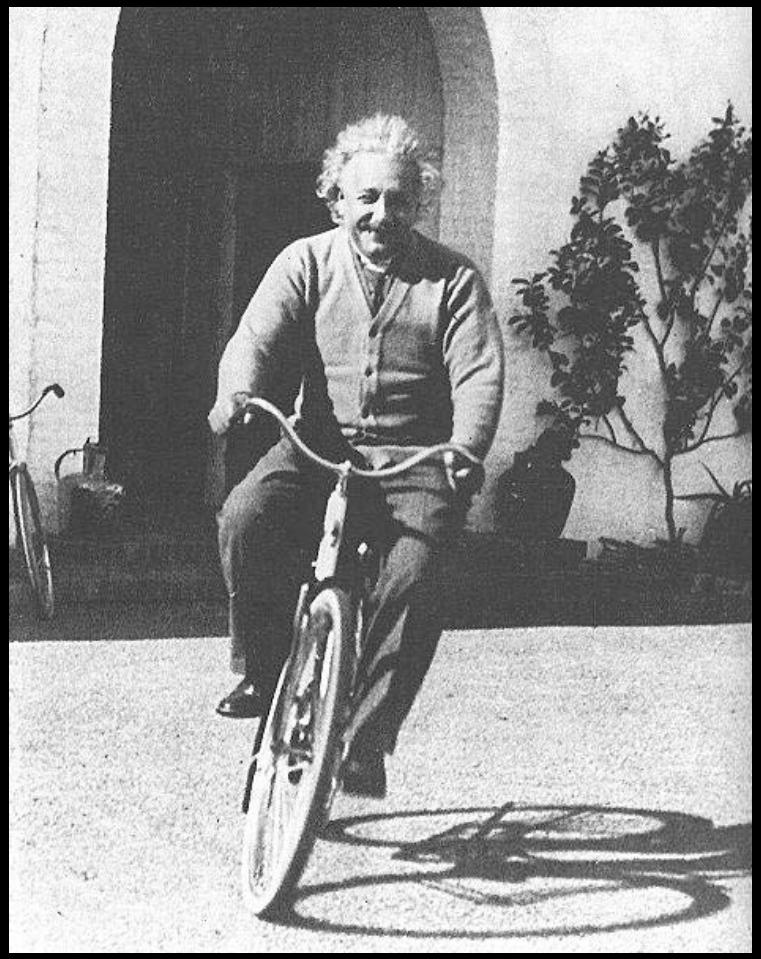
1917



Albert Einstein

$$G_{\mu\nu} = k\, T_{\mu\nu}$$

Universo in evoluzione

Universo statico

modifica delle equazioni
di campo della R.G.

$$G_{\mu\nu} - \Lambda\, g_{\mu\nu} = k\, T_{\mu\nu}$$

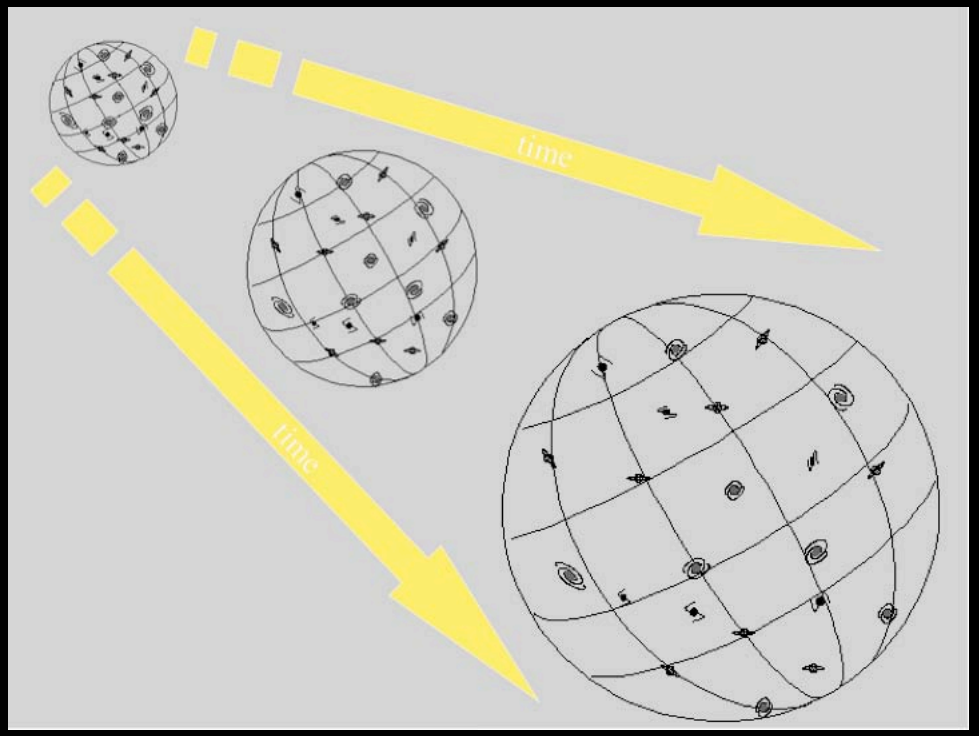
costante cosmologica

1922

Aleksander Fridman

$$G_{\mu\nu} = k\, T_{\mu\nu}$$

Universo in espansione

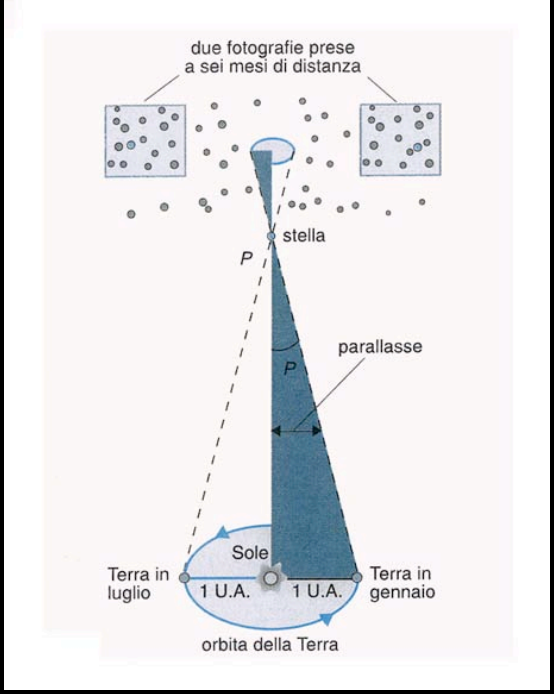


Misura delle distanze

Parallasse astronomica

$$d \approx \frac{1 \text{ u.a.}}{p}$$

(d < 100 pc)



Henrietta Leavitt

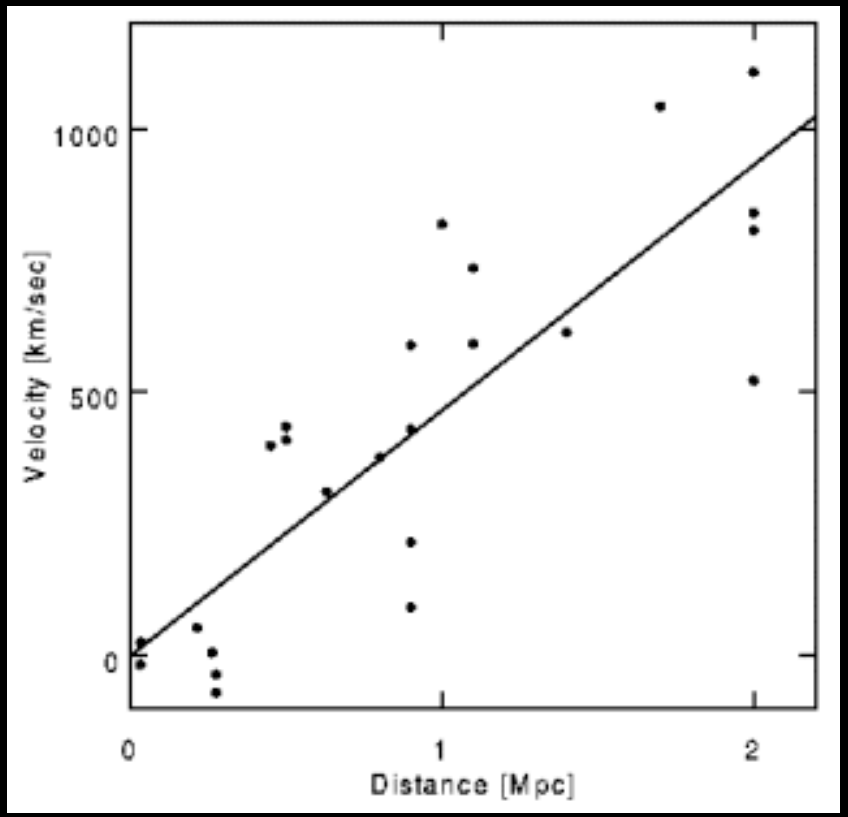
variabili cefeidi

Candele standard: relazione tra luminosità intrinseca e periodo

(d < 10 Mpc)

Edwin Hubble

Misura del redshift di 24 galassie



Legge di Hubble ←

$$v = H\,d$$

$H \approx 500$ km s^{-1} Mpc^{-1}

prova sperimentale della espansione dell'Universo

$t_H = \frac{1}{H}$ rappresenta l'età dell'Universo
(nell'ipotesi di espansione costante)

