

Il lato oscuro dell'Universo

Francesco Pace

Dipartimento di Fisica, Università di Torino

15 Settembre 2023



Cosa osserviamo?
○○○○○

Come è iniziato?
○

Di cosa è fatto?
○○○○○○○○○○○○○○○○

Evoluzione
○○○○○○○○○○○○

Il lato oscuro dell'Universo
○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○

Di cosa parliamo oggi?

1 Cosa osserviamo?

Di cosa parliamo oggi?

- 1 Cosa osserviamo?
- 2 Come è iniziato?

Di cosa parliamo oggi?

- 1 Cosa osserviamo?
- 2 Come è iniziato?
- 3 Di cosa è fatto?

Di cosa parliamo oggi?

- 1 Cosa osserviamo?
- 2 Come è iniziato?
- 3 Di cosa è fatto?
- 4 Evoluzione

Di cosa parliamo oggi?

- 1 Cosa osserviamo?
- 2 Come è iniziato?
- 3 Di cosa è fatto?
- 4 Evoluzione
- 5 Il lato oscuro dell'Universo

L'Universo matematico

- Le leggi della fisica sono descritte nel linguaggio della matematica
- Le leggi della fisica sono universali
- Possiamo descrivere l'Universo con esperimenti realizzati sulla Terra



L'Universo osservabile

- Abbiamo un solo Universo
- Non possiamo fare esperimenti in cosmologia, ma solo osservazioni
- Possiamo quindi proporre modelli e teorie da confrontare con i dati osservativi
- Da questo confronto si traggono delle conclusioni di carattere fisico
- È l'Universo stesso il nostro esperimento

Quali forze agiscono nell'Universo?

Ci sono quattro forze fondamentali

- Forza gravitazionale
- Forza elettromagnetica
- Forza nucleare debole
- Forza nucleare forte

La forza gravitazionale domina a grandi scale

C'è anche una quinta forza?



Che cosa osserviamo?

La Via Lattea, casa nostra



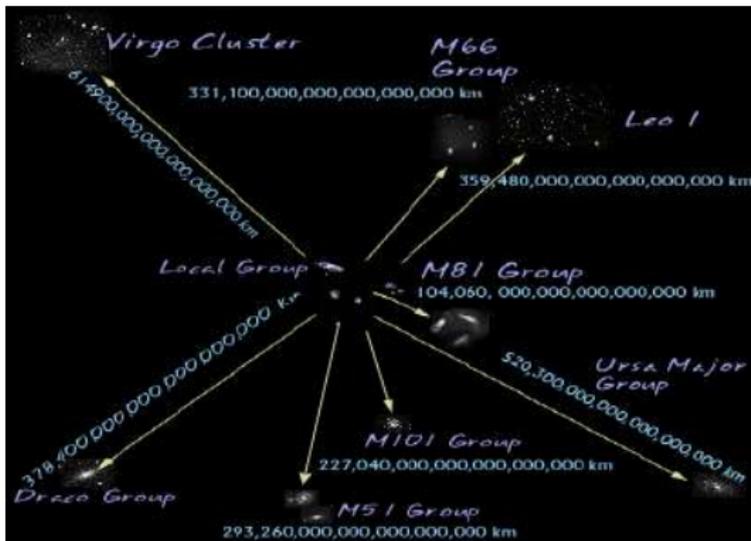
Che cosa osserviamo?

Il gruppo locale, i nostri vicini di casa



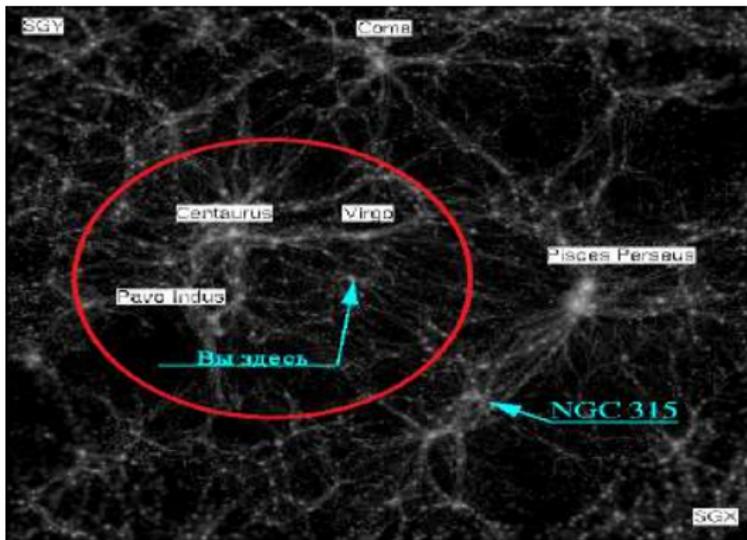
Che cosa osserviamo?

Il superammasso della Vergine



Che cosa osserviamo?

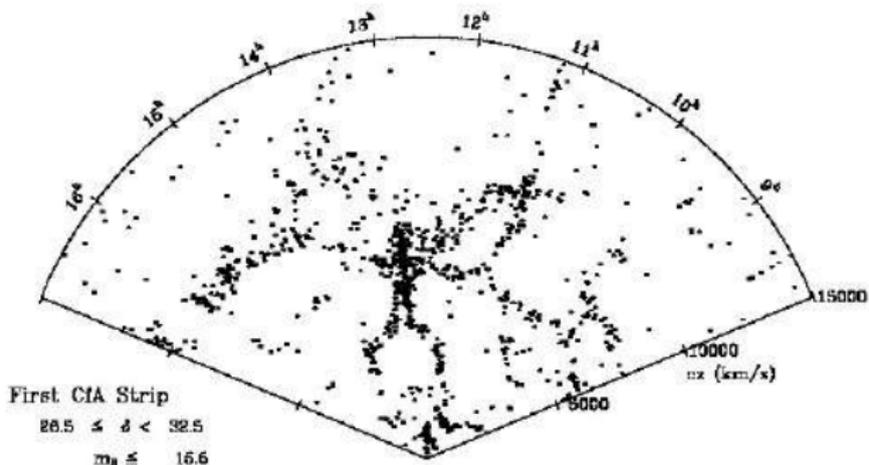
Laniakea, il superammasso locale



Come sono cambiate le osservazioni nel tempo?

The CfA Survey

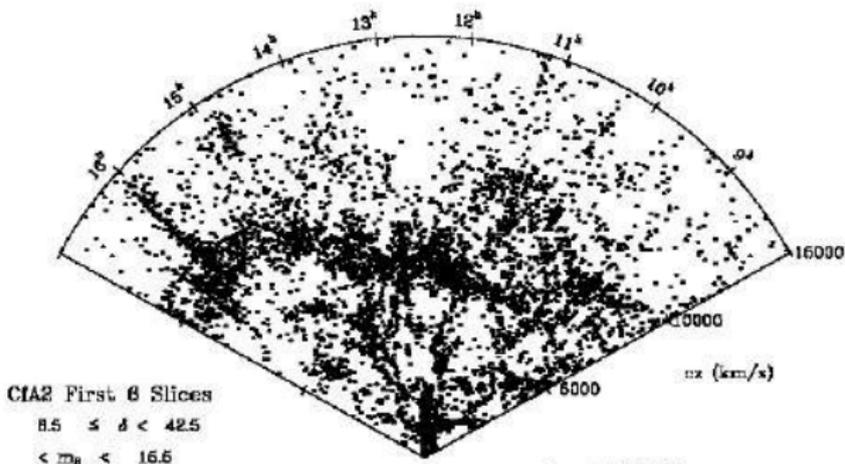
Migliaia di galassie



Come sono cambiate le osservazioni nel tempo?

