

*Evidenza di
materia oscura*

Spiral galaxy



Spiral galaxy

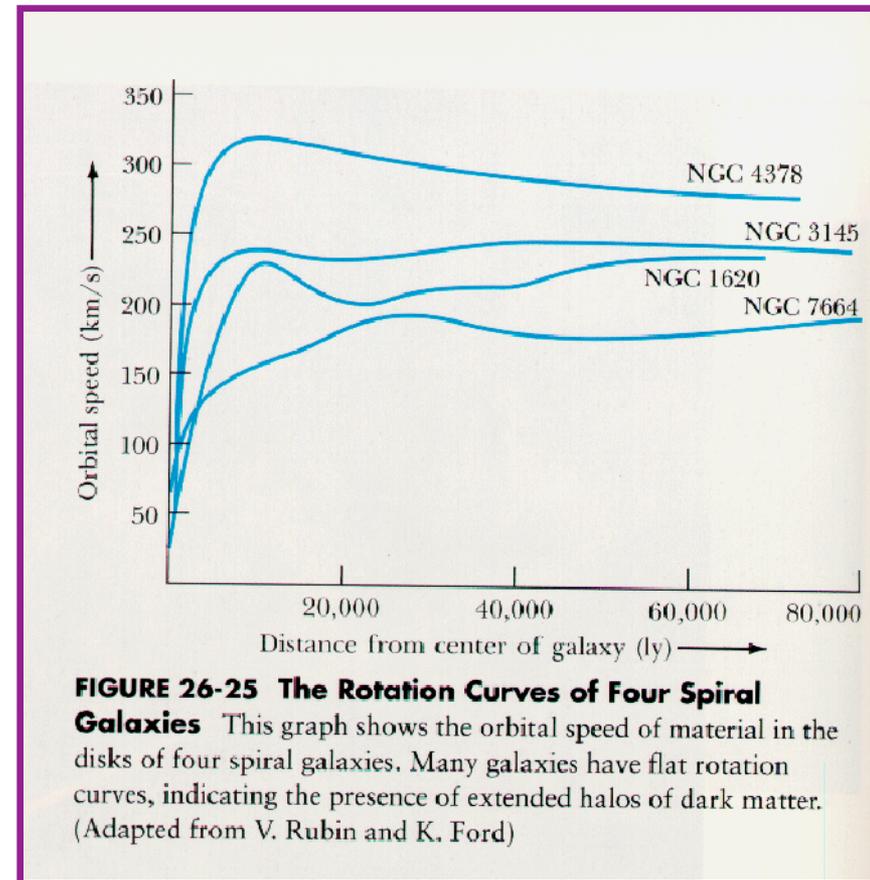


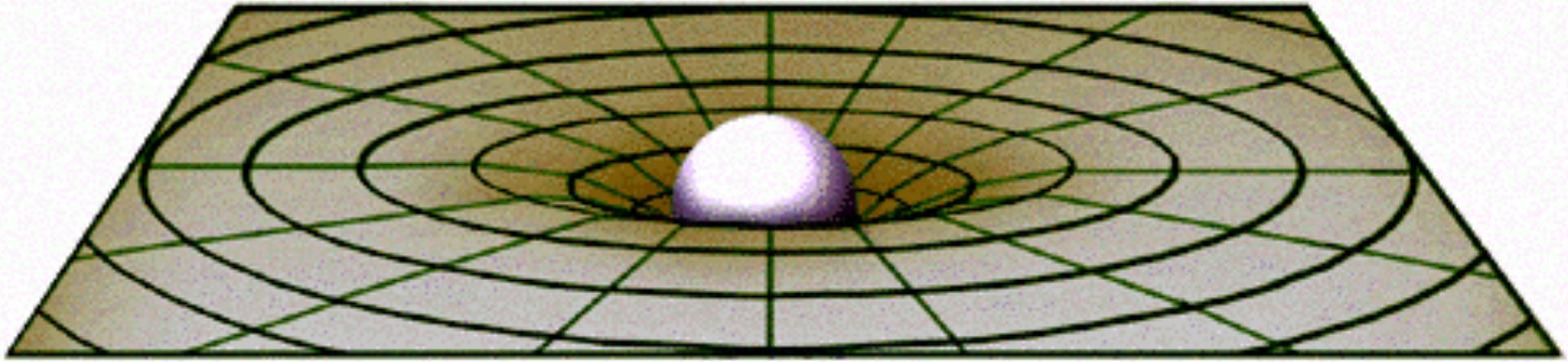
Evidenza di materia oscura dalle curve di rotazione di galassie a spirale