≈ 2 miliardi di anni **la Terra è più vecchia !!**

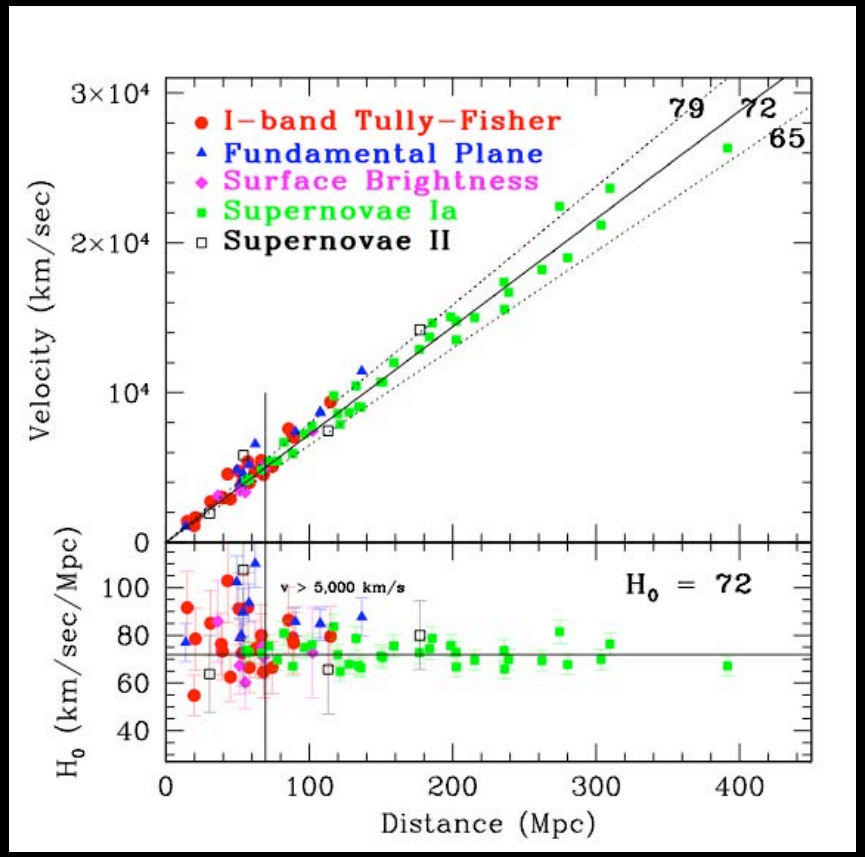


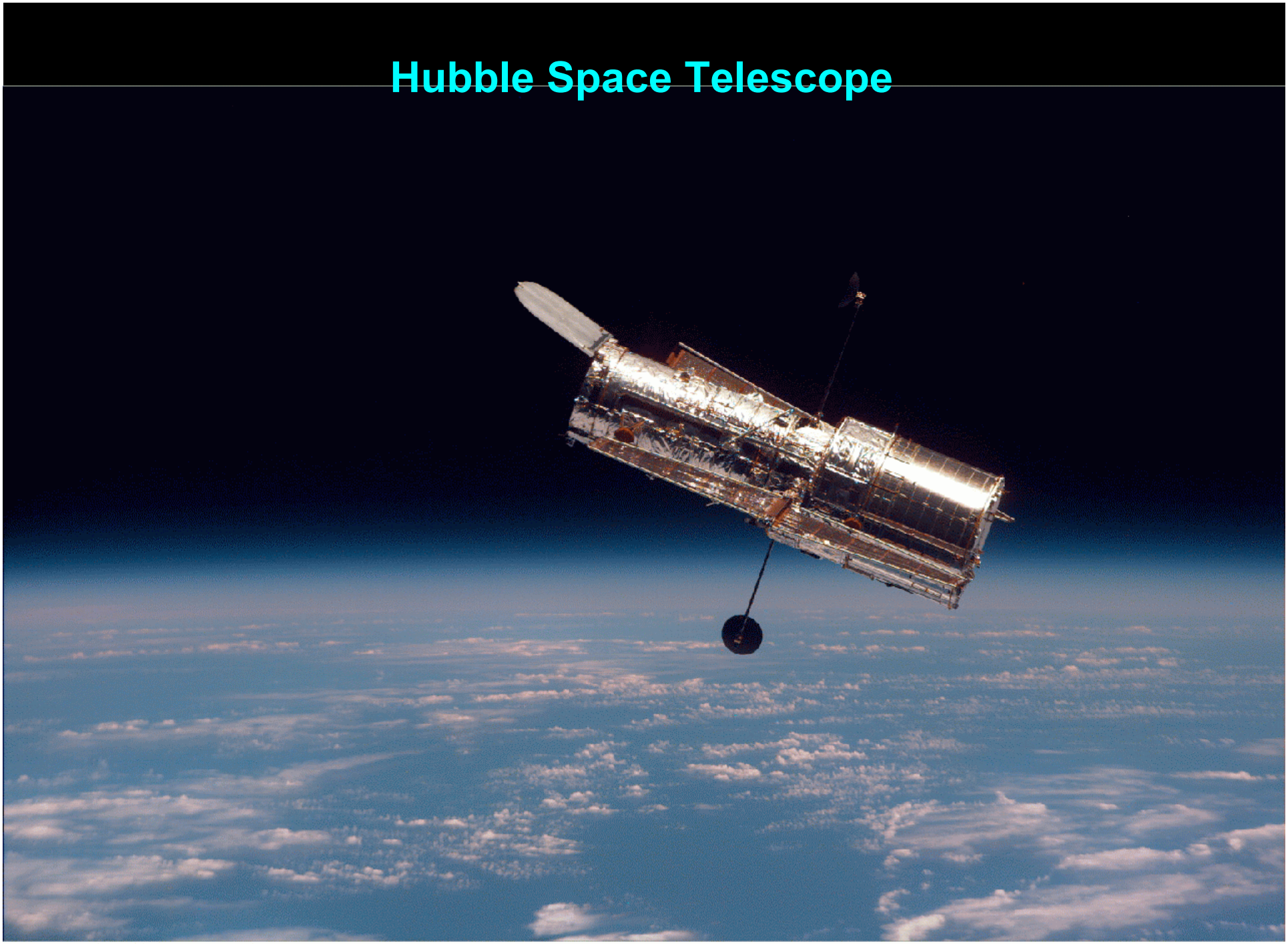
Diagramma di Hubble nel 2001 (HST)

