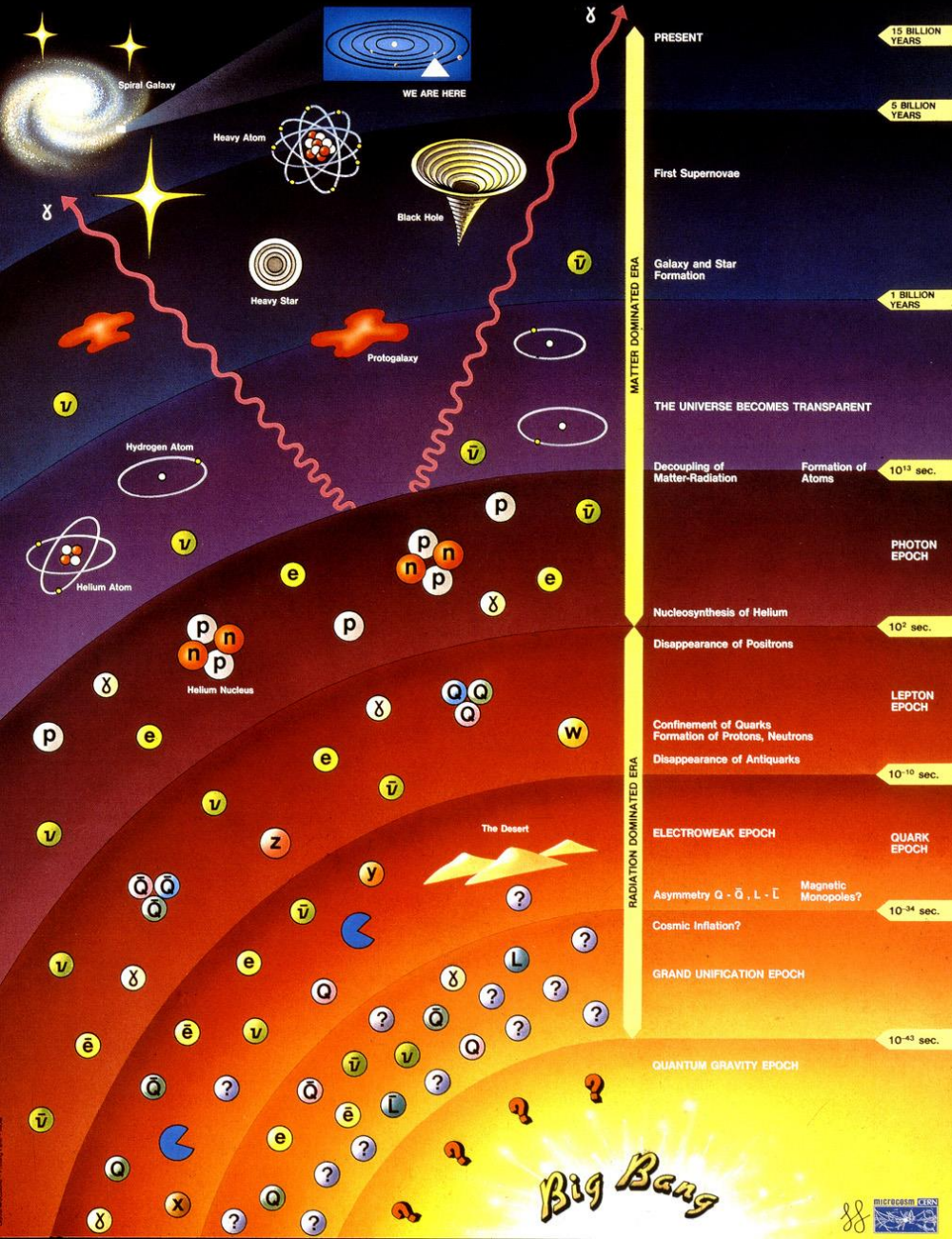


# History of the Universe



# Cours de Cosmologie

## Le Big Bang « classique »

Niveau L2 – L3

Jean-Marc Virey

Centre de Physique Théorique  
Université d'Aix Marseille  
Labex OCEVU

# Plan de l'exposé

## I La Physique Fondamentale moderne :

(les 4 interactions fondamentales et les 3 infinis,  
principe de la démarche scientifique)

## II Cadre Cosmologique :

### Le Modèle Standard de «Big Bang Chaud»

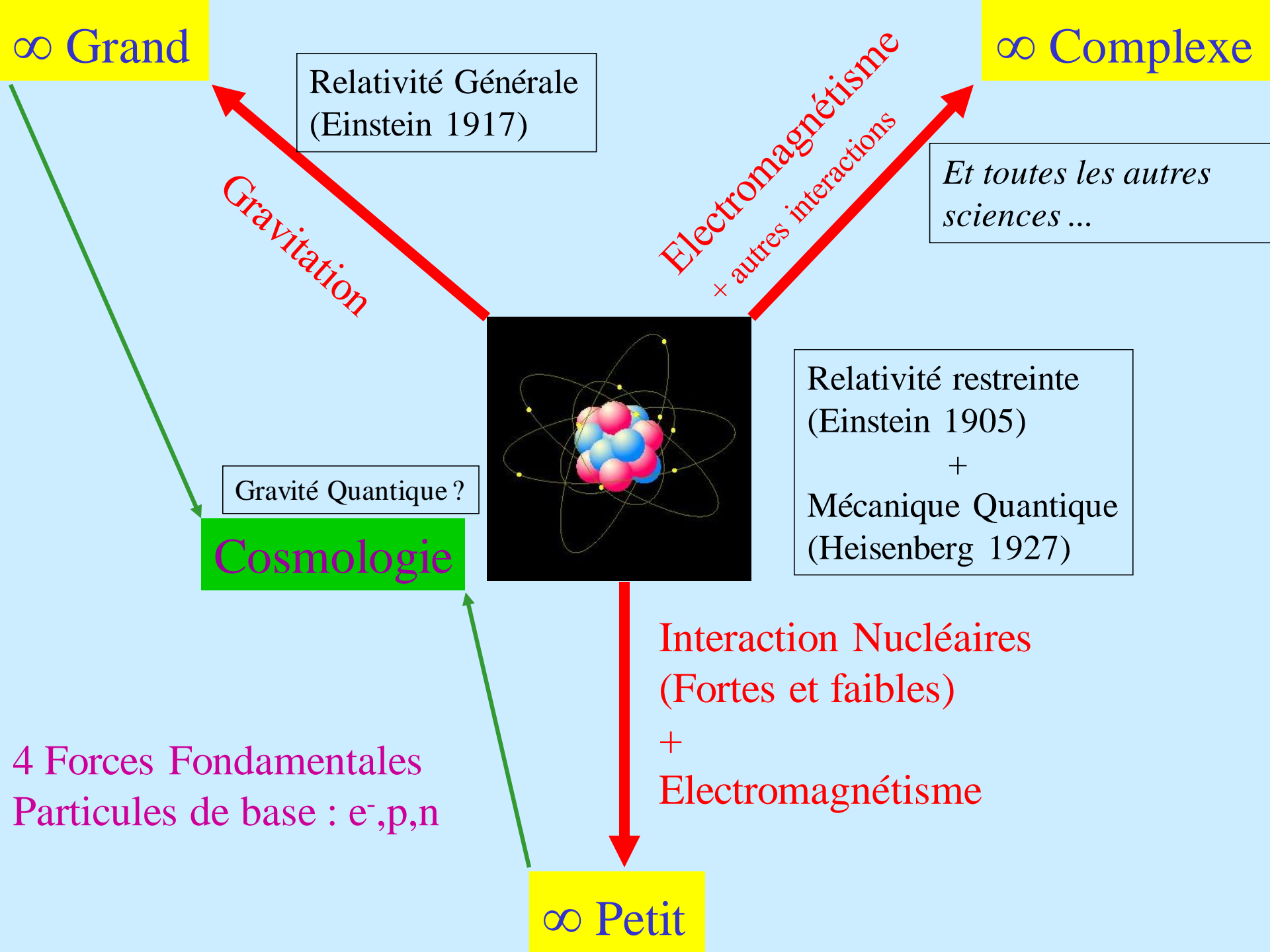
(expansion, nucléosynthèse, CMB, oscillations baryoniques,  
formation des structures, sondes cosmiques)

## III Cadre Mathématique : Les équations

(équations de Friedman et  
conservation de l'énergie dans un univers en expansion)

# I La Physique Fondamentale moderne:

Une vision d'un physicien théoricien



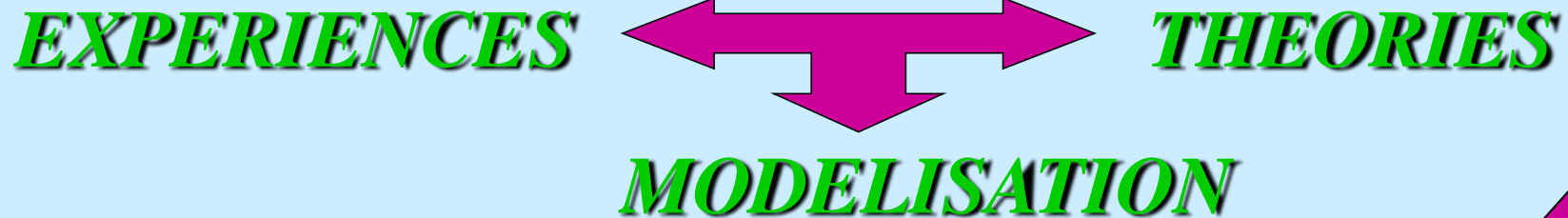
## But de la physique :

- Décrire/Modéliser/Expliquer les phénomènes naturels

« La chose la **plus incompréhensible** du monde **est** que le monde **soit compréhensible** » *Albert Einstein*

