



# La "prepotenza" della gravità!

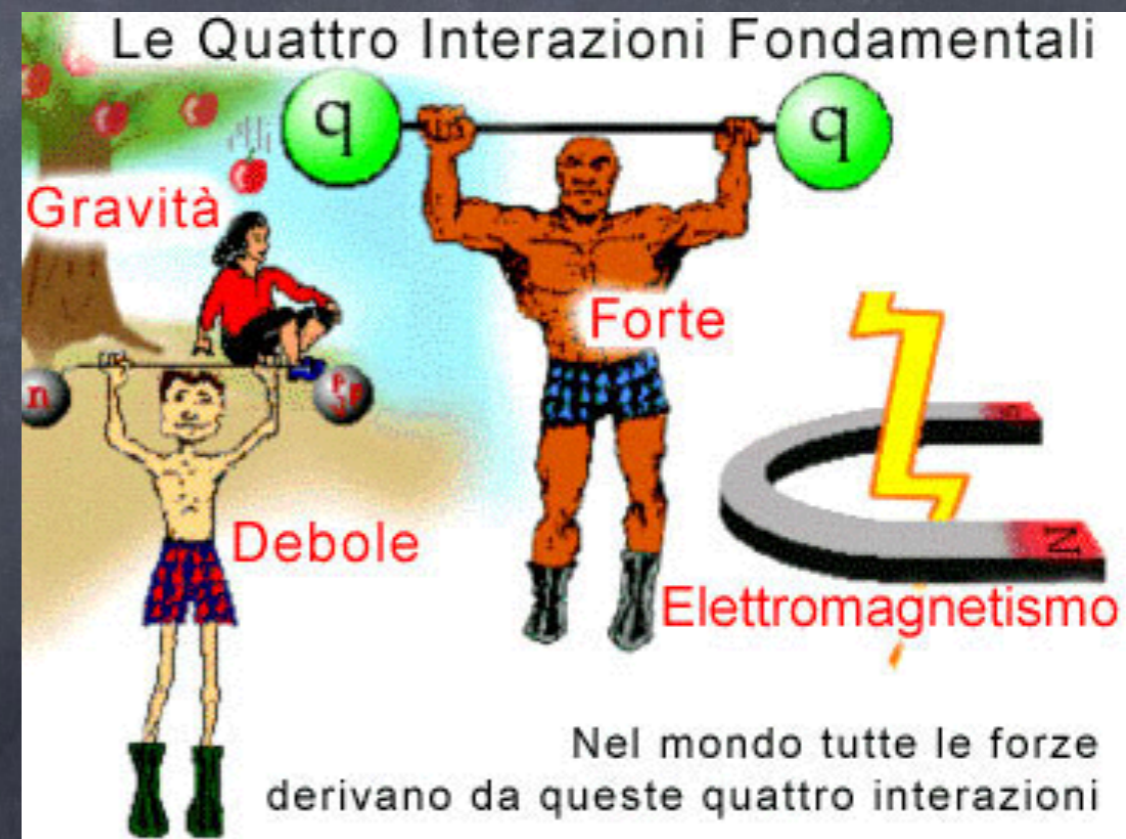
Stefano Covino

INAF / Osservatorio Astronomico di Brera



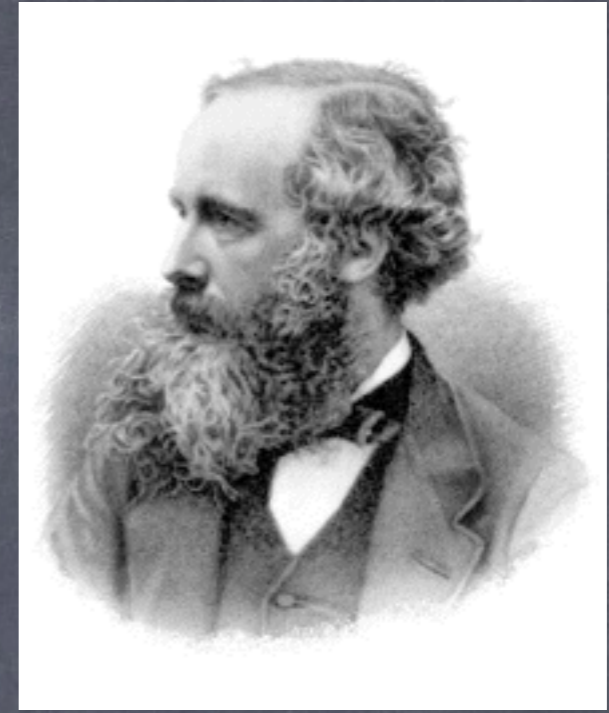
# Ma quanto è forte la forza di gravità?

- In natura conosciamo 4 interazioni fondamentali:
  - La forza di gravità
  - La forza elettromagnetica
  - La forza "debole"
  - La forza "forte"





Isaac Newton 1642 - 1727

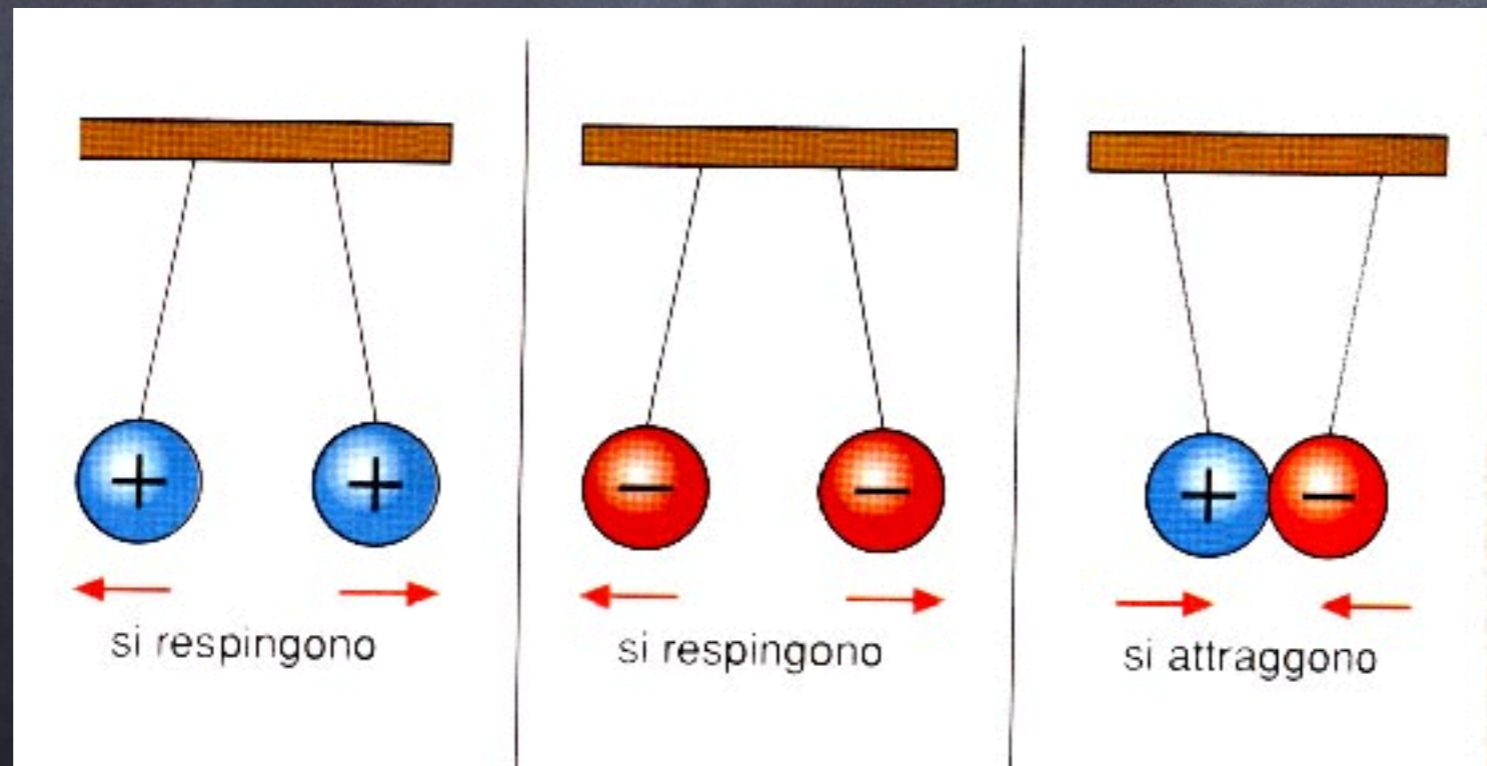


James Clerk Maxwell 1831 - 1879

- La forza di gravità risulta la più debole fra le interazioni conosciute:
- se calcoliamo la forza di gravità ed elettromagnetica fra, per esempio, due protoni, troviamo che la  $F_{el} \sim 10^{36} F_g$

# E come mai, quindi, l'Universo è dominato dalla forza di gravità?

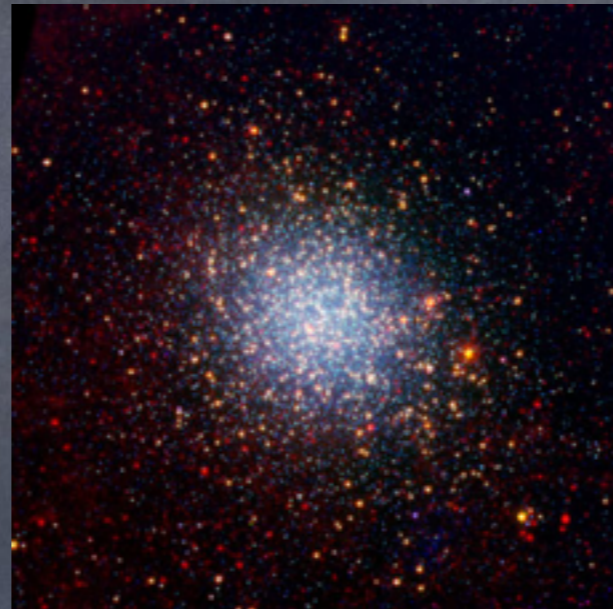
- Perché proprio per la "potenza" della forza elettromagnetica l'Universo è globalmente neutro.
- Separare le cariche è difficile.
- Mentre la gravità è cumulativa, non conosciamo masse positive e negative!