$H = 72 \pm 7$ km s^{-1} Mpc^{-1}

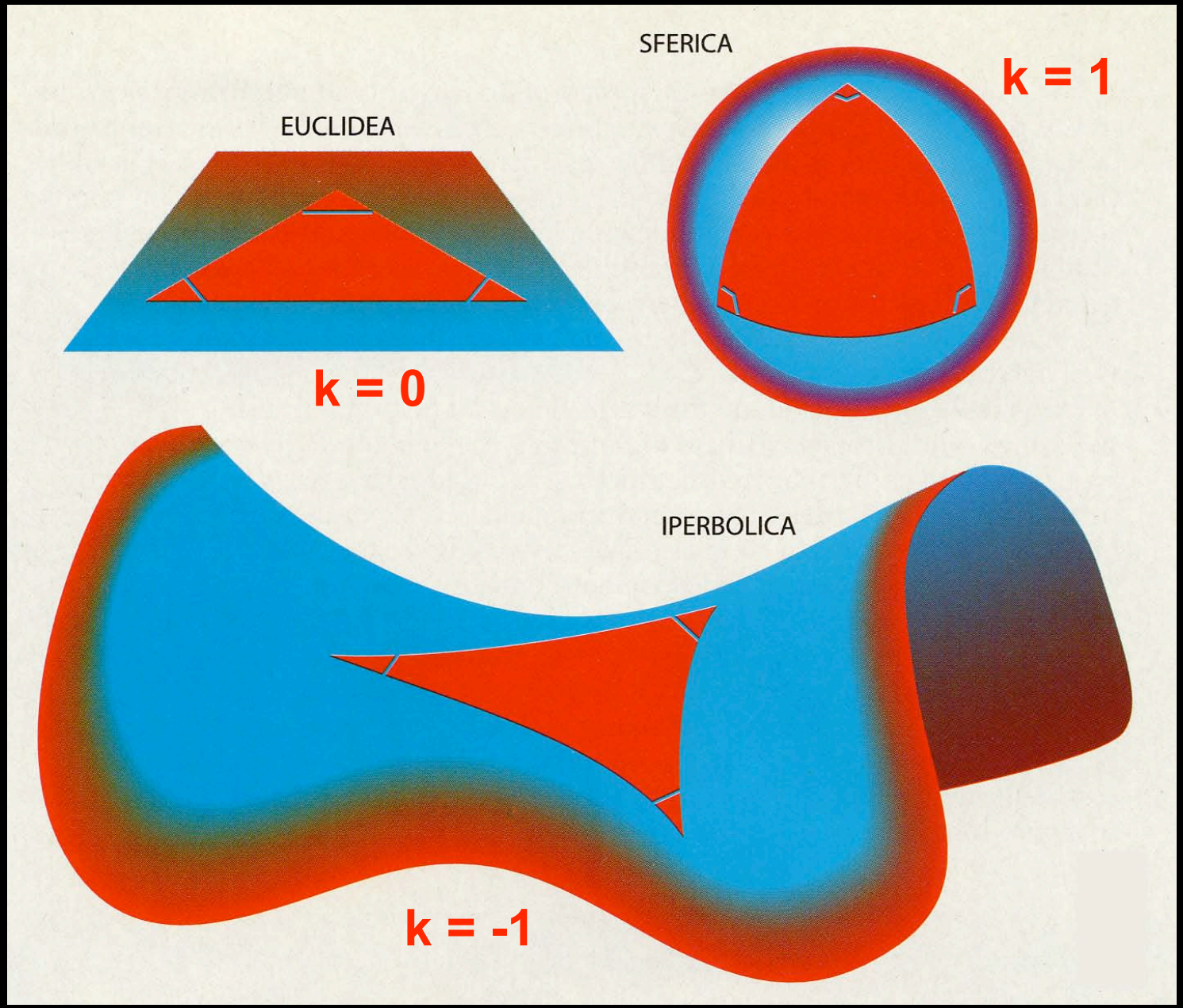
↓

$t_H = (13.7 \pm 1.4) \times 10^9$ anni

Hubble Space Telescope



S82E5937 1997:02:19 07:06:57

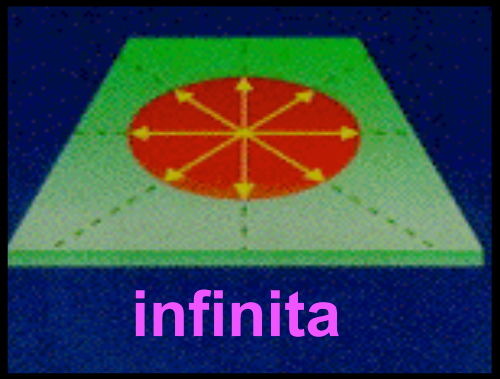

SFERICA
k = 1
EUCLIDEA
k = 0
IPERBOLICA
k = -1

Geometrie possibili

$C < 2\pi r$ ← $k = 1$

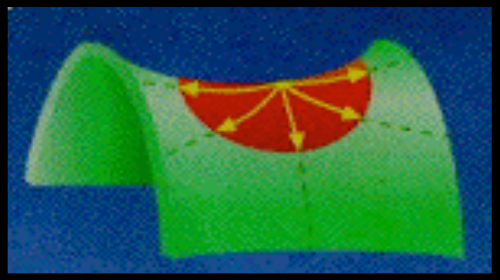
finita

$C = 2\pi r$ ← $k = 0$

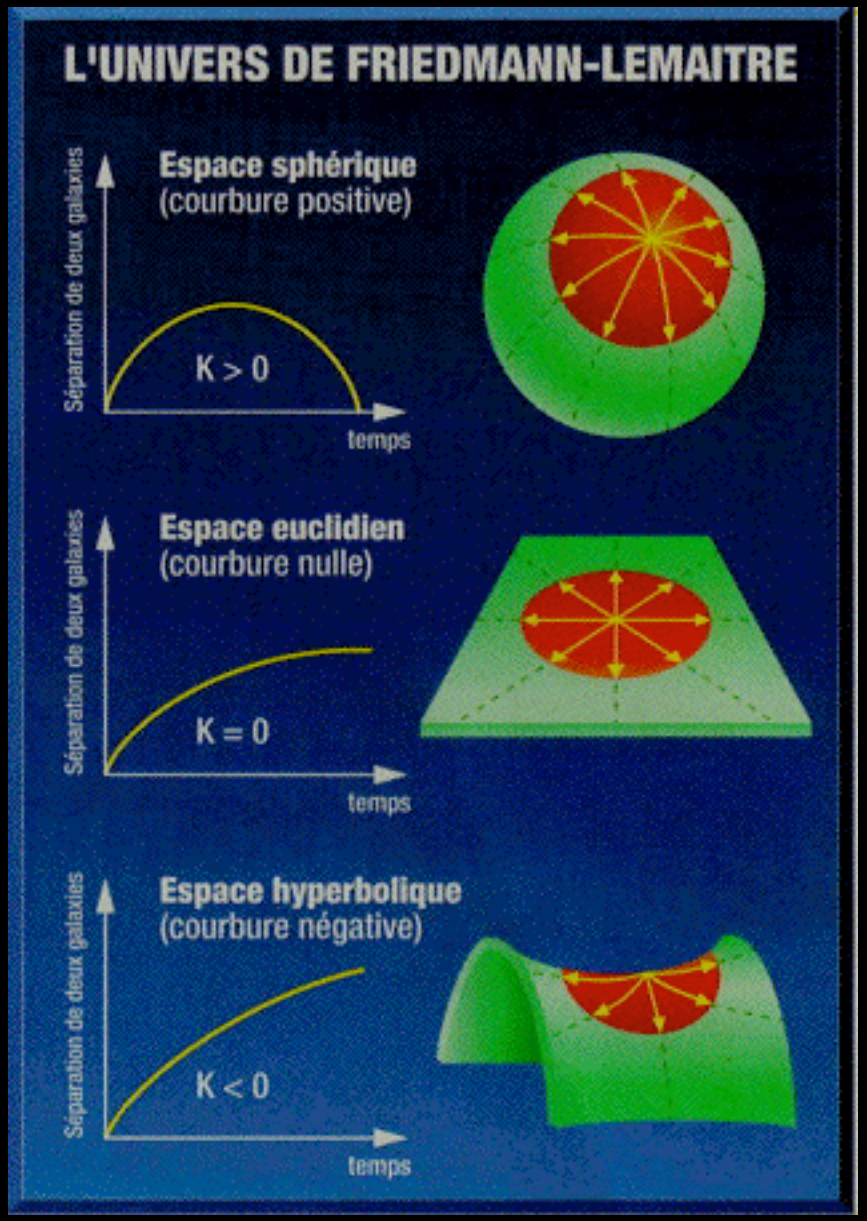


infinita

$C > 2\pi r$ ← $k = -1$



infinita



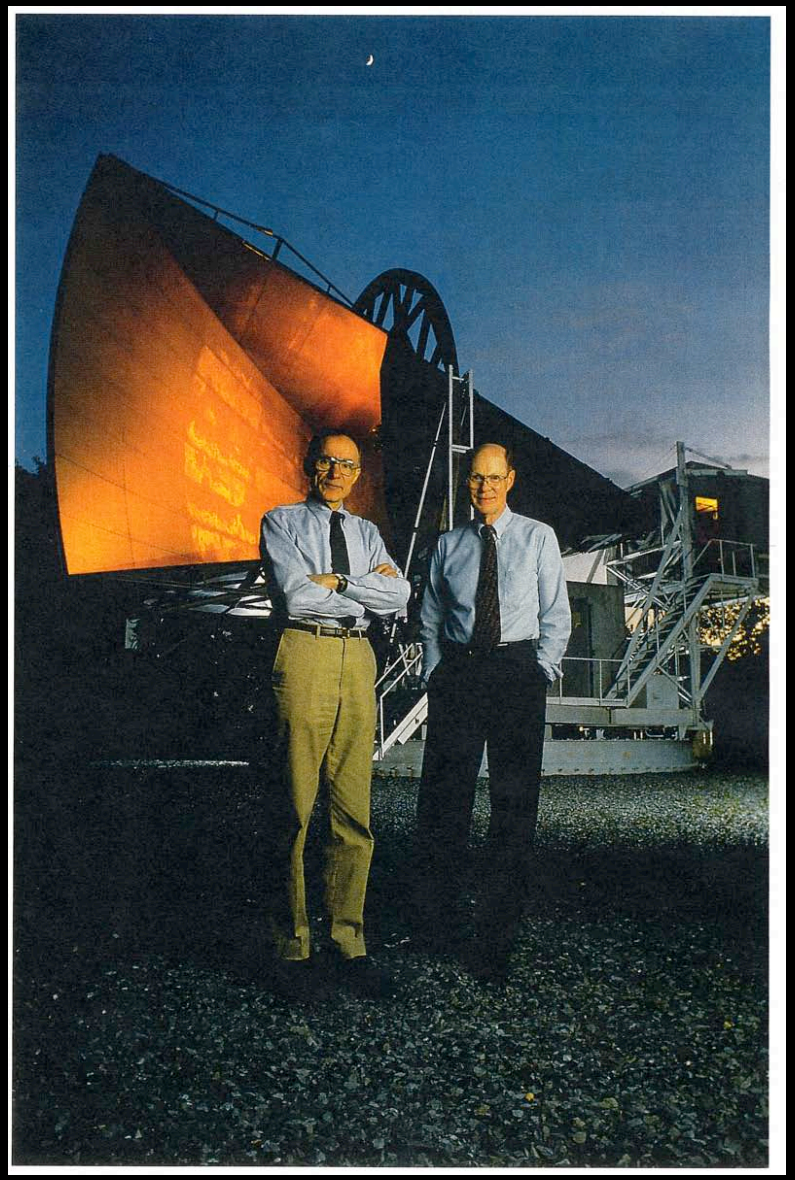
Ω = densità di massa-energia

$\Omega > 1$ **Big Crunch nel futuro**

$\Omega = 1$ **espansione eterna**

$\Omega < 1$ **espansione eterna**

NB - $\Omega = 1 \rightarrow \rho \sim 10^{-29}$ g/cm^3 $\rightarrow$10 atomi d'idrogeno a m^3



Arno Penzias Robert Wilson

La scoperta fondamentale:

Fondo Cosmico a Microonde (CMB)

