CERN
European Organization for Nuclear Research
Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire
erc NewDark

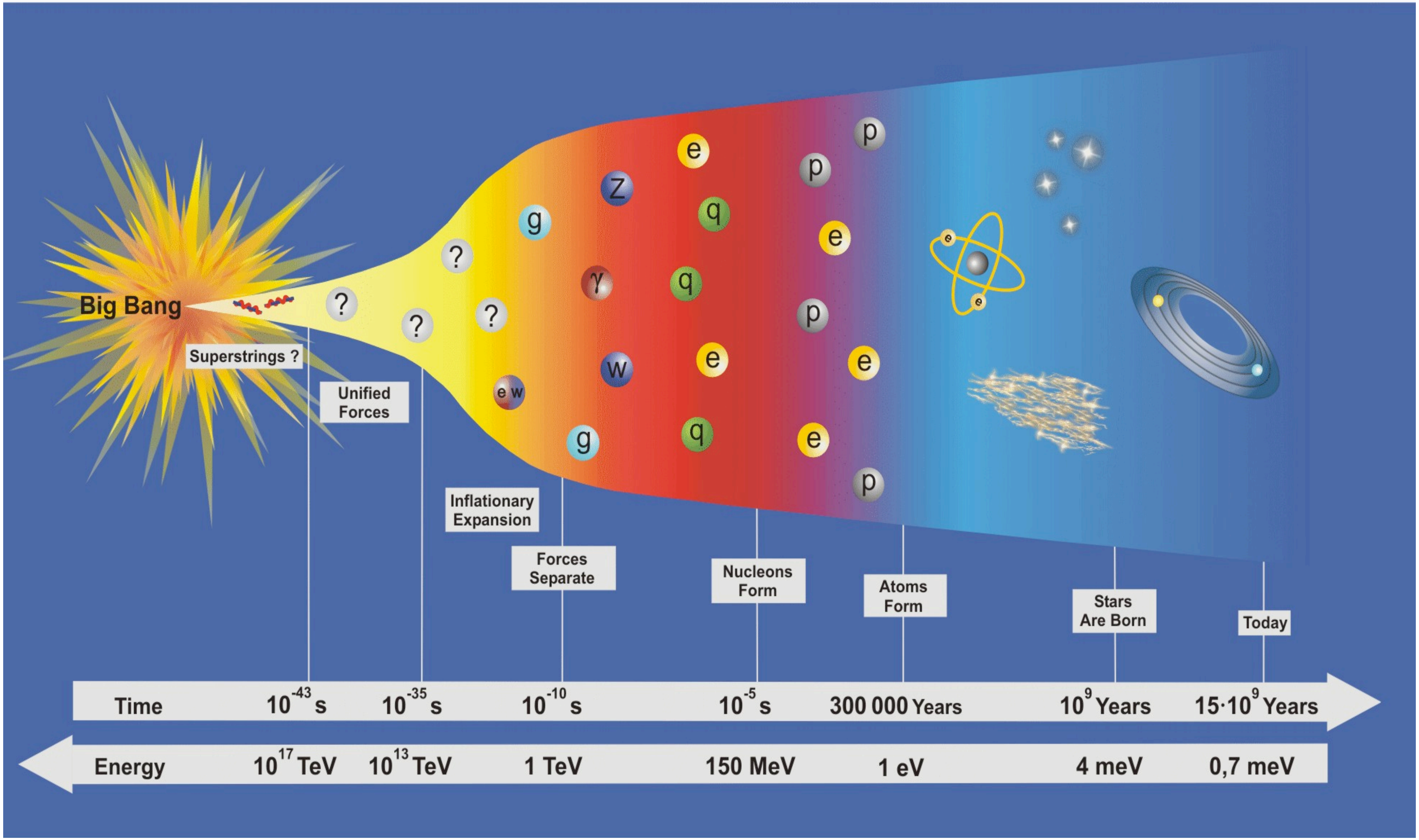
Fisica delle Particelle, Astrofisica & Cosmologia

- Breve storia dell'Universo:
  inflazione, BG, BBN, CMB, LSS
- Materia Oscura
- Energia Oscura

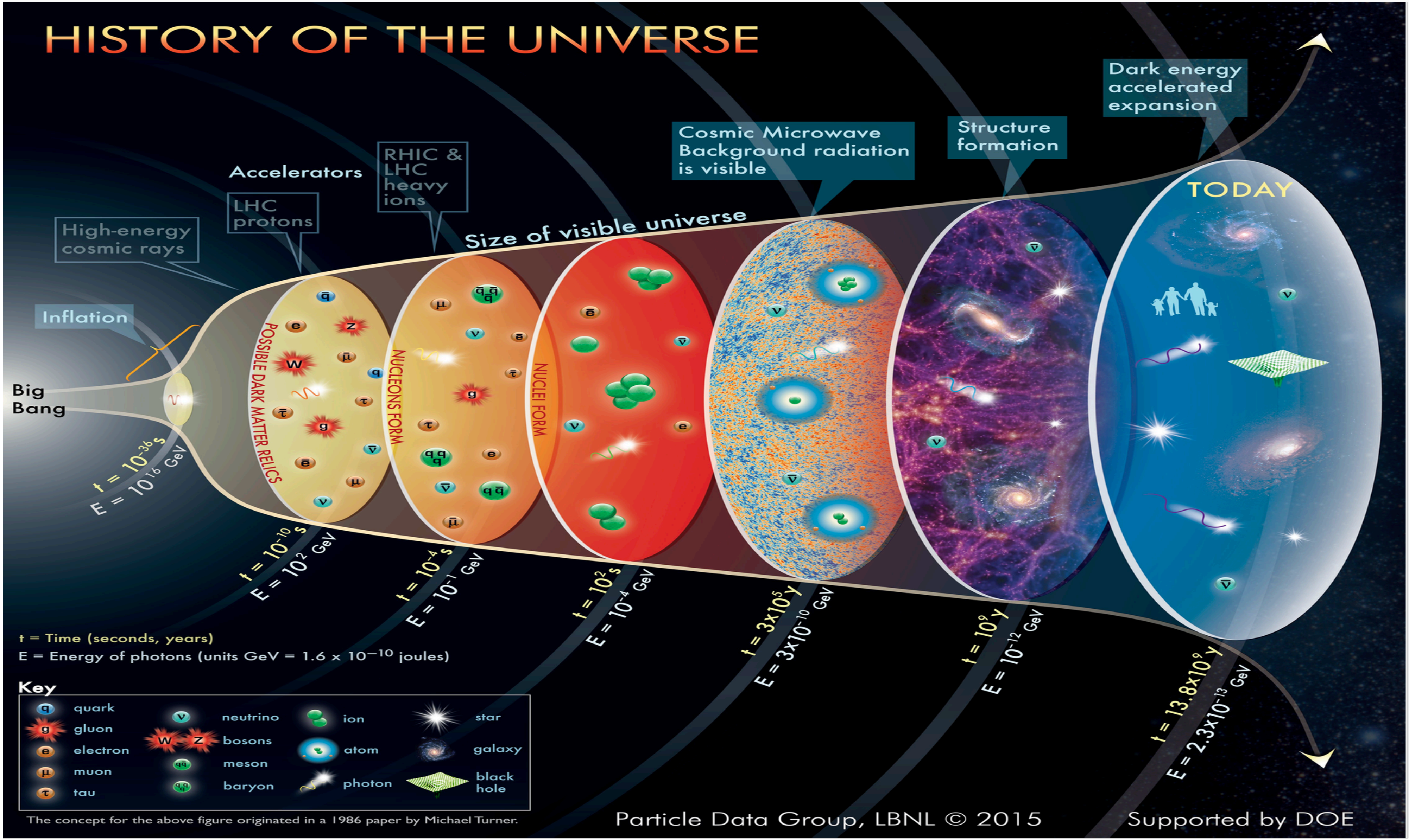
Marco CIRELLI [CNRS LPTHE Jussieu]