Lo studio delle galassie a spirale mostra che la curva della velocità di rotazione rimane costante, o piatta, all'aumentare della distanza dal centro galattico. Sulla base della teoria Newtoniana la velocità di rotazione dovrebbe diminuire per le componenti più lontane dal centro galattico. La curva di rotazione piatta suggerisce che le galassie sono circondate da una significativa quantità di materia oscura, distribuita in massicci aloni oscuri di forma approssimativamente sferica. Nelle parti più esterne delle galassie la luminosità è trascurabile; nubi di gas che orbitano in tali regioni permettono di misurare come varia la velocità di rotazione con la distanza dal centro galattico, portando alla conclusione che essa tende a rimanere costante. La massa deve continuare a crescere poiché la velocità di rotazione deve soddisfare la legge (di Keplero):

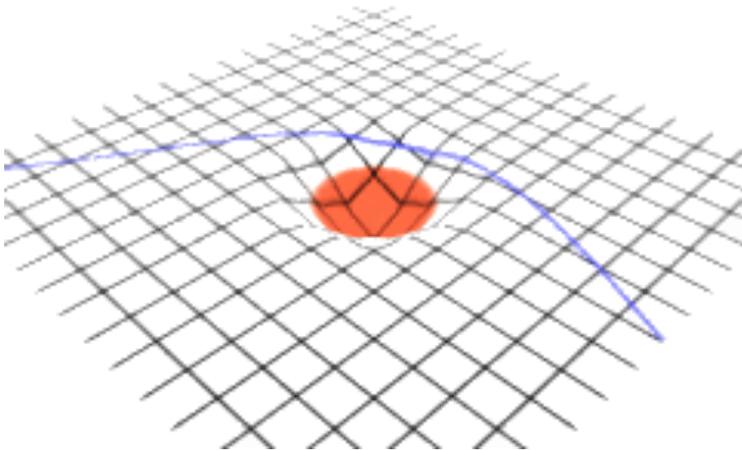
$$v^2 = GM/r$$

dove **M** è la massa entro il raggio **r**; quindi **M** \propto **r**. Il rapporto massa/luminosità della galassia è molto maggiore di quello stimato dalla regione luminosa interna.





La geometria dello spazio (e del tempo) non è un dato fisso, come per Newton, ma dipende dalla materia in esso contenuta



Le traiettorie dei corpi celesti seguono le linee più brevi (geodetiche).

Vicino a una massa lo spazio è curvo e la linea più breve non è la linea retta!