A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s

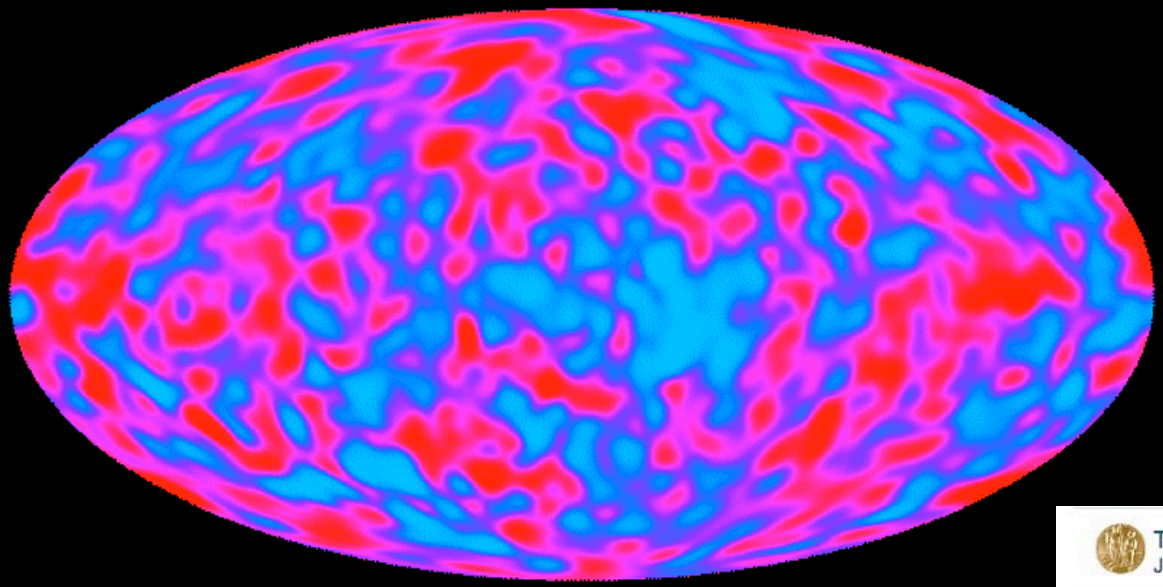
Measurements of the effective zenith noise temperature of a 20-foothorn antenna … have yielded a value about 3.5 K higher than expected

(Astrophysical Journal, May 13, 1965)

~ ½ milione di fotoni a m^3

Nobel 1978

1996: COBE



$\Delta T/T \approx 10^{-5}$

The Nobel Prize in Physics 2006
John C. Mather, George F. Smoot

The Nobel Prize in Physics 2006
Nobel Prize Award Ceremony
John C. Mather
George F. Smoot

Photo: P. Izzo

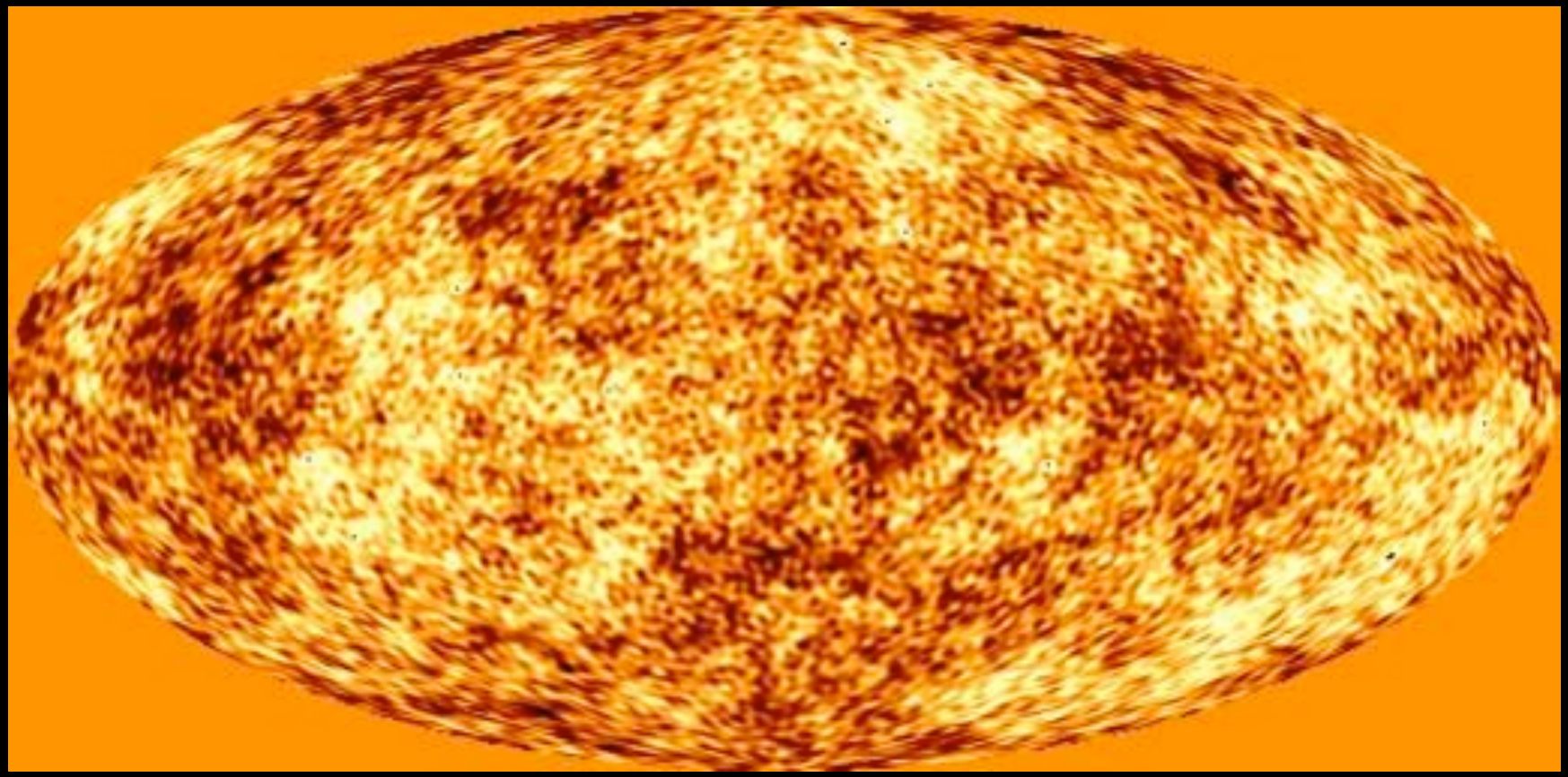
Photo: J. Bauer

John C. Mather George F. Smoot

The Nobel Prize in Physics 2006 was awarded jointly to John C. Mather and George F. Smoot *"for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"*

