

# Introduzione alla Cosmologia

Sunny Vagnozzi

Percorso di Approfondimento in Fisica 2022-23

✉ [sunny.vagnozzi@unitn.it](mailto:sunny.vagnozzi@unitn.it)

🏠 [www.sunnyvagnozzi.com](http://www.sunnyvagnozzi.com)

26 Maggio 2023



UNIVERSITÀ  
DI TRENTO

## Le 3 domande più antiche dell'umanità...

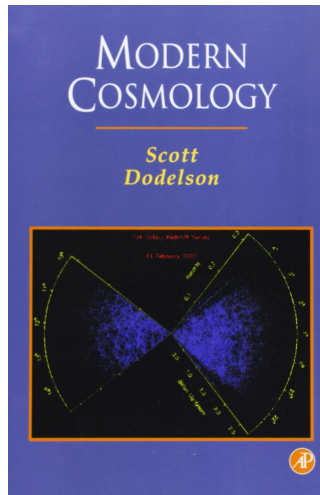


- Da dove veniamo?
- Di cosa siamo fatti?
- Dove andremo?

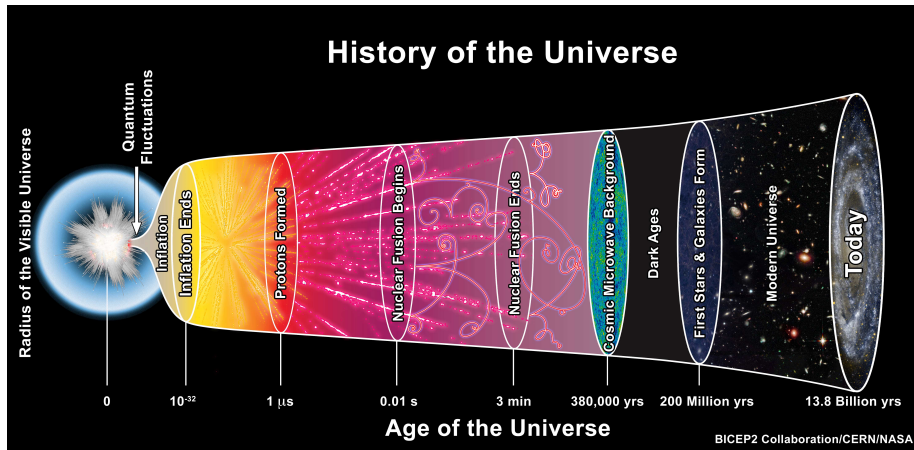
## ...e le loro versioni moderne!

(la cui risoluzione è guidata da una quantità *enorme* di dati)

- Quali sono le condizioni iniziali dell'Universo?
- Di cosa è fatto l'Universo?
- Qual è il fato dell'Universo?



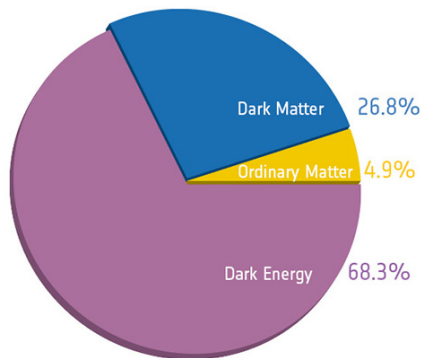
# Storia dell'Universo



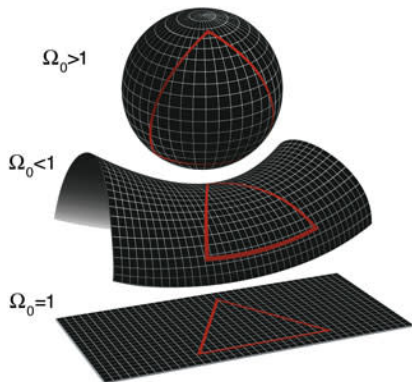


# Contenuti e forma dell'Universo

Il 95% dell'Universo è sconosciuto!