The CfA Survey

Migliaia di galassie

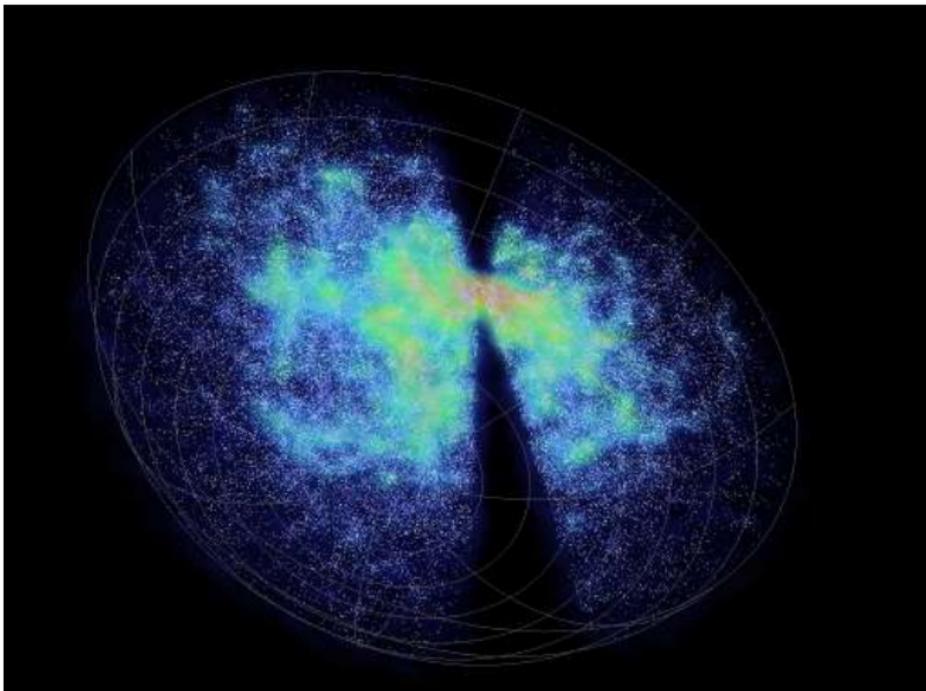


Copyright: SNO 1998

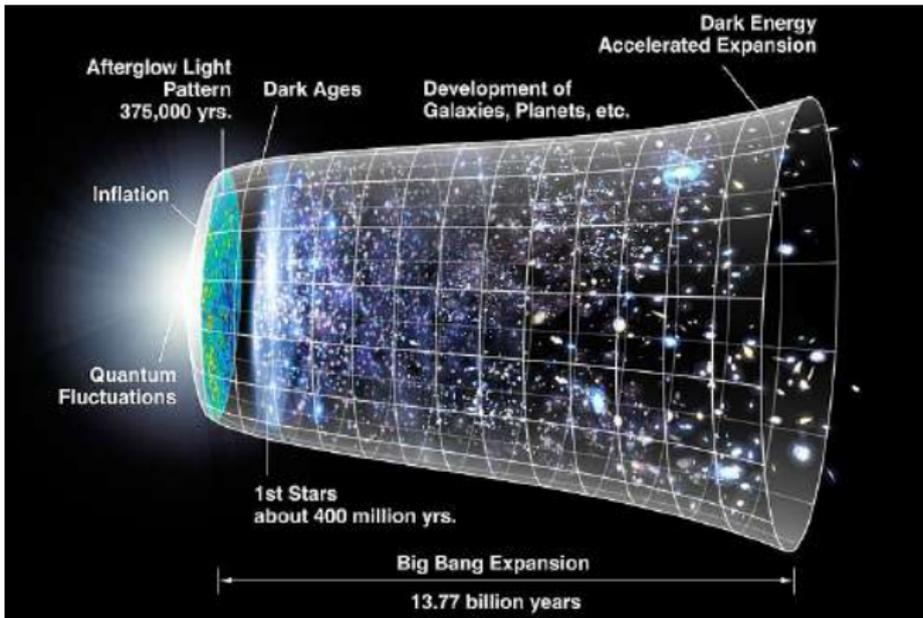
Come sono cambiate le osservazioni nel tempo?

6dF Galaxy Redshift Survey

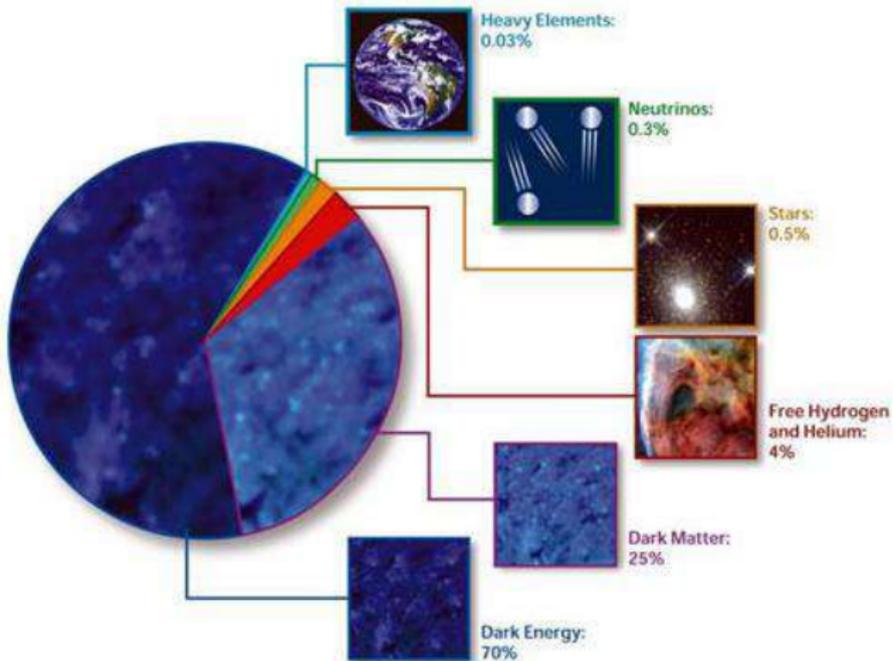
Diverse centinaia di migliaia di galassie



Il big bang



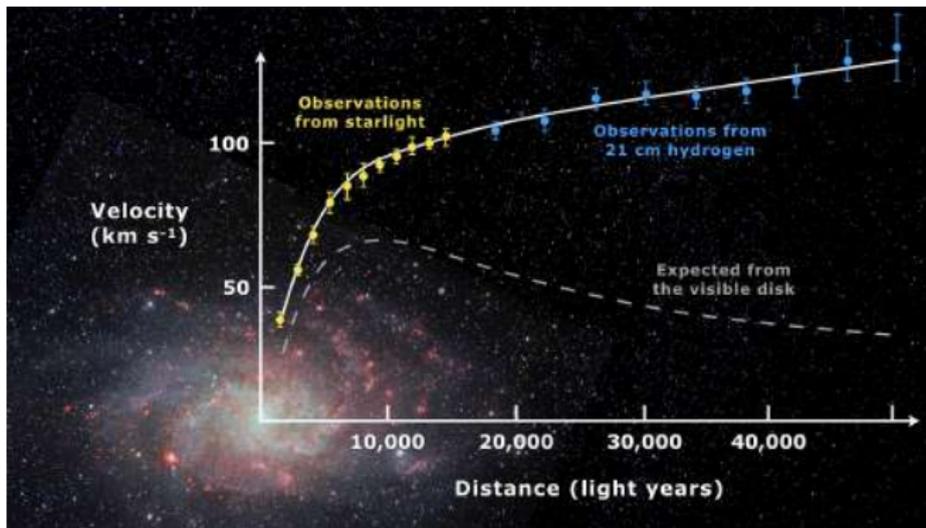
Di cosa è fatto l'Universo?