2003: WMAP

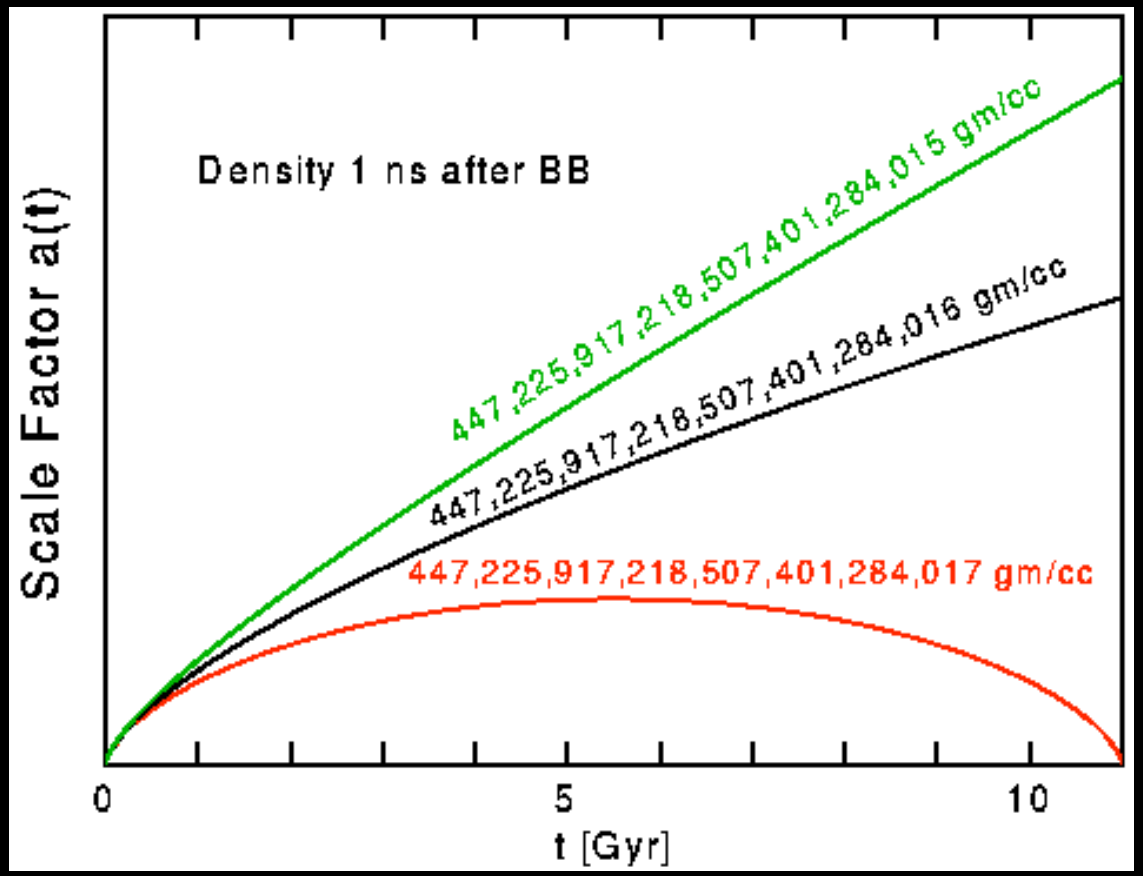
T_{CMB} = 2.725 K



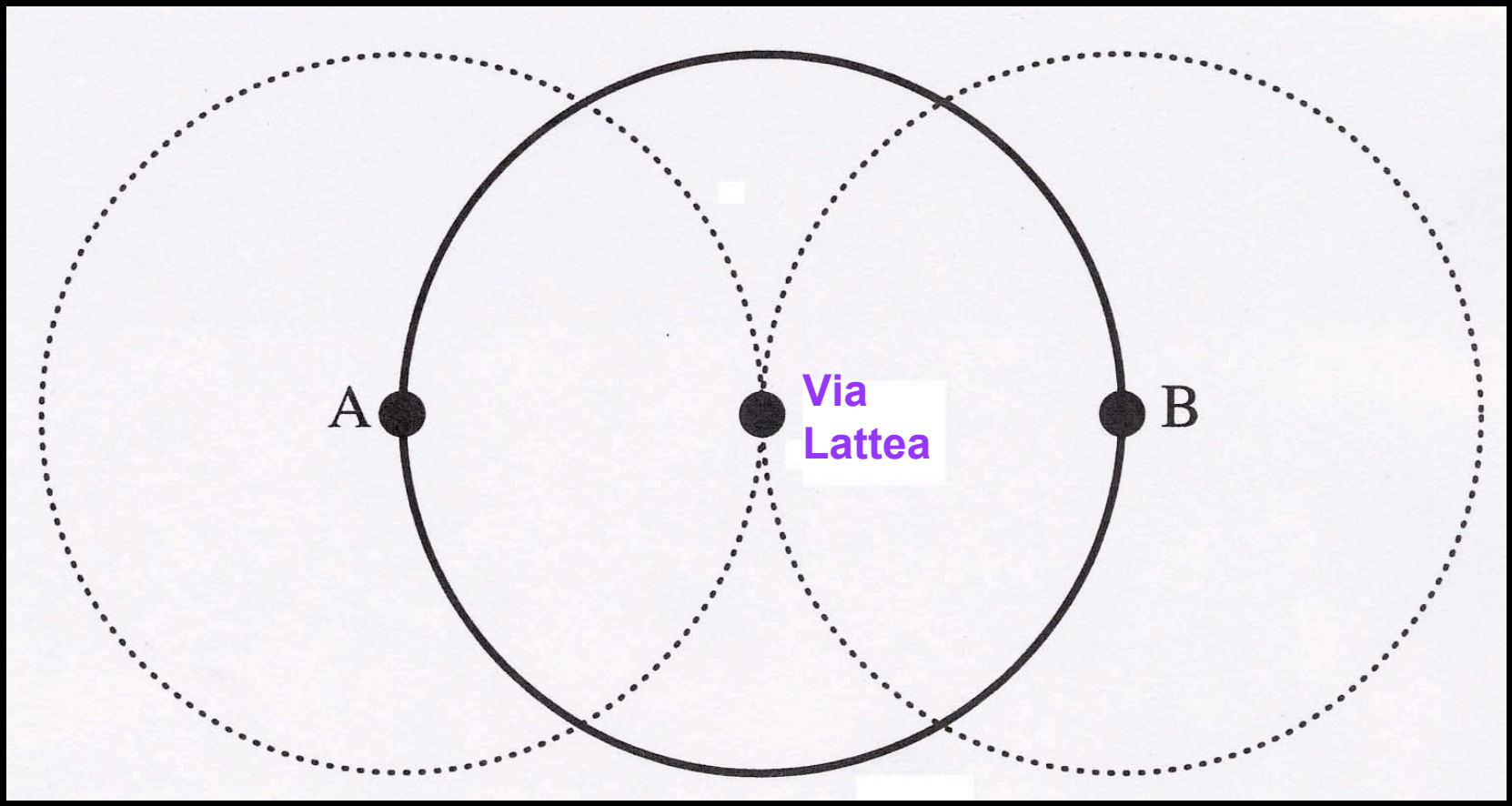
T_{dec} ≈ 3000 K → età dell'Universo ≈ 380,000 anni

Problemi del modello del Big Bang

- ✓ Piattezza: geometria piatta è instabile



- ✓ Orizzonte: impossibile spiegare omogeneità del CMB su regioni di cielo più estese di 1^0



Inflazione

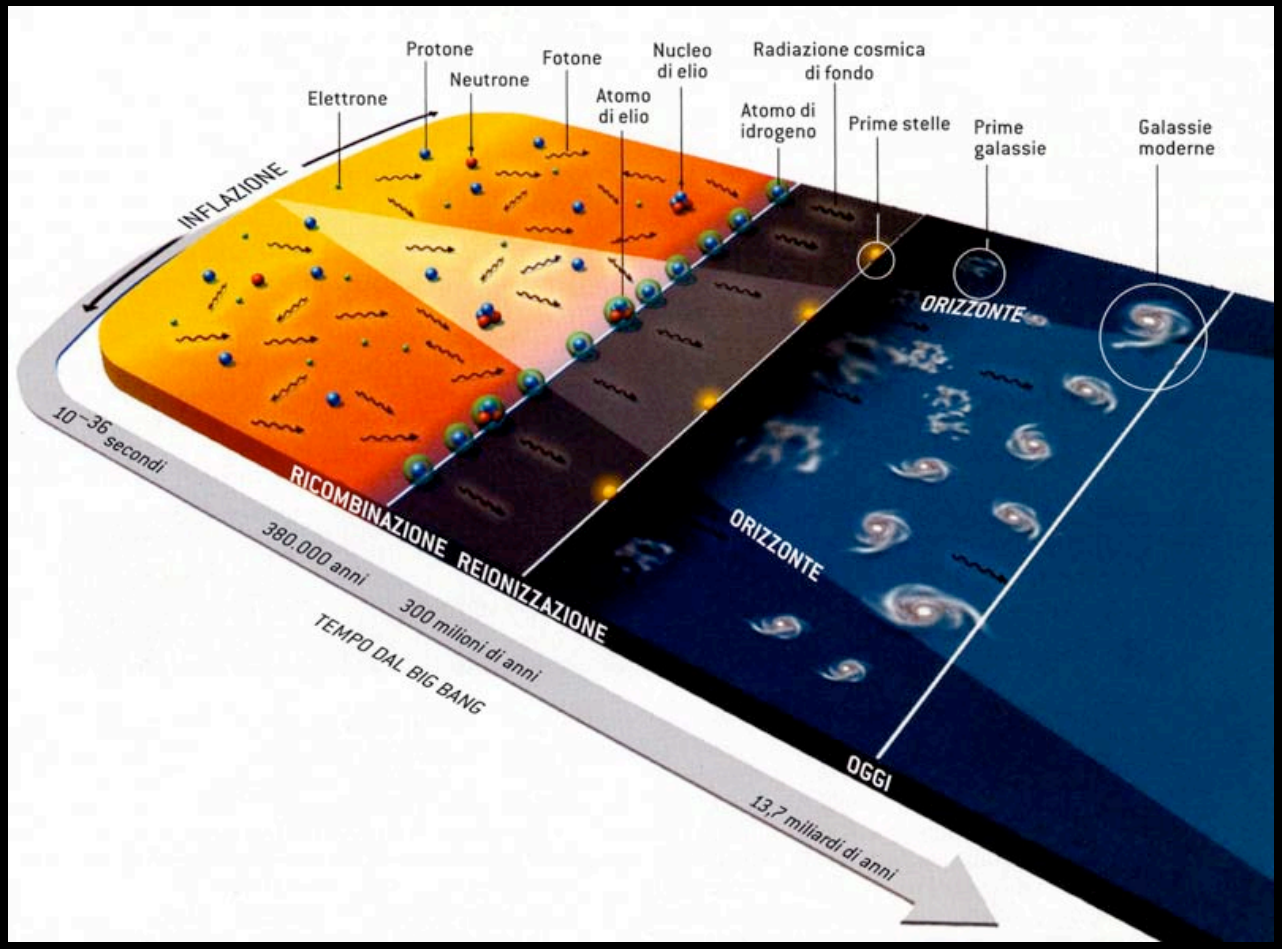
espansione accelerata
nei primi istanti di vita
dell'Universo

tra ~10^{-36} e ~10^{-34}
secondi dopo il BB le
dimensioni dell'Universo
aumentano di ~ 43 ordini
di grandezza!