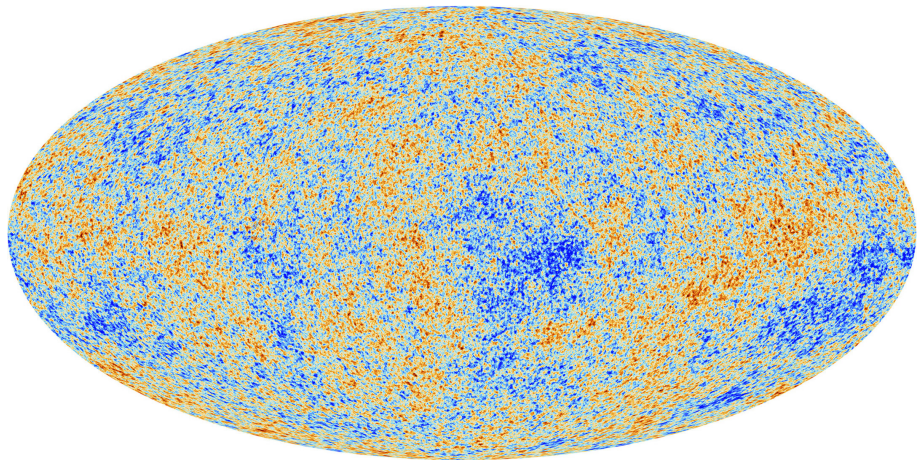
Essenzialmente 3 possibili "forme"



Come sappiamo tutto ciò? Grazie a misure di precisione su una vasta gamma di tempi e scale!

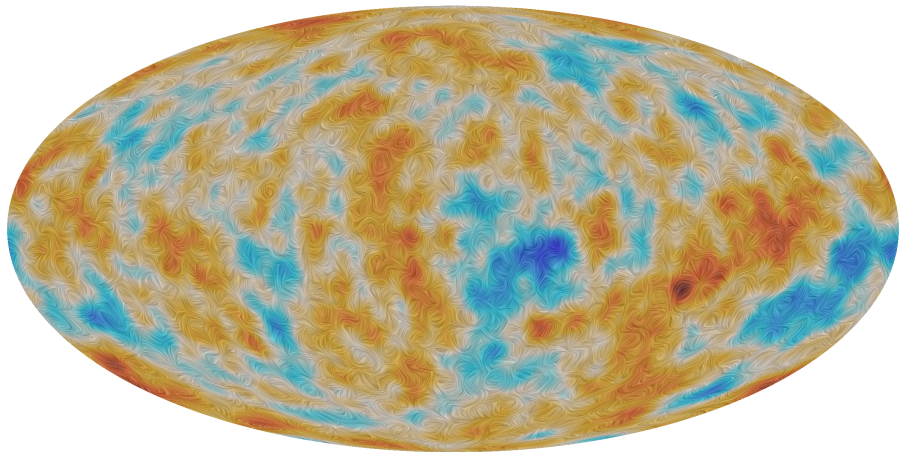
## Misure cosmologiche di precisione

Fondo cosmico a microonde (Cosmic Microwave Background – CMB: temperatura)



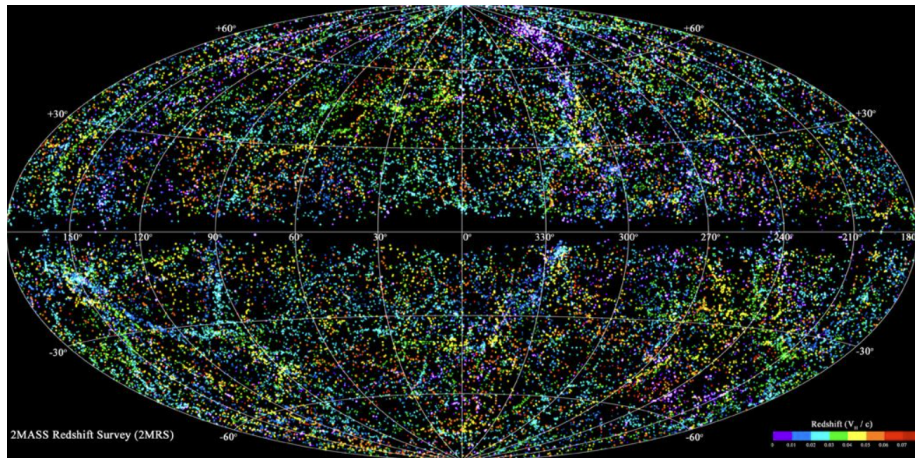
## Misure cosmologiche di precisione

Fondo cosmico a microonde (polarizzazione)