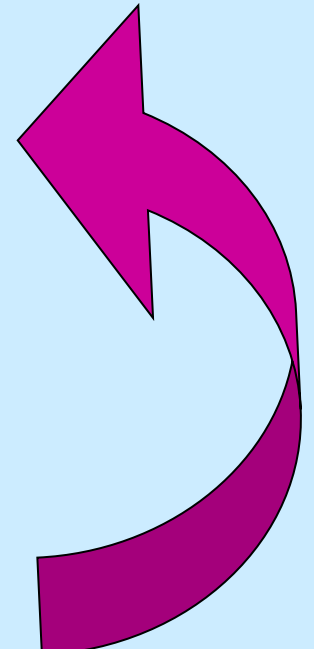
- Expliquer la multiplicité des phénomènes sur la base d'un nombre limité d'hypothèses simples (simplification de la complexité)

## Démarche scientifique :



## Instruments :

- Observations
- Expériences
- Hypothèses et Approximations
- Lois et Modélisation
- Théories (& Principes)
- Prédications
- Esprit critique : Limites/Doutes/Remise en question



# II Cadre Cosmologique :

## Le Modèle Standard

dit de

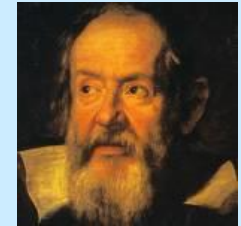
«Big Bang Chaud»

S'appuie sur :

- Le Principe Cosmologique : pas de centre absolu
- Le Principe de Relativité : invariance des lois
- Le Principe d'Universalité de  $c$  : vitesse finie
- Une Théorie de la Gravitation : la Relativité Générale
- La Physique (microscopique et macroscopique)



COPERNIC  
1473- 1543

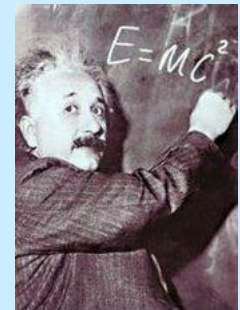


GALILEE  
1564-1642

**COSMOLOGIE** (global) ↔ **PHYSIQUE** (local)

Repose sur 4 piliers observationels:

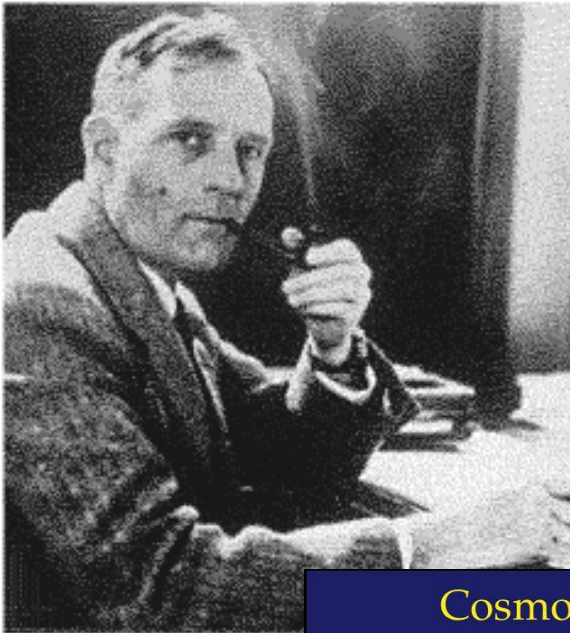
- L'expansion de l'Univers (fuite des galaxies)
- L'abondance des premiers éléments
- Le rayonnement cosmologique fossile ( $T_{\text{CMB}} = 3 \text{ °K}$ )
- Les oscillations baryoniques (anisotropies CMB, formation des structures)



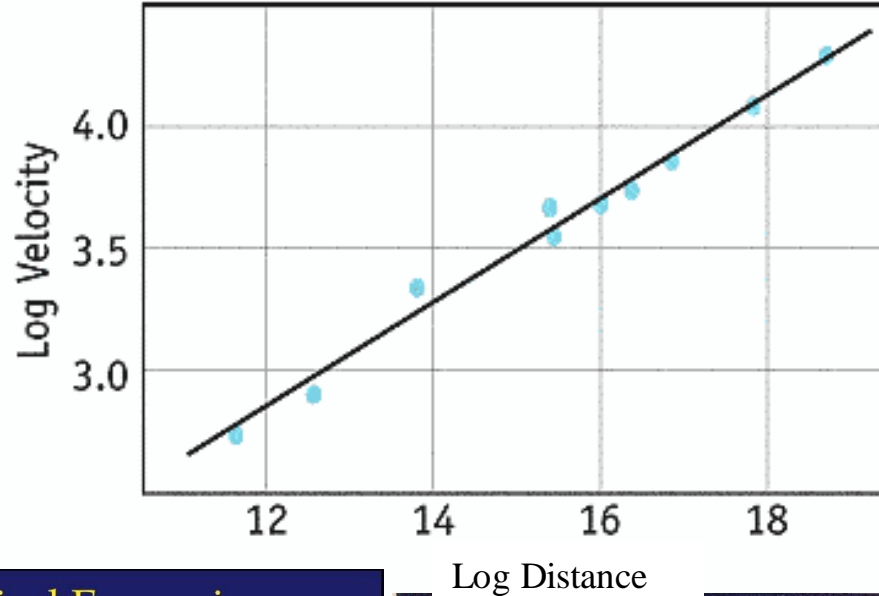
EINSTEIN  
1879-1955

# OBSERVATION DE LA FUITE DES GALAXIES : LA LOI DE HUBBLE

# EXPANSION DE L'UNIVERS !



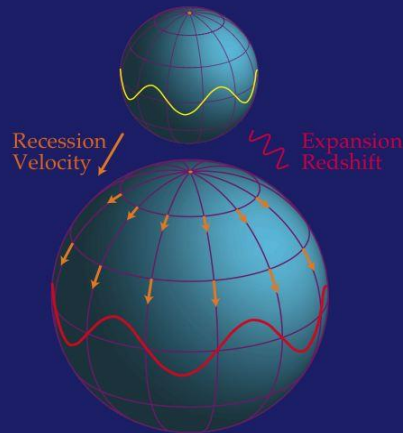
Edwin Hubble



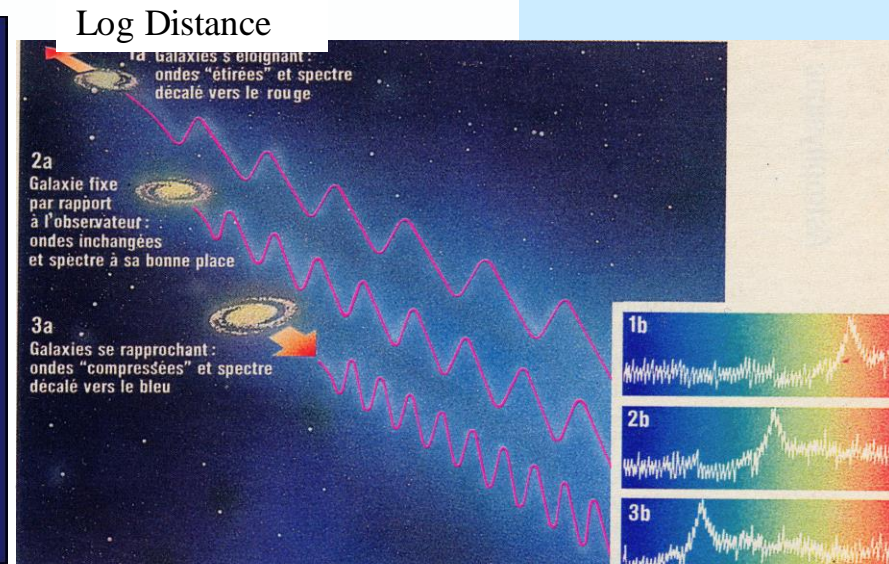
$$V \cong H_0 r$$

$$H_0 = 72 \pm 6 \text{ km/s/Mpc}$$

## Cosmological Expansion



W. Hu





# Pause détente :

## Ordres de grandeur par analyse dimensionnelle

Calculons :

- l'âge de l'Univers (classique) :  $t_U$
- la densité moyenne (critique) :  $\rho_U$
- la taille de l'Univers (observable) :  $R_U$
- la masse de l'Univers :  $M_U$
- le nombre de galaxies de l'Univers :  $N_{g/U}$

# Nucléosynthèse Primordiale

Cadre : expansion +  
physique nucléaire

Prédictions :

→ Abondance élts légers :

H(80%),  $^4\text{He}$ (20%), D( $10^{-4}$ ),  
 $^3\text{He}$ ( $10^{-5}$ ),  $^7\text{Li}$ ( $10^{-9}$ )

