

# Il lato oscuro del cosmo:

domande fondamentali e fisica fondamentale

Massimo Cerdonio

- cosa non *vediamo*, ma ne abbiamo evidenza indiretta  
buchi neri \* materia oscura\*\* energia oscura\*\*\*
- cosa ci aiuta nella rivelazione indiretta  
la loro azione gravitazionale
- come tentiamo di sondare direttamente  
buchi neri > onde gravitazionali  
materia oscura > (rivelatori di particelle), gravita'  
energia oscura > (cosmografia), onde gravitazionali

qual'e' l'interesse fondamentale:

la gravita' in condizioni estreme, quando sovrasta le altre interazioni  
come si e' strutturato l'Universo come lo vediamo  
come si evolve l'Universo

\*c'e' la teoria...

\*\*ci sono ipotesi fondate...

\*\*\*si brancola....

se l'Universo fosse

# infinito e anche statico

# fatto di stelle eterne e immutabili

# la luce viaggiasse a velocita' infinita

*come potrebbe il cielo la notte essere oscuro ?*

$n \sim 10^{20}$  stelle/ $(10^{28})^3$  cm<sup>3</sup> di luminosita' L

la luce dalle stelle a distanza r da noi tra

r e r+dr e'  $4\pi r^2 n dr L/4\pi r^2 = n L dr$

l'integrale da noi all'infinito diverge

quindi basta guardare il cielo notturno per rendersi conto che siamo in un Universo in evoluzione, in cui le stelle nascono e muoiono, dove la luce ha velocita' finita

# il cielo la notte e' buio

il "paradosso di Olbers" (sovranisolto...)

l'Universo non e' come una foresta molto estesa,  
dove vedo solo alberi in tutte le direzioni

e' in evoluzione

le stelle *nascono e muoiono*

la luce viaggia a velocita'  $c = 300.000 \text{ km/s}$

(grandissima per noi.....poca cosa per il cosmo)

ma *finita*  $\rightarrow$  molte stelle nascono troppo tardi  
e a distanza grande (crescente nel tempo)  
perche' la luce faccia in tempo ad arrivare a noi,  
molte altre muoiono troppo presto e la loro luce  
prima di quando noi guardiamo

# nascita e morte delle stelle

(e la forza di gravita' gioca un ruolo fondamentale)

- condensazione da gas sotto la propria attrazione di gravita' (nebulosa di Orione)
- innesco di fusione termonucleare controllata
- brillano per miliardi di anni (il Sole 5 mld anni)
- formano sistemi planetari
- sono strutturano in galassie e poi ammassi di galassie e poi superammassi
- le piu' massiccie, dopo fusione di elementi sempre piu' pesanti, diventano instabili ed esplodono, brillando per poche ore piu' che in tutta la loro vita (Supernova 1987a in LMC)

# una fucina di stelle: la nebulosa di Orione



# la supernova 1987a nella Grande Nube di Magellano

prima



dopo



...e dopo al centro dello scoppio  
non si vede piu' niente...

cosa c'e' rimasto ??? niente?

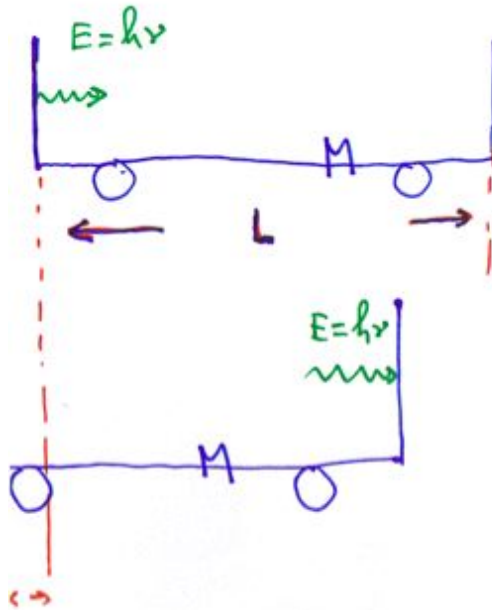
da segnali radio, X, vis  
da orbite di compagne, polveri, gas  
e' evidente che e' rimasto un  
"corpo compatto"

("stella di neutroni") "buco nero"

# equivalenza massa-energia

preliminare 2

carrello+fotone



sappiamo che il fotone ha  
energia  $E = h\nu$   
quantità di moto  $p = \frac{h\nu}{c} \equiv \frac{E}{c}$   
assumiamo  $M \gg E$  (ne risulta  $\Delta x \ll L$ )

conservazione della quantità di moto  
parte il fotone  $\rightarrow$  il carrello acquista  $V$

$$MV + \frac{E}{c} = 0 \quad \Rightarrow \quad V = -\frac{E}{Mc}$$

arriva il fotone  $\rightarrow$  il carrello si ferma a  $\Delta x$   
al tempo  $\Delta t$

$$\Delta t \approx \frac{L}{c} \quad \Delta x \approx V \Delta t = -\frac{EL}{Mc^2}$$

il suo baricentro?

il carrello si è spostato di  $\Delta x$   
e per la conservazione delle quantità di moto chiediamo che

il baricentro non si è spostato

dobbiamo assumere che una massa  $m$  si è spostata di  $L$

$$M \Delta x + mL = 0 \quad \Rightarrow \quad m = -\Delta x \frac{M}{L} = + \frac{EL}{Mc^2 L} \Rightarrow mc^2 = E$$



# ...allora anche la luce "cade" nei campi di gravita'...

un raggio di luce:

- rimontando la gravita' di una massa perde energia > "red shift"
- passando in prossimita' di una massa, viene deviato dall'azione gravitazionale esercitata dalla massa stessa

metodo per rivelare materia oscura

lenti "gravitazionali"

- luce di stelle lontane "focheggiata" da oggetti "neri" nella Galassia, possibili costituenti "noti" della materia oscura buchi neri, nane brune, pianeti, ... al massimo 20% > il resto e' sconosciuto
- luce di quasar e galassie lontani "focheggiata" da addensamenti di materia oscura nel cosmo rivelano il "tessuto" di materia oscura cosmica (23% del totale di massa-energia) che sarebbe la base di condensazione della materia luminosa (piccola parte del totale 4% di materia ordinaria)

la densita' media di materia oscura Galattica e' 100.000 volte quella cosmica, indicando che la Galassia si e' formata per attrazione gravitazionale di un tale addensamento locale di materia oscura

per farci un'idea di cosa sia un "buco nero"  
basta la fisica Newtoniana e l'idea che la luce "cade":  
*buchi neri* di Laplace

per "sfuggire" l'attrazione gravitazionale di una massa  $M$  di raggio  $R$  e arrivare all'infinito fermi, bisogna partire con una "velocita' di fuga"  $V_{fuga} = (2GM/R)^{1/2}$

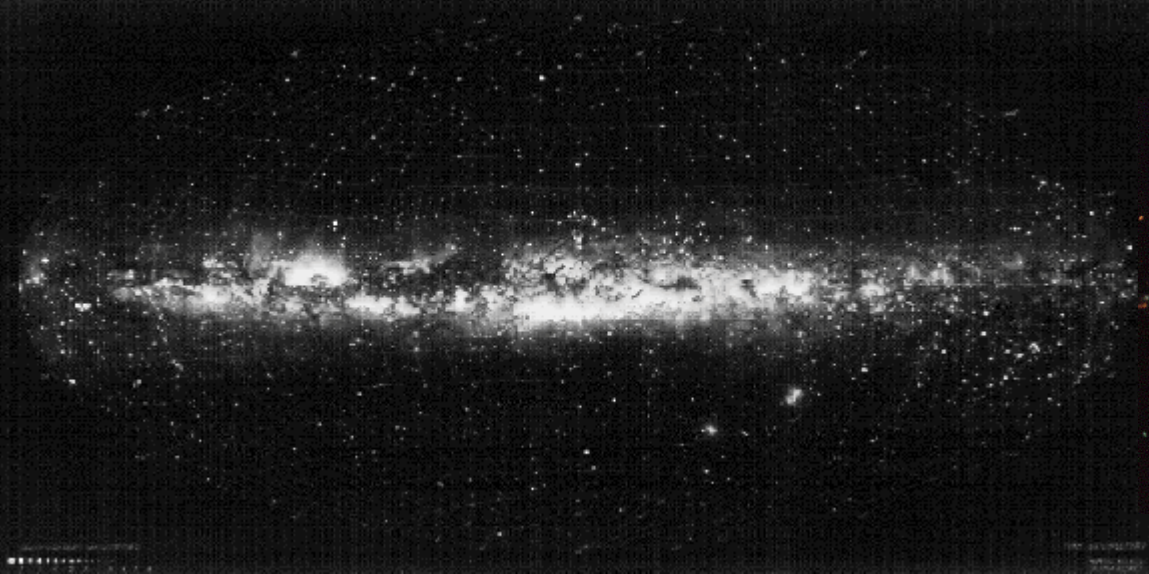
fuga da	Luna	Terra	Sole	Stella di neutroni
$V_{fuga}$ km/s	2.5	11.5	650	150000

la velocita' della luce e'  $c = 300.000$  km/s

se il raggio  $R$  dell'oggetto e' cosi' piccolo che  $V_{fuga} > c$

la luce non ce la fa a vincere l'attrazione gravitazionale e non puo' uscire > l'oggetto e' un *buco nero*

il raggio  $R$  di un tipico buco nero "stellare" di 10 masse Solari e' 30 km



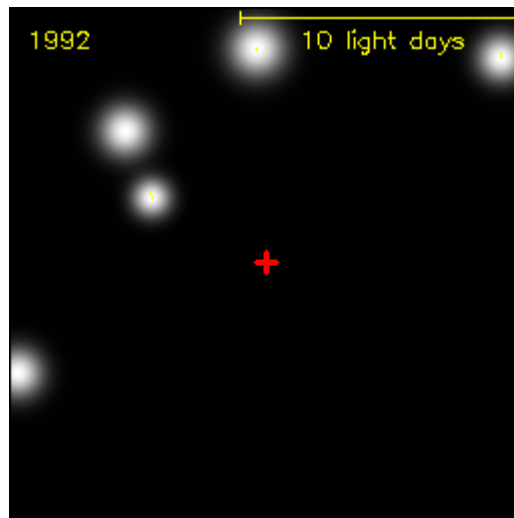
# La Via Lattea: la nostra Galassia



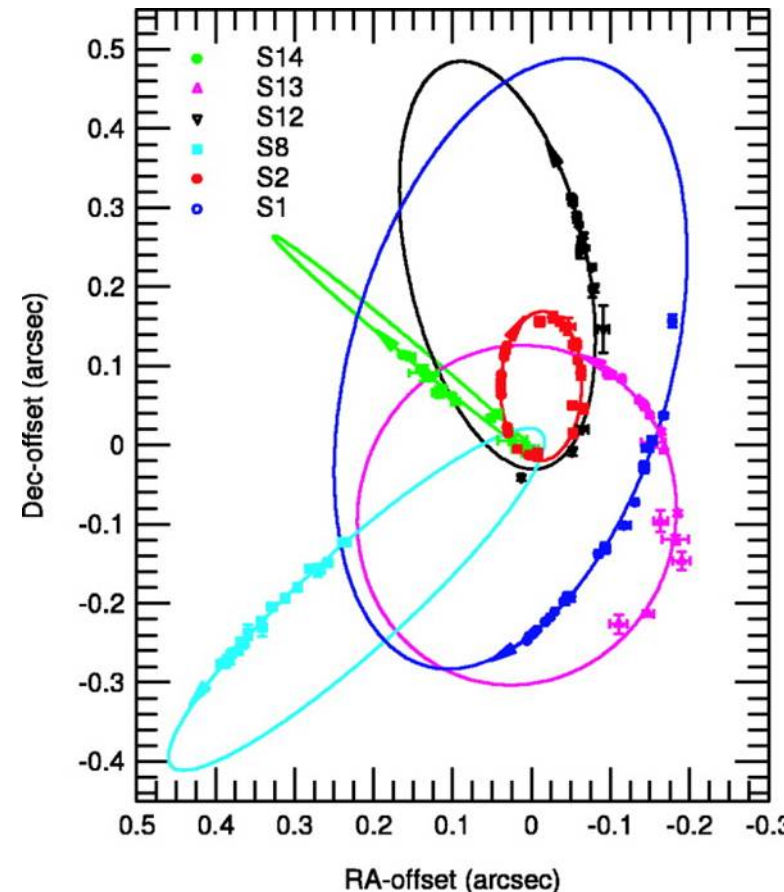
una galassia del tipo della nostra



...ha al centro un "buco nero" di circa  
3 milioni di masse solari...