Breve storia dell’Universo

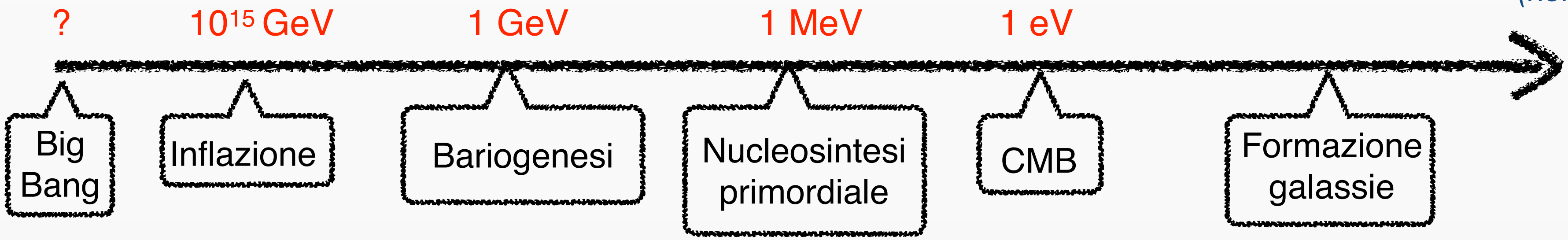
Ripercorrere all'indietro la storia dell'Universo



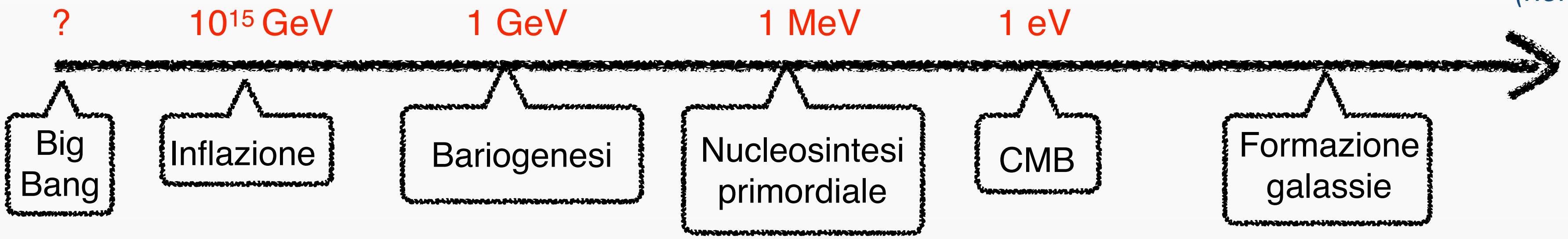
Ripercorrere all'indietro la storia dell'Universo



(non in scala!)


?
10^{15} GeV
1 GeV
1 MeV
1 eV
Big Bang
Inflazione
Bariogenesi
Nucleosintesi primordiale
CMB
Formazione galassie

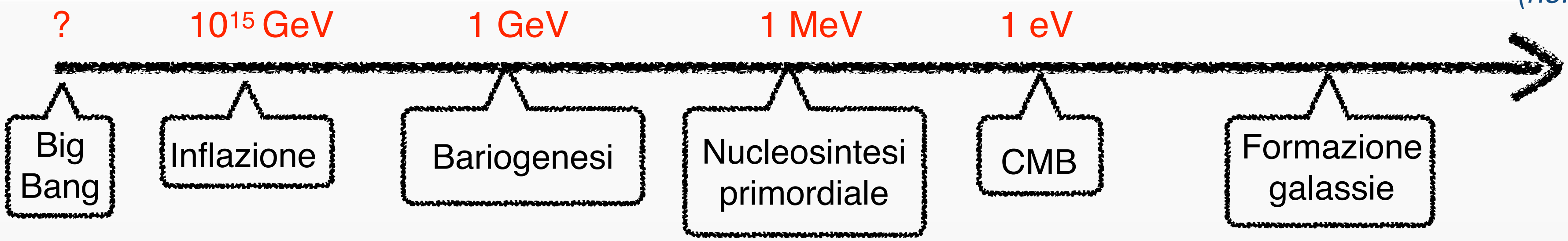
(non in scala!)



Concetto base:

l'Universo si espande e si raffredda

(non in scala!)



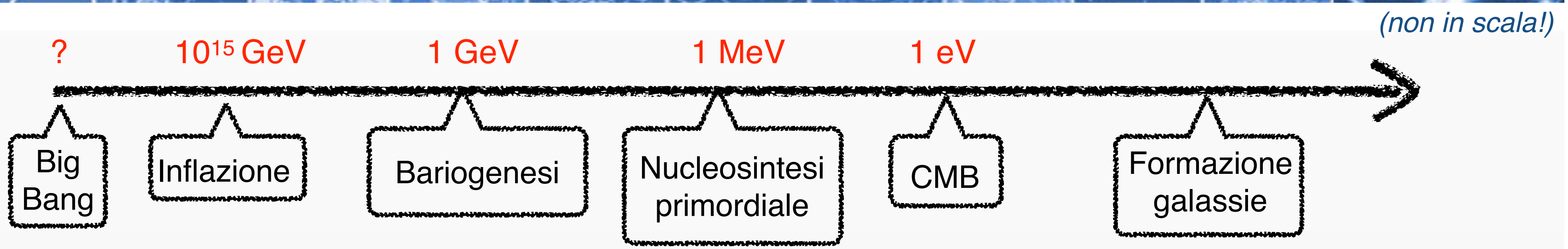
Concetto base:

l’Universo si espande e si raffredda

aumenta di volume
come un panettone che lievita

(FAQ: *in* che cosa si espande?) *

* Altre domande trabocchetto (con le risposte): https://preposterousuniverse.com/cosmologyprimer/faq.html



Concetto base:

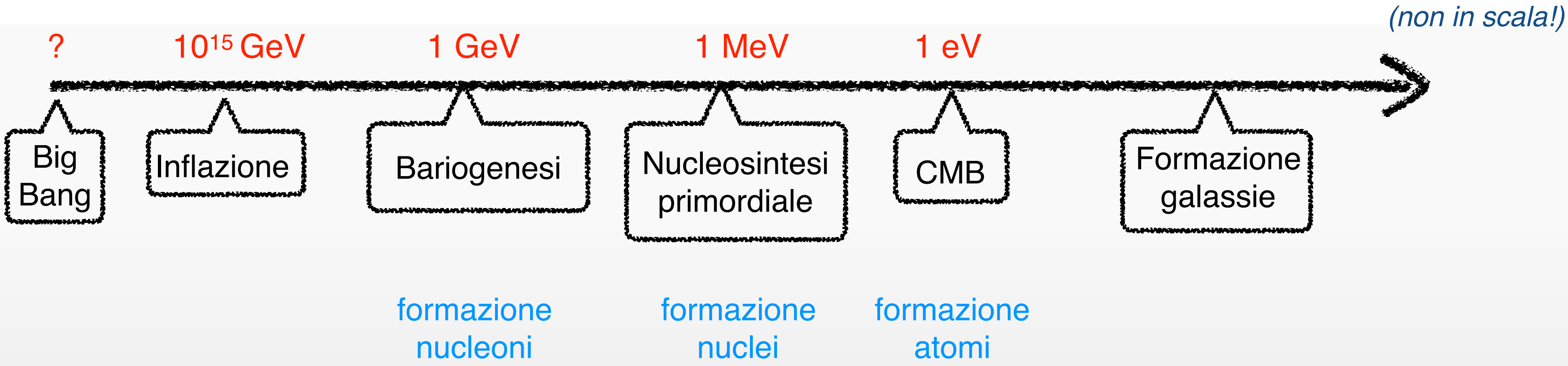
l'Universo si espande e si raffredda

aumenta di volume
come un panettone che lievita

(FAQ: *in* che cosa si espande?)