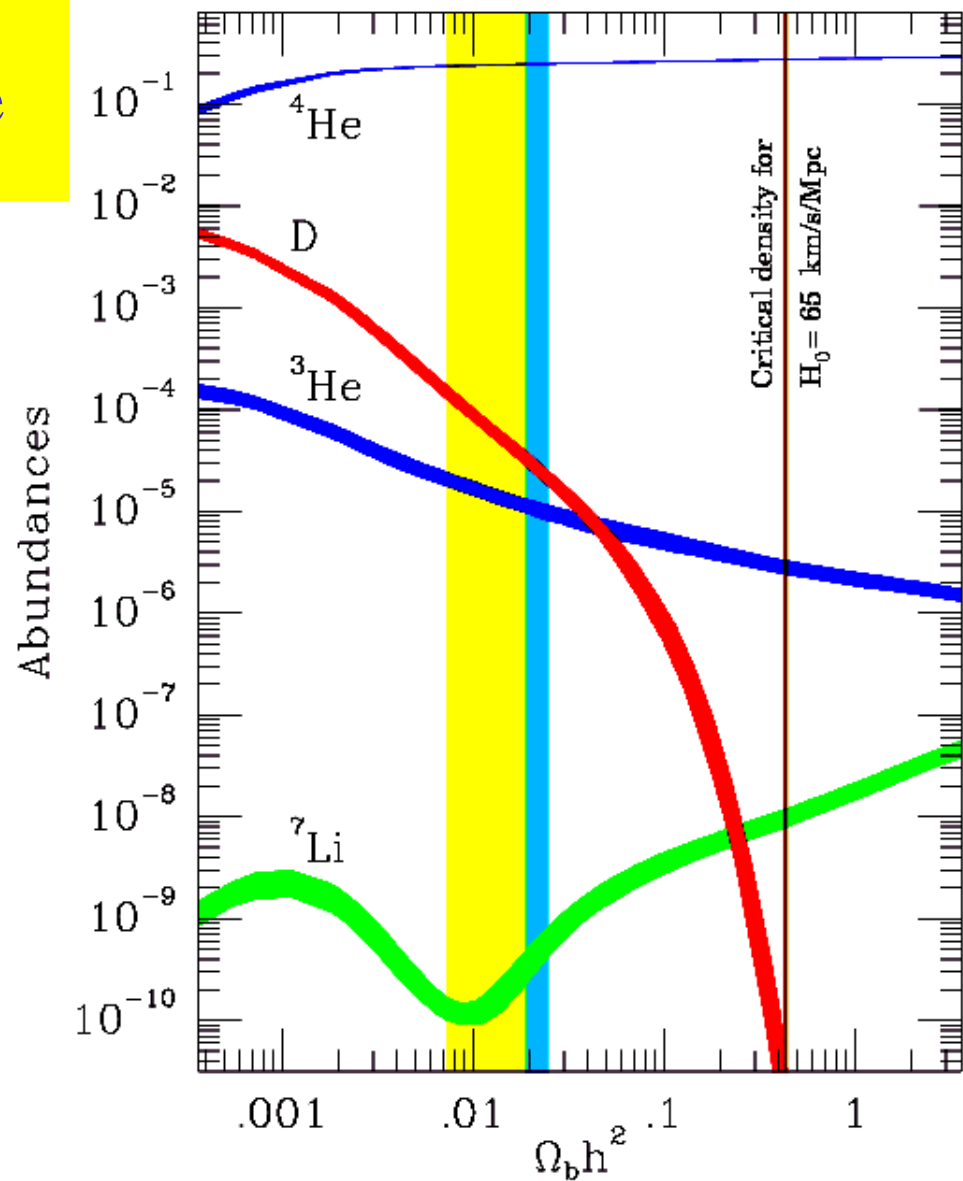
→ rapport photon/baryon :

$$\Omega_\gamma / \Omega_b \approx 10^{10}$$

→ peu de baryons :

$$\Omega_b / \Omega_T \ll 1$$

$$\Omega_b \cong 4-5 \%$$



# PERIODIC TABLE Atomic Properties of the Elements

**NIST Big Bang**  
National Institute of Standards and Technology  
Technology Administration, U.S. Department of Commerce

**Frequently used fundamental physical constants**

For the most accurate values of these and other constants, visit [physics.nist.gov/constants](http://physics.nist.gov/constants)

1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of  $^{133}\text{Cs}$

speed of light in vacuum	$c$	299 792 458 m s <sup>-1</sup>	(exact)
Planck constant	$h$	6.6261 × 10 <sup>-34</sup> J s	( $h = h/2\pi$ )
elementary charge	$e$	1.6022 × 10 <sup>-19</sup> C	
electron mass	$m_e$	9.1094 × 10 <sup>-31</sup> kg	
proton mass	$m_p$	1.6726 × 10 <sup>-27</sup> kg	
neutron mass	$m_n$	1.6749 × 10 <sup>-27</sup> kg	
Rydberg constant	$R_\infty$	10 973 732 m <sup>-1</sup>	
$R_\infty c$		3.289 842 × 10 <sup>15</sup> Hz	
$R_\infty hc$		13.6057 eV	
Boltzmann constant	$k$	1.3807 × 10 <sup>-23</sup> J K <sup>-1</sup>	

- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

Group 1 IA		Group 2 IIA		Transition Metals										Main Group Elements					
Group 13 IIIA		Group 14 IVA		Group 15 VA		Group 16 VIA		Group 17 VIIA		Group 18 VIIIA									
1 H	2 He	3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
55 Cs	56 Ba	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn			
87 Fr	88 Ra	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uuu	112 Uub	114 Uuq	116 Uuh							
Lanthanides		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
Actinides		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

**ETIOPIA**

Atomic Number: 58  
Ground-state Level:  $1G_4$   
Symbol: Ce  
Name: Cerium  
Atomic Weight: 140.116  
Ground-state Configuration:  $[Xe]4f15d6s^2$   
Ionization Energy (eV): 5.5387

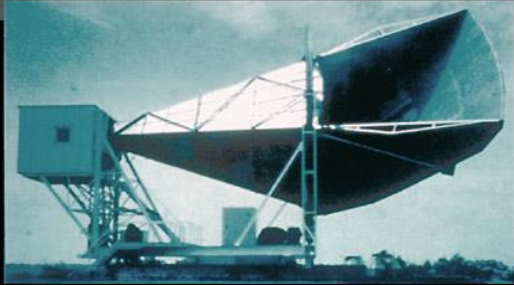
<sup>†</sup>Based upon  $^{12}\text{C}$ . () indicates the mass number of the most stable isotope.

For a description of the data, visit [physics.nist.gov/data](http://physics.nist.gov/data)

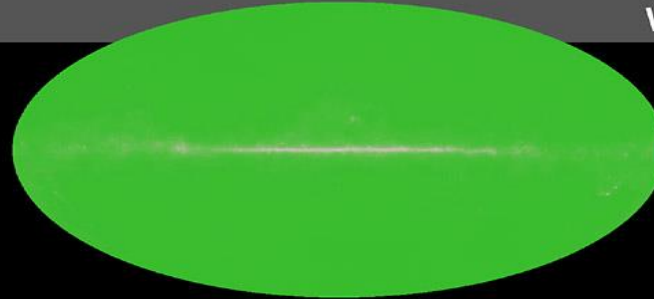
**Supernovae**

# OBSERVATION DU RAYONNEMENT A $T = 3$ K FOSSILE DES PHASES TRES CHAUDES DE L'UNIVERS

1965



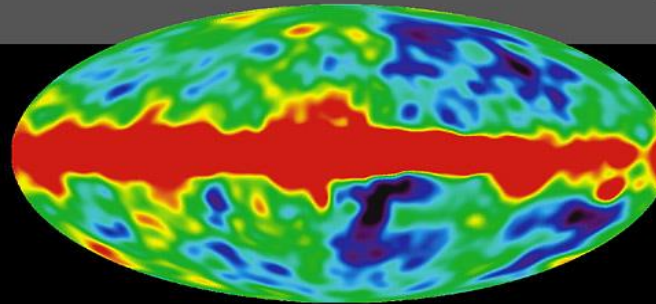
Penzias and  
Wilson



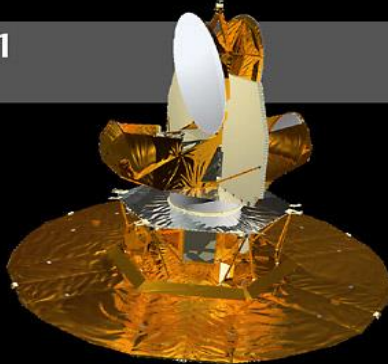
1992



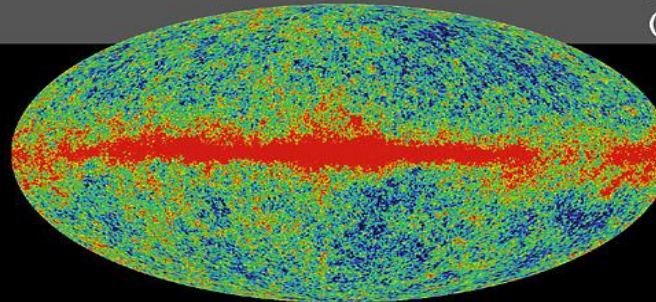
COBE



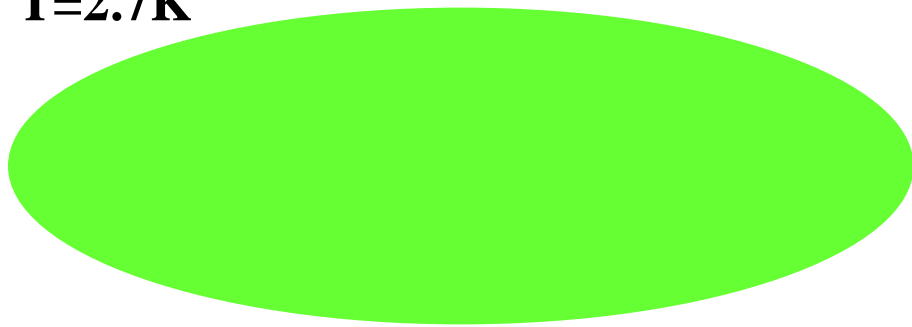
2001



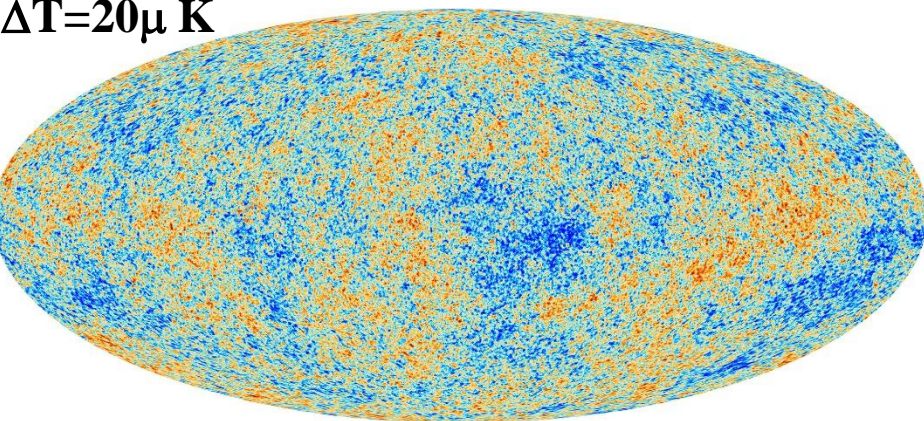
MAP  
(Simulated)



