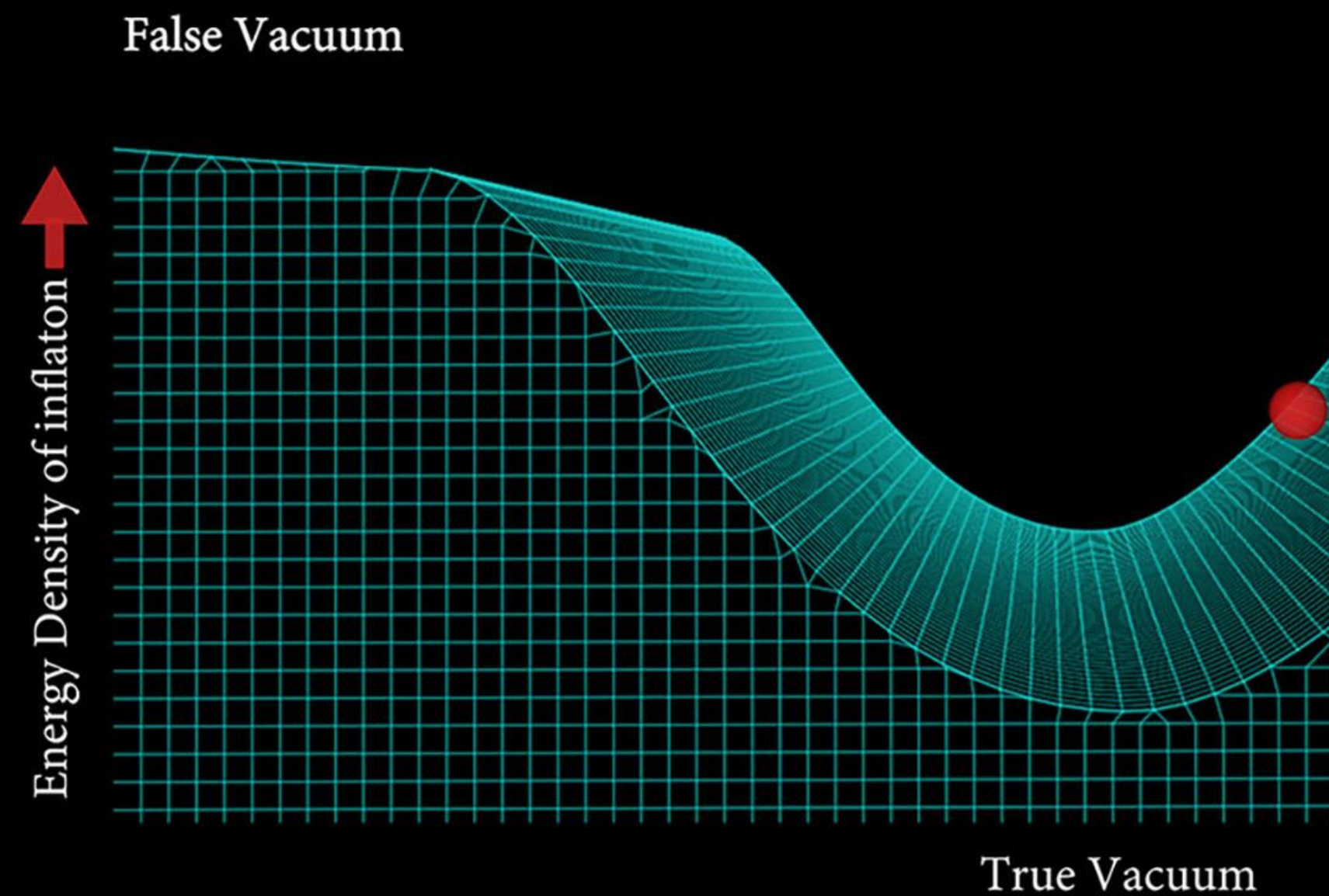
Contenuto  
di materia

+

En. associata allo  
stato di vuoto

## Condizioni di gravita' repulsiva

Lo spazio puo' sospingere la sua stessa ~~componente~~ ~~del vuoto~~ ~~contiene una~~ densita' di energia costante



In Meccanica Quantistica le particelle sono descritte come quanti (pacchetti) di energia di un particolare "campo" (elettroni, quark ...) che interagiscono tra loro, risultando - a livello macroscopico - nel mondo che percepiamo, similmente a come nel dipinto ci sono puntini di diversi colori la cui interazione nei nostri sensi risulta nella raffigurazione che percepiamo

mentre i puntini individualmente sono discreti (discontinui) il dipinto nel suo insieme e' continuo.