a **alte T**, la materia si **dissocia** nei costituenti fondamentali

a **basse T**, la materia si **agglomera** in strutture sempre più complesse



Concetto base:

l’Universo si espande e si raffredda

aumenta di volume
come un panettone che lievita

(FAQ: *in* che cosa si espande?)

a **alte T**, la materia si **dissocia** nei costituenti fondamentali

a **basse T**, la materia si **agglomera** in strutture sempre più complesse

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

Equazioni di Einstein

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

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

Equazioni di Einstein

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

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

Equazioni di Einstein

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

geometria dello spazio-tempo

contenuto di materia e energia

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

Equazioni di Einstein

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

geometria dello spazio-tempo | *contenuto di materia e energia*

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\mathcal{R} g_{\mu\nu}$$

$R_{\mu\nu}$ funzione di $g_{\mu\nu}$

$g_{\mu\nu}$: la metrica

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

Equazioni di Einstein

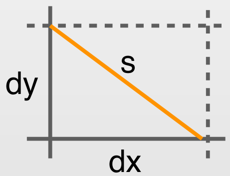
$$G_{\mu\nu} = 8\pi\, G\, T_{\mu\nu}$$

geometria dello spazio-tempo | *contenuto di materia e energia*

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\mathcal{R} g_{\mu\nu}$$

$R_{\mu\nu}$ funzione di $g_{\mu\nu}$

$g_{\mu\nu}$: la metrica



$s^2 = dx^2 + dy^2$

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

'Teorema di Pitagora'

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

Equazioni di Einstein

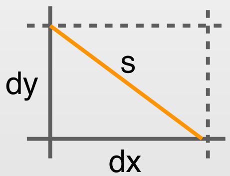
$$G_{\mu\nu} = 8\pi\, G\, T_{\mu\nu}$$

geometria dello spazio-tempo | *contenuto di materia e energia*

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\mathcal{R} g_{\mu\nu}$$

$R_{\mu\nu}$ funzione di $g_{\mu\nu}$

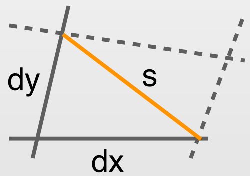
$g_{\mu\nu}$: la metrica



$s^2 = dx^2 + dy^2$

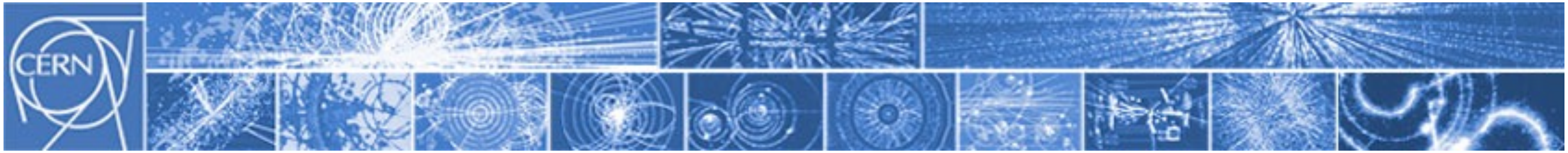
$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

'Teorema di Pitagora'



$g_{\mu\nu} = \dots$

~~*'Teorema di Pitagora'*~~



Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

Equazioni di Einstein

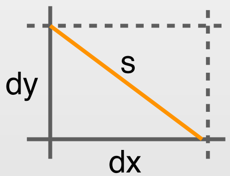
$$G_{\mu\nu} = 8\pi\, G\, T_{\mu\nu}$$

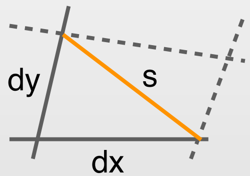
geometria dello spazio-tempo | *contenuto di materia e energia*

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\mathcal{R} g_{\mu\nu}$$

$R_{\mu\nu}$ funzione di $g_{\mu\nu}$

$g_{\mu\nu}$: la metrica





$s^2 = dx^2 + dy^2$

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

'Teorema di Pitagora'

$g_{\mu\nu} = \ldots$

~~*'Teorema di Pitagora'*~~

Esempio: metrica di Schwarzschild attorno a un buco nero di massa M:

$$s^2 = \frac{\left(1 - \frac{M}{2R}\right)^2}{\left(1 + \frac{M}{2R}\right)^2} dt^2 - \left(1 + \frac{M}{2R}\right)^4 (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$ (in coordinate "isotropiche")

per 'M grande' o 'R piccolo', deviazioni da spazio-tempo piatto

(NB nel seguito guarderemo allo spazio-tempo dell'intero universo, non a effetti locali)

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

Equazioni di Einstein

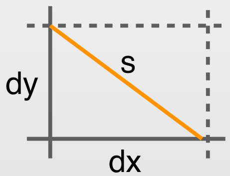
$$G_{\mu\nu} = 8\pi\, G\, T_{\mu\nu}$$

geometria dello spazio-tempo | *contenuto di materia e energia*

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\mathcal{R} g_{\mu\nu}$$

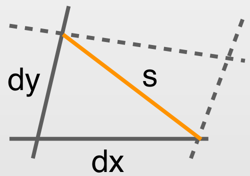
$R_{\mu\nu}$ funzione di $g_{\mu\nu}$

$g_{\mu\nu}$: la metrica



$s^2 = dx^2 + dy^2$

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$



$g_{\mu\nu} = \dots$

$a(t)$: il fattore di scala (la grandezza) dell'Universo

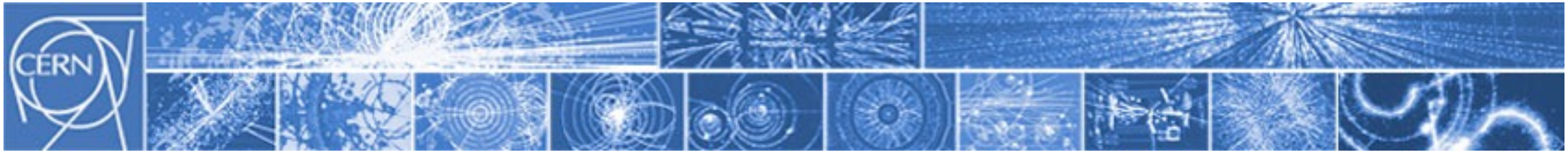
(*a* è da intendersi come rapporto, non ha un significato fisico intrinseco)

Parametro di Hubble

$$H = \frac{\dot{a}}{a}$$

Redshift

$$z = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \propto \frac{T_1}{T_0}$$



Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

Equazioni di Einstein

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

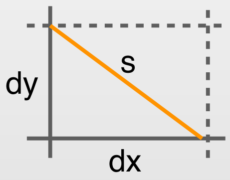
geometria dello spazio-tempo

contenuto di materia e energia

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\mathcal{R}g_{\mu\nu}$$

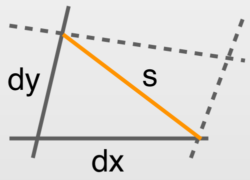
$R_{\mu\nu}$ funzione di $g_{\mu\nu}$

$g_{\mu\nu}$: la metrica



s² = dx² + dy²

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$



$g_{\mu\nu} = \ldots$

$$G = \frac{1}{M_{\rm Pl}^2}$$

$$T_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \rho & & & \\ & -P & & \\ & & -P & \\ & & & -P \end{pmatrix}$$

(assumendo fluido perfetto)

$a(t)$: il fattore di scala (la grandezza) dell'Universo

Parametro di Hubble

$$H = \frac{\dot{a}}{a}$$

Redshift

$$z = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \propto \frac{T_1}{T_0}$$