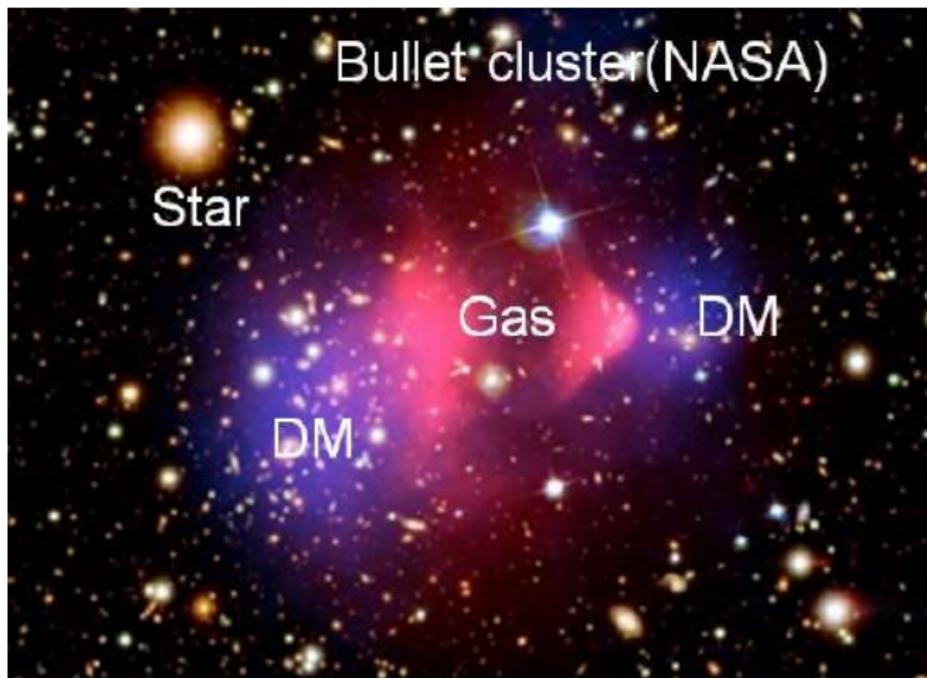
Il lato oscuro dell'Universo

- Circa il 95% dell'Universo è composto da due componenti di cui non sappiamo di cosa siano fatti
- La materia oscura è responsabile della formazione delle strutture
- L'energia oscura spiega l'espansione accelerata dell'Universo
- Quando l'energia oscura viene interpretata come costante cosmologica, abbiamo il modello cosmologico standard → Λ CDM

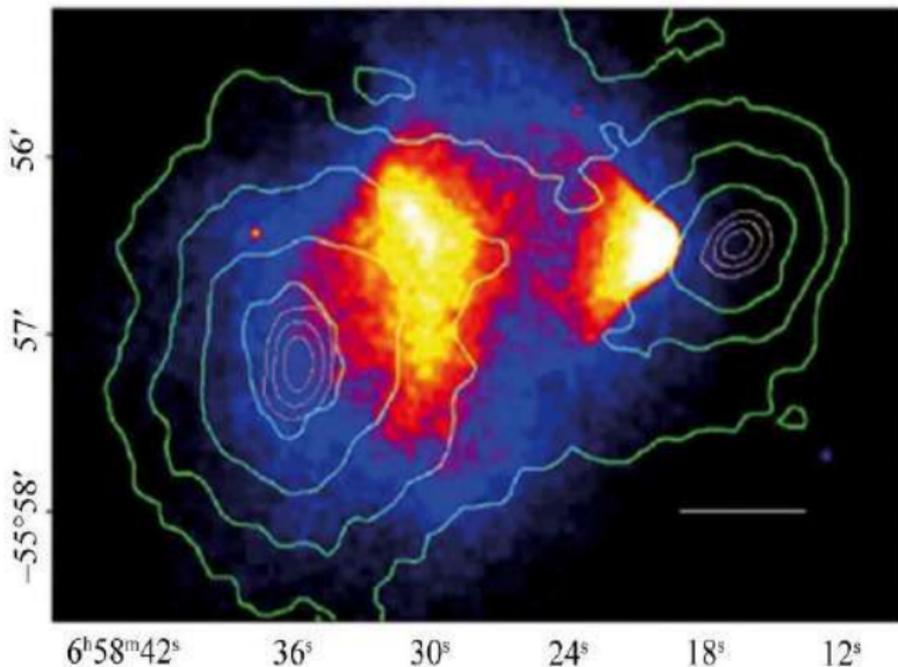
La materia oscura e le curve di rotazione



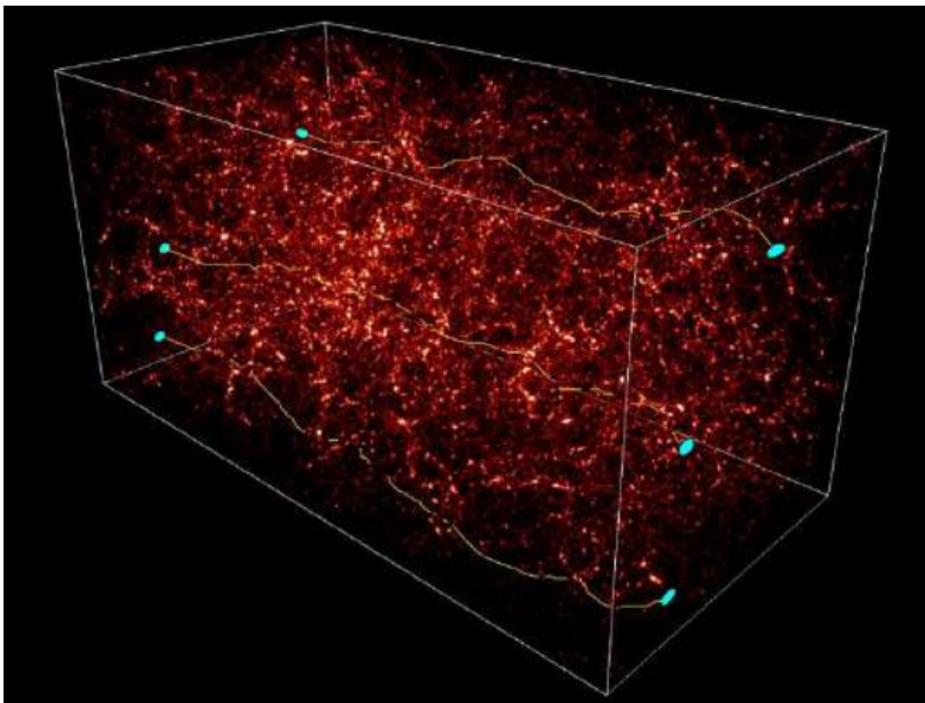
La materia oscura e la dinamica degli ammassi



La materia oscura e la dinamica degli ammassi



La materia oscura ed il lensing gravitazionale



Di cosa è fatta la materia oscura?