Le fluttuazioni quantistiche sono mutamenti temporanei dello stato di energia dello spazio vuoto.

L'indeterminazione quantistica permette l'apparizione dal nulla di piccole quantita' di energia a condizione che esse scompaiano in un tempo molto breve.



Seraut

*Un dimanche après-midi a  
l'île de la Grand Jatte*

Il vuoto e' caratterizzato da continue fluttuazioni di energia attorno ad un valore medio **Diverso da zero (inflazione, espansione accelerata)**  
**Nulla (fine inflazione, espansione decelerata)**

- Energia del vuoto (insorgere dell'inflazione)
- Fluttuazioni di energia su scala microscopica (0.0001 cm)

Le fluttuazioni quantistiche sono mutamenti temporanei dello stato di energia dello spazio vuoto.  
L'indeterminazione quantistica permette l'apparizione dal nulla di piccole quantita' di energia a condizione che esse scompaiano in un tempo molto breve.

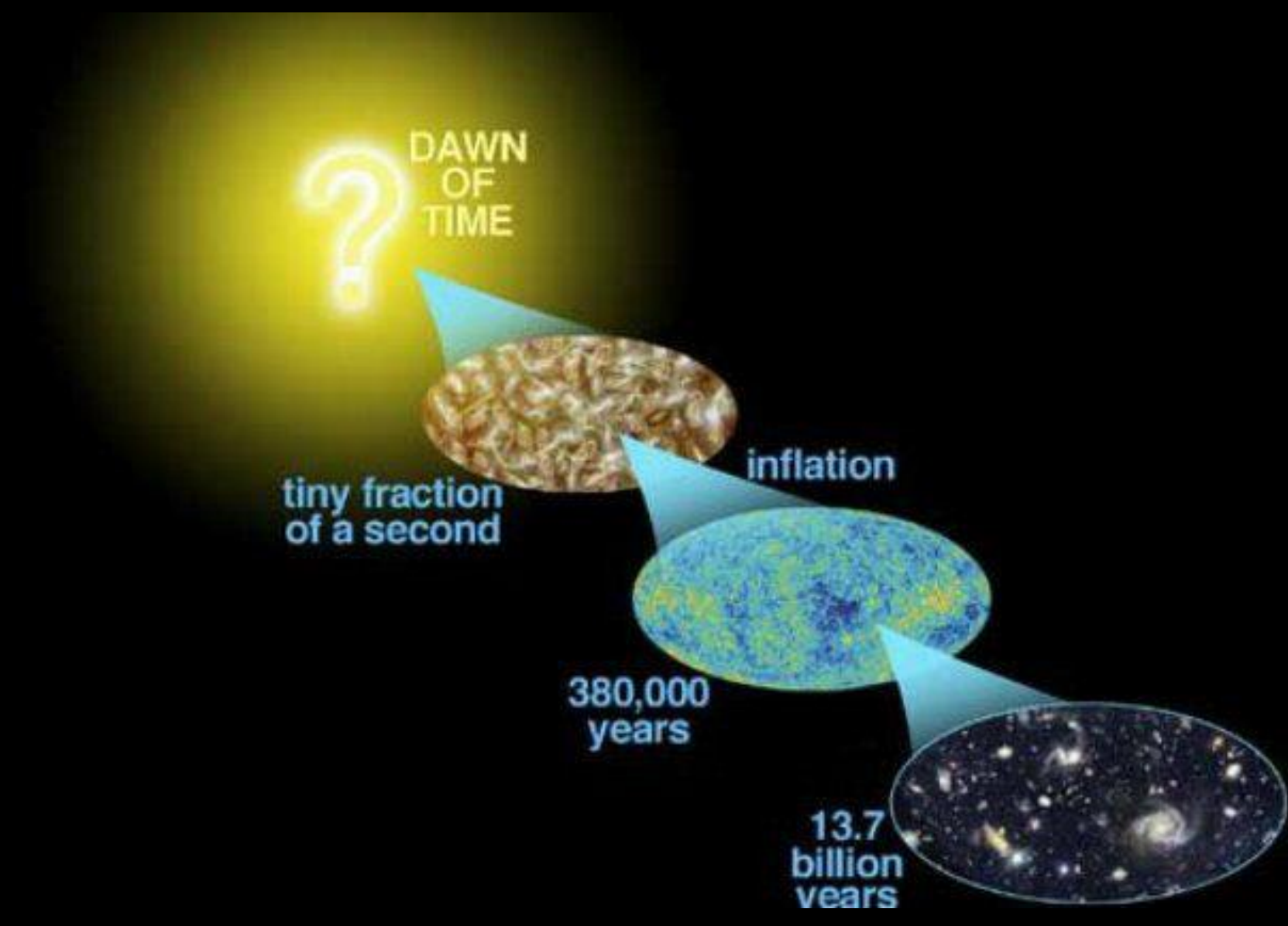
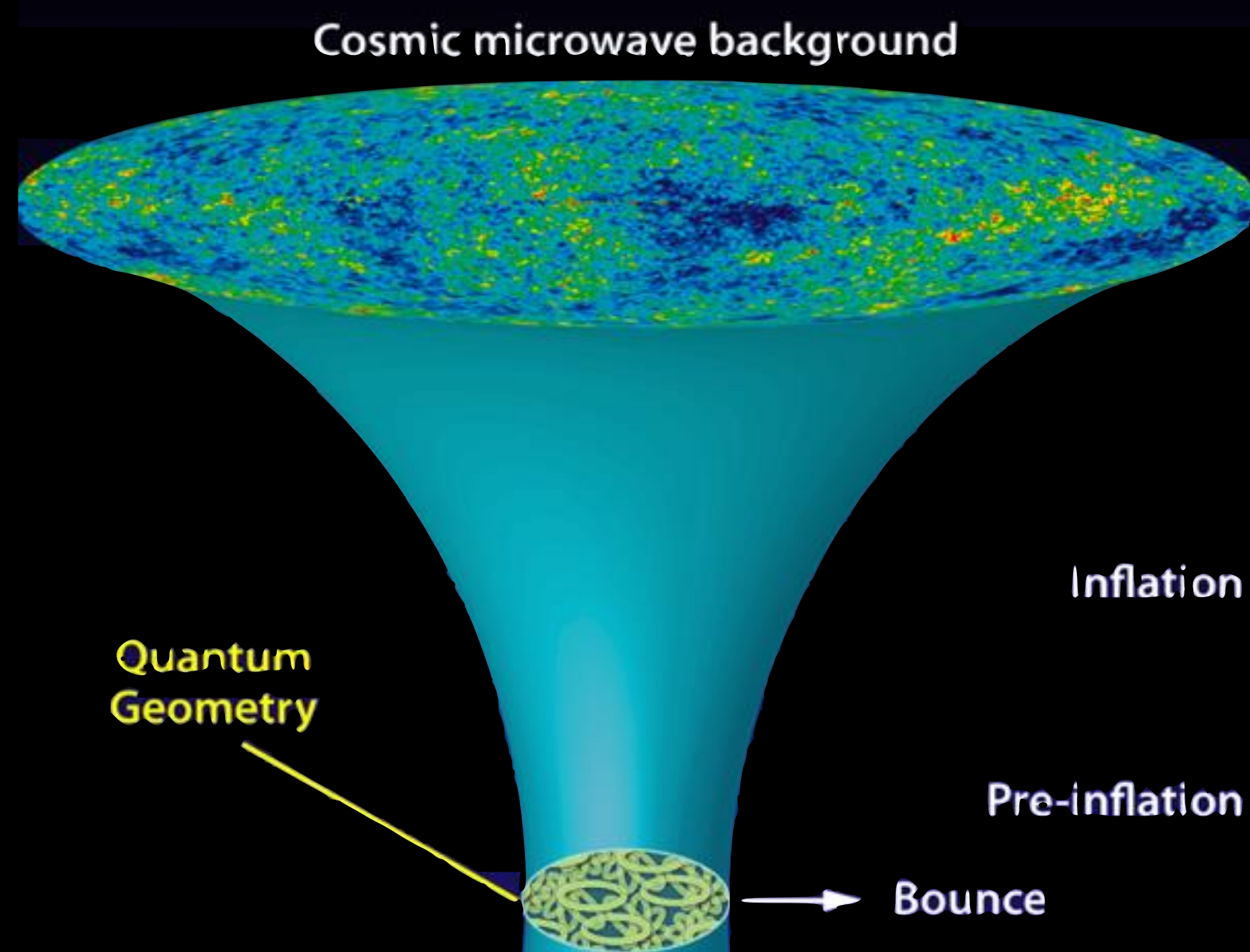