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

Equazioni di Einstein

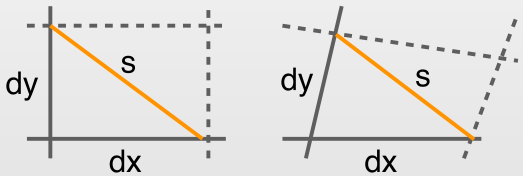
$$G_{\mu\nu} = 8\pi\, G\, T_{\mu\nu}$$

geometria dello spazio-tempo | *contenuto di materia e energia*

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\mathcal{R} g_{\mu\nu}$$

$R_{\mu\nu}$ funzione di $g_{\mu\nu}$

$g_{\mu\nu}$: la metrica



s² = dx² + dy²

$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

$g_{\mu\nu} = \ldots$

$a(t)$: il fattore di scala (la grandezza) dell'Universo

Parametro di Hubble

$$H = \frac{\dot{a}}{a}$$

Redshift

$$z = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \propto \frac{T_1}{T_0}$$

$$G = \frac{1}{M_{\rm Pl}^2}$$

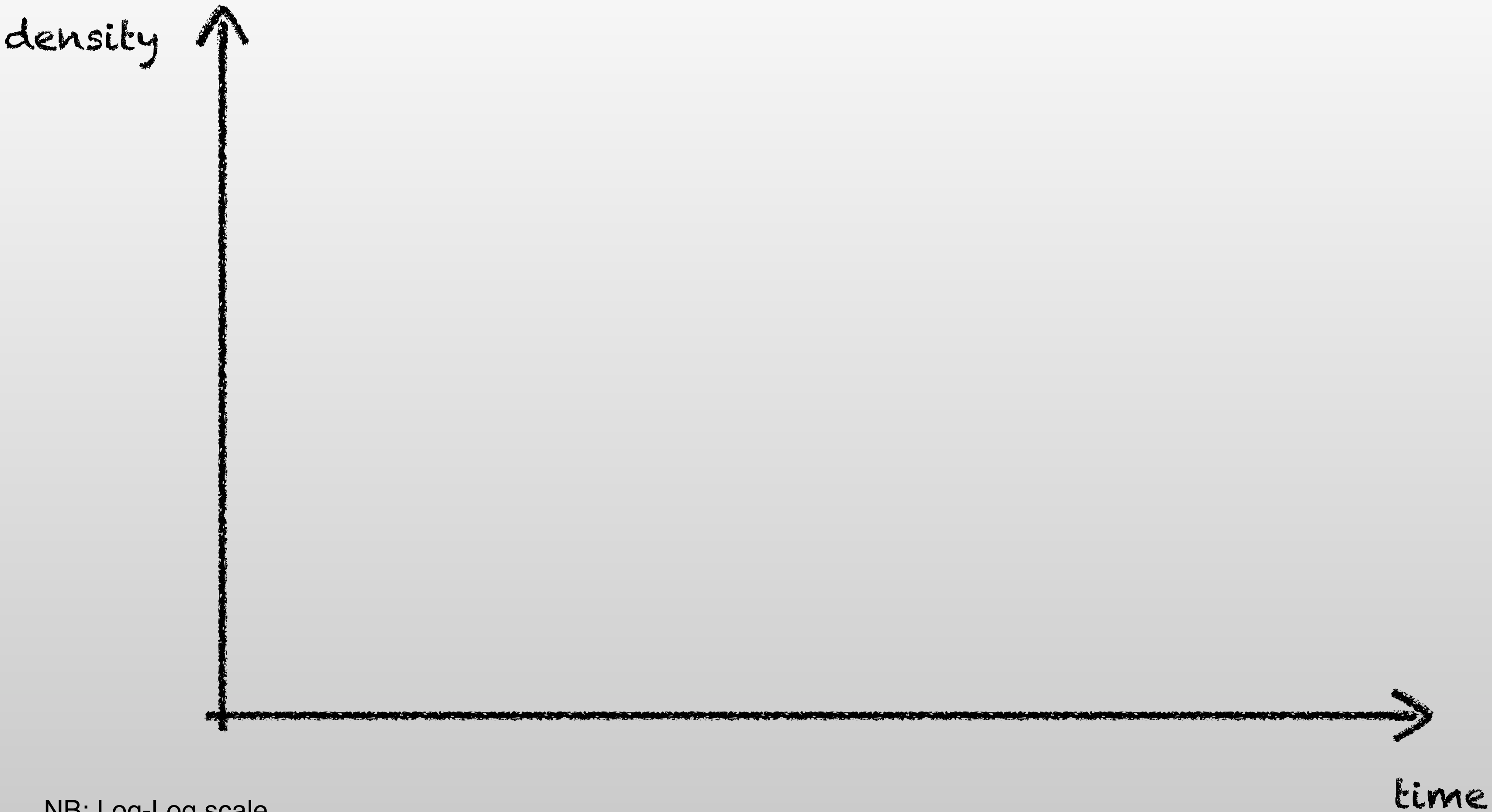
$$T_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \rho & & & \\ & -P & & \\ & & -P & \\ & & & -P \end{pmatrix}$$

Equazione di stato $P = w\rho$

'matter'	$P = 0$	$\rho \propto 1/a^3$
'radiation'	$P = \frac{1}{3}\rho$	$\rho \propto 1/a^4$
'vacuum'	$P = -\rho$	$\rho \propto \text{cost}$

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

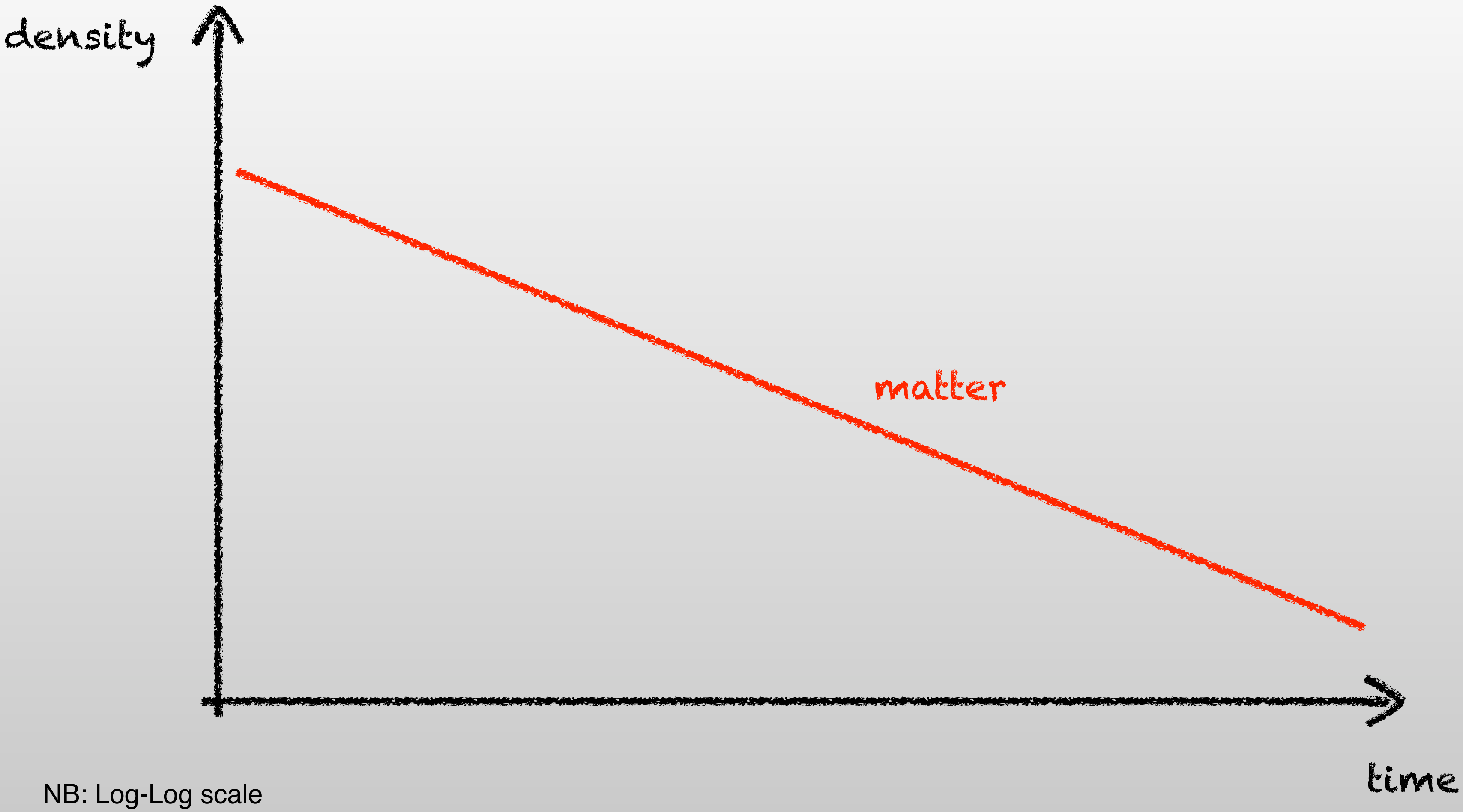
Evoluzione delle componenti dell'Universo



