

# La historia termica del Universo

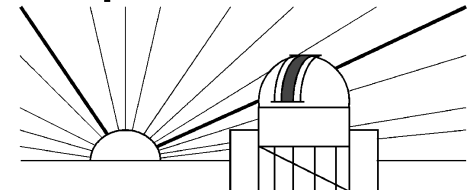
---

Dr. Alexander Knebe

La historia termica del Universo

- introduccion
- la era de la radiacion
- la era de la materia
- formacion de estructuras
- cosmologica computacional

**Grupo de Astrofísica**



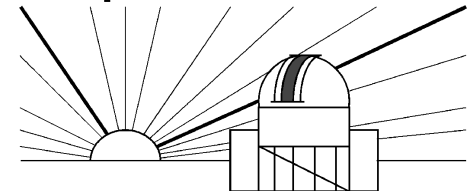
Universidad Autónoma de Madrid

# La historia termica del Universo

Dr. Alexander Knebe

*termica!?*

- *introduccion*
- la era de la radiacion
- la era de la materia
- formacion de estructuras
- cosmologica computacional



# Introducción

---

- 2 hechos observacionales sobre el Universo:

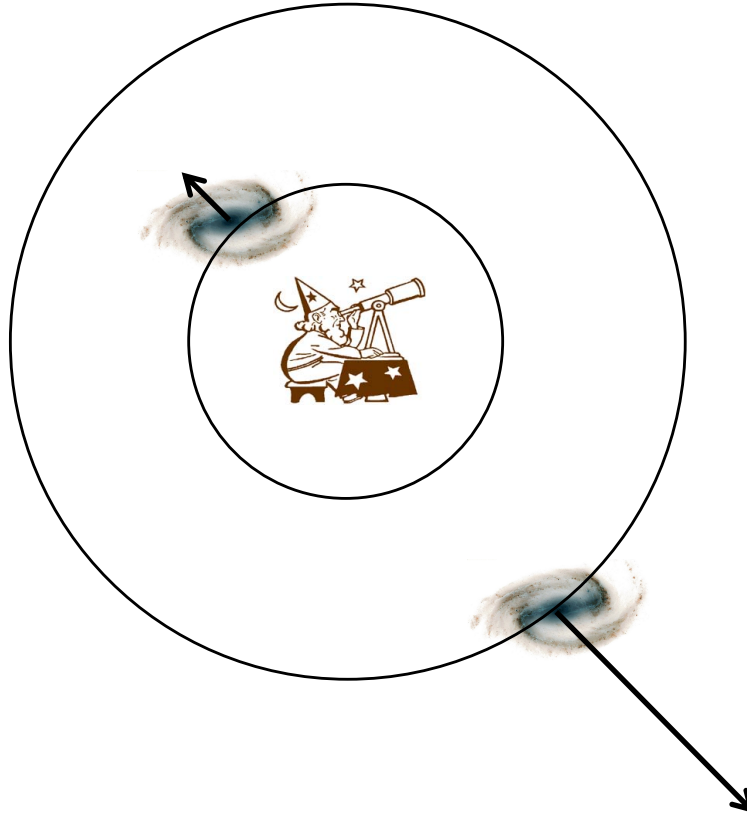
# Introducción

---

- 2 hechos observacionales sobre el Universo:

Vesto Slipher (1916):

*galaxias en nuestra proximidad estan volando atras*



# Introduccion

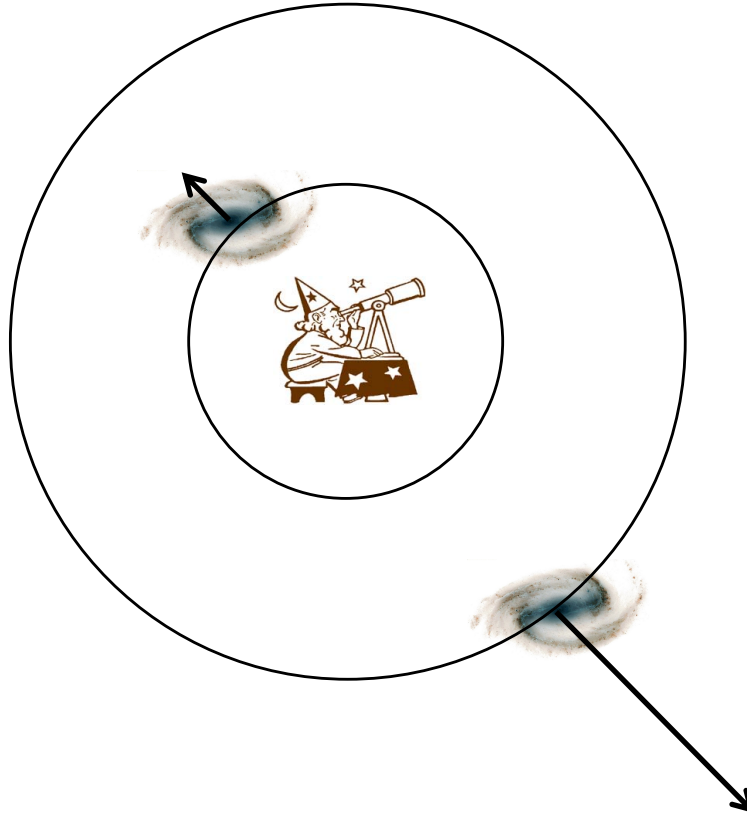
- 2 hechos observacionales sobre el Universo:

Vesto Slipher (1916):

*galaxias en nuestra proximidad estan volando atras*

Penzias & Wilson (1965):

*hay una radiacion isotropa alrededor*



# Introduccion

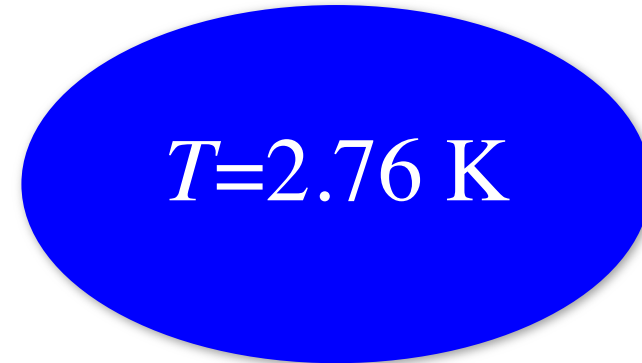
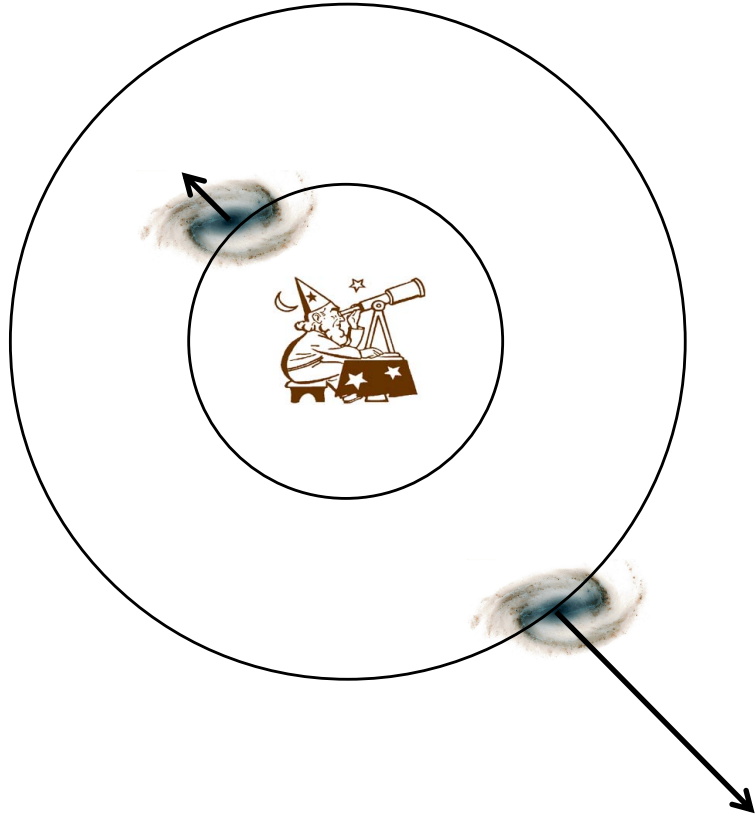
- 2 hechos observacionales sobre el Universo:

Vesto Slipher (1916):

*galaxias en nuestra proximidad estan volando atras*

Penzias & Wilson (1965):

*hay una radiacion isotropa alrededor*



→ el Universo se esta expandiendo...

# Introducción

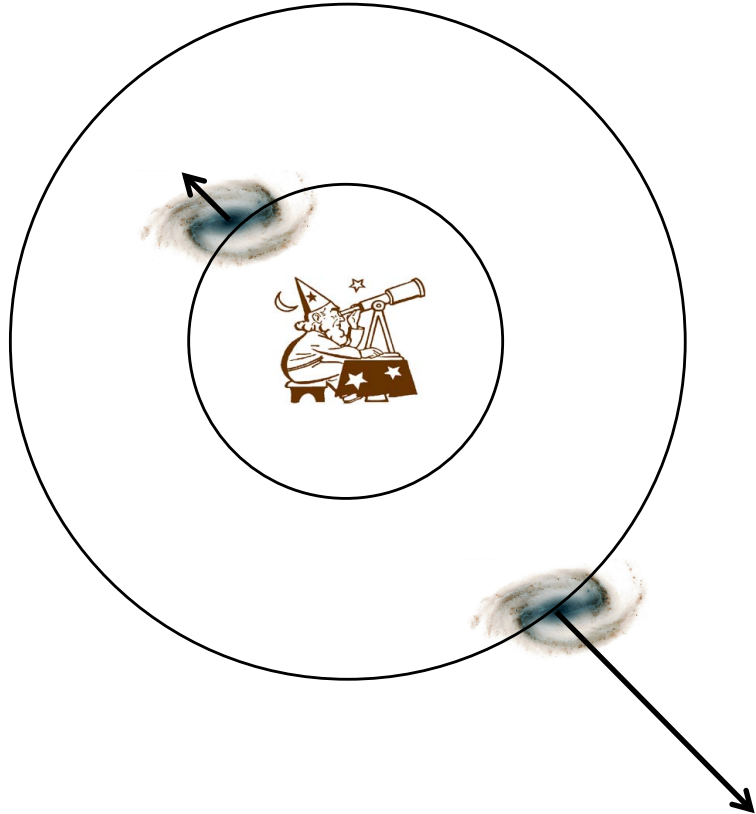
- 2 hechos observacionales sobre el Universo:

Vesto Slipher (1916):

*galaxias en nuestra proximidad están volando atrás*

Penzias & Wilson (1965):

*hay una radiación isotrópica alrededor*



→ el Universo se está expandiendo...y tenía que ser más caliente antes!

# Introduccion

- 2 hechos observacionales sobre el Universo:

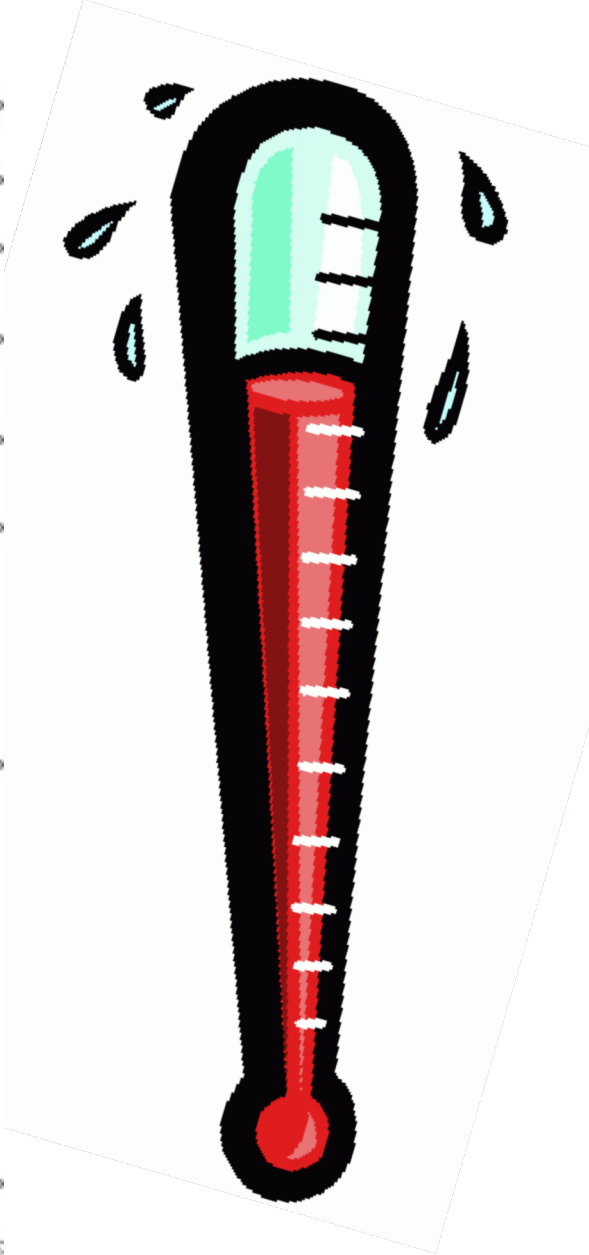
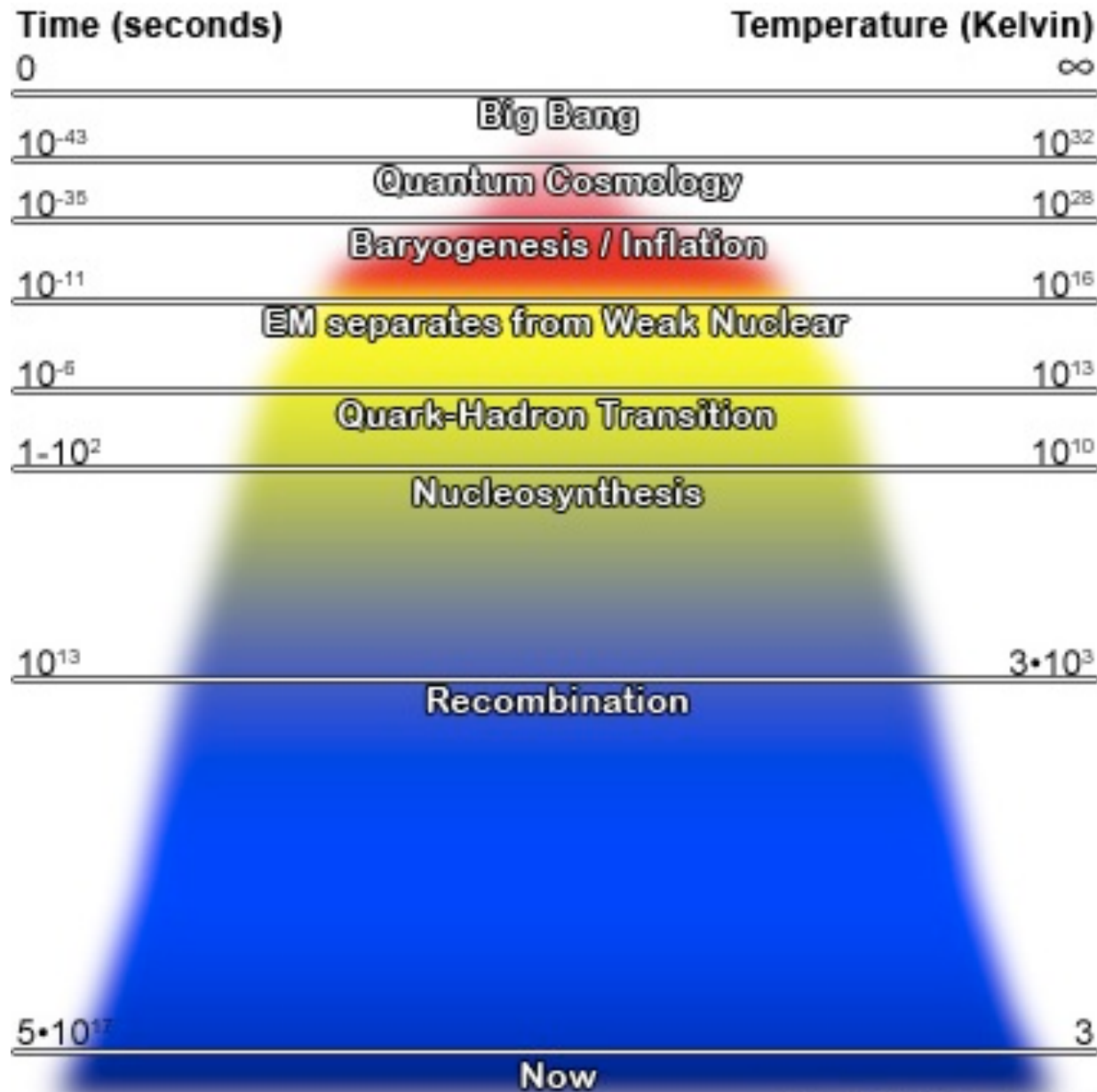


*Hot  
Big  
Bang  
Model*

→ el Universo se esta expandiendo...y tenia que ser mas caliente antes!