Alan Guth

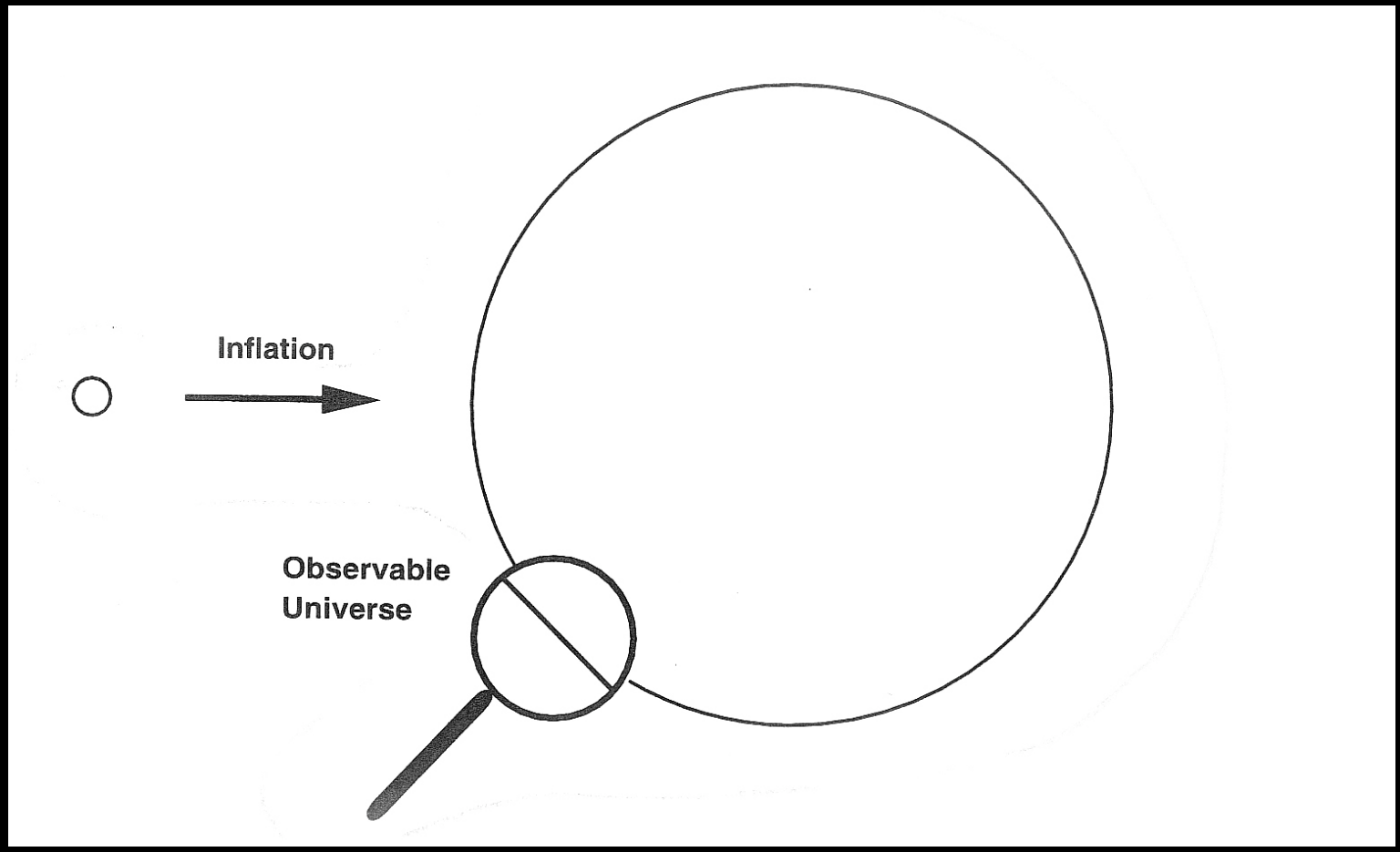
Soluzione dei problemi

- Orizzonte — Universo osservabile proviene da una regione piccolissima



- Piattezza

espansione esponenziale
"stira" la curvatura



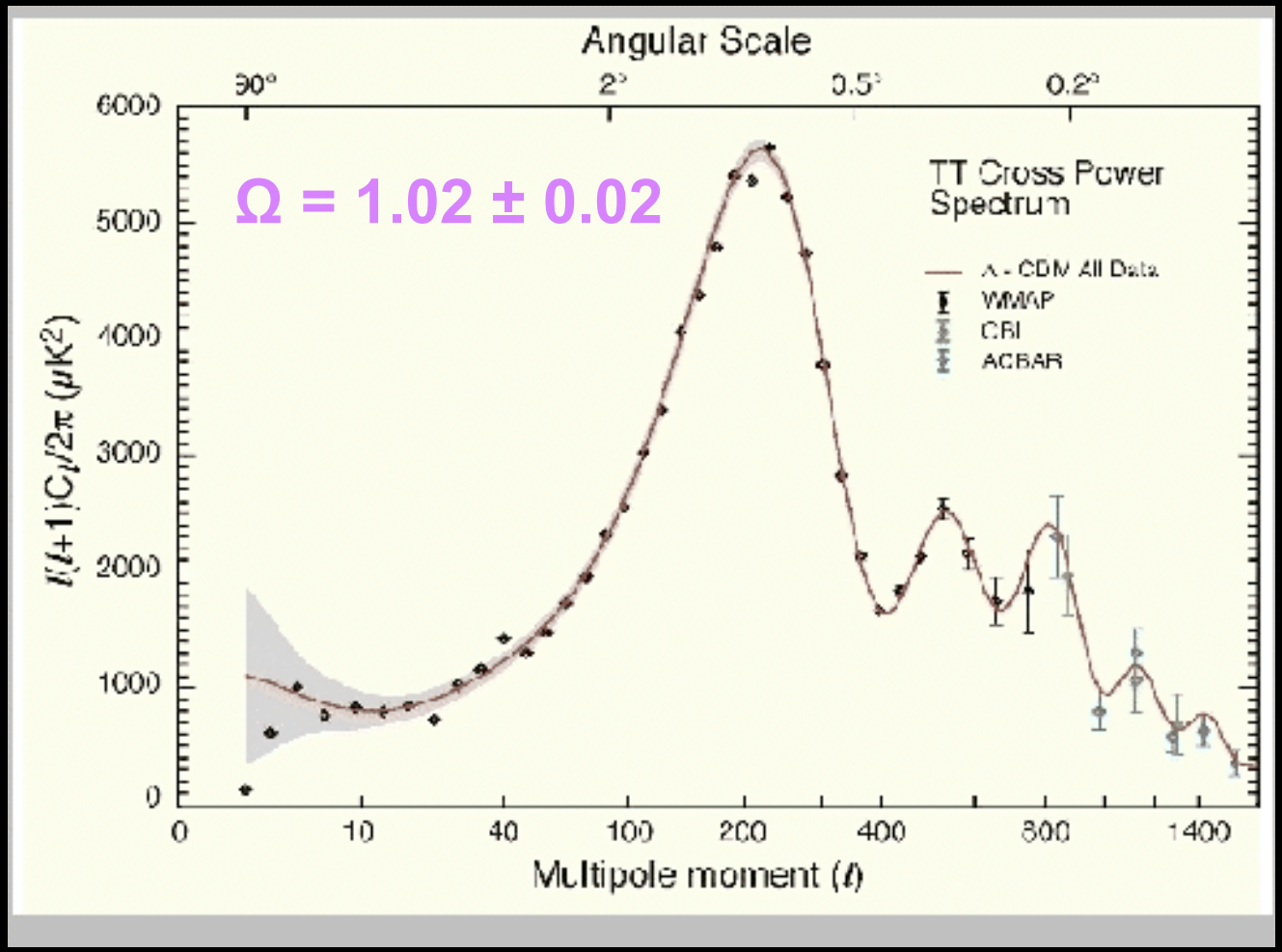
espansione accelerata → gravità repulsiva

forza repulsiva generata da pressione negativa associata a campo quantistico scalare il cui valore è uniforme nello spazio (inflatone)

campo uniforme è entità dinamica caratterizzata da una energia potenziale dalla cui forma dipendono i dettagli dell'accensione e spegnimento della fase espansiva

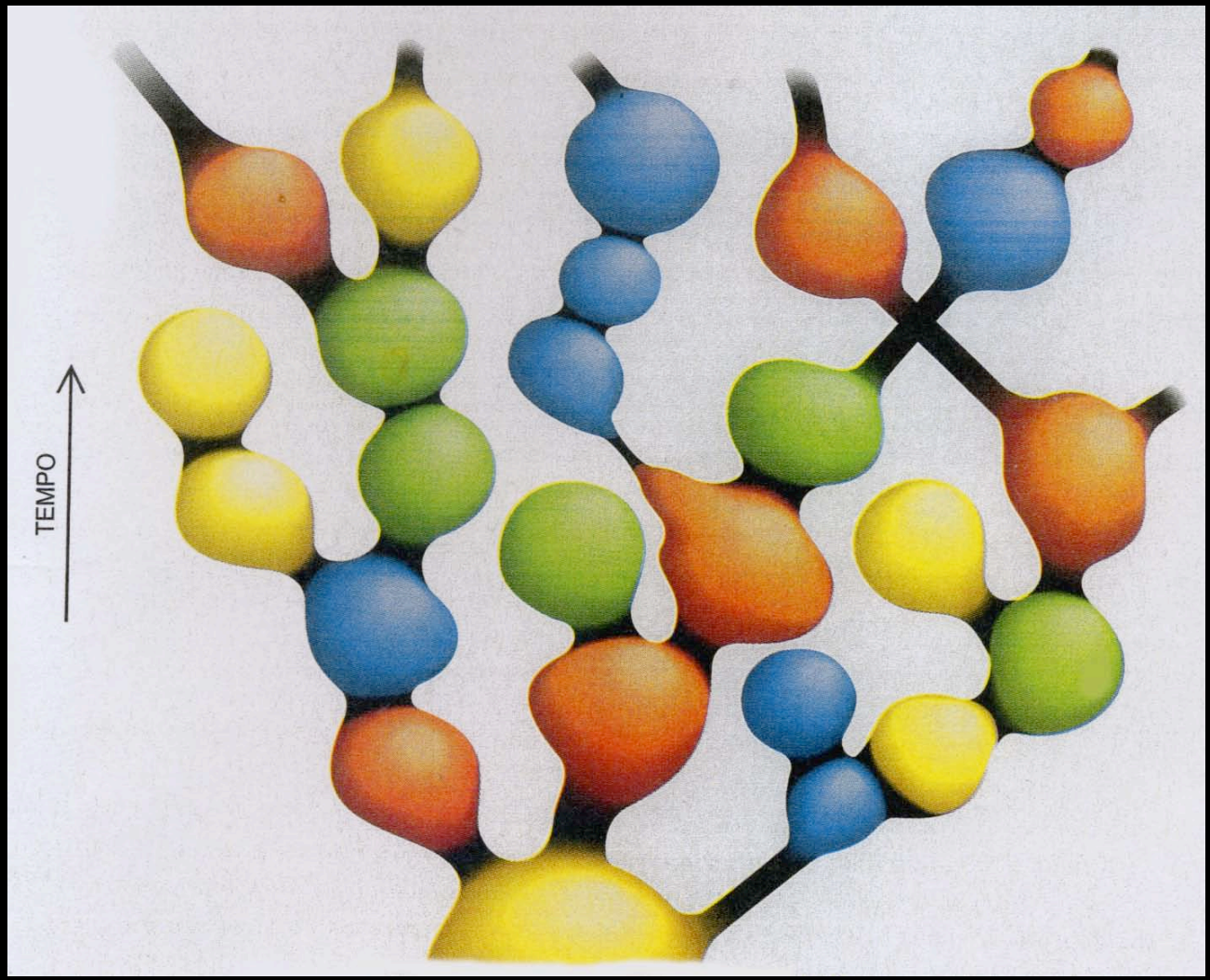
durante l'espansione il valore del campo diminuisce rilasciando energia che si condensa in particelle che riempiono lo spazio

