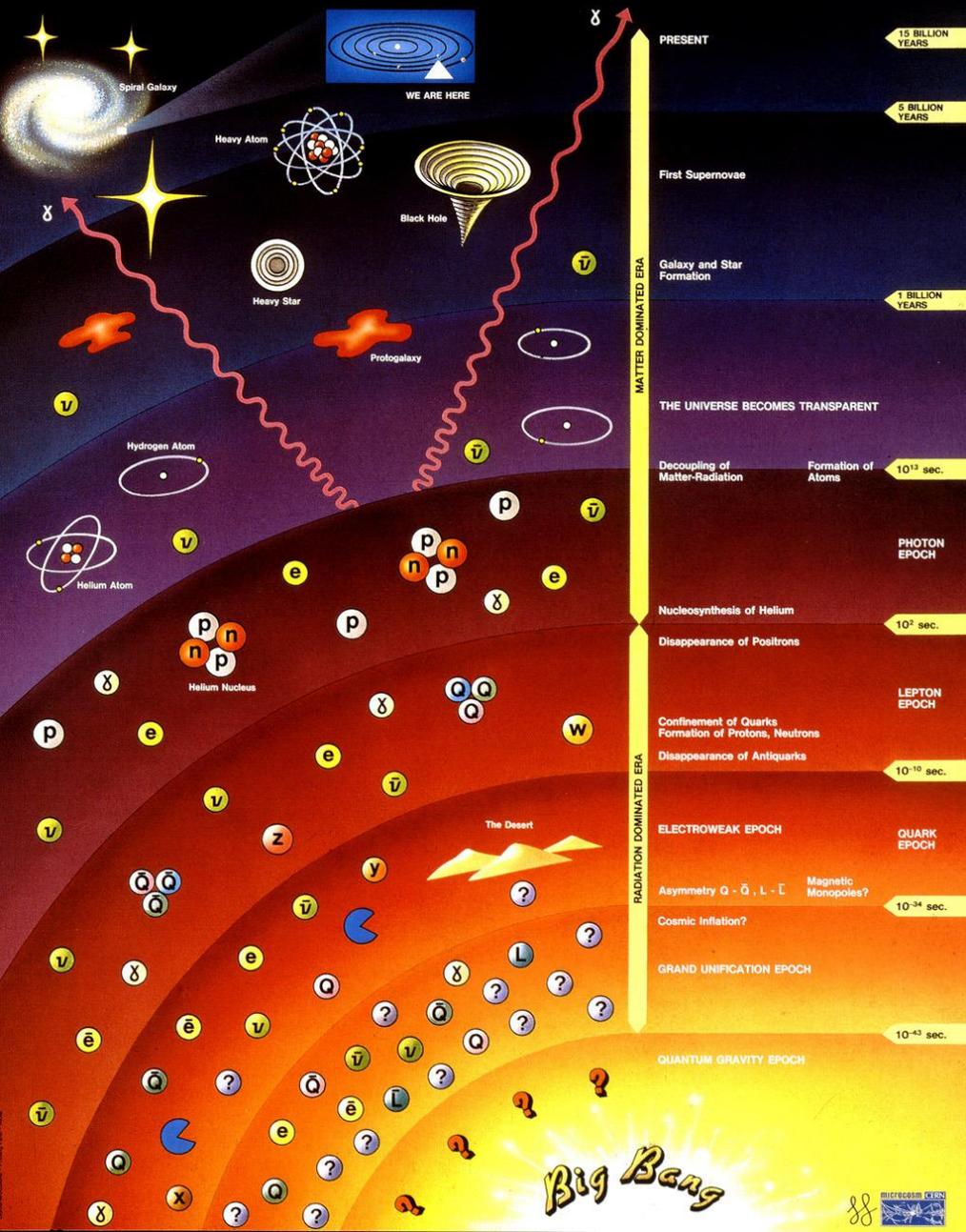


History of the Universe



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»

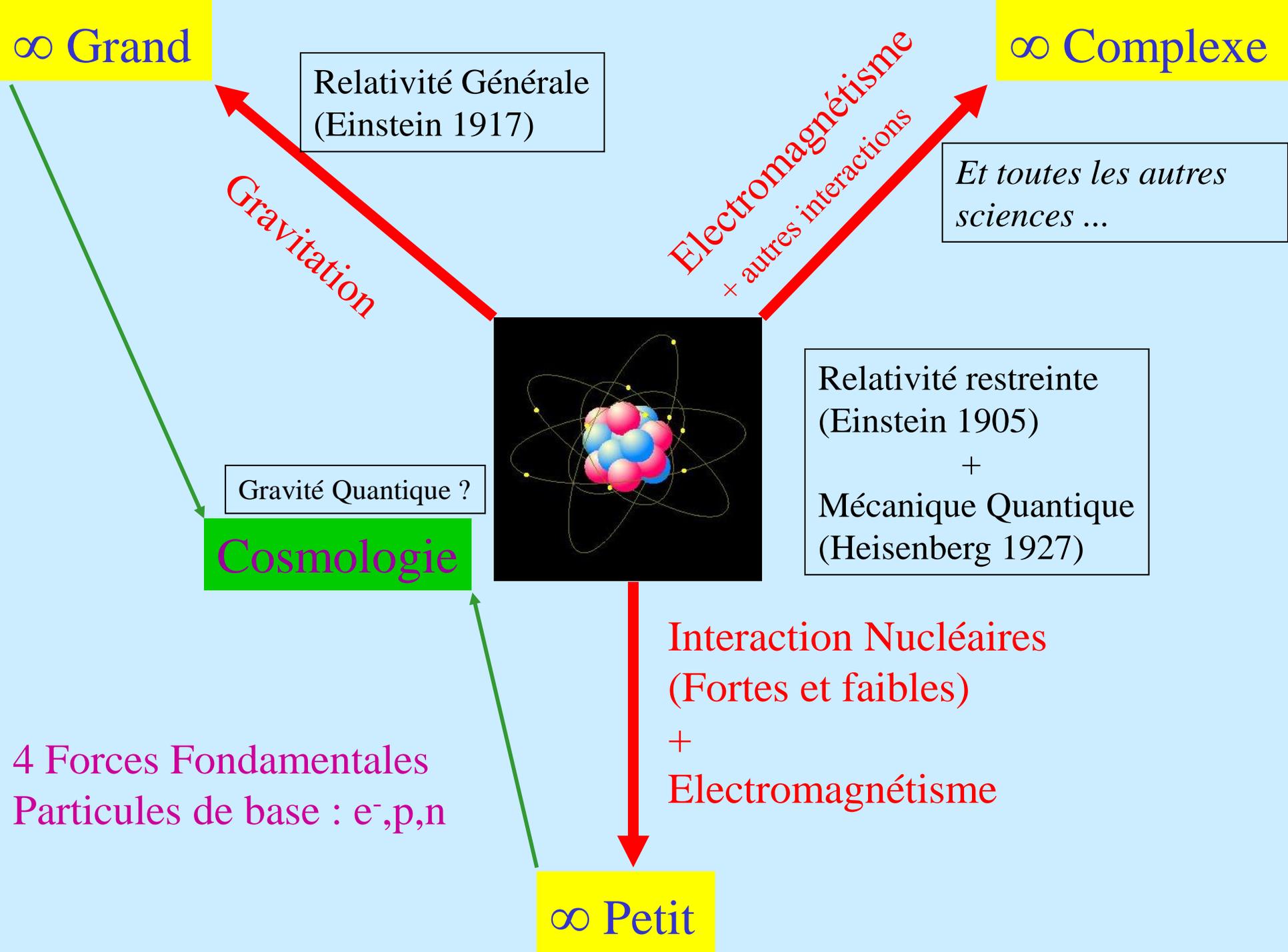
(expansion, nucléosynthèse, CMB, oscillations baryoniques,
formation des structures, sondes cosmiques)

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



∞ Grand

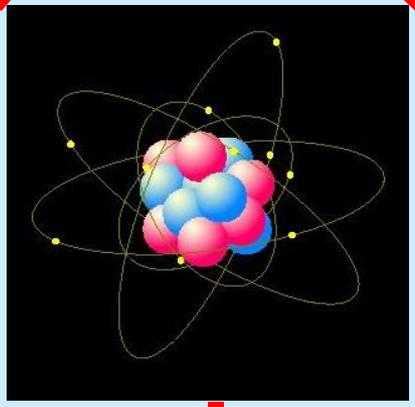
∞ Complexe

Relativité Générale
(Einstein 1917)

Et toutes les autres sciences ...

Gravitation

Electromagnétisme
+ autres interactions



Relativité restreinte
(Einstein 1905)
+
Mécanique Quantique
(Heisenberg 1927)

Gravité Quantique ?