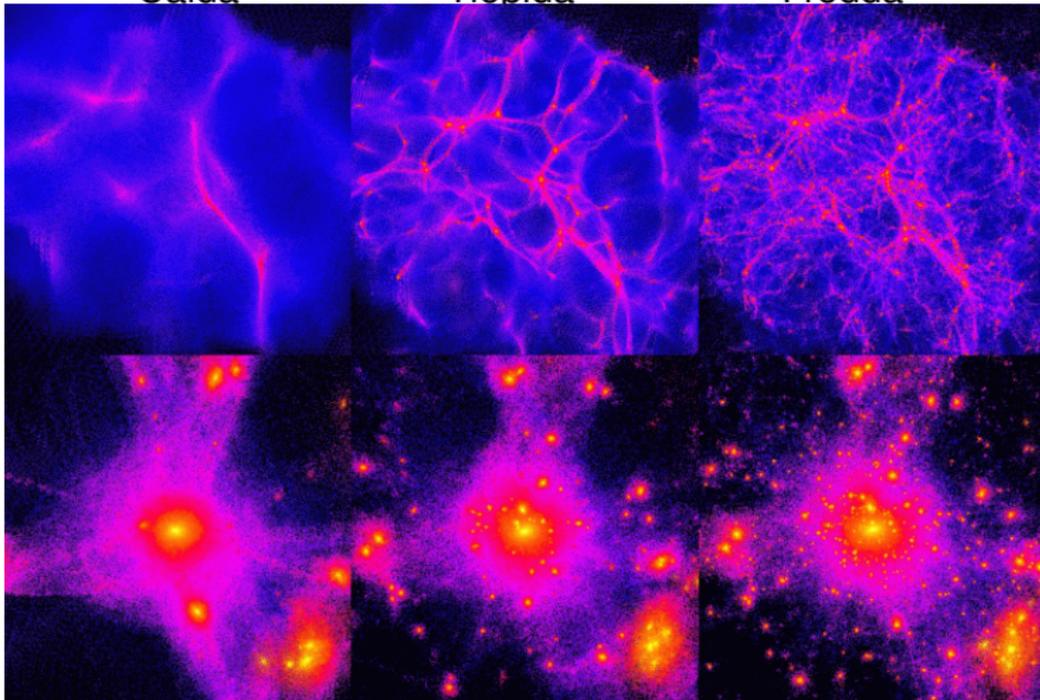
- Non è fatta di materia ordinaria
- L'abbiamo osservata solo indirettamente
- Non ci sono prove dirette della sua esistenza
- Diverse nuove particelle proposte
- Sono in corso esperimenti per osservare nuove particelle di materia oscura

La materia oscura è CALDA, TIEPIDA o FREDDA?

Calda

Tiepida

Fredda

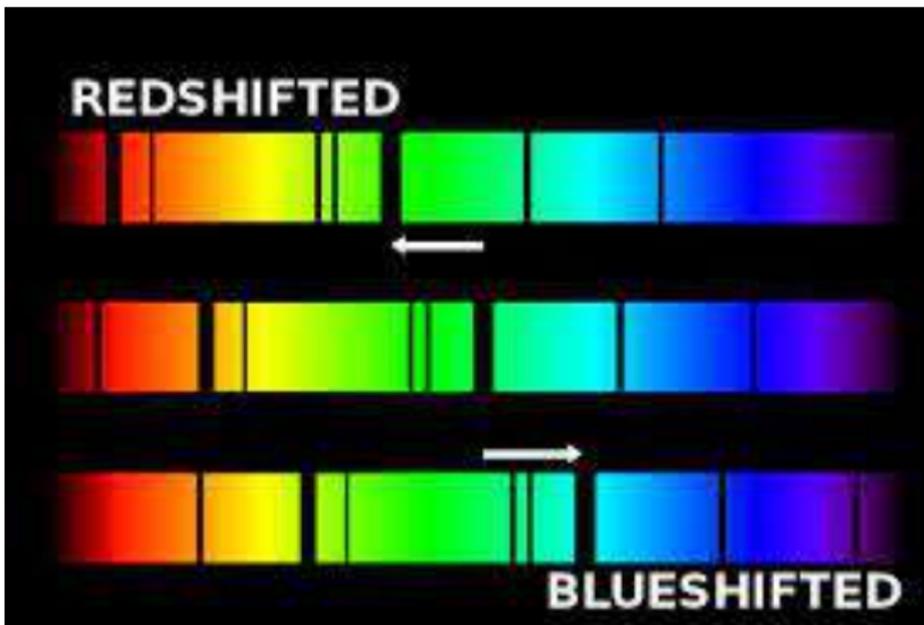


Credit: Ben Moore

L'energia oscura

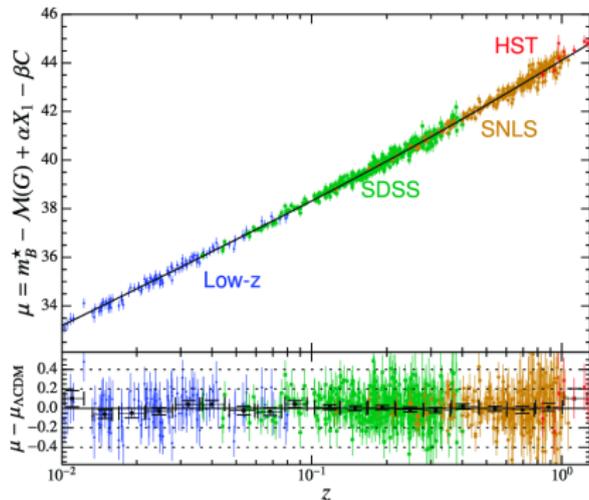
- È uno dei più grandi misteri della fisica
- È responsabile dell'espansione accelerata dell'Universo
- Di solito è associata all'energia del vuoto (Λ)
- Può anche essere interpretata come gravità modificata

Effetto Doppler



La legge di Hubble

- Nel 1924 Hubble capisce che la nostra galassia non è l'unica, ma ce ne sono altre
- Utilizzando le stelle Cefeidi, nel 1929 Hubble misurò la distanza delle galassie vicine