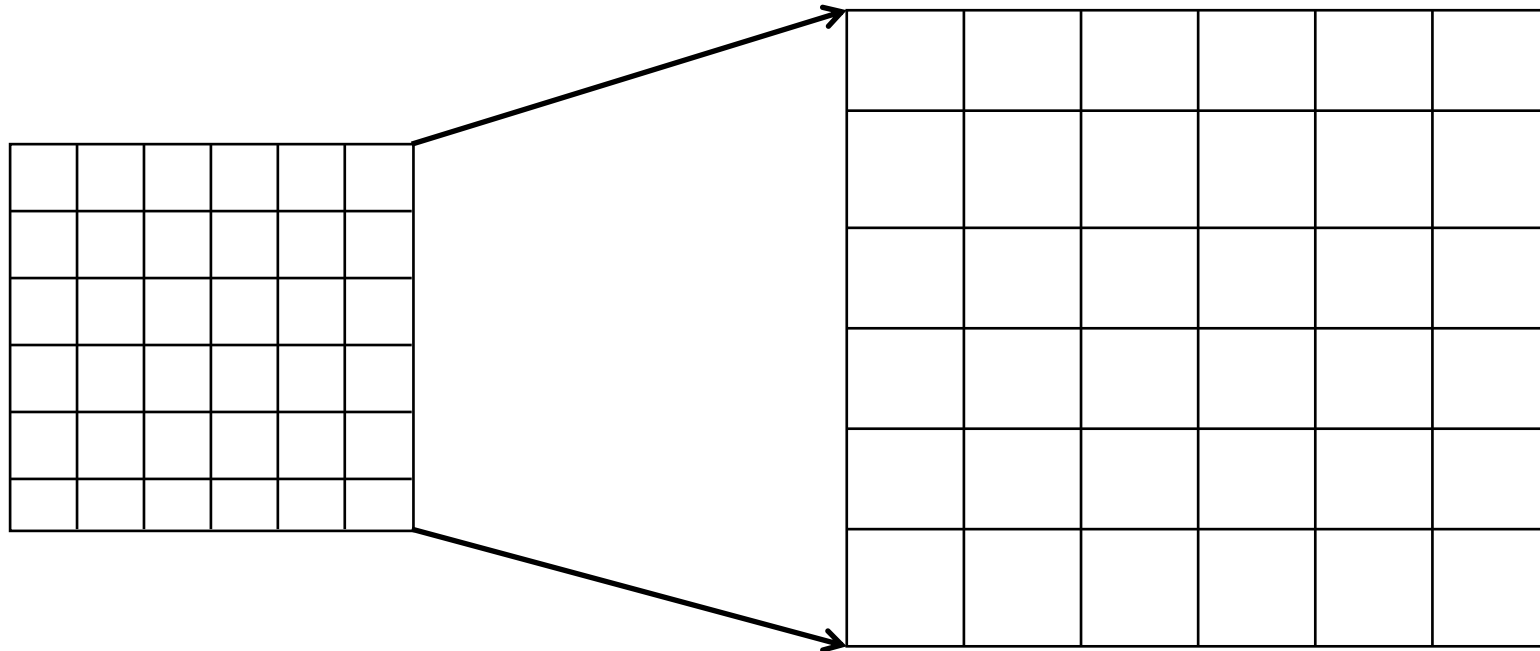
# Introduccion

La historia termica del Universo



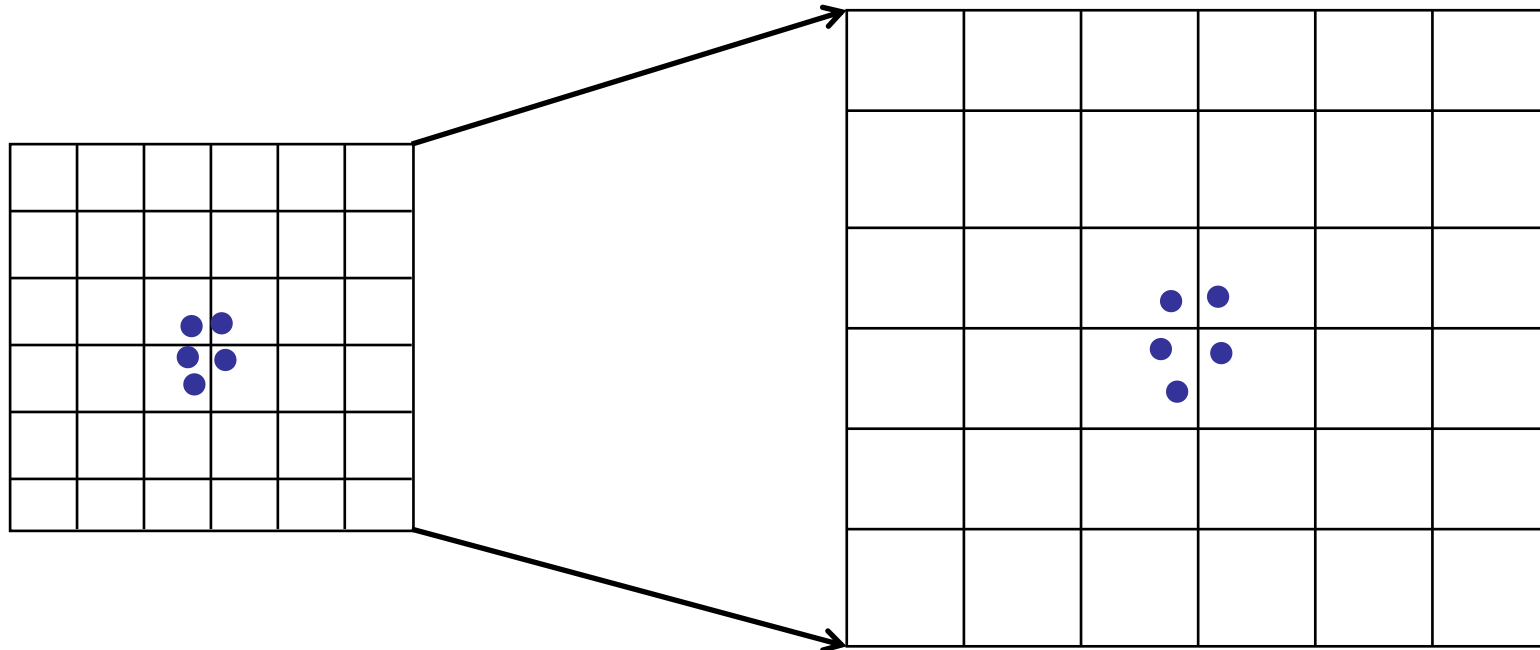
# Introducción

- radiación vs. materia en un espacio en expansión:



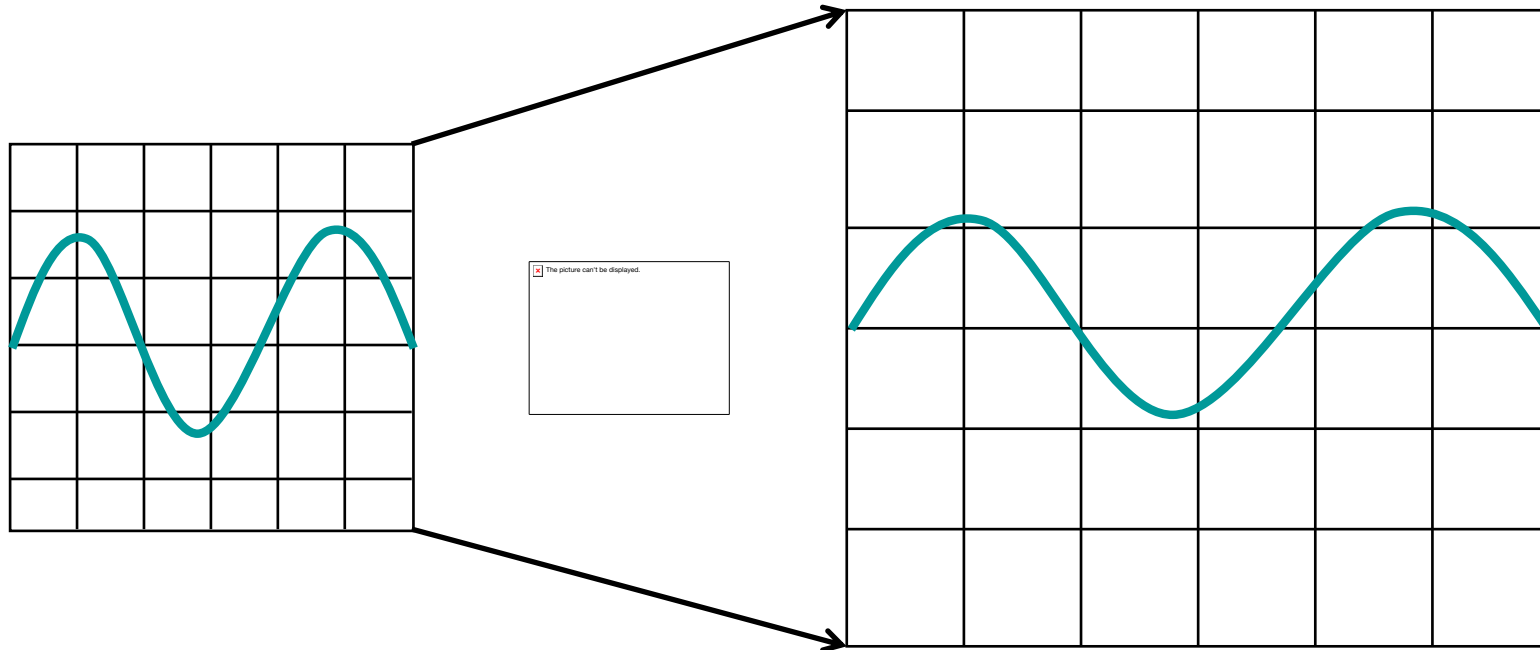
# Introducción

- radiación vs. materia en un espacio en expansión:
  - la densidad de la materia cae cuando el espacio se expande



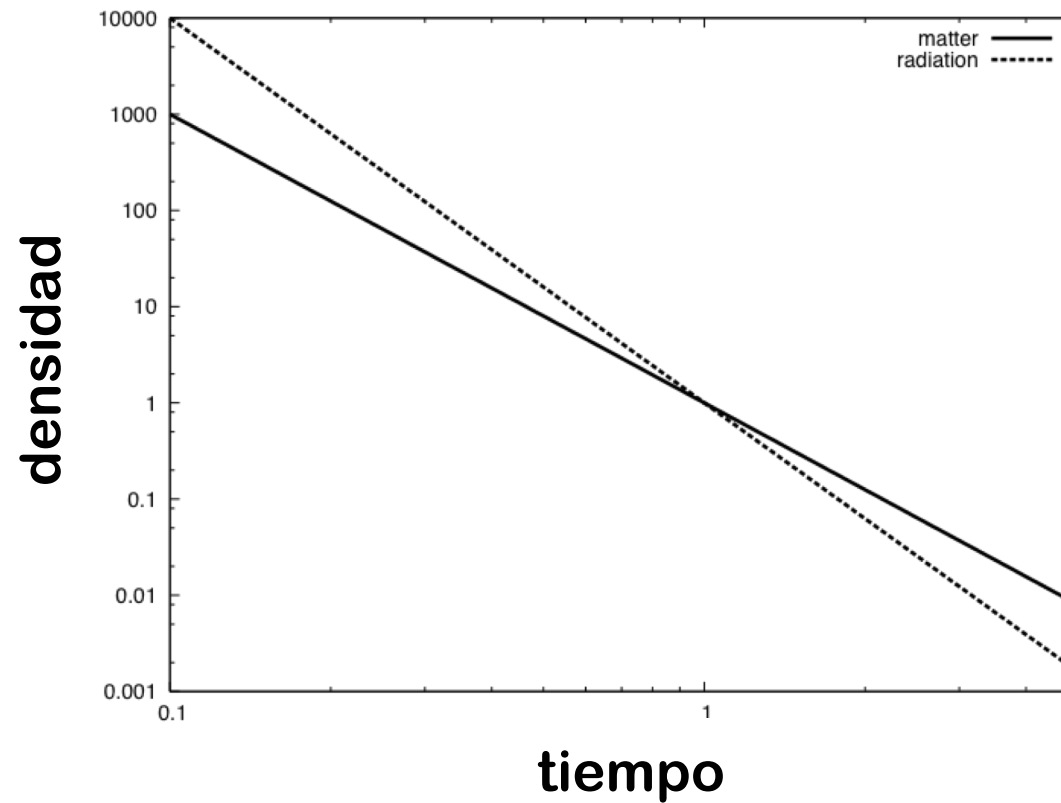
# Introduccion

- **radiacion vs. materia en un espacio en expansion:**
  - la densidad de la materia cae cuando el espacio se expande
  - la densidad de la radiacion cae mas rapido proque la onda se estira tambien



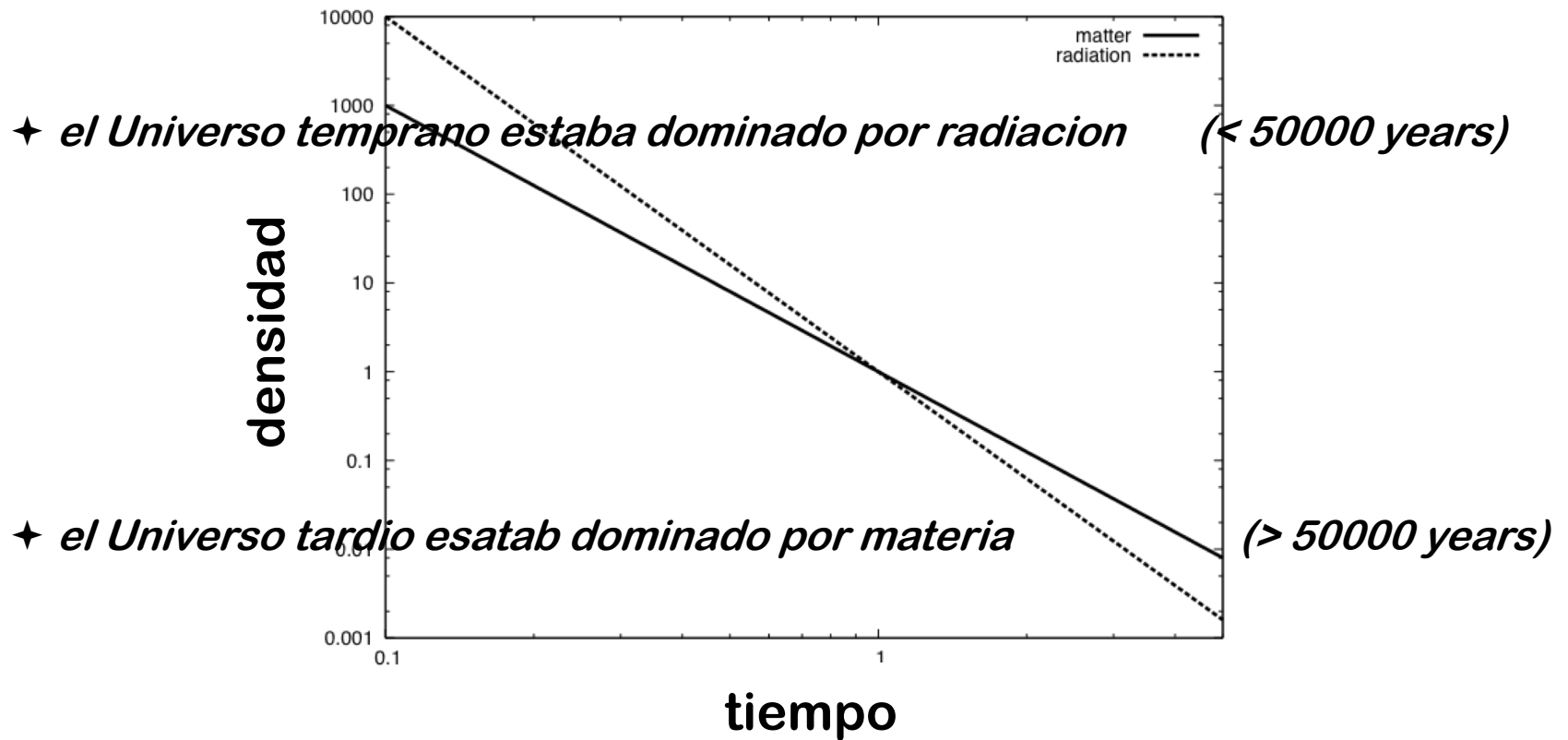
# Introduccion

- radiacion vs. materia en un espacio en expansion:
  - la densidad de la materia cae cuando el espacio se expande
  - la densidad de la radiacion cae mas rapido proque la onda se estira tambien