Cosmologie

Interaction Nucléaires
(Fortes et faibles)
+
Electromagnétisme

4 Forces Fondamentales
Particules de base : e⁻, p, n

∞ Petit

But de la physique :

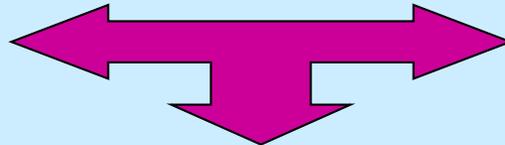
- Décrire/Modéliser/Expliquer les phénomènes naturels

« 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 :

EXPERIENCES

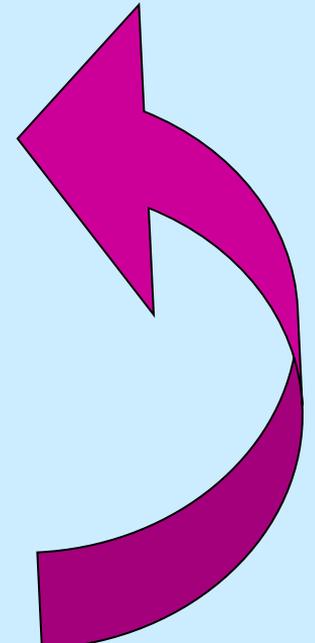


THEORIES

MODELISATION

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

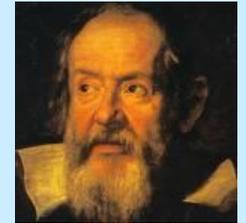
«Big Bang Chaud»

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

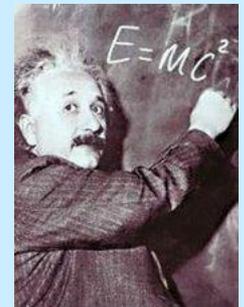


GALILEE
1564-1642

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)



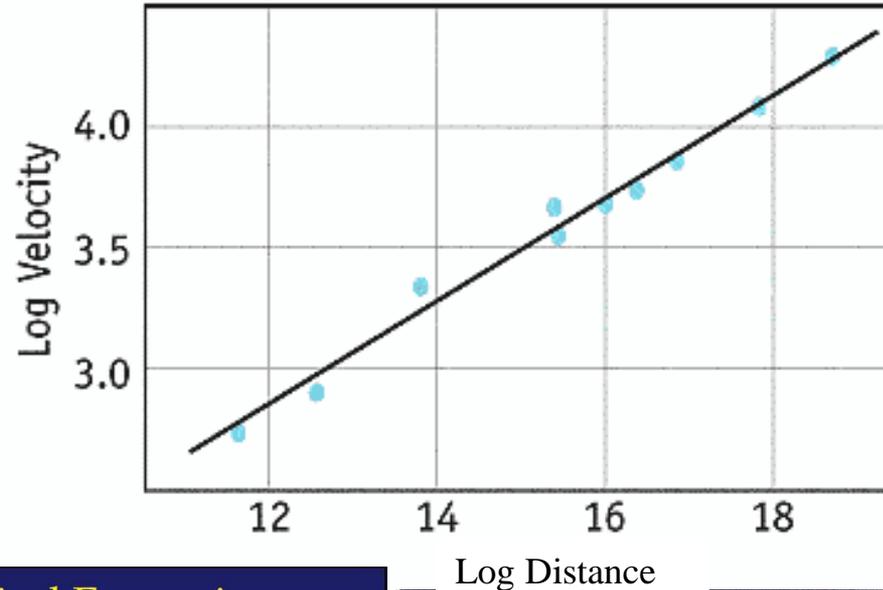
EINSTEIN
1879-1955

OBSERVATION DE LA FUITE DES GALAXIES : LA LOI DE HUBBLE

EXPANSION DE L'UNIVERS !



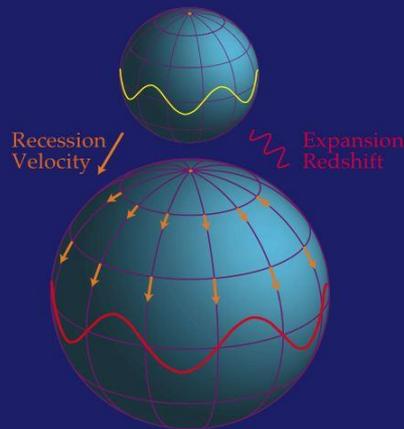
Edwin Hubble



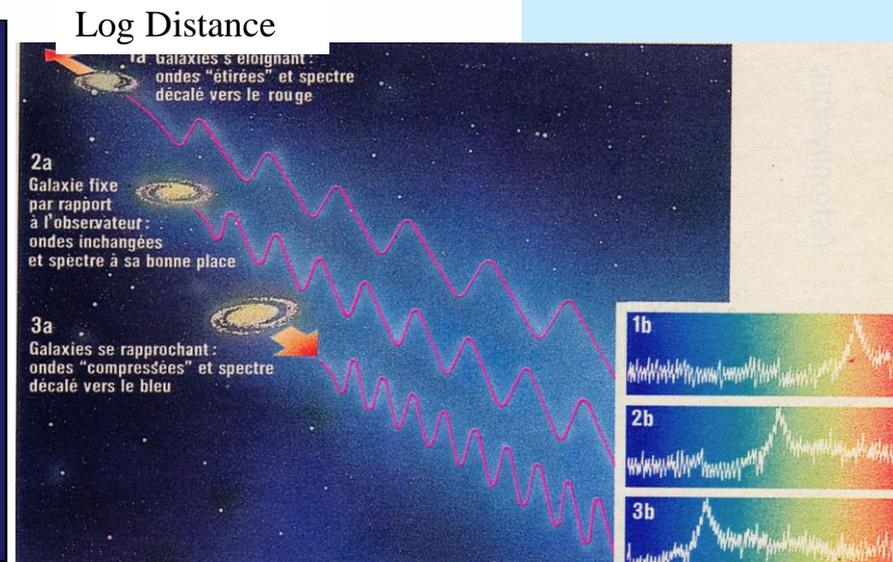
$$V \cong H_0 r$$

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

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) : ρ_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(75%), ${}^4\text{He}$ (25%), D(10^{-4}),
 ${}^3\text{He}$ (10^{-5}), ${}^7\text{Li}$ (10^{-9})

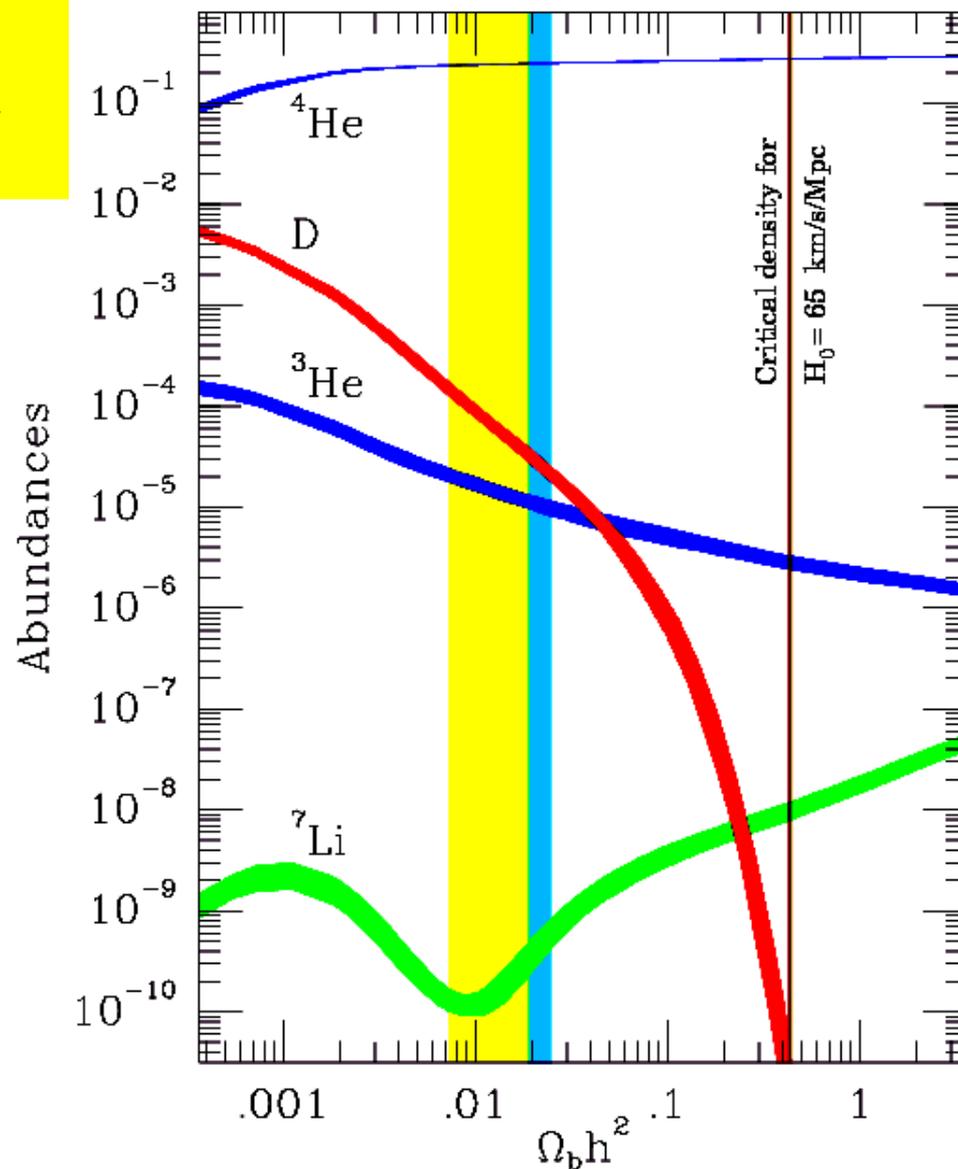
→ rapport photon/baryon :

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

→ 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
1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of ¹³³Cs

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

- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

13 IIIA		14 IVA		15 VA		16 VIA		17 VIIA		18 VIIIA	
5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne						
Boron	Carbon	Nitrogen	Oxygen	Fluorine	Neon						
10.811	12.011	14.007	15.999	18.998	20.180						
1s ² 2s ² 2p ¹	1s ² 2s ² 2p ²	1s ² 2s ² 2p ³	1s ² 2s ² 2p ⁴	1s ² 2s ² 2p ⁵	1s ² 2s ² 2p ⁶						
9.208	11.260	14.534	13.811	17.422	21.564						
13 IIIA		14 IVA		15 VA		16 VIA		17 VIIA		18 VIIIA	
13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar						
Aluminum	Silicon	Phosphorus	Sulfur	Chlorine	Argon						
26.981	28.085	30.973	32.065	35.453	39.948						
[Ne]3s ² 3p ¹	[Ne]3s ² 3p ²	[Ne]3s ² 3p ³	[Ne]3s ² 3p ⁴	[Ne]3s ² 3p ⁵	[Ne]3s ² 3p ⁶						
5.985	8.157	10.486	10.360	12.967	15.750						

