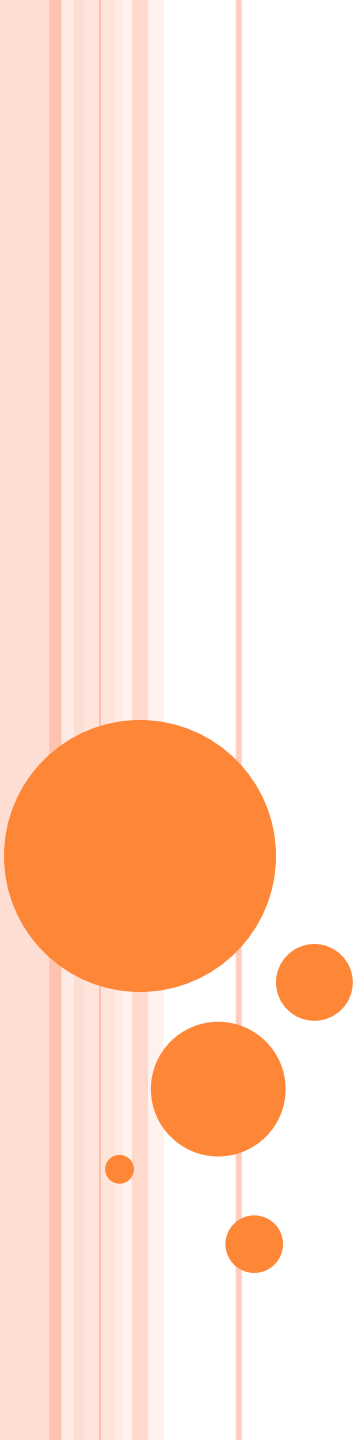




INTRODUZIONE ALLA COSMOLOGIA

BIS ITALIA

Salvatore Aglieri Rinella
BIS member since 2015

COSMOLOGY IS THE STUDY OF THE UNIVERSE, OR COSMOS, REGARDED AS A WHOLE



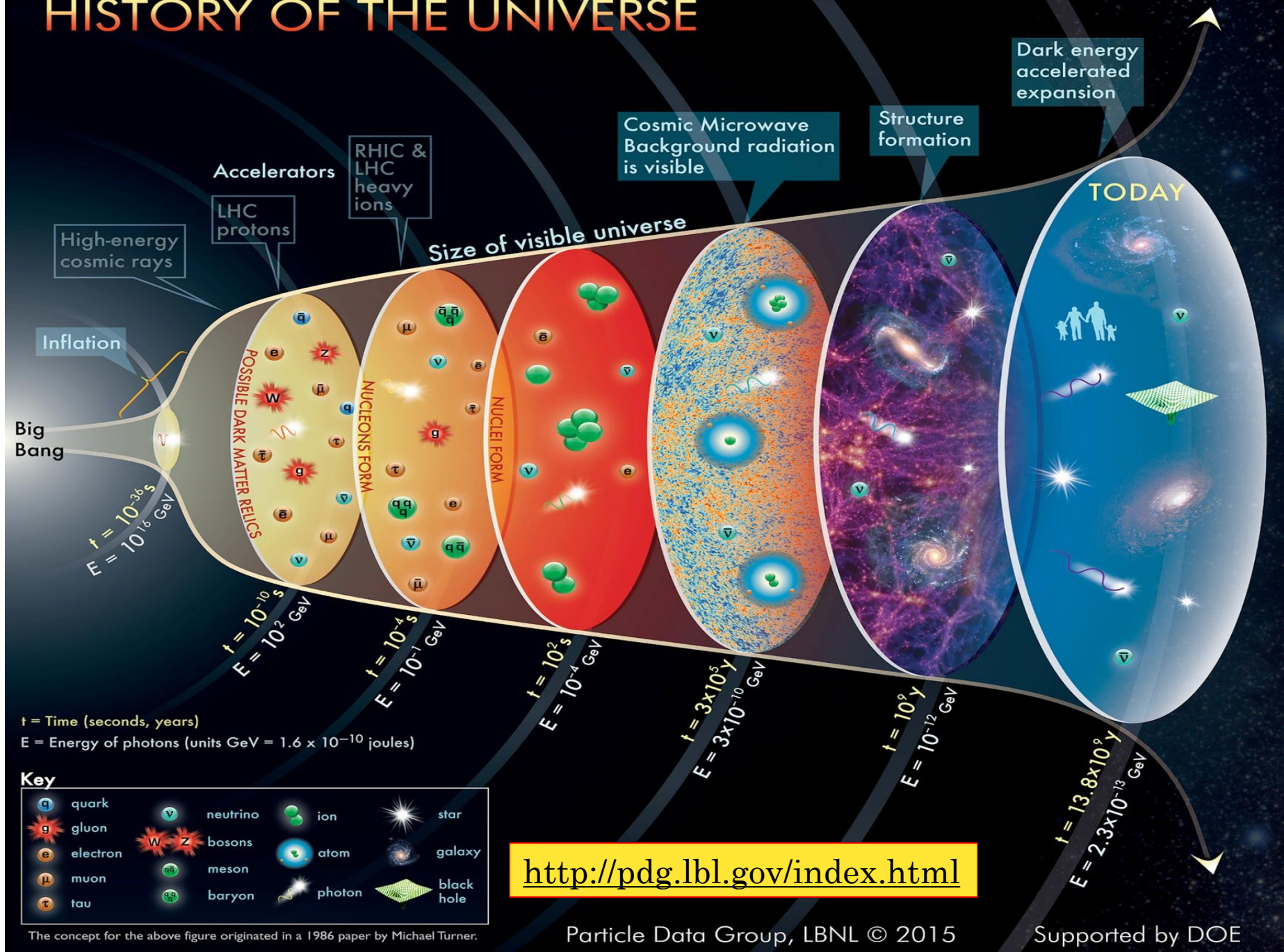
Where Do We Come From? What Are We? Where Are We Going? Paul Gauguin, 1897
[Museum of Fine Arts, Boston]

Cosmology grapples with these questions by describing the past, explaining the present, and predicting the future of the universe. Cosmologists ask questions such as What is the universe made of? Is it finite or infinite in spatial extent? Did it have a beginning some time in the past? Will it come to an end some time in the future?“

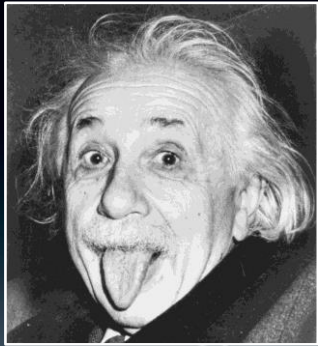
Barbara Ryden Introduction to Cosmology 2006



HISTORY OF THE UNIVERSE



HISTORY OF THE UNIVERSE



Accelerators

C protons

RHIC & LHC heavy ions

Cosmic Microwave Background radiation is visible

Structure formation

Dark energy accelerated expansion

Size of visible universe

TODAY

Inflation

Big Bang

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

$t = 10^{-36} s$
 $E = 10^{16} GeV$

$t = 10^{-10} s$
 $E = 10^2 GeV$

$t = 10^{-4} s$
 $E = 10^{-1} GeV$

$t = 10^2 s$
 $E = 10^{-4} GeV$

$t = 3 \times 10^5 y$
 $E = 3 \times 10^{-10} GeV$

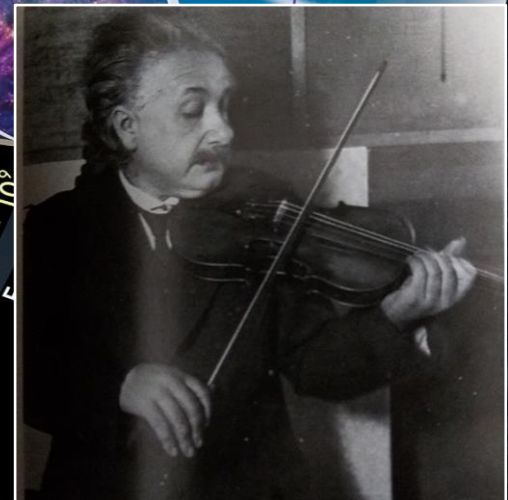
$t = 10^9 y$

t = Time (seconds, years)

E = Energy of photons (units GeV = 1.6×10^{-10} joules)

Key

quark	neutrino	ion	star
gluon	bosons	atom	galaxy
electron	meson	photon	black hole
muon	baryon		
tau			



The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

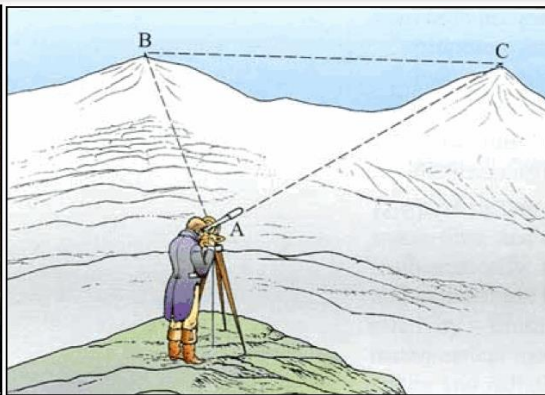
Particle Data Group, LBNL © 2015

Supported by DOE

HYSTORICAL NOTE BEFORE GR



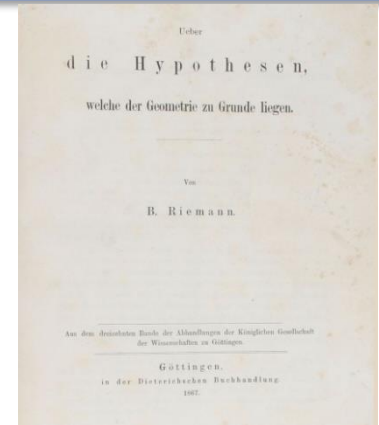
Carl Friedrich Gauss
1777 - 1855



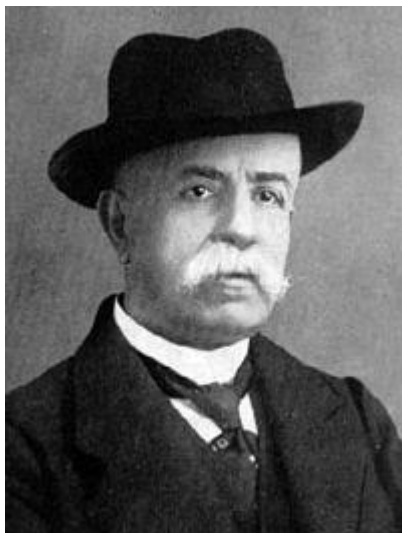
Gauss finds 180 degrees in large survey triangles:
Space is not (grossly) non-Euclidean



Bernhard Riemann
1826 - 1866



*Über die Hypothesen,
welche der Geometrie
zu Grunde liegen 1854*



Gregorio Ricci Cubastro
1853 - 1925



Tullio Levi Civita
1873 - 1941

1891

Méthodes de calcul différentiel absolu et leurs applications.
Par
M. M. G. Ricci et T. Levi-Civita à Padoue.