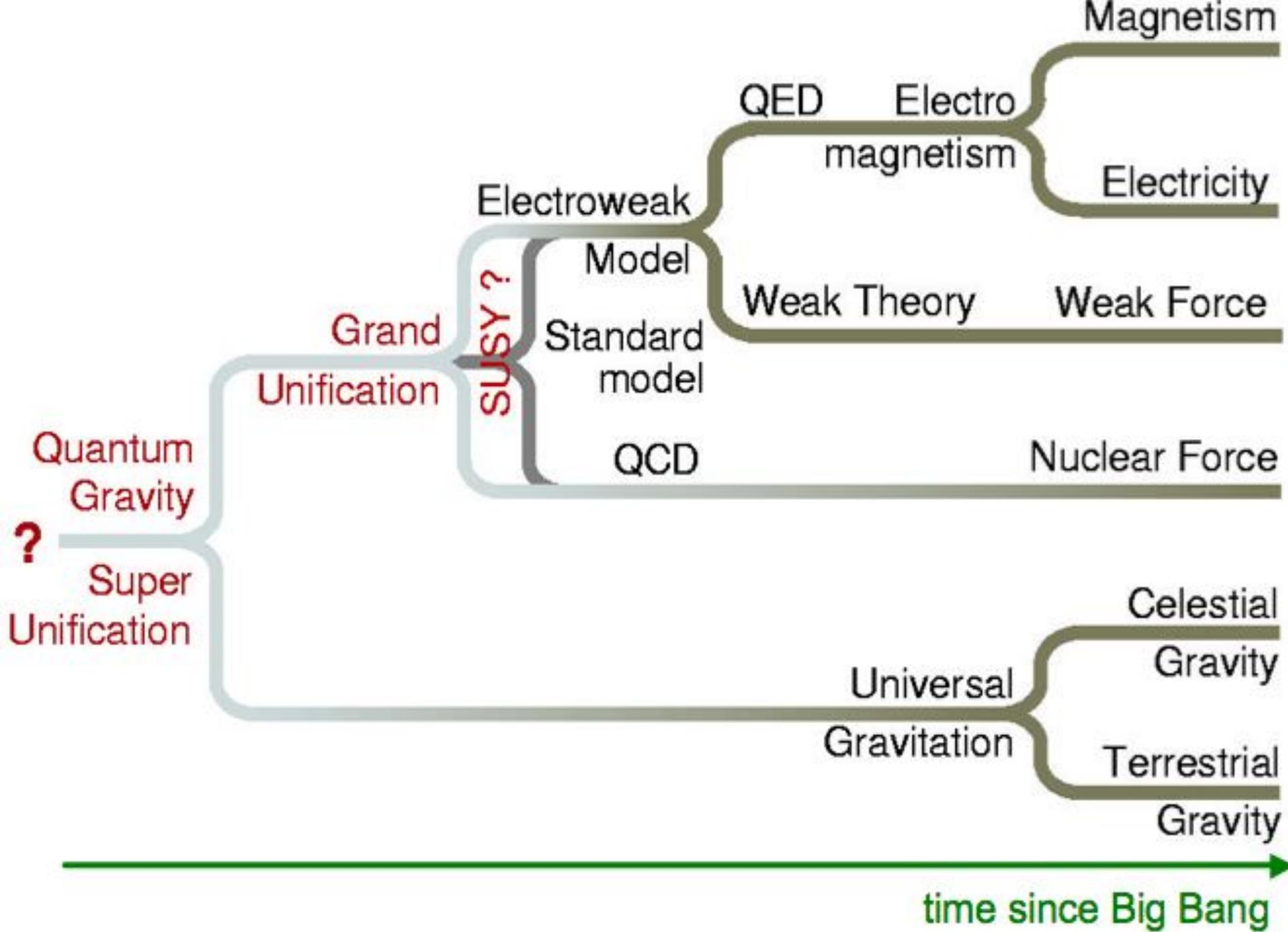
Il Lensing Gravitazionale



Abell 2218: A Galaxy Cluster Lens, Andrew Fruchter et al.

(HST)

- *Di che cosa e' fatta la materia (oscura) nell' Universo (neutralini, assioni, pura gravita')?*
- *Quali sono le forze ("interazioni") che agiscono sulla materia?*
- *Esiste una Unificazione delle forze tale per cui la varieta' delle interazioni discende da un' unica interazione fondamentale?*



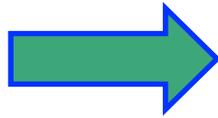
Abbiamo realmente necessita' di Materia Oscura?

- Le osservazioni attuali forniscono molte prove indipendenti della presenza di una qualche forma di materia oscura (CMB, galaxy clustering, gravitational lensing, galaxy rotation curves, etc.; se la sua esistenza dovesse venir messa in discussione dovremmo trovare uno scenario alternativo capace di spiegare gli stessi fenomeni in modo almeno altrettanto coerente e accurato.
- Quali teorie alternative possiamo considerare?

Dark Matter: scenari a confronto

- In linea di principio sono possibili due classi di candidati per la materia oscura (DM), se questa e' composta da particelle elementari:
- **Hot Dark Matter** (e.g. neutrini con massa) → scenario *Top-Down* per la formazione delle strutture cosmiche
- **Cold Dark Matter** (e.g. WIMPs, assioni) → scenario *Bottom-Up* per la formazione delle strutture cosmiche
- Di fatto il primo scenario si e' presto rivelato incompatibile con le osservazioni (a cominciare dall'epoca di formazione delle prime galassie) ed e' stato totalmente escluso.
- Oggi si considerano anche scenari alternativi; tra questi, la possibilita' che la DM non sia composta da particelle elementari, ma da un "campo" continuo, o essere un puro effetto gravitazionale ...