l'azione gravitazionale ci ha permesso di  
*vedere un oggetto oscuro*



## materia oscura: curva di rotazione delle galassie

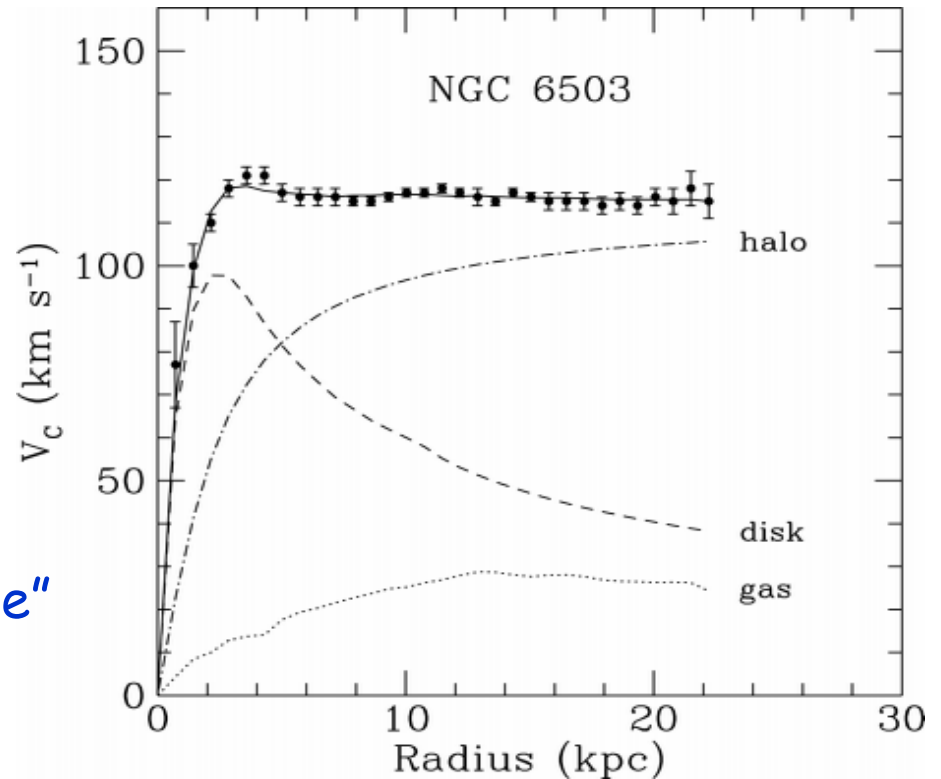
Le stelle stanno su orbite circolari intorno al centro galattico date dalla meccanica Newtoniana:

$$mv^2(r)/r = Gm M(<r) / r^2$$

$$[ma = F]$$

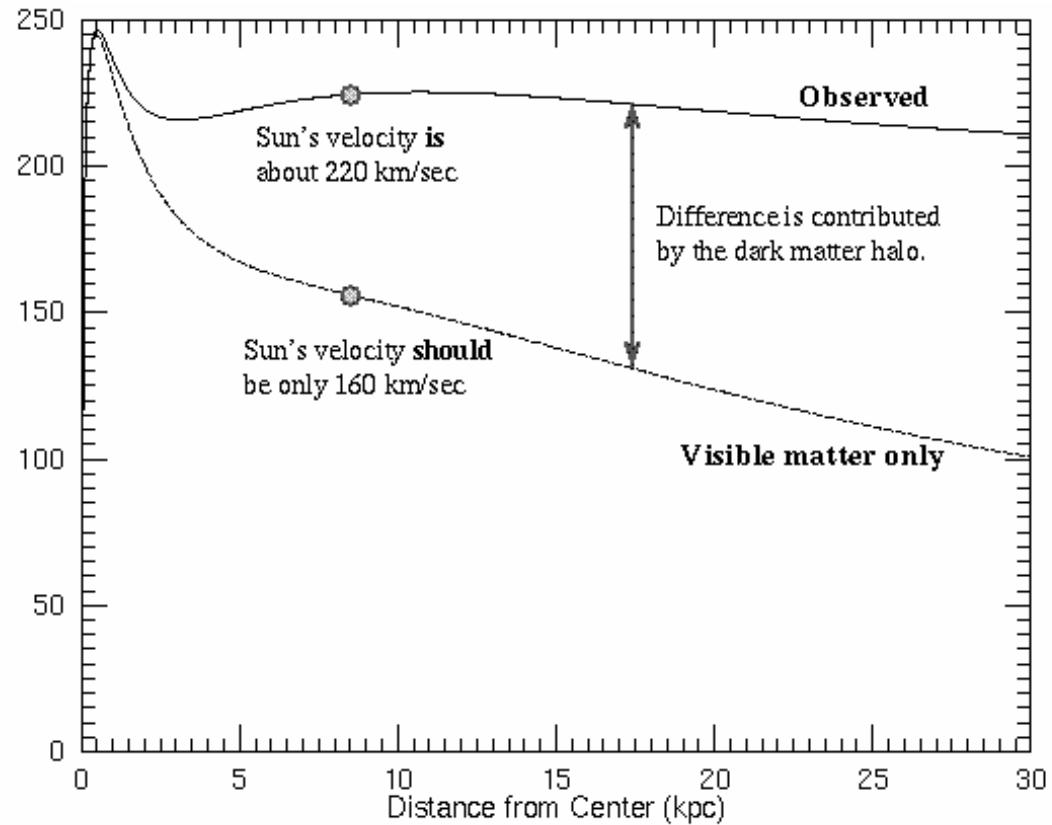
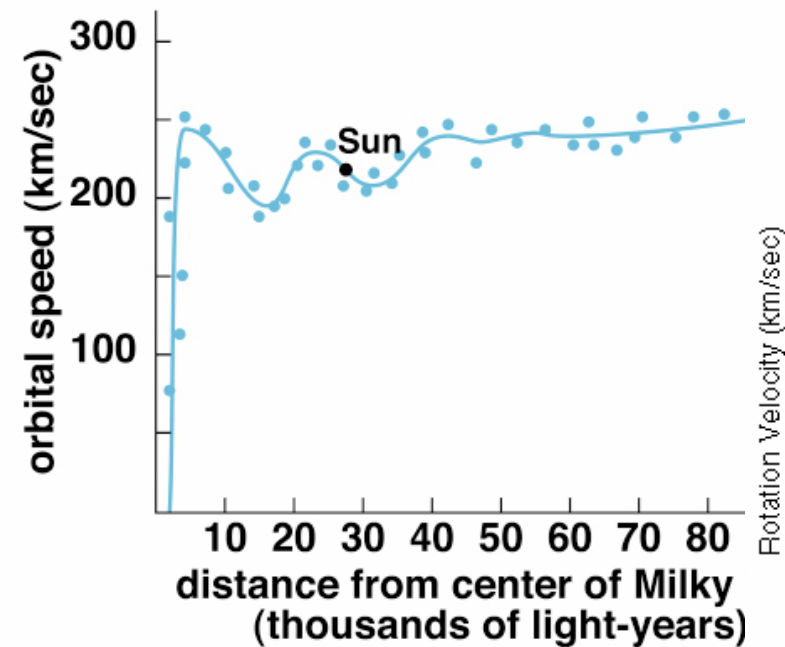
a l'accelerazione (centripeta)  
F la forza di "gravitazione Universale"

la massa "luminosa" M (di stelle)  
all'interno di r e' insufficiente  
a dar conto della curva "piatta":  
**c'e' "materia oscura"**



Rotation curve of the spiral galaxy NGC 6503 as established from radio observations of hydrogen gas in the disk (K Begeman et al MNRAS 249 439 (1991)). The dashed curve shows the rotation curve expected from the disk material alone, the chain curve from the dark-matter halo alone.

# la nostra Galassia

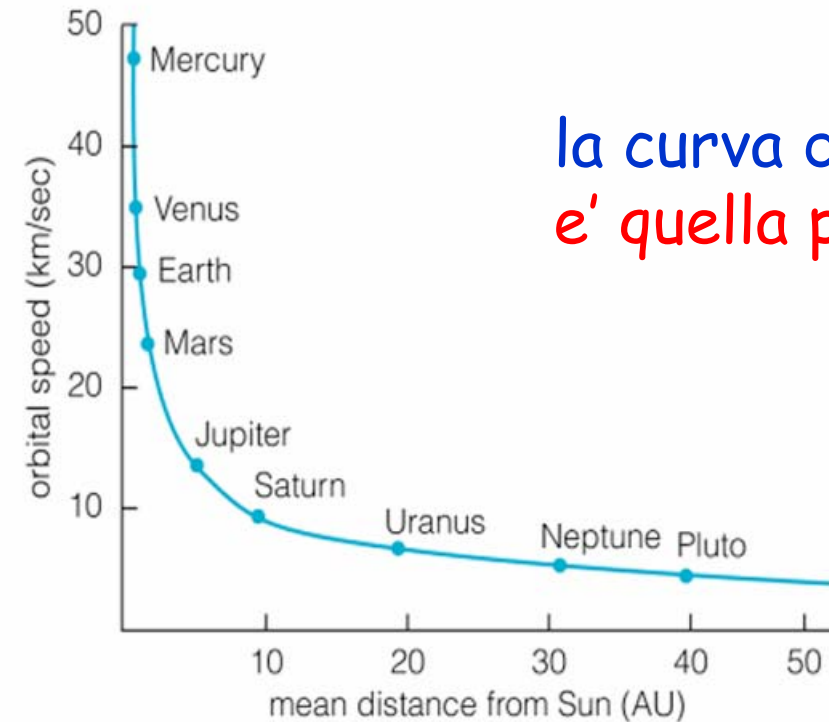


(c)  
Copyright © Addison Wesley

- buona parte della massa e':
- un alone di materia oscura
  - un buco nero centrale

The gravity of the visible matter in the Galaxy is not enough to explain the high orbital speeds of stars in the Galaxy. For example, the Sun is moving about 60 km/sec too fast. The part of the rotation curve contributed by the visible matter only is the bottom curve. The discrepancy between the two curves is evidence for a **dark matter halo**.