ETIOPIES

1 IA	2 IIA											
1 H	2 He											
Hydrogen	Helium											
1.008	4.003											
1s ¹	1s ²											
13.598	24.587											
2												
3	4											
Li	Be											
Lithium	Beryllium											
6.941	9.012											
1s ² 2s ¹	1s ² 2s ²											
5.391	9.327											
3												
11	12											
Na	Mg											
Sodium	Magnesium											
22.990	24.305											
[Ne]3s ¹	[Ne]3s ²											
5.139	7.375											

3 IIIB			4 IVB		5 VB		6 VIB		7 VIIB		8 VIII		9 IB		10 IIB		12 IIB		
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		
Potassium	Calcium	Scandium	Titanium	Vanadium	Chromium	Manganese	Iron	Cobalt	Nickel	Copper	Zinc	Gallium	Germanium	Arsenic	Selenium	Bromine	Krypton		
39.098	40.078	44.955	47.88	50.942	51.996	54.938	55.845	58.933	58.933	63.546	65.409	69.723	72.64	74.922	78.96	79.904	83.798		
[Ar]4s ¹	[Ar]4s ²	[Ar]3d ¹ 4s ²	[Ar]3d ² 4s ²	[Ar]3d ³ 4s ²	[Ar]3d ⁴ 4s ²	[Ar]3d ⁵ 4s ²	[Ar]3d ⁶ 4s ²	[Ar]3d ⁷ 4s ²	[Ar]3d ⁸ 4s ²	[Ar]3d ⁹ 4s ¹	[Ar]3d ¹⁰ 4s ¹	[Ar]3d ¹⁰ 4s ²	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ²	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ³	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶	
4.340	6.113	6.565	6.821	6.821	6.765	7.430	7.902	7.881	7.638	7.724	9.394	5.985	7.894	9.788	9.752	11.813	13.996		
4			5		6		7		8		9		10		11		12		
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		
Rubidium	Strontium	Yttrium	Zirconium	Niobium	Molybdenum	Technetium	Ruthenium	Rhodium	Palladium	Silver	Cadmium	Indium	Tin	Antimony	Tellurium	Iodine	Xenon		
85.468	87.62	88.906	91.224	92.906	95.94	(98)	101.07	102.905	106.42	107.868	112.411	114.818	118.710	121.760	127.6	126.904	131.293		
[Kr]5s ¹	[Kr]5s ²	[Kr]4d ¹ 5s ²	[Kr]4d ² 5s ²	[Kr]4d ³ 5s ²	[Kr]4d ⁴ 5s ²	[Kr]4d ⁵ 5s ²	[Kr]4d ⁶ 5s ²	[Kr]4d ⁷ 5s ²	[Kr]4d ⁸ 5s ²	[Kr]4d ⁹ 5s ¹	[Kr]4d ¹⁰ 5s ¹	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ²	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ³	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶		
4.177	5.894	6.217	6.639	6.758	7.092	7.28	7.365	7.459	8.336	7.576	8.993	5.784	7.349	8.608	9.096	10.451	12.129		

Atomic Number: 58
Ground-state Level: 1G₄
Symbol: Ce
Name: Cerium
Atomic Weight: 140.116
Ground-state Configuration: [Xe]4f¹5d⁰6s²
Ionization Energy (eV): 5.5387

Lanthanides												Actinides							
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					
Lanthanum	Cerium	Praseodymium	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium					
138.905	140.116	140.907	144.24	(145)	150.36	151.964	157.25	158.925	162.500	164.930	167.259	168.934	173.054	174.967					
[Xe]5d ¹ 6s ²	[Xe]4f ¹ 5d ¹ 6s ²	[Xe]4f ³ 6s ²	[Xe]4f ⁴ 6s ²	[Xe]4f ⁵ 6s ²	[Xe]4f ⁶ 6s ²	[Xe]4f ⁷ 6s ²	[Xe]4f ⁷ 5d ¹ 6s ²	[Xe]4f ⁹ 6s ²	[Xe]4f ¹⁰ 6s ²	[Xe]4f ¹¹ 6s ²	[Xe]4f ¹² 6s ²	[Xe]4f ¹³ 6s ²	[Xe]4f ¹⁴ 6s ²	[Xe]4f ¹⁴ 6s ²					
5.579	5.538	5.473	5.525	5.582	5.643	5.670	6.149	5.863	5.939	6.021	6.107	6.184	6.254	6.259					
89 Ac		90 Th		91 Pa		92 U		93 Np		94 Pu		95 Am		96 Cm		97 Bk		98 Cf	
Actinium	Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lawrencium					
(227)	232.038	231.036	238.029	237.048	244	(243)	(247)	(247)	(251)	(257)	(257)	(258)	(259)	(262)					
[Rn]6d ¹ 7s ²	[Rn]6d ² 7s ²	[Rn]5f ² 6d ¹ 7s ²	[Rn]5f ³ 6d ¹ 7s ²	[Rn]5f ⁴ 6d ¹ 7s ²	[Rn]5f ⁶ 7s ²	[Rn]5f ⁷ 7s ²	[Rn]5f ⁷ 6d ¹ 7s ²	[Rn]5f ⁹ 7s ²	[Rn]5f ¹⁰ 7s ²	[Rn]5f ¹¹ 7s ²	[Rn]5f ¹² 7s ²	[Rn]5f ¹³ 7s ²	[Rn]5f ¹⁴ 7s ²						
5.17	6.308	5.89	6.194	6.257	6.026	5.973	5.991	6.197	6.281	6.42	6.50	6.58	6.85	4.9					

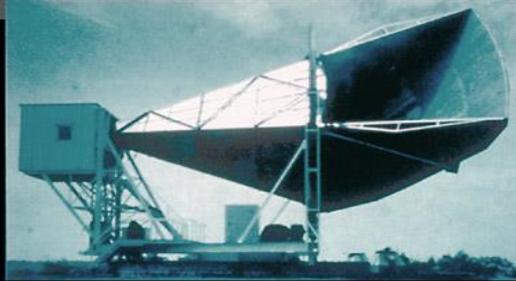
[†]Based upon ¹²C. () indicates the mass number of the most stable isotope.