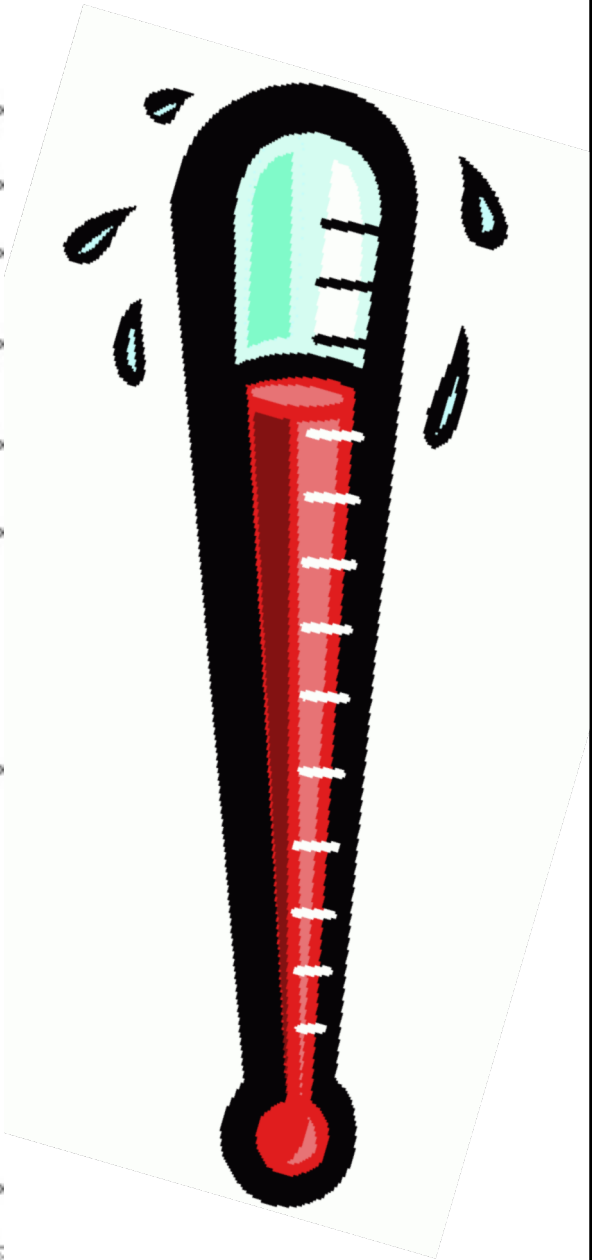
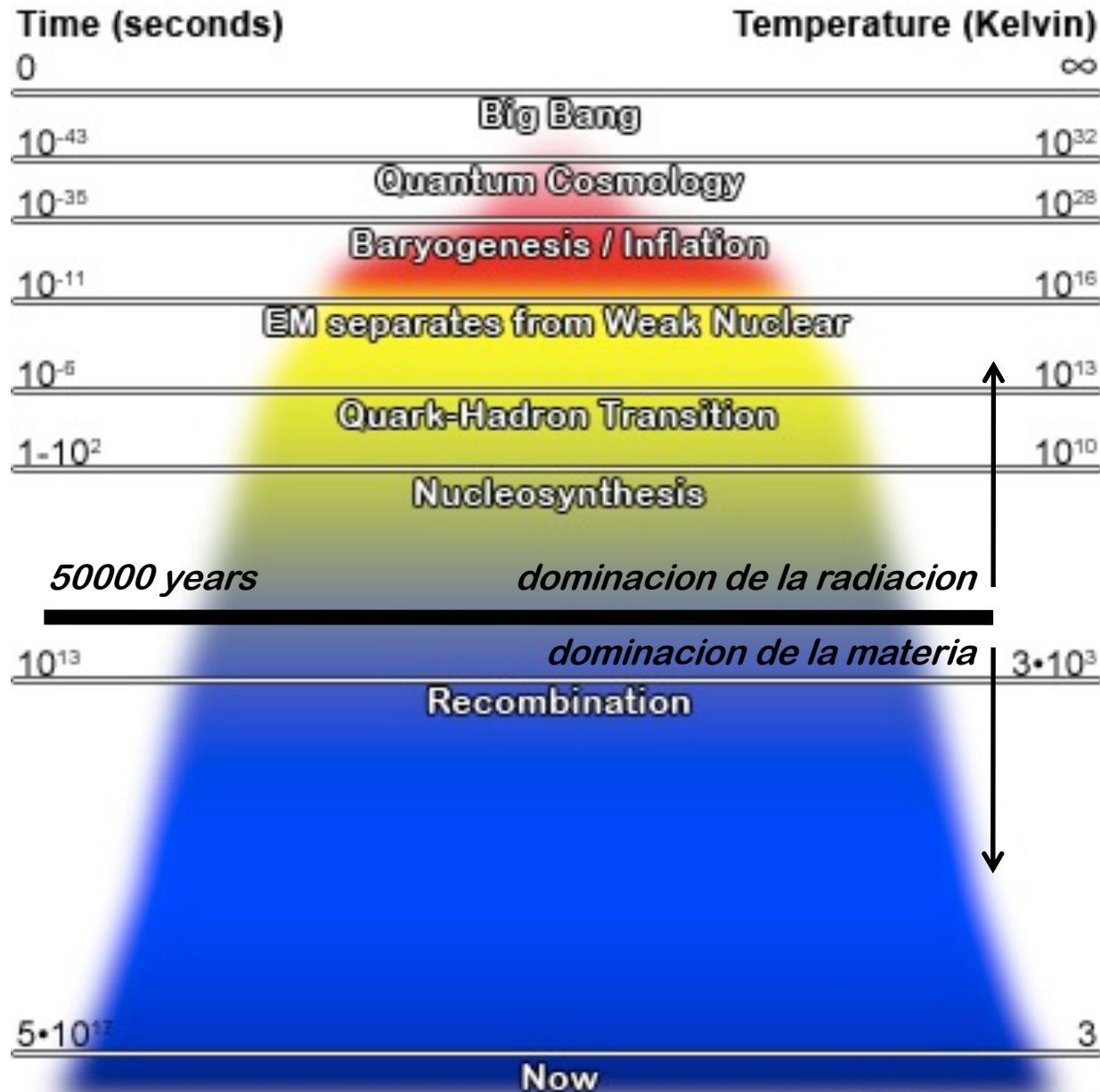
# Introduccion

- radiacion vs. materia en un espacio en expansion:
  - la densidad de la materia cae cuando el espacio se expande
  - la densidad de la radiacion cae mas rapido proque la onda se estira tambien



# Introduccion

La historia termica del Universo



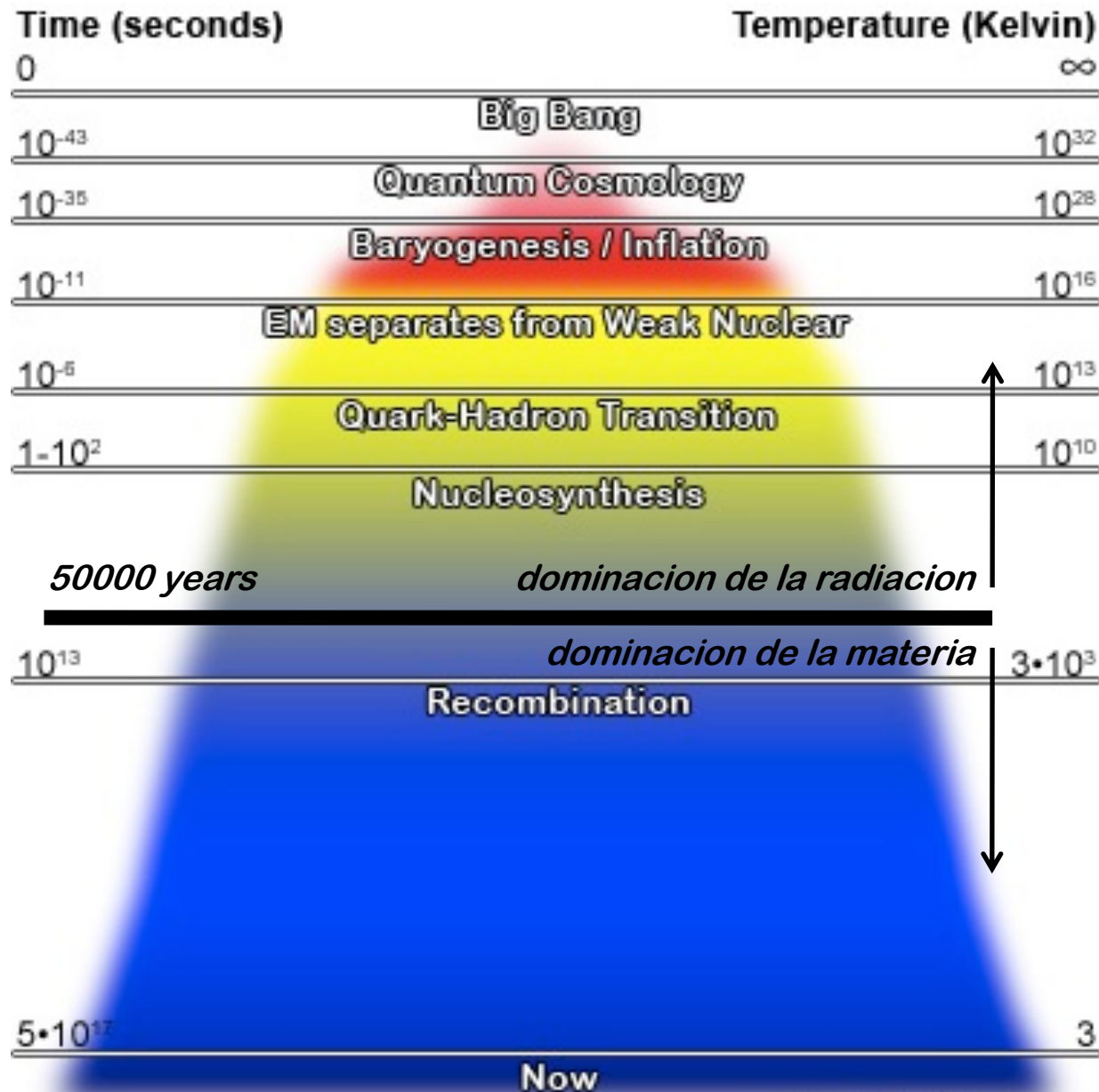
# La historia termica del Universo

---

- introduccion
- *la era de la radiacion*
- la era de la materia
- formacion de estructuras
- cosmologica computacional

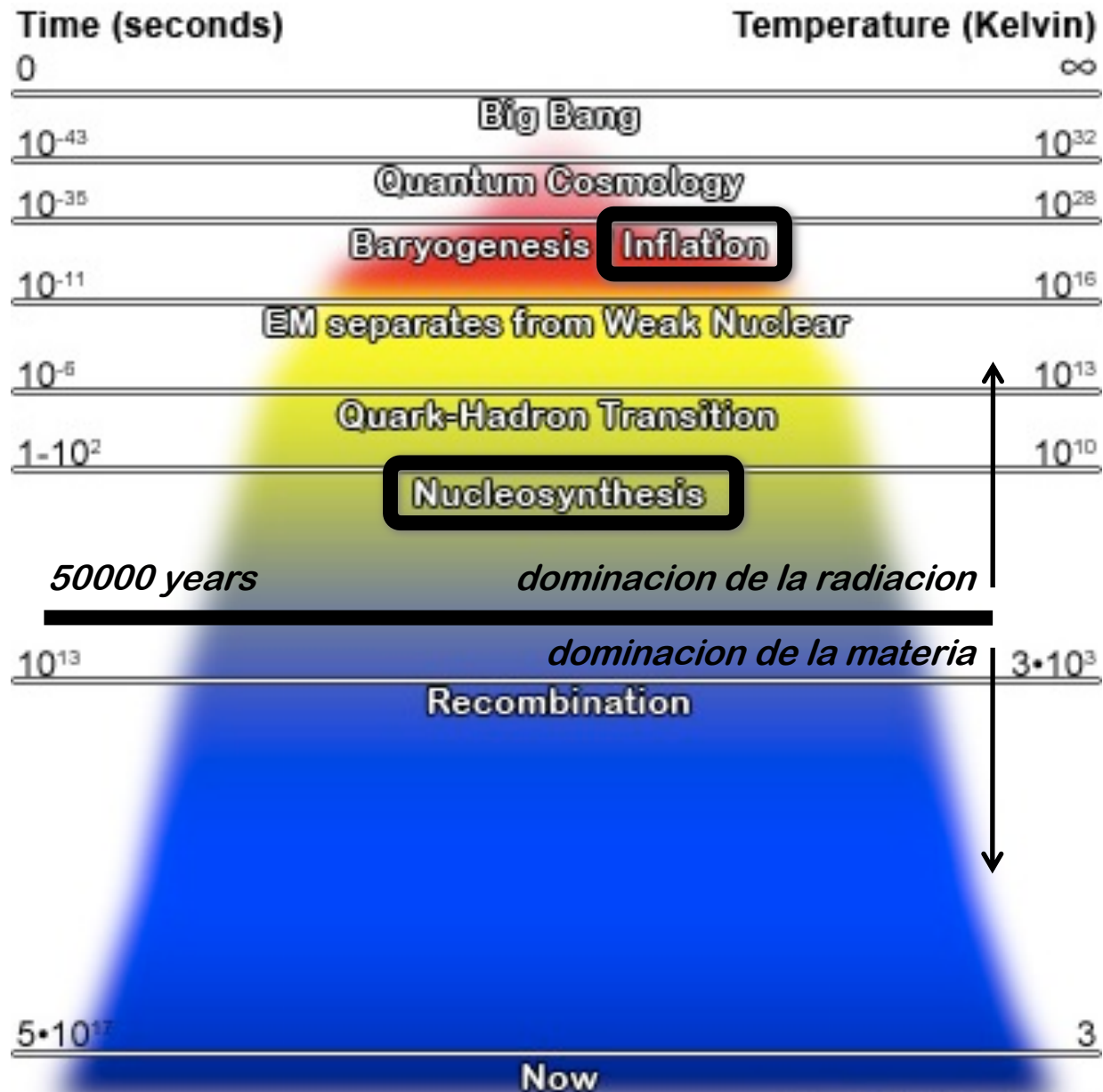
# La Era de la Radiación

La historia termica del Universo



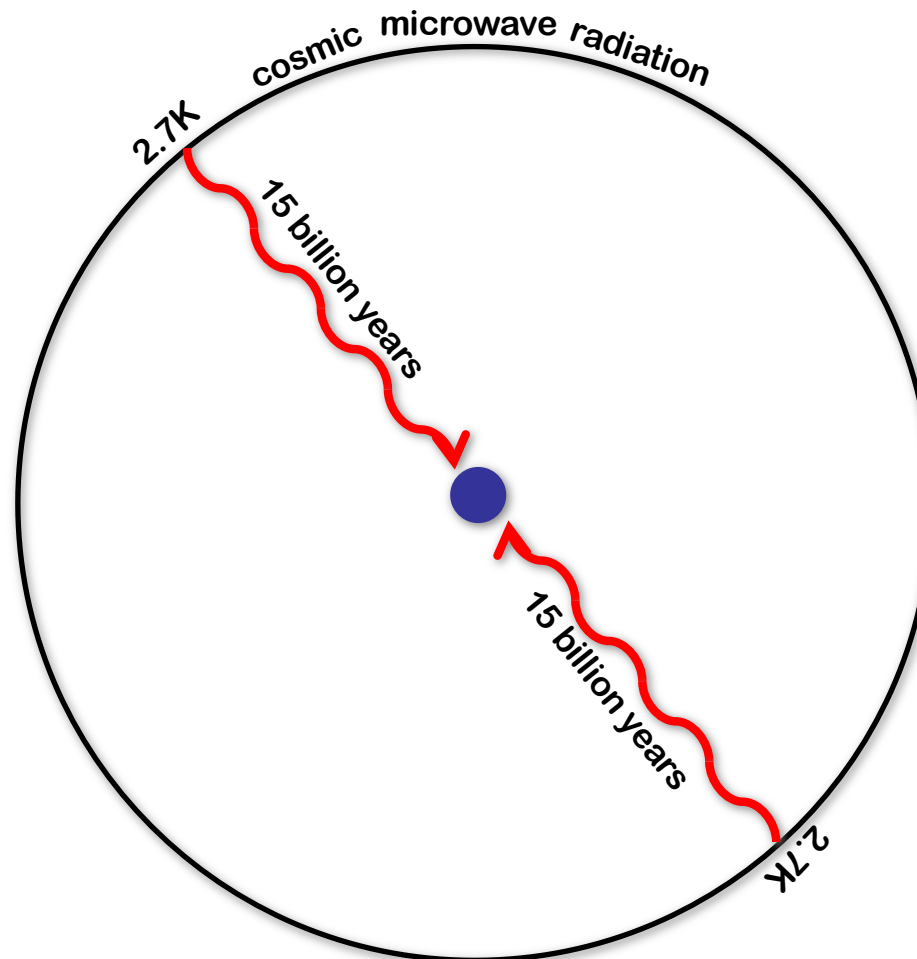
# La Era de la Radiación

La historia termica del Universo



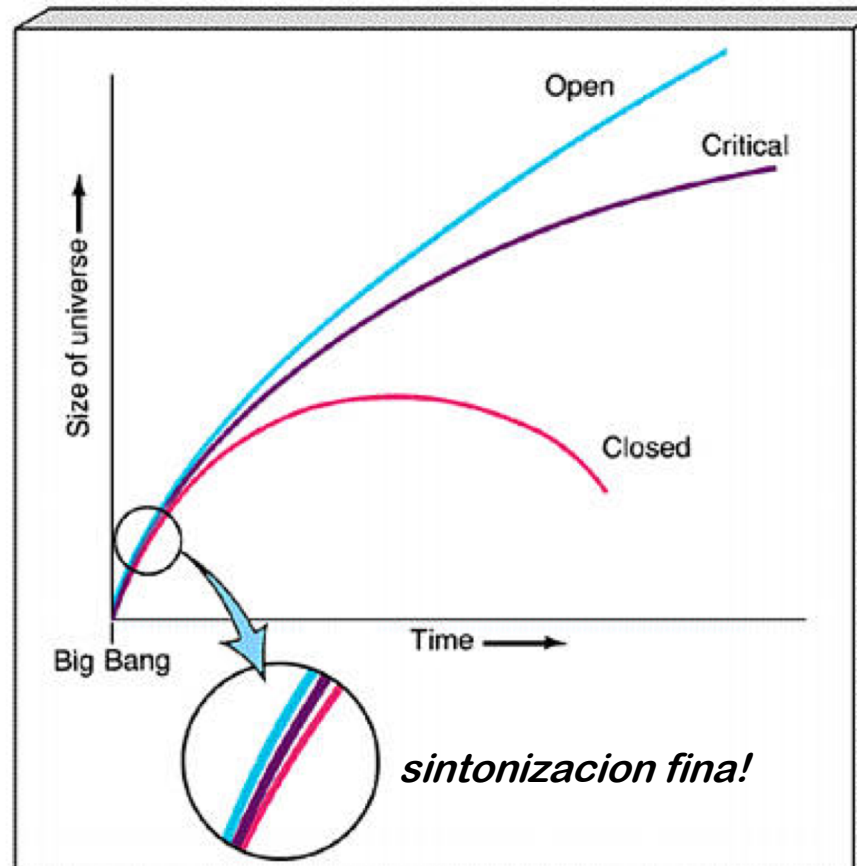
## ▪ 2 problemas en cosmología:

1. el problema del horizonte



## ■ 2 problemas en cosmología:

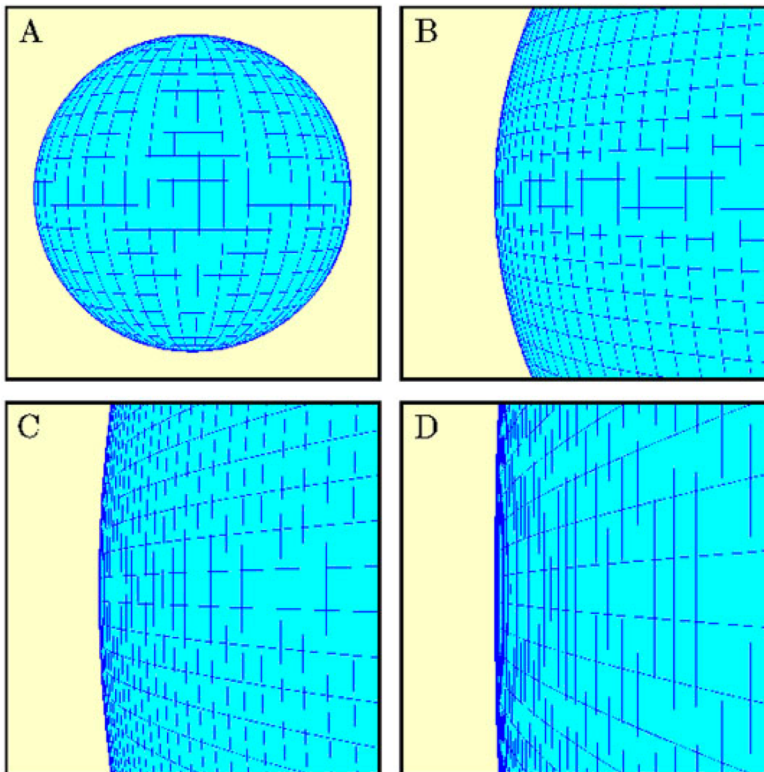
1. el problema del horizonte
2. el problema de la planitud (i.e.  $\Omega_{\text{tot}}=1$ )



- 2 problemas en cosmologia:

1. el problema del horizonte
2. el problema de la planitud (i.e.  $\Omega_{\text{tot}}=1$ )

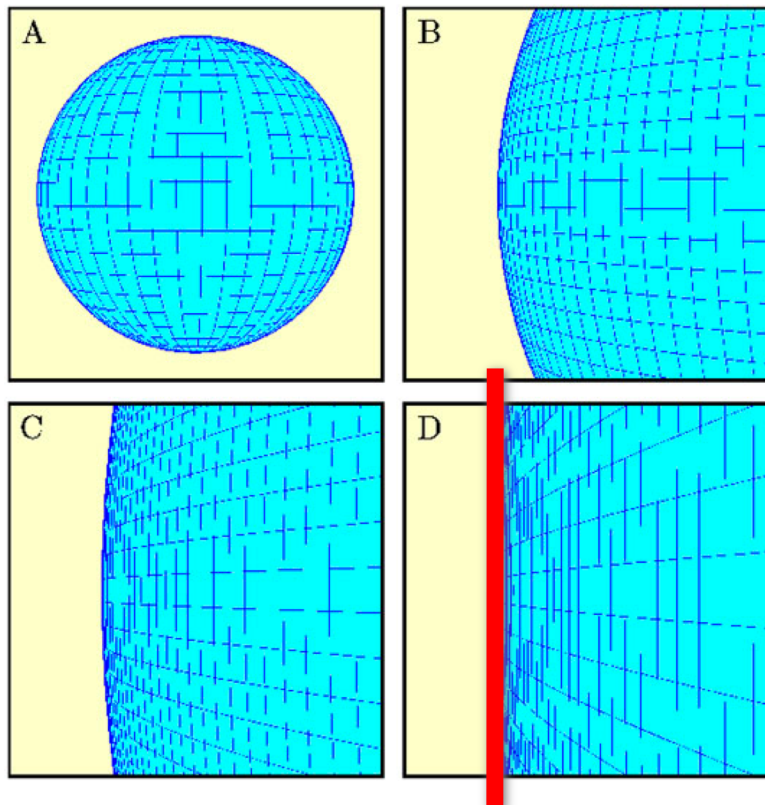
- solucion: inflation!



una fase de la expansion *muy*  
 rapida brevemente despues del  
**Big Bang**

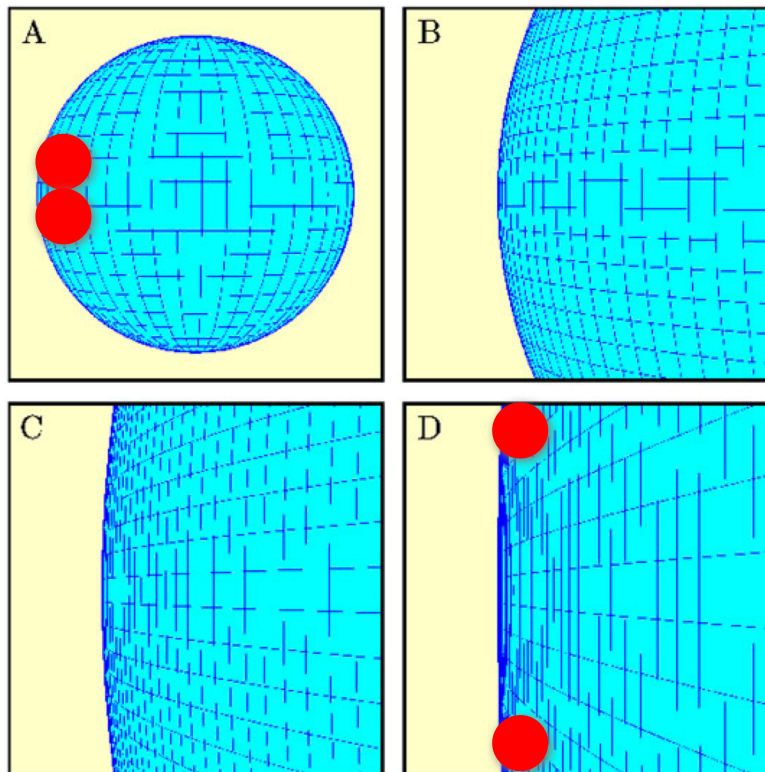
(disparada por alguna ruptura de simetria...)

- 2 problemas en cosmologia:
  1. el problema del horizonte
  2. el problema de la planitud (i.e.  $\Omega_{\text{tot}}=1$ )
- solucion: inflation!



la superficie esta plano hoy

- 2 problemas en cosmologia:
  1. el problema del horizonte
  2. el problema de la planitud (i.e.  $\Omega_{\text{tot}}=1$ )
- solucion: inflation!



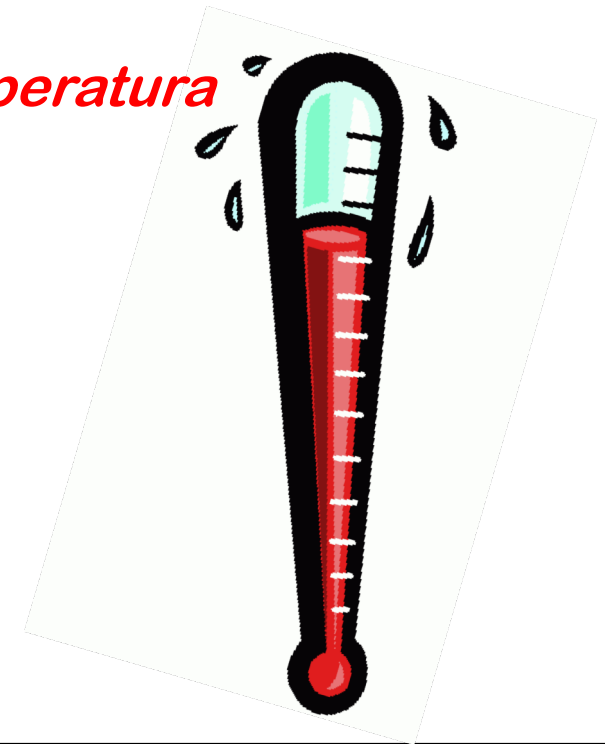
dos puntos muy lejos hoy  
podian comunicarse antes



**radiación  $\rightleftharpoons$  materia**

radiación  $\rightleftharpoons$  materia

*equilibrio sensible a la temperatura*



- “particle freeze-out”, por ejemplo

protons:  $k_B T \approx 1.0 \text{ GeV}$ ,  $T \approx 1000 \text{ billion K}$ ,  $t = 0.000001 \text{ s}$

electrons:  $k_B T \approx 0.5 \text{ MeV}$ ,  $T \approx 10 \text{ billion K}$ ,  $t = 1 \text{ s}$

- “particle freeze-out”, por ejemplo

protons:  $k_B T \approx 1.0 \text{ GeV}$ ,  $T \approx 1000 \text{ billion K}$ ,  $t = 0.000001 \text{ s}$

electrons:  $k_B T \approx 0.5 \text{ MeV}$ ,  $T \approx 10 \text{ billion K}$ ,  $t = 1 \text{ s}$

...

igualdad de la materia y radiación:  $T \approx 10000 \text{ K}$ ,  $t = 50000 \text{ years}$

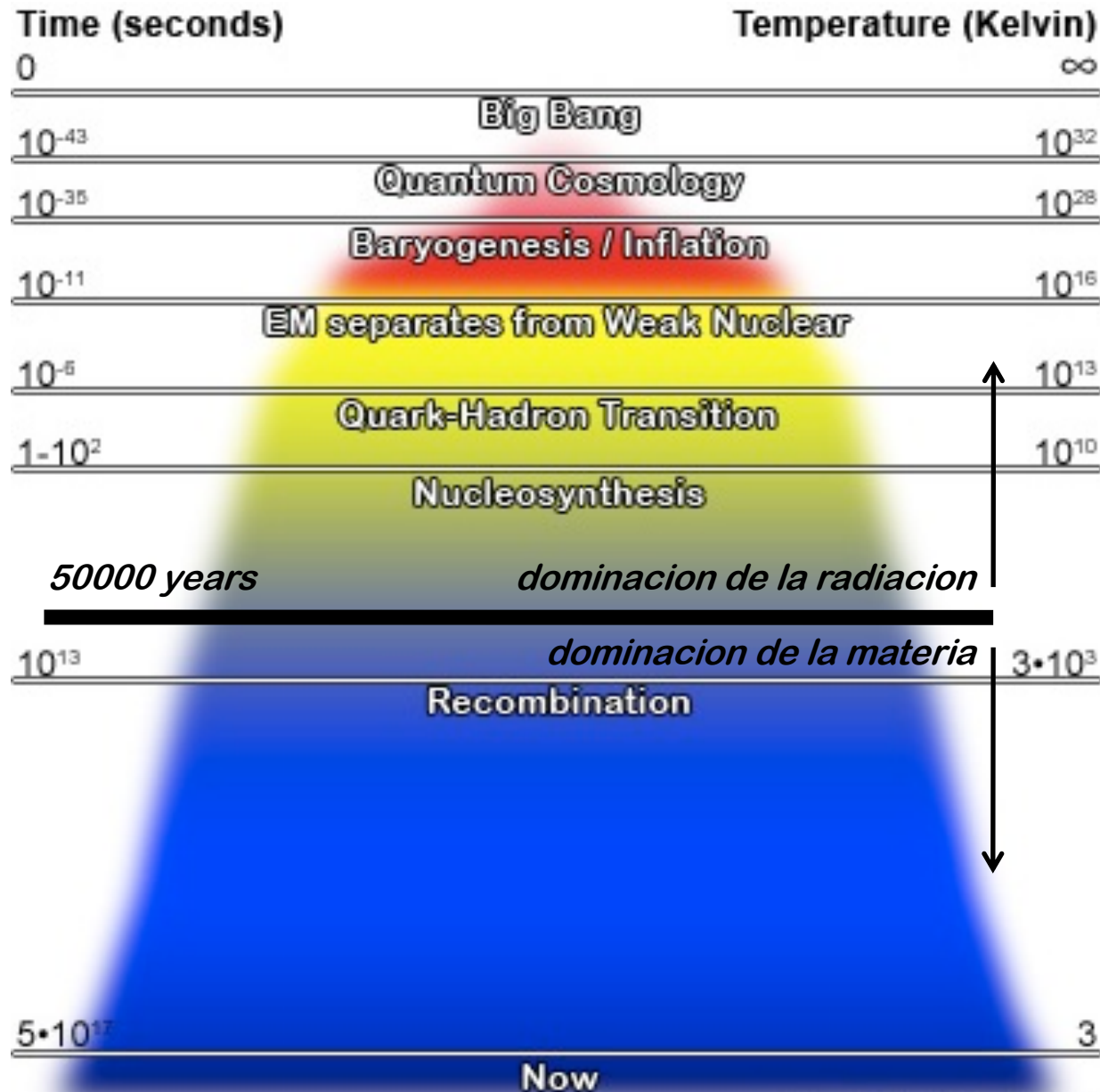
# La historia termica del Universo

---

- introduccion
- la era de la radiacion
- *la era de la materia*
- formacion de estructuras
- cosmologica computacional

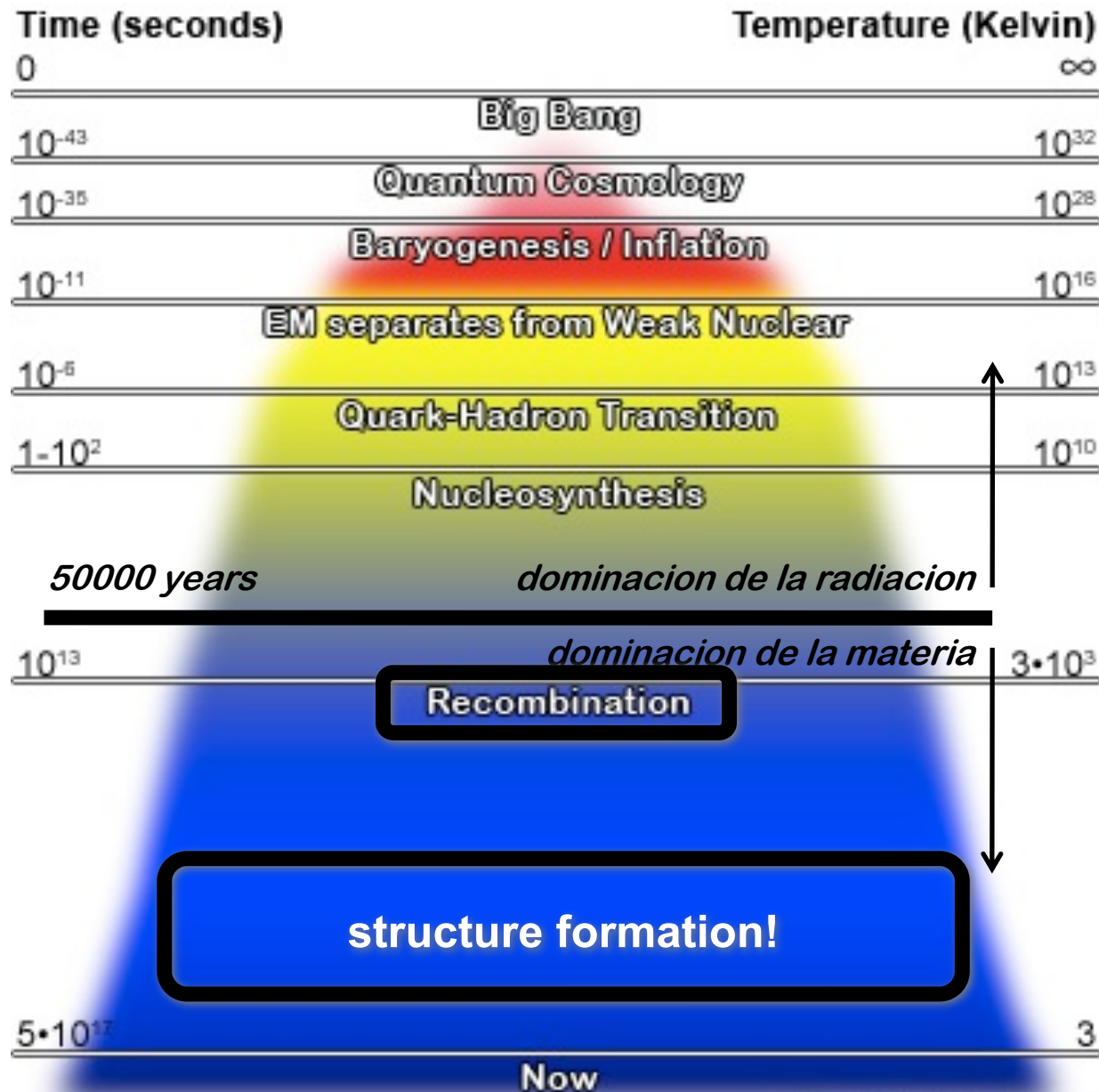
# La Era de la Materia

La historia termica del Universo



# La Era de la Materia

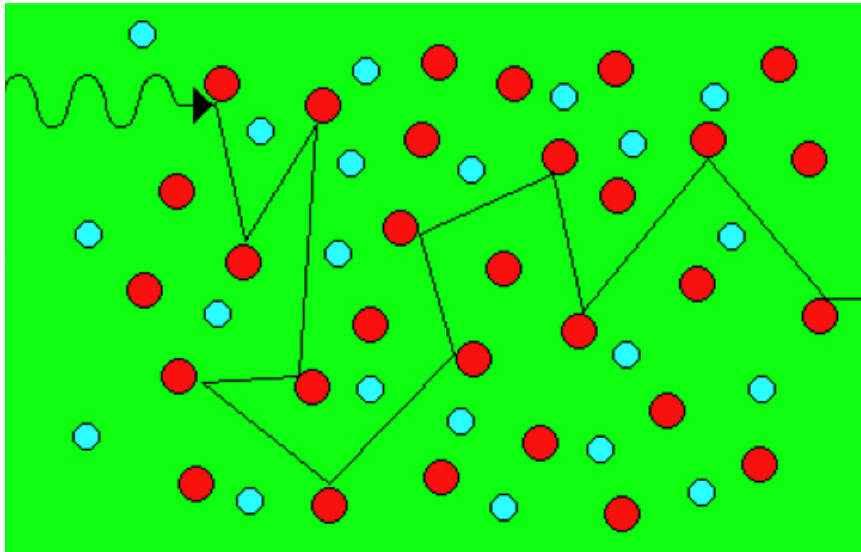
La historia termica del Universo



# La Era de la Materia

## ■ antes “desacoplo”/”recombinación”

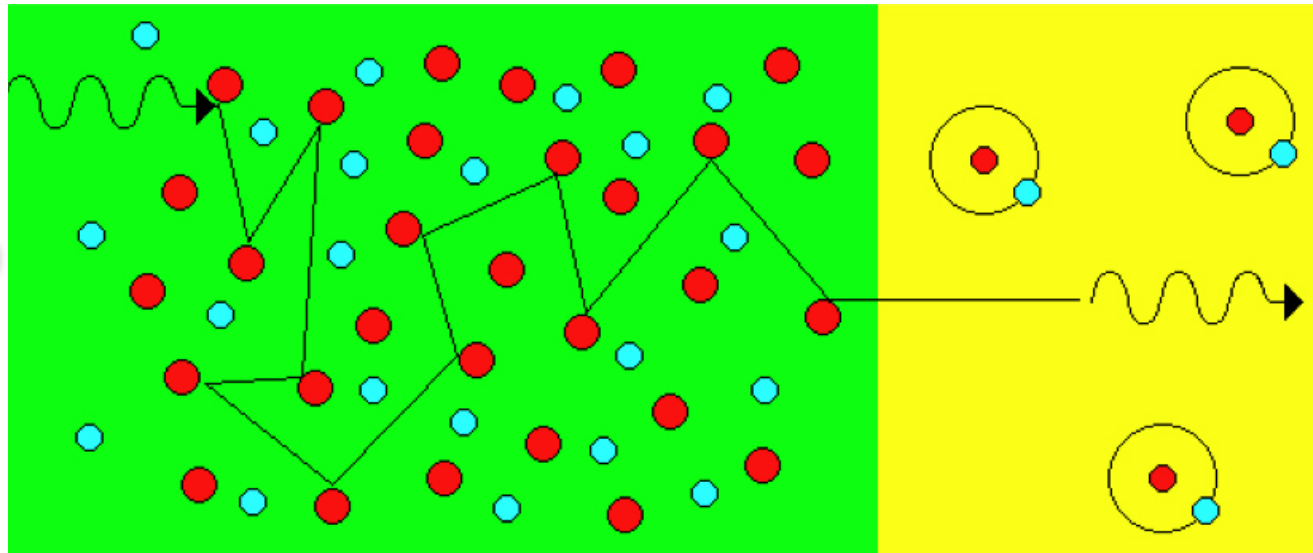
- electrones y fotones intercambian energía
- radiación y materia están en equilibrio
- el Universo es opaco a radiación