la curva di rotazione nel sistema solare:  
e' quella prevista *senza* materia oscura



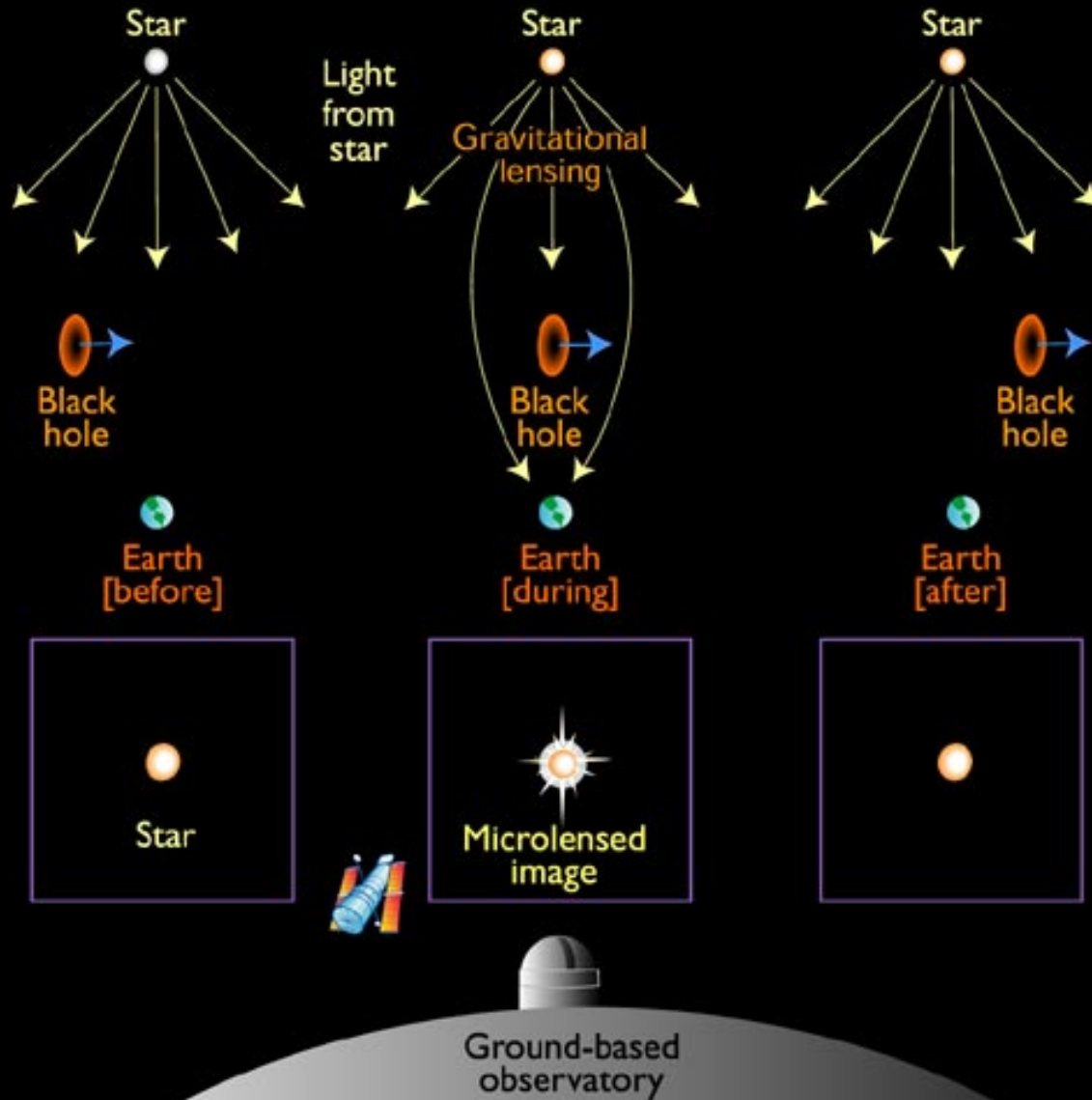
contraddizione ???

la Gravitazione Universale e' un po' meno "universale" e vale nel Sistema Solare, ma non su scala piu' grande???

servono osservazioni piu' fini: le orbite dei pianeti interni sono misurate con la telemetria radio, microonde e laser a  $< 1\text{m}$ , ma gli effetti di materia oscura alla densita' media Galattica sarebbero di frazioni di mm