For a description of the data, visit physics.nist.gov/data

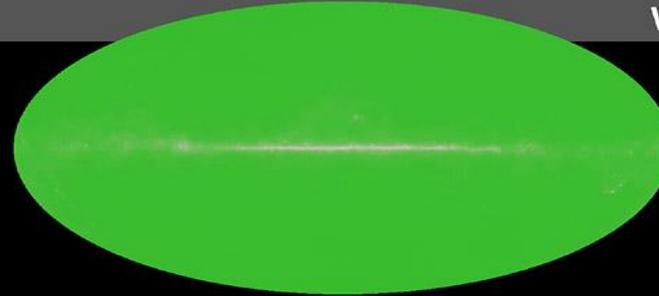
Supernovae

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

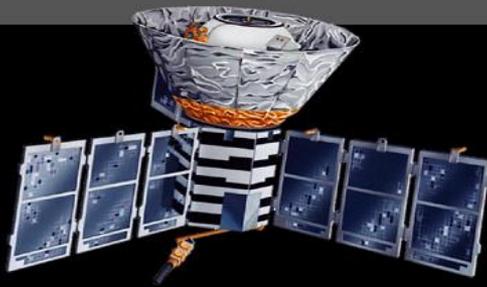
1965



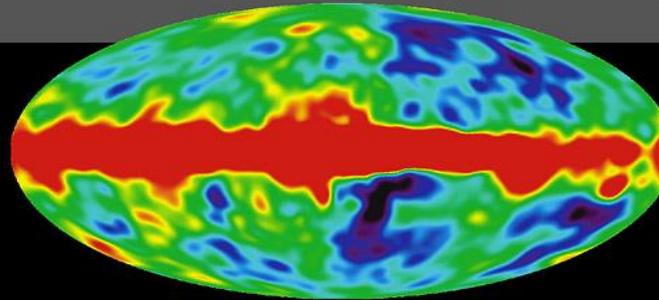
Penzias and
Wilson



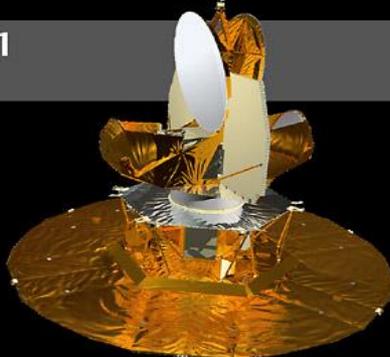
1992



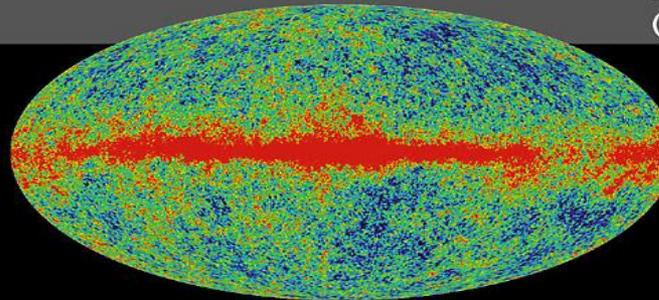
COBE



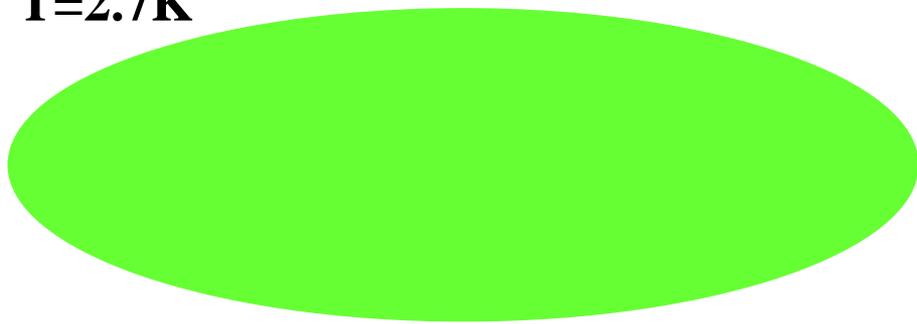
2001



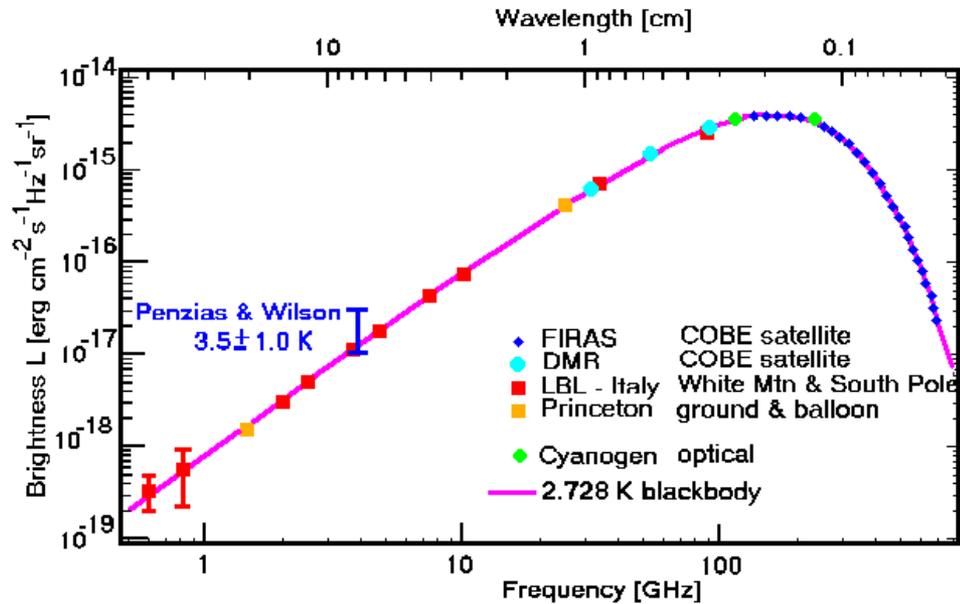
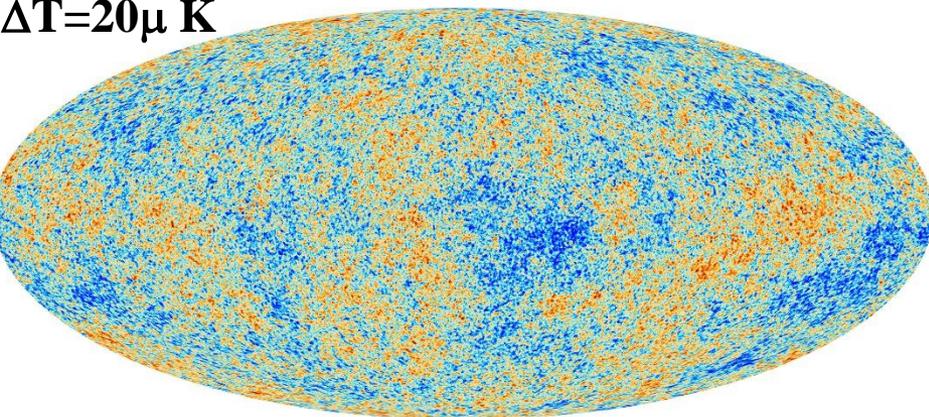
MAP
(Simulated)



T=2.7K



ΔT=20μ K

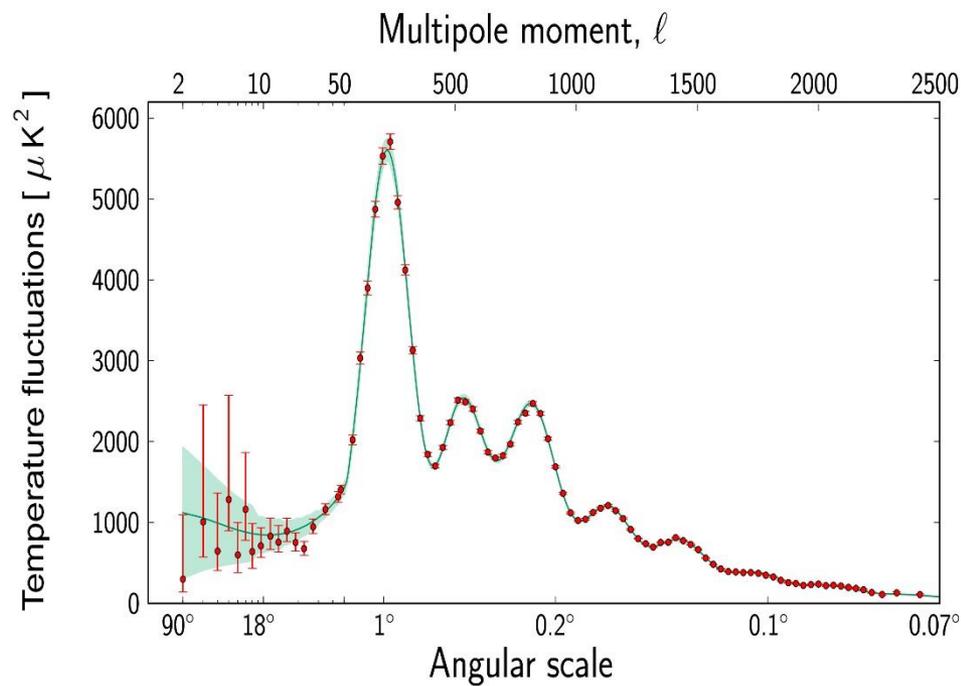


Spectre :

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

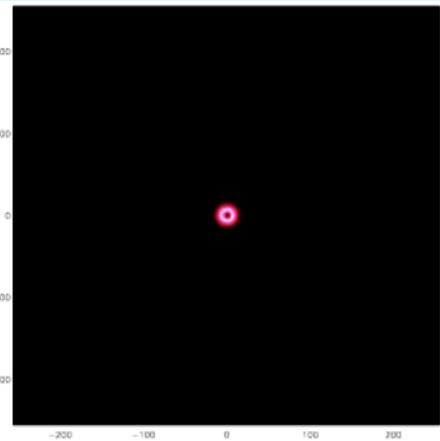
Fluct. Primordiales

Anisotropies : Géométrie
Physique

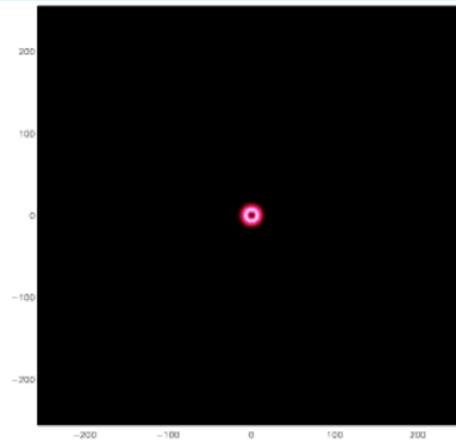


Les ondes acoustiques (baryoniques) primordiales

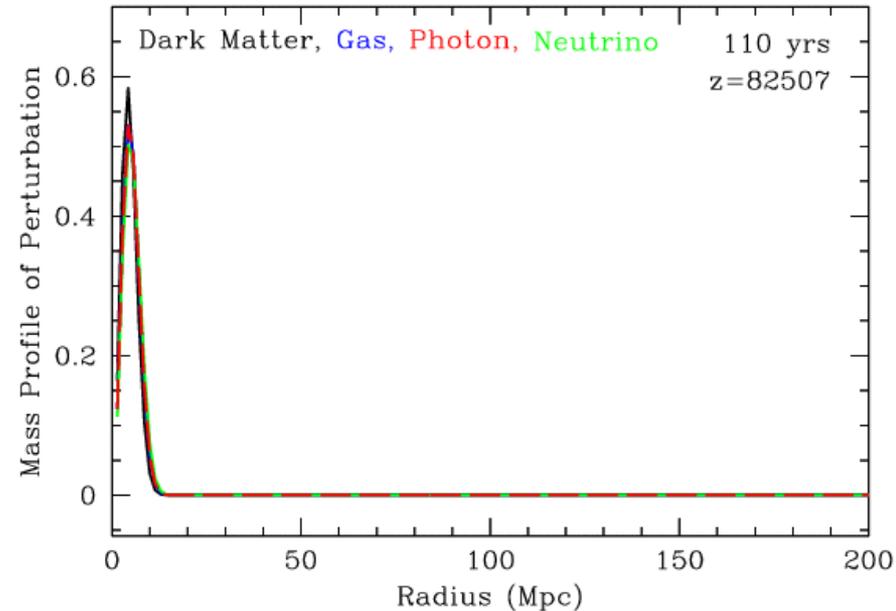
Etape 1 : condition initiale : une (des) perturbation(s) de densité