Table des matières.

Chapitre I.

Algorithme du calcul différentiel absolu. 128

§ 1. Transformations ponctuelles et systèmes de fonctions. 128

§ 2. Systèmes covariants et contravariants. — Exemples divers. 130

§ 3. Addition, multiplication, composition des systèmes. — Quadruplets fondamentaux. — Systèmes orthogonaux. 132

§ 4. Application à l'analyse vectorielle. 135

§ 5. Dérivatives covariantes et contravariantes selon une forme fondamentale. — Conservation des règles du calcul différentiel ordinaire. 138

§ 6. Système de Riemann. — Relations entre les éléments du deuxième système dérivé d'un système covariant symétrique. 142

§ 7. Caractère invariant des équations, que l'on rencontre en calcul différentiel absolu. 143

Chapitre II.

La géométrie intrinsèque comme instrument de calcul. 145

§ 1. Généralité sur les systèmes orthogonaux de congruences dans un espace quelconque. 145

§ 2. Dérivées intrinsèques et leurs relations. 148

§ 3. Congruences normales et géodésiques. — Familles isothermes de surfaces. — Systèmes canoniques par rapport à une congruence donnée. 150

§ 4. Propriétés des coefficients de rotation. — Lien avec la théorie du système mobile d'après M. Darboux. 154

§ 5. Formes canoniques des systèmes associés à la forme fondamentale. 158

Chapitre III.

Applications analytiques. 160

§ 1. Classification des formes quadratiques différentielles. 160

§ 2. Invariants absolus. — Remarques géométriques. — Paramètres différentiels. 161

*Méthodes de calcul
différentiel absolu et
leurs applications.*



Luigi Bianchi
1865 - 1928



HYSTORICAL NOTE AFTER GR

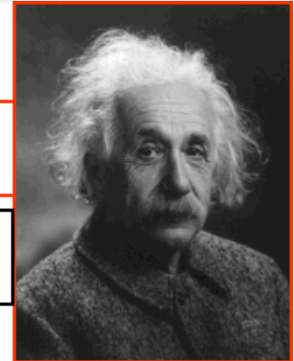
Cosmology's Remarkable 20 Years



De Sitter (1917) : pure Λ exponential expansion

Einstein (1915):
General Relativity

Einstein (1917):
static universe, Λ



1920

Birkhoff (1923): isotropy simplifies GR

Friedmann (1922-24) : general solution
for homogeneous Universe



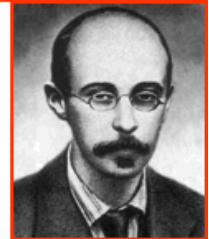
Lemaître predicts expansion (1927) &
considers "Primeval Atom" (1931)

1930

Einstein (1932) : abandons Λ ;
Einstein de Sitter model: $\Omega_m = 1$



Hubble (1929-31) : finds
expansion & Hubble Law



Milne & McCrea (1934): recognize
Newtonian character of solutions



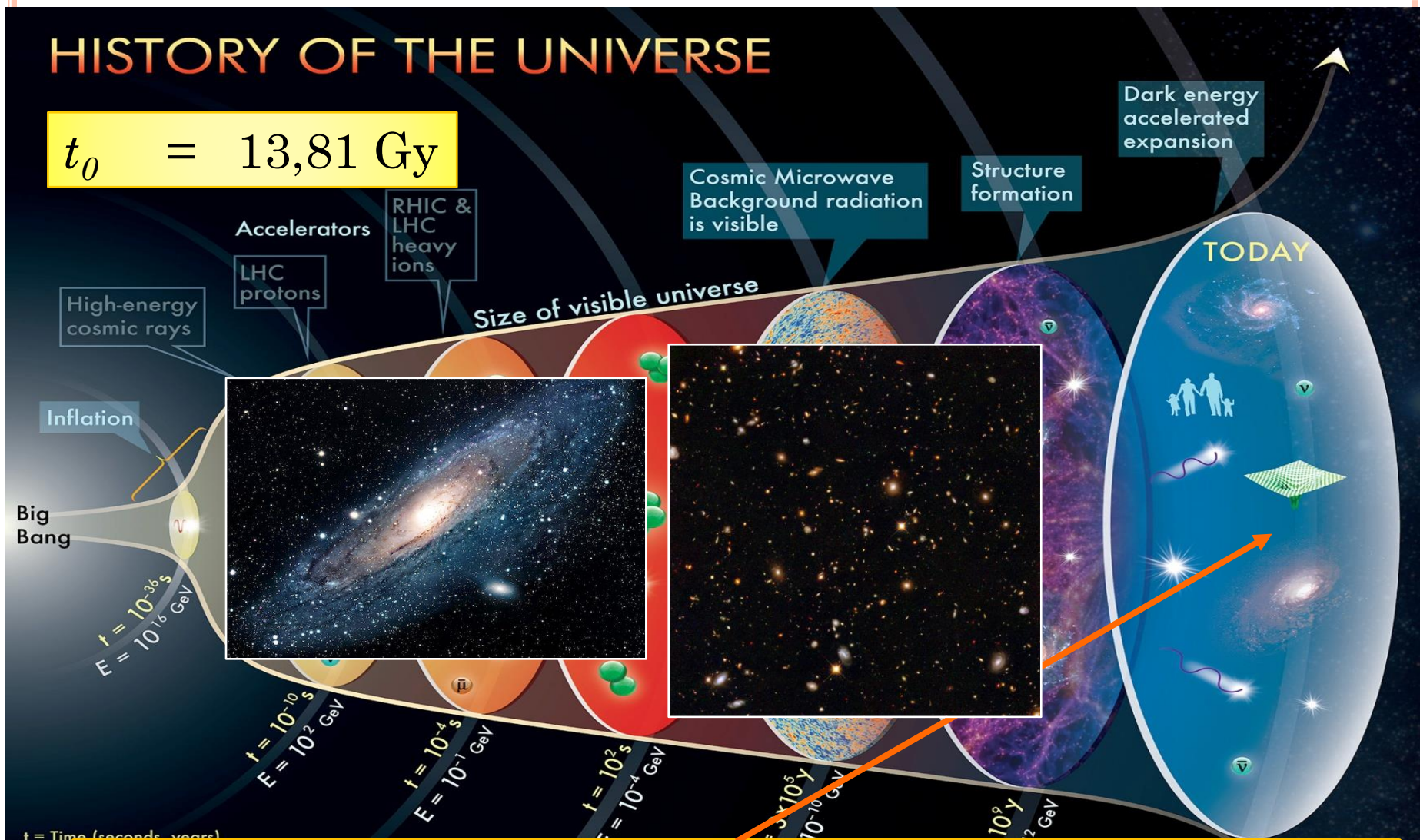
FLRW

Robertson & Walker (1935-36):
find general space-time metric



HISTORY OF THE UNIVERSE

$$t_0 = 13,81 \text{ Gy}$$



L'UNIVERSO OGGI

Principio Cosmologico - Un unico parametro descrive l'espansione $a(t)$ ($a_0 = 1$)

Risultato fondamentale $T_0 = 2,725 \text{ K}$ $T(t) \propto 1/a(t)$

200-2000 miliardi di Galassie (100-200 miliardi di stelle per ognuna)

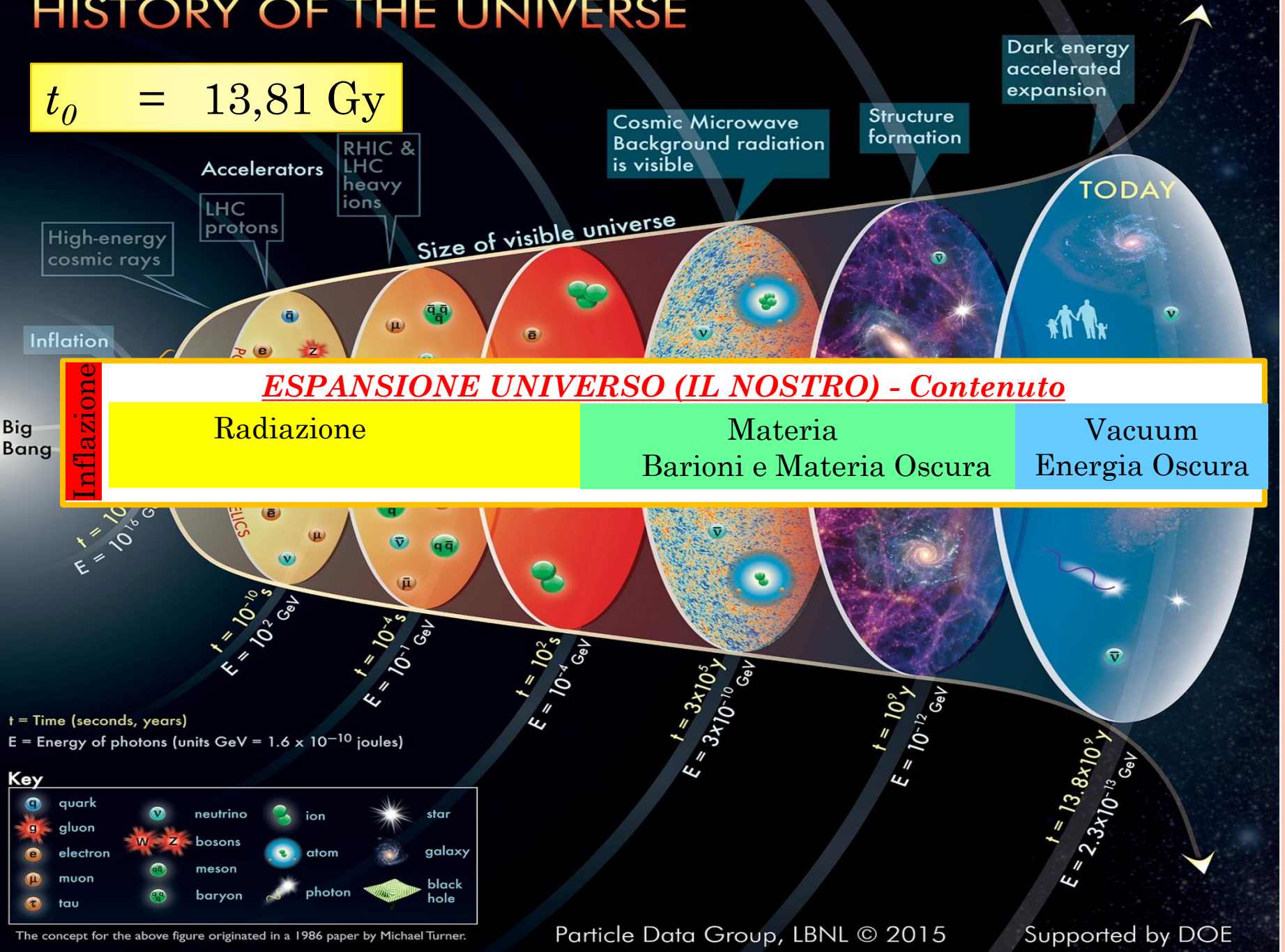
Solo 1% circa della densità (massa-energia) dell'Universo