T=2.7K



ΔT=20μ K

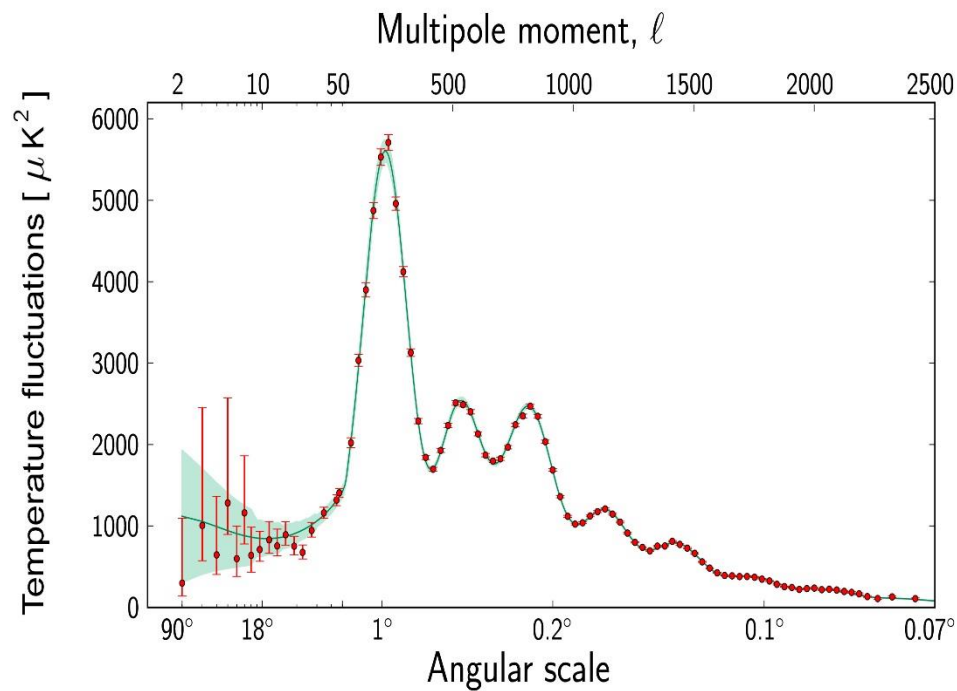
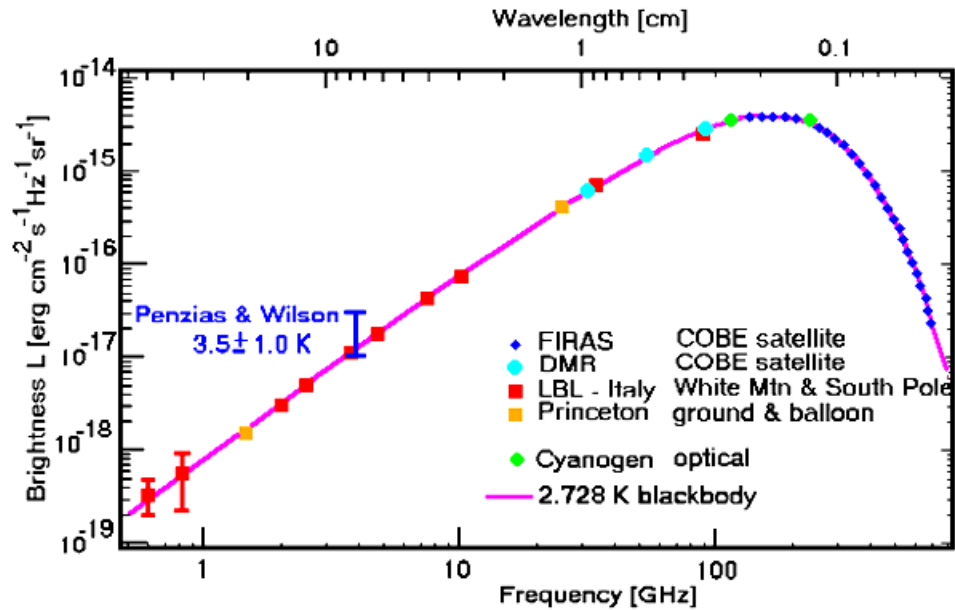


Spectre :

$$\rho_{\gamma} = \frac{\pi^2}{15} T^4$$

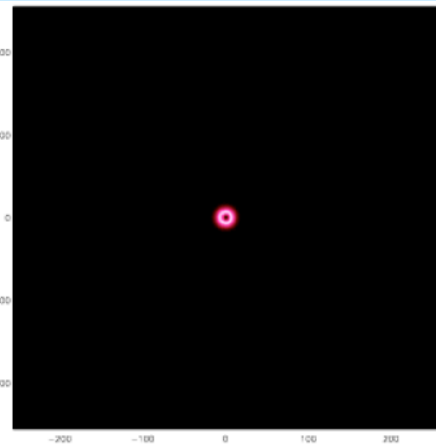
Fluct. Primordiales

Anisotropies : Géométrie  
Physique

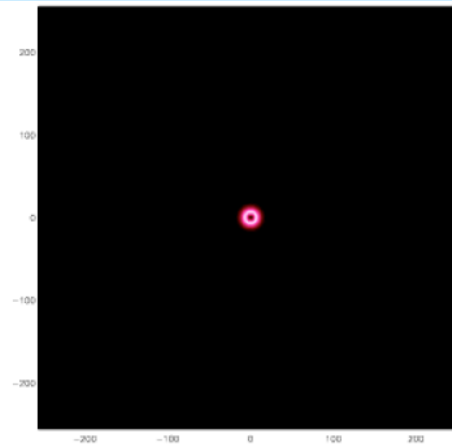


# Les ondes acoustiques (baryoniques) primordiales

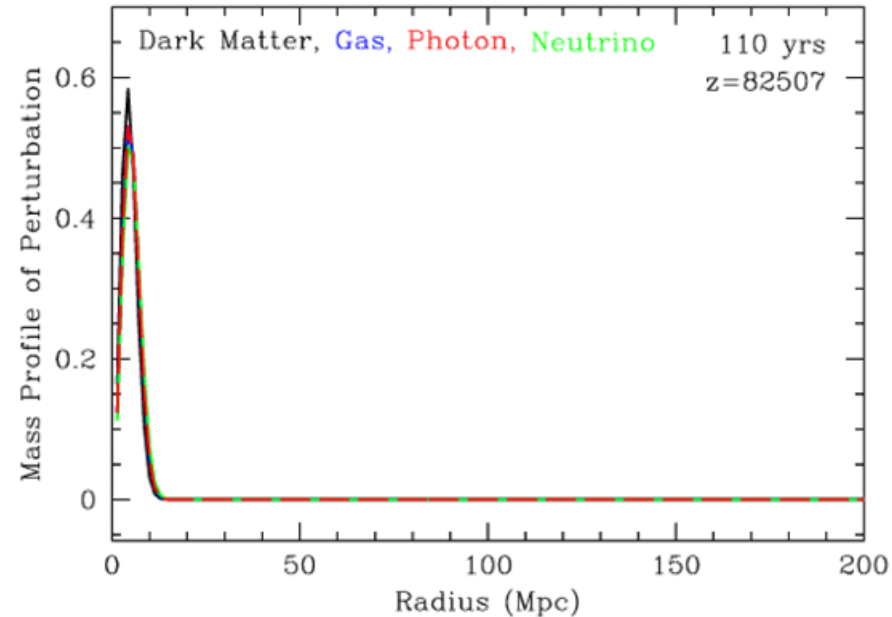
Etape 1 : condition initiale : une (des) perturbation(s) de densité



Baryons



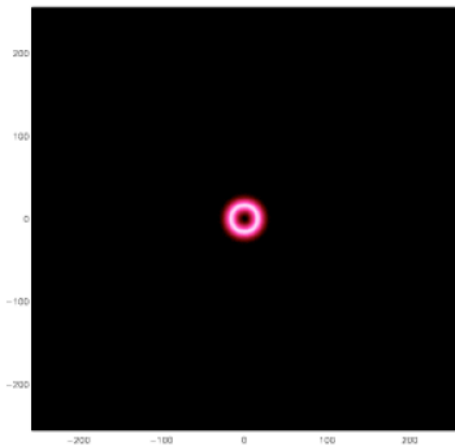
Photons



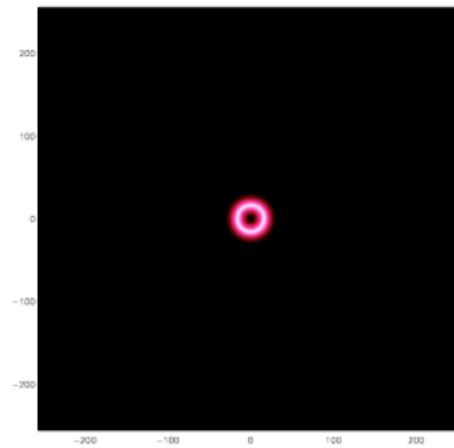
\* plasma primordial homogène sauf un léger excès de matière à l'origine

\* forte pression pousse  $\gamma+b+e+\nu$  loin de l'origine à  $c_s \approx c/\sqrt{3}$

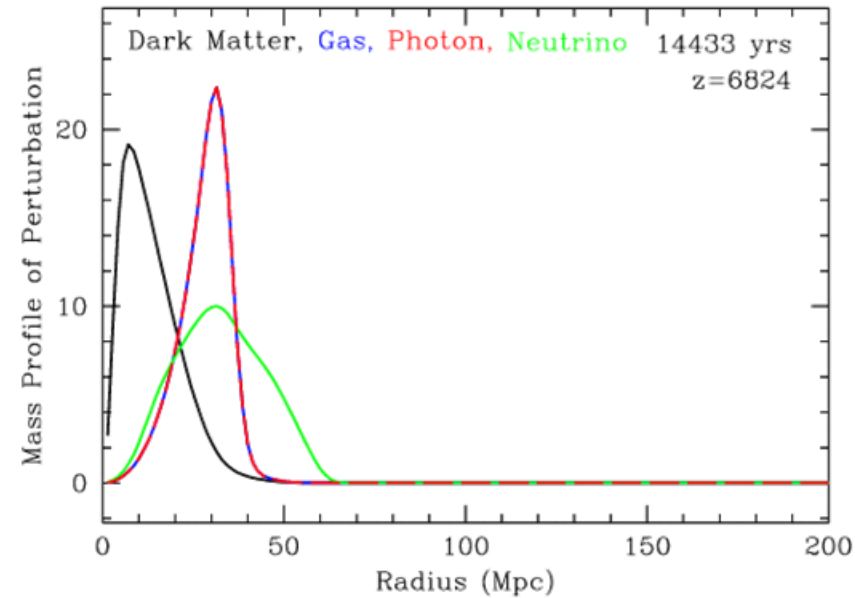
## Etape 2 : propagation avant découplage