Baryons



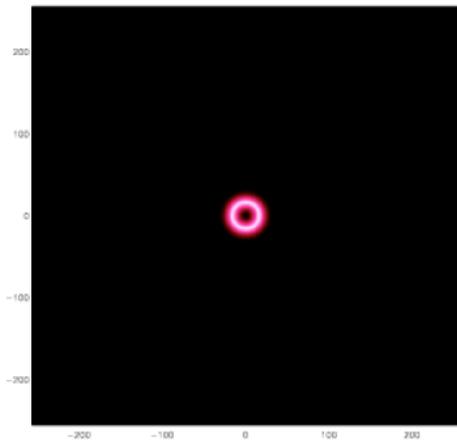
Photons



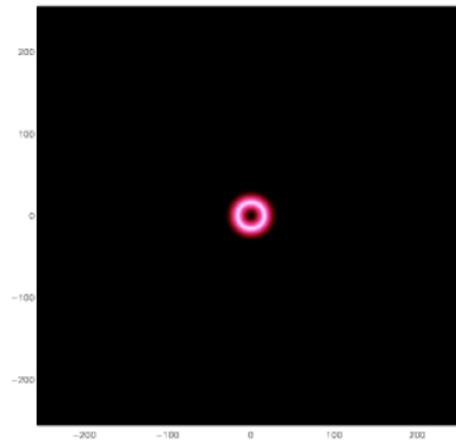
* plasma primordial homogène sauf un léger excès de matière à l'origine

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

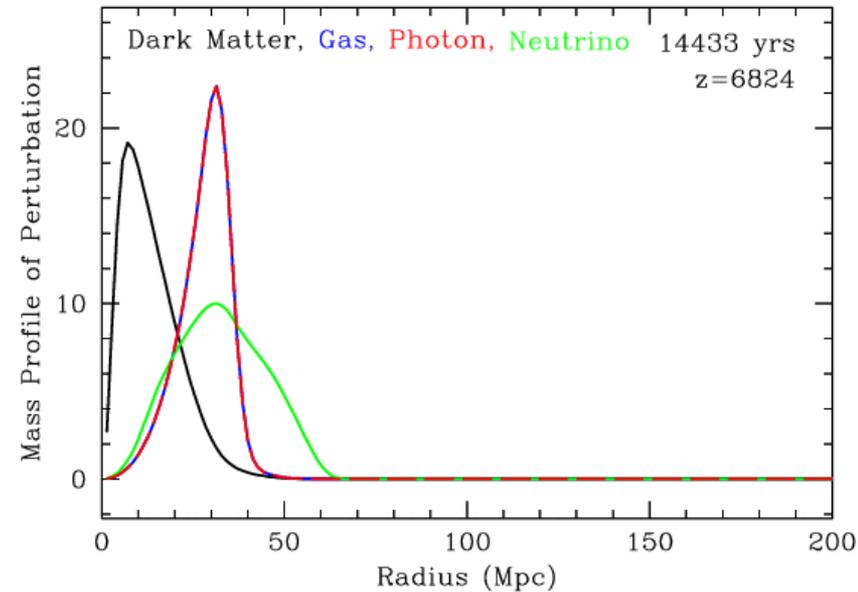
Etape 2 : propagation avant découplage



Baryons

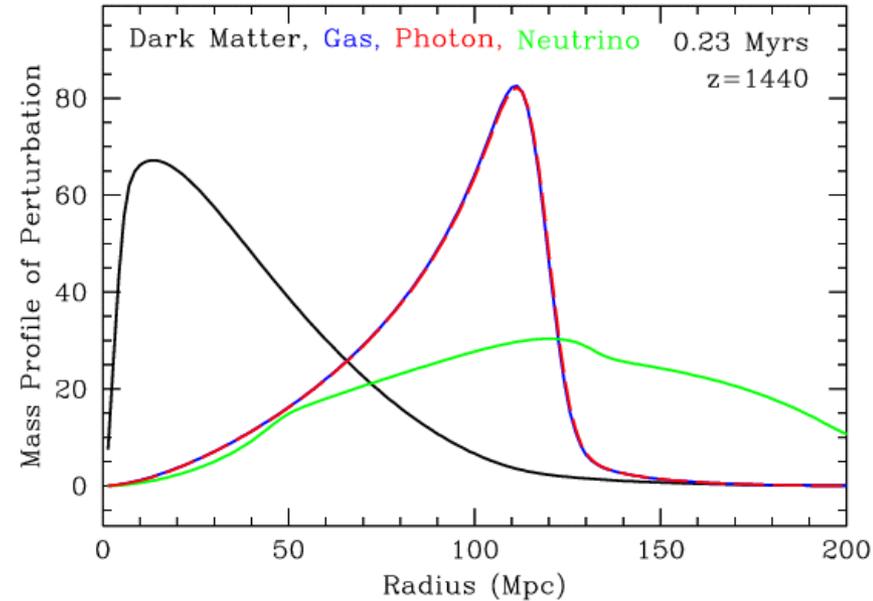
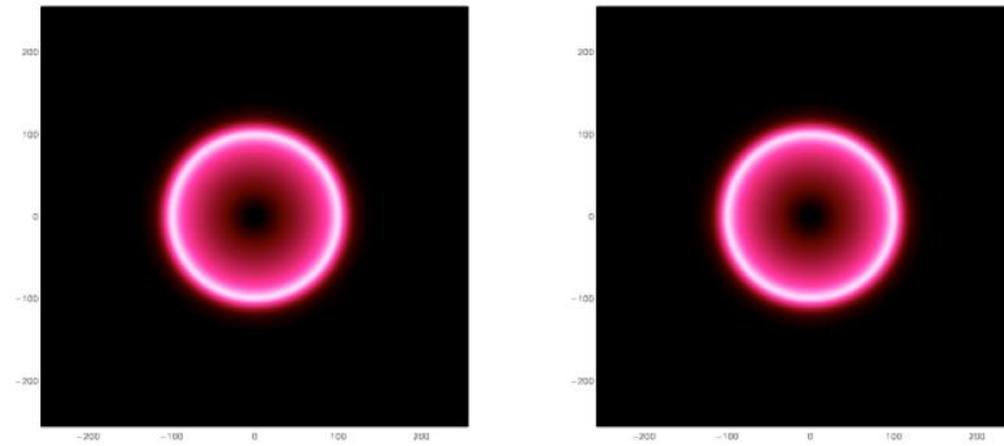


Photons



- * Propagation initiale : gaz(=b+e) + γ se déplacent simultanément
- * DM et ν ne couplent pas (peu) au gaz ou au γ
- * Les ν 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 !



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

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

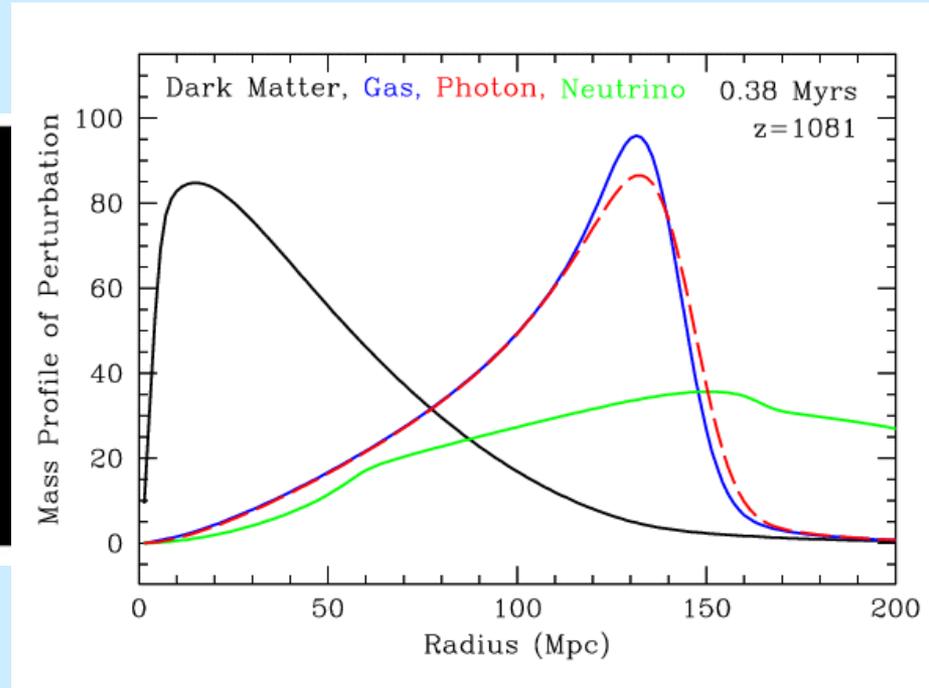
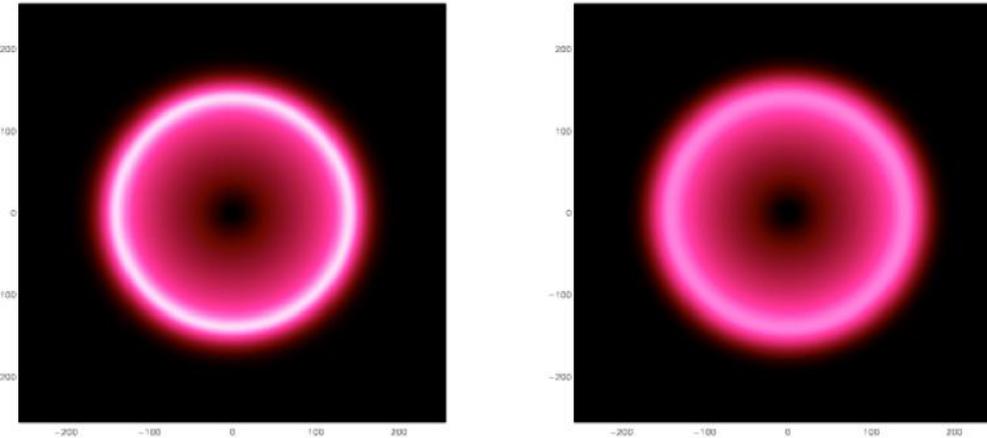
(Horizon sonore)