# Gravitational Microlensing by Black Hole

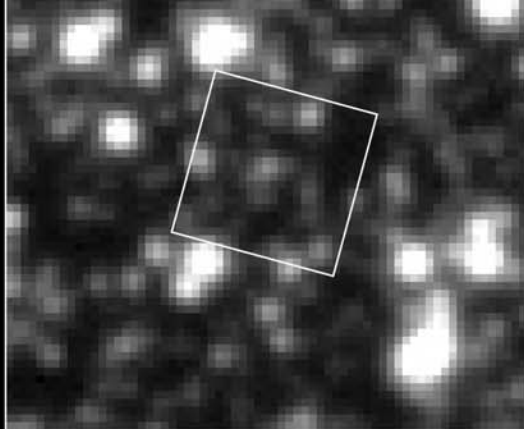




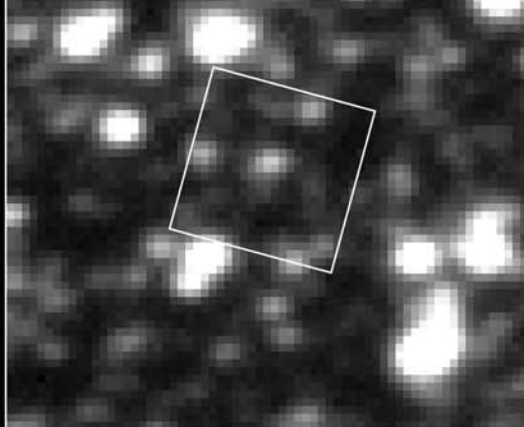
## Hubble Floating Free

Image Credit: NASA, 2002

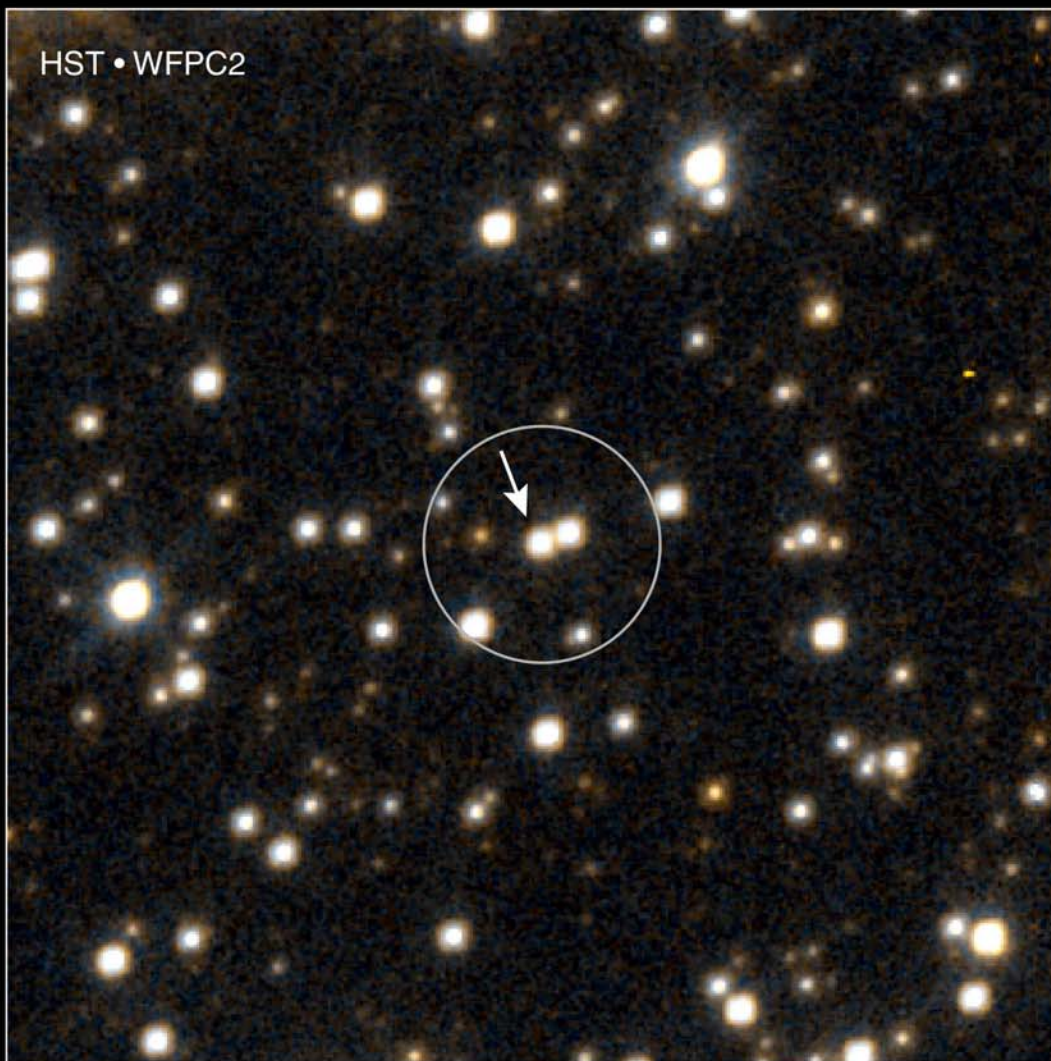
Ground • CTIO  
April 28, 1996



Ground • CTIO  
November 15, 1996



HST • WFPC2



**Microlens Event MACHO-96-BLG-5**  
Hubble Space Telescope • WFPC2

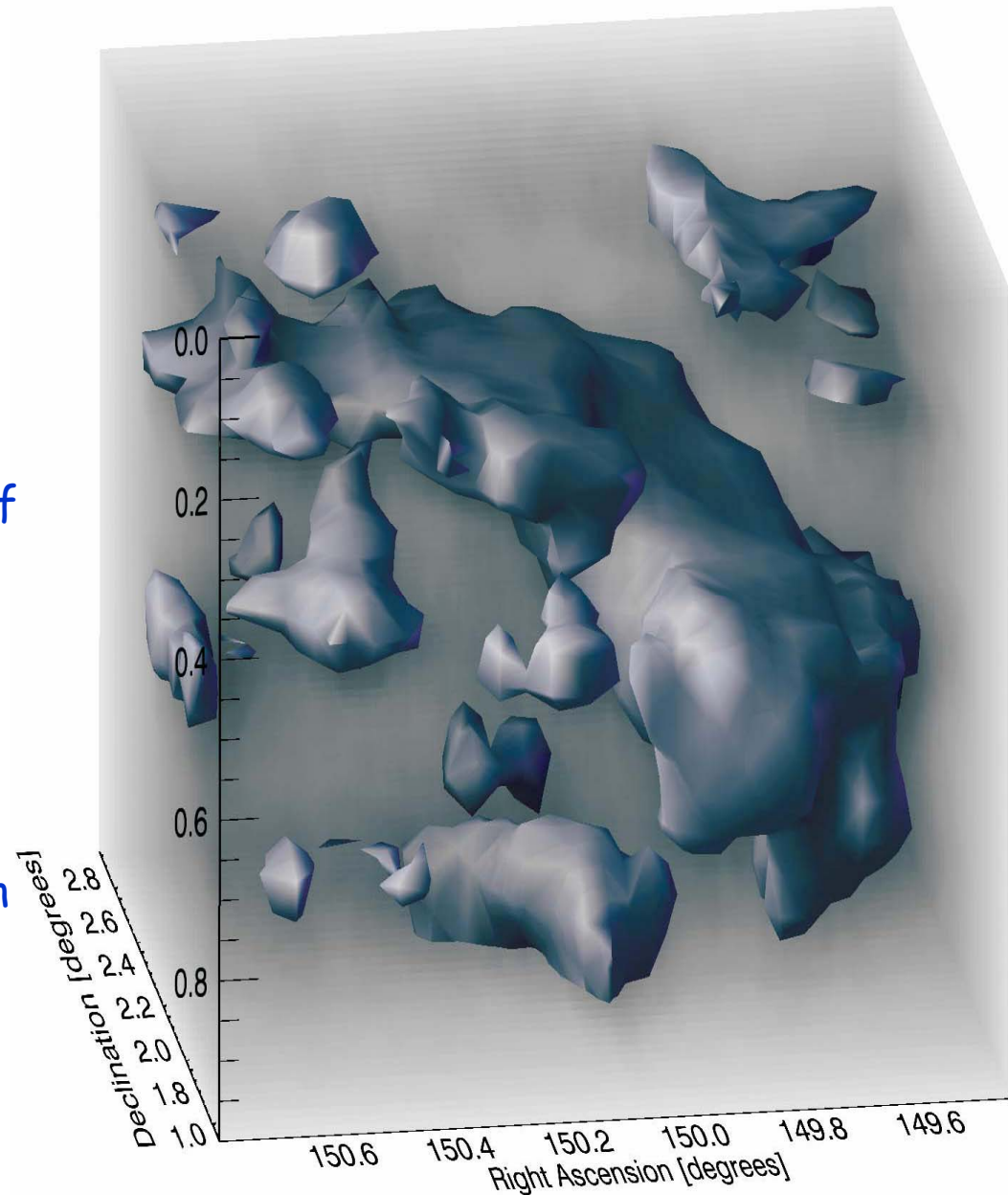
# Il Lensing Gravitazionale



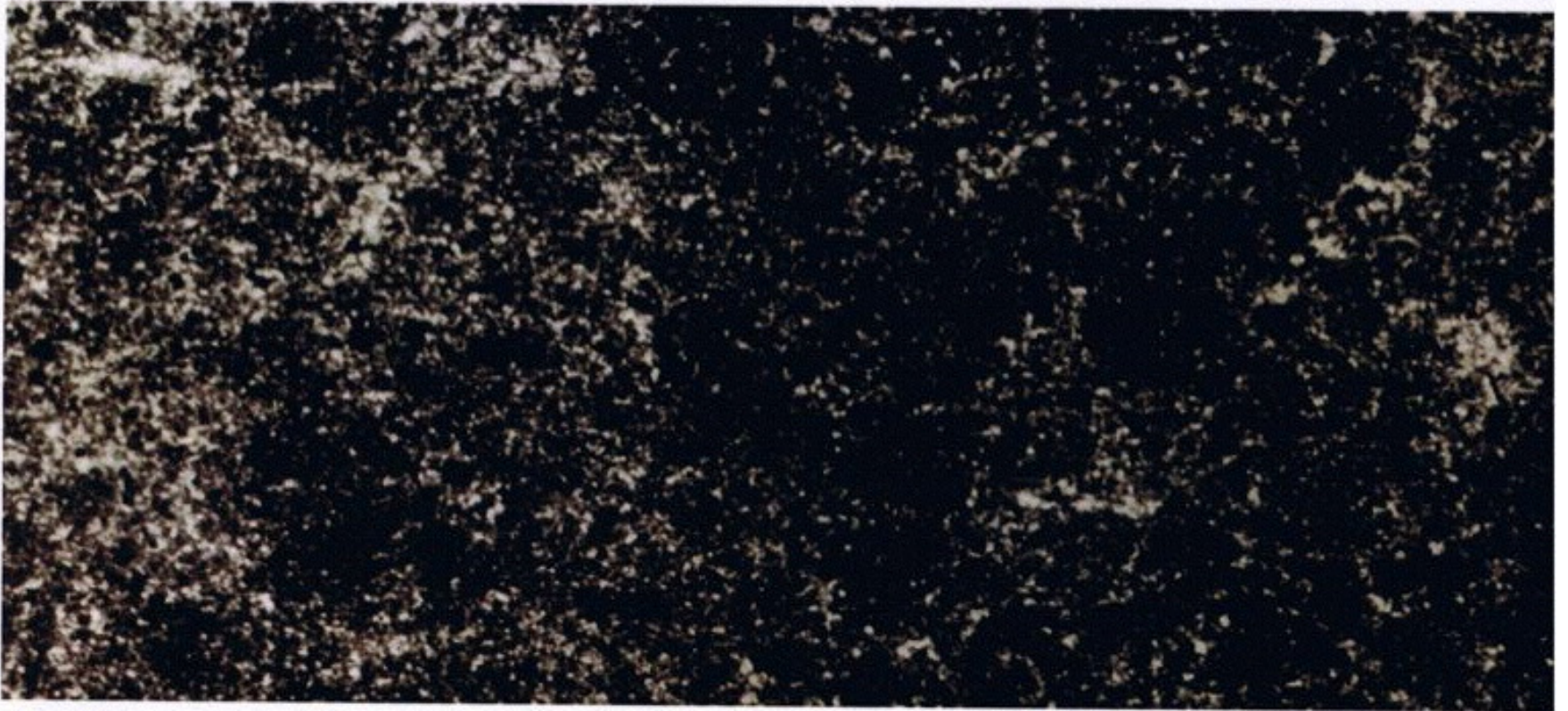
**Abell 2218: A Galaxy Cluster Lens, Andrew Fruchter et al. (HST)**

Richard Massey et al  
Nature 445, 286 (2007)

"We find a loose network of filaments, growing over time, which intersect in massive structures at the locations of clusters of galaxies. Our results are consistent with predictions of gravitationally induced structure formation, in which the initial, smooth distribution of dark matter collapses into filaments then into clusters, forming a gravitational scaffold into which gas can accumulate, and stars can be built.



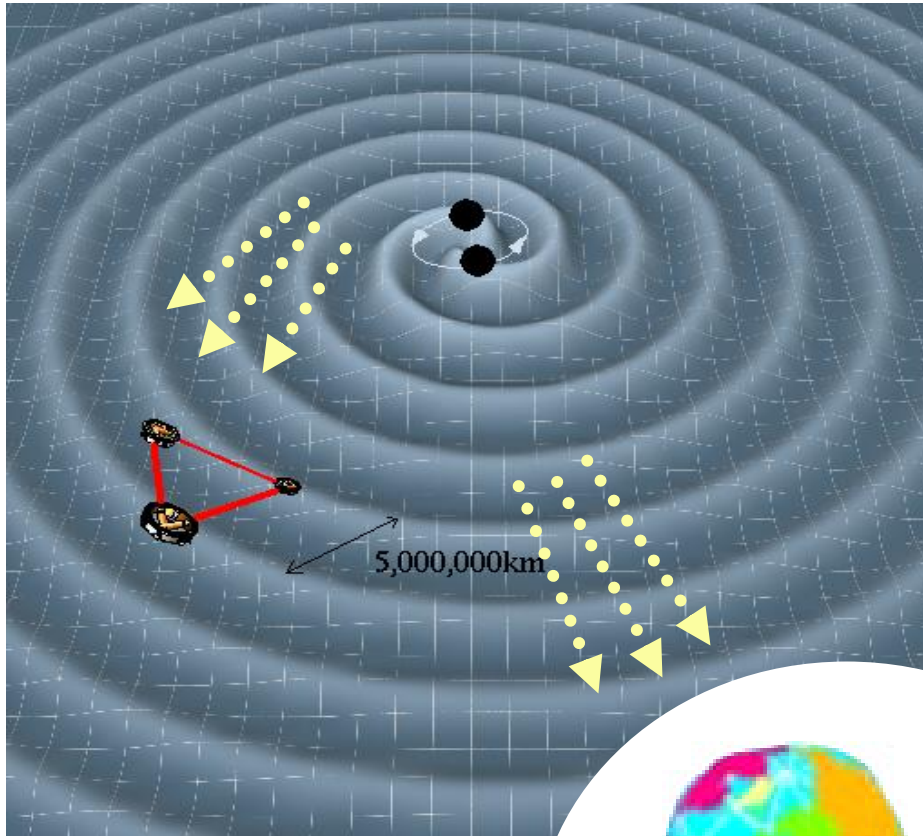
# la tessitura dell'Universo



**INFN**  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
Laboratori Nazionali di Legnaro  
Agenzia Nazionale per i Servizi Scientifici Internazionali

Tessitura dell'Universo fino a  $10^9$  anni-luce

# onde gravitazionali e rivelatori nello spazio e a terra



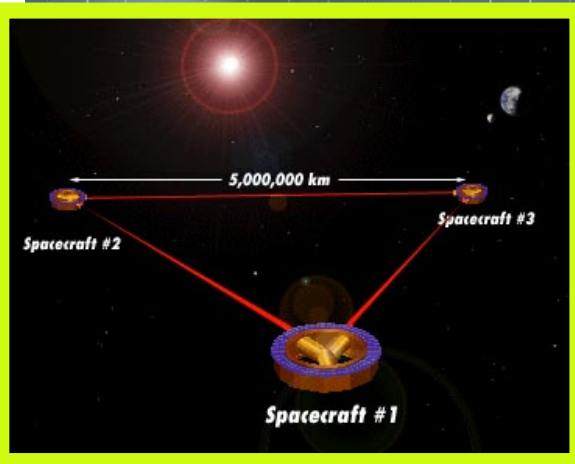
AURIGA  
(Legnaro)



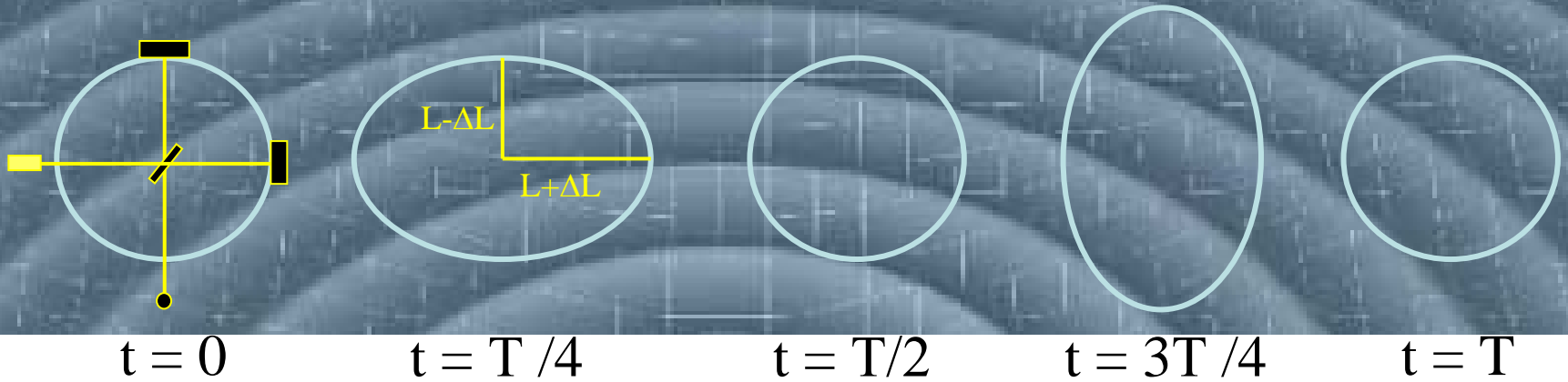
LIGO  
(US)