# La massa racchiusa!

- Velocità orbitale:

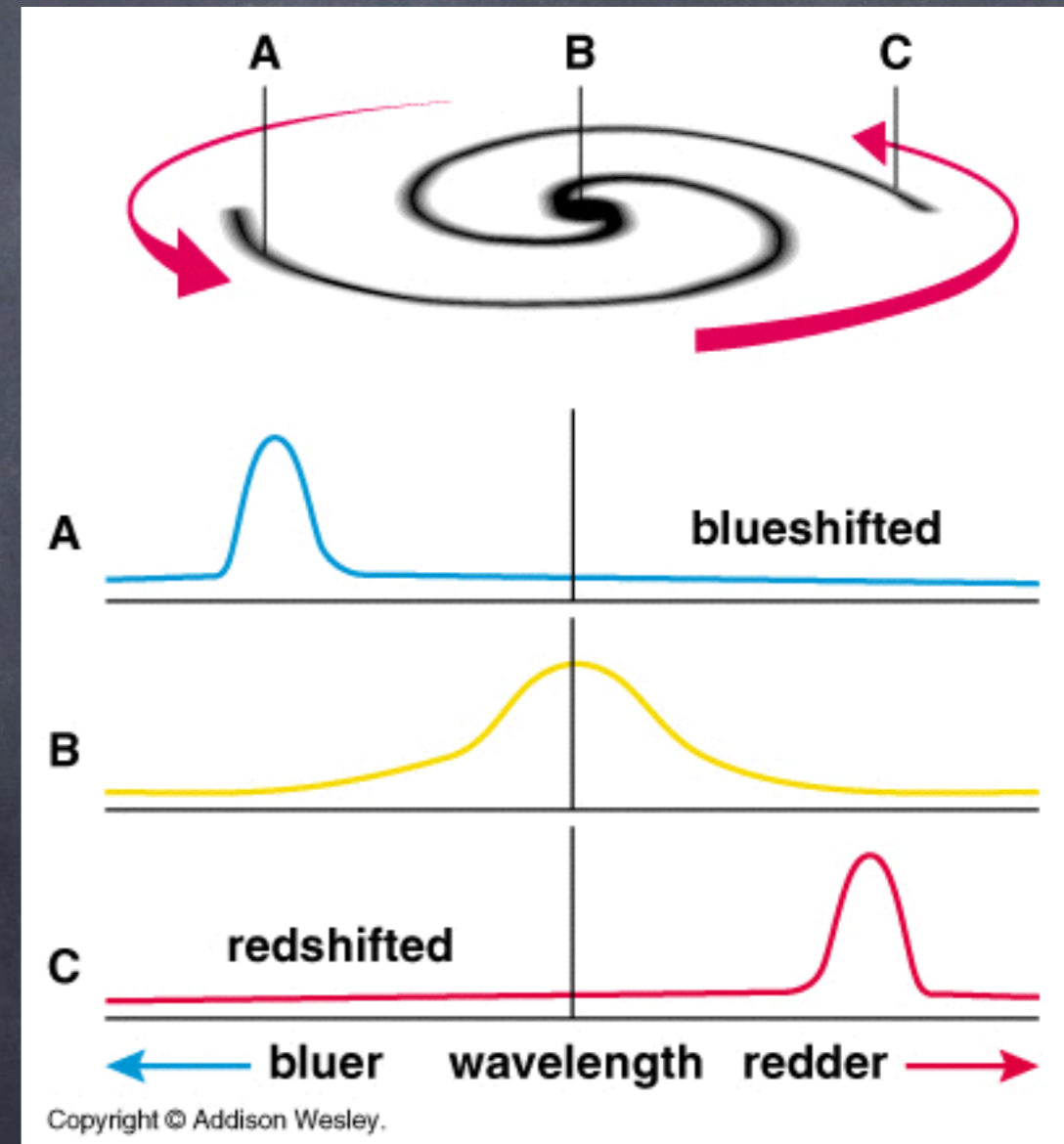
- $v = \sqrt{GM/R}$



- $M$  non è necessariamente quella di una stella. È la massa racchiusa entro l'orbita.
- Questo vale per anche per oggetti estesi come gli ammassi di stelle, le nebulose, e le galassie.
- Ne consegue, quindi, che misurando la velocità orbitale da una certa distanza dal centro dell'orbita io posso misurare la massa racchiusa.

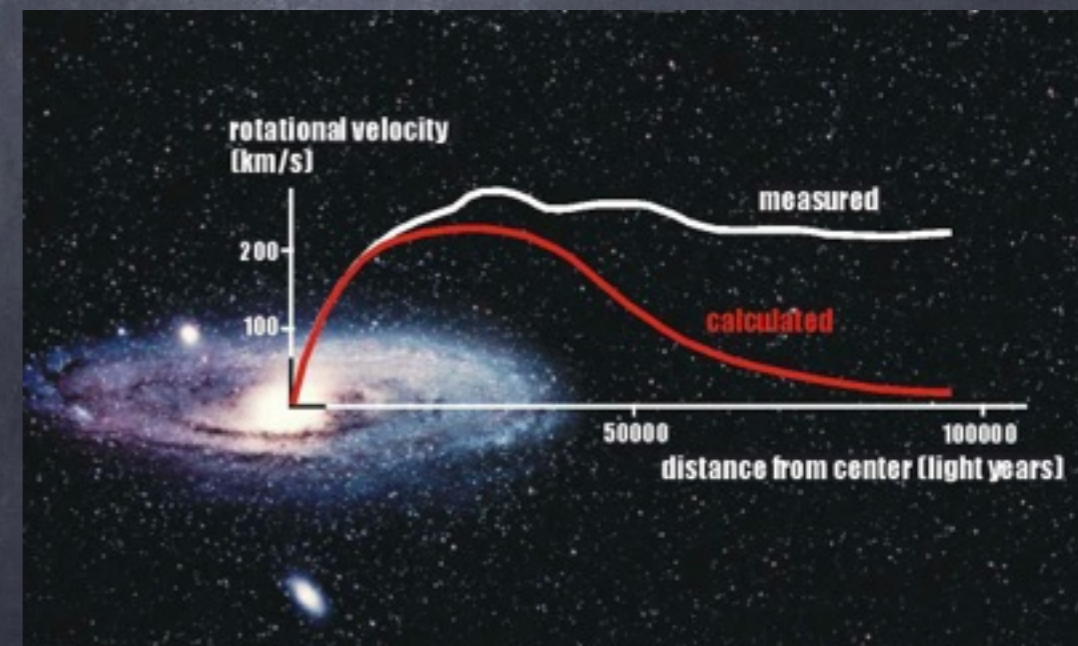
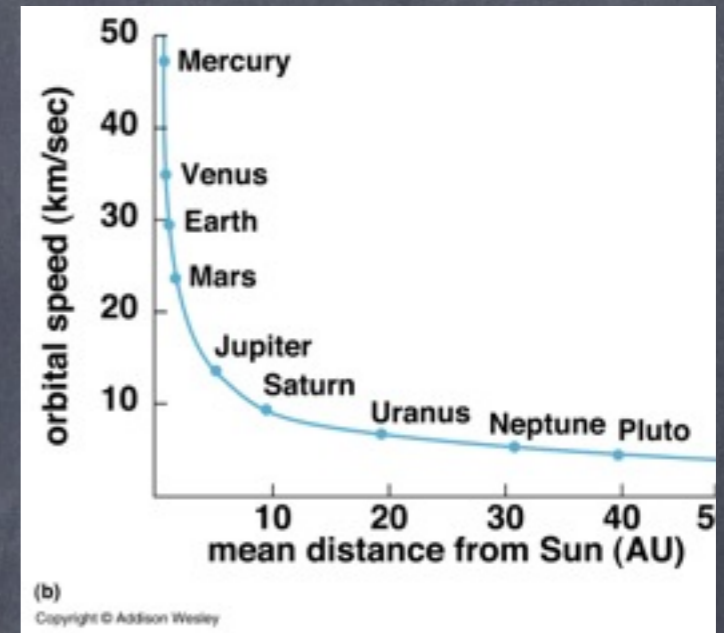
# La dinamica delle galassie

- Applicando tecniche particolari è possibile misurare la velocità orbitale delle stelle, la cosiddetta curva di rotazione, nelle galassie a varie distanze dal centro.
- Le misure ottenute, tuttavia, hanno dato risultati decisamente inaspettati.