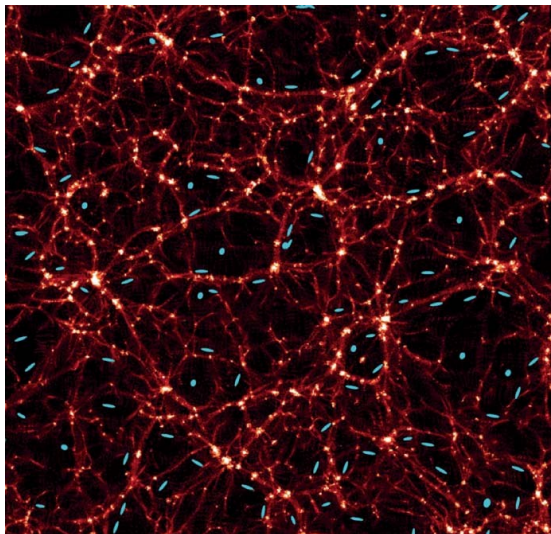
# Misure cosmologiche di precisione

Struttura su Grande Scala (Large-Scale Structure), es. cataloghi di galassie



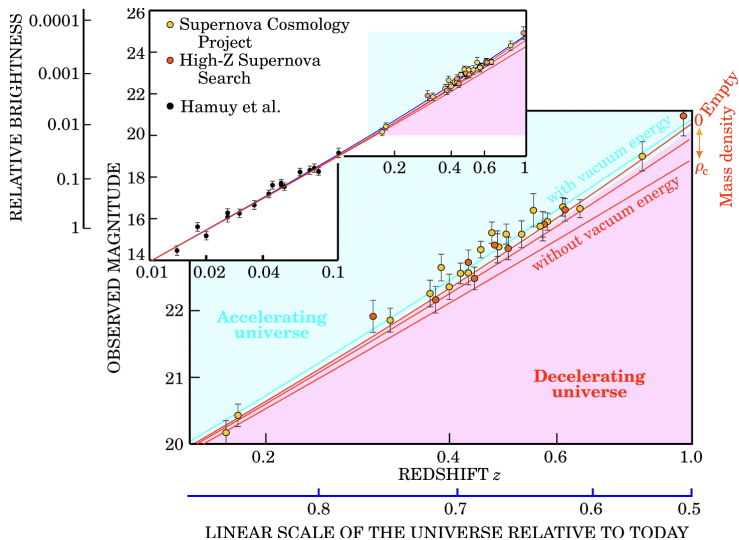
## Misure cosmologiche di precisione

Fenomeno di lente gravitazionale debole (cosmic shear)



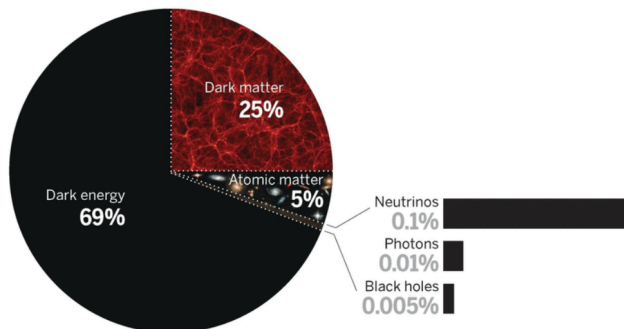
# Misure cosmologiche di precisione

## Supernove: le prime prove di un Universo in accelerazione



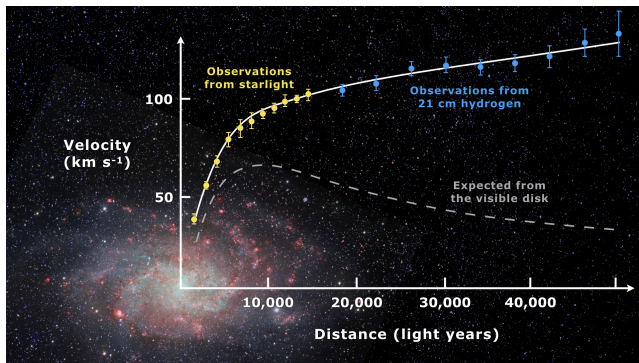
## Il modello $\Lambda$ CDM

- Materia visibile: “barioni”
- Materia oscura (non visibile, ma pur sempre materia)
- Energia oscura (costante cosmologica  $\Lambda$ )
- Inflazione cosmica per settare le condizioni iniziali
- Relatività Generale per descrivere la gravità



# Materia oscura

Curve di rotazione delle galassie...