LISA  
(ESA-NASA)



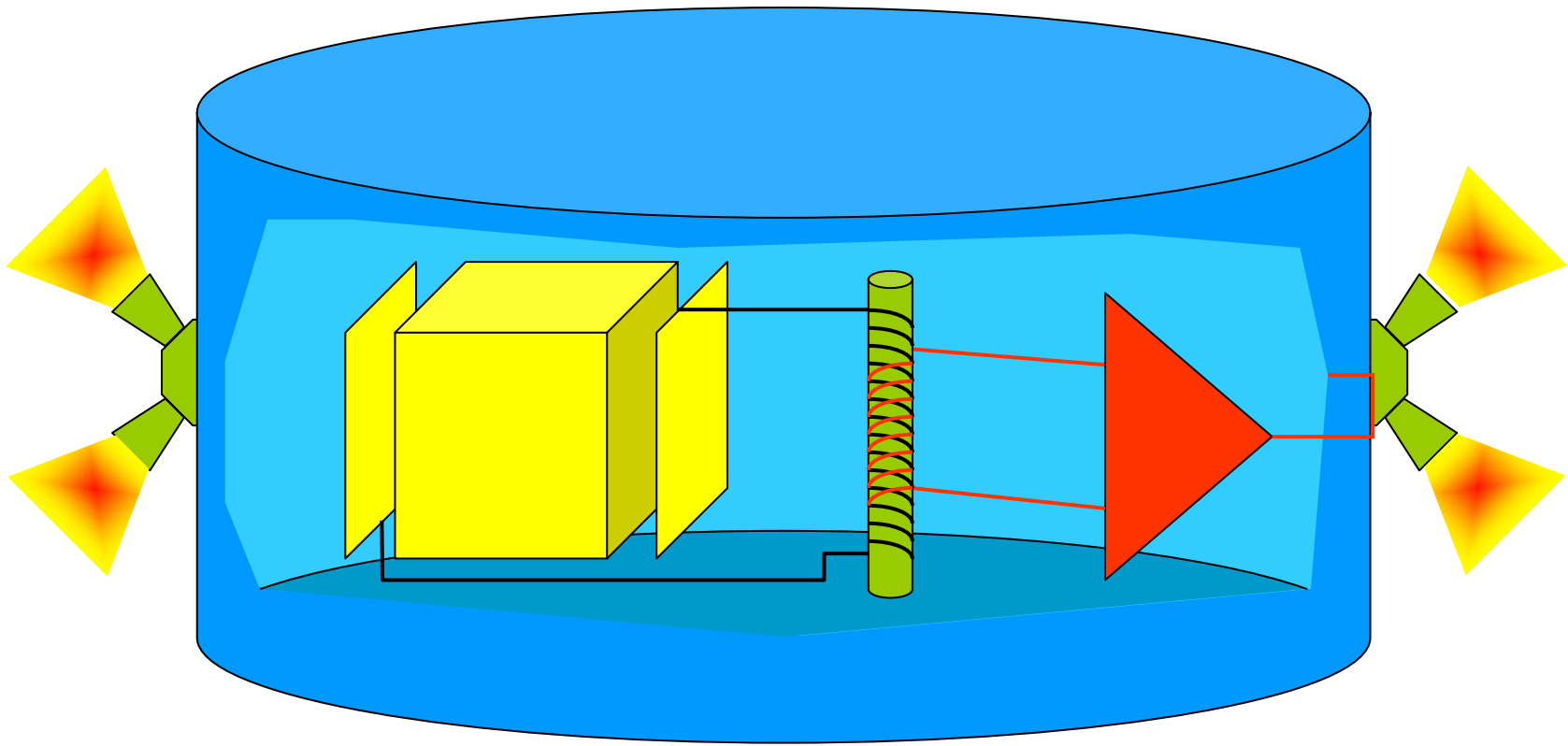
VIRGO  
(Pisa)



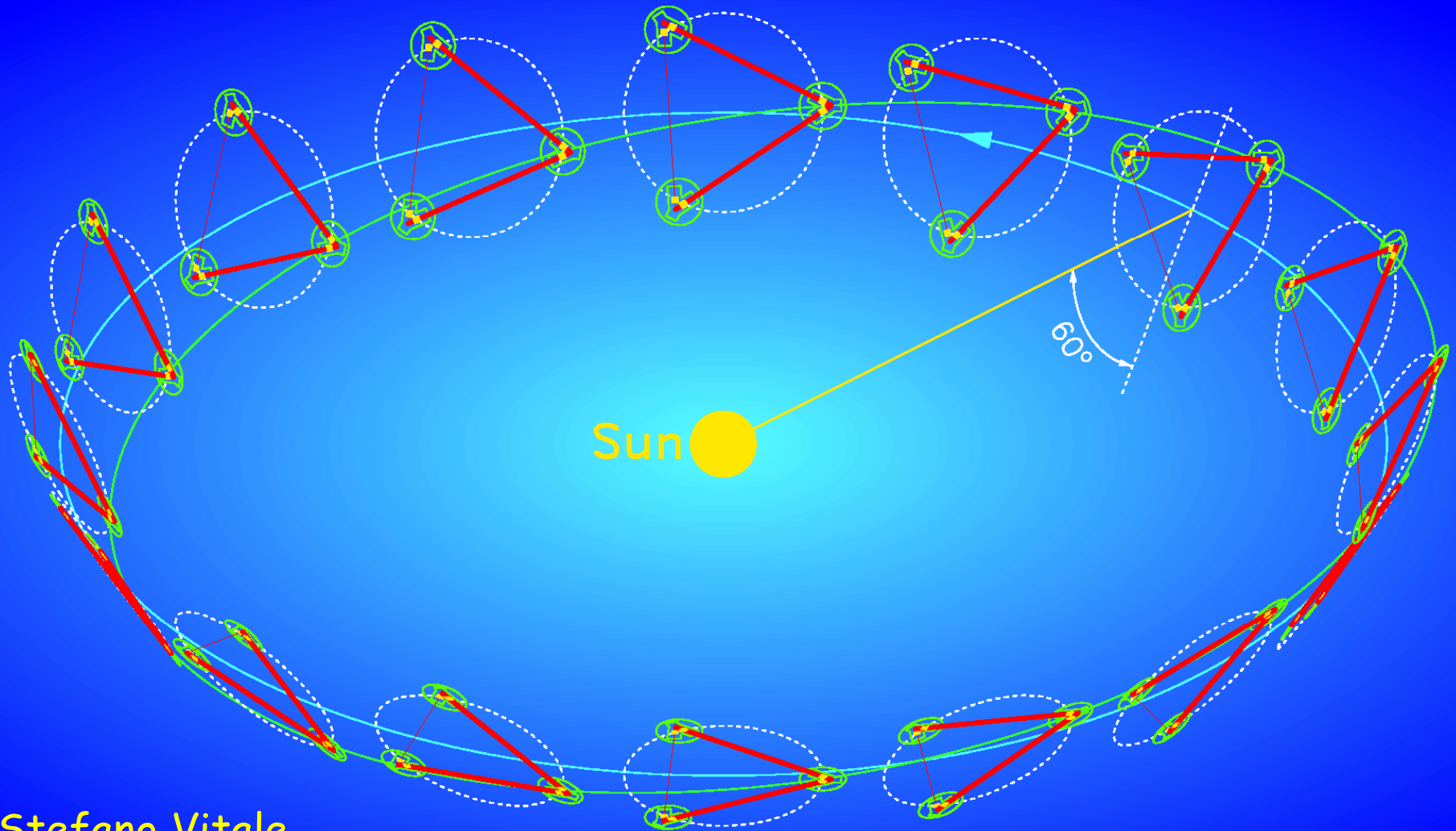
$$\Delta L = \frac{1}{2} h L$$

$\Delta L \sim 10^{-18} \text{ m}$        $L \sim 10^3 \text{ m}$        $h \sim 10^{-21}$   
*(bh/bh @ 15 Mpc)*





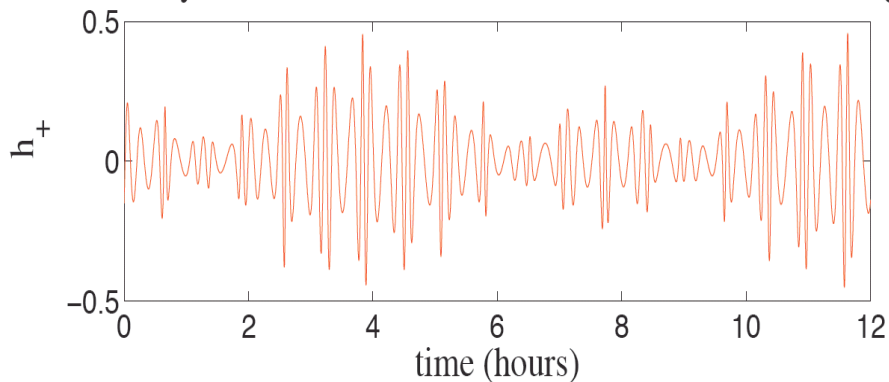
# LISA essentials 1: the smart orbits



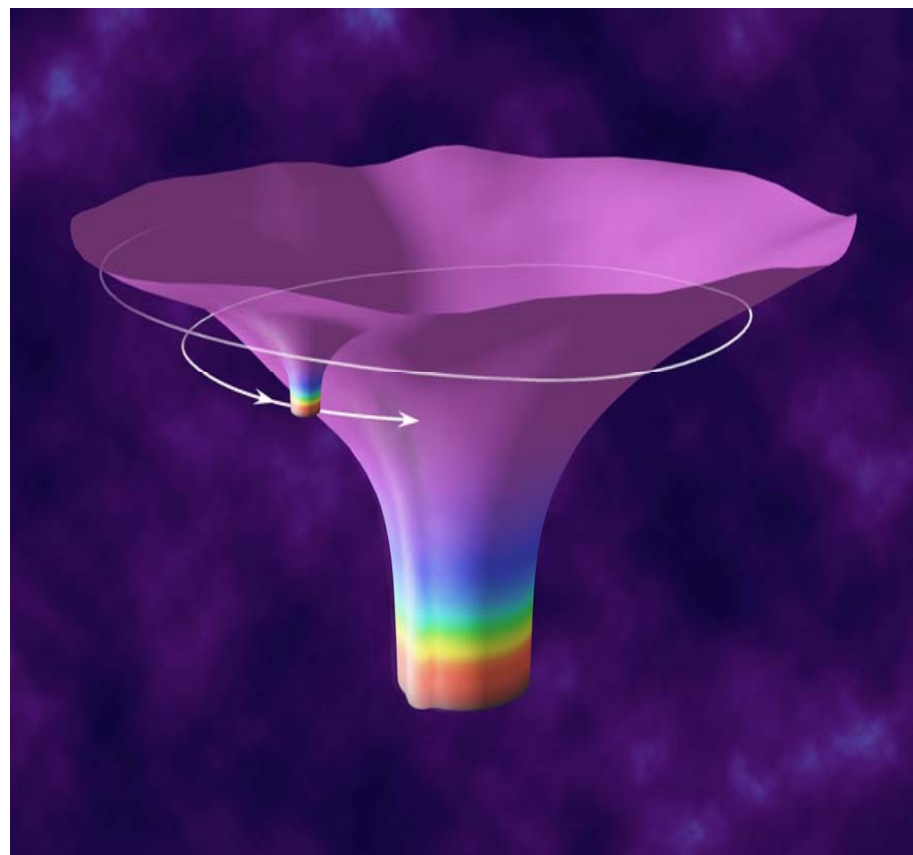
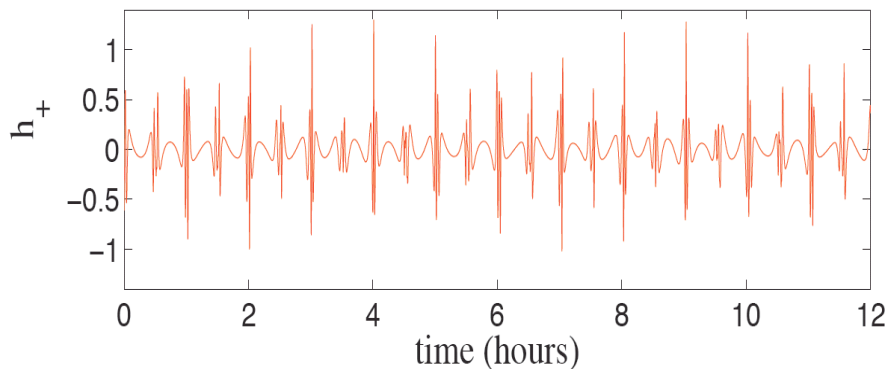
Stefano Vitale  
of LISA Pathfinder  
Trento