Spettro delle fluttuazioni di temperatura del CMB



in accordo con la predizione inflazionaria

Inflazione Eterna → **l'Universo che si autoriproduce**

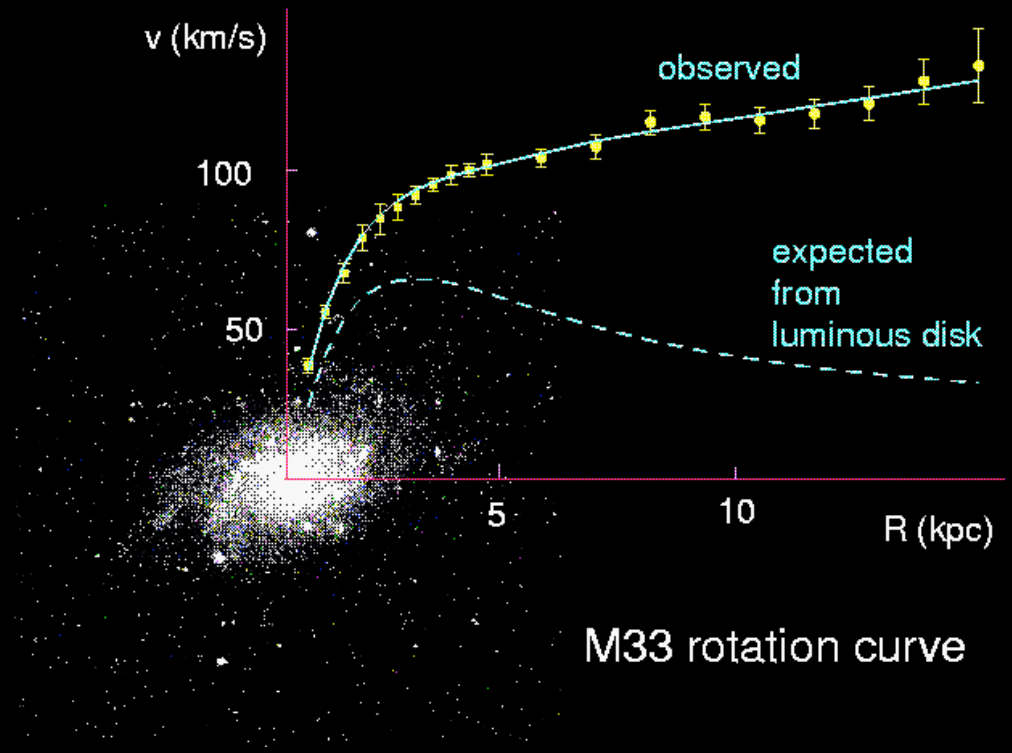


Curve di rotazione delle galassie

$$v^2 = \frac{G\,M_R}{R}$$

$M_R \sim R^3$ → $v \sim R$ fino al bordo della galassia

$v \sim \frac{1}{R^{1/2}}$ oltre il bordo della galassia



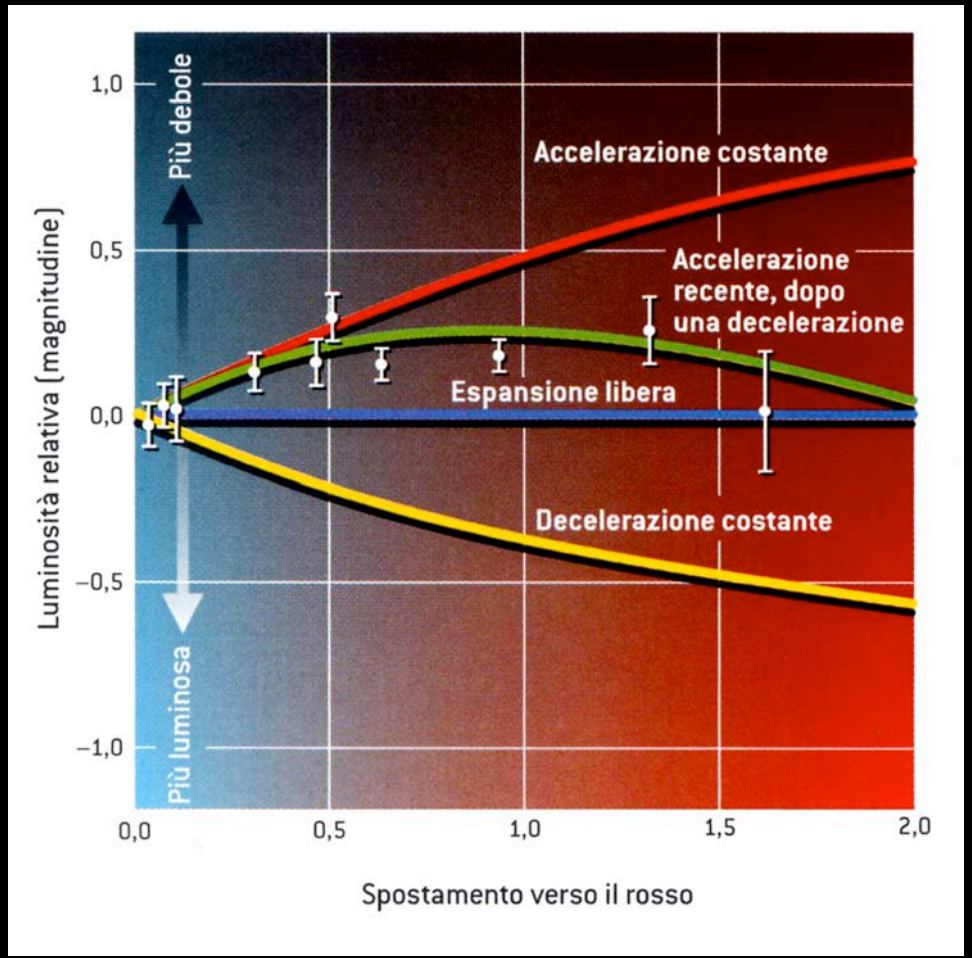
$\Omega_{halo} \approx 0.1$

↓

Dark Matter

le SN-Ia lontane meno luminose del previsto →

nel passato l'Universo si espandeva più lentamente

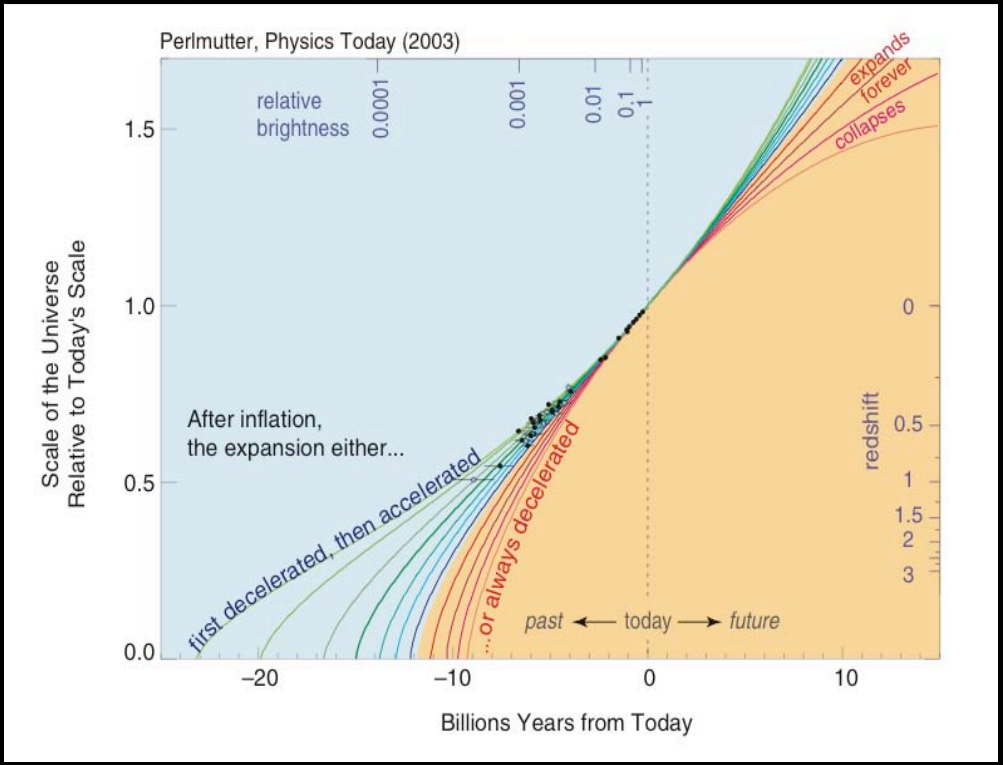


→ l'Universo sta accelerando !!