Le découplage n'est pas instantané =>

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

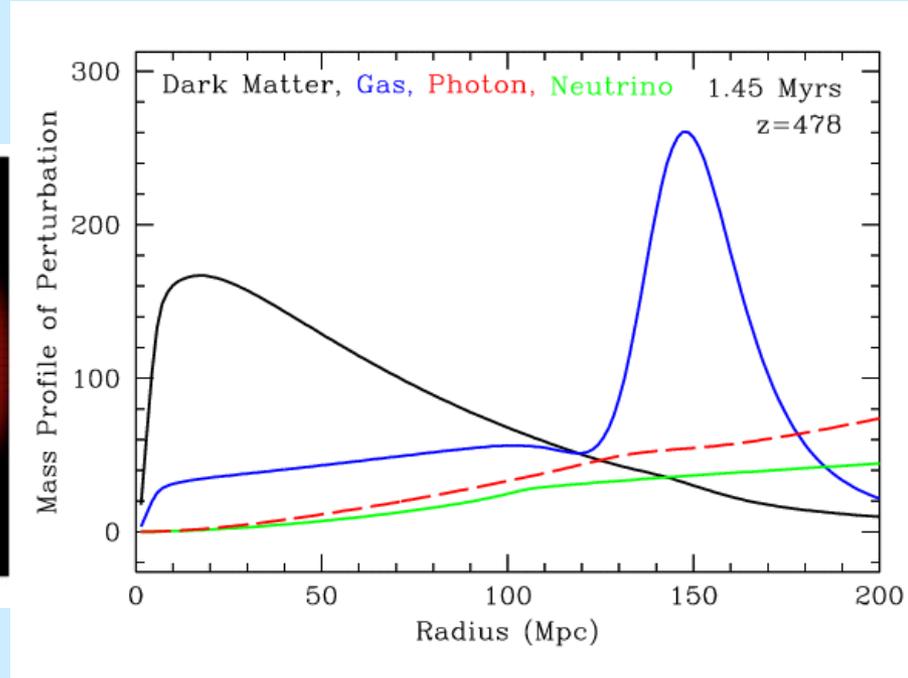
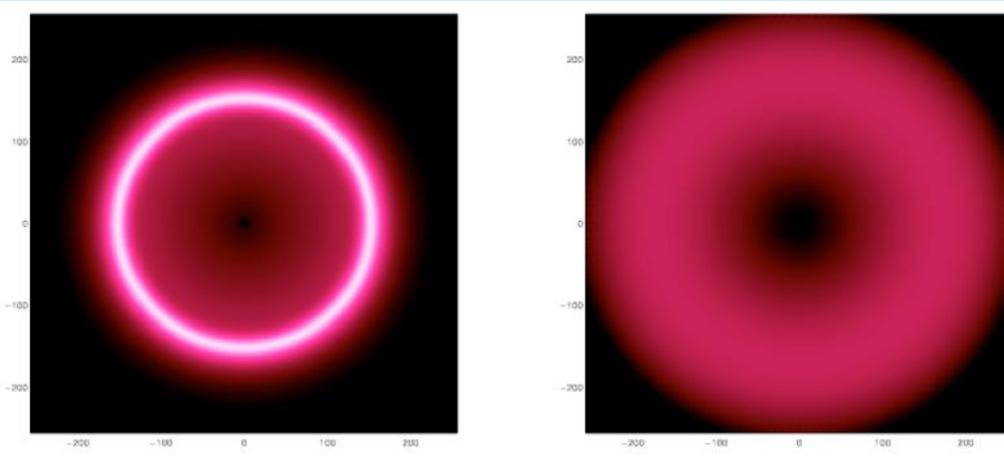
Etape 4 : Découplage !!

Le CMB est né !!



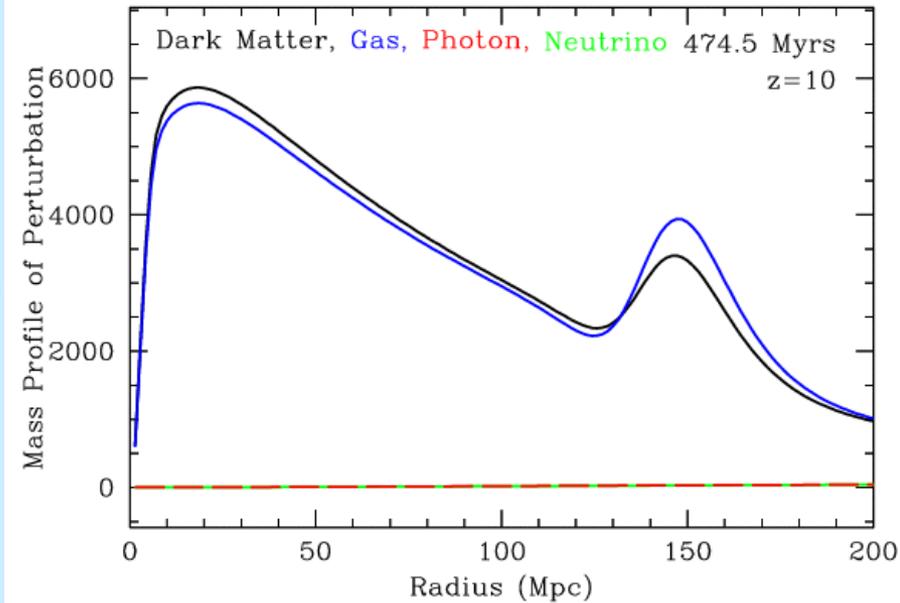
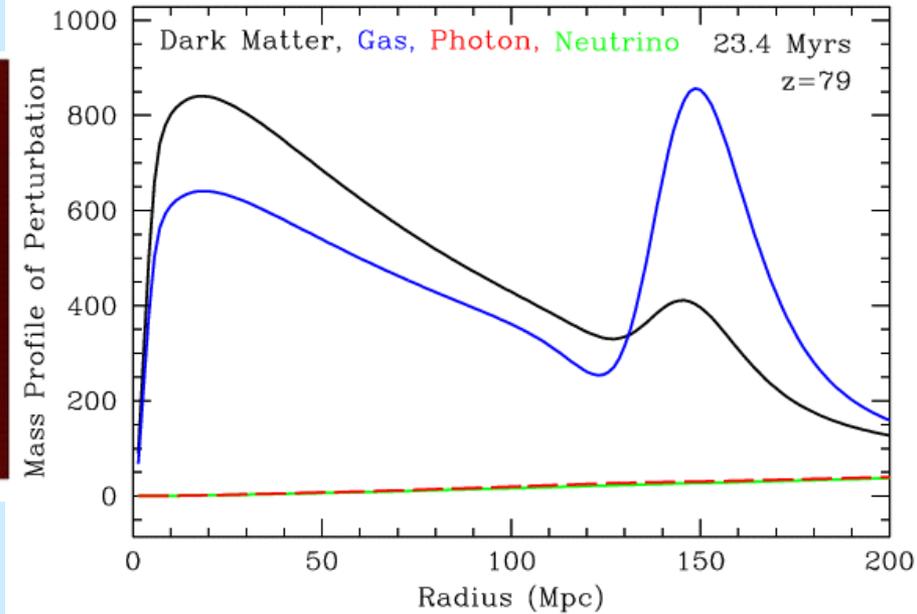
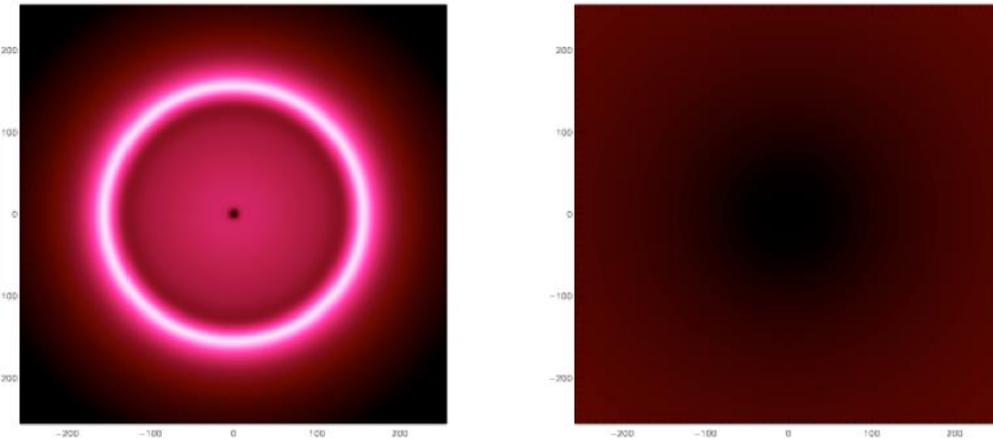
- * Découplage : les baryons capturent les e : phase neutre
- * Les photons γ se découplent des baryons \Rightarrow propagation libre
- * Les baryons (atomes) ont une pression nulle \Rightarrow déplacement s'arrête