Baryons

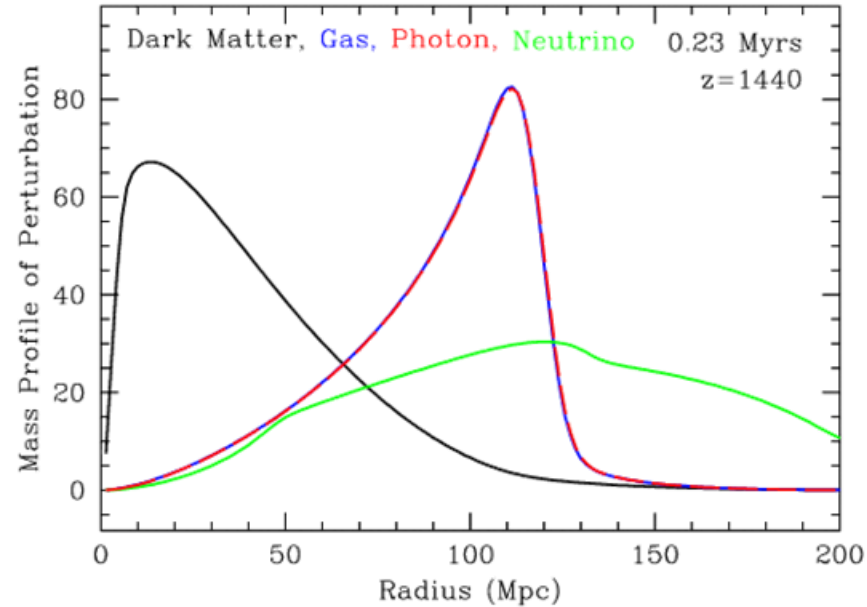
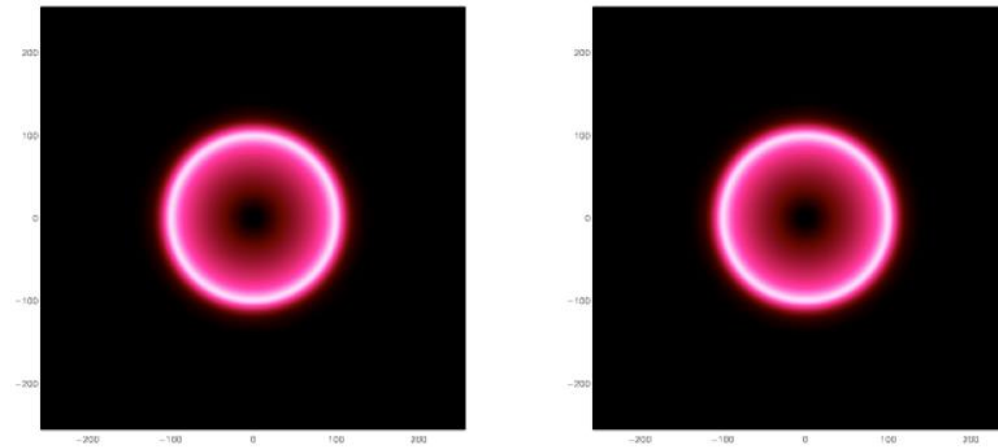


Photons



- \* Propagation initiale : gaz(=b+e) +  $\gamma$  se déplacent simultanément
- \* DM et  $\nu$  ne couplent pas (peu) au gaz ou au  $\gamma$
- \* Les  $\nu$  sont relativistes  $\Rightarrow$  propagation à vitesse  $c$
- \* DM sans pression  $\Rightarrow$  reste au centre (ou presque ...)

# Etape 3 : propagation avant découplage dure $4 \cdot 10^5$ ans !



$$l_{dec} \approx c_s t_{dec} = c / \sqrt{3} 4 \cdot 10^5 t_{1an} \approx 3 \cdot 10^5 AL$$

$$l_0 \approx \frac{a_0}{a_{dec}} l_{dec} \approx 10^3 l_{dec} \approx 100 \text{ Mpc}$$

(Horizon sonore)

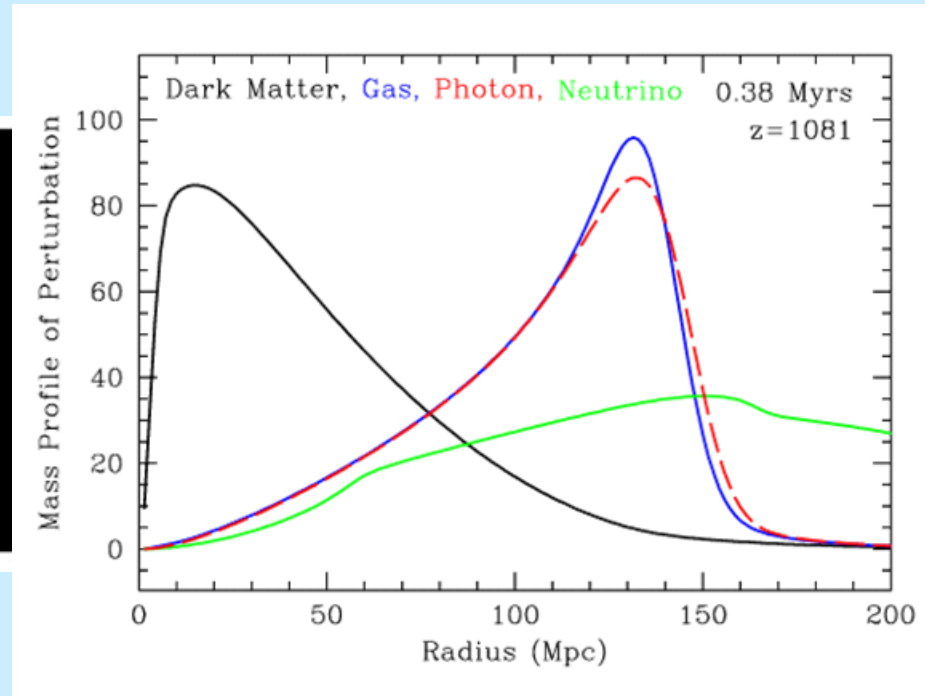
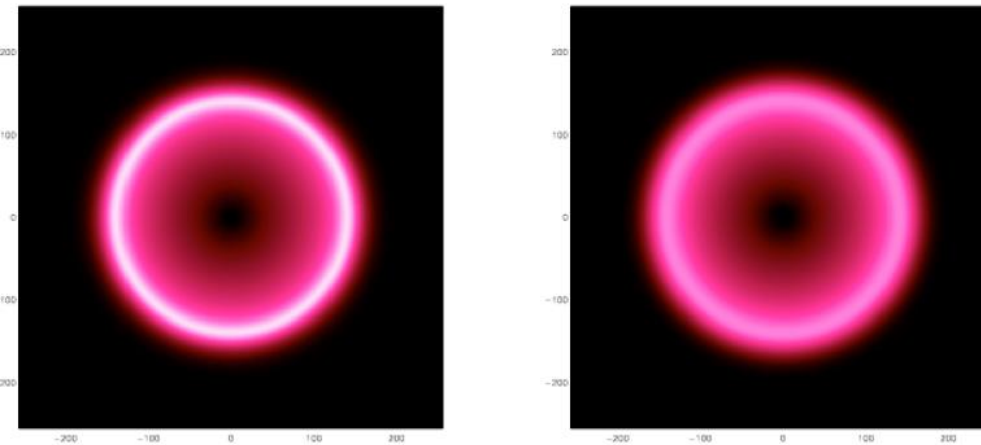
Le découplage n'est pas instantané =>

$$l_0 \approx 150 \text{ Mpc}$$



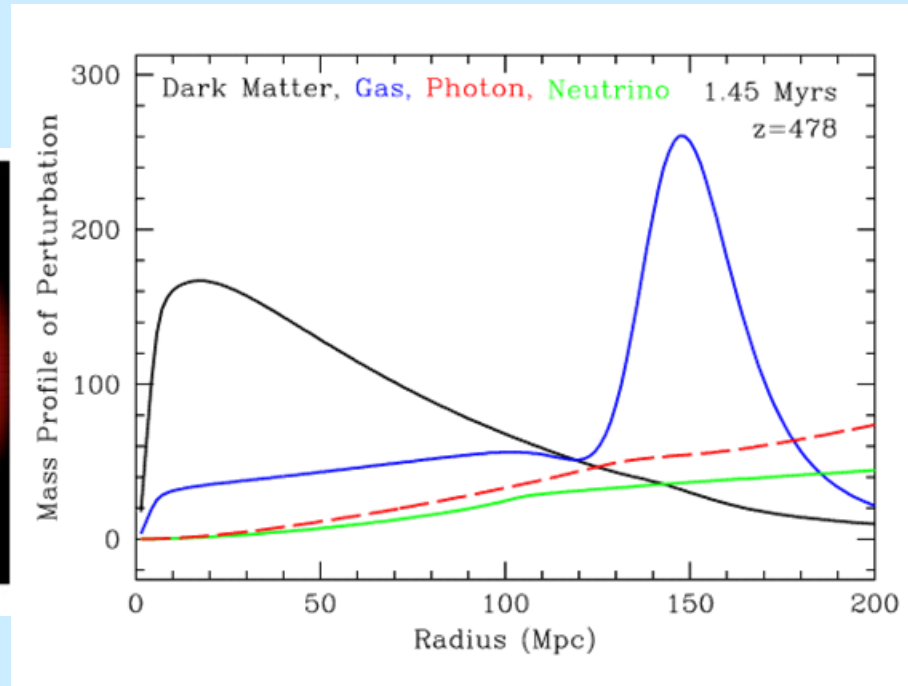
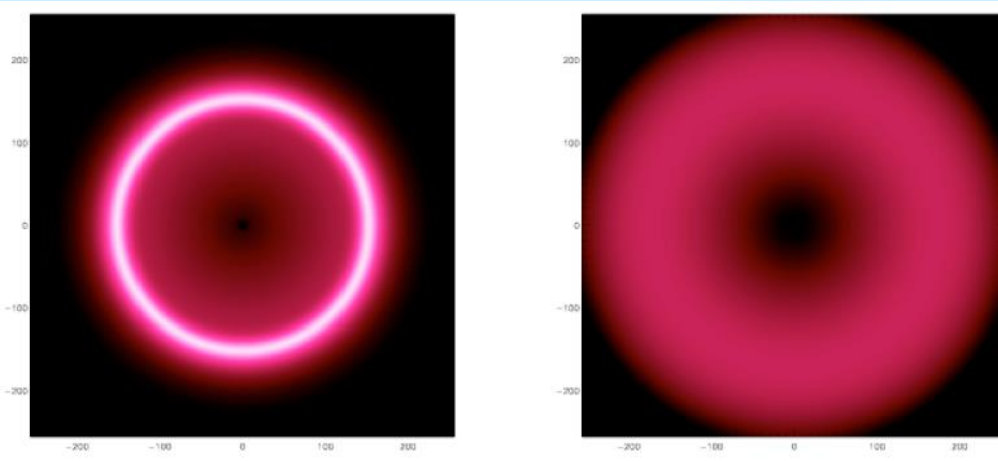
## Etape 4 : Découplage !!