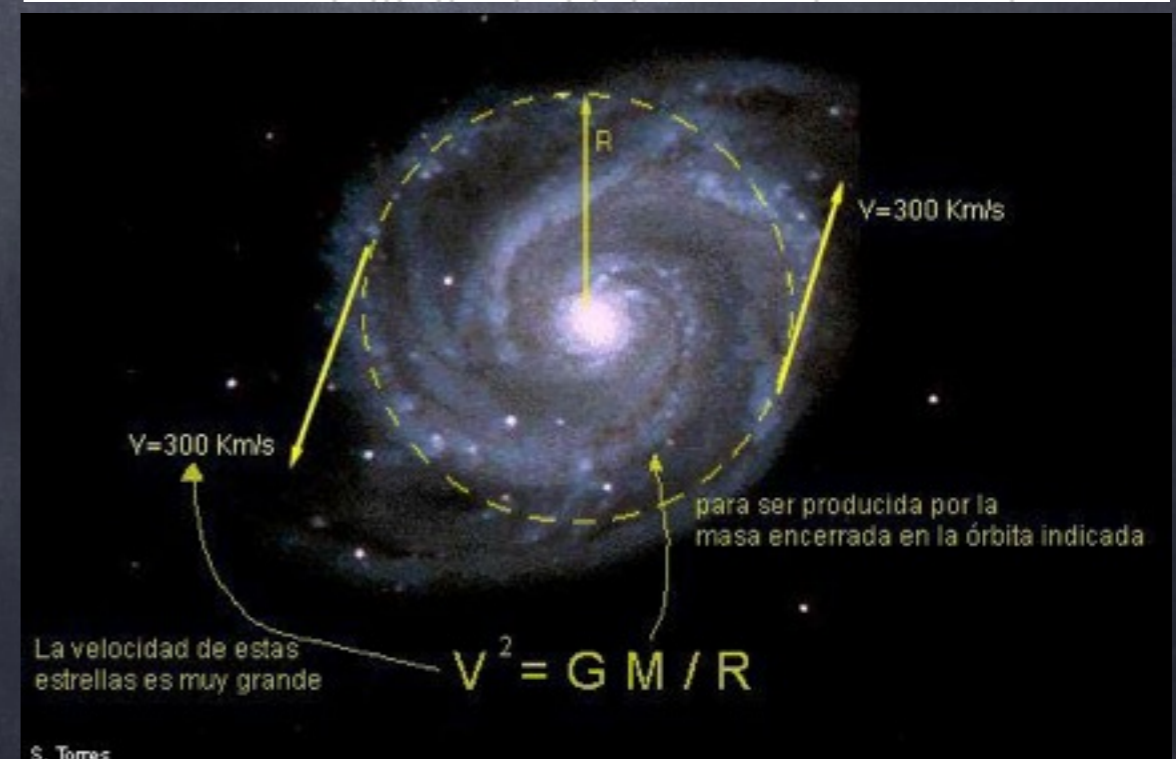
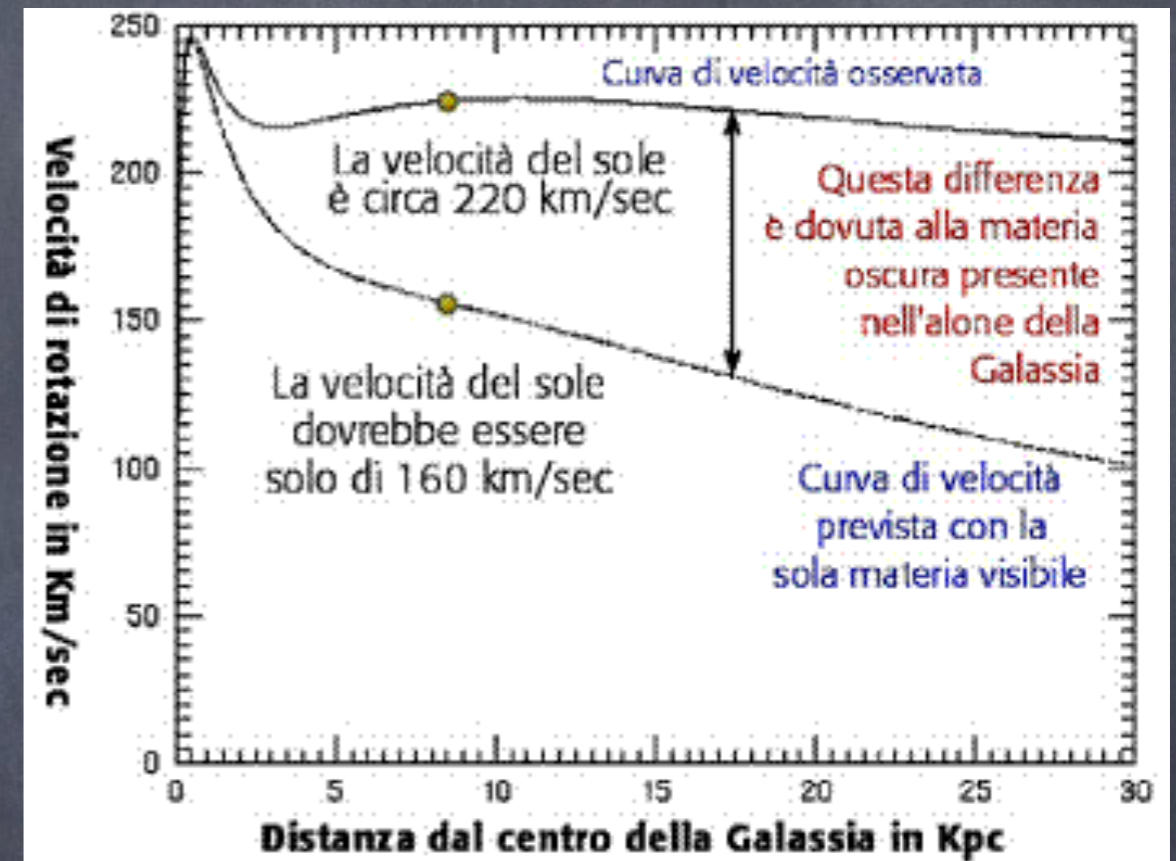
# Le curve di rotazione

- Nel caso del sistema solare la velocità decresce allontanandosi dal Sole come ci aspetta.
- Nel caso delle galassie, a differenza di quanto atteso, la velocità di rotazione rimane elevata anche a grandi distanze dal centro.



# Materia oscura!

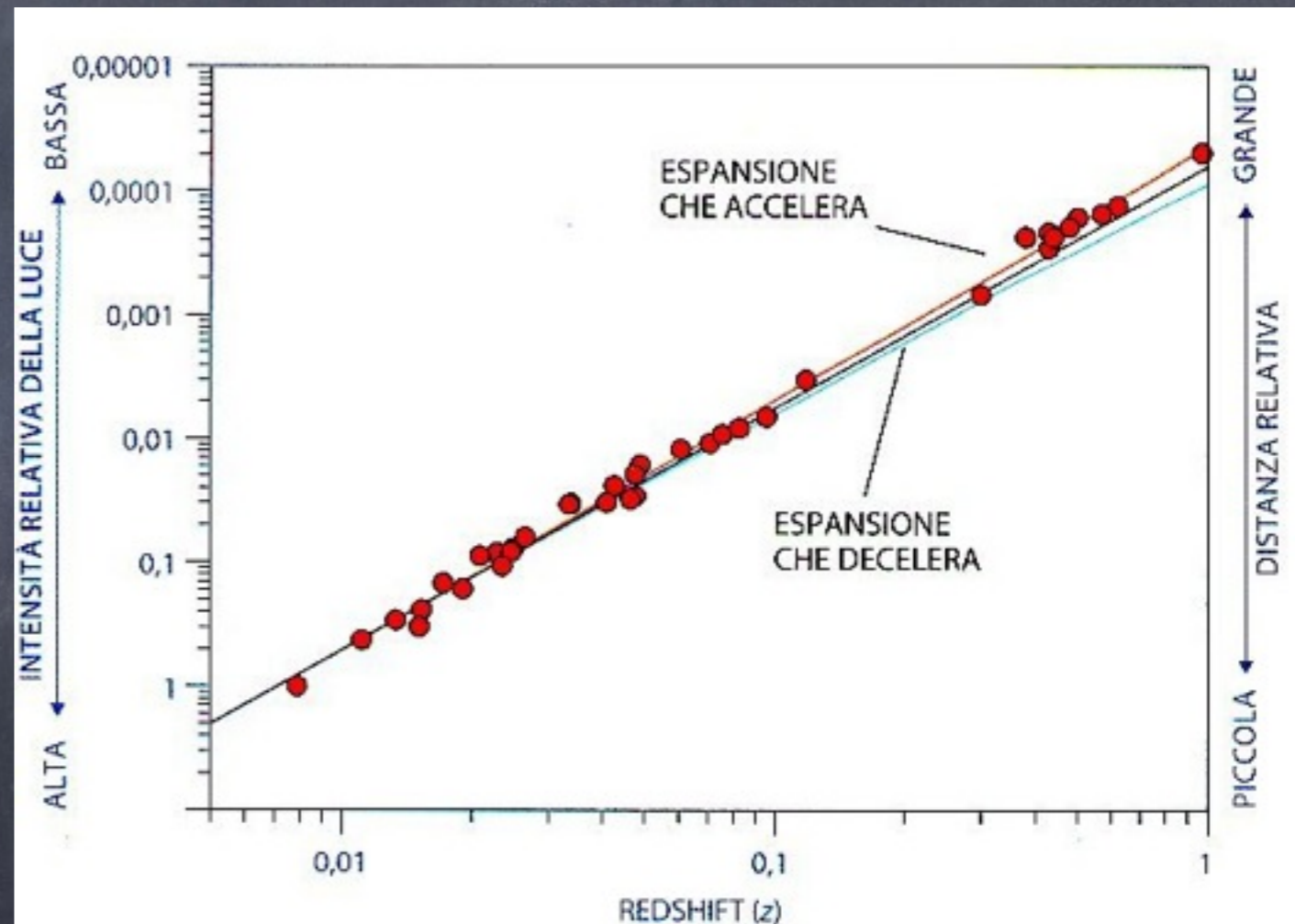
- In pratica abbiamo più attrazione gravitazionale di quanto aspettato.
- La soluzione più semplice è che ci sia più massa.
- Questa materia però non produce stelle e non è illuminata da esse.
- È materia... oscura!





# Universo in espansione

- In seguito al big-bang come è noto l'Universo è in espansione.
- A differenza però di quanto supposto anche solo pochi anni fa l'espansione non rallenta ma anzi è in accelerazione.



# Scoperta da premio Nobel...

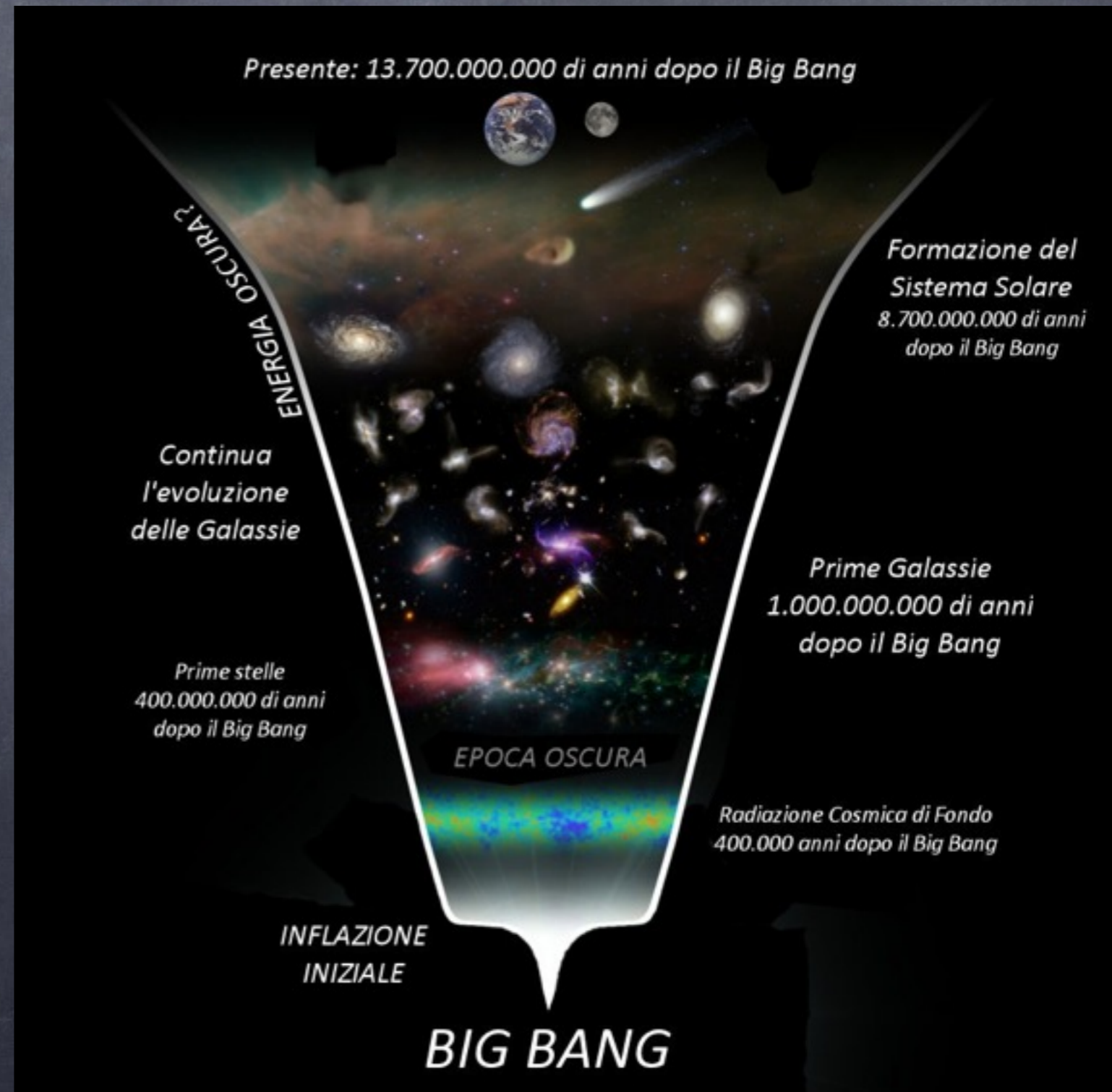
- From Left to Right- Saul Perlmutter, Brian Schmidt and Adam Riess