↓

Dark Energy

l'accelerazione è cominciata circa 7 miliardi di anni fa !!



The Nobel Prize in Physics 2011
Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess

The Nobel Prize in Physics 2011
Nobel Prize Award Ceremony
Saul Perlmutter
Brian P. Schmidt
Adam G. Riess

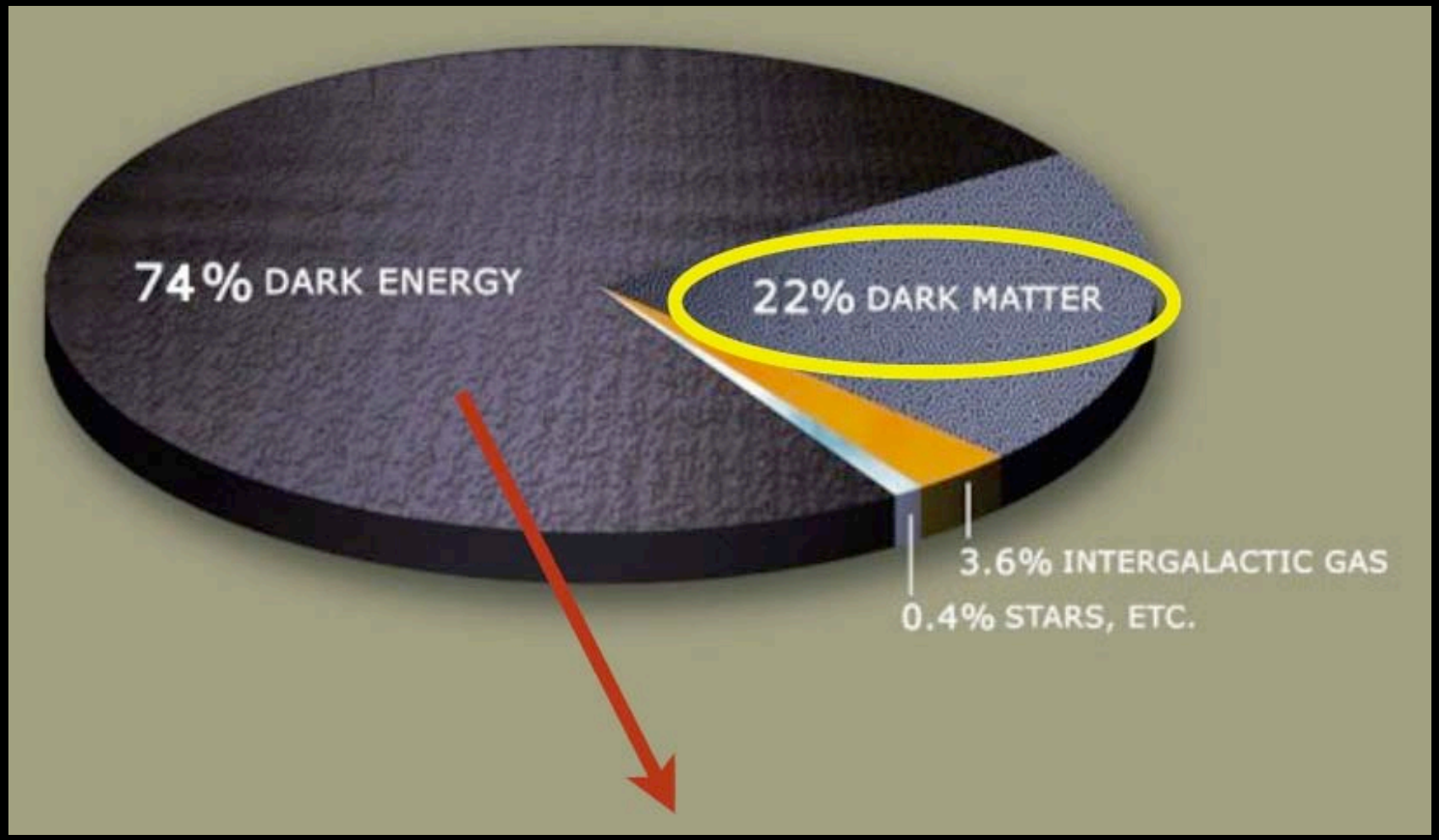
Photo: U. Montan
Saul Perlmutter

Photo: U. Montan
Brian P. Schmidt

Photo: U. Montan
Adam G. Riess

The Nobel Prize in Physics 2011 was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess *"for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"*.

La composizione dell'Universo



l'energia del vuoto

osservazioni astrofisiche: $\rho_\Lambda \sim 7 \times 10^{-30}$ g/cm^3

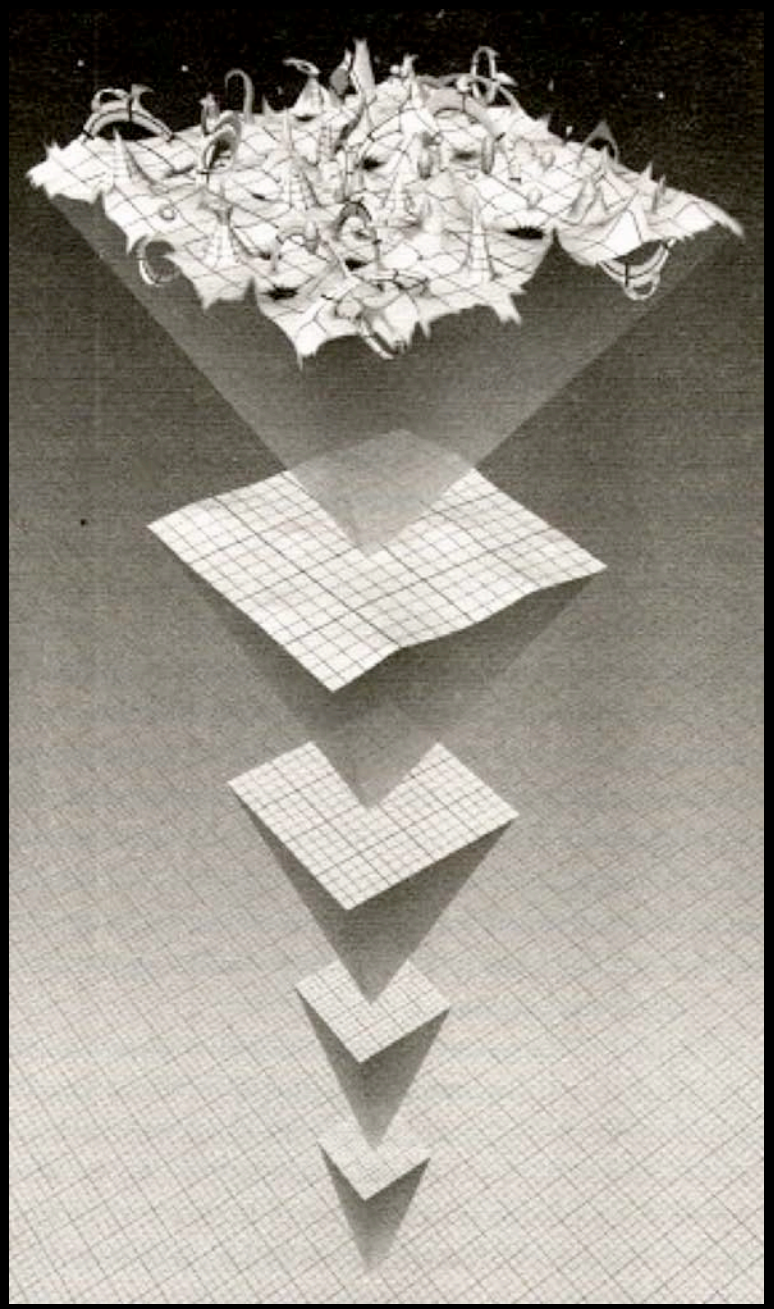
costante cosmologica è molto piccola, ma non = 0 come la voleva Einstein

da cosa è costituita?

fluttuazioni dei campi quantistici? → energia infinita

calcolo da rifare: la teoria dei campi non è affidabile per distanze molto piccole: fluttuazioni con $\lambda \leqq \ell_{Pl}$ (10^{-33} cm) hanno energia così grande che forza gravitazionale diviene importante

su scale di dimensioni ~ ℓ_{Pl}
le fluttuazioni quantistiche
introducono modifiche
sostanziali alla geometria
dello spaziotempo



necessaria teoria quantistica
della gravità

rifacciamo il calcolo escludendo $\lambda \leqq \ell_{Pl}$ → si ottiene

$$\rho_{Pl} = \frac{M_{Pl}}{\ell_{Pl}^3} = \frac{10^{-5}\ \mathrm{g}}{(10^{-33}\ \mathrm{cm})^3} \sim 10^{94}\ \mathrm{g/cm^3}$$

espansione troppo violenta: no atomi e galassie

problema imbarazzante:

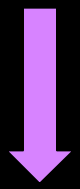
$$\frac{\rho_\Lambda}{\rho_{Pl}} \sim 10^{-123}$$

SUSY → fluttuazioni quantistiche di particella e s-particella sono di uguale ampiezza e segno opposto → $\rho_{SUSY} = 0$

Problema: compensazione si verifica esattamente se particella e superparticella hanno "cariche" (elettrica, forte, …) uguali

diversa massa per la coppia particella/superparticella → la compensazione non si verifica

$$\frac{\rho_\Lambda}{\rho_{SUSY}} \sim 10^{-55}$$



cos'è che accelera l'espansione dell'Universo ?