un buco nero stellare cade in un buco nero galattico: le onde gravitazionali emesse danno una mappa del campo gravitazionale estremo in prossimità dello "orizzonte degli eventi", la superficie di *non ritorno*, attraversata la quale la materia/energia che cade scompare per sempre

eccentricity = 0.3, semilatus rectum = 12, inclination = 140 degrees



eccentricity = 0.7, semilatus rectum = 6, inclination = 60 degrees



# distanze nell'universo

si esprimono in "anni luce"

*la distanza che la luce percorre in un anno*

300.000 km/s per 30.000.000 s = 9.000.000.000.000 km [ **9.46 10<sup>12</sup> km** ]

(circa novemila miliardi – nove bilioni di chilometri)

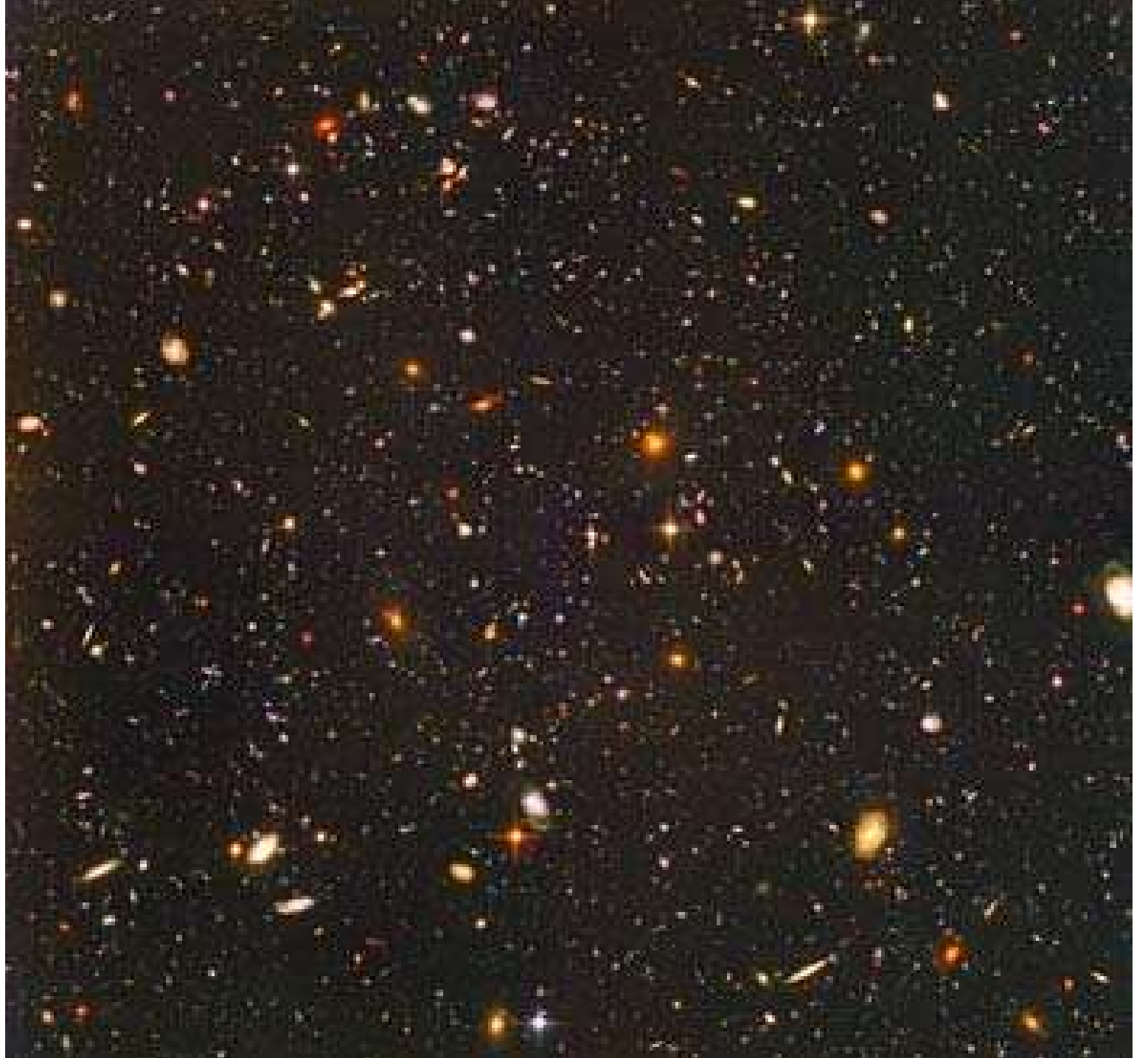
- il Sole e' a 8 minuti-luce
- le stelle piu' vicine del sistema  $\alpha$ -Centauri a circa 4,2 anni luce
- il Sole e' a circa 26 mila anni luce dal Centro della Galassia e gira intorno ad esso in 220 milioni di anni a 220 km/s
- la Galassia piu' vicina grande come la nostra, circa 100.000 anni luce, e' Andromeda M31 a circa 2,3 milioni di anni luce e ha una massa di 300 miliardi di Soli
- l'ammasso di galassie piu' vicino, l'ammasso della Vergine, contiene 2500 galassie e si estende tra 30 mila e 60 mila anni luce
- L'Universo "visibile" (le galassie piu' lontate, i "quasar", ...) si estende fino a circa 5 miliardi di anni luce

# vediamo il passato

.....e allora evidentemente vediamo

- il Sole com'era 8 minuti fa
- $\alpha$ -Centauri com'era oltre 4 anni fa
- Andromeda com'era oltre 2 milioni di anni fa
- i "confini" dell'Universo com'erano oltre 5 miliardi di anni fa (piu' o meno l'eta' del Sole)

l'eta' dell' Universo dal "big bang" e'  
circa 13 miliardi di anni

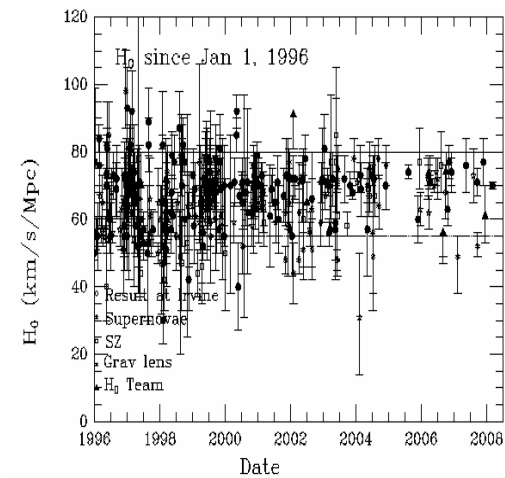
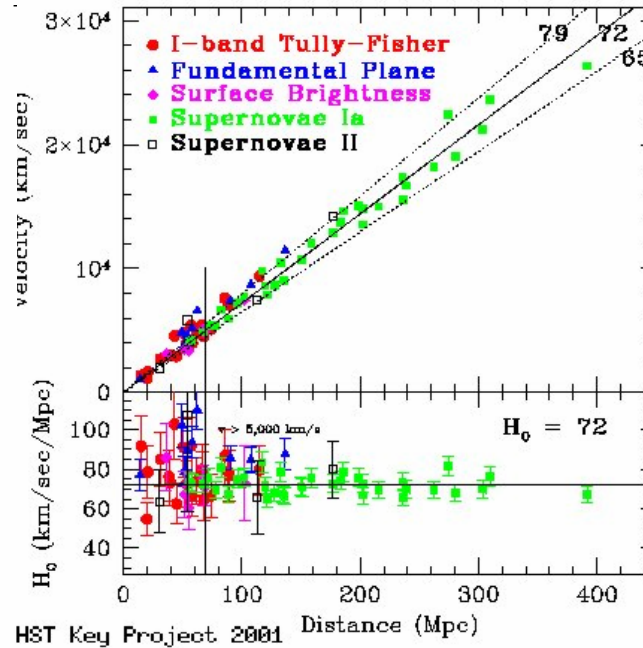
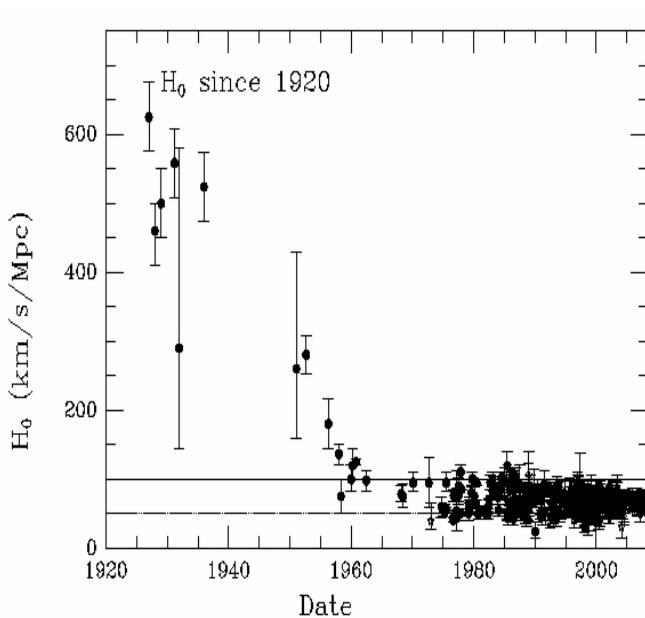


# l'Universo in espansione

vediamo le galassie "fuggire" in tutte le direzioni a velocità tanto più grande quanto più sono distanti (*legge di Hubble*)

$$v = H d \quad \text{la "costante" di Hubble } H = (72 \pm 7) \text{ km/s/Mpc}$$

da <http://www.cfa.harvard.edu/~huchra/hubble/>

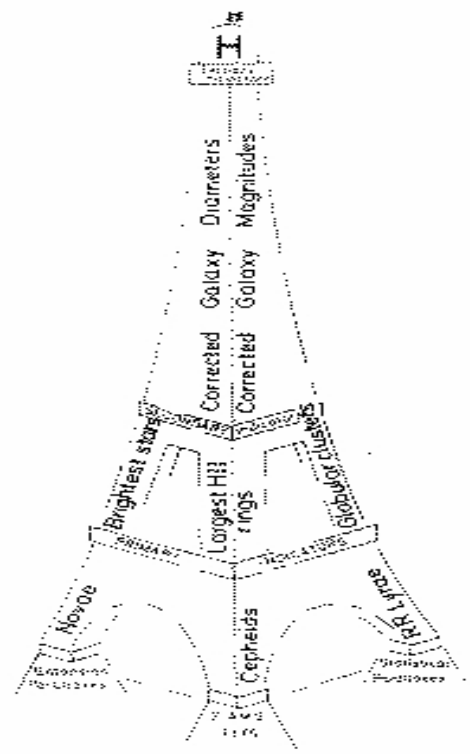


"...its stands, along with the Copernican Principle -that there is no preferred place in the Universe, and Olbers' paradox -that the sky is dark at night- as one of the cornerstones of modern cosmology..."