Il vuoto e' caratterizzato da continue fluttuazioni di energia attorno ad un valore medio **Diverso da zero (inflazione, espansione accelerata)**  
**Nulla (fine inflazione, espansione decelerata)**

- Energia del vuoto (insorgere dell'inflazione)
- Fluttuazioni di energia su scala microscopica (0.0000000000000000000000000000000000000001 cm)

quark ...)che interag

se scompaiano in u



Il vuoto e' caratterizzato da continue fluttuazioni di energia  
 attorno ad un valore medio **Diverso da zero (inflazione, espansione accelerata)**  
**Nulla (fine inflazione, espansione decelerata)**

- Energia del vuoto (insorgere dell'inflazione)

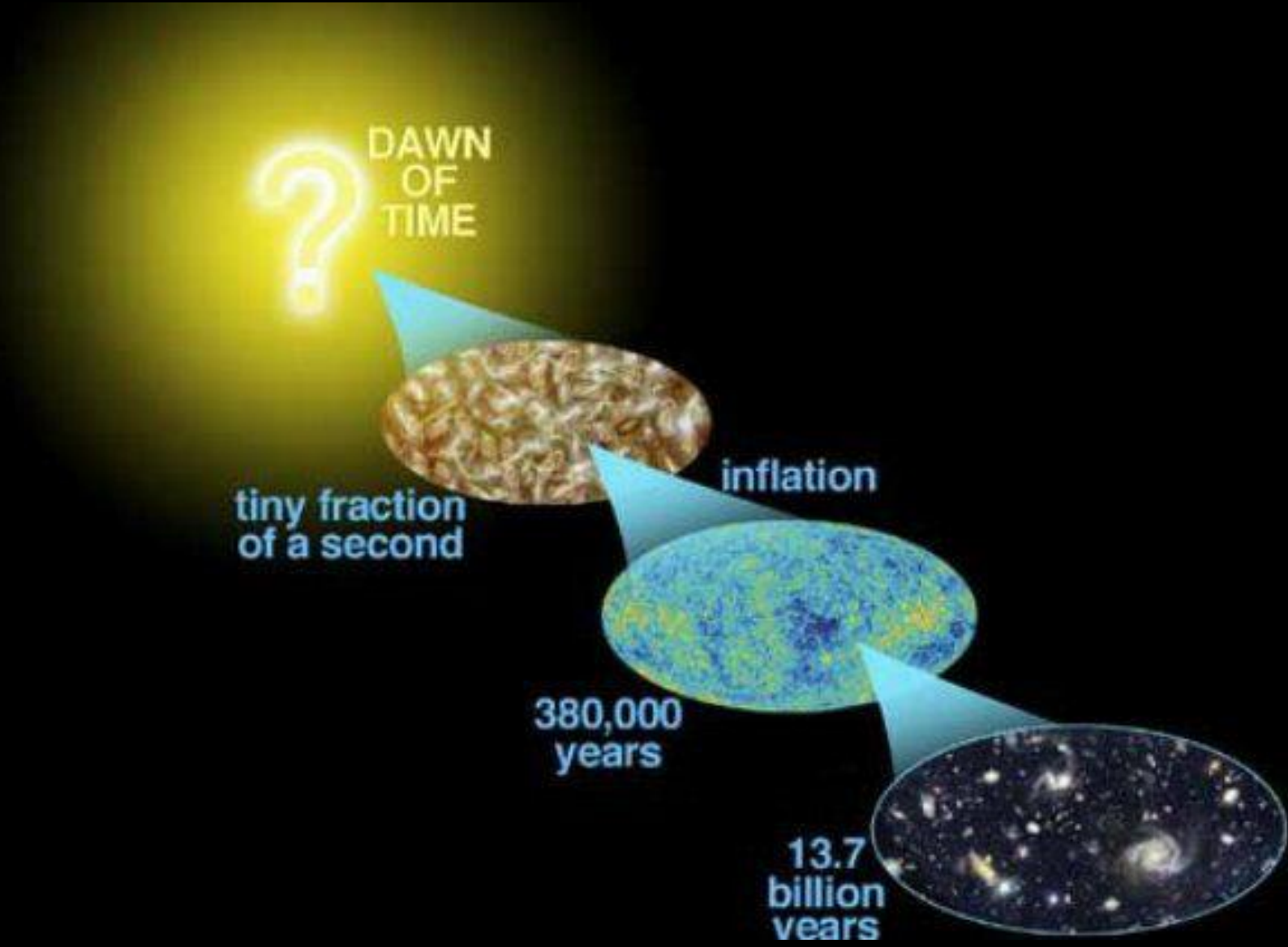
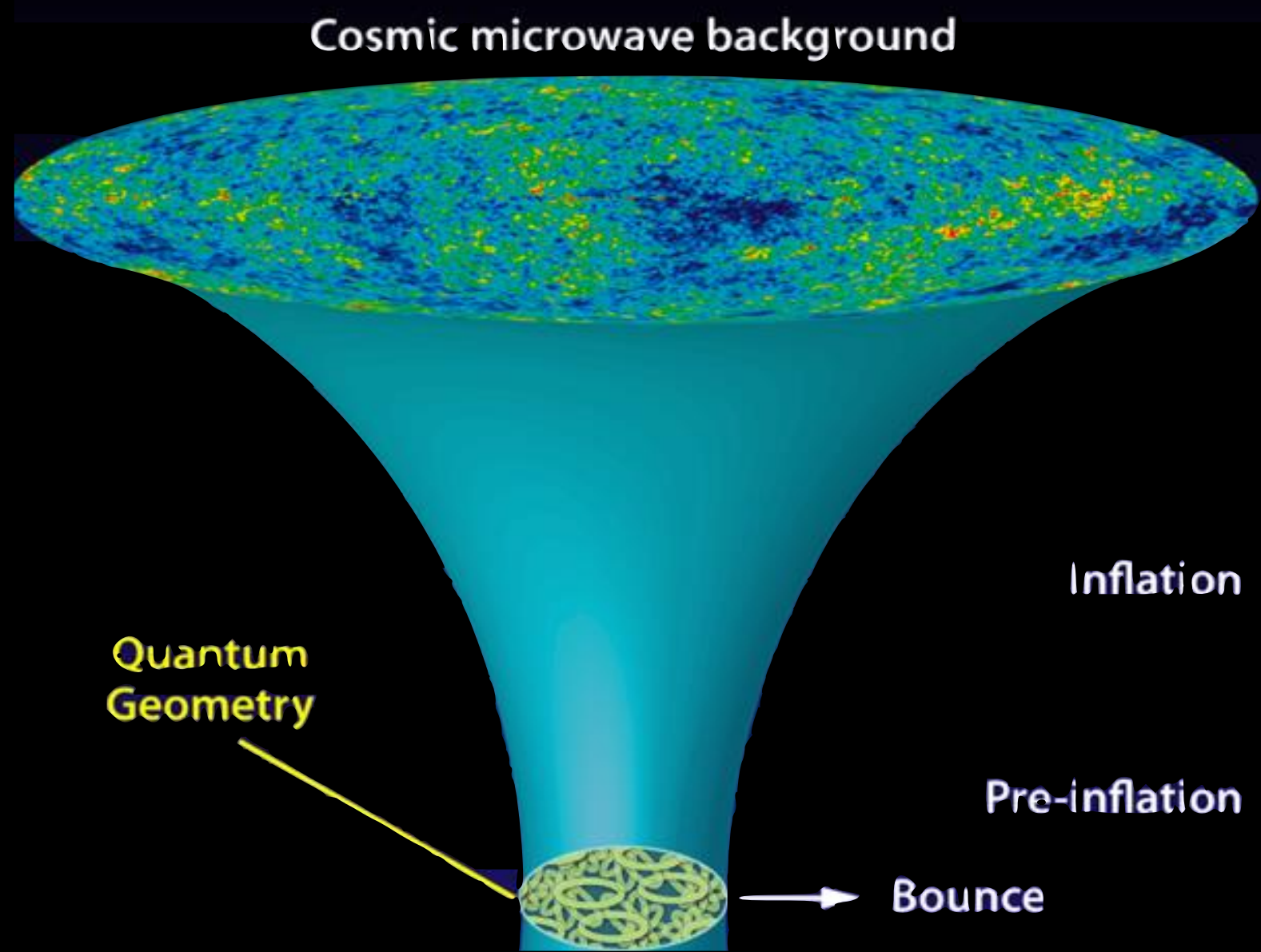
Fluttuazioni di energia su scala microscopica  
 (0.0000000000000000000000000000000000000001 cm)