**Nobel Prize Winners in Physics 2011**

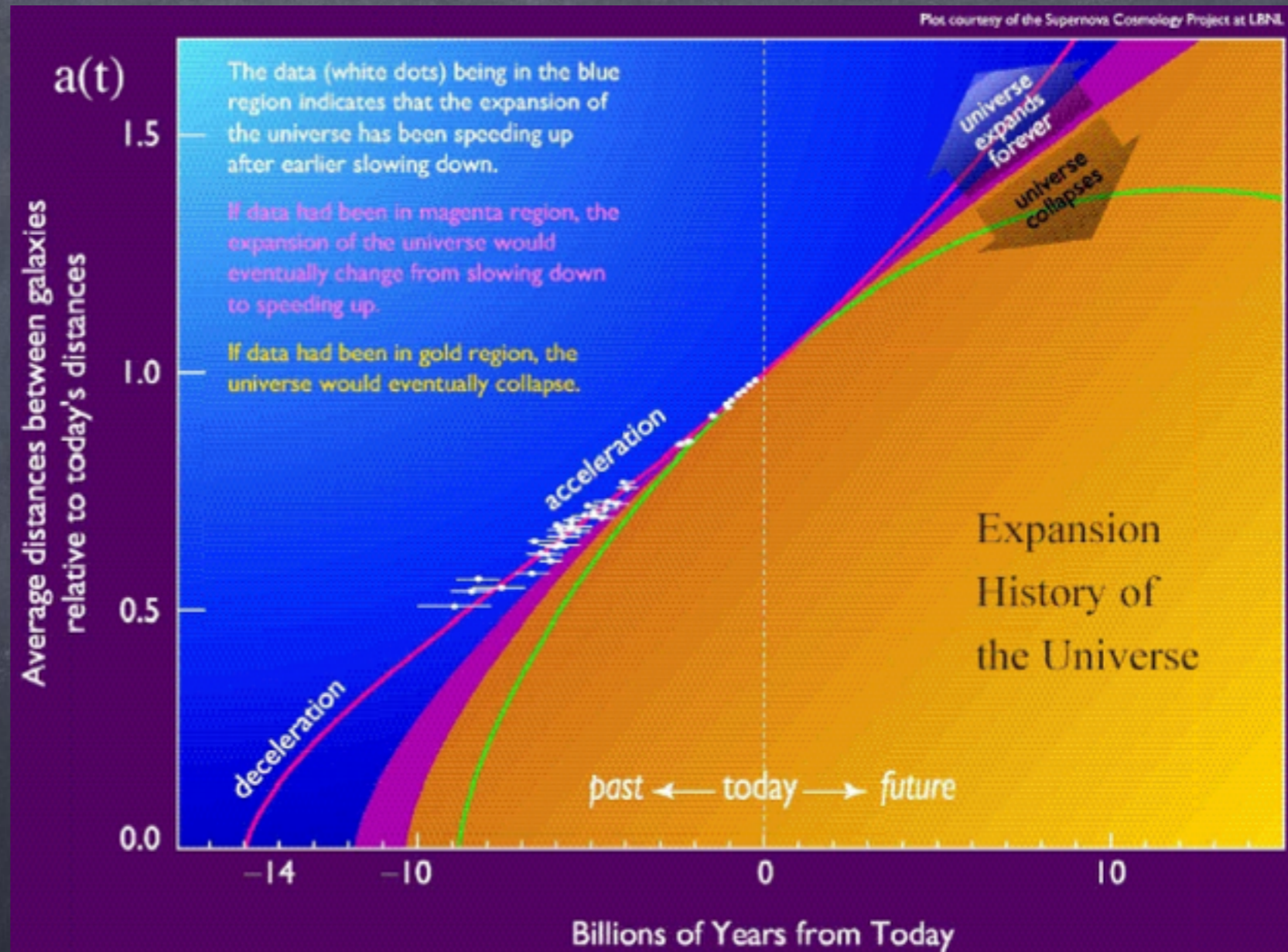
# Energia oscura!

- Una possibile spiegazione a ciò che si osserva è che ci sia una componente fino ad ora ignota dell'Universo che ne modifica la dinamica.
- Per analogia la si indica come energia... oscura!



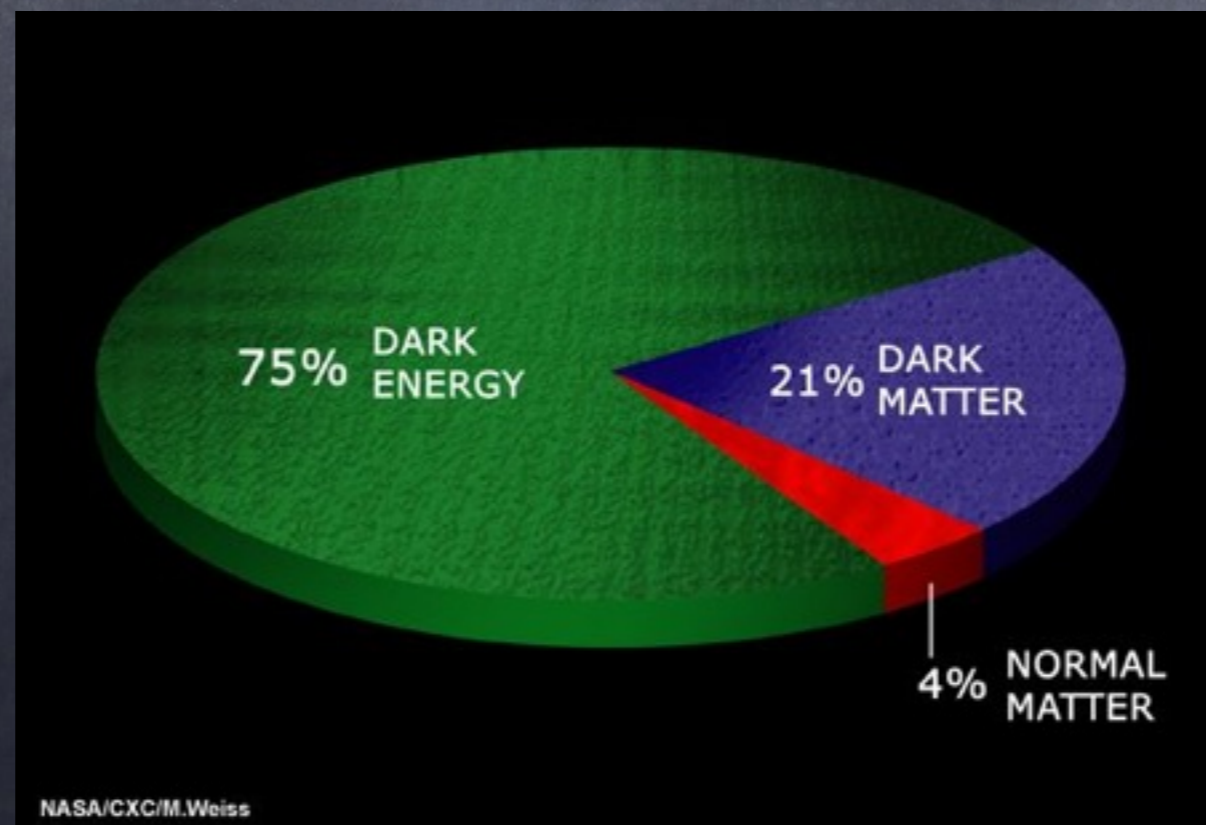
# Cosa può essere l'energia oscura?

- La costante cosmologica di Einstein.
- L'energia di punto zero del vuoto.
- Una nuova particella con massa molto piccola.
- Gravità in realtà in più dimensioni.
- La relatività generale è sbagliata su grandi scale.
- Qualcos'altro...