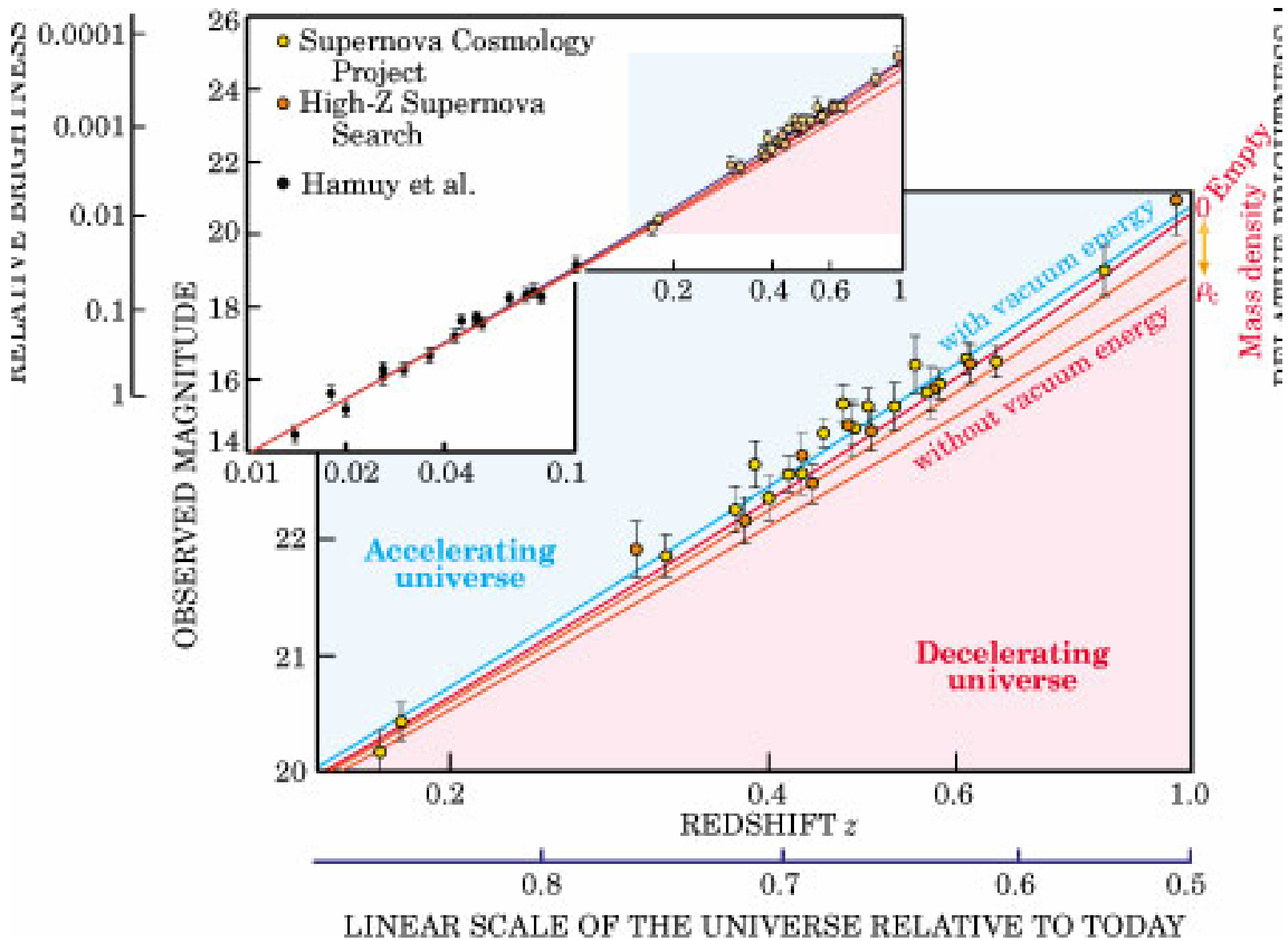
# misure per la legge di Hubble:

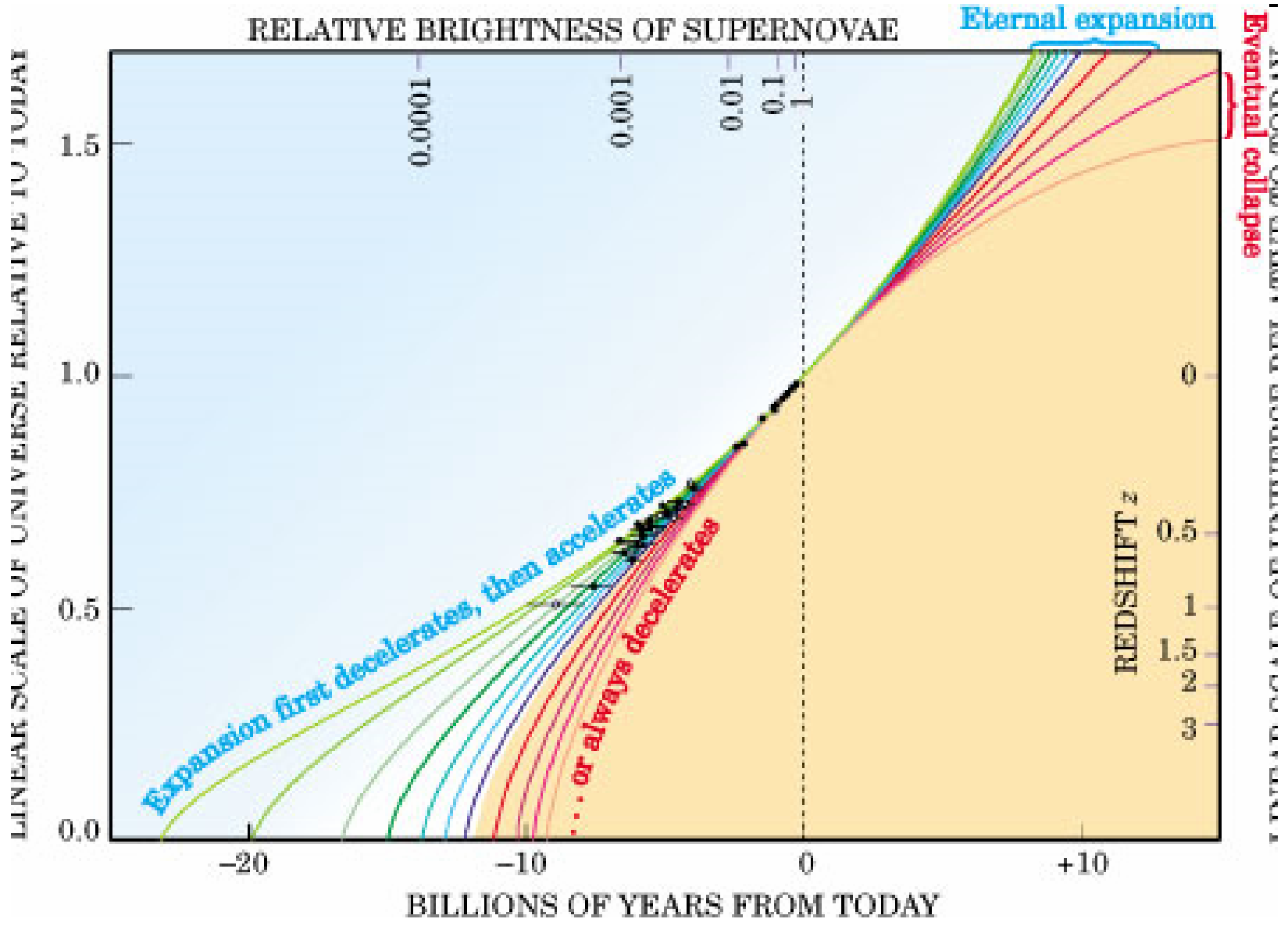
v la velocita' dell Galassie > dall'effetto Doppler **relativamente facile**

d la distanza **un problema difficilissimo** > costruzione di indicatori di distanza diversissimi da sovrapporre un all'altro per connetterli ed estendersi fino alle distanze piu' grandi