La legge di Hubble e l'espansione dell'Universo

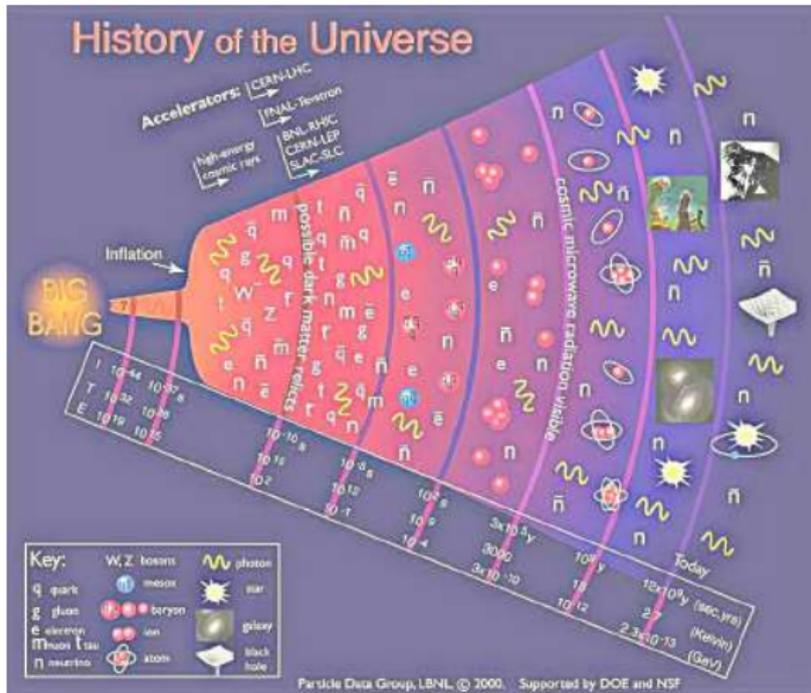
- La legge di Hubble ci dice che l'Universo si espande
- Questo implica un istante iniziale dove tutto era concentrato nello stesso punto
- L'Universo nel passato era più caldo
- Possiamo spiegarla con la relatività generale di Einstein

Il più grande errore di Einstein. O no?

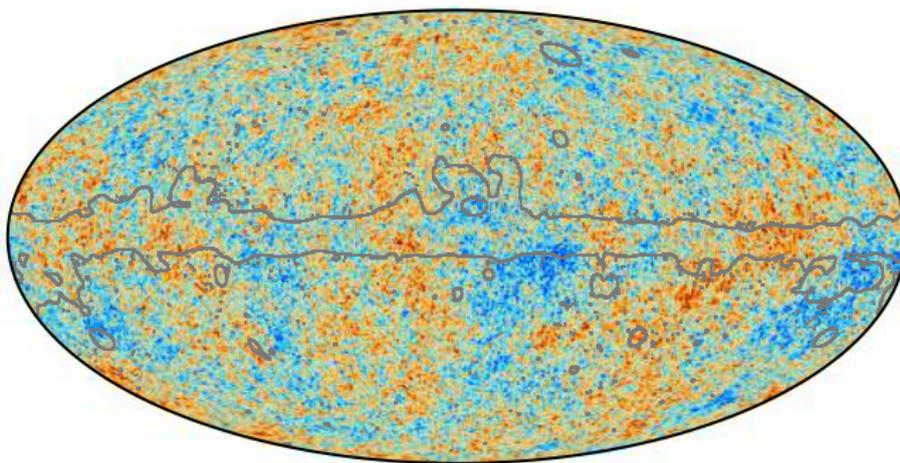
- La relatività generale prevede un Universo in espansione o contrazione
- Einstein aggiunse alle sue equazioni un termine per avere un Universo statico
- Ma l'Universo si espande. Questo è il suo errore
- Ma adesso osserviamo che l'espansione è accelerata e la costante cosmologica ritorna

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

Come si è evoluto l'Universo?



La radiazione cosmica di fondo e le perturbazioni primordiali

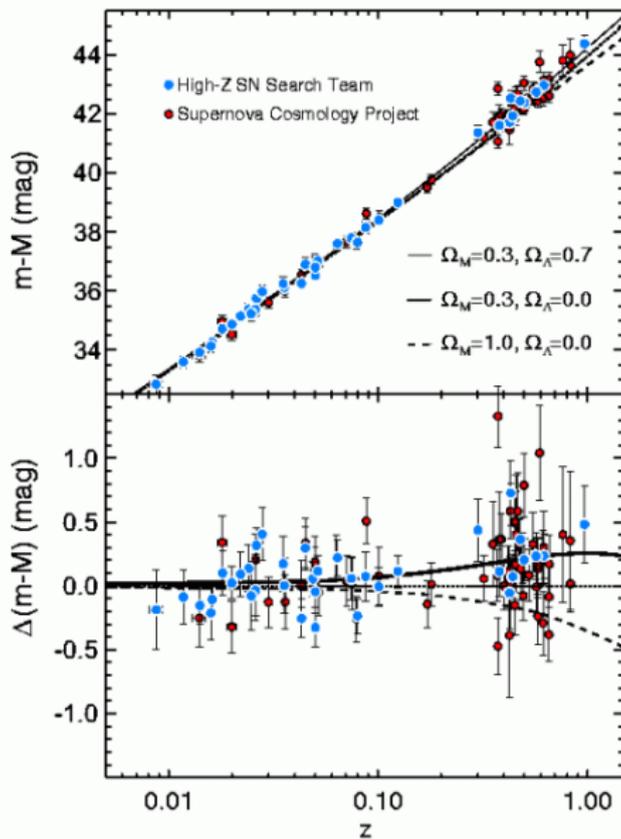


La geometria dell'Universo

- La radiazione cosmica di fondo ci dice che l'Universo è piatto
- Ma non c'è abbastanza materia, neanche considerando la materia oscura
- L'età degli oggetti più vecchi è maggiore di quella dell'Universo

L'espansione dell'Universo

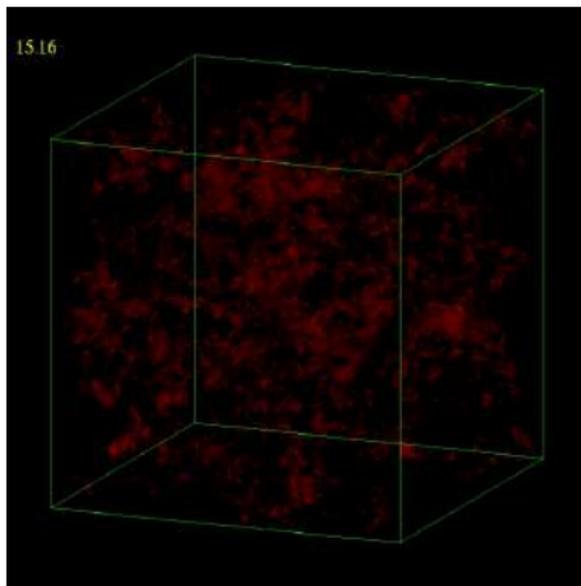
- Nel 1998 due gruppi di astronomi misurano l'espansione dell'Universo usando le supernovae di tipo Ia
- Sono stelle con la stessa luminosità intrinseca e permettono di calibrare la distanza delle galassie
- È la stessa idea di Hubble, ma con tecniche moderne