# La "composizione" dell'Universo

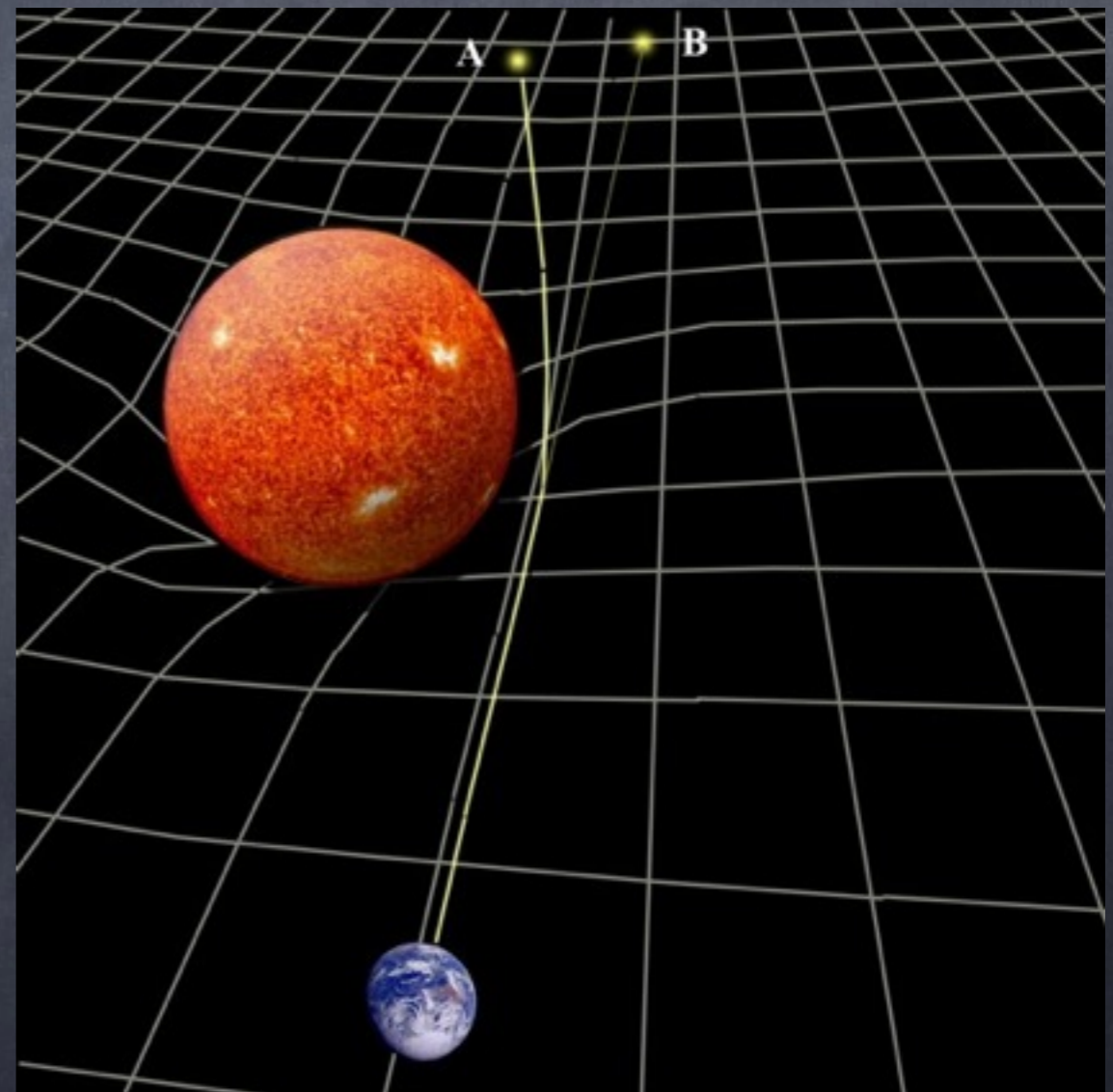
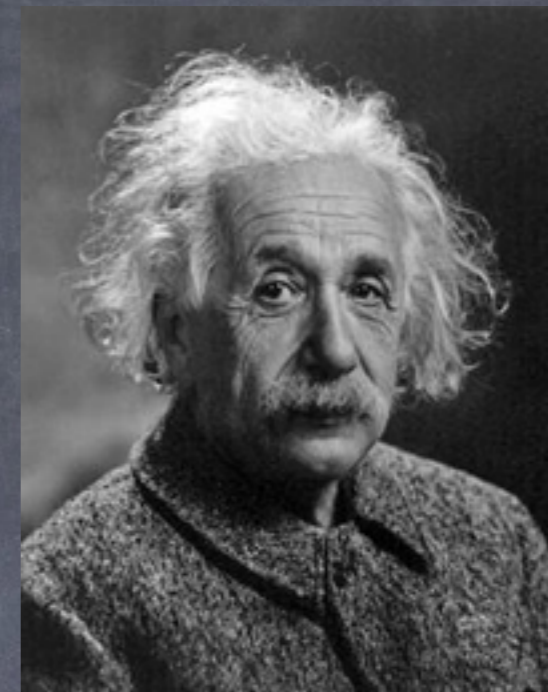
- La presenza di energia oscura risolverebbe un altro problema cosmologico: la "piattezza" dell'Universo.
- L'Universo può essere caratterizzato da una curvatura, che può essere positiva o negativa a seconda del valore della densità media di massa/energia rispetto ad un valore critico.
- Quello che si trova è che il valore misurato è esattamente quello critico. Ma la massa/energia (barionica) che si osserva è molto meno di quella necessaria...



# La forza di gravità

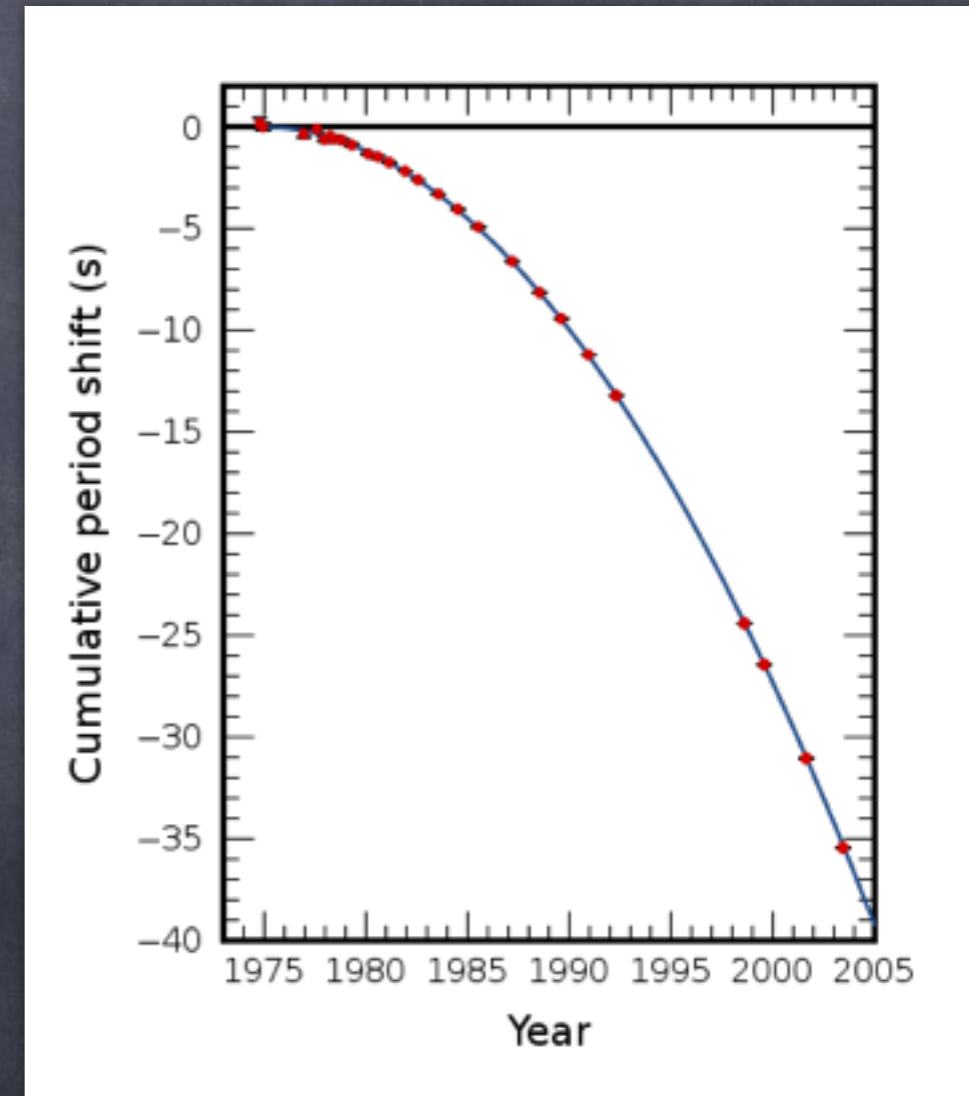
- Tutti questi ragionamenti si basano sulla nostra formulazione della teoria della gravità.
- Come sappiamo l'idea originale di Newton è stata ampliata da Einstein che ha introdotto il concetto di curvatura dello spazio per "spiegare" la gravità.

Albert Einstein  
1879 - 1955



# Ma possiamo "fidarci" della relatività generale?

- La risposta è sì! Per ora...
- La teoria della relatività generale è una delle teorie sottoposte a maggiori verifiche sperimentali, ed in tutti i casi, fino ad ora, ne è uscita confermata.
- Ad esempio: la precessione del perielio di Mercurio, la deflessione della luce da parte del Sole, lo spostamento verso il rosso gravitazionale, lenti gravitazionali, il principio di equivalenza, l'effetto Lense-Thirring, decadimento orbitale per emissione di onde gravitazionali, ecc.