Orizzonte 46 Miliardi Anni Luce - Velocità di espansione

$$\frac{\dot{a}}{a} = H(t)$$

HISTORY OF THE UNIVERSE

$$t_0 = 13,81 \text{ Gy}$$



FASE INFLAZIONE (10^{-36} - 10^{-34} sec)

Espansione esponenziale (fattore e^{99} o 10^{43})

Lo spazio diventa euclideo (Flatness Problem)

Lo spazio è in equilibrio termodinamico (Horizon Problem)

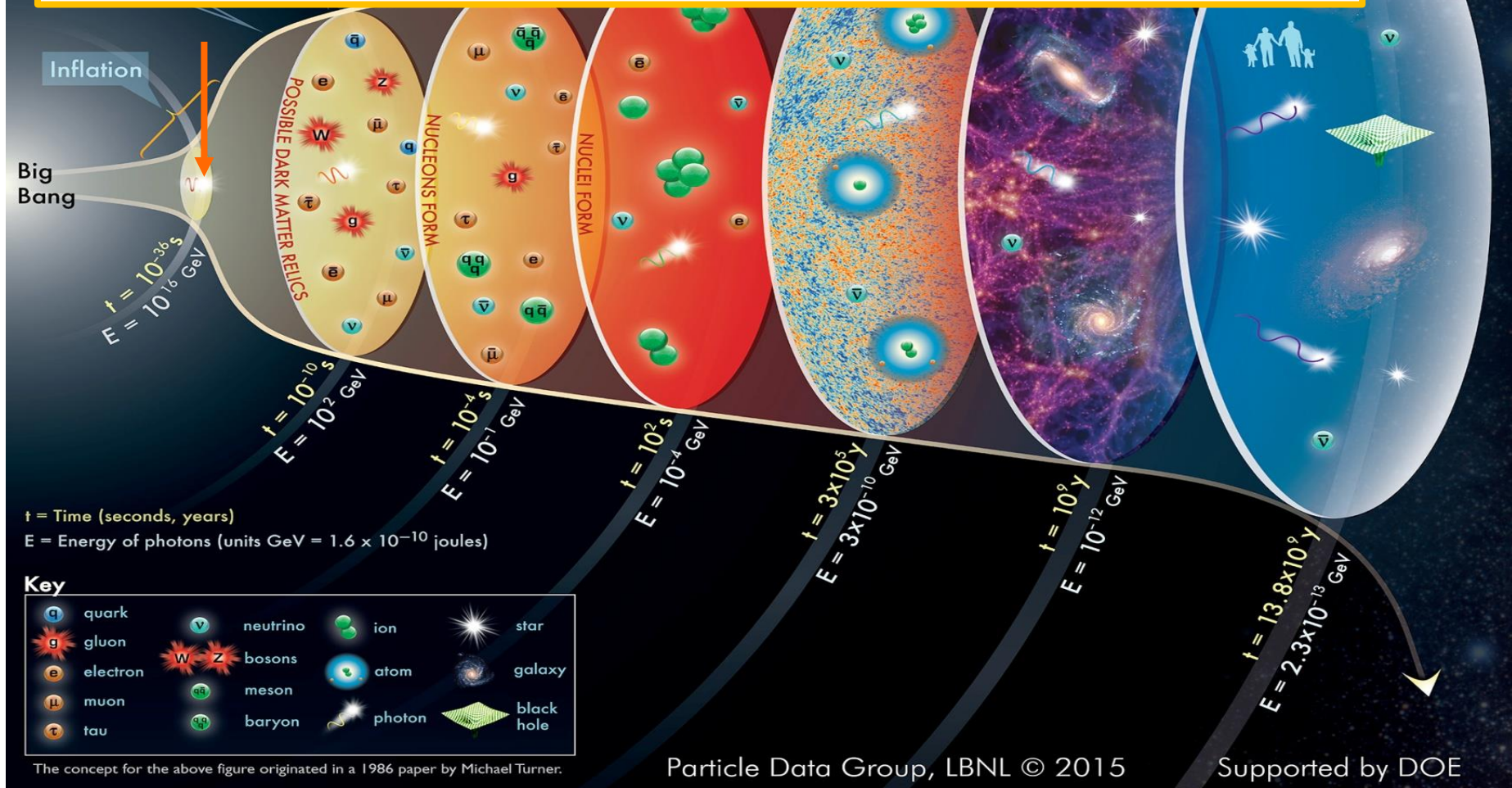
Il Nostro Universo era come un'arancia, forse un pallone o raggio 4 m (Horizon)

La luce ha percorso meno di 30 μm

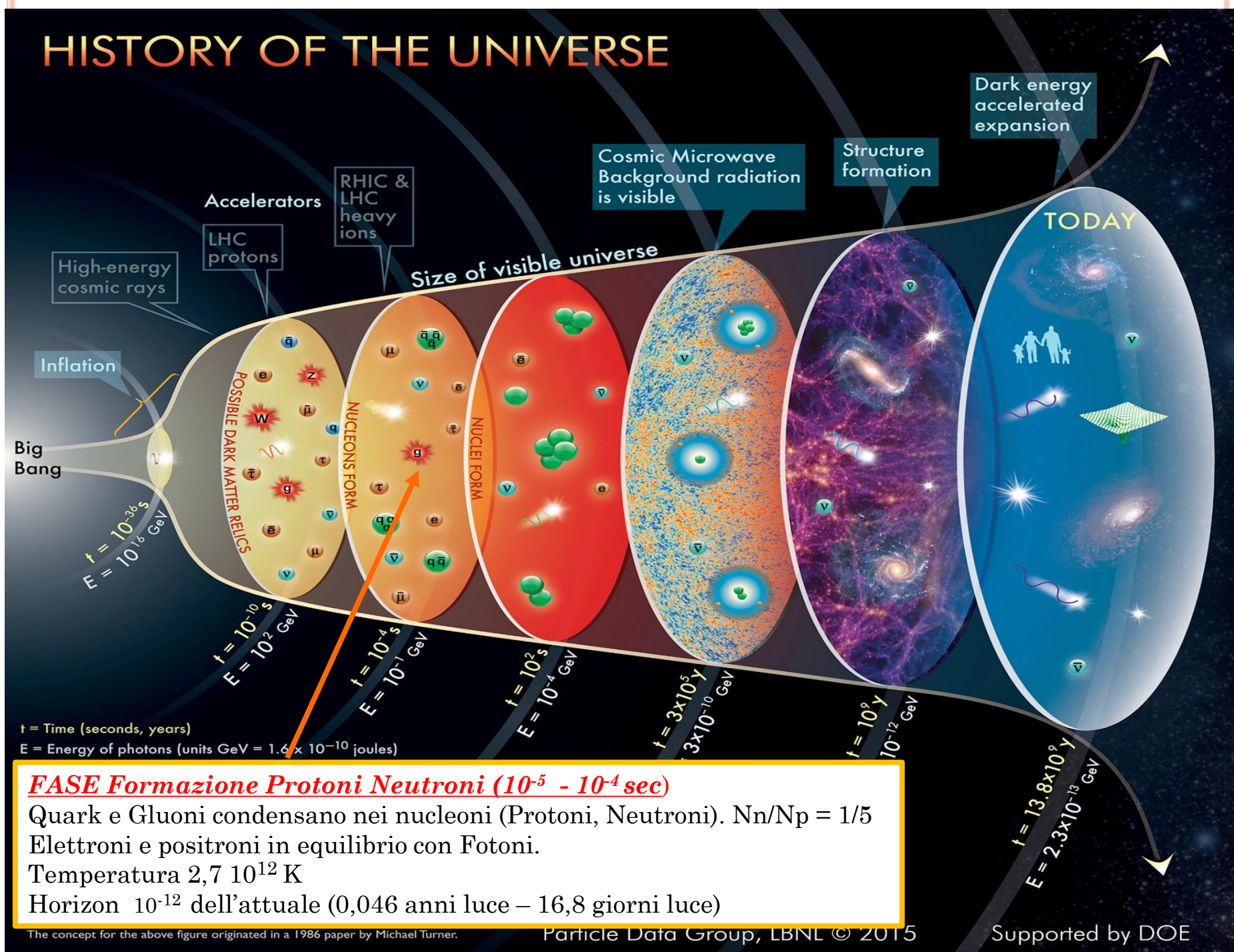
Le fluttuazioni quantistiche – CMB Dot – Galassie oggi

Capacità predittive della Teoria dell'Inflazione. MA non tutti sono d'accordo

L'Universo sarebbe almeno 10^{46} (in volume) più grande del nostro!