NB: Log-Log scale

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

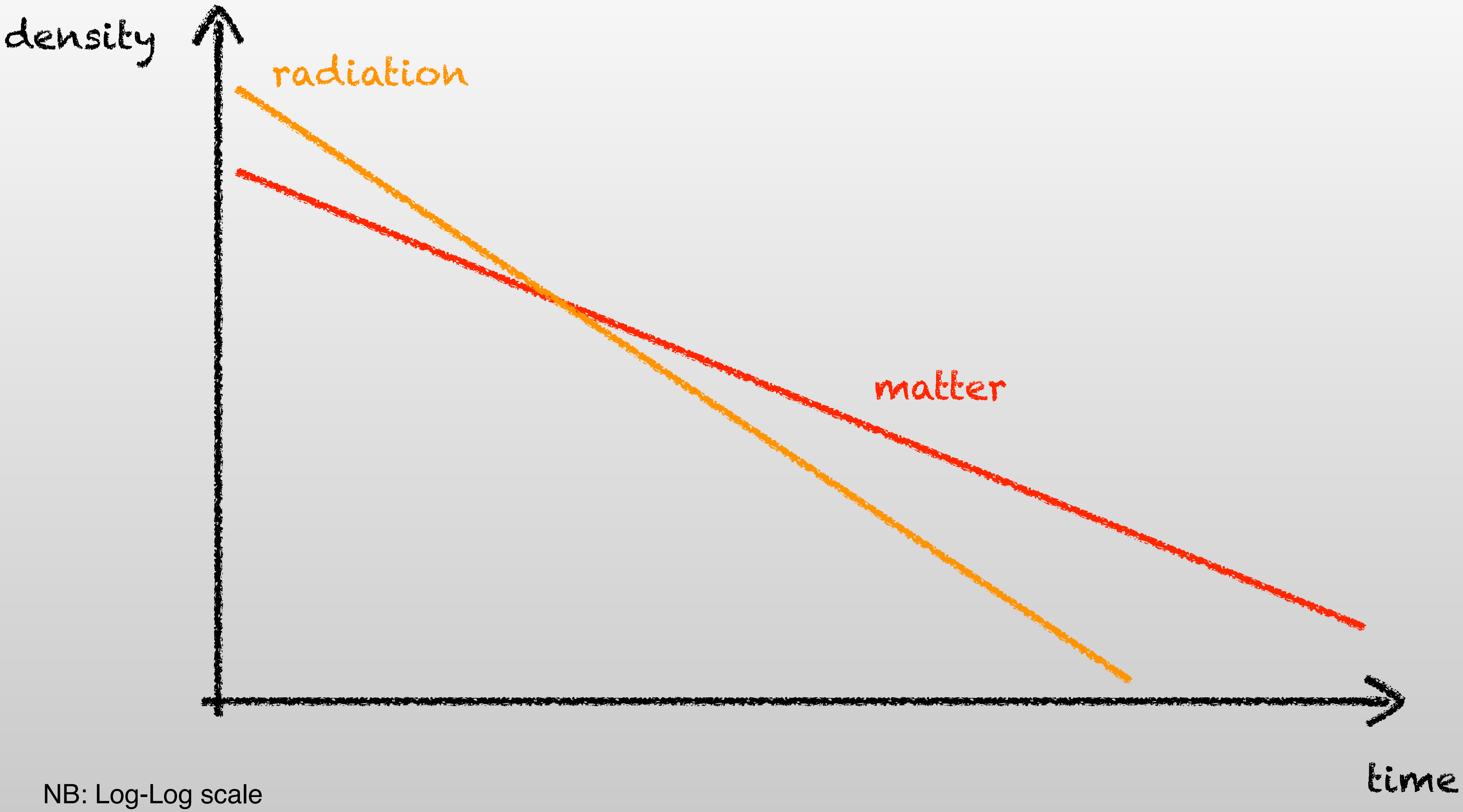
Evoluzione delle componenti dell'Universo



NB: Log-Log scale

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

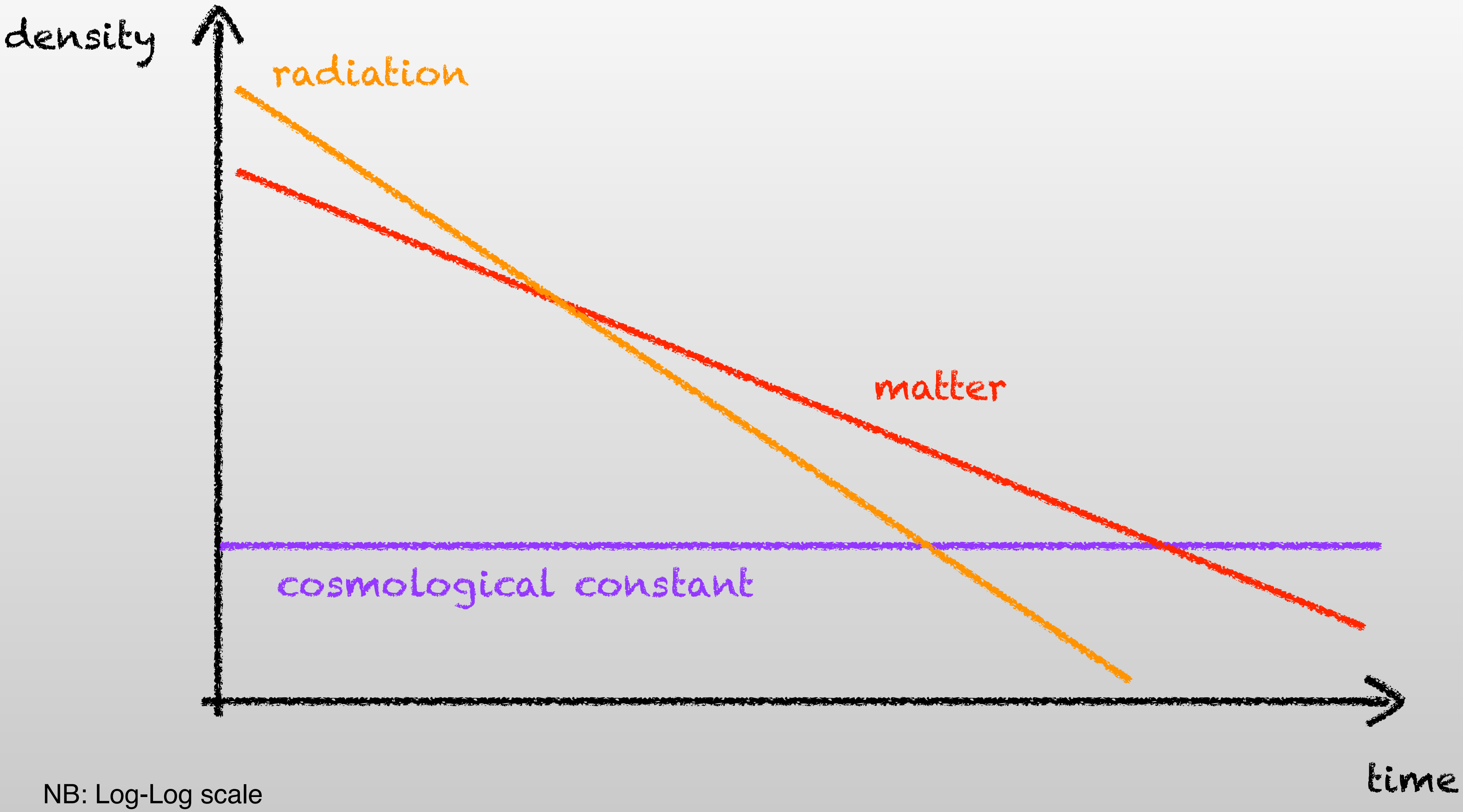
Evoluzione delle componenti dell'Universo