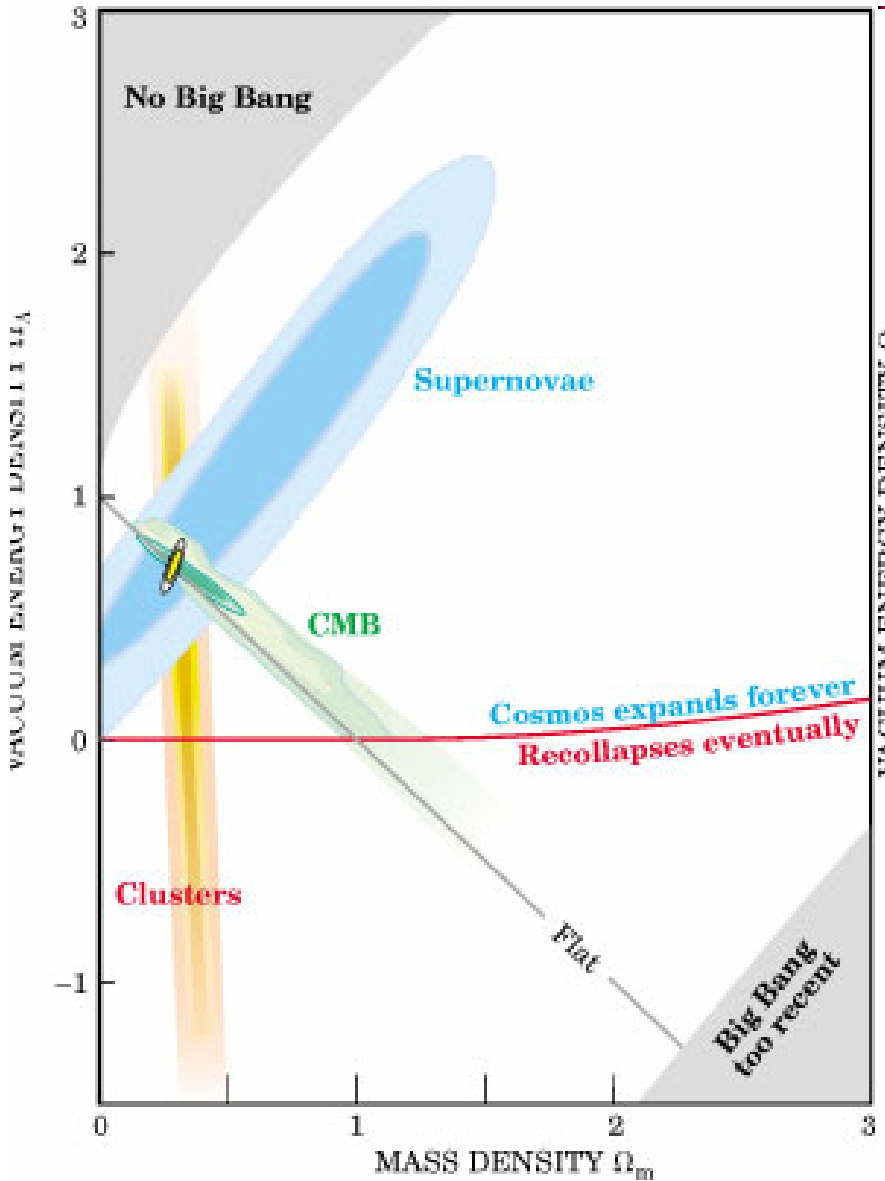








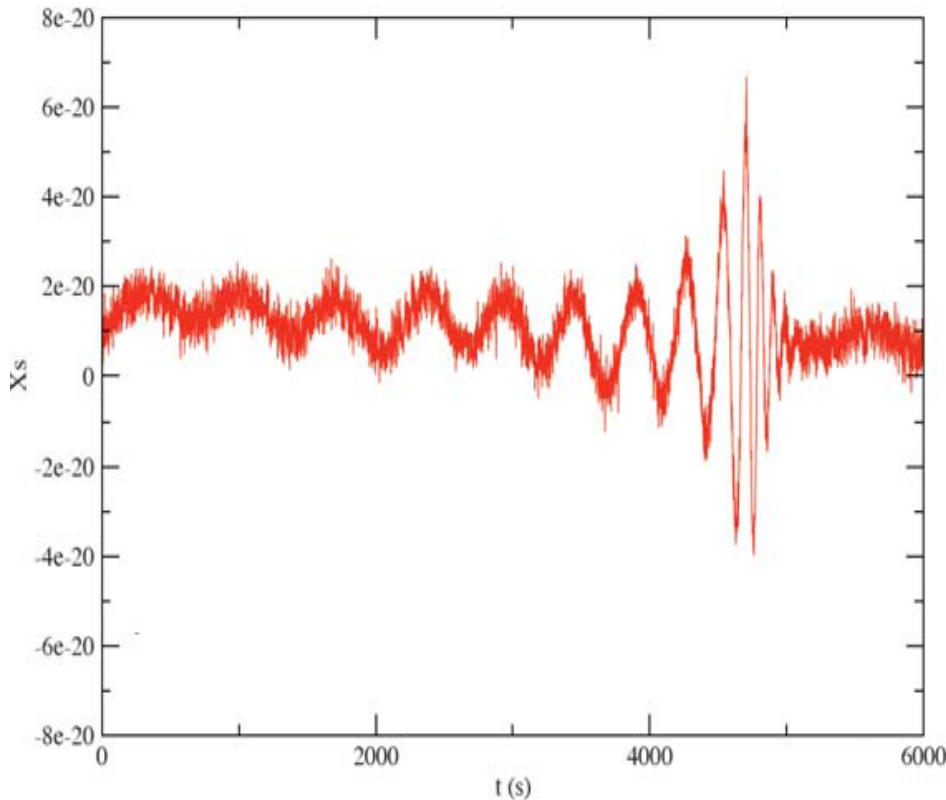
Saul Perlmutter *Physics Today*, April 2003, Volume 56, pp. 53-60



galassie in collisione  
(con i loro buchi neri al centro...)



onde gravitazionali (simulazione) dalla spiralizzazione finale, coalescenza, vibrazioni di assestamento di due buchi neri da  $10^5$  masse Solari ai limiti dell'Universo visibile



dallo sviluppo in ampiezza e frequenza delle onde gravitazionali emesse sarà possibile:  
determinare la *distanza assoluta* ed avere un metodo indipendente per misurare come l'espansione dell'Universo stia *accelerando*  
eseguire stringenti *test* sulla Relatività Generale

# il nostro Universo

- vediamo le galassie "fuggire" in tutte le direzioni a velocità tanto più grande quanto più sono distanti (*legge di Hubble*)
- la struttura, sulla scala intermedia di 1 mld di anni luce, è filamentare con grandi vuoti (*dominata dalla materia oscura, regolata dalla Gravitazione Relativistica*)
- sulla scala grande dell'Universo visibile è omogeneo e isotropo (*principio "Copernicano"*)
- è in continua espansione e da un po' ha preso ad accelerare (*ruolo critico dell'energia oscura*)

materia (23%) ed energia (73%) oscura dominano:  
l'azione gravitazionale le rivela  
e permettera' di comprenderne il ruolo nella struttura e  
sviluppo dell'Universo

*e' la "saggezza convenzionale"*

per completezza va notato che questo quadro emerge dalla combinazione di:

- Relativita' Generale obbedita a tutte le scale  
ma l'esperienza *diretta* e' limitata al Sistema Solare, dove non abbiamo esp  
raffinati abbastanza per verifiche sulla materia/energia oscura
- Il Principio Cosmologico di omogeneita' e isotropia su larga scala  
potremmo stare osservando su una scala dove le inomogeneita' ancora sono  
rilevanti
- Il Principio Copernicano  
e' gia' violato nel tempo (siamo in un'epoca "speciale") potrebbe esserlo anche  
nello spazio e saremmo in un posto "speciale", un vuoto ?

se una di queste ipotesi di base dovesse cadere sotto le verifiche,  
si potrebbero formulare modelli dell' Universo  
che *fanno a meno* dell materia e/o dell'energia oscura

per scaricare gratis Stellarium:

<http://www.stellarium.org/>

per bellissime immagini:

<http://hubblesite.org/>

per "2009 anno dell'astronomia:

<http://www.unipd.it/astro2009/>



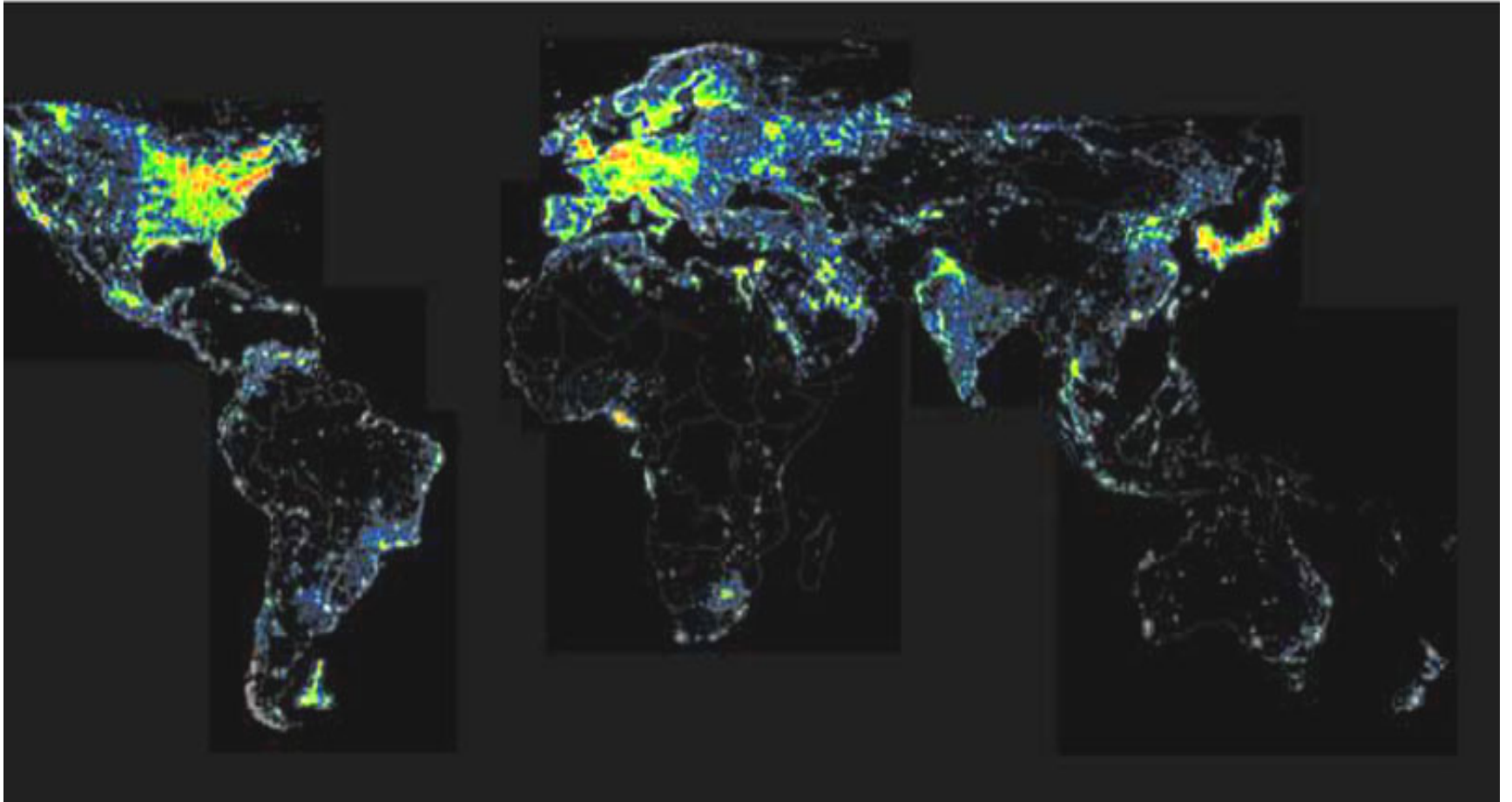
cosa NON vediamo perche' il cielo non e'  
abbastanza oscuro

la Via Lattea !!! e molto altro: nebulose, galassie,...

"e' tempo di spegnere le luci..."

da Nature del 1 gennaio 2009

"Le citta' irraggiano bilioni di dollari l'anno direttamente nel cielo notturno e, come risultato, un quinto della popolazione mondiale non puo' piu' vedere la Via Lattea"



The arc of the Milky Way seen from a truly dark site is part of our planet's cultural and natural heritage. It is now more urgent than ever to preserve and protect dark night skies in places such as urban cultural landscapes, national parks and sites connected with astronomical observations, as well as to support the goals of UNESCO's thematic initiative, Astronomy and World Heritage, to preserve sites of astronomical importance for posterity.

[www.darkskiesawareness.org/](http://www.darkskiesawareness.org/)



a che serve *vedere...*

nel Sistema Solare, oltre i pianeti, ci sono asteroidi, meteoriti, comete, polvere.....



simulazione NASA dell'impatto di un asteroide o cometa che 65 milioni di anni fa causò l'estinzione dei dinosauri

zero

gravity



## A Conversation in Kansas



*"All I'm saying is now is the time to develop the technology to deflect an asteroid."*