HISTORY OF THE UNIVERSE



FASE Formazione Protoni Neutroni ($10^{-5} - 10^{-4} \text{ sec}$)

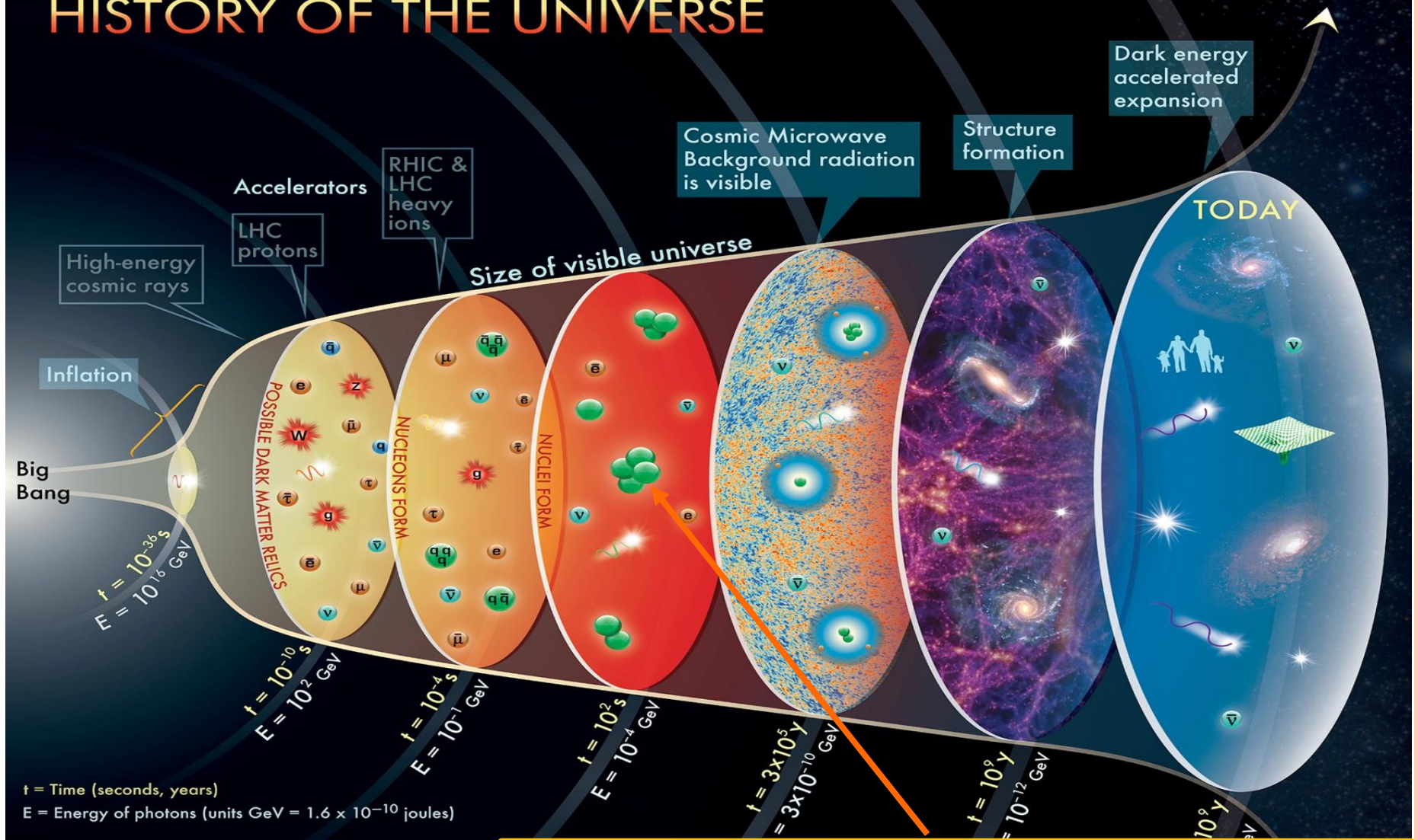
Quark e Gluoni condensano nei nucleoni (Protoni, Neutroni). $N_n/N_p = 1/5$

Elettroni e positroni in equilibrio con Fotoni.

Temperatura $2,7 \cdot 10^{12} \text{ K}$

Horizon 10^{-12} dell'attuale (0,046 anni luce – 16,8 giorni luce)

HISTORY OF THE UNIVERSE



t = Time (seconds, years)

E = Energy of photons (units GeV = 1.6×10^{-10} joules)

Key

	quark		neutrino		ion
	gluon		bosons		atom
	electron		meson		photon
	muon		baryon		black hole
	tau				

FASE Formazione Nuclei H - He (1 - 200 sec)

Neutroni decadono (890 sec circa) . Iniziale $N_n/N_p = 1/5$

H^+ 76% - He^{++} 24% - tracce di Litio, Deuterio. Finale $N_n/N_p = 1/7,3$

Temperatura $77 \cdot 10^6 \text{ K}$

Horizon $3,5 \cdot 10^9$ dell'attuale (160 anni luce)

FASE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND emissione (380.000 anni circa)

Nuclei H e He, Elettroni e fotoni

I positroni si sono annichilati con gli elettroni. Rimangono solo elettroni (asimmetria)

Gli atomi di He si sono formati a T circa 5.000 K (150.000 anni)

La temperatura è intorno ai 3000 K (equilibrio termodinamico - Corpo Nero)

Si formano gli atomi di H.

Dimensione del Nostro Universo circa 1090 più piccolo (42 Mly)

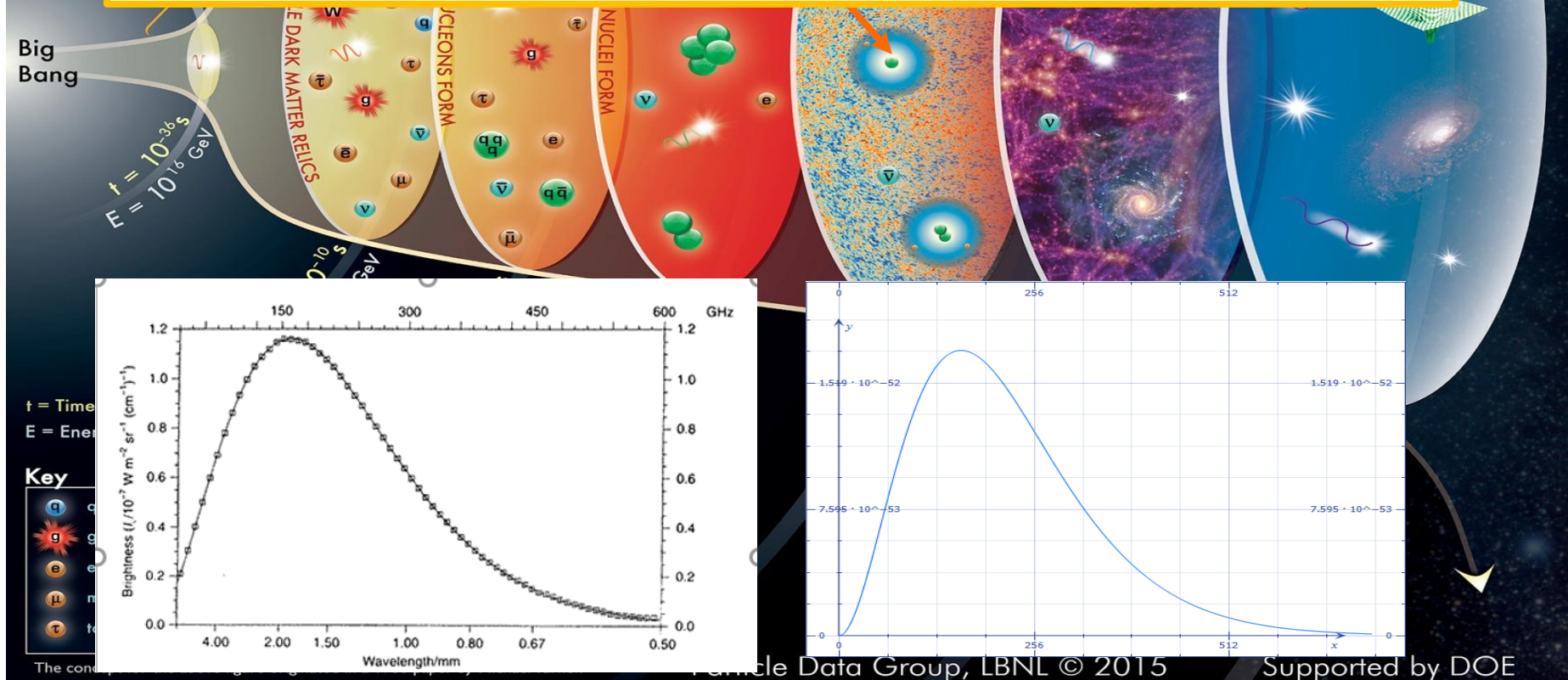
Intorno ai 100.000 anni l'Universo inizia a «suonare». Velocità «suono» circa 0,5 c

Onde 'acustiche' di Barioni (e elettroni) con Fotoni, lasciano una impronta sulla Mappa

I puntini colorati mostrano variazioni di circa 1/100.000 di K

L'Universo diventa trasparente. Una luce «calda» permea il tutto.

Poi, dopo un milione di anni circa, il buio.



HI

FASE Formazione Stelle Galassie ...