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

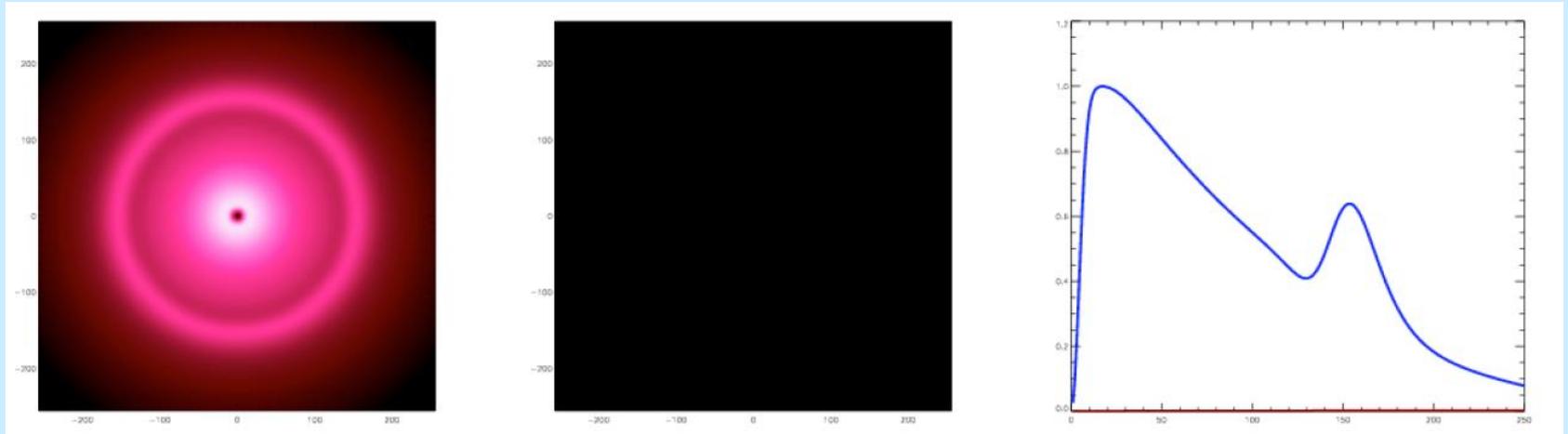


Les γ sont quasiment uniformes

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 Ω_b / Ω_M

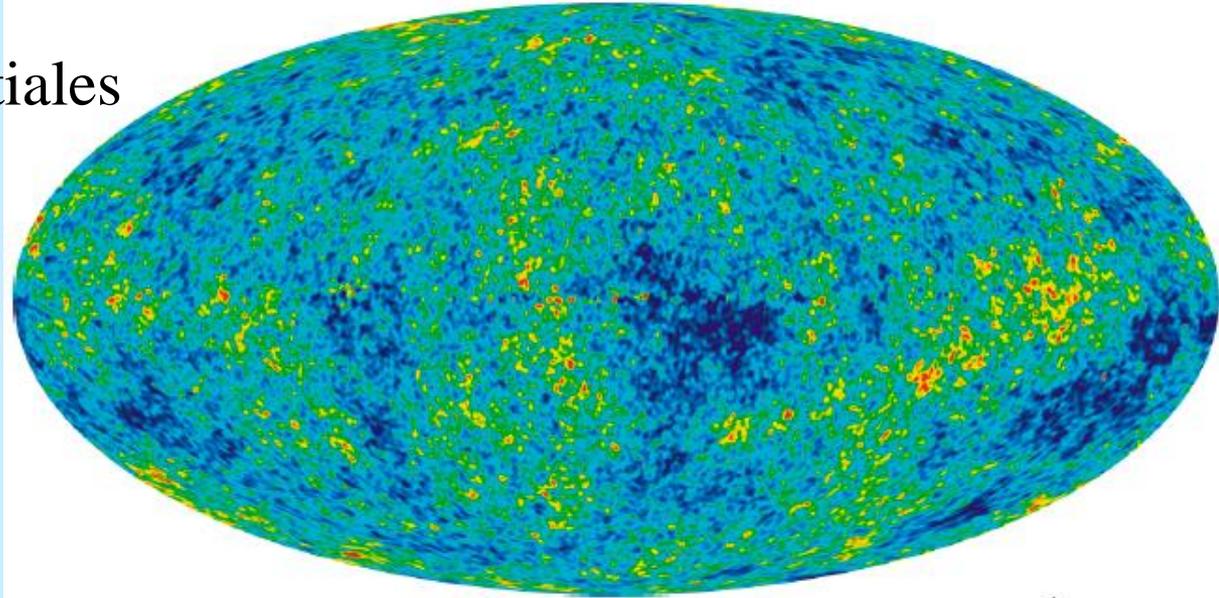
Configuration finale : pic initial + écho à 150 Mpc

Formation des galaxies : phénomène local (<10 Mpc)

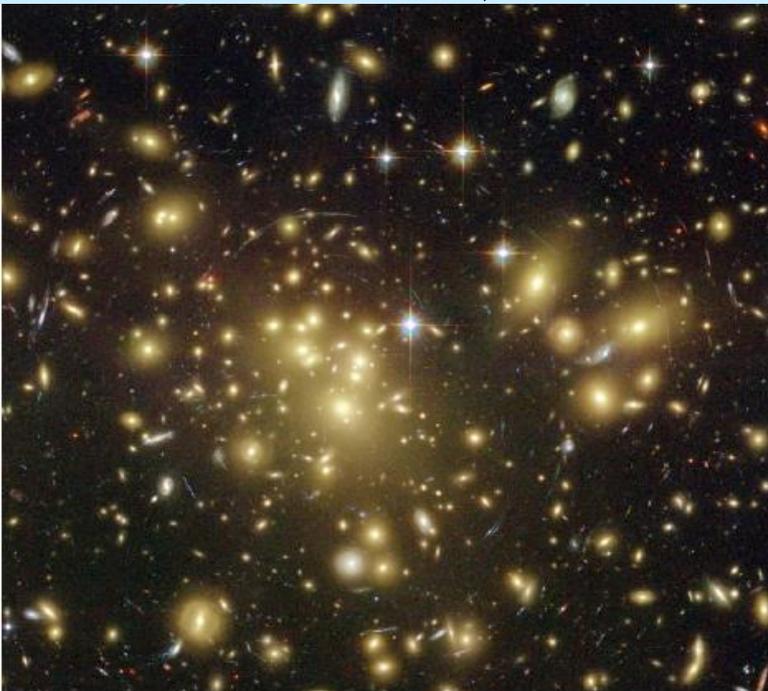
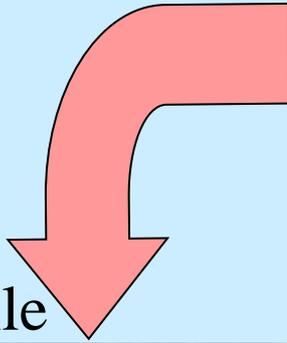
=> les évolutions ultérieures des deux pics sont découplées

La formation des structures : Observations

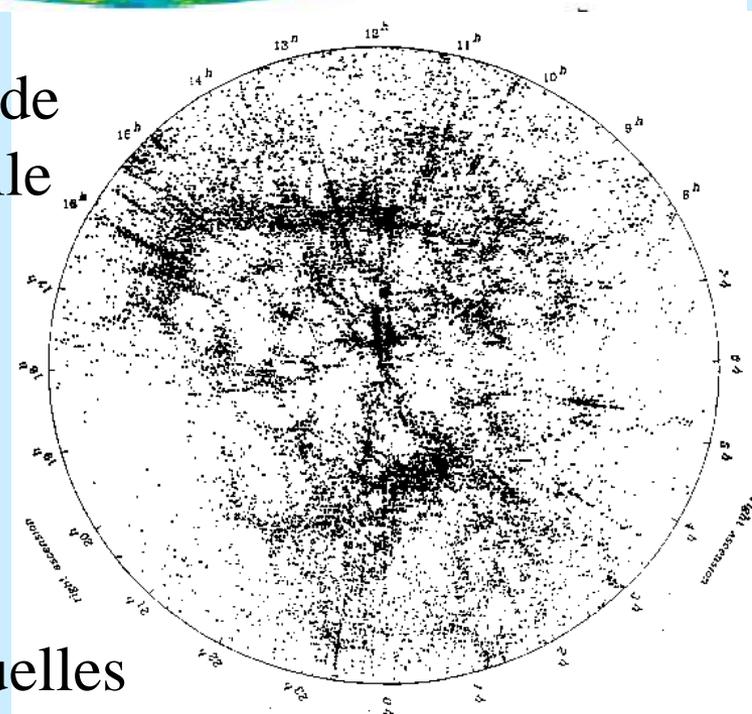
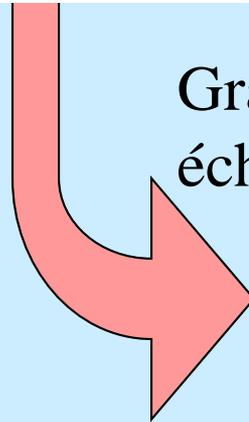
Conditions initiales