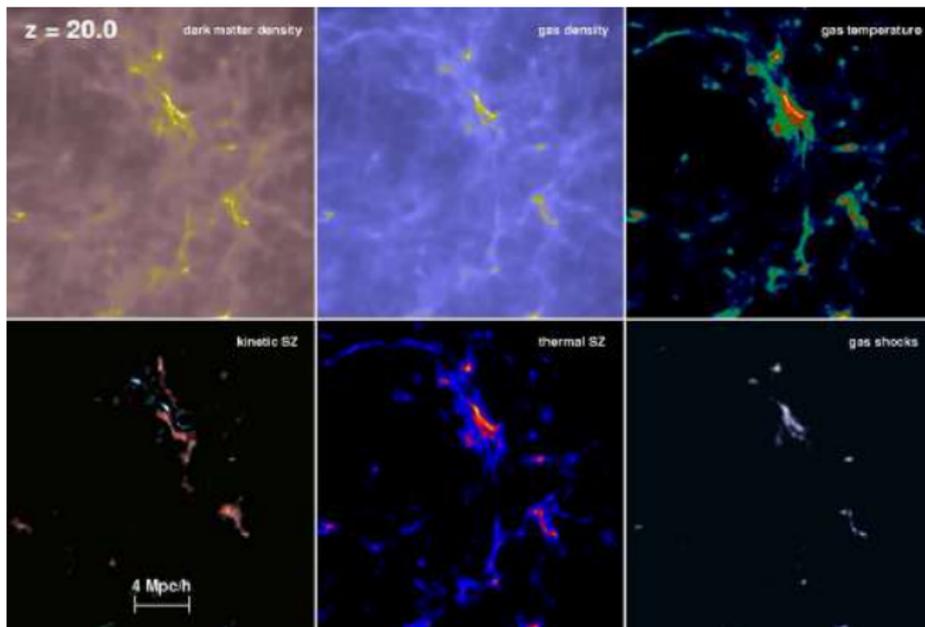
L'espansione dell'Universo

- Le galassie si allontanano le une dalle altre
- La gravità è positiva e questo è un paradosso
- La velocità di espansione cambia con il tempo
- L'Universo giovane decelera
- L'Universo attuale accelera

Evoluzione delle fluttuazioni di densità



Formazione di un ammasso di galassie



Cosa osserviamo?
○○○○○

Come è iniziato?
○

Di cosa è fatto?
○○○○○○○○○○○○○○

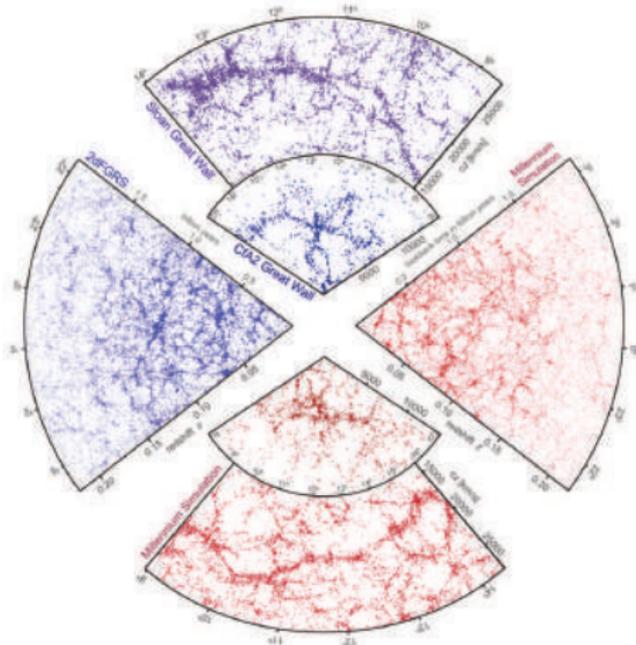
Evoluzione
○○○○○○○○●○○

Il lato oscuro dell'Universo
○○○○○○○○○○○○○○○○



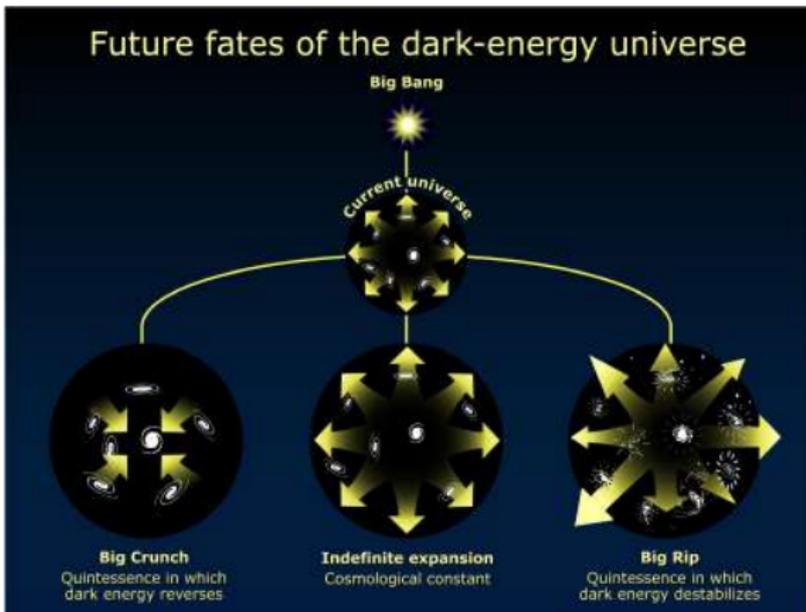
Osservazioni vs Simulazioni

Come appare la struttura a grandi scale



Come evolverà l'Universo

Dipenderà dalle proprietà dell'energia oscura



Il gruppo di cosmologia del dipartimento

- Componenti
 - Prof. A. Diaferio
 - Prof.ssa L. Ostorero
 - Prof. S. Camera
 - Dr. F. Pace
- Dottorandi
 - A. Rubiola
 - S. Rossiter
- Tesisti
 - R. Ingrao
 - F. Montano
 - M. Novara
- Collaboratori interni (gruppo teorico ed astroparticellare)
 - Prof. N. Fornengo
 - Prof. A. Cuoco
 - Prof. M. Regis



Quali scale studiamo nel Dipartimento?

- Strutture a piccola scala (galassie, ammassi di galassie) (Diaferio, Ostorero, Pace)
- Strutture a grandi scale (cosmologiche) (Camera, Pace)
- Strutture a grandissime scale (Camera, Pace)

Quali argomenti studiamo come gruppo di cosmologia?

- Galassie come strumento cosmologico (Diaferio, Ostorero)
- Materia oscura e sue alternative, come MOND (Diaferio, Ostorero, Pace)
- Modelli di energia oscura e gravità modificata (Camera, Pace)
- Confronto teoria/osservazioni (Camera, Diaferio, Ostorero, Pace)