Le CMB est né !!



- \* Découplage : les baryons capturent les e : phase neutre
- \* Les photons  $\gamma$  se découplent des baryons  $\Rightarrow$  propagation libre
- \* Les baryons (atomes) ont une pression nulle  $\Rightarrow$  déplacement s'arrête

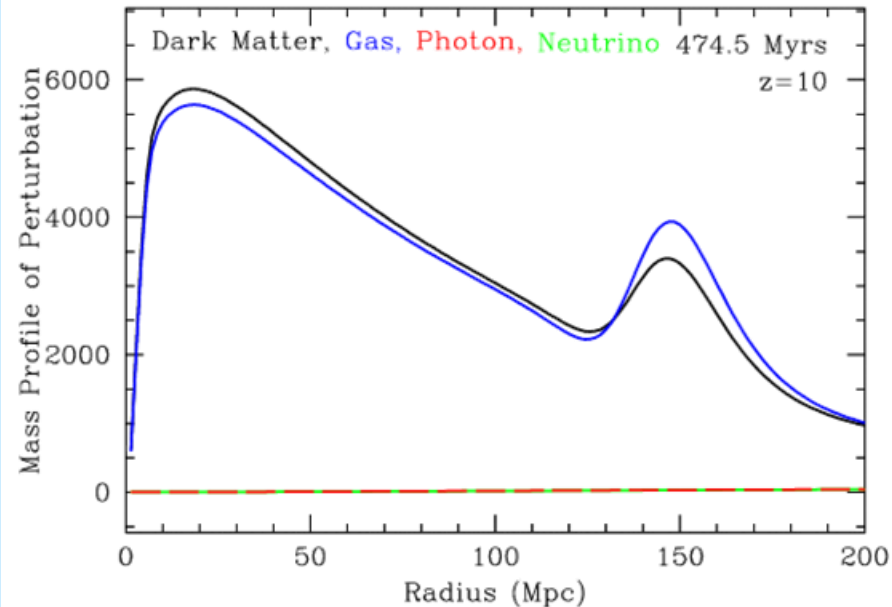
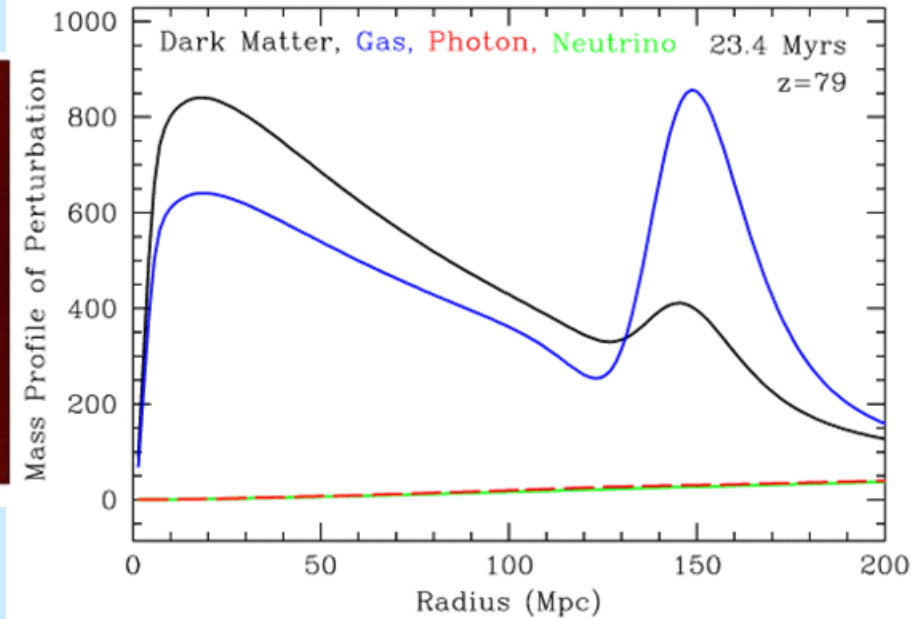
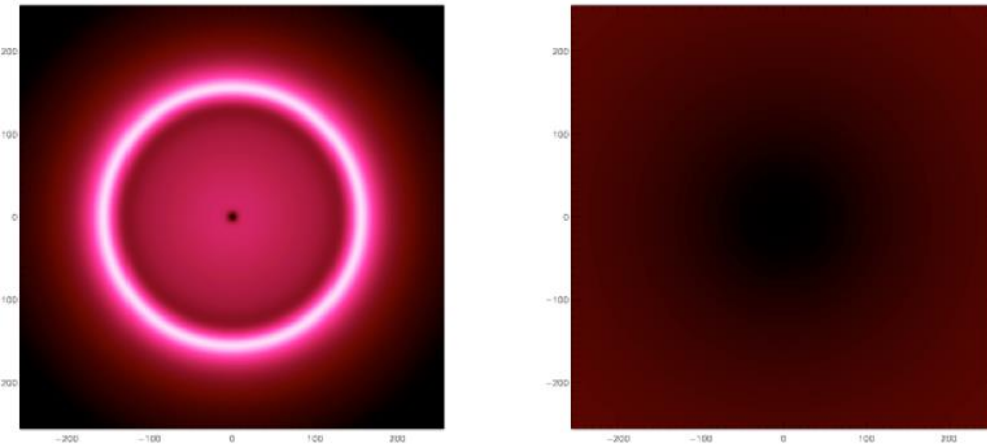
# Etape 5 : Propagation libre des photons + croissance perturbation densité



\* Les photons diffusent dans le milieu : homogénéisation

\* Les baryons forment un pic de densité à «150 Mpc» de la densité initiale de matière noire

# Etape 6 : Action de la gravité pendant 500 millions d'années

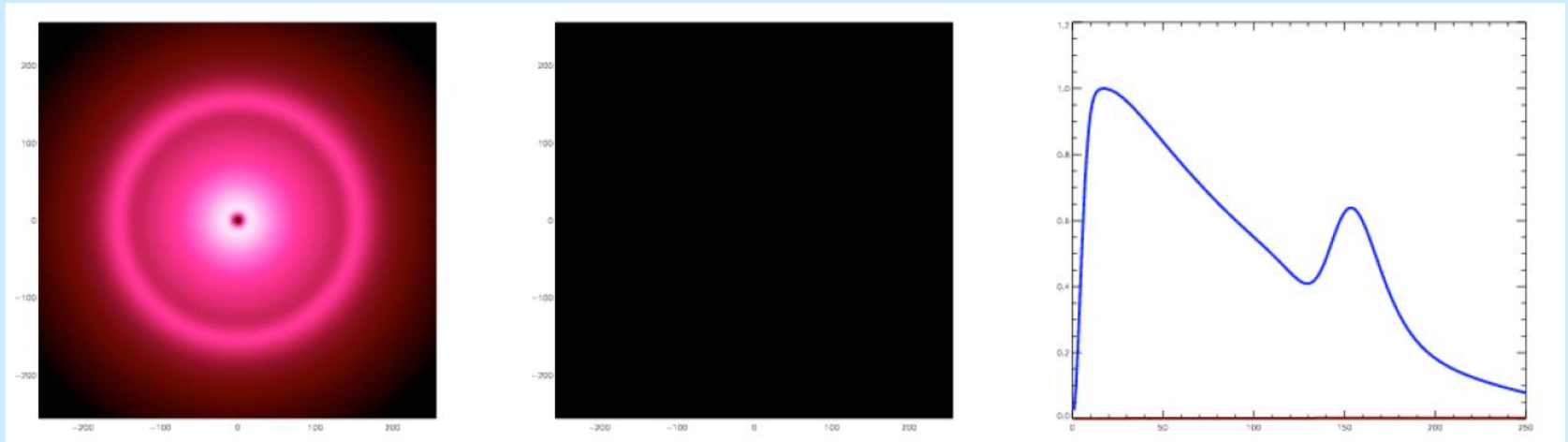


Les  $\gamma$  sont quasiment uniformes

Le pic de DM initial attire les baryons

Le pic de baryons attire de la DM

## Etape 7 : Aujourd'hui après 14 milliards d'années



Baryons et DM ont atteint leurs densités d'équilibre dans le rapport  $\Omega_b / \Omega_M$