# La Era de la Materia

## ■ antes “desacoplo”/”recombinacion”

- electrones y fotones intercambian energia
- radiacion y materia estan en equilibrio
- el Universo es opaco a radiacion



## ■ despues “decoupling”/”recombinacion”

- electrones estan ligados a los protones
- fotones estan libres para volar

## La Era de la Materia

---

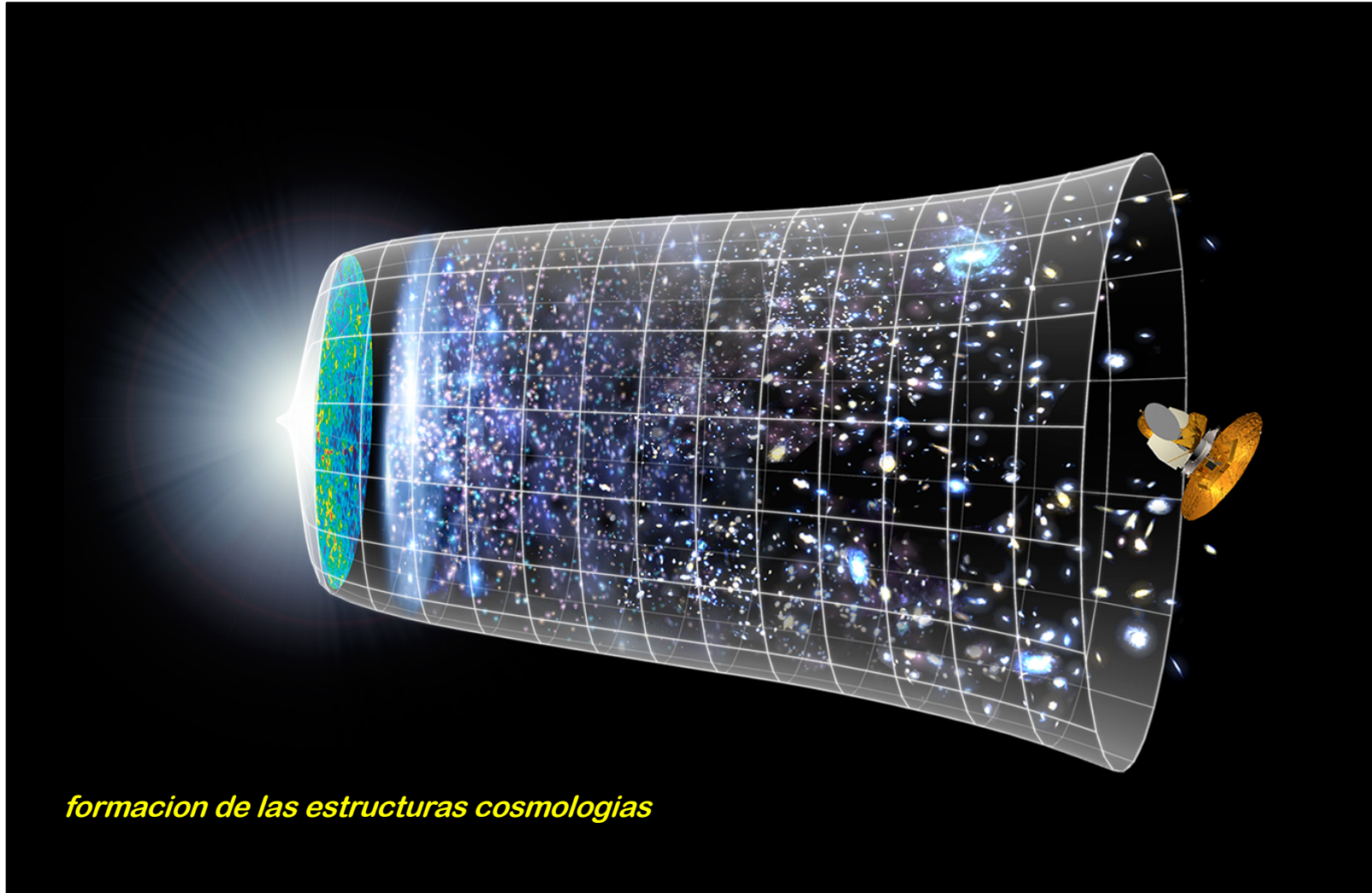
- despues “desacoplo”/”recombinacion”

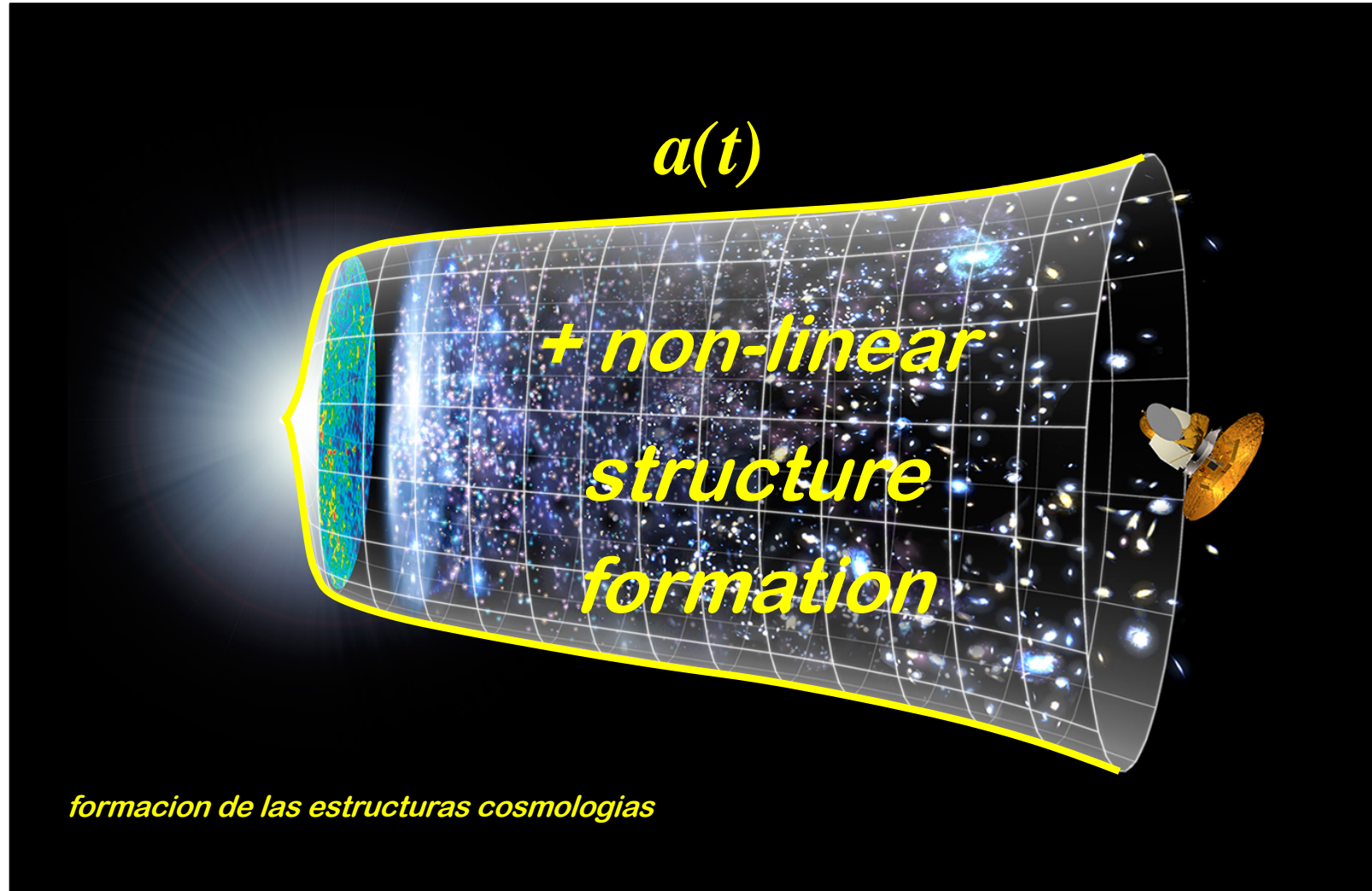
*la formacion de las estructuras cosmologias empieza...*

# La historia termica del Universo

---

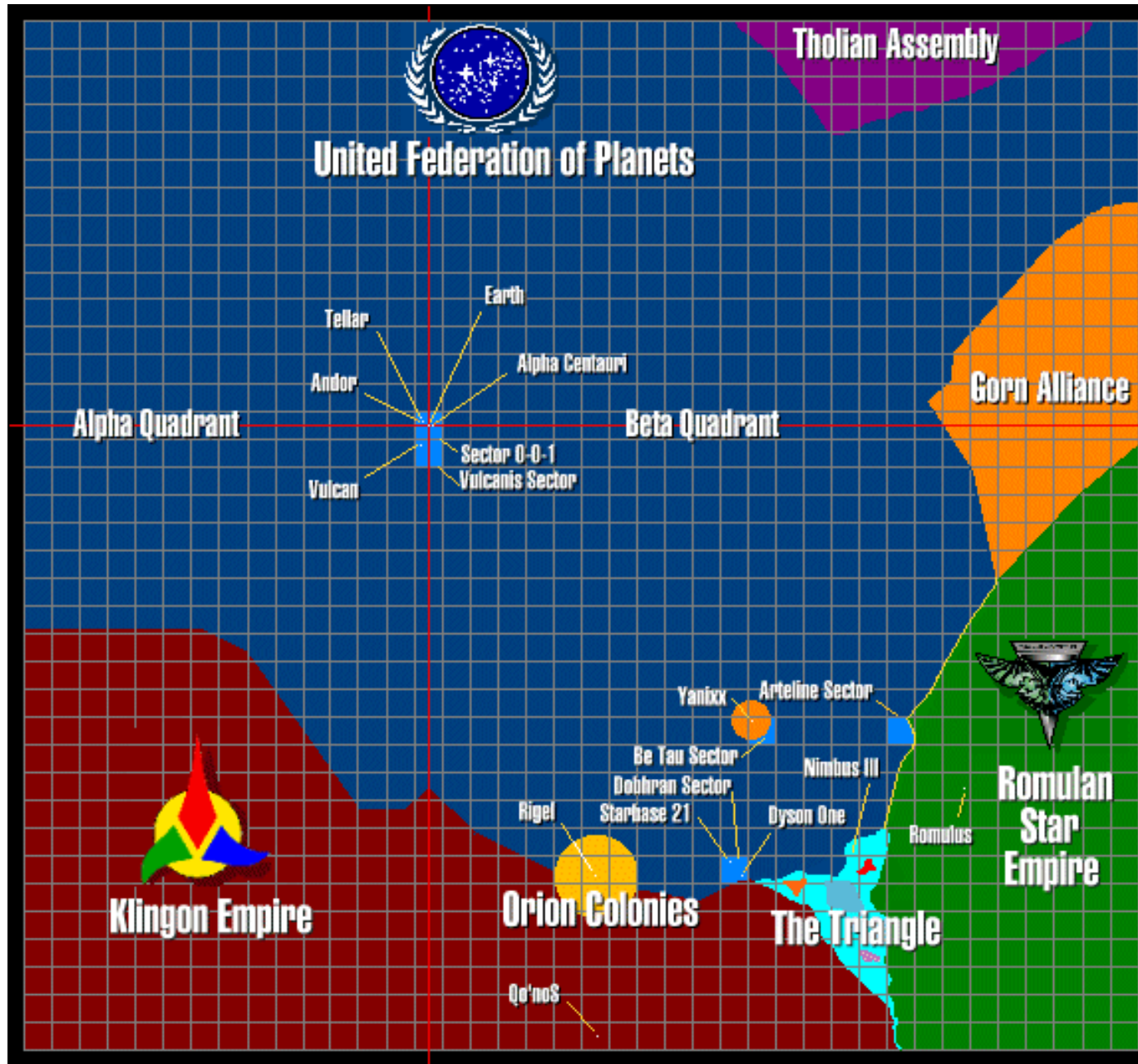
- introduccion
- la era de la radiacion
- la era de la materia
- *formacion de estructuras*
- cosmologica computacional





# Formacion de Estructuras

La historia termica del Universo

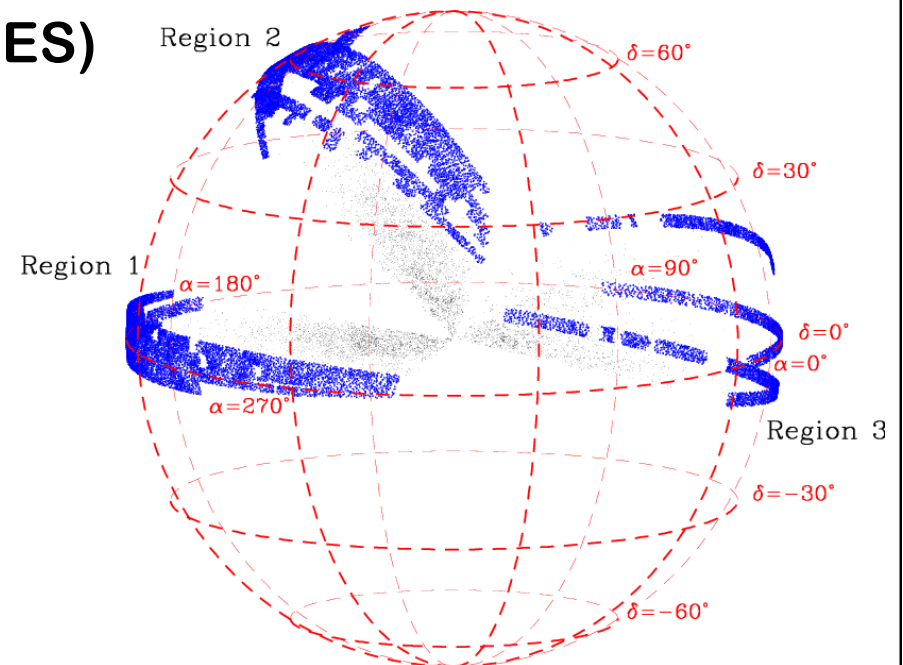


## ▪ inspeccion systematico del cielo:

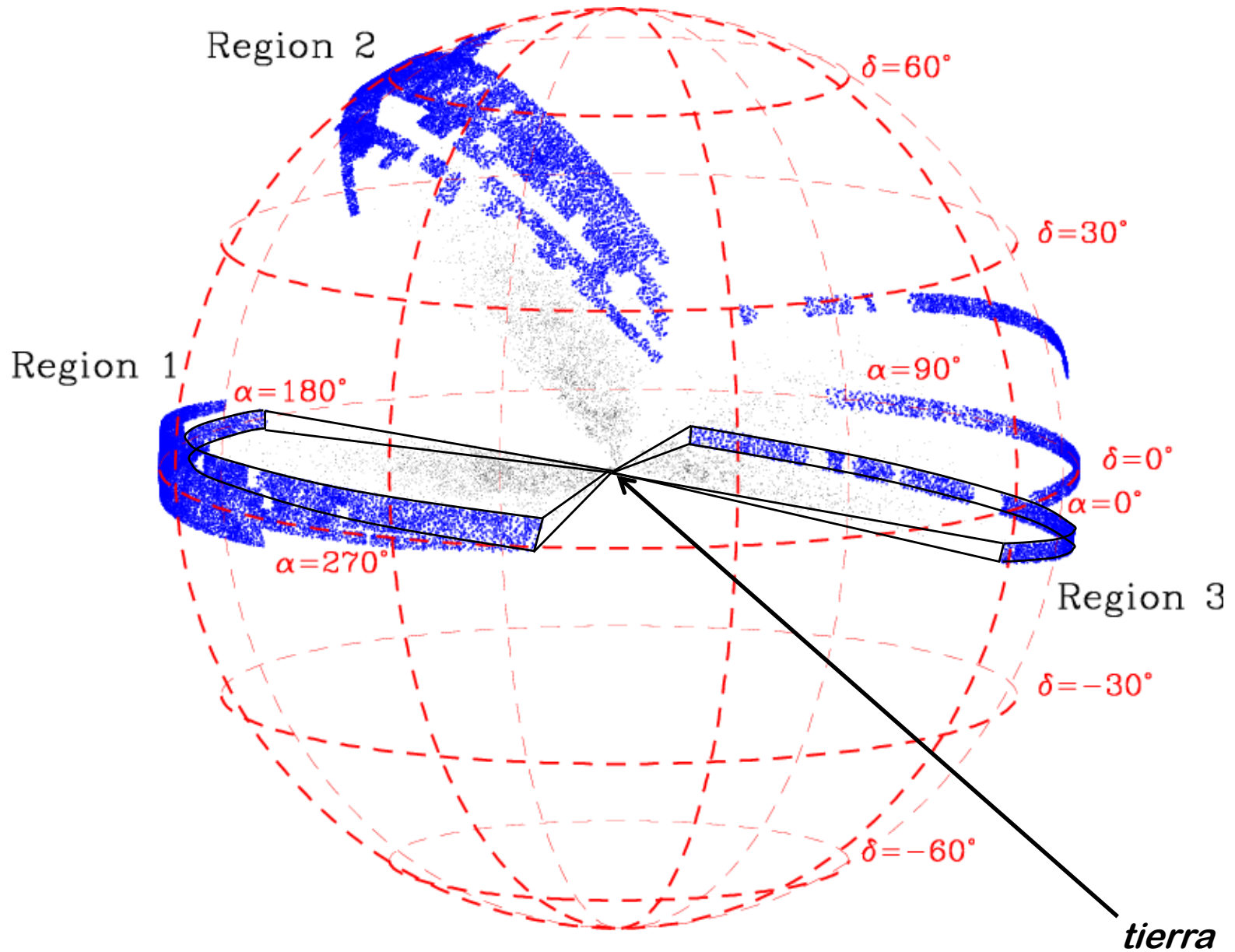
1986	Centre-for-Astrophysics Survey
1997	Las Campanas Redshift Survey
2001	2dF Galaxy Redshift Survey
2003	Sloan Digital Sky Survey (SDSS)
2008	Pan-STARRS
2009	BOSS (part of SDSS)
2012	Dark Energy Survey (DES)
2013	HETDEX
2014	PAU
2019	Euclid satellite
2019	BigBOSS