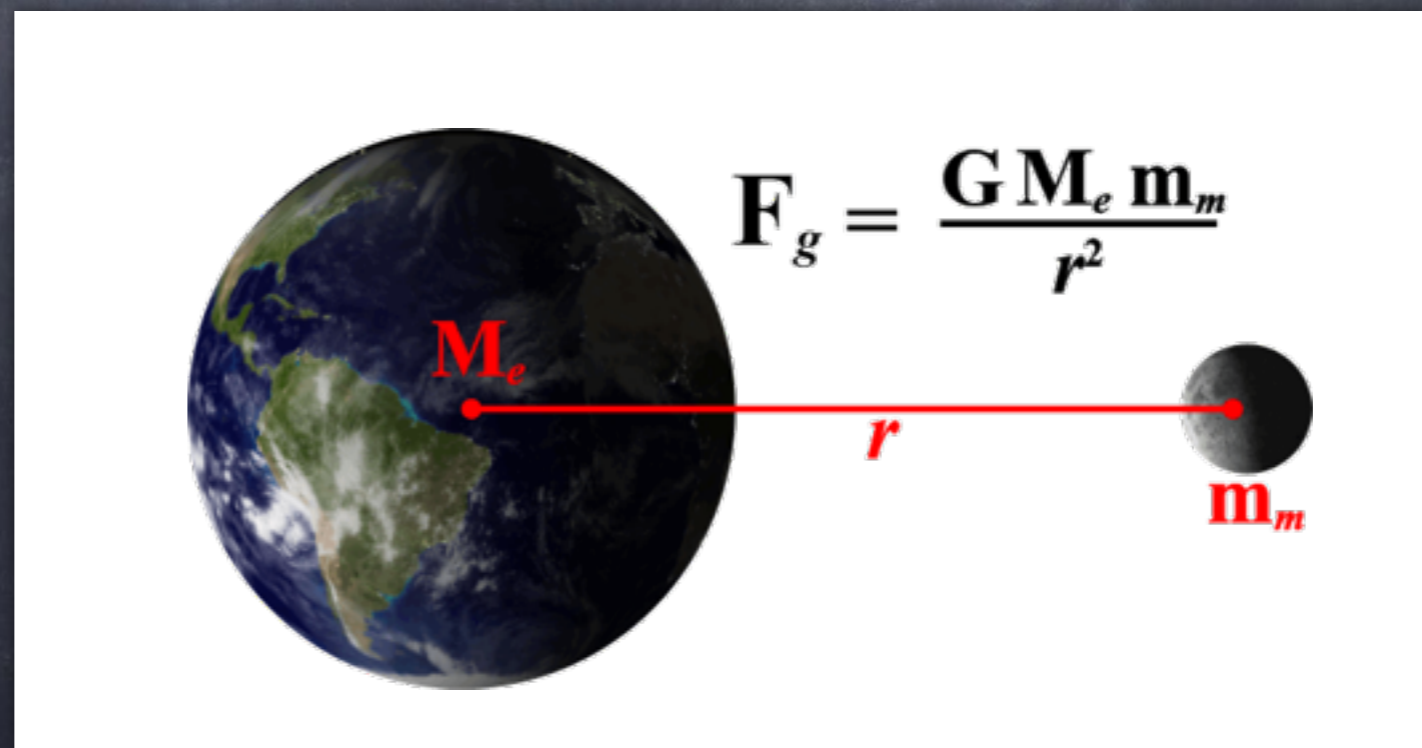


Decadimento orbitale del sistema  
PSR\_B1913+16

# Forze all'infinito...

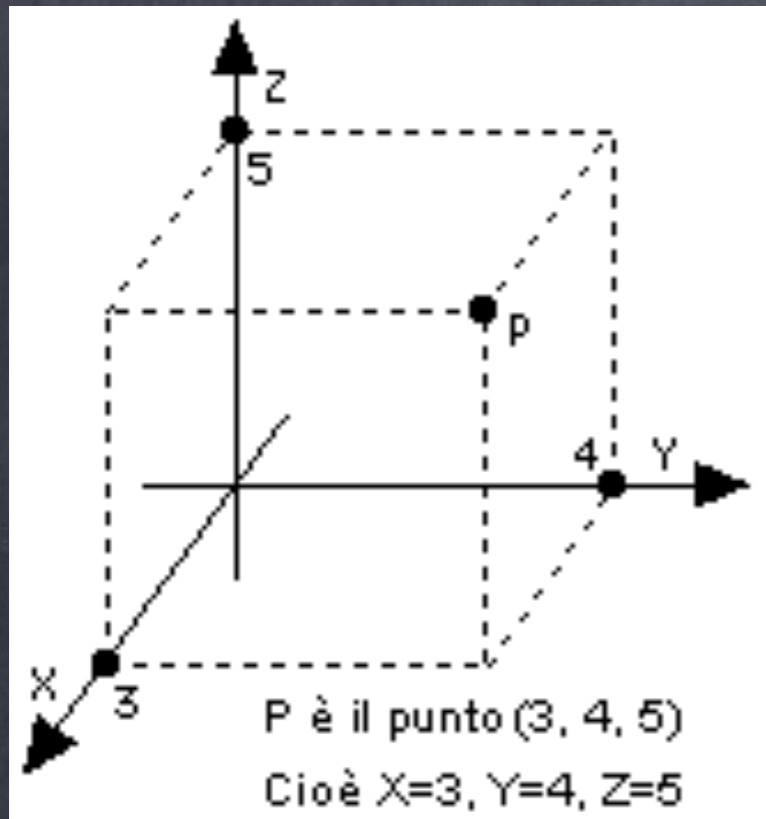
- Sia la forza di gravità che elettromagnetiche decadono con l'inverso del quadrato della distanza.

- Perché?





Dipende dalle "dimensioni" dello spazio...



• Nello spazio 3-dimensionale l'area di una sfera è proporzionale al quadrato del raggio ( $r^2$ ).

• Il Teorema di Birkhoff mostra che lo stesso discorso vale nello spazio-tempo della relatività generale.



George David Birkhoff 1884 - 1944

# Un MOND da scoprire...



Mordehai Milgrom 1946 - vivente

- MOND sta per Modified Newtonian Dynamics, ed è un'idea basata su una modifica delle legge di Newton.

- Se  $a > a_0$ , dove  $a_0 \sim 10^{-10} \text{ ms}^{-2}$  siamo in regime Newtoniano,  $F \propto 1/r^2$ .

- Altrimenti l'accelerazione non è più proporzionale alla forza di gravità,  $F \propto 1/r$ , e l'effetto è che la velocità orbitale non dipende più dalla distanza dalla massa che genera il campo,  $v \sim \text{costante}$ .

- Si tratta di una modifica puramente fenomenologica. Non ha una chiara base teorica.

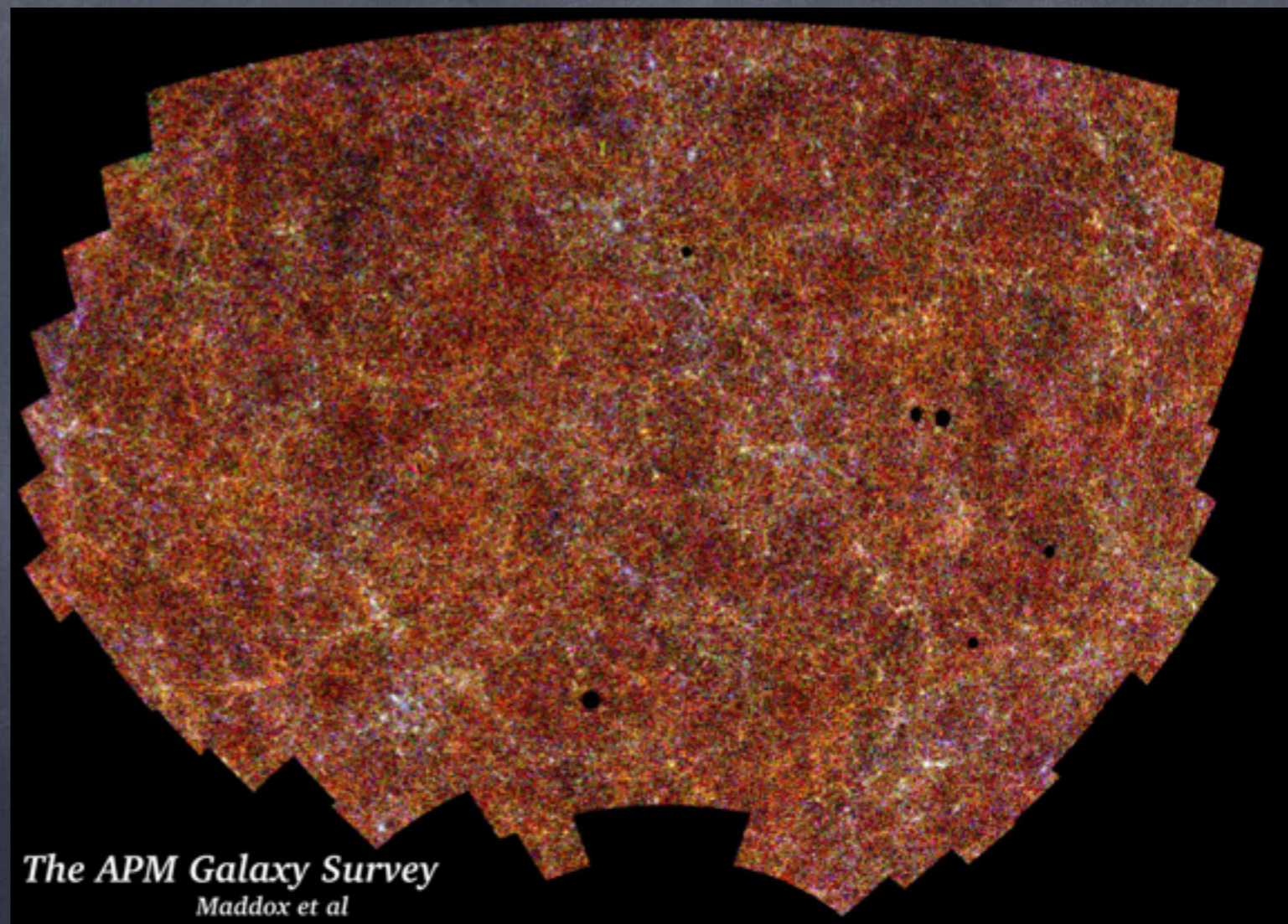
# Quanto è $a_0$ ?



- L'accelerazione di gravità alla superficie terrestre è circa  $9,8 \text{ ms}^{-2}$ .
- L'accelerazione dovuta al Sole alla distanza della Terra è circa  $0,01 \text{ ms}^{-2}$ .
- L'accelerazione alla distanza del Sole dal centro della Galassia è circa  $10^{-10} \text{ ms}^{-2}$ !
- Le modifiche MOND diventano importanti solo per accelerazioni molto basse, tipiche delle stelle lontane dal centro delle galassie.