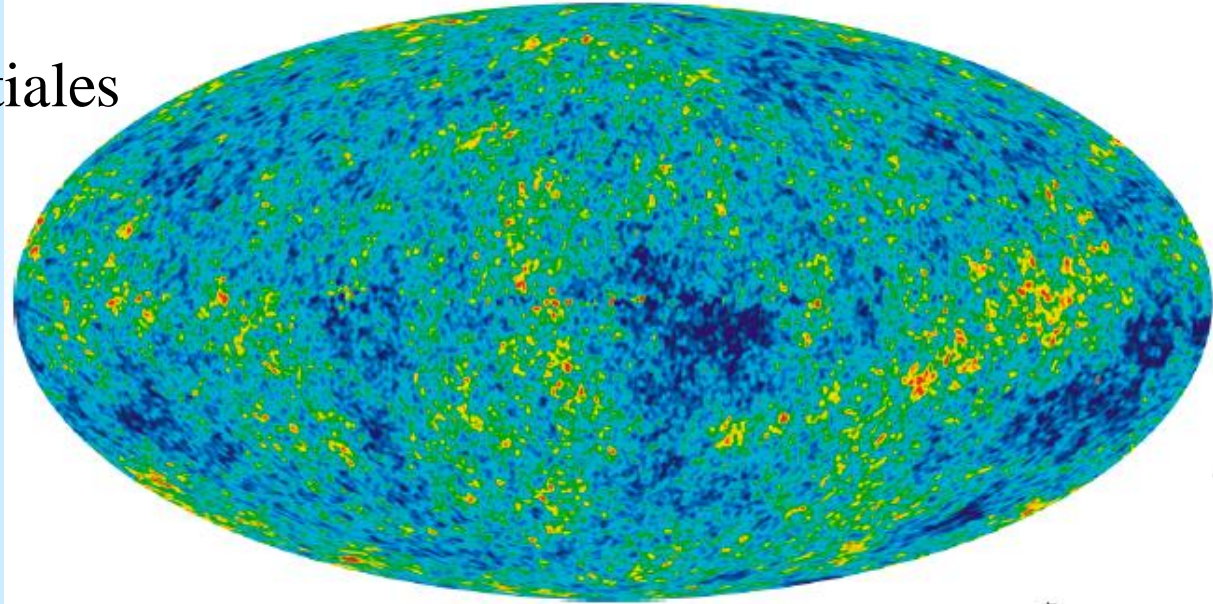
Configuration finale : pic initial + écho à 150 Mpc

Formation des galaxies : phénomène local ( $<10$  Mpc)

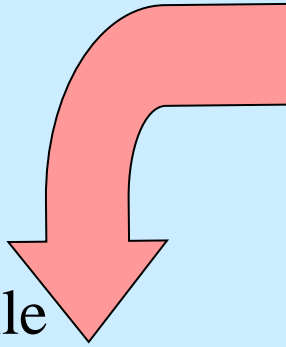
=> les évolutions ultérieures des deux pics sont découplées

# La formation des structures : Observations

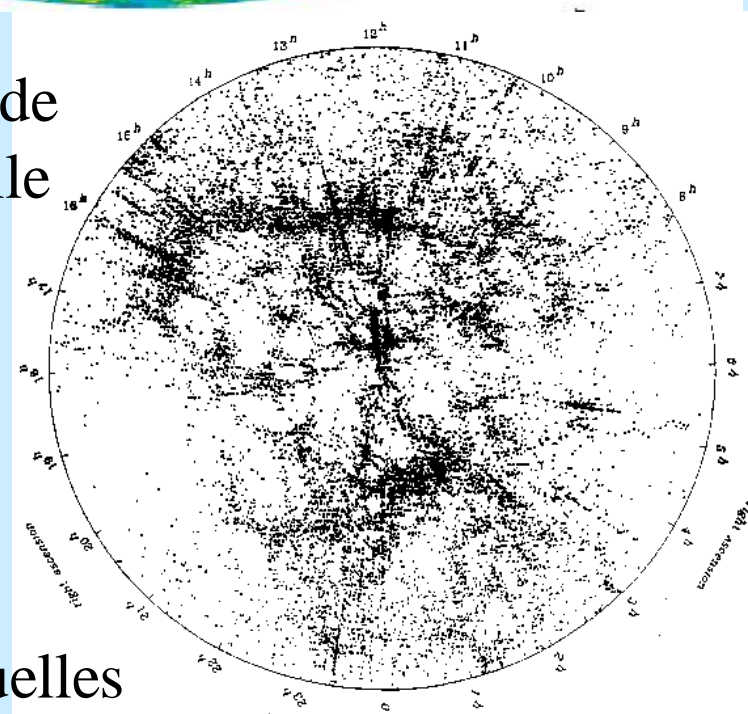
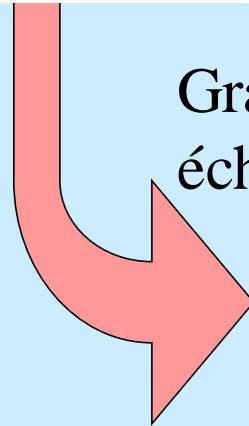
Conditions initiales