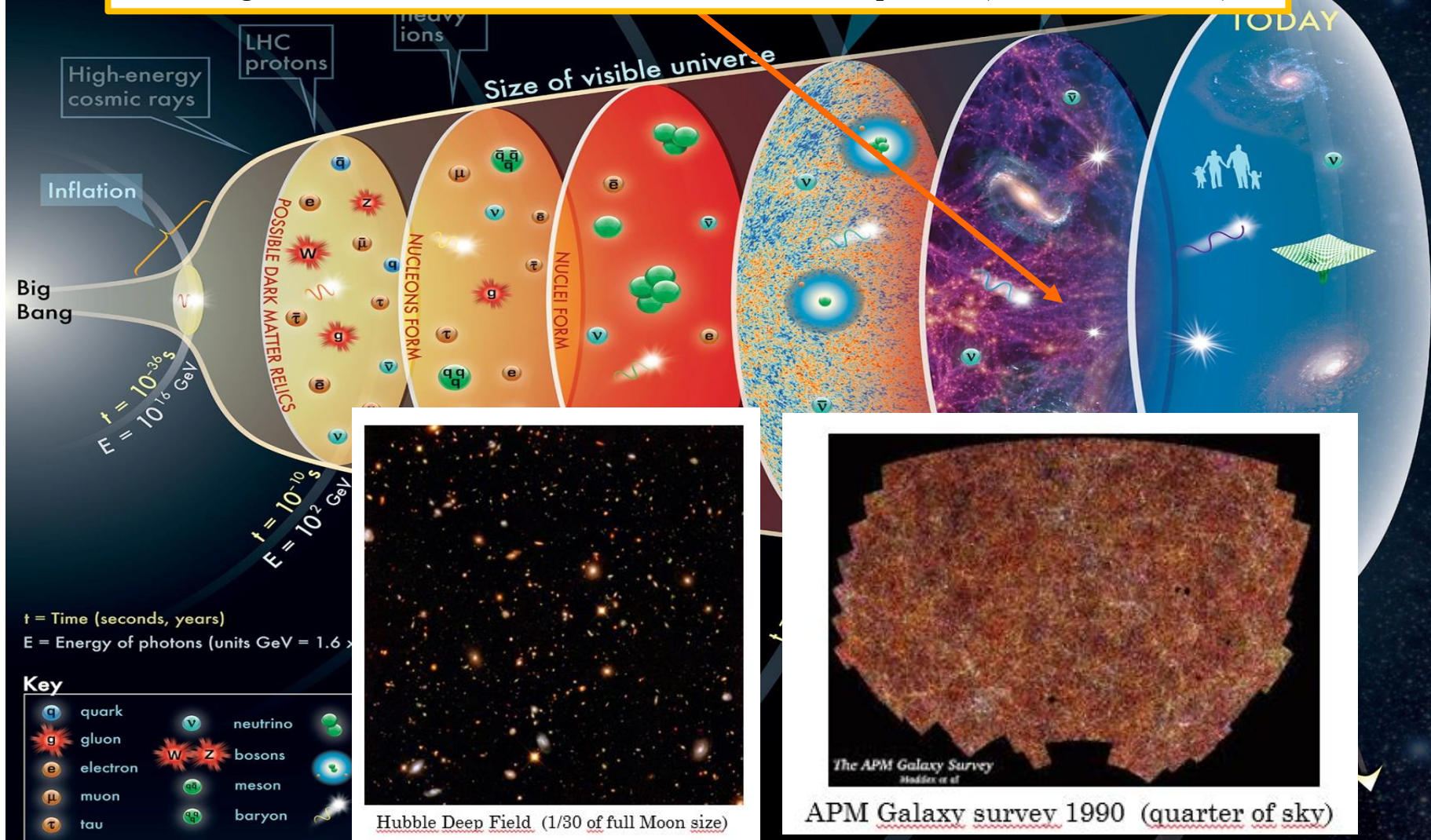
La galassia più lontana osservata ($z=7,5$) esisteva a circa 700 My

Le prime stelle più o meno intorno ai 500 My

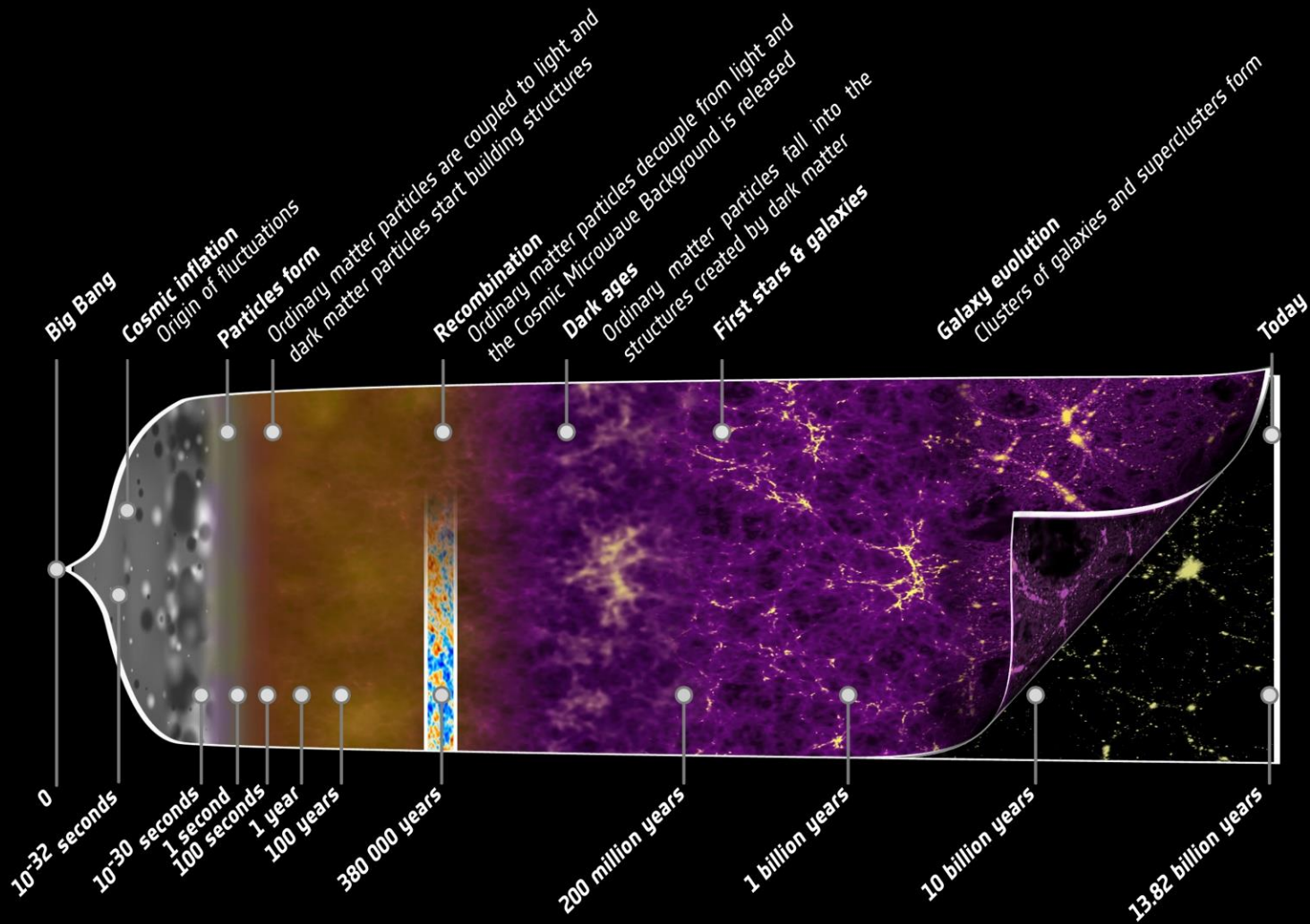
Dalle nubi interstellari si formano aggregati di materia (instabilità gravitazionale)

L'enorme pressione (e temperatura) accende le reazioni di fusione nucleare

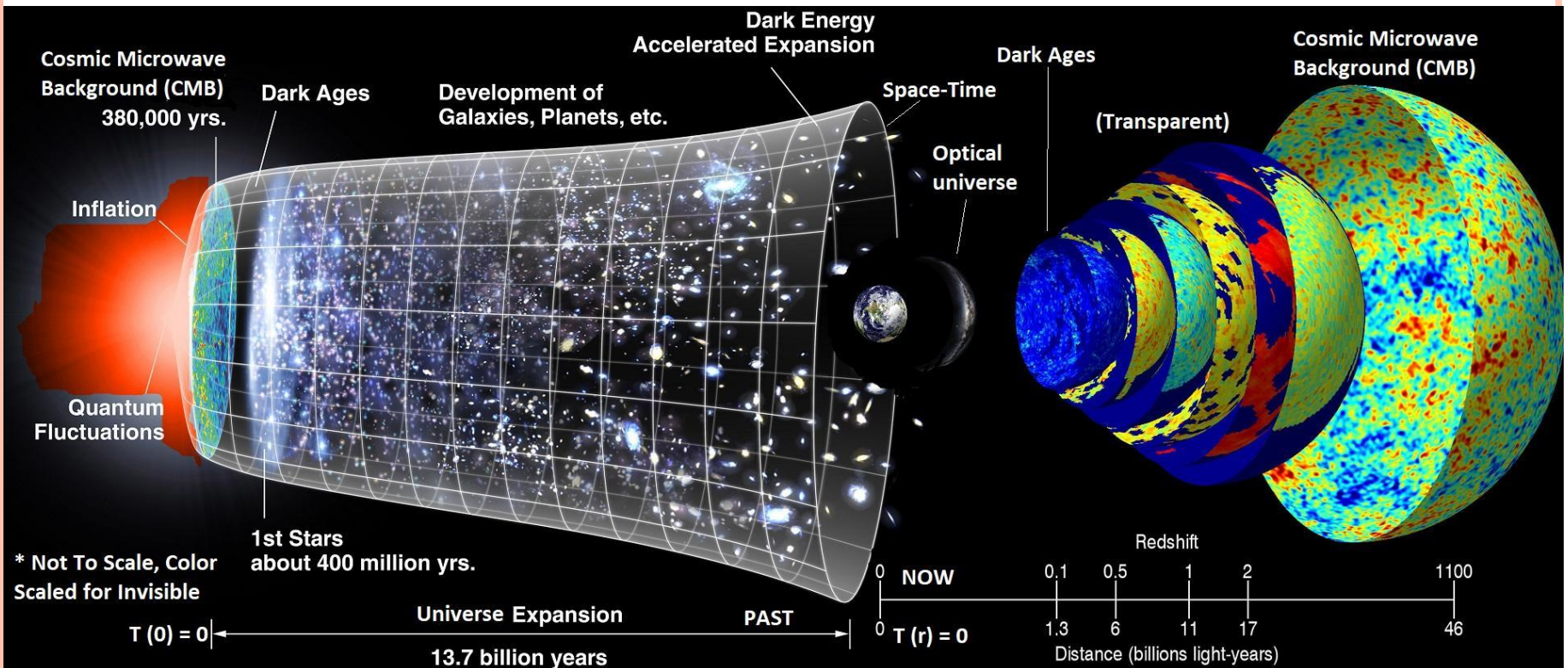
Le forze gravitazionali formano le strutture di livello superiore (Galassie, Cluster)



HISTORY OF UNIVERSE



HISTORY OF UNIVERSE



UNIVERSE IS EXPANDING

PHYSICAL, MATHEMATICAL AND IMAGINATION CHALLENGE

L'Universo è isotropo (principio cosmologico)

- E quindi omogeneo

L'Universo si espande a partire da una fase iniziale (Big Bang)

- La metrica è instabile.

L'espansione è caratterizzato da un solo parametro $a(t)$

- Per convenzione $a=1$ oggi

L'espansione determina un nuovo tipo di red shift

- Red Shift Cosmologico della radiazione elettromagnetica
- Un parametro fisico osservabile

L'Universo è pieno di una radiazione isotropa CMB

- La Temperatura di corpo nero oggi è 2,725 K - $T \propto 1/a(t)$

L'espansione comporta un limite alla distanza osservabile oggi

- Oggi circa 46,5 miliardi di anni luce (*la luce ha viaggiato 13,8 Gy*)

L'espansione comporta un limite alla distanza osservabile in futuro

- Oggi circa 62,5 miliardi di anni luce
- *la luce di una galassia che oggi sta oltre 17,4 Gly non arriverà mai!*



UNIVERSE IS EXPANDING

Riflessioni Domande

- Si espande lo Spazio?
- Dove si espande?
- L'atomo si espande? Noi ci espandiamo?
- La Terra, La Via Lattea, Andromeda?
- A quali distanze prevale l'espansione?
- Esiste un limite per la velocità di recessione?
- Contraddizione con GR? Segnali superluminari?
- Velocità espansione > velocità della Luce?