## ▪ inspeccion systematico del cielo:

1986	Centre-for-Astrophysics Survey
1997	Las Campanas Redshift Survey
2001	2dF Galaxy Redshift Survey
2003	Sloan Digital Sky Survey (SDSS)
2008	Pan-STARRS
2009	BOSS (part of SDSS)
2012	Dark Energy Survey (DES)
2013	HETDEX
2014	PAU
2019	Euclid satellite
2019	BigBOSS

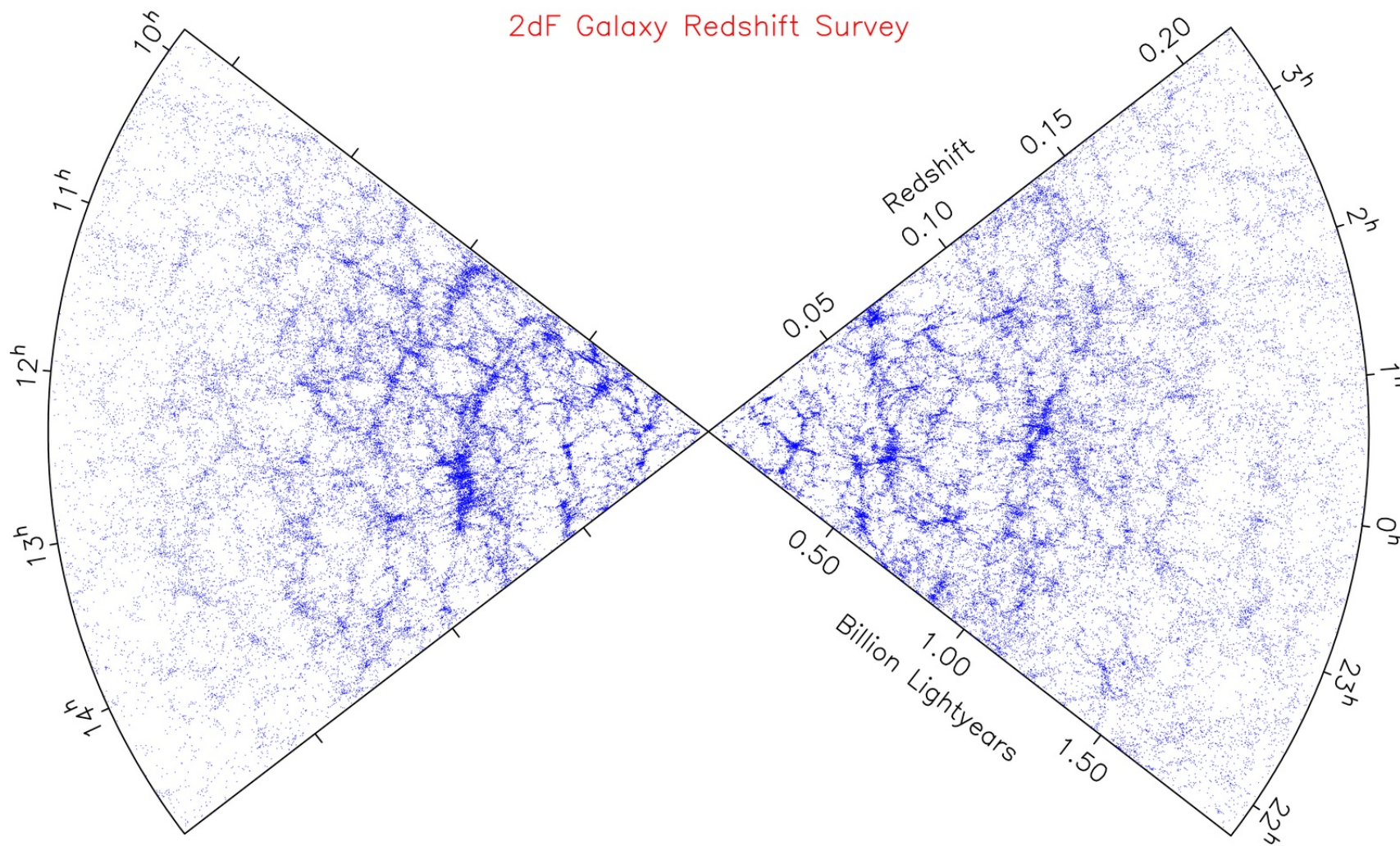


# Formacion de Estructuras



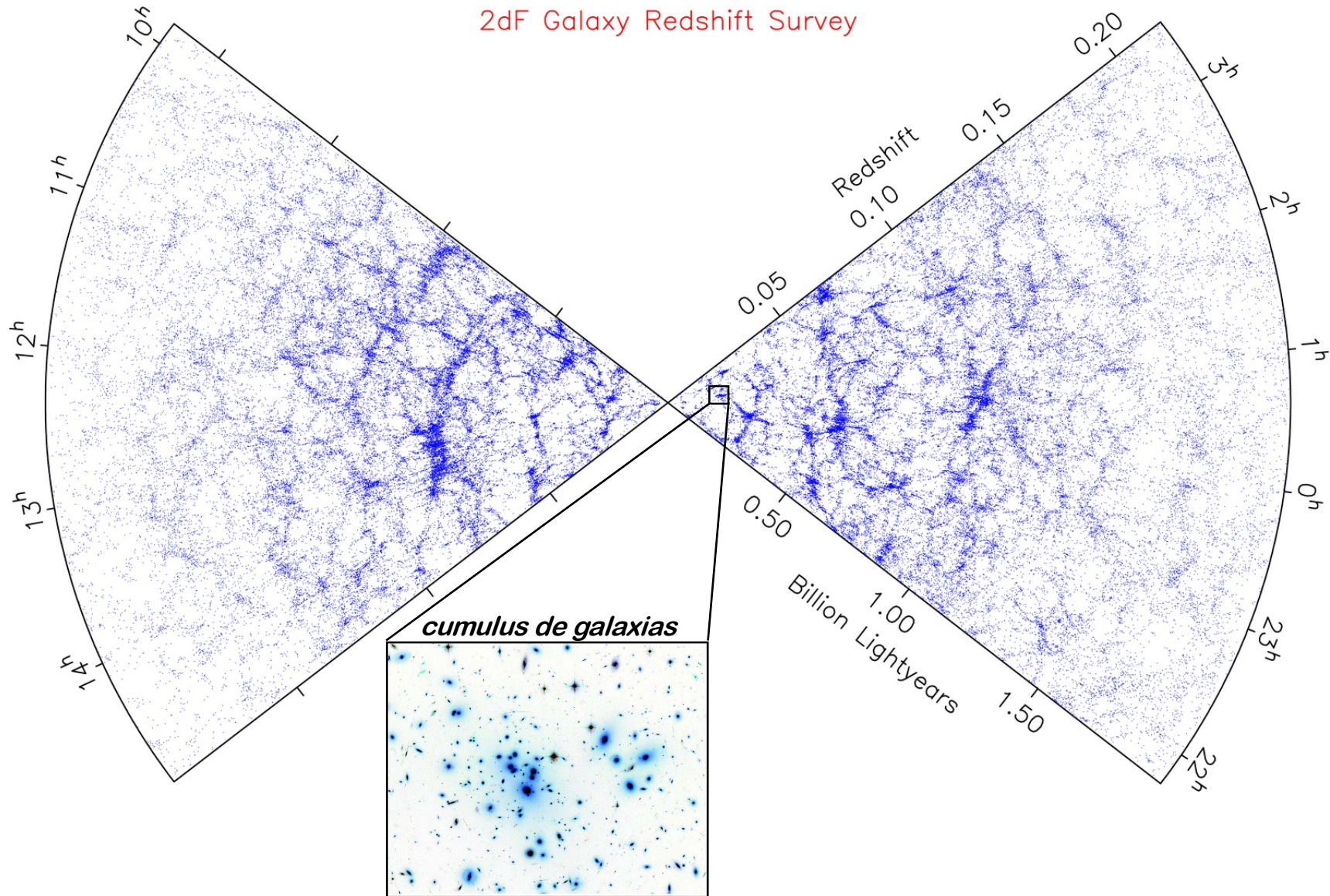
# Formacion de Estructuras

La historia termica del Universo



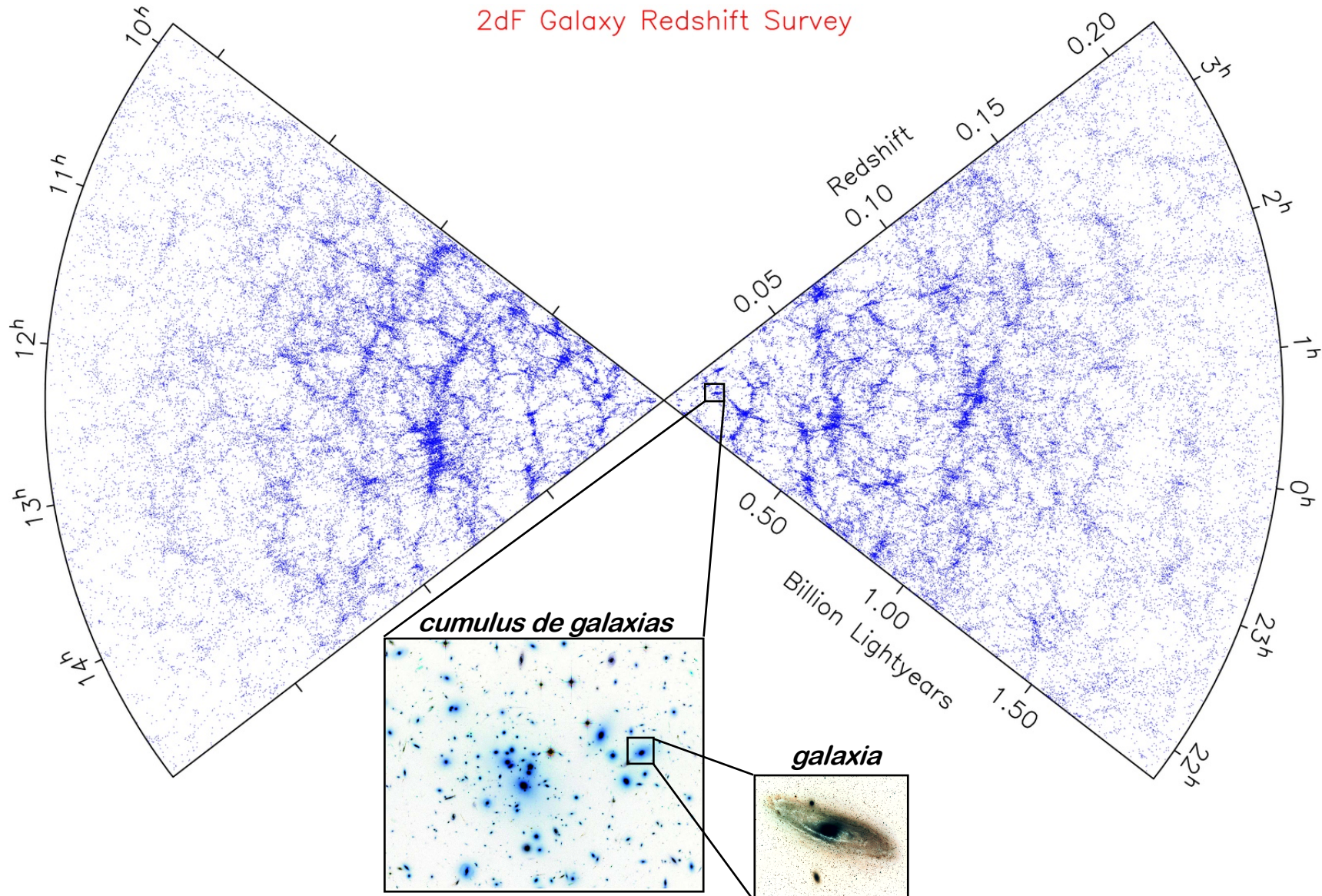
# Formacion de Estructuras

La historia termica del Universo



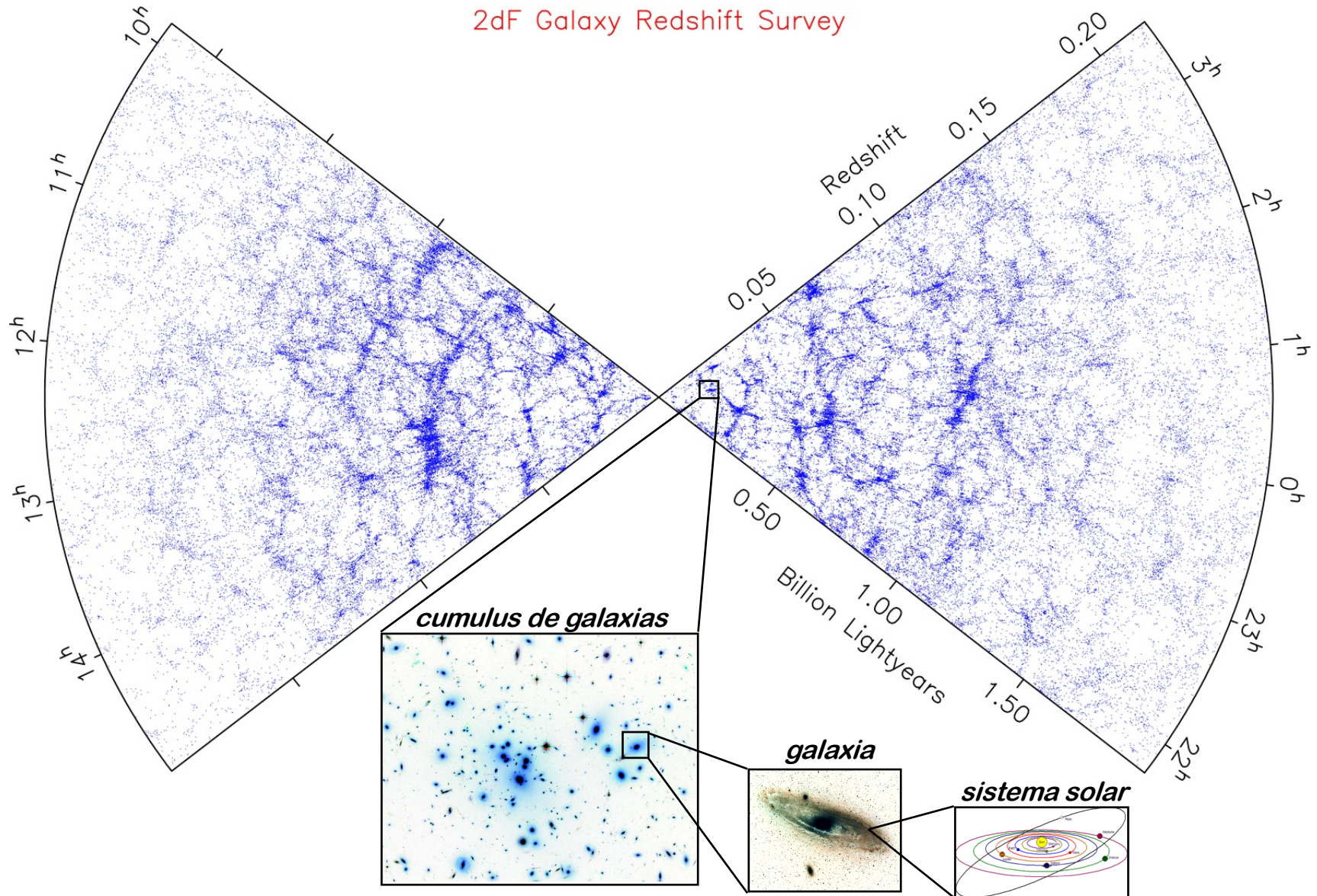
# Formacion de Estructuras

La historia termica del Universo



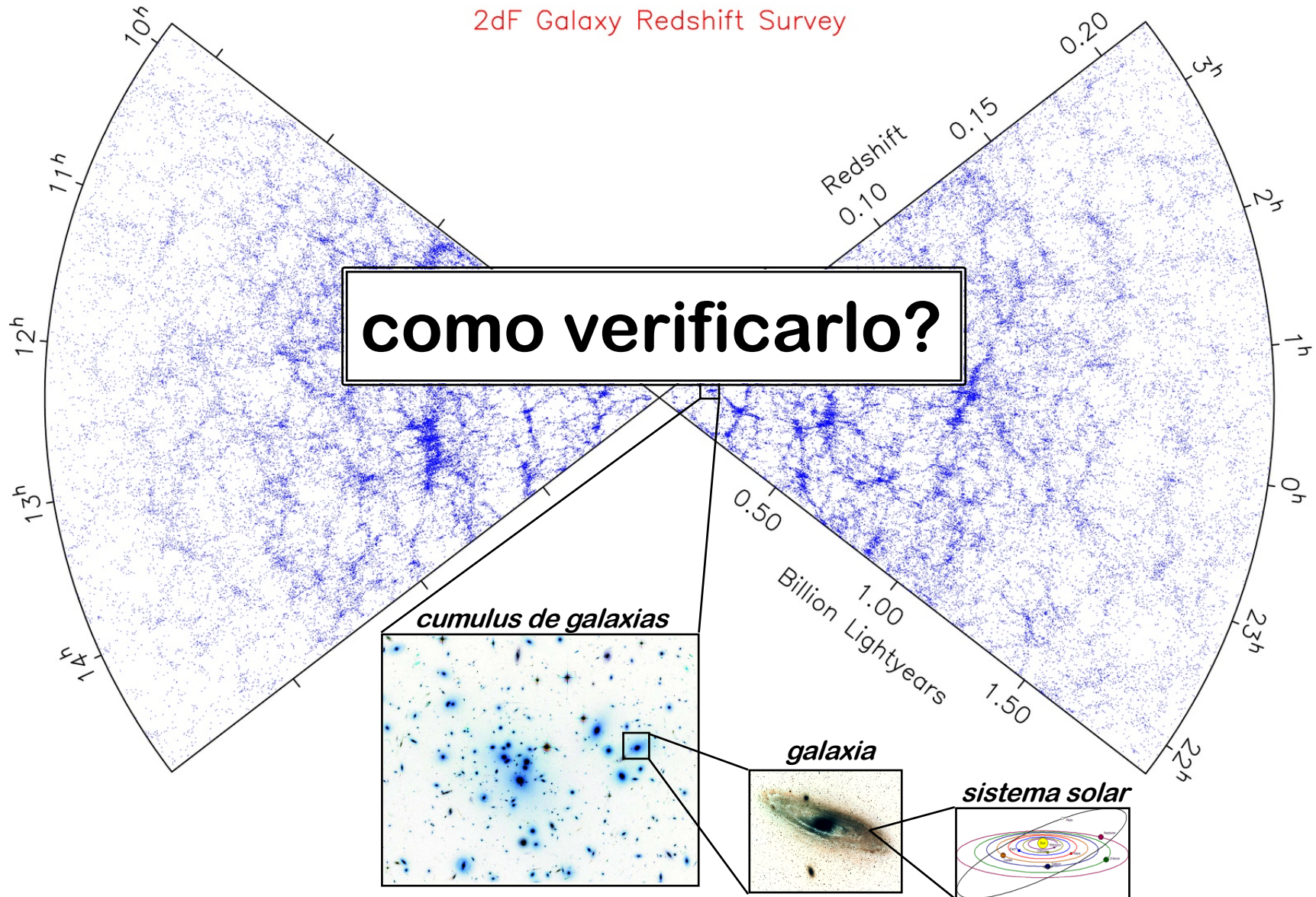
# Formacion de Estructuras

La historia termica del Universo



# Formacion de Estructuras

La historia termica del Universo



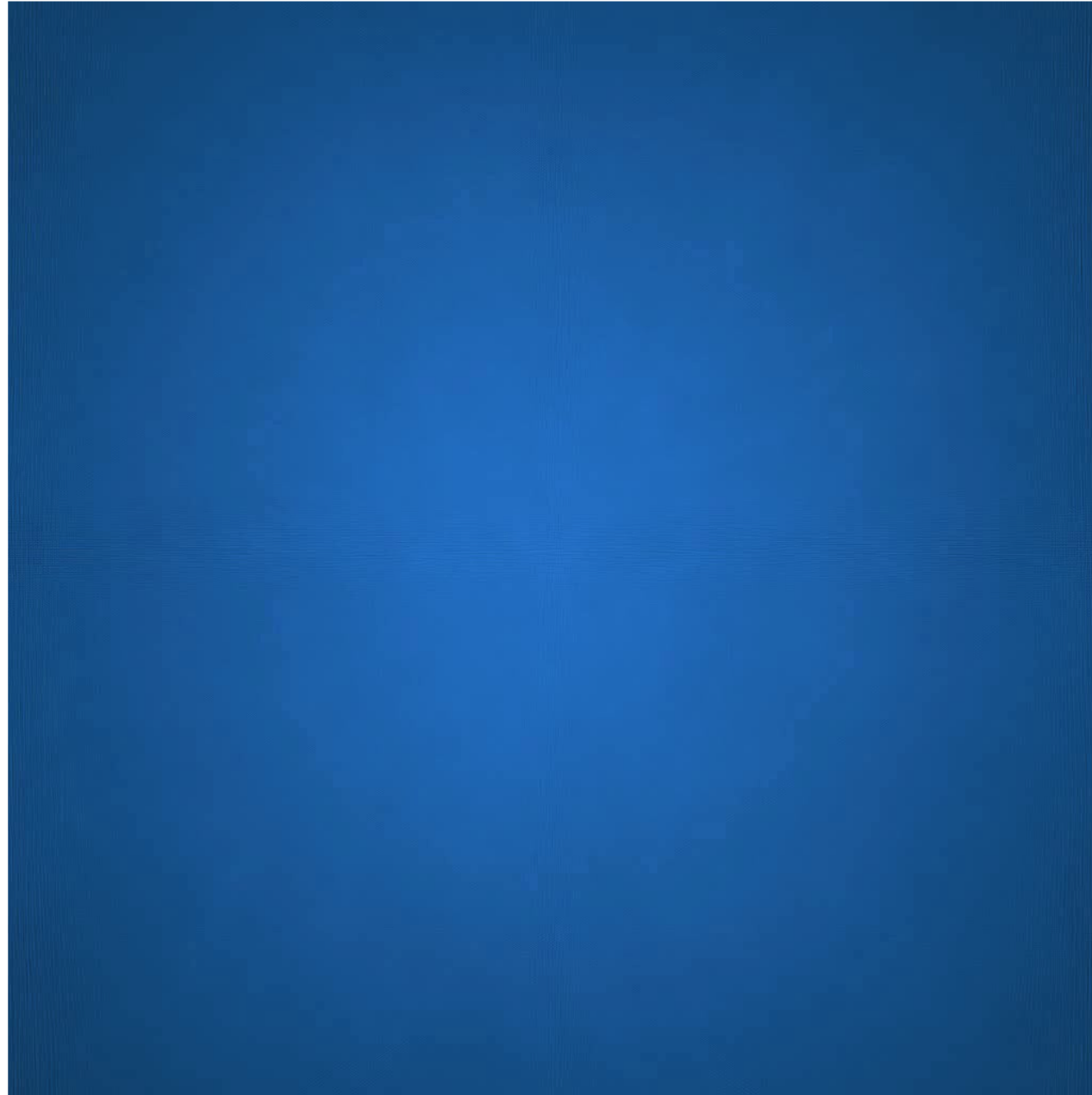
# La historia termica del Universo

---