# Addensamenti di galassie

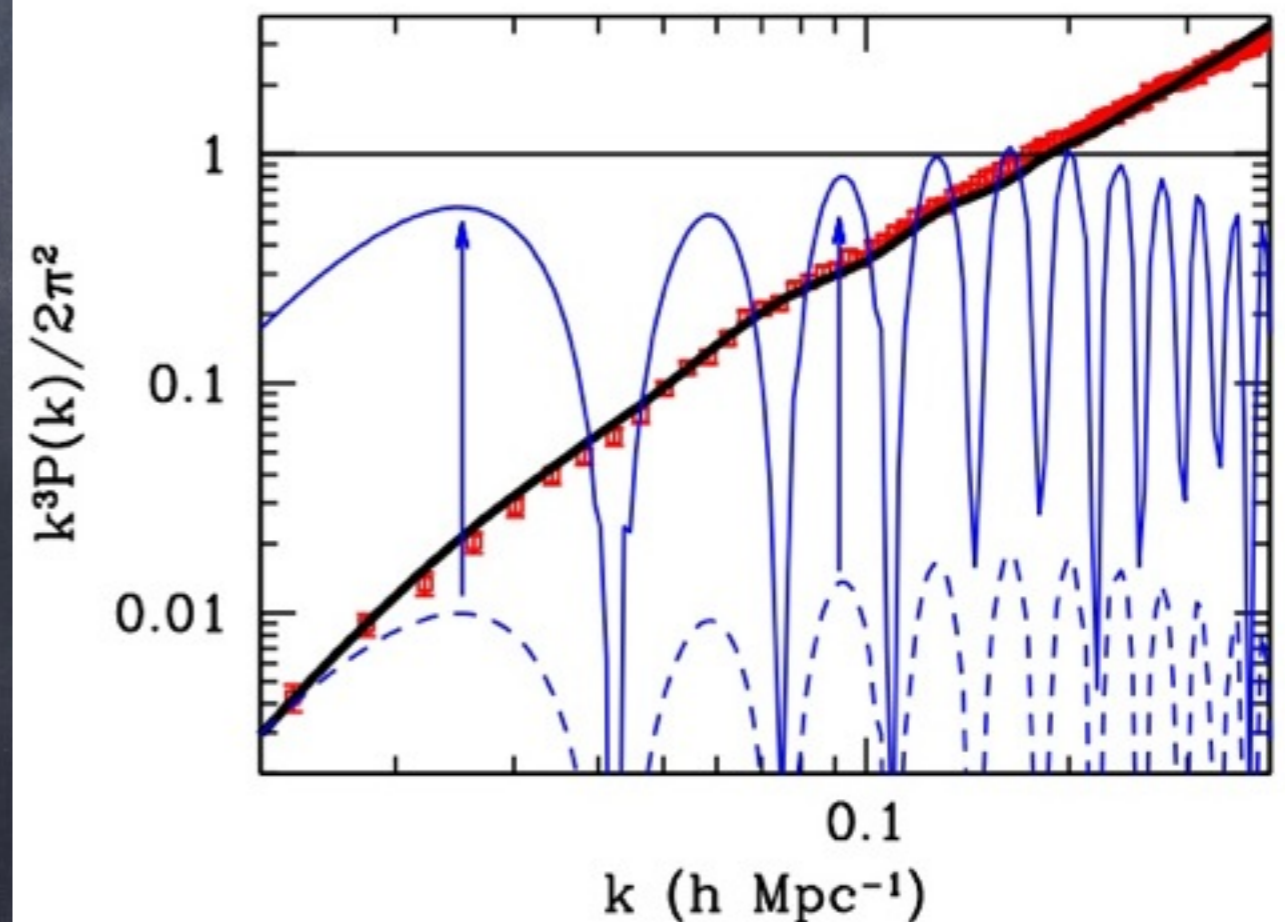
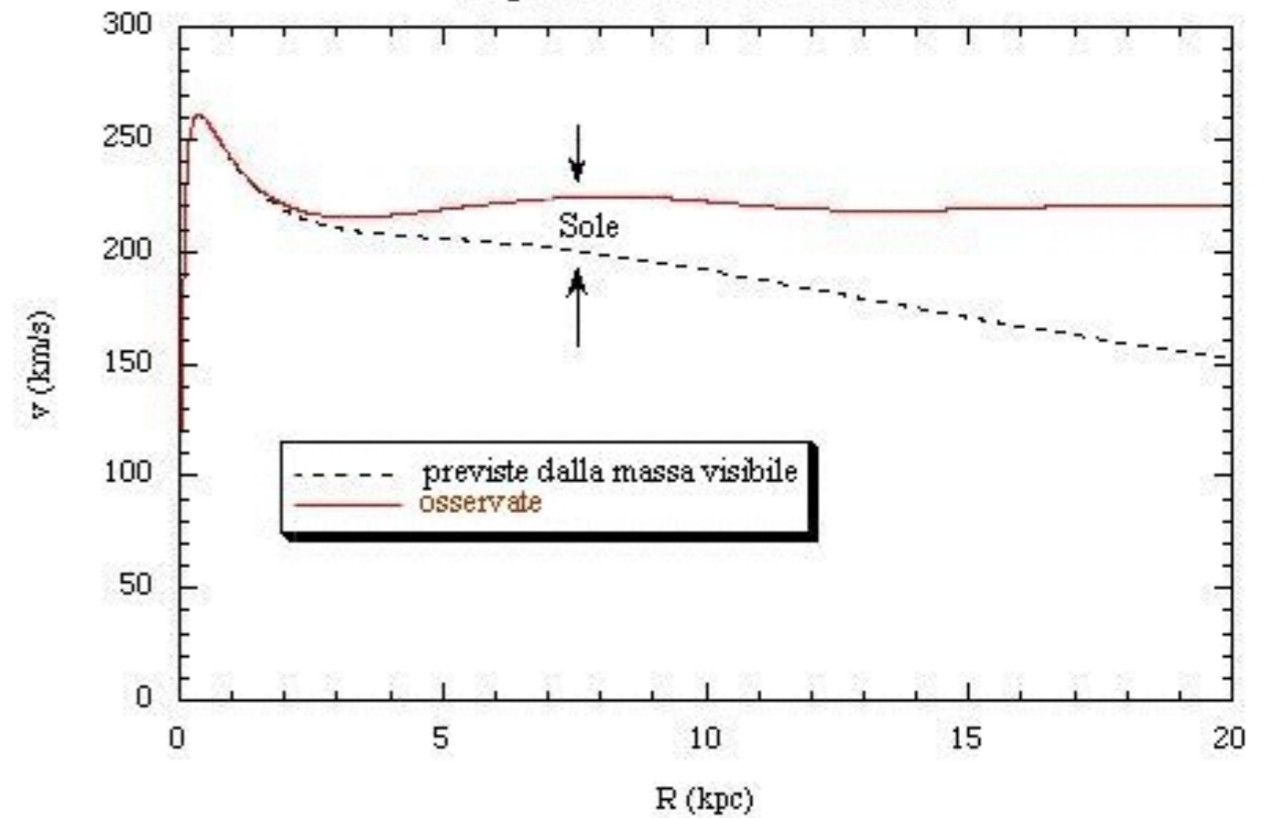
- Milioni di galassie formano la struttura su grande scala dell'universo.
- La distribuzione di "masse" e di "vuoti" si può misurare e confrontare con e predizioni teoriche.



# Conseguenze?

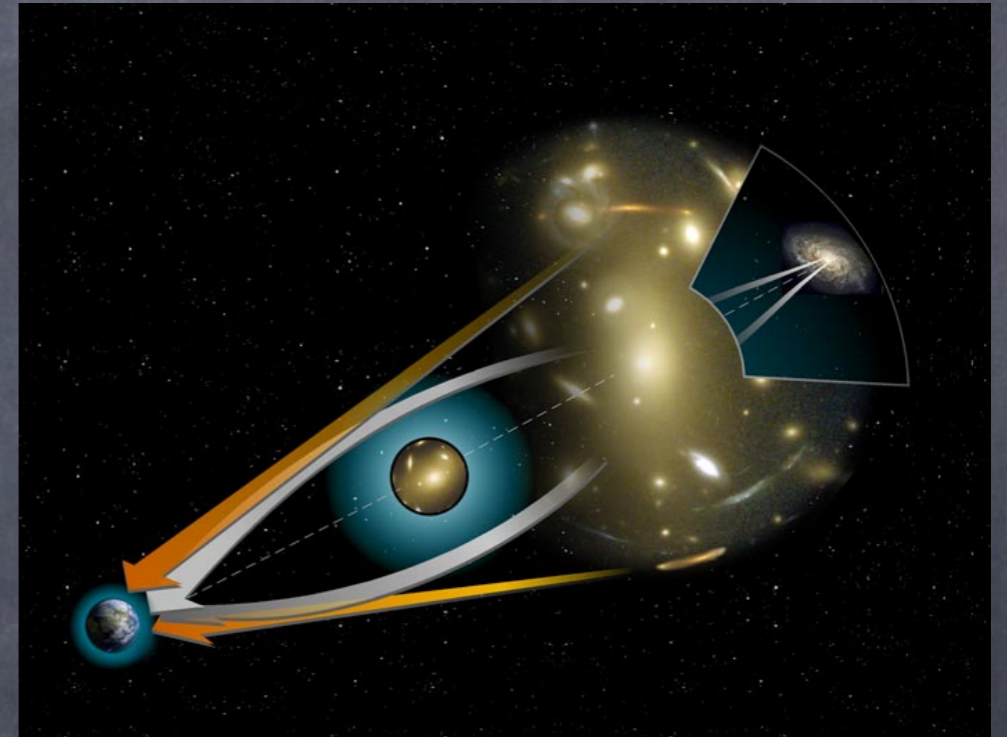
- Le curve di rotazione delle galassie oltre una certa distanza dal centro diventano piatte...
- In generale MOND si comporta bene a livello di galassie di ogni taglia e categoria.
- Mostra difficoltà a livello di ammassi di galassie.
- E mostra difficoltà a livello cosmologico.

Tipiche curve di rotazione



# Le lenti gravitazionali

- Ogni massa può agire come lente gravitazionale.
- La luce proveniente da oggetti più lontani viene amplificata.
- Studiando il fenomeno è possibile misurare la massa dell'oggetto "lente".

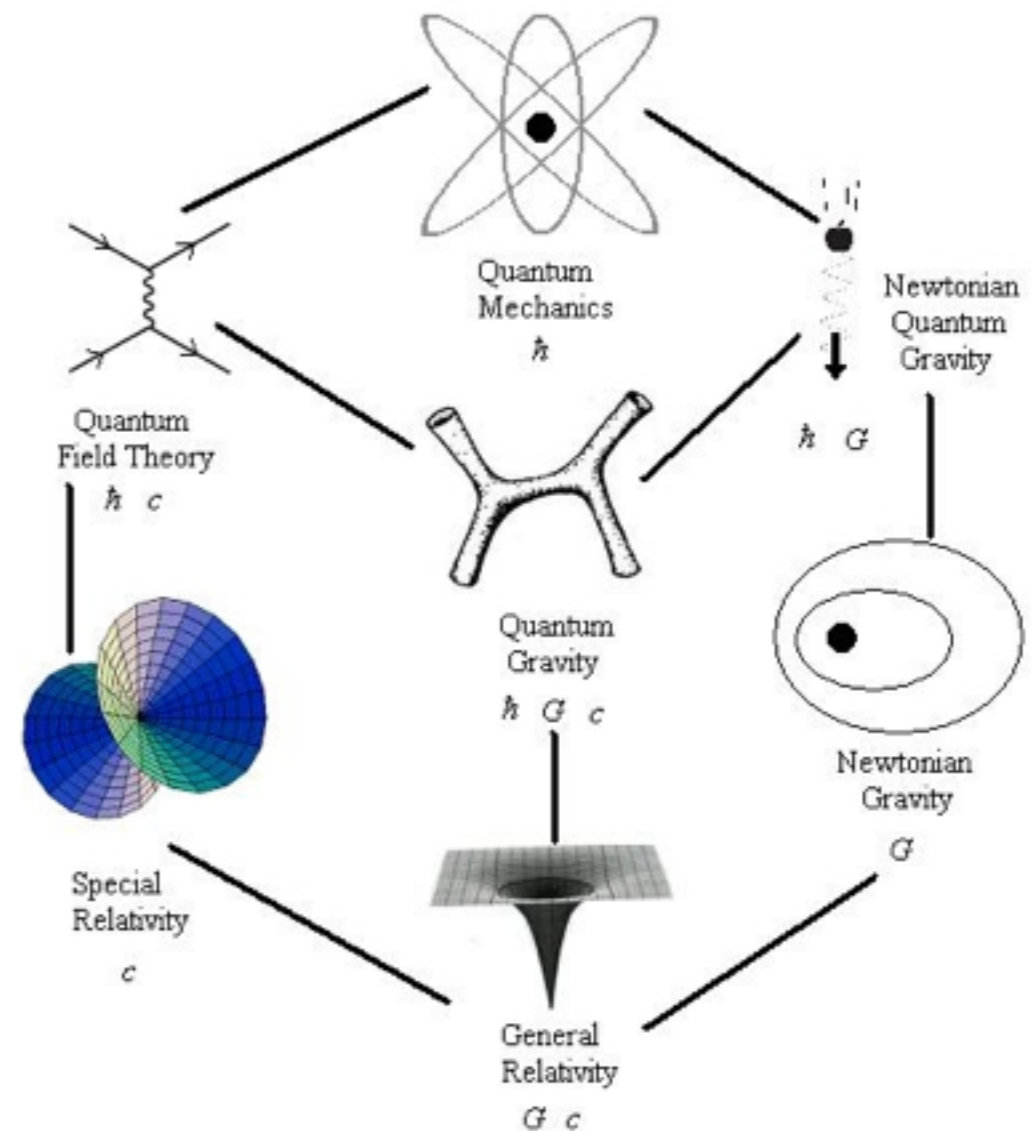




- Queste sono immagini di due ammassi di galassie in collisione, il cosiddetto "bullet cluster".
- L'immagine ottica mostra le galassie, quella X il gas caldo, la materia oscura invece è rivelata tramite lenti gravitazionali.