La distribuzione della Materia Oscura

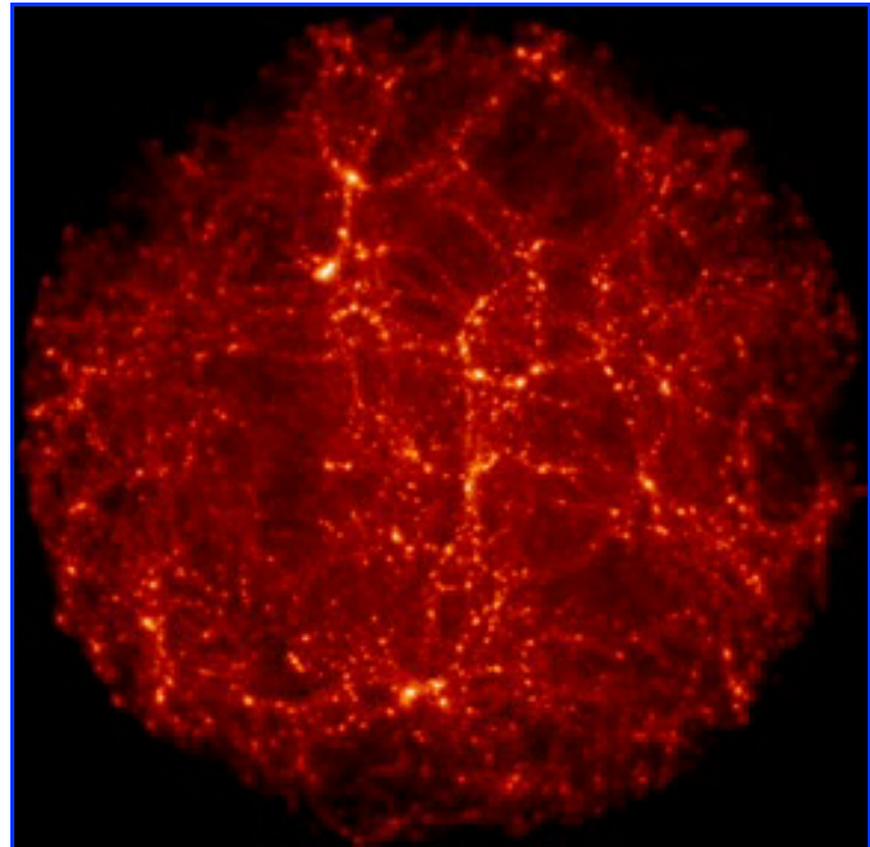


La materia oscura forma la struttura dell'Universo su grande scala, mentre la materia "ordinaria", luminosa, viene gravitazionalmente attratta da questa.

N-body Simulation
by the
Virgo
Consortium

The logo for the Virgo Consortium, featuring the word "VIRGO" in white capital letters on a dark red rectangular background with a small white star-like dot to the right.