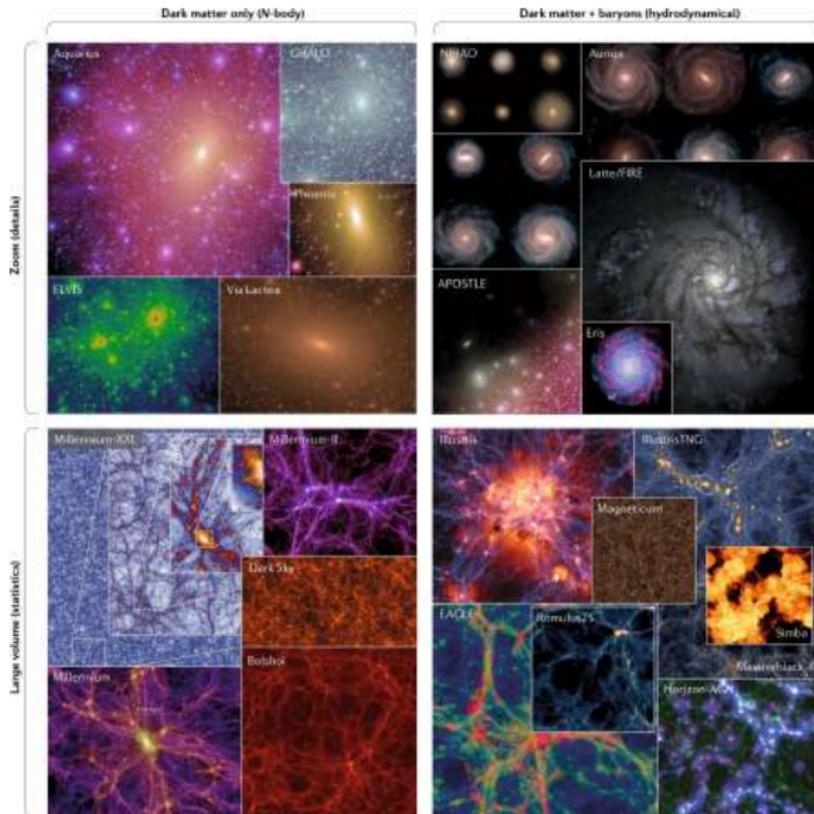
Cosa osserviamo?
○○○○○

Come è iniziato?
○

Di cosa è fatto?
○○○○○○○○○○○○○○

Evoluzione
○○○○○○○○○○○

Il lato oscuro dell'Universo
○○○○●○○○○○○○○○○



Courtesy of Nature Reviews Physics



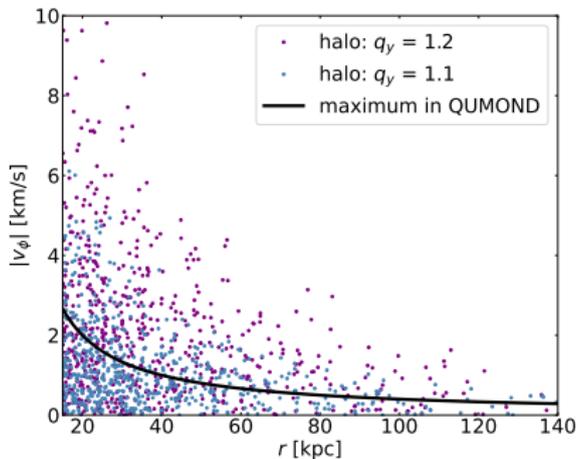
Materia oscura . . .

- La materia oscura spiega le curve di rotazione delle galassie
- Ma è stata ipotizzata, mai osservata
- Ci sono molte ipotesi a riguardo
- Potrebbe essere una nuova particella, un aspetto geometrico della gravità, . . .
- Magari la materia oscura non esiste . . .

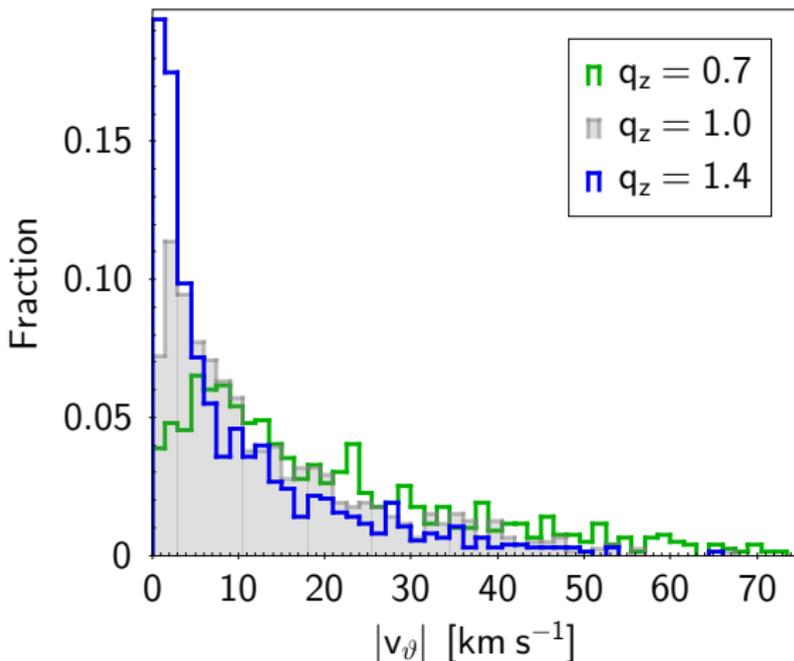


...e MOND

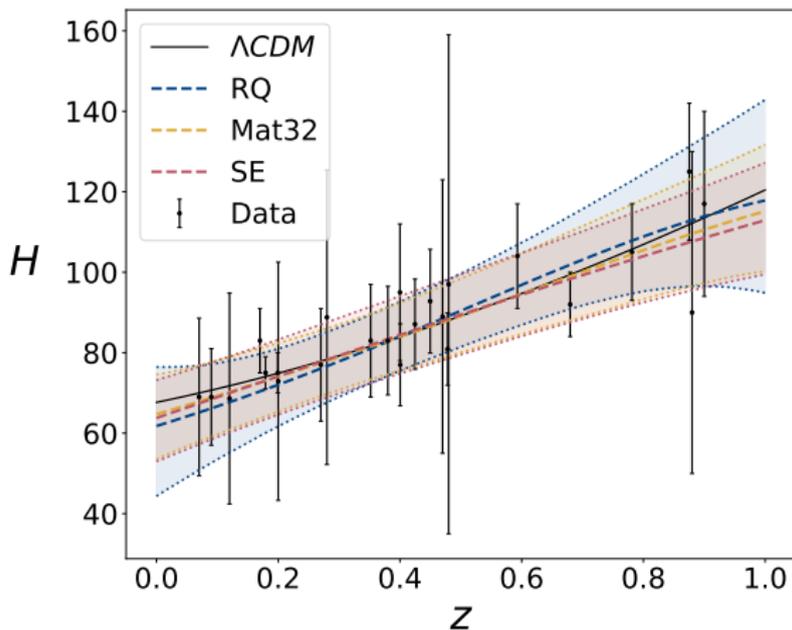
- Si può assumere che la gravità non sia più Newtoniana al di sotto di una certa accelerazione
- In questo caso, $\mathbf{g} = \mu\left(\frac{|\mathbf{g}_N|}{a_0}\right)\mathbf{g}_N$
- $a_0 \approx 10^{-10} \text{ m s}^{-2}$ per tutte le galassie



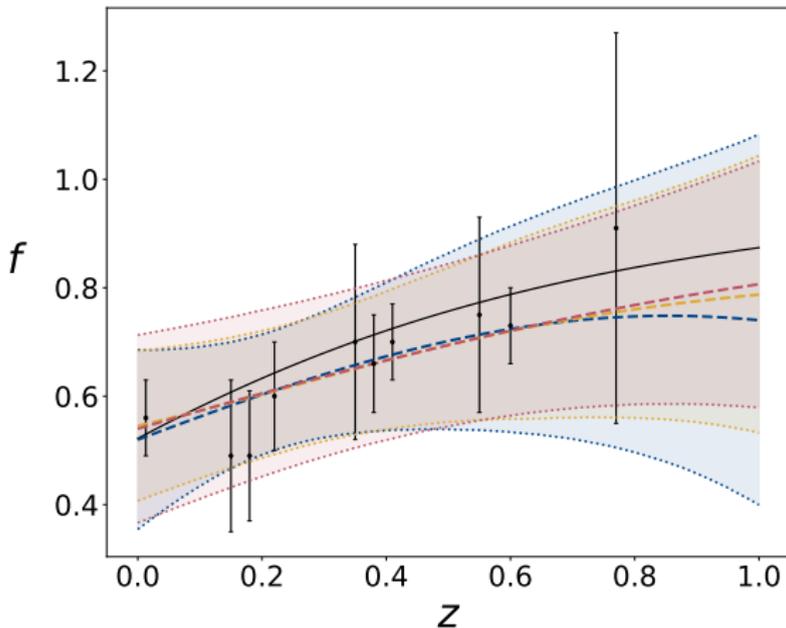
Qual è la forma dell'alone di materia oscura della Via Lattea?