NB: Log-Log scale

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

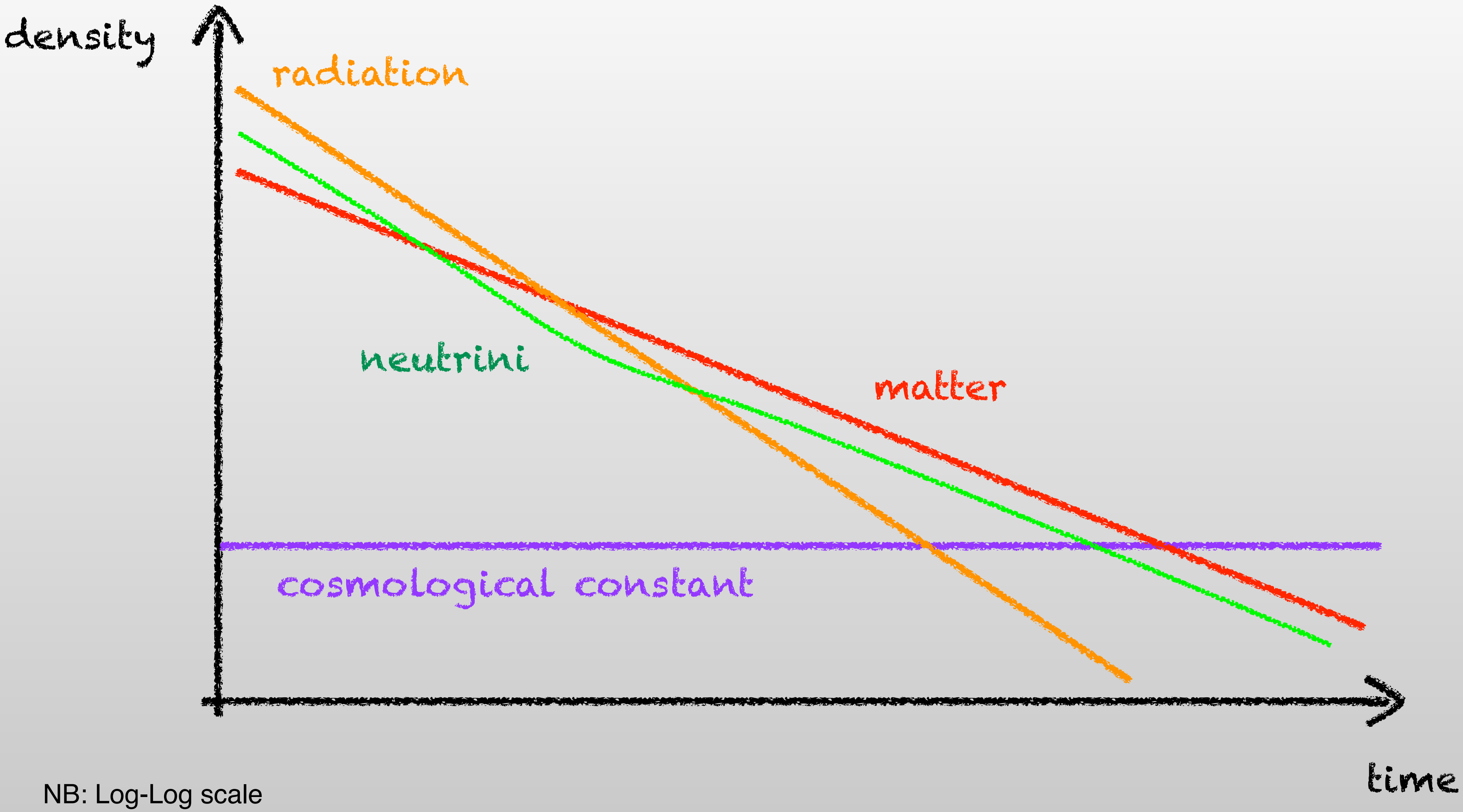
Evoluzione delle componenti dell'Universo



NB: Log-Log scale

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

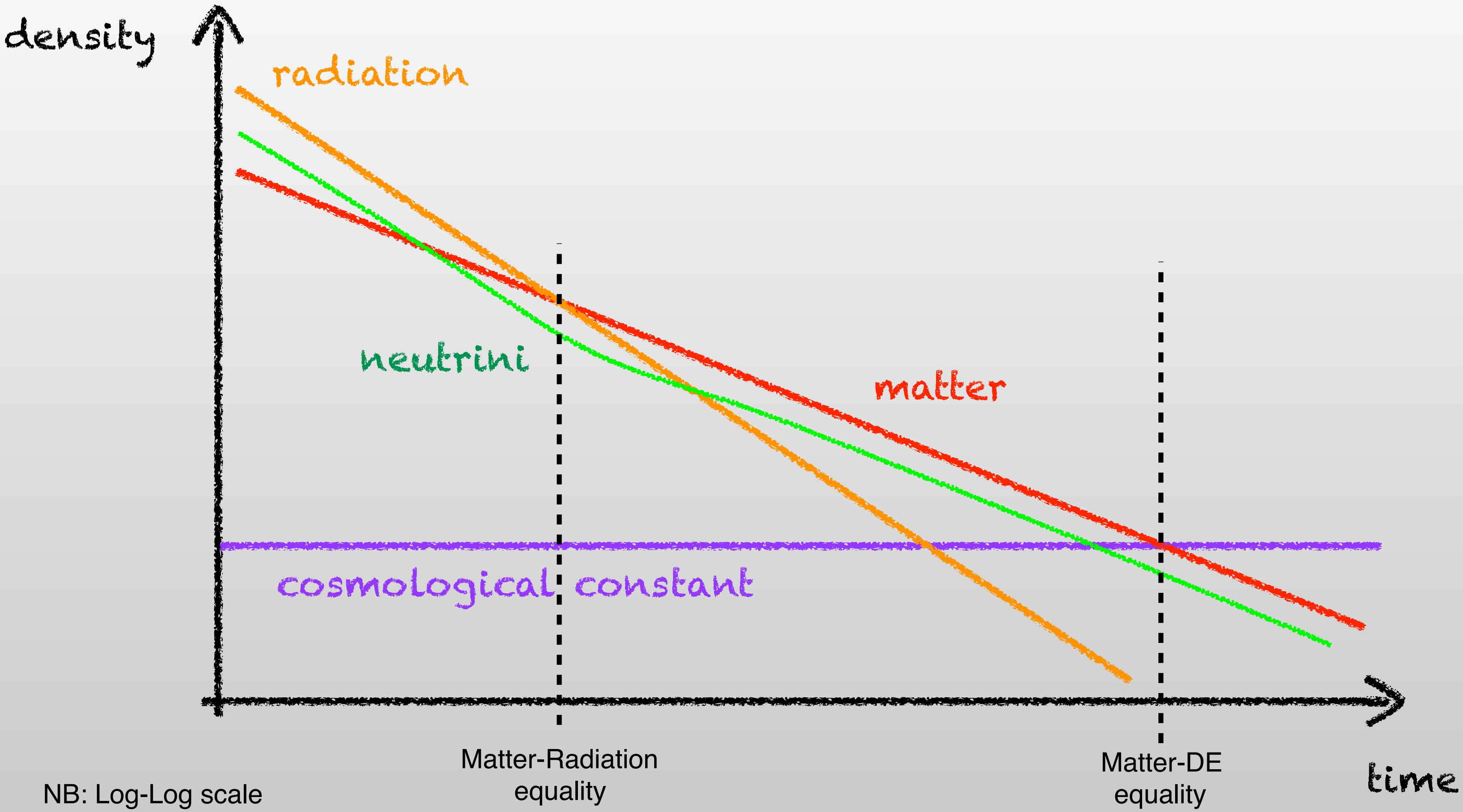
Evoluzione delle componenti dell'Universo