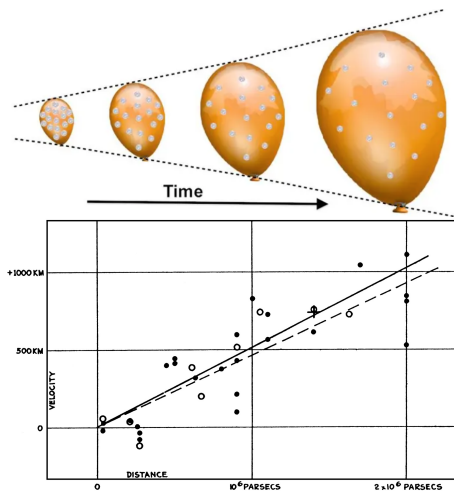


...e altre evidenze (formazione delle strutture, spettro della CMB, ecc.)



# Legge di Hubble

$$v = Hd$$



## Svolgendo indietro il nastro...

L'Universo primordiale era un posto molto semplice:

- Liscio
- Caldo
- Con (quasi) tutti i costituenti in equilibrio!

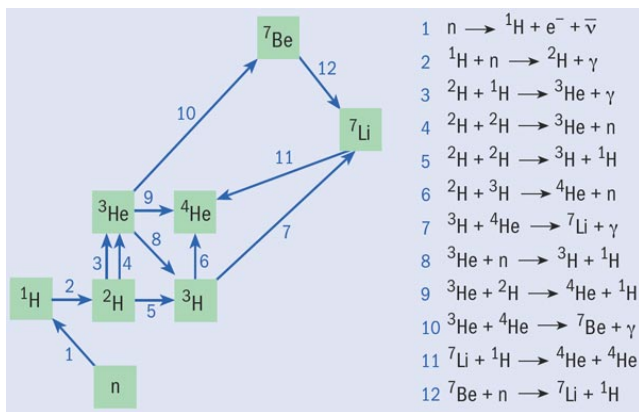
Come si raffredda, alcuni costituenti cominciano ad uscire dall'equilibrio ("freeze-out" /disaccoppiamento)

2+ momenti chiave?

- $t \ll 1 \text{ s}$  ( $T \sim 100 \text{ GeV}$ ): Formazione di materia oscura?
- $t \sim 1 \text{ min}$  ( $T \sim 0.1 \text{ MeV}$ ): nucleosintesi primordiale
- $t \sim 300,000 \text{ anni}$  ( $T \sim 0.1 \text{ eV}$ ): formazione dell'atomo di idrogeno

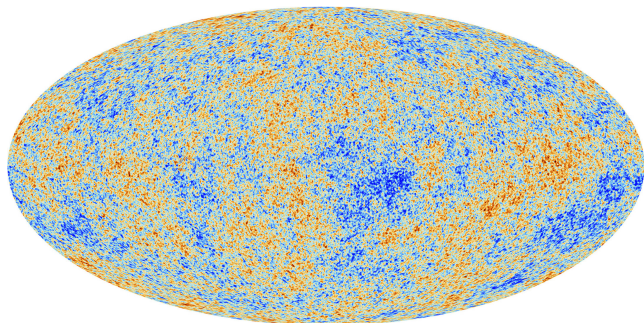
# I tre pilastri del modello "hot Big Bang"

- Diagramma di Hubble
- Nucleosintesi primordiale
- Fondo cosmico a microonde



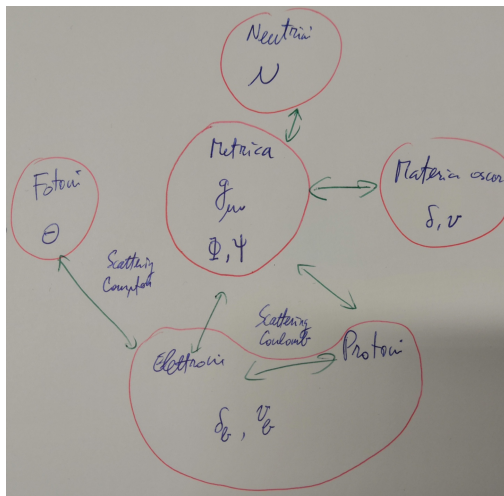
## Perturbazioni

Piccole anisotropie osservate nella CMB sono il segno di inhomogeneità/perturbazioni che in seguito crescono sotto l'instabilità gravitazionale per formare le strutture che vediamo oggi (grazie alle quali esistiamo)