# Quantum gravity?

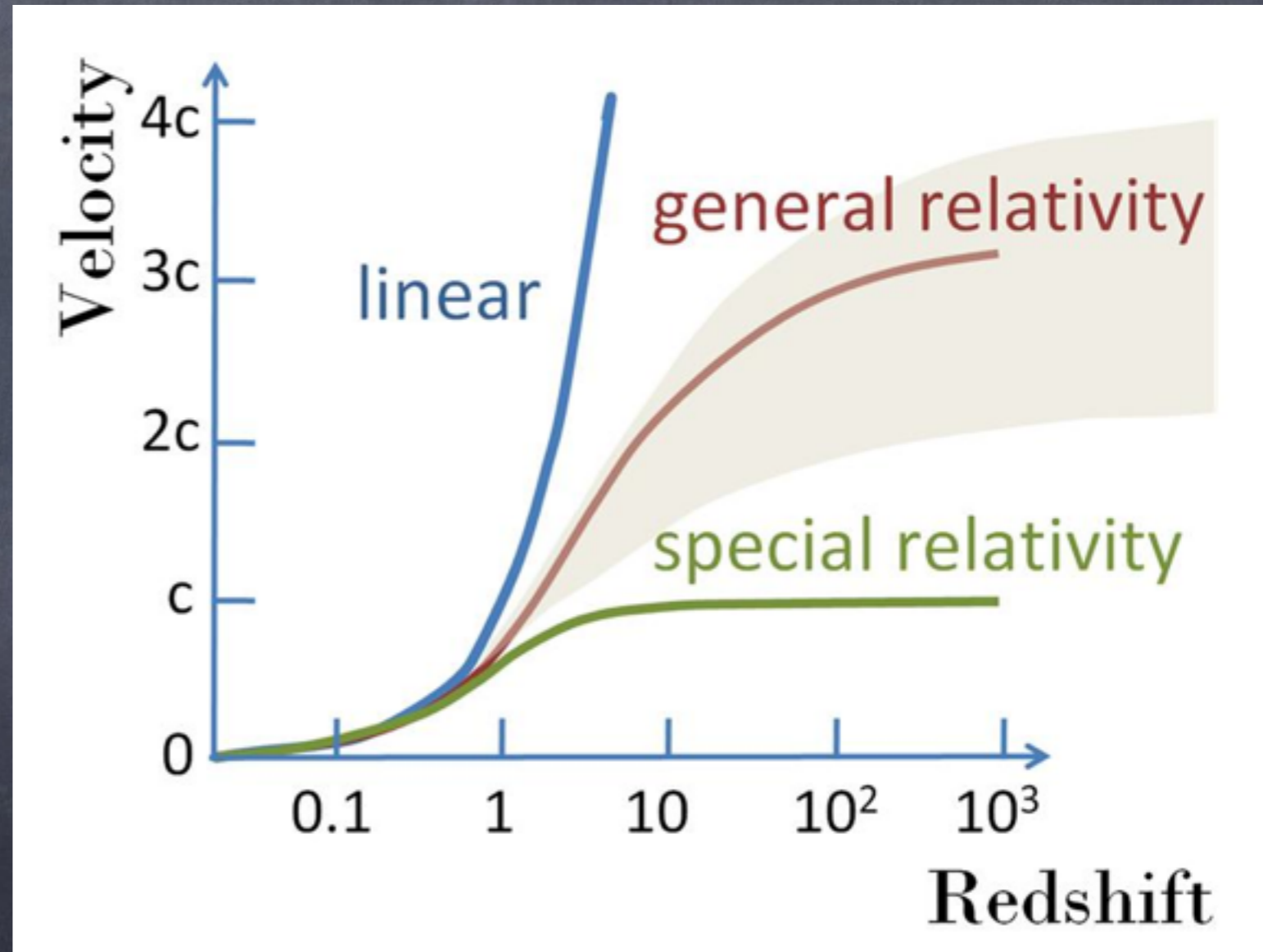
- La gravità quantistica è uno scenario teorico che tenta di unificare la teoria quantistica dei campi, il modello standard, e la relatività generale.
- Tutte le teorie quantistiche della gravità richiedono l'esistenza dei "gravitoni".





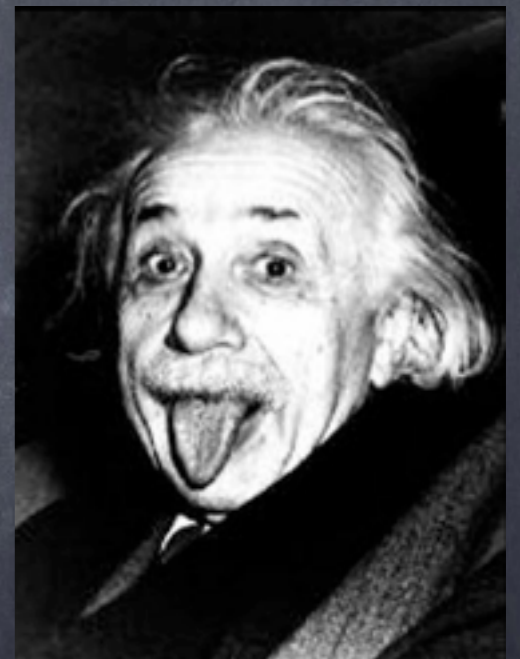
# La relatività generale è un osso duro...

- Il grafico mostra schematicamente la storia del nostro universo.
- Qualunque alternativa alla relatività generale deve comunque non discostarsene troppo...
- E deve rimanere consistente con la relatività generale nell'ambito degli esperimenti entro scale più piccole.

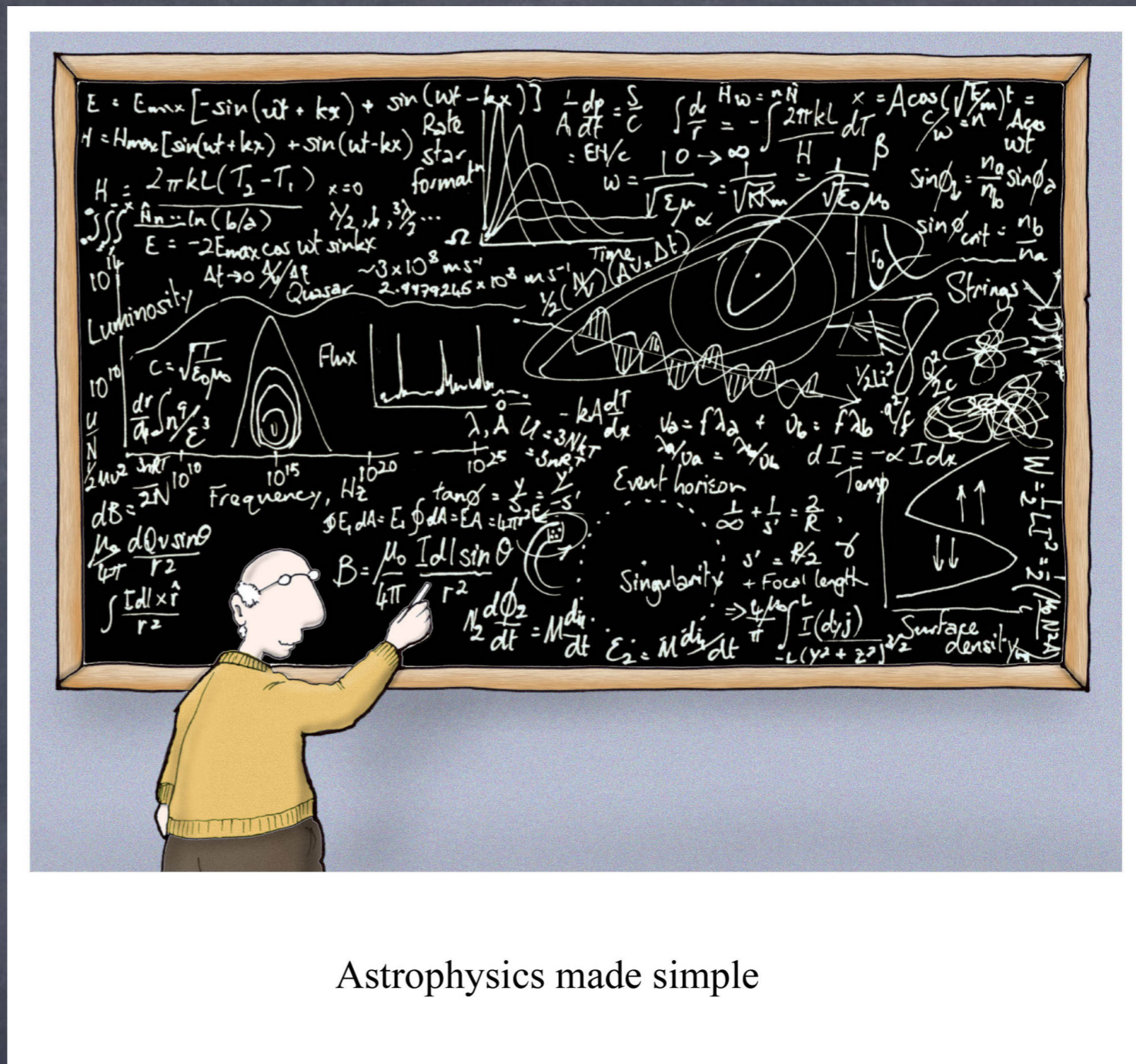


# Le verifiche continuano...

- Su scala cosmologica, nucleosintesi primordiale, lenti gravitazionali, evoluzione delle strutture cosmiche...
- Su scala da terrestre a galattica, satelliti nel sistema solare, osservazioni lunari, onde gravitazionali...
- Su scala di laboratorio, misure accurate di forze, accelerazione di particelle...



# La Mite Scienza



Astrophysics made simple

• Blog di divulgazione e cultura scientifica:

• <http://mitescienza.blogspot.it>

• E-mail: [stefano.covino@brera.inaf.it](mailto:stefano.covino@brera.inaf.it)