Commenti Risposte

- Crescono le distanze.
- Da nessuna parte.
- No. Le strutture sono regolate da altre leggi (QM, EM....)
- No. Prevalgono ancora le forze gravitazionali locali.
- Oltre i 100 Mpc. $V_{\text{rec}} > 7.000 \text{ km/s}$
Velocità propria galassie 500 km/s
- No. Le formule non pongono limite. Può essere maggiore di c!
- No. Abbiamo dedotto questo risultato dalla GR. No segnali > c
- Sì! La proprietà additiva delle distanze comporta anche questo



UNIVERSE IS EXPANDING

COSMOLOGICAL RED SHIFT

$$1 + z = \frac{R(t_0)}{R(t_{em})} = \frac{1}{a(t)}$$

$$z = \frac{\lambda_0 - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} = \frac{\lambda_0}{\lambda_{em}} - 1$$

Definizione Red Shift

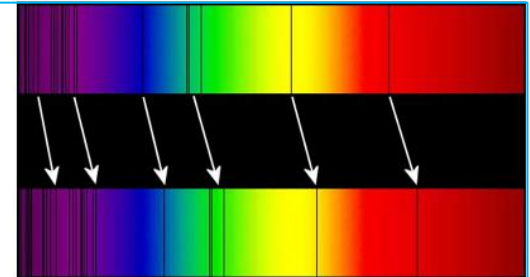
Good news!

- il red shift è un parametro fisico misurabile
- relazione semplice tra *red shift* e *scale factor*

Misuro il red shift di una galassia
(analisi spettrale della luce) e calcolo a

Esempio: $z=1$ $a=1/2$

*la distanza tra noi e la galassia quando è stata emessa
la luce era la metà di quella di oggi (comoving χ)*



Come calcolo il tempo impiegato dalla luce per arrivare? Look back time
Come calcolo la distanza della galassia oggi? Proper distance



UNIVERSE IS EXPANDING

COSMOLOGICAL RED SHIFT

Il redshift è cosmologico, non è un effetto Doppler.
Le galassie sono “ferme”. E' lo spazio che si espande.

Tre tipi di red shift

○ *Redshift Cosmologico*

- Dovuto all'espansione dell'Universo su grande scala
- Non dipende dalla velocità propria dell'oggetto
- Dipende dal percorso compiuto, (di quanto si è espanso nel mentre lo spazio)

○ *Redshift (o Blueshift) Doppler*

- Dovuto solo alla velocità peculiare della galassia al momento della emissione
- Non cambia durante il percorso
- Esiste anche una formula relativistica

○ *Redshift Gravitazionale*

- Dovuto all'intensità del campo gravitazionale
- Il tempo rallenta in presenza di un campo gravitazionale
- Le frequenze di emissione (della luce) si spostano verso il rosso
- Previsto dalla GR



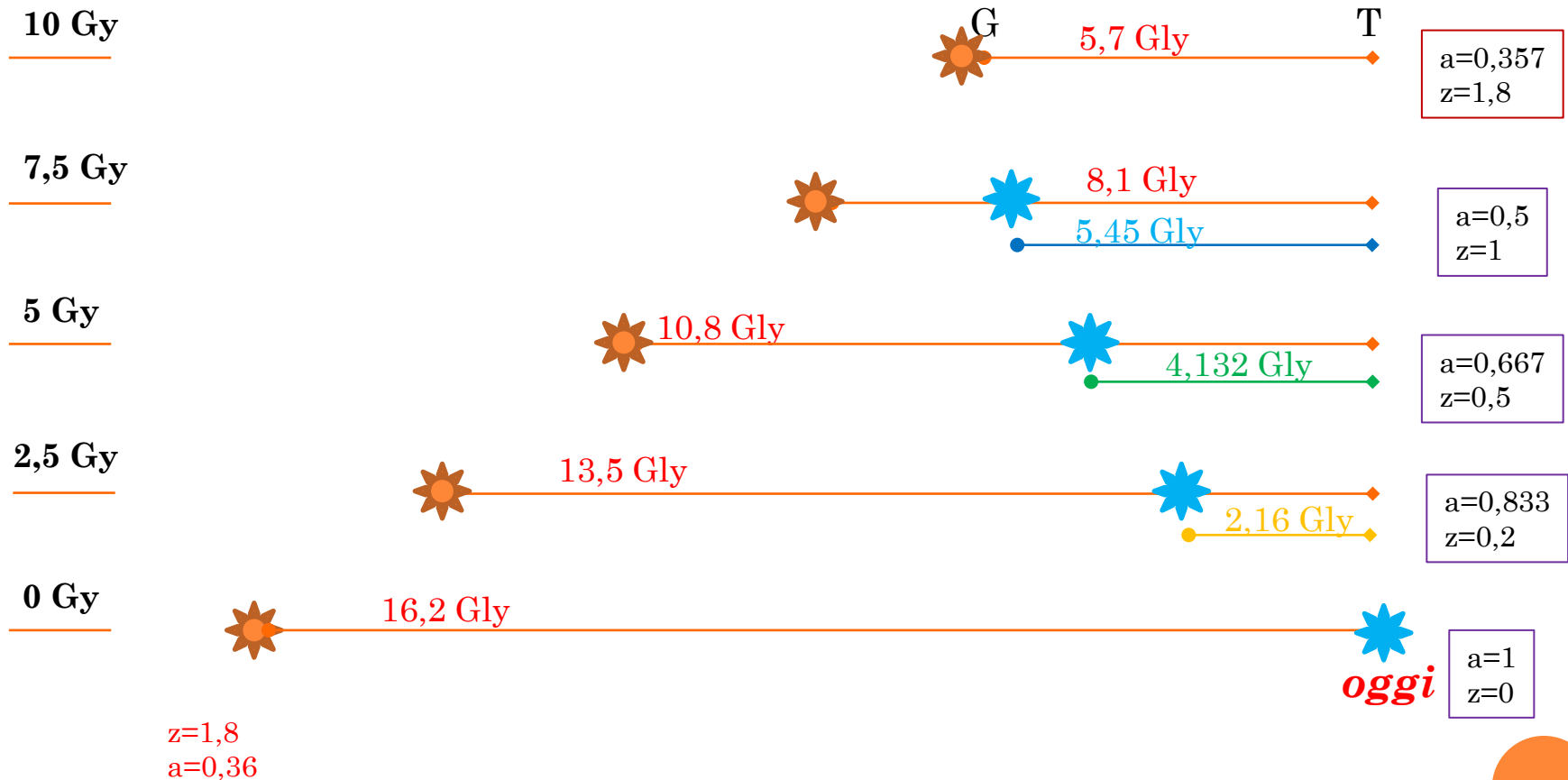
UN CALCOLO CHE VORREMMO FARE (CHE FAREMO!)

OGGI OSSERVO GALASSIA CON $z=1,8$

CALCOLO TEMPO = 10 Gy (LA LUCE HA VIAGGIATO PER 10 Gy)

CALCOLO DISTANZA OGGI = 16,2 Gly

MOLTIPLICO PER COEFFICIENTE DI ESPANSIONE = 5,7 Gly



- Andate su Google Play o su Apple store e scaricate WolframAlpha (anche su PC www.wolframalpha.com).
- Cercate Cosmological redshift. Immettete vari valori al redshift z (es 1.8), scegliete redshift cosmologico (non doppler please),
- Leggete i risultati e controllate anche i miei numeri.

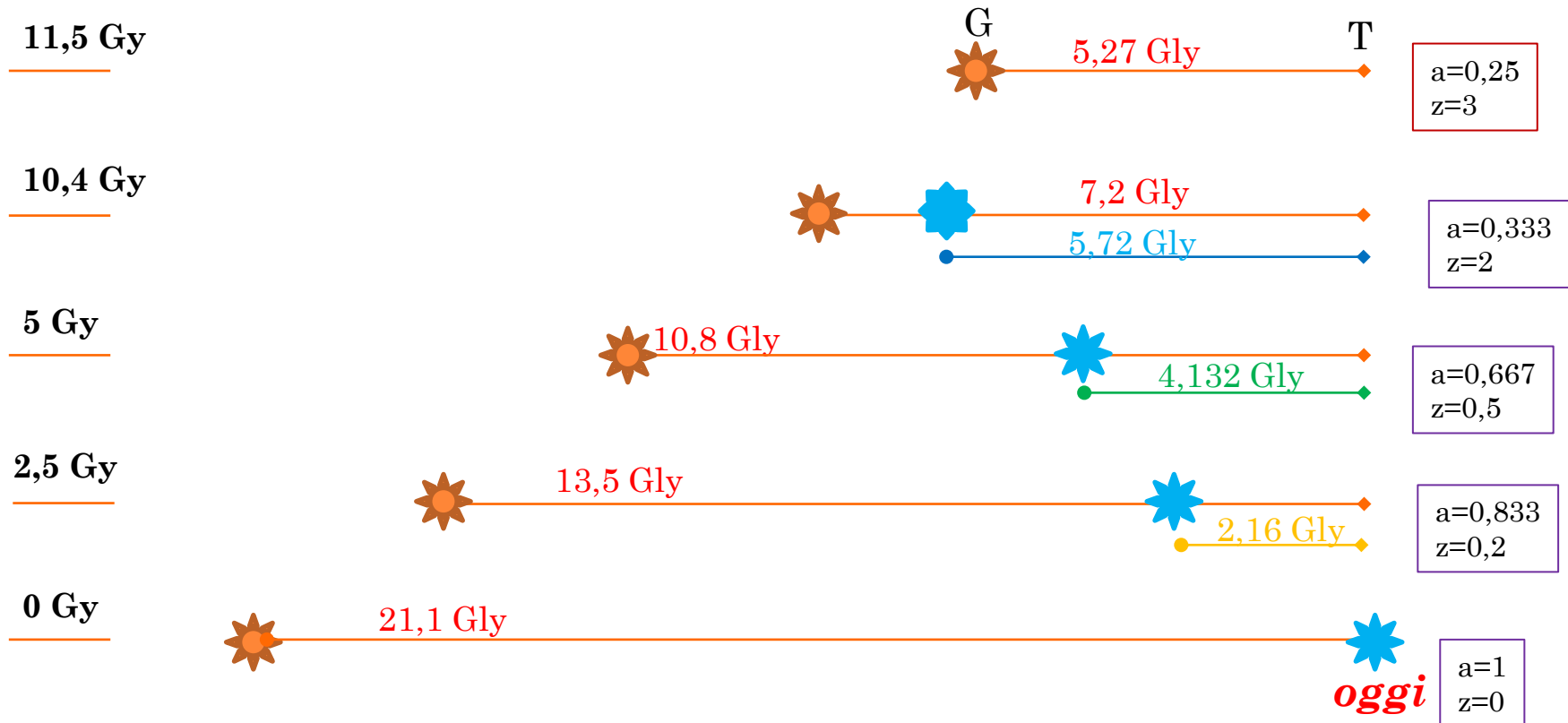
UN CALCOLO CHE VORREMMO FARE (CHE FAREMO!)