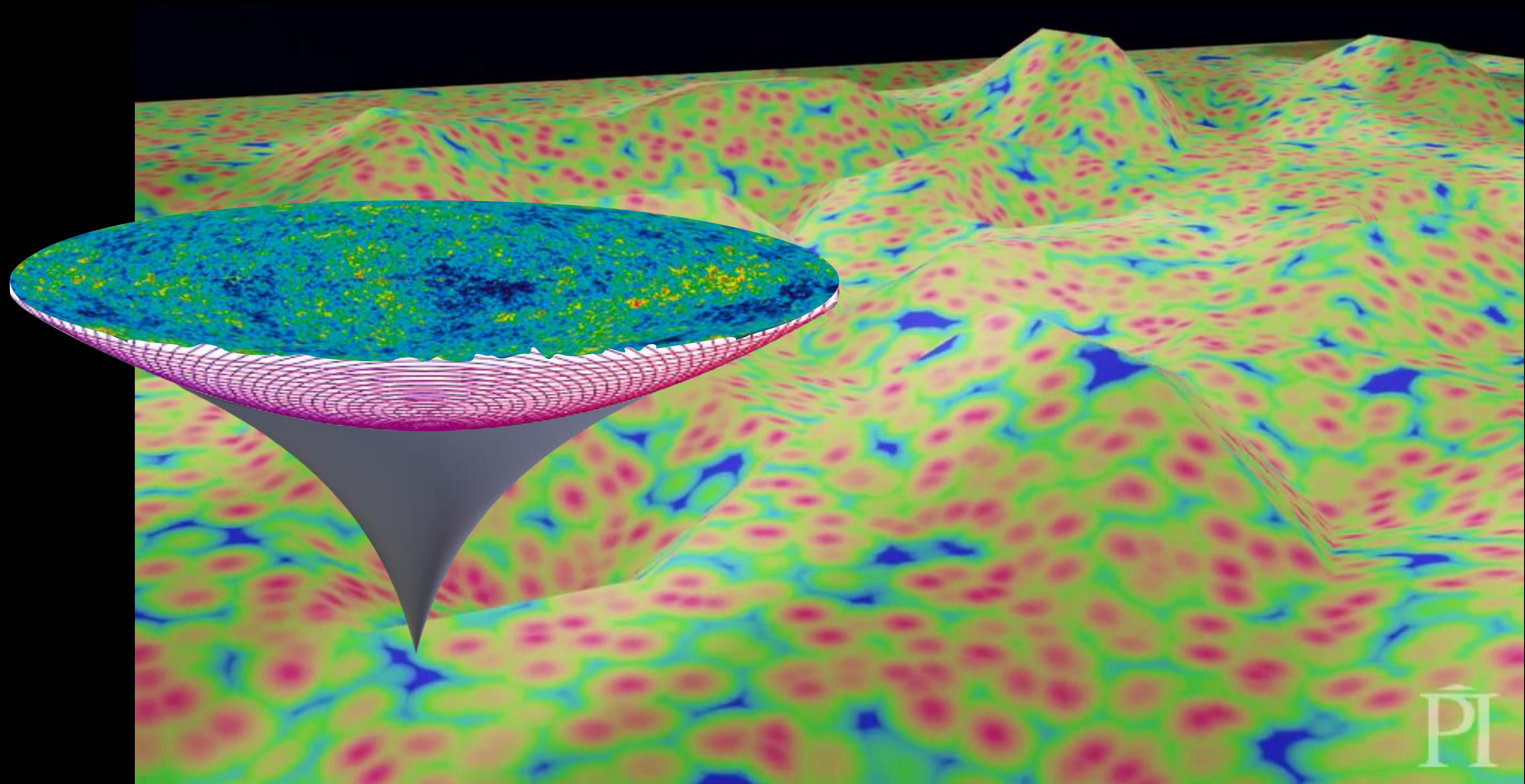
quark ...)che interag

Origine dell'Espansione

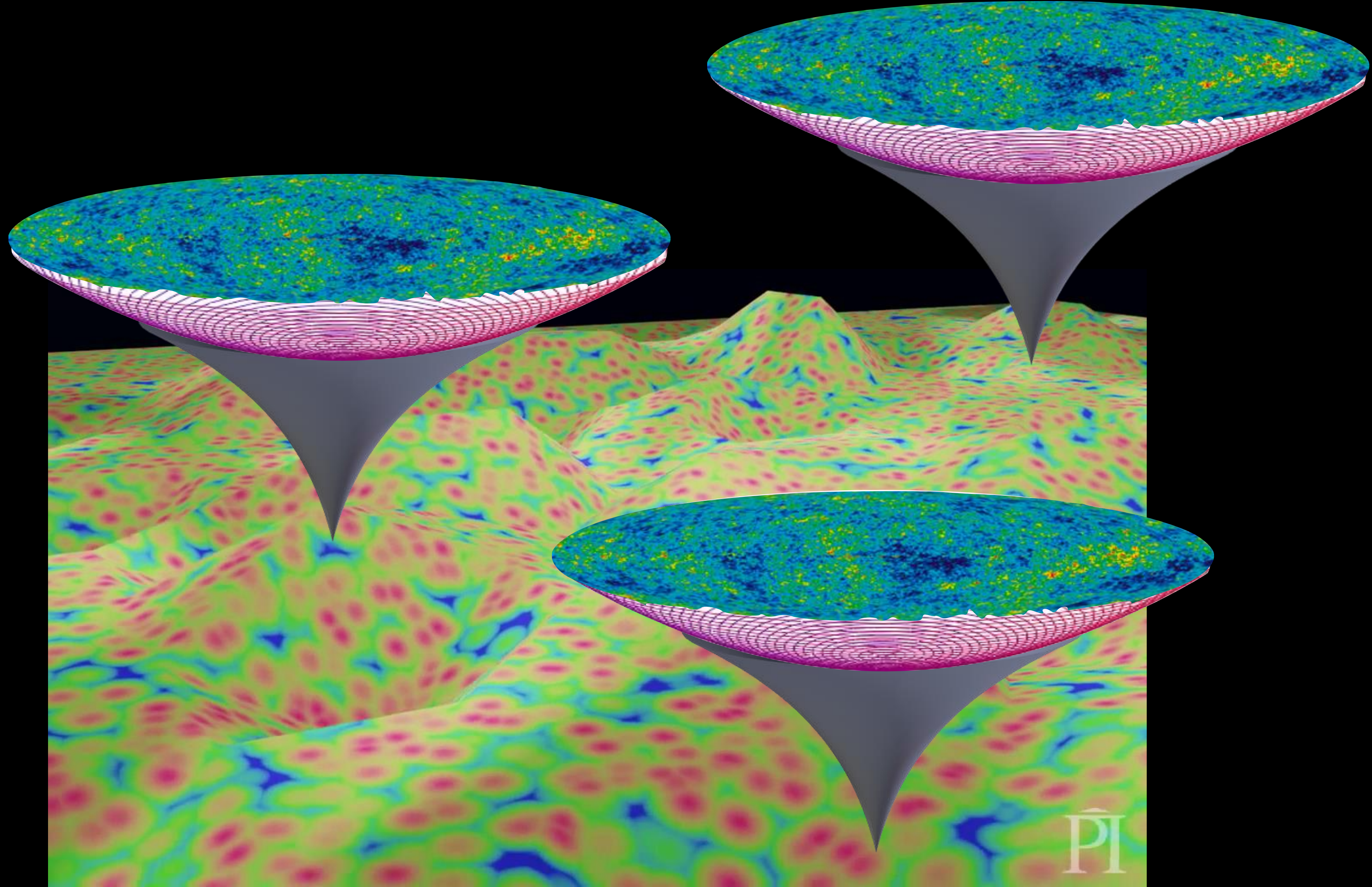
Origine delle Galassie

se scompaiano in u









## Inflazione: slow roll

$$a \propto \exp(\sqrt{(8\pi/3c^2)V})$$

$$H = \sqrt{(8\pi/3)GV(\phi)}$$

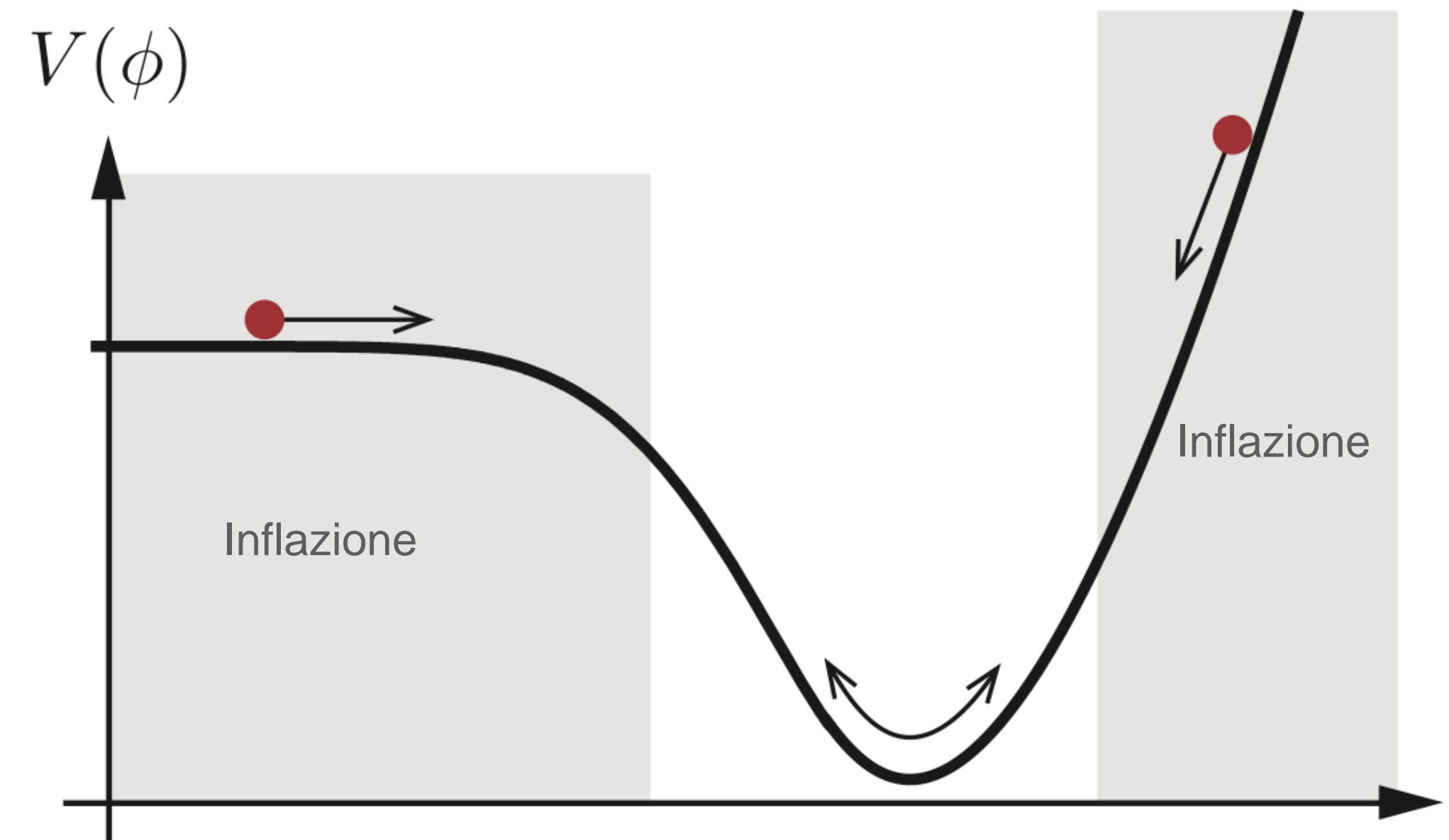
$$3H\dot{\phi} = -V'(\phi)$$

Il potenziale deve essere tale che i slow roll parameters

$$\epsilon \text{ e } \eta \ll 1$$

$$\epsilon = \frac{1}{16\pi G} \left(\frac{V'}{V}\right)^2$$

$$\eta = \frac{1}{8\pi G} \left(\frac{V''}{V}\right)$$



$$N = \ln \frac{a(t_{\text{end}})}{a(t_i)} = \int_{t_i}^{t_{\text{end}}} dt H(t)$$

$$dt = \dot{\phi}^{-1} d\phi$$

$$\dot{\phi}^{-1} = \frac{3H}{V'}$$

$$N = 8\pi G \int_{\phi_i}^{\phi_f} d\phi \frac{V}{V'}$$

vincolo su forma del Potenziale

Un grande numero di e-folds  $N$  può essere ottenuto per  $\epsilon$  sufficientemente piccolo