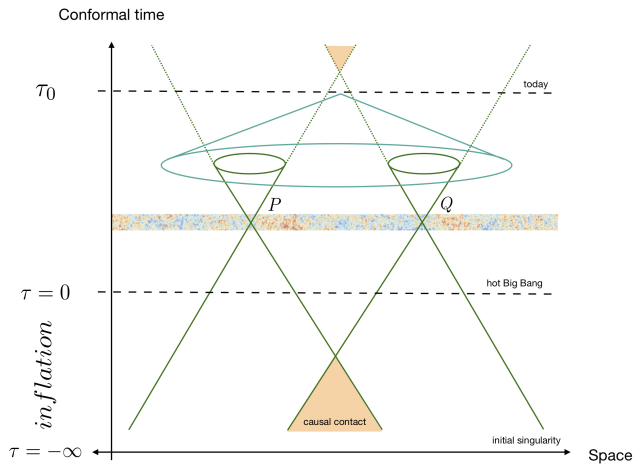


# Le equazioni di Boltzmann

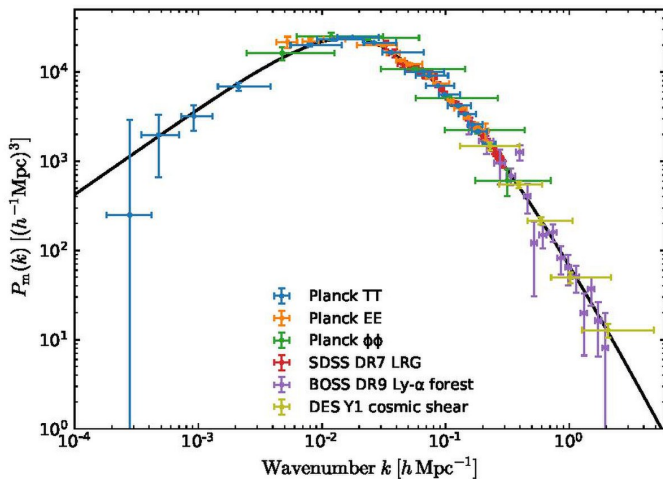
$$\frac{df}{dt} = C[f]$$



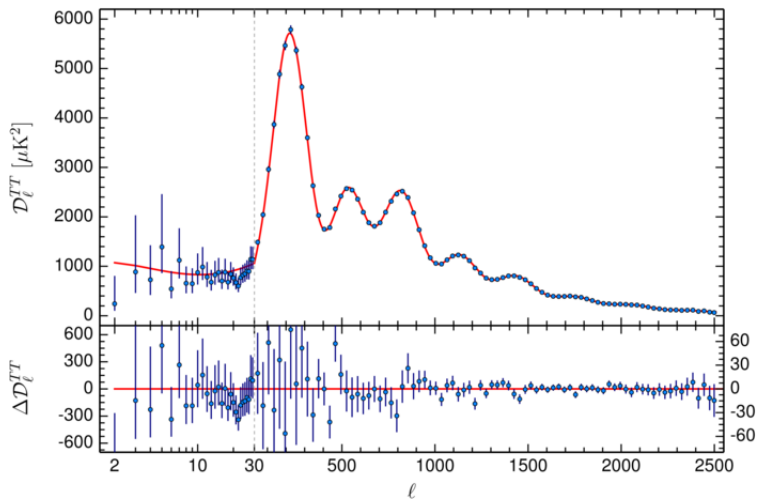
# Il problema dell'orizzonte



# Spettro di potenza della materia



# Spettro di potenza della radiazione cosmica di fondo





## Domande aperte

- Cosa sono la materia oscura e l'energia oscura?
- L'inflazione cosmica è davvero avvenuta?
- La gravità è descritta veramente dalla Relatività Generale?
- Tensione di Hubble
- Possiamo riconciliare la teoria delle stringhe con le osservazioni?
- ...e tante altre!