«Petite» échelle

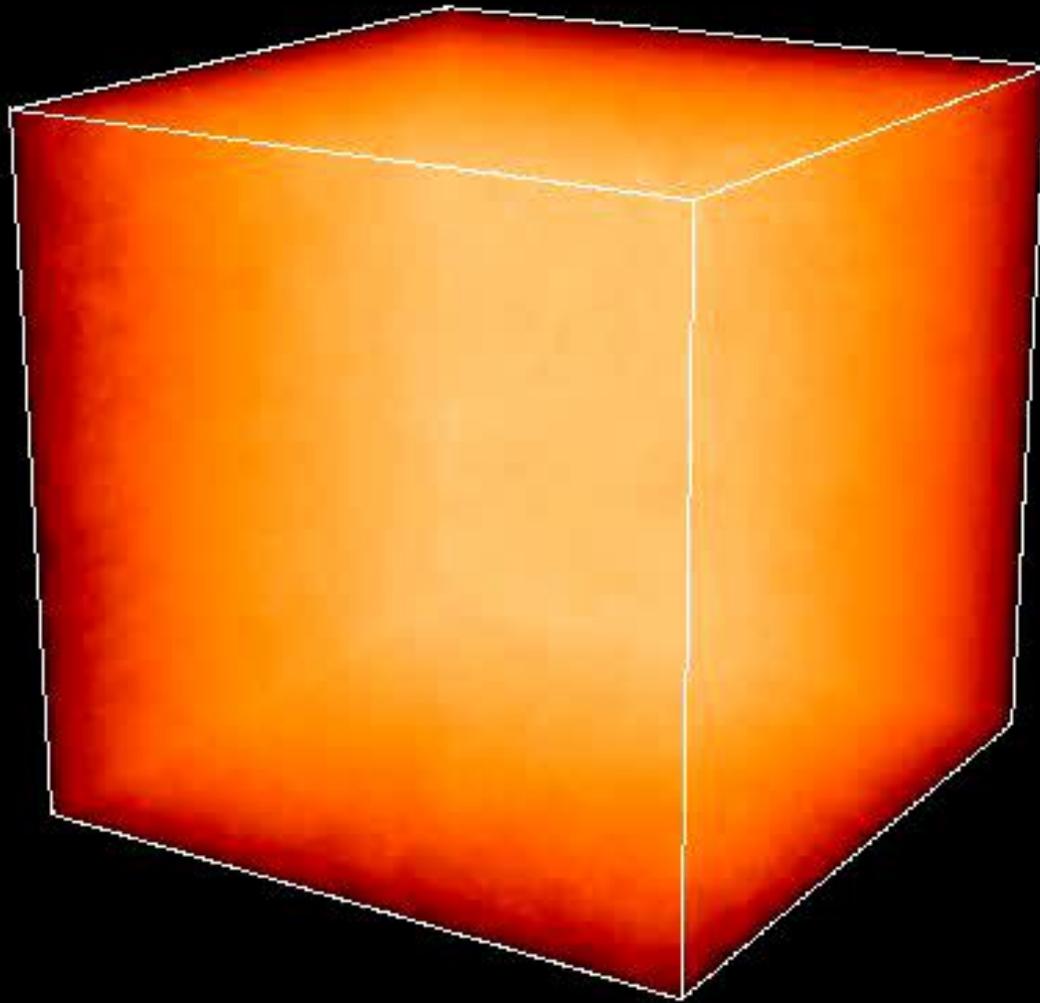


Grande
échelle

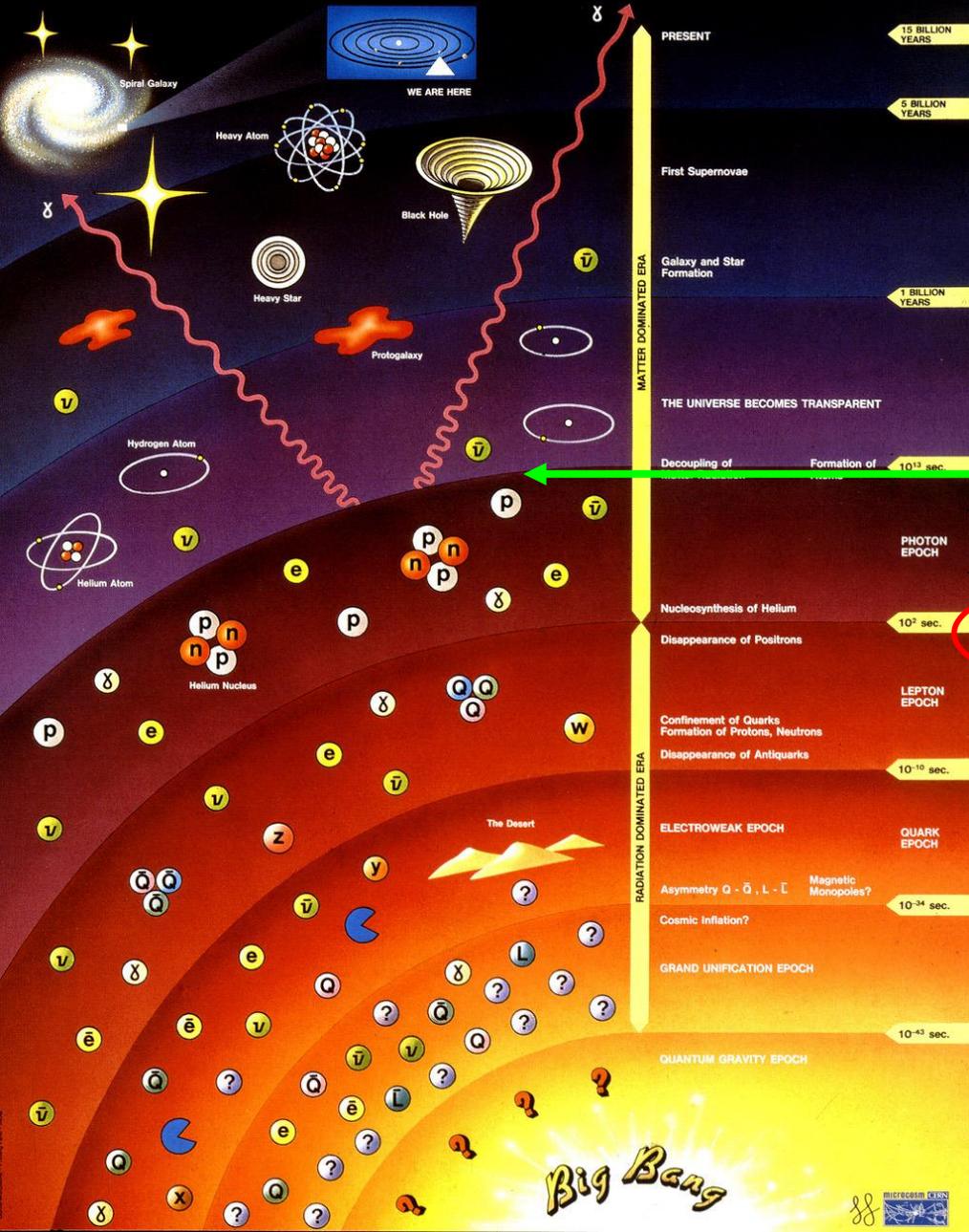


Situations actuelles

La formation des structures : Simulations



History of the Universe



Formation structures

recombinaison

BAO
nucléosynthèse

inflation ?

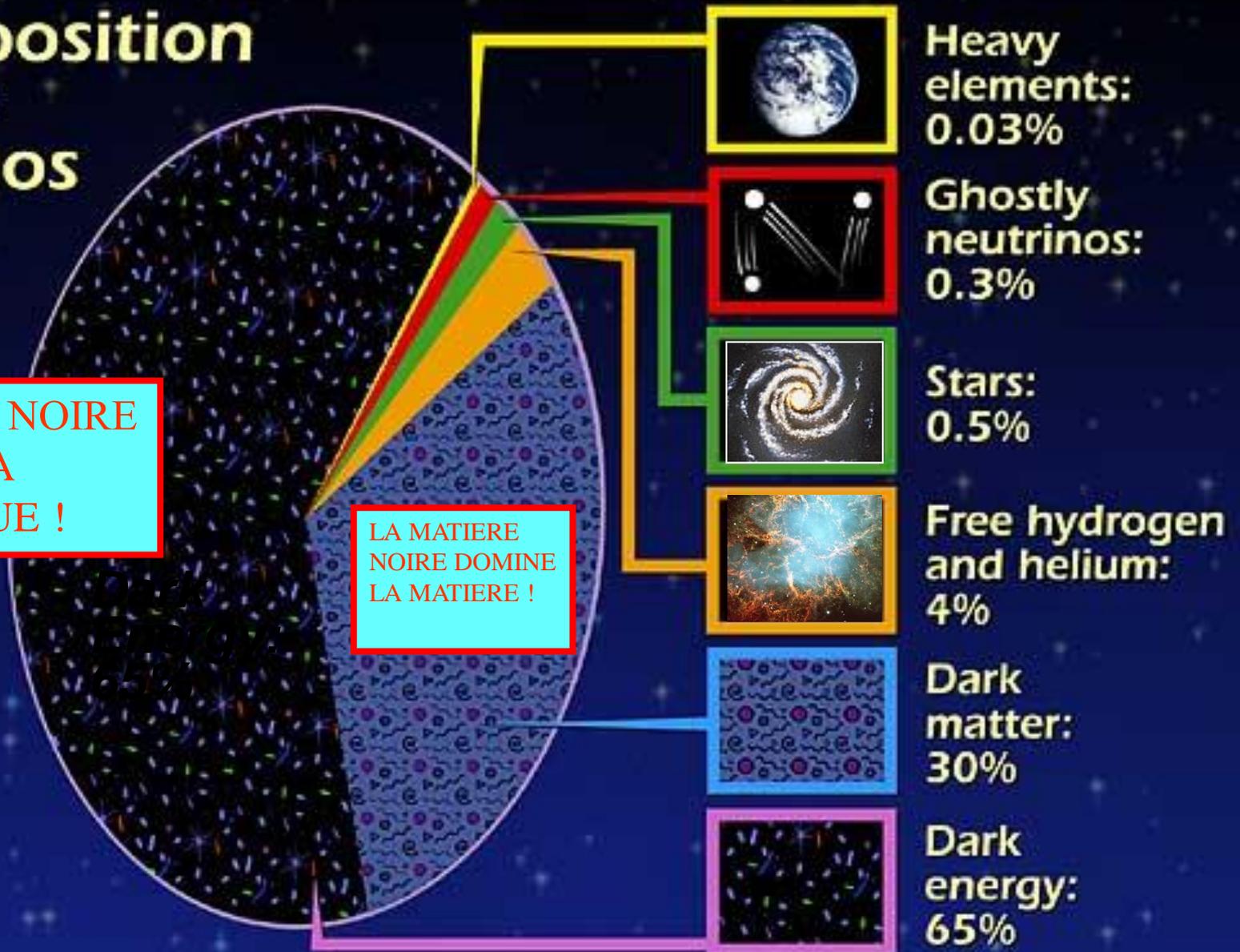
Gravité quantique ?

Energy budget of Universe

Composition of the Cosmos

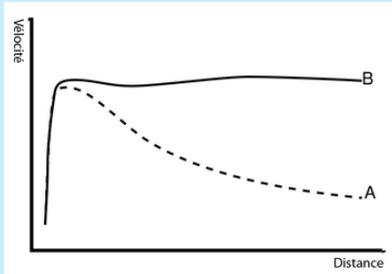
L'ENERGIE NOIRE
DOMINE LA
DYNAMIQUE !

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

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

$$z = v/c \text{ (classique)}$$