OGGI OSSERVO GALASSIA CON $z=3$ (MASSIMO OSS. 7,5! 13 GLY AGO)

CALCOLO TEMPO = 11,5 Gy

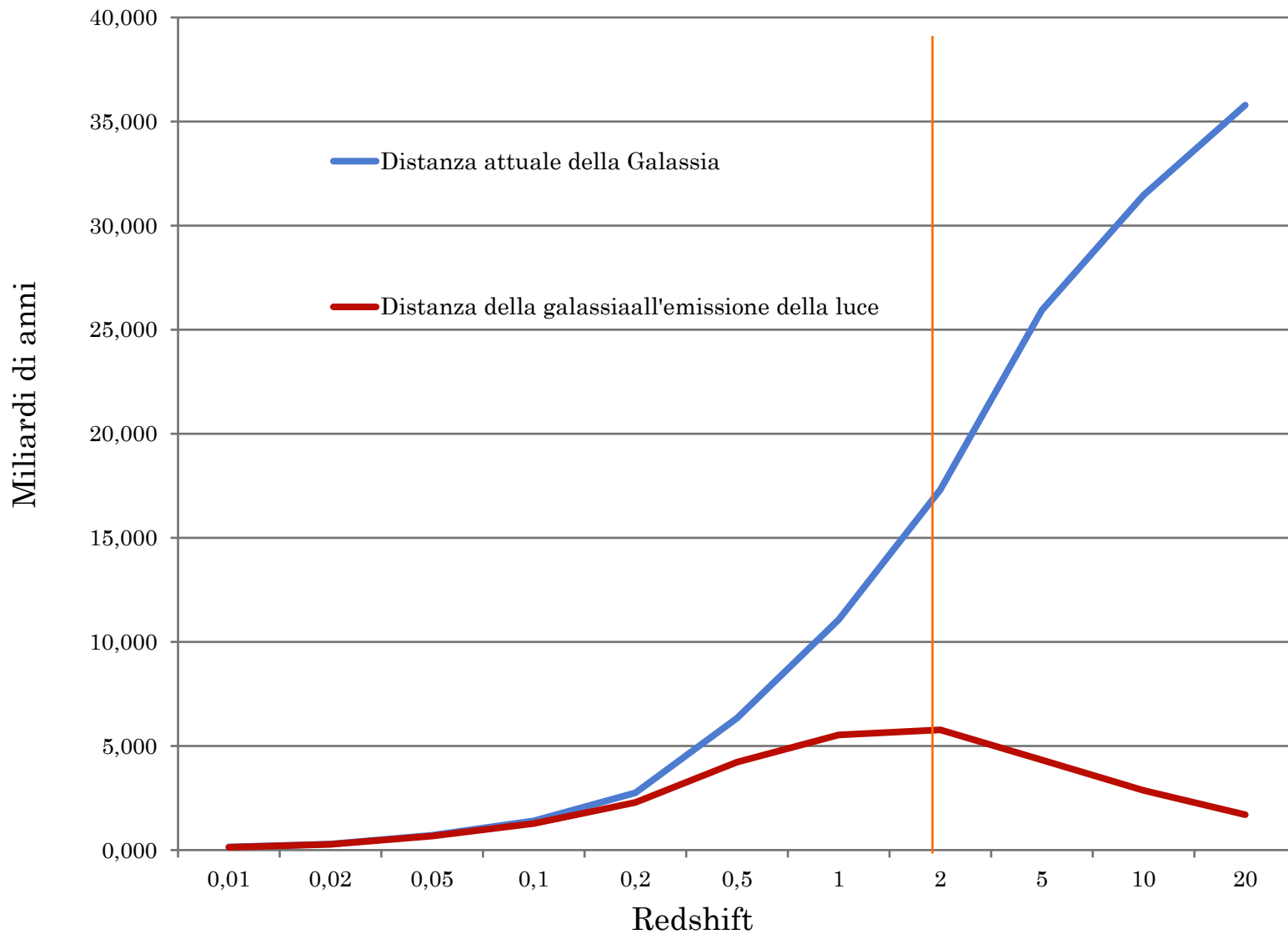
CALCOLO DISTANZA OGGI = 21,1 GLY

MOLTIPLICO PER COEFFICIENTE DI ESPANSIONE = 5,27 GLY



- Andate su Google Play o su Apple store e scaricate WolframAlpha (anche su PC www.wolframalpha.com).
- Cercate Cosmological redshift. Immettete vari valori al redshift z (es 1.8), scegliete redshift cosmologico (non doppler please),
- Leggete i risultati e controllate anche i miei numeri.

UNIVERSE MYSTERY



UNIVERSE WHO?

A ciascuno il suo Universo!



Who? What? When? Where? Why?

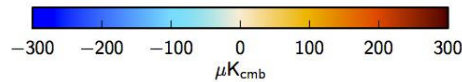
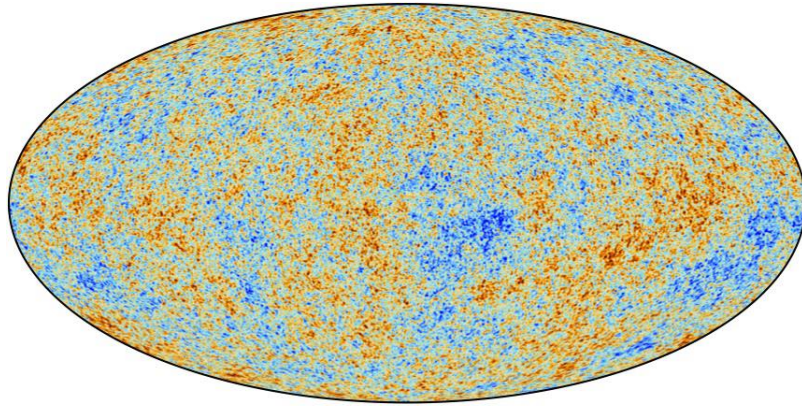
STANDARD COSMOLOGICAL MODEL

RADIATION – ESA PLANCK COLLABORATION (2015)

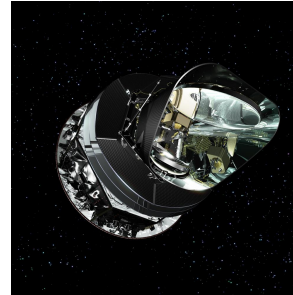
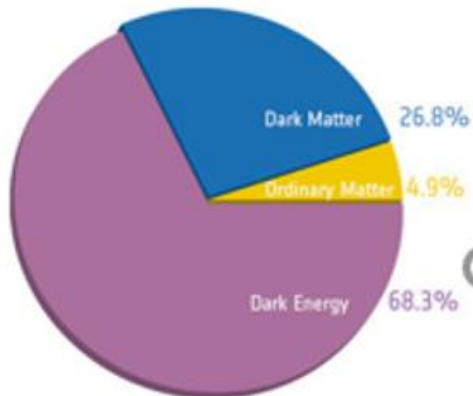
Parameter	Value			%
Radiation	$\Omega_{r,0} = 9,1 \cdot 10^{-5}$	Photons	$\Omega_{r,0} = 5,4 \cdot 10^{-5}$	0%
		Neutrinos	$\Omega_{n,0} = 3,7 \cdot 10^{-5}$	
Matter	$\Omega_{m,0} = 0,308$	Dark	$\Omega_{dm,0} = 0,259$	25,9 %
		Baryonic	$\Omega_{bm,0} = 0,049$	4,9%
Vacuum	$\Omega_{\Lambda,0} = 0,692$			69,2%
Hubble	$H_0 = 67,8$	km/s Mpc		
Age /Gyr	$t_0 = 13,81$			
$Stellar \Omega_{b*,0} = 0,009$ $\eta = 6,1 \cdot 10^{-10}$ barioni/fotone (1,64 miliardi fotoni/barione) $\Sigma \Omega_i = 1 \quad K=0$ <i>Universe is flat (!?)</i>				
$n_{baryon} = 0,25/m^3$				