NB: Log-Log scale

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

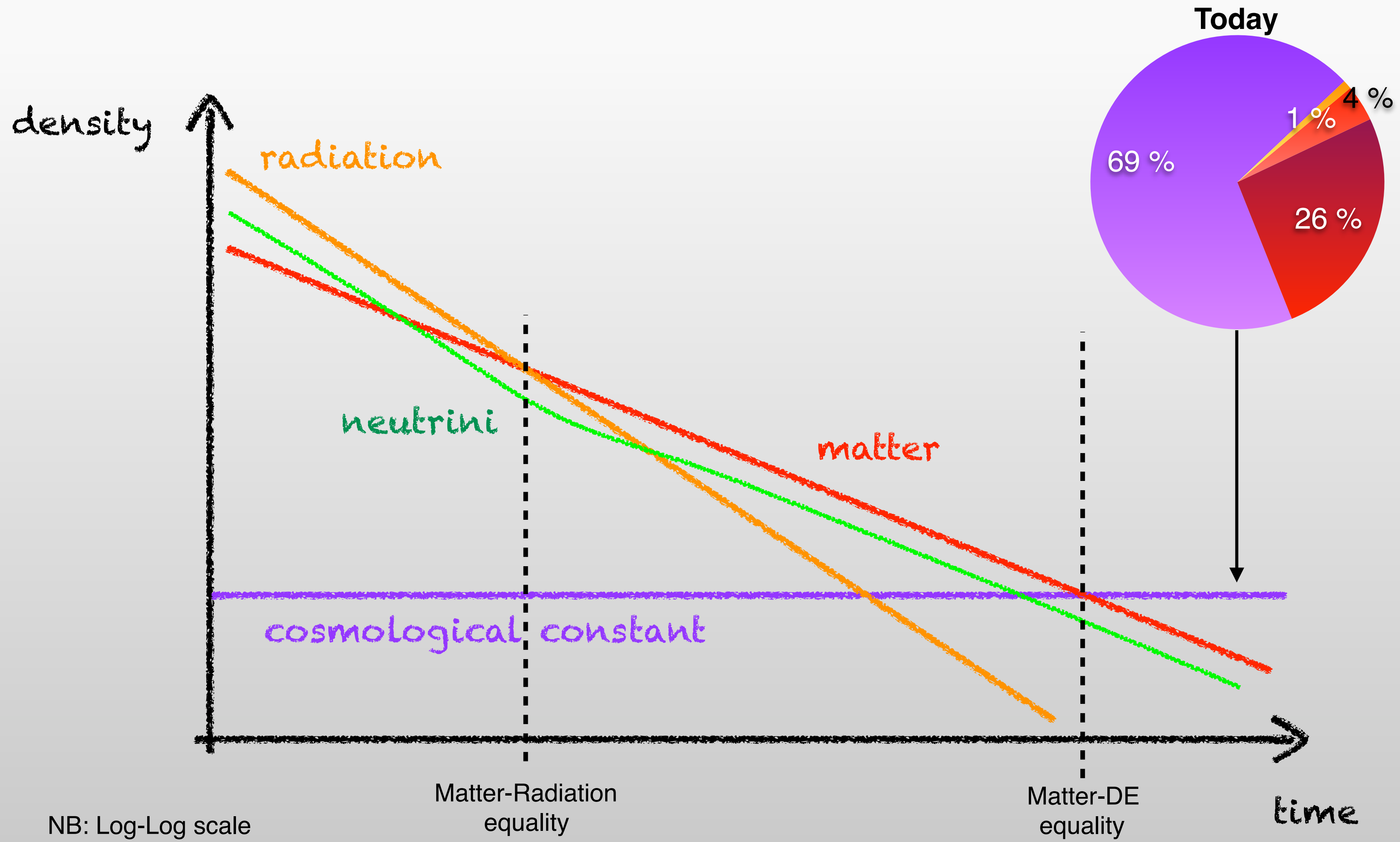
Evoluzione delle componenti dell'Universo



NB: Log-Log scale

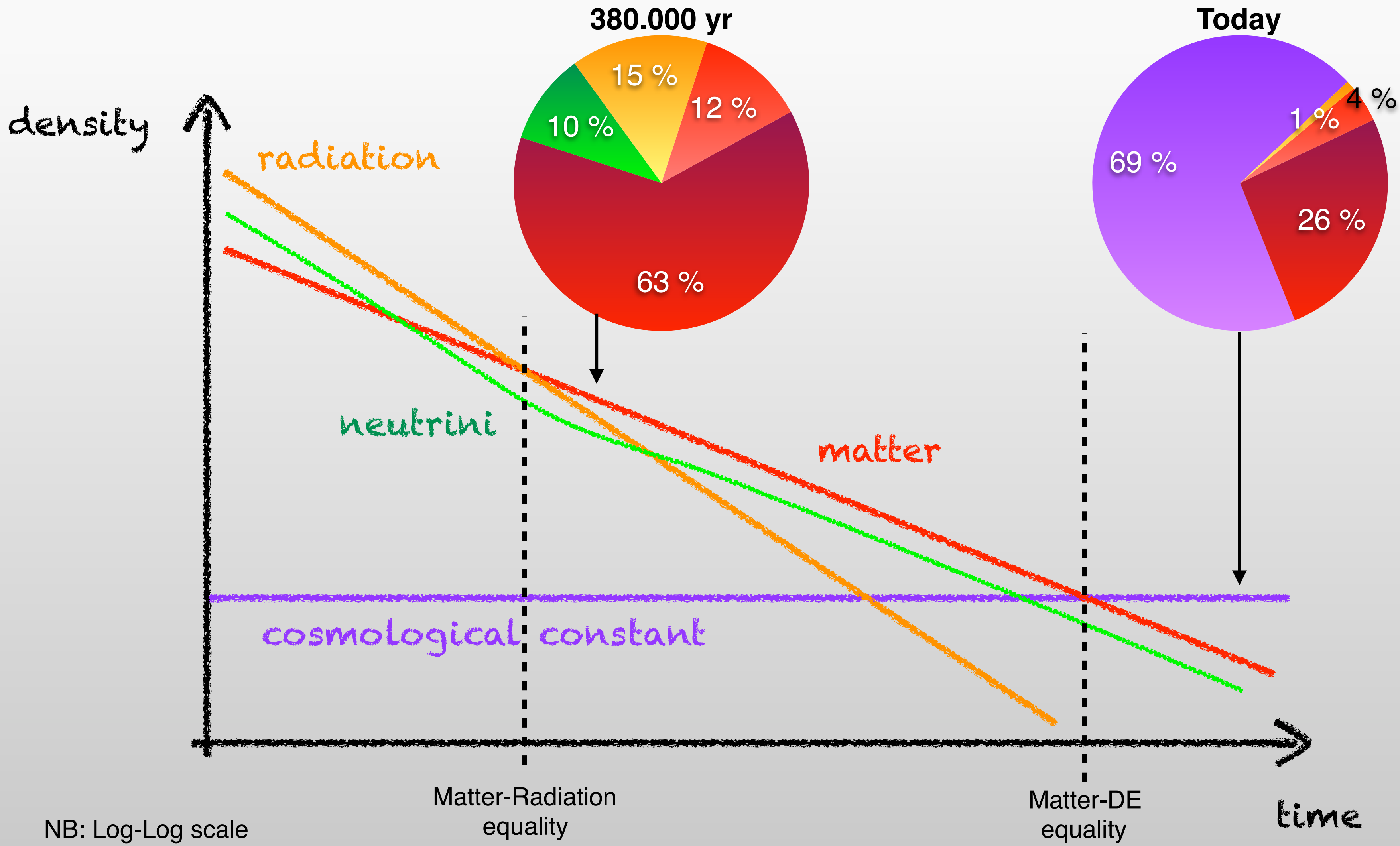
Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