Cosa ci dicono le osservazioni?



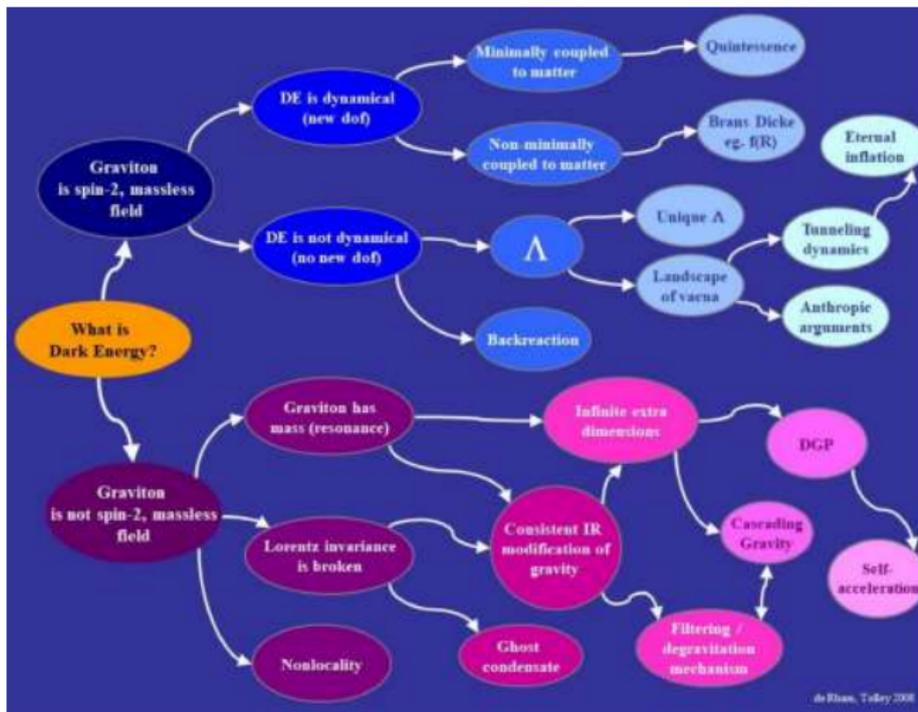
Cosa ci dicono le osservazioni?



Energia oscura e gravità modificata

- Anche se riproduce le osservazioni molto bene, il Λ CDM ha problemi teorici e fenomenologici
- Si cerca di generalizzare il concetto di costante cosmologica usando l'energia oscura
- Oppure si va oltre la relatività generale e si introduce il concetto di gravità modificata
- Tutto questo per spiegare l'espansione accelerata dell'Universo e le tensioni cosmologiche

Uno zoo di modelli (2008)



Come andiamo dalla teoria alle osservazioni?

- 1 Scegliere la Lagrangiana (modello)
- 2 Trovare le equazioni di campo → background
- 3 Perturbarle linearmente
- 4 Metterle in un codice Boltzmann → spettri
- 5 Usare un codice MCMC per determinare i parametri liberi → dati osservativi
- 6 Se possibile, studiare le perturbazioni nonlineari, analiticamente o con simulazioni ad N -corpi

Come andiamo dalla teoria alle osservazioni? Modelli $f(R)$ designer

- 1 $S = \int d^4x \sqrt{-g} \frac{1}{16\pi G} f(R)$

- 2 $f'' + \left(3\epsilon_H - 1 - \frac{\bar{\epsilon}'_H}{\bar{\epsilon}_H}\right) f' - \bar{\epsilon}_H f = 6H^2 \bar{\epsilon}_H \Omega_{de}$

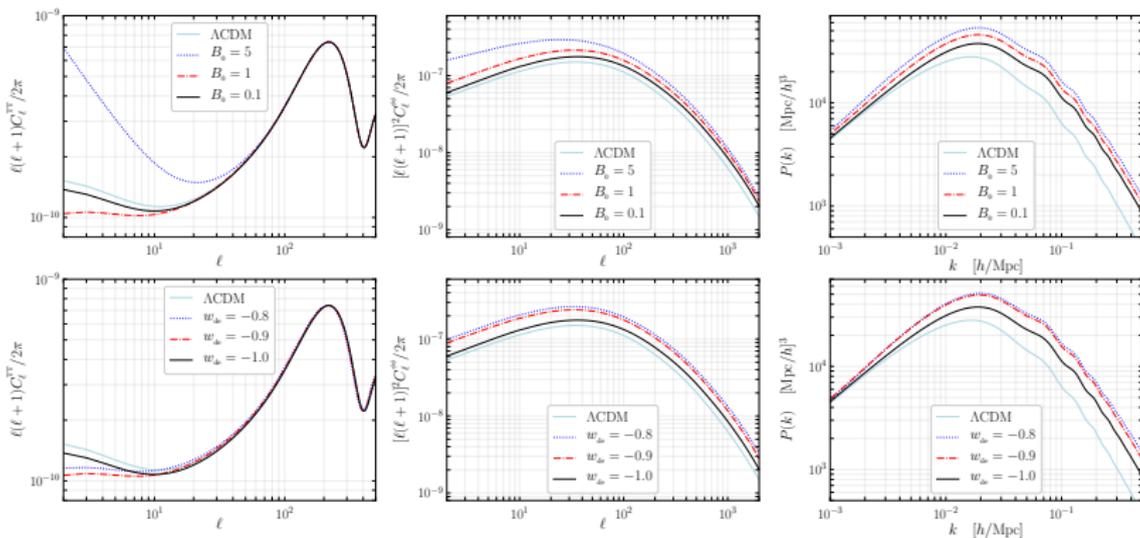
- 3

$$\Delta''_m + (2 - \epsilon_H)\Delta'_m - \frac{3}{2}\Omega_m\Delta_m = -\frac{3}{2}\Omega_{de}\Delta_{de},$$

$$\Delta''_{de} + (2 - \epsilon_H)\Delta'_{de} + (K^2 + M^2)\Delta_{de} = -\frac{1}{3}\frac{\Omega_m}{\Omega_{de}}K^2\Delta_{de}$$

Battye, Bolliet, Pace, 2018

Come andiamo dalla teoria alle osservazioni? Modelli $f(R)$ designer



- Vincoli sui parametri: $\log B_0 < -2.35$, $\sigma_8 < 1.04$,
 $1 + w_{de} < 2.1 \times 10^{-3}$