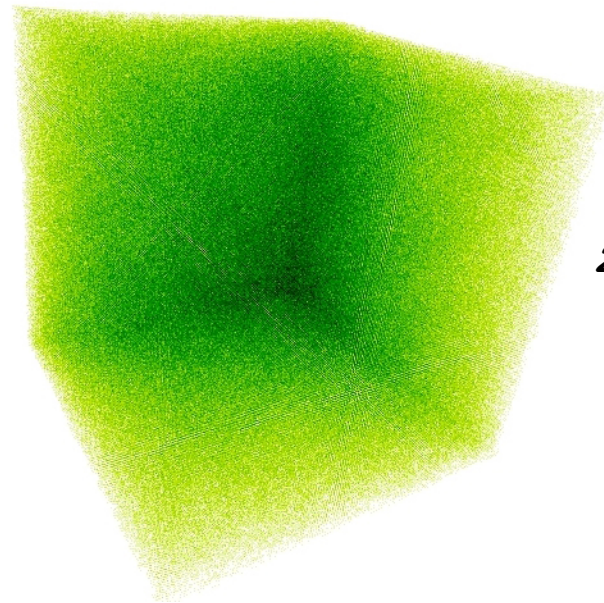
- introduccion
- la era de la radiacion
- la era de la materia
- formacion de estructuras
- *cosmologica computacional*



La historia termica del Universo

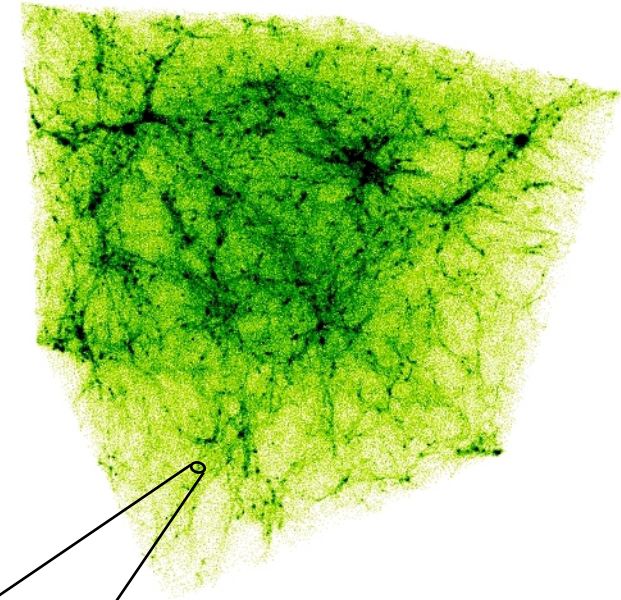


# Cosmología Computacional

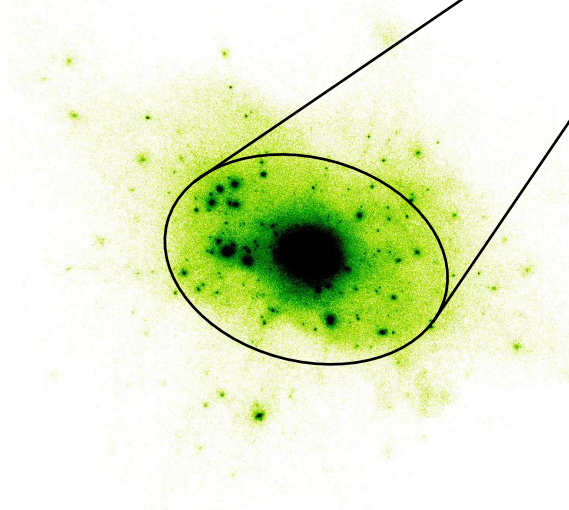


*1. generando condiciones inicial*

*2. haciendo la simulacion*  
→

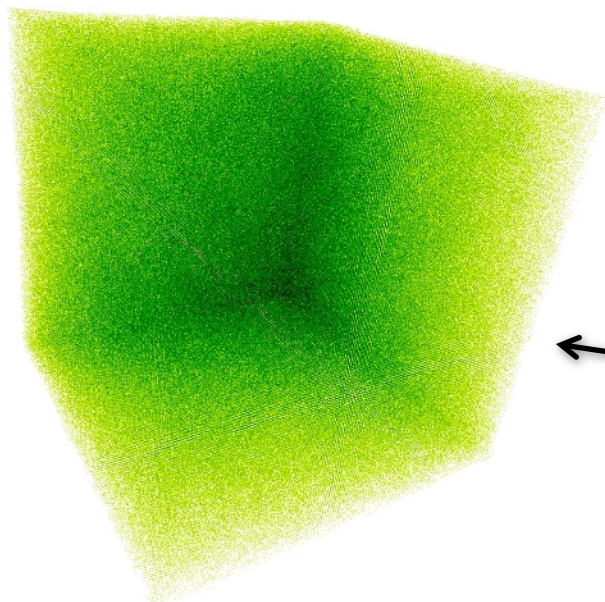


*3. analizando los resultados*

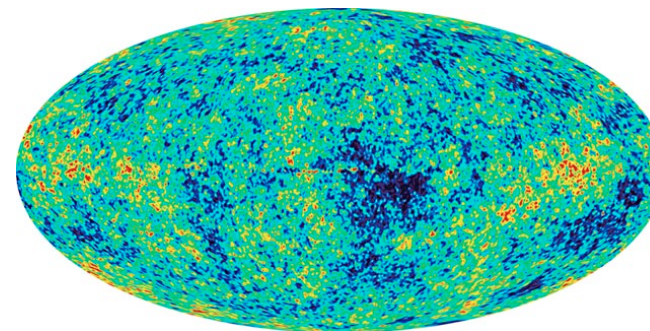


# Cosmología Computacional

La historia térmica del Universo



*1. generando condiciones inicial*



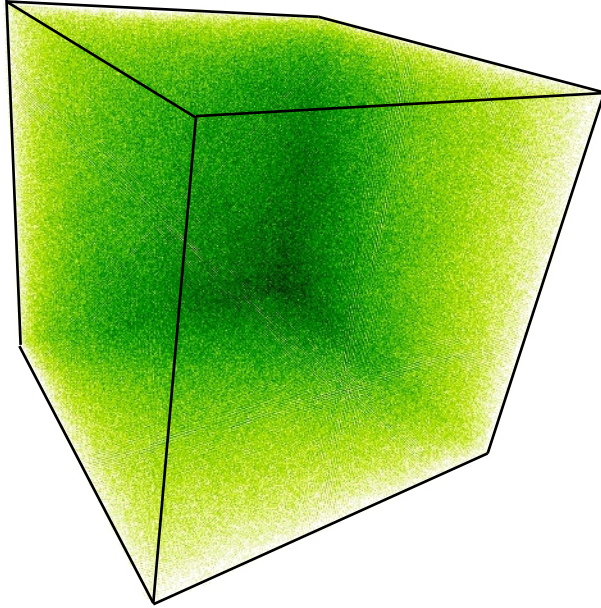
fluctuaciones en el CMB



# Cosmología Computacional

---

*universo cuadrado?*

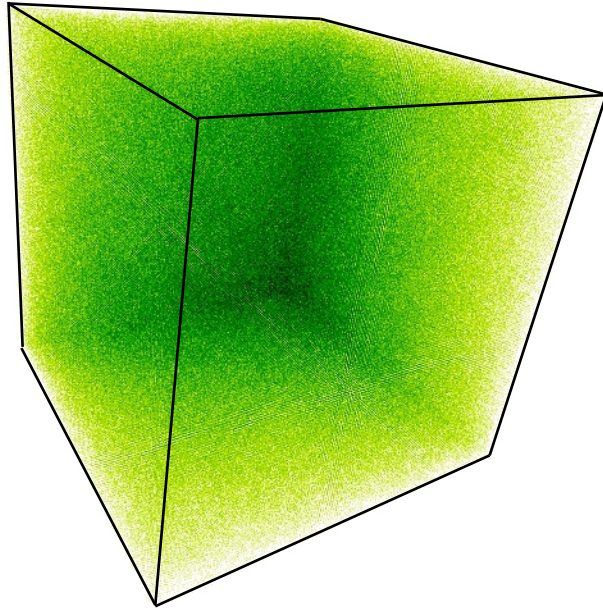


*1. generando condiciones inicial*

# Cosmología Computacional

---

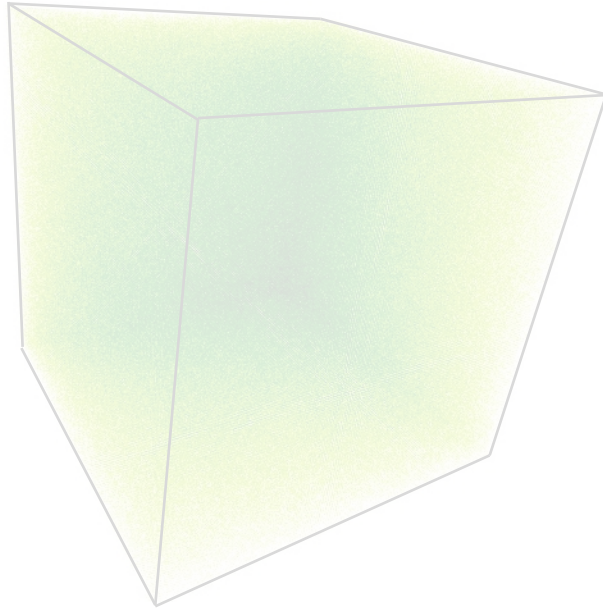
*universo cuadrado: infinito mediante condiciones de contorno periódicas*