UNIVERSE CONTENT TODAY

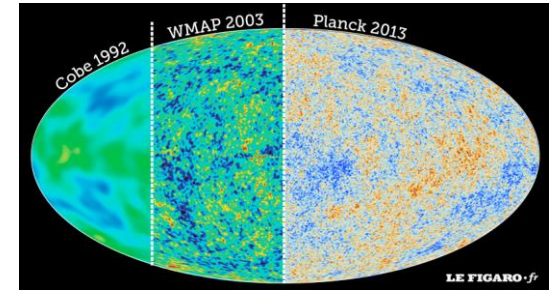
ESA PLANCK – COSMOLOGICAL FIGURES



CMB ΔT Map

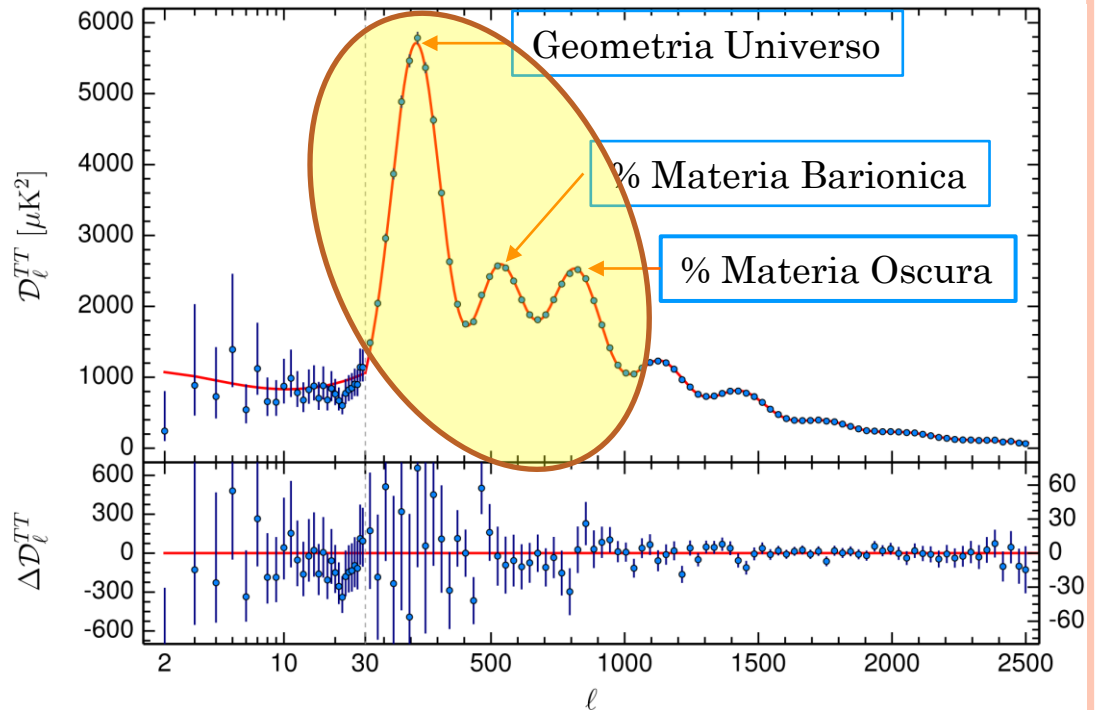


Esa Planck Satellite at L2



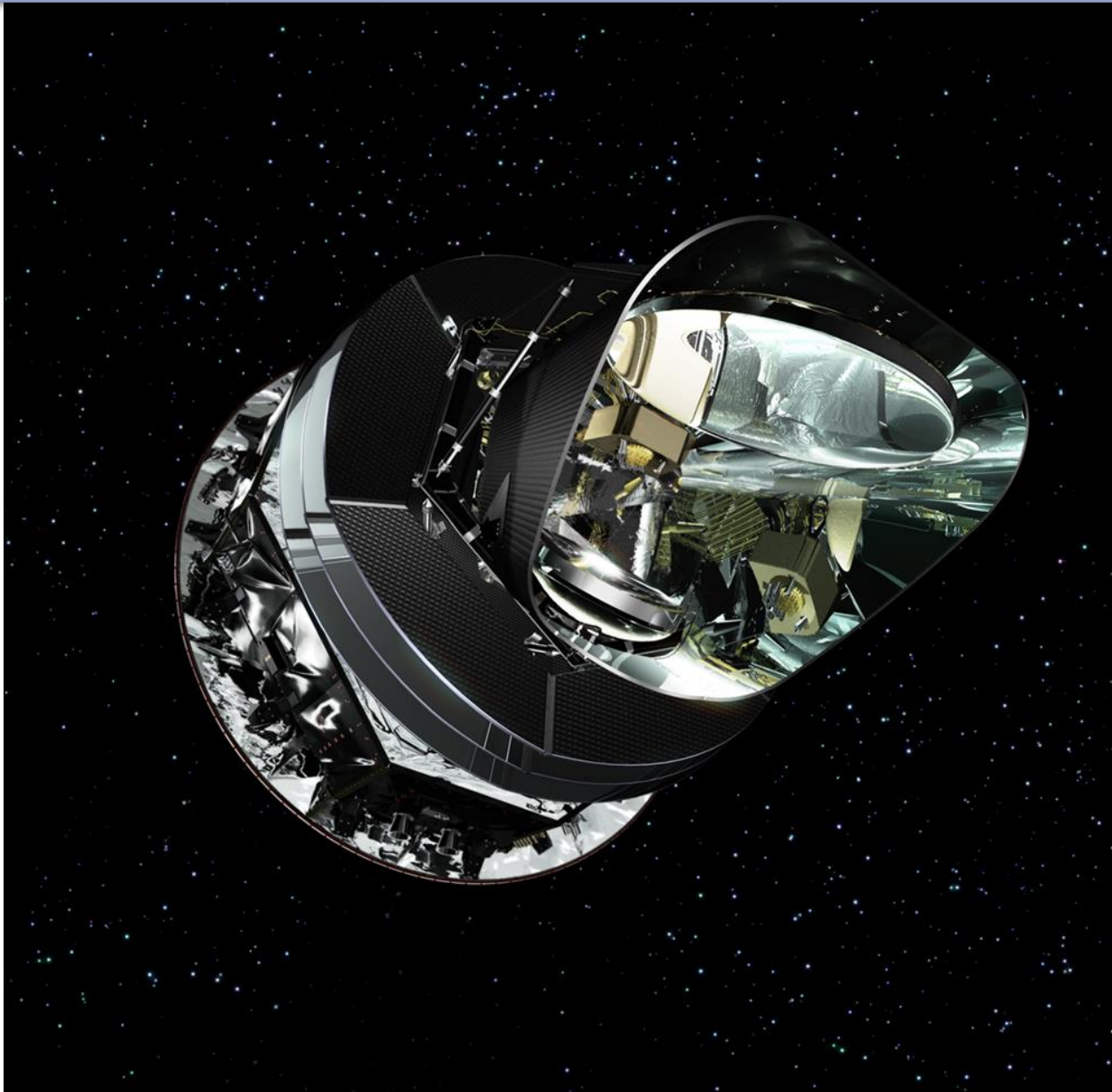
Cobe, WMAP, Planck

Angular Power Spectrum



UNIVERSE CONTENT TODAY

ESA PLANCK SATELLITE AT L2



MODELLI COSMOLOGICI

COMPOSIZIONE NEL TEMPO DELL'UNIVERSO

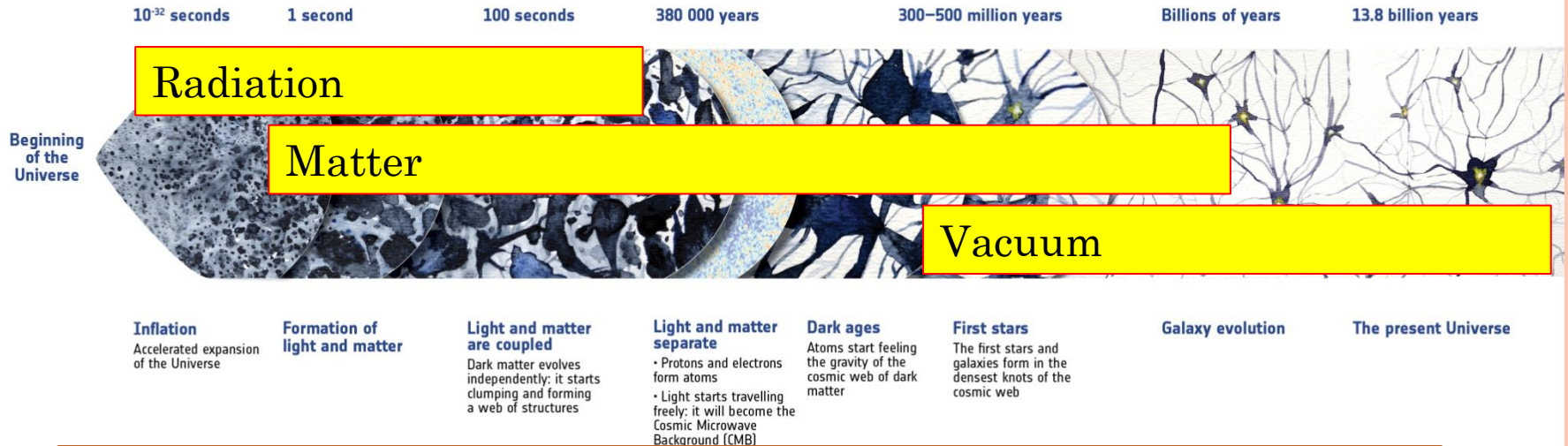
Fluid Components		State Parameter	Density (t or z)	$\rho = \alpha R^{-3(1+w)}$
Radiation •Photons •Neutrinos	CMB Photons Neutrinos	$w= 1/3$	$\rho_r(t) = \rho_{r,0} \left[\frac{R_0}{R(t)} \right]^4 = \rho_{r,0} a^{-4}$	
			$\rho_r(z) = \rho_{r,0} (1+z)^4$	
Matter •Barionic •Dark Matter	Dust, no pressure Galaxies	$w= 0$	$\rho_m(t) = \rho_{m,0} \left[\frac{R_0}{R(t)} \right]^3 = \rho_{m,0} a^{-3}$	
			$\rho_m(z) = \rho_{m,0} (1+z)^3$	
Vacuum •Dark Energy	Negative pressure	$w= -1$	$\rho_\Lambda(t) = \rho_{\Lambda,0} = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G}$	
Assumption. • No or low interaction between different cosmological fluid • w for radiation need more insight			$\rho(t) = \rho_{r,0}a^{-4} + \rho_{m,0}a^{-3} + \rho_{\Lambda,0}$	
			$\rho(t) = \rho_{r,0}(1+z)^4 + \rho_{m,0}(1+z)^3 + \rho_{\Lambda,0}$	

COSMOLOGICAL MODEL

RADIATION MATTER VACUUM INTERPLAY AND OPEN PROBLEMS



→ COSMIC HISTORY



Dark Matter?
Dark Energy?
Hubble Parameter today?

- *Introduzione per lay person*
 - <https://salvatoreaglieririnella.com/scopo-di-universo-e-dintorni/>
(Universo democratico, immenso, irrequieto, pazzesco, superveloce, dark)
- *Corso per ingegneri, fisici, matematici (orientati alla didattica e self study)*
 - Hobson, General Relativity
(Relatività, Black hole, Gravitational wave, Cosmology)
 - Ryden, Introduction to Cosmolgy
 - Liddle, Modern Cosmology
 - Hartle, Gravity (Relatività, Black Hole, Cosmology,...)
 - Carrol Ostile, Modern Astrophysics
- *Testi articoli avanzati (post-graduate)*
 - Tamara Davis, Expanding Confusion
 - Weinberg, Cosmology
 - Mukhanov, Cosmology
- *Testi e articoli divulgativi*
 - Tamara Davis, Misconceptions about the Bing Bang
 - Paolo De Bernardis, Solo un miliardo di anni?
 - Amedeo Balbi, La musica del Big Bang

EXPANDING