Evoluzione delle componenti dell'Universo



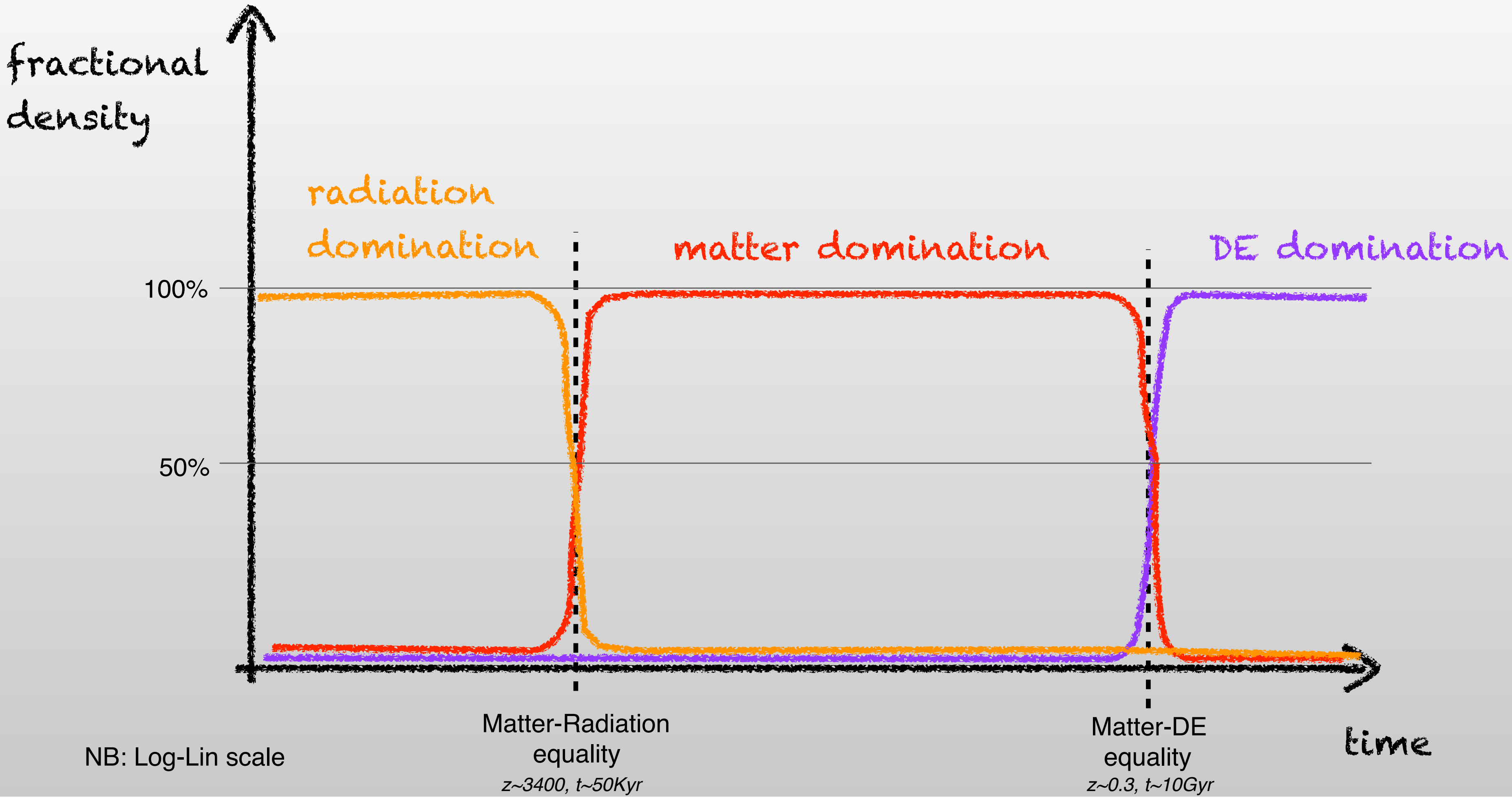
Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

Evoluzione delle componenti dell'Universo



Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

Evoluzione delle componenti dell'Universo



NB: Log-Lin scale

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

Equazioni di Einstein

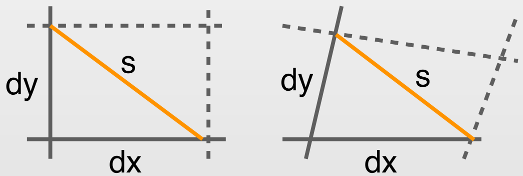
$$G_{\mu\nu} = 8\pi\, G\, T_{\mu\nu}$$

geometria dello spazio-tempo | *contenuto di materia e energia*

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\mathcal{R} g_{\mu\nu}$$

$R_{\mu\nu}$ funzione di $g_{\mu\nu}$

$g_{\mu\nu}$: la metrica



s² = dx² + dy²

$g_{\mu\nu} = \ldots$

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$a(t)$: il fattore di scala (la grandezza) dell'Universo

omogeneità
isotropia

Parametro di Hubble

$$H = \frac{\dot{a}}{a}$$

Redshift

$$z = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \propto \frac{T_1}{T_0}$$

$$G = \frac{1}{M_{\rm Pl}^2}$$

$$T_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \rho & & & \\ & -P & & \\ & & -P & \\ & & & -P \end{pmatrix}$$

Equazione di stato $P = w\rho$

'matter'	$P = 0$	$\rho \propto 1/a^3$
'radiation'	$P = \frac{1}{3}\rho$	$\rho \propto 1/a^4$
'vacuum'	$P = -\rho$	$\rho \propto \mathrm{cost}$

Relatività generale e basi di cosmologia (in 2 slides / 2 minuti)

Equazioni di Einstein

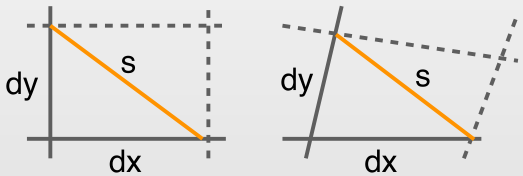
$$G_{\mu\nu} = 8\pi G\, T_{\mu\nu}$$

geometria dello spazio-tempo | *contenuto di materia e energia*

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\mathcal{R} g_{\mu\nu}$$

$R_{\mu\nu}$ funzione di $g_{\mu\nu}$

$g_{\mu\nu}$: la metrica



s² = dx² + dy²

$$g_{\mu\nu} = \ldots$$

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$a(t)$: il fattore di scala (la grandezza) dell'Universo

omogeneità
isotropia

$$G = \frac{1}{M_{\rm Pl}^2}$$

$$T_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \rho & & & \\ & -P & & \\ & & -P & \\ & & & -P \end{pmatrix}$$

Equazione di stato $P = w\rho$

'matter'	$P = 0$	$\rho \propto 1/a^3$
'radiation'	$P = \frac{1}{3}\rho$	$\rho \propto 1/a^4$
'vacuum'	$P = -\rho$	$\rho \propto \text{cost}$

Parametro di Hubble

$$H = \frac{\dot{a}}{a}$$

Redshift

$$z = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \propto \frac{T_1}{T_0}$$

Equazioni di Friedmann-Robertson-Walker

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho \qquad \text{FRW I}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P) \qquad \text{FRW II}$$