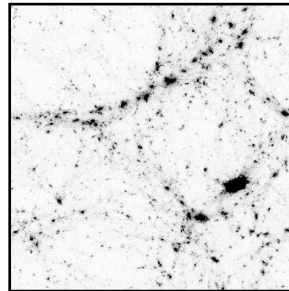
*1. generando condiciones inicial*

# Cosmología Computacional

*universo cuadrático: la infinidad por condiciones secundarias periódicamente*

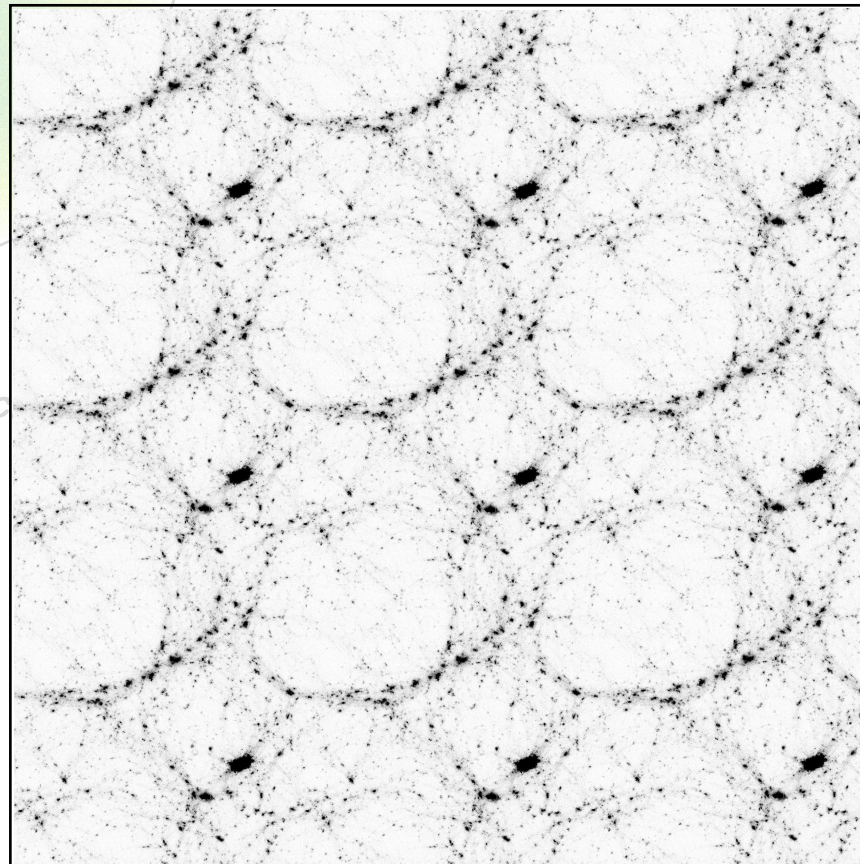
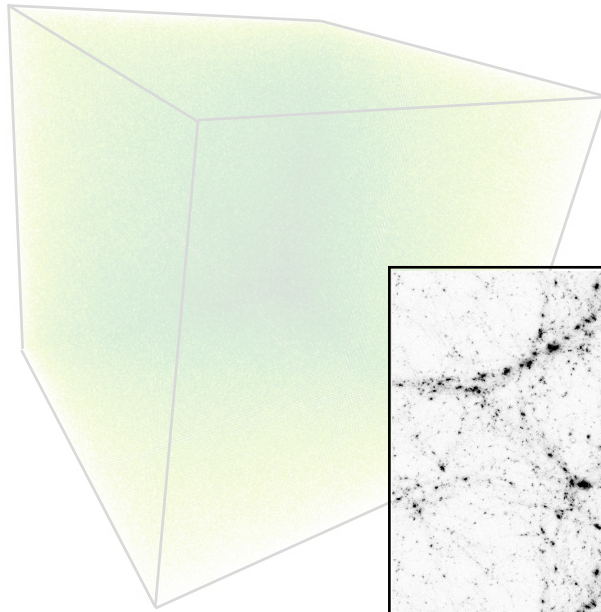


*1. generando condiciones inicial*



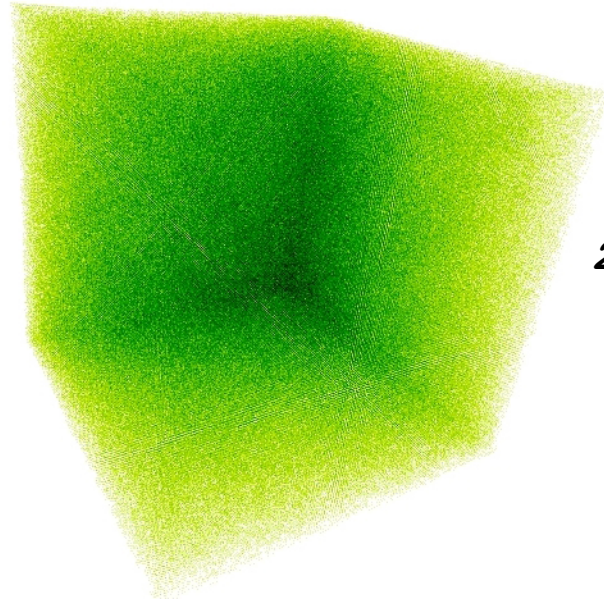
# Cosmología Computacional

*universo cuadrático: la infinitud por condiciones secundarias periódicamente*



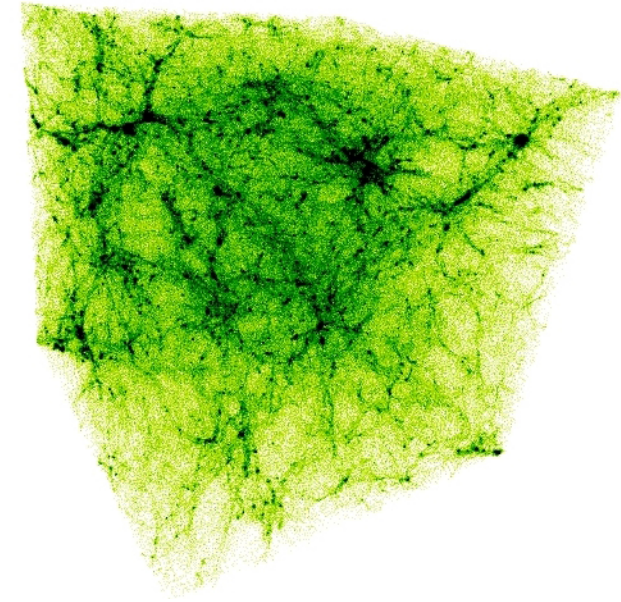
1. generando condicio

# Cosmología Computacional



*1. generando condiciones inicial*

*2. haciendo la simulacion*  
→



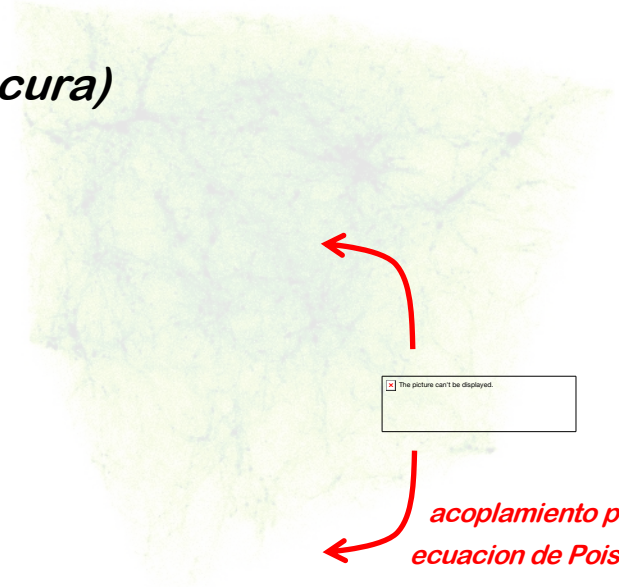
gravitacion ala Newton  
+  
(magneto-)hidrodinamica

# Cosmología Computacional

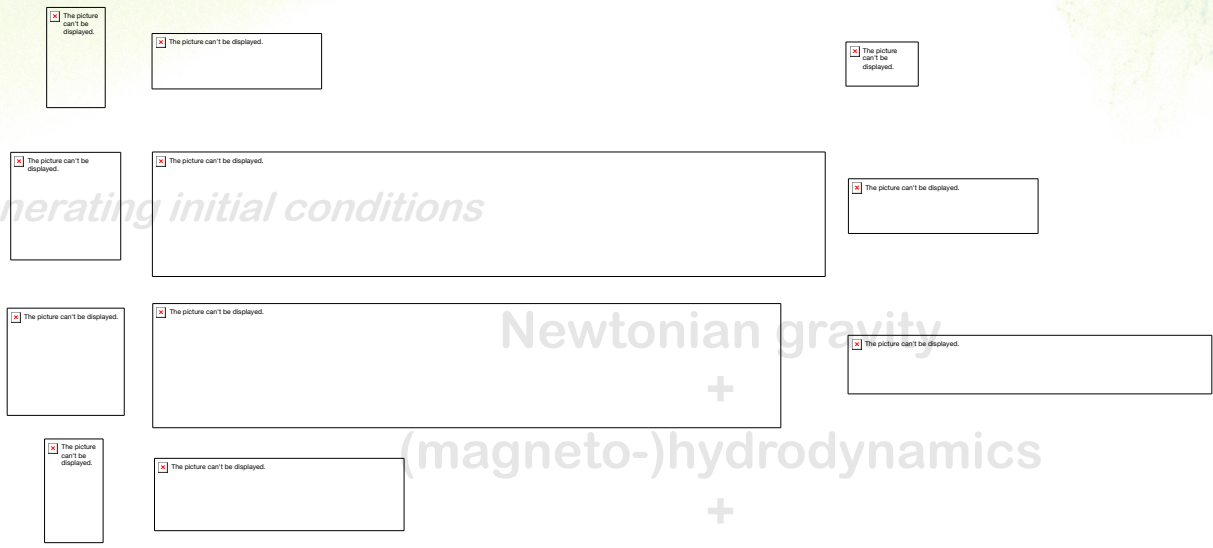
- *materia no colisional (e.g. estrellas & materia oscura)*



2. running the simulation



- *materia colisional (e.g. gas)*

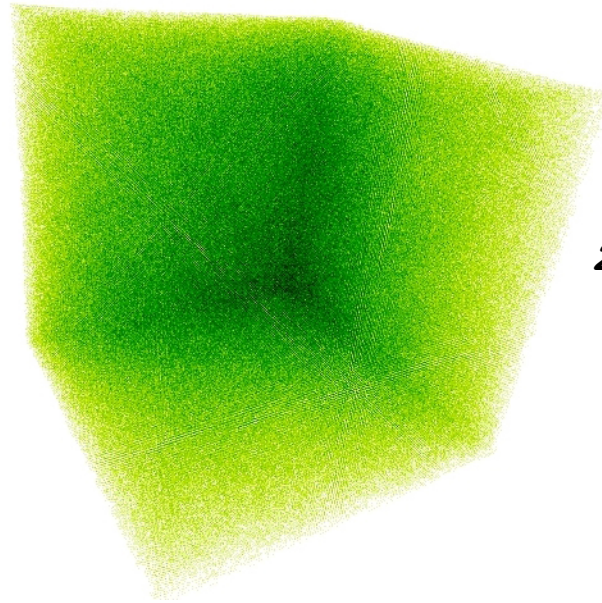


1. generating initial conditions

Newtonian gravity  
+  
(magneto-)hydrodynamics  
+  
"sub-grid" physics

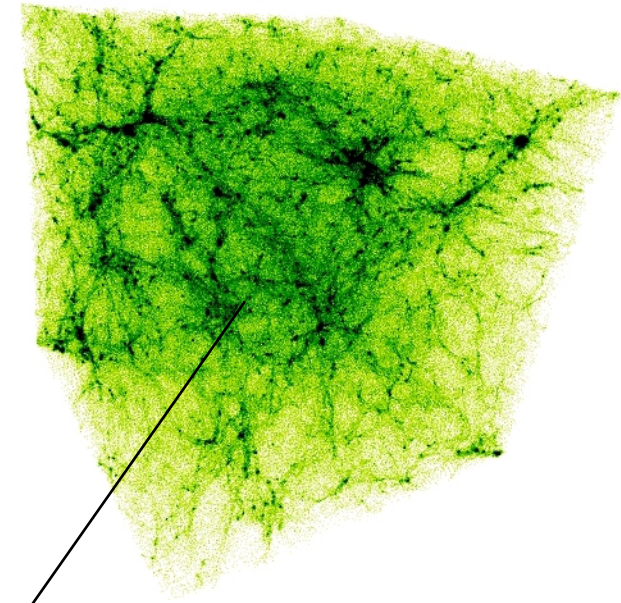
acoplamiento por  
ecuacion de Poisson

# Cosmología Computacional

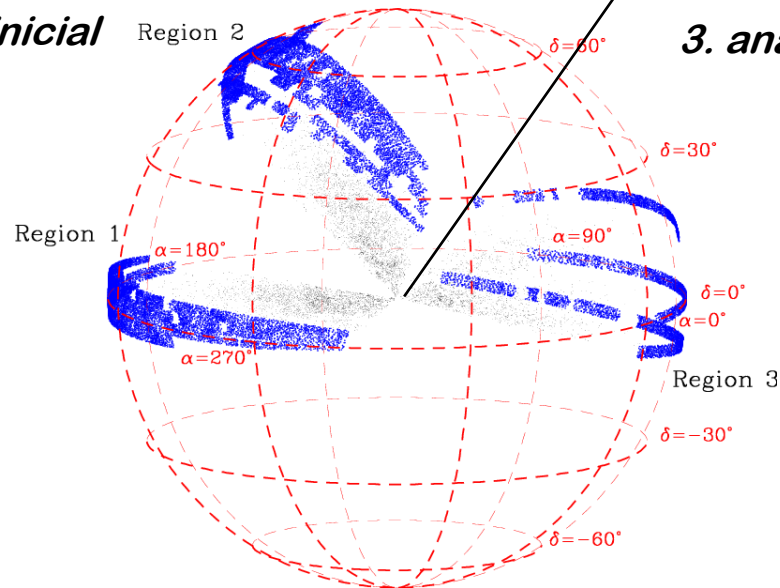


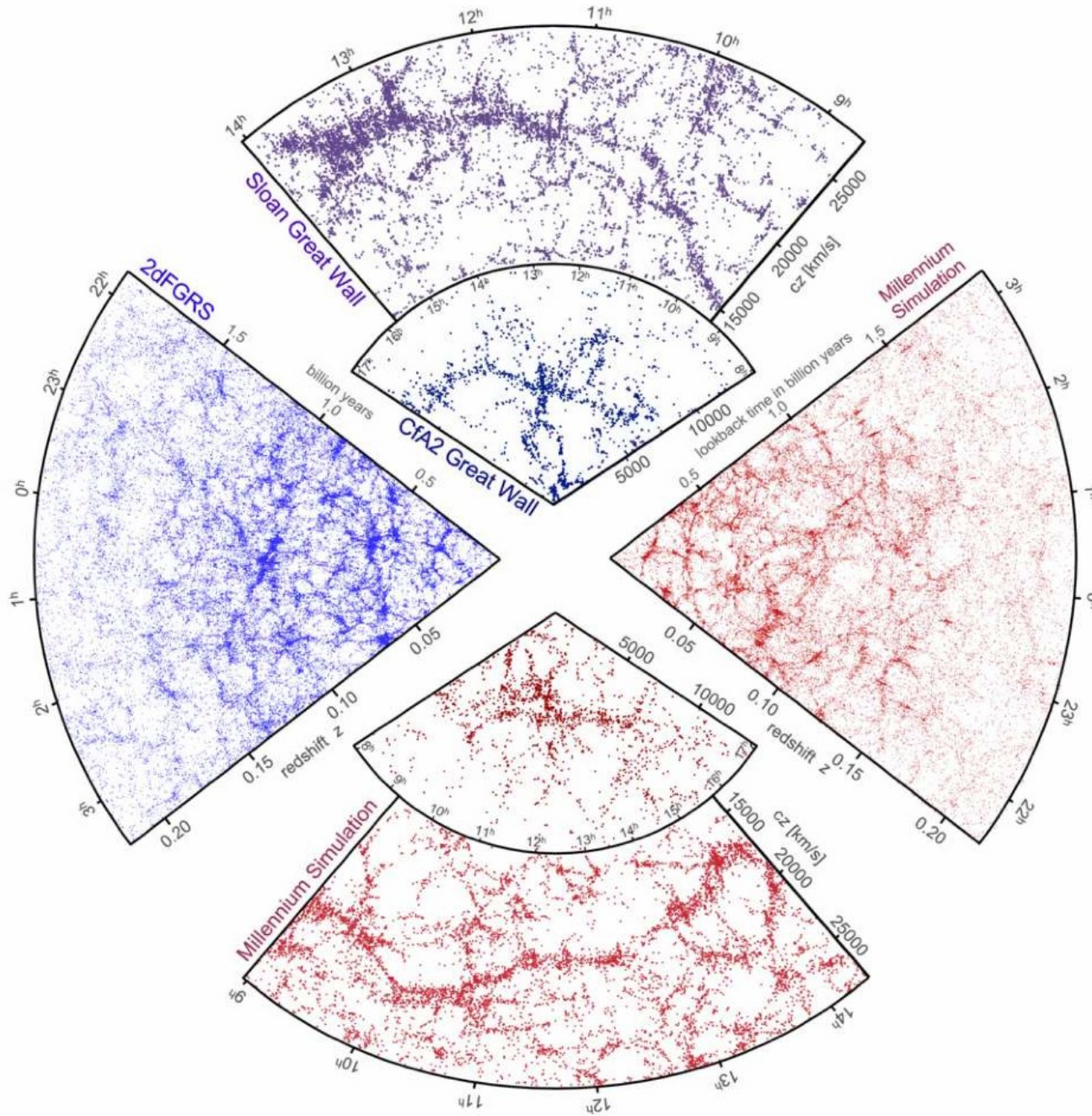
1. generando condiciones inicial

2. haciendo la simulacion



3. analizando los resultados





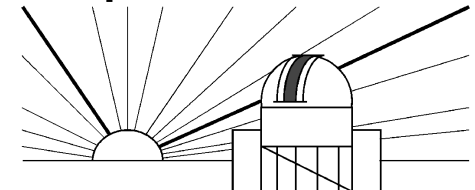
# La historia termico del Universo

Dr. Alexander Knebe

<i>Event</i>	<i>T</i>	<i>kT</i>	<i>z</i>	<i>t</i>
Now	2.7 K	0.0002 eV	0	13 Gyr
First Galaxies	16 K	0.001 eV	5	1 Gyr
Recombination	3000 K	0.3 eV	1100	300,000 yr
Equal $r_M = r_R$	9500 K	0.8 eV	3500	50,000 yr
$e^+ e^-$ pairs	$10^{9.7}$ K	0.5 MeV	$10^{9.5}$	3 s
Nucleosynthesis	$10^{10}$ K	1 MeV	$10^{10}$	1 s
Nucleon pairs	$10^{13}$ K	1 GeV	$10^{13}$	$10^{-6.6}$ s
E-W unification	$10^{15.5}$ K	250 GeV	$10^{15}$	$10^{-12}$ s
Quantum gravity	$10^{32}$ K	$10^{19}$ GeV	$10^{32}$	$10^{-43}$ s

La historia termica del Universo

Grupo de Astrofísica



Universidad Autónoma de Madrid