«Petite» échelle

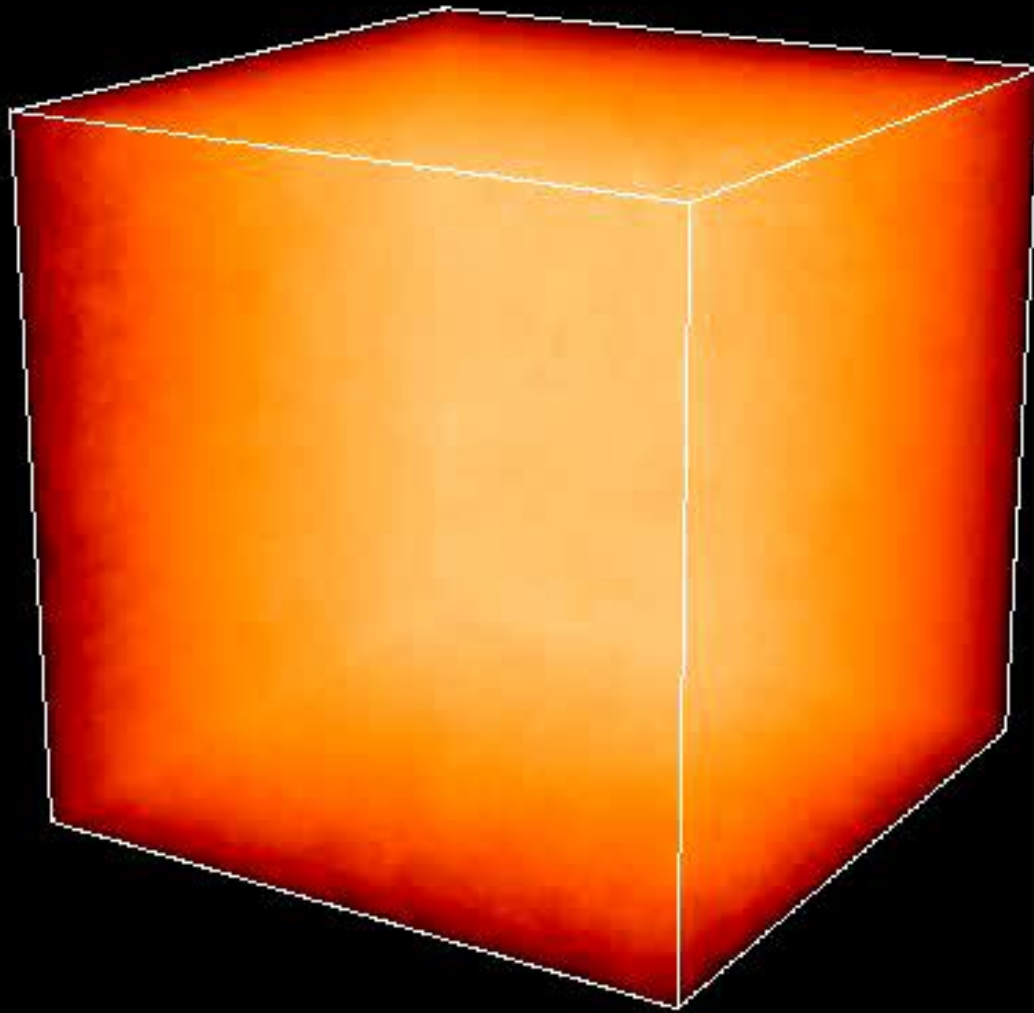


Grande  
échelle

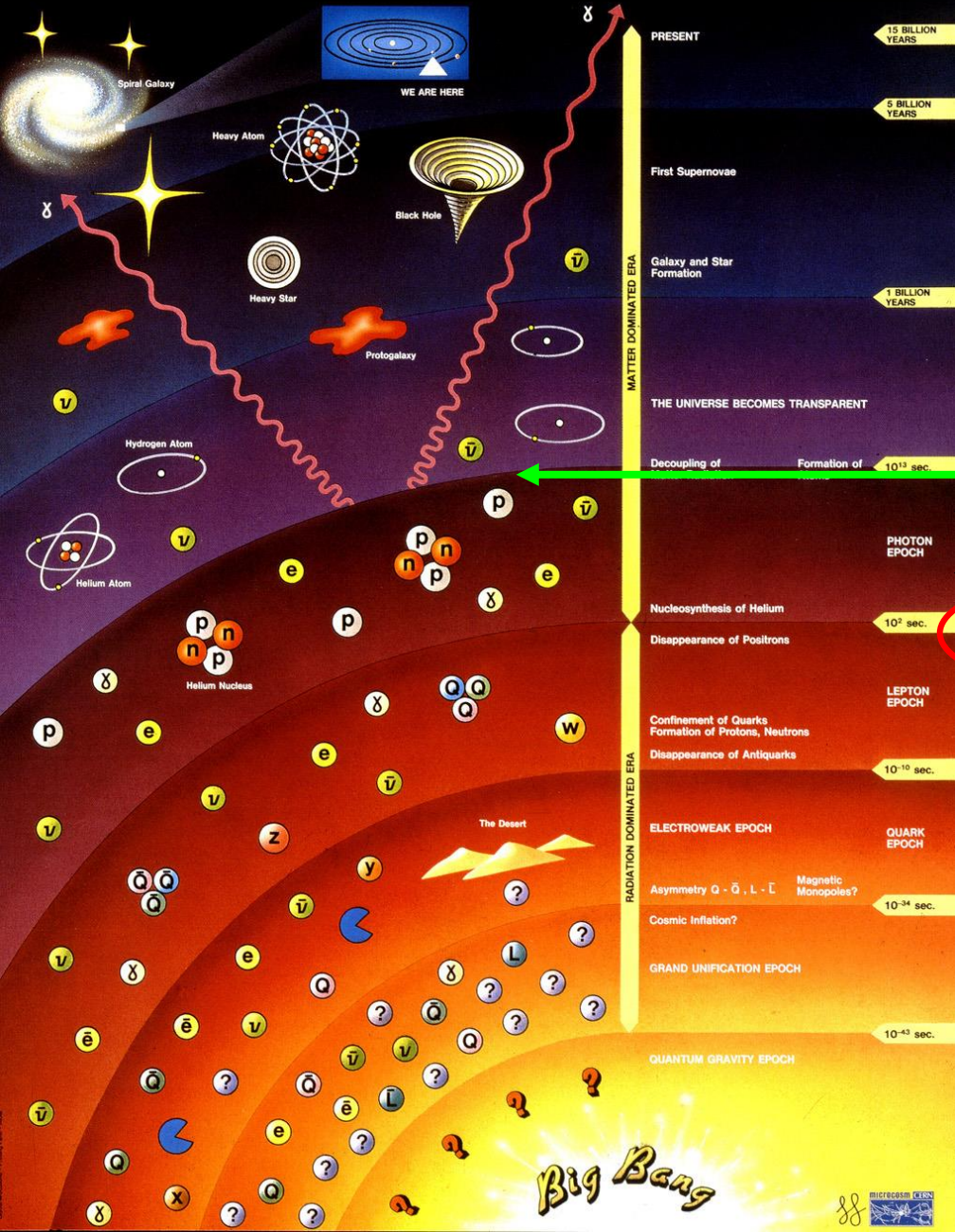


Situations actuelles

# La formation des structures : Simulations



# History of the Universe



Formation structures

recombinaison

BAO

nucléosynthèse

inflation ?

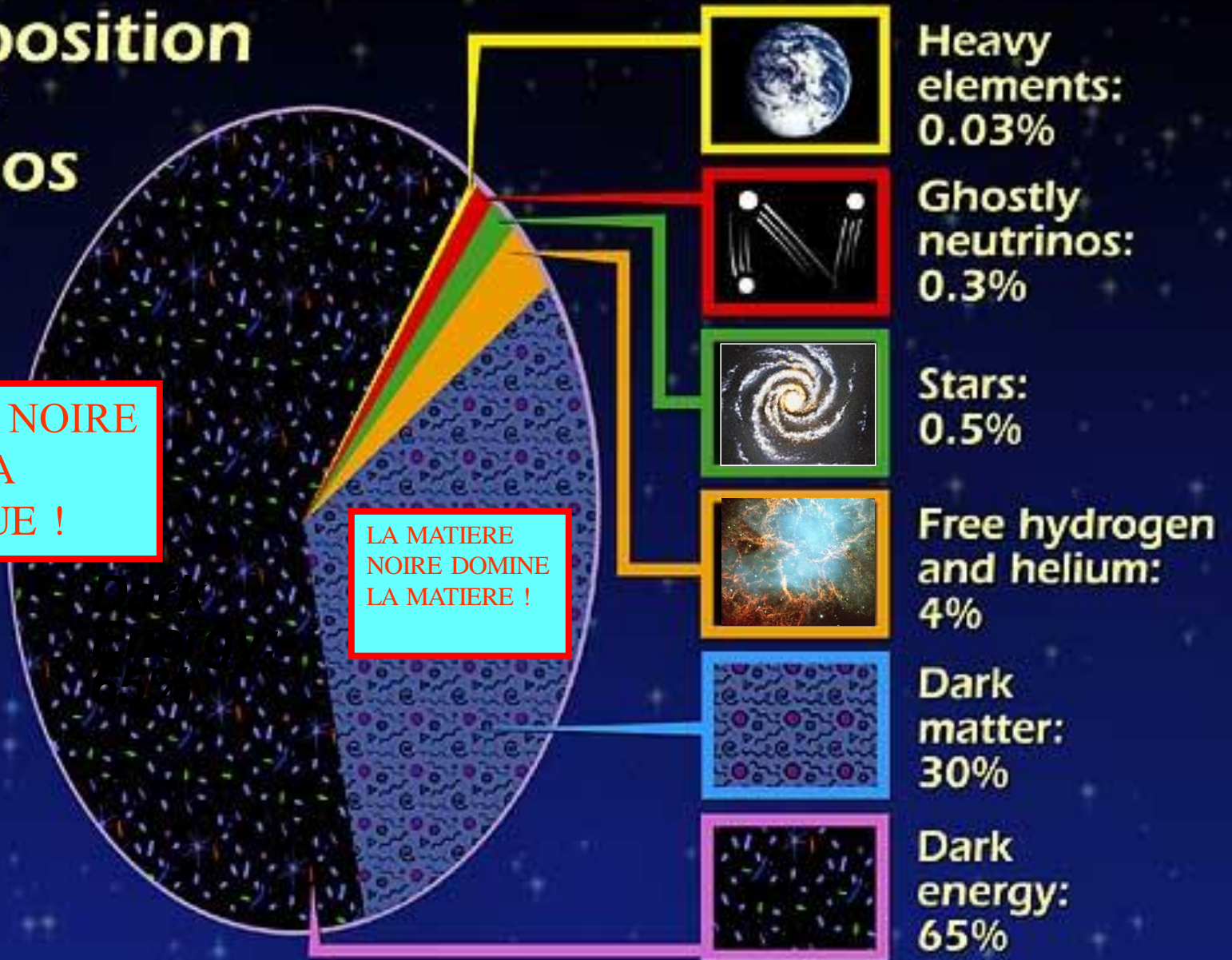
Gravité quantique ?

# Energy budget of Universe

## Composition of the Cosmos

L'ENERGIE NOIRE  
DOMINE LA  
DYNAMIQUE !

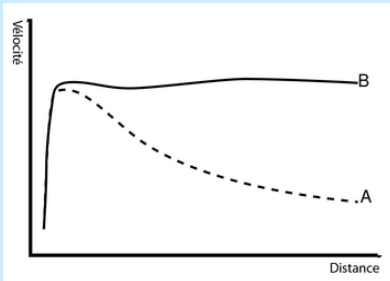
LA MATIERE  
NOIRE DOMINE  
LA MATIERE !





# Matière Noire : Observations

⇒ Galaxies :



➤ rotation des étoiles (Rubin 1970)

➤ *forme des galaxies spirales (débat)*  
(Peebles – Ostriker 1970)

⇒ Amas de Galaxies :

➤ dynamique des galaxies (Zwicky 1931)

➤ effet de lentille gravitationnelle

⇒ Structure à grande échelle : ➤ formation des structures (Peebles 1980)

➤ sondes cosmiques (CMB, BAO, SNIa)

# Matière Noire : Interprétations

⇒ Matière ordinaire : MACHO (Massive Compact Halo Objects)

Défavorisé : pas assez d'objets détectés

⇒ Nouvelle forme de Matière : WIMPs  
(Weakly Interactive Massive Particles)

Toujours aucune détection

⇒ Nouvelle théorie : ex. MOND (MOdified Newtonian Dynamics)

existence d'une accélération limite :  $a_0 = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$

fonctionne à l'échelle des galaxies

# Energie Noire : Observations

2 phénomènes s'opposent : Expansion vs Gravitation

Conclusion : l'expansion doit décélérer

Observations des SNIa1998 : l'expansion accélère (prix Nobel 2011)

Conclusion :

La dynamique de la matière est dominée par une force répulsive :

L'énergie noire !

# Energie Noire : Interprétations

Il existe une nouvelle composante dans l'Univers :

- ⇒ La constante cosmologique
- ⇒ L'énergie du vide (quantique)
- ⇒ Une nouvelle force : La Quintessence ( $F \sim r$ )

Notre interprétation est fausse / nos équations ne fonctionnent plus :

- ⇒ La Gravitation est modifiée à grande échelle
- ⇒ La relativité générale ne fonctionne plus
- ⇒ Le principe cosmologique/ principe de Copernic n'est pas valable

# III Cadre Mathématique :

## Les Equations

# Théorie

Etape 1: Description du Fond/Expansion dynamique (depuis 1920)

Expansion + Homogénéité/Isotropie + Relativité Générale

Cinématique

Dynamique

Etape 2: Description des inhomogénéités/Dyn. Perturbations (depuis 1970-85)

Observations : « 3 » types de tests

→ Tests «Géométriques» : mesures de distances (et  $H(z)$  directement ...)

→ Tests «Dynamiques» : mesures croissance perturbations de densités

→ Tests «Statistiques» : distributions statistiques des observations

# Equations à la base de la cosmologie :

## Expansion de fond

Friedmann 1

$$H^2(z) = (\dot{a}/a)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_T - \frac{k}{a^2}$$

$$\Omega_T + \Omega_k = 1$$

$$\Omega_k = -k/a^2 H^2$$

$$\rho_c(z) = 3H^2(z)/8\pi G$$

$$\Omega_i(z) = \rho_i(z)/\rho_c(z)$$

$$\rho_T = \sum_{i=M,R,X} \rho_i$$

$$\Omega_T = \Omega_M + \Omega_R + \Omega_X$$

$$w_i = P_i/\rho_i$$

Conservation énergie :

$$\rho_i(z) = \rho_i^0 (1+z)^3 e^{3 \int_0^z w_i(z') d \ln(1+z')}$$

$$\dot{\rho}_i + 3H\rho_i(1+w_i) = 0$$

$$E(z)^2 = (H(z)/H_0)^2 = \Omega_M^0 (1+z)^3 + \Omega_R^0 (1+z)^4 + \Omega_k^0 (1+z)^2 + \Omega_X^0 (1+z)^3 e^{3 \int_0^z w_X(z') d \ln(1+z')}$$

Friedmann 2

$$\ddot{a}/a = -\frac{4\pi G}{3} (\rho_T + 3P_T)$$

$$P_T \sim P_X$$

$$\rho_T \sim \rho_M + \rho_X$$

$$q(z) = -\ddot{a}/aH^2 = \frac{\Omega_T}{2} (1+3w_T) = \frac{\Omega_T}{2} + \frac{3}{2} w_X \Omega_X$$

## Le redshift

$$1+z = a_0/a = \lambda_0/\lambda$$

$z = v/c$  (classique)