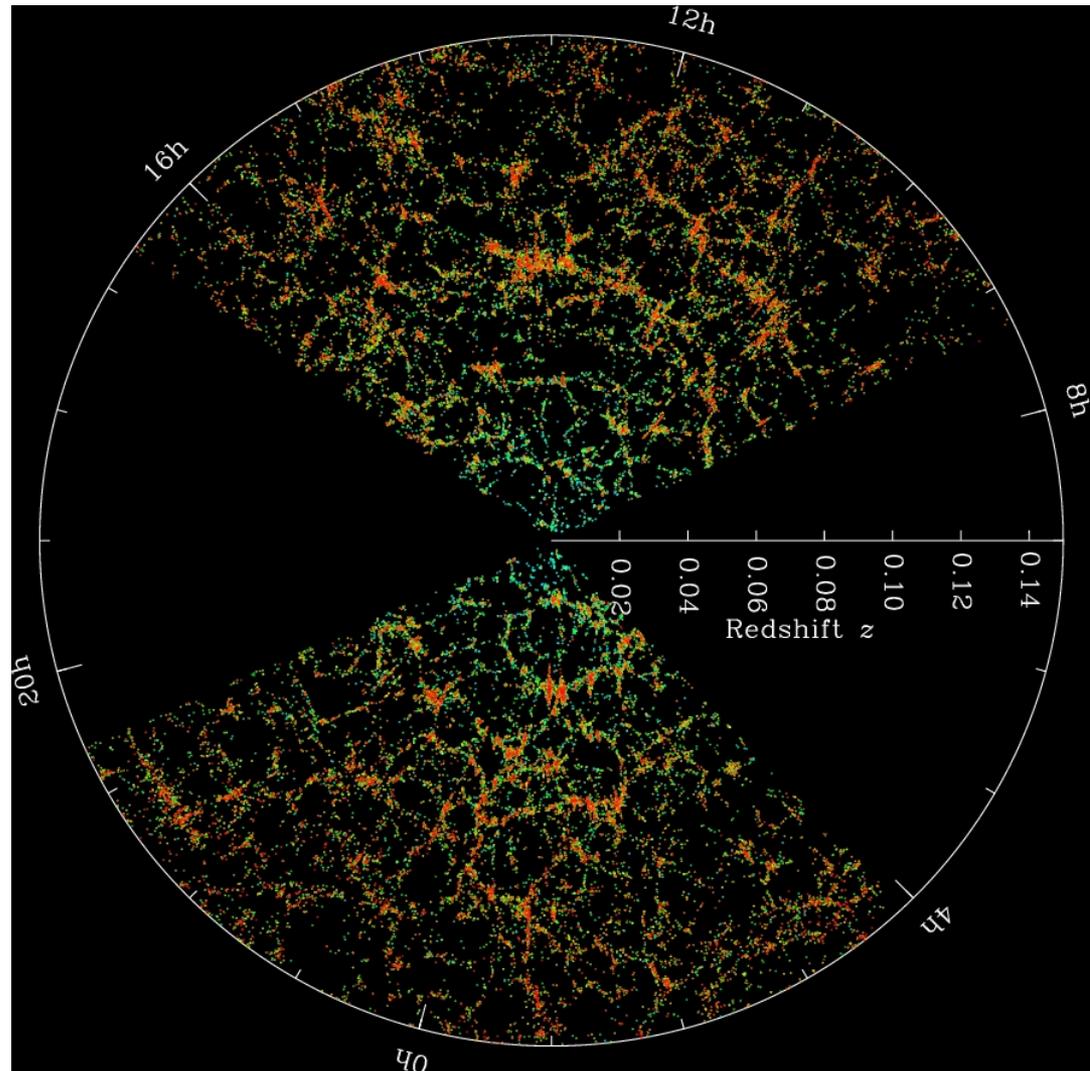
VIRGO



Sloan Digital Sky Survey (~ 1 milione di galassie)



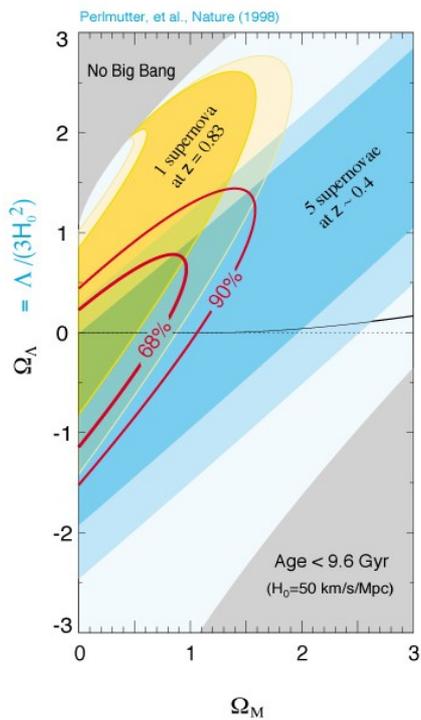
The 2.5-meter telescope at Apache Point Observatory, named the Sloan Foundation Telescope in recognition of the pivotal and generous support of the Alfred P. Sloan Foundation through all phases of the SDSS. All SDSS imaging and spectroscopy were carried out with the Sloan Telescope, equipped with a large format digital camera and fiber-fed spectrographs that measured spectra of 640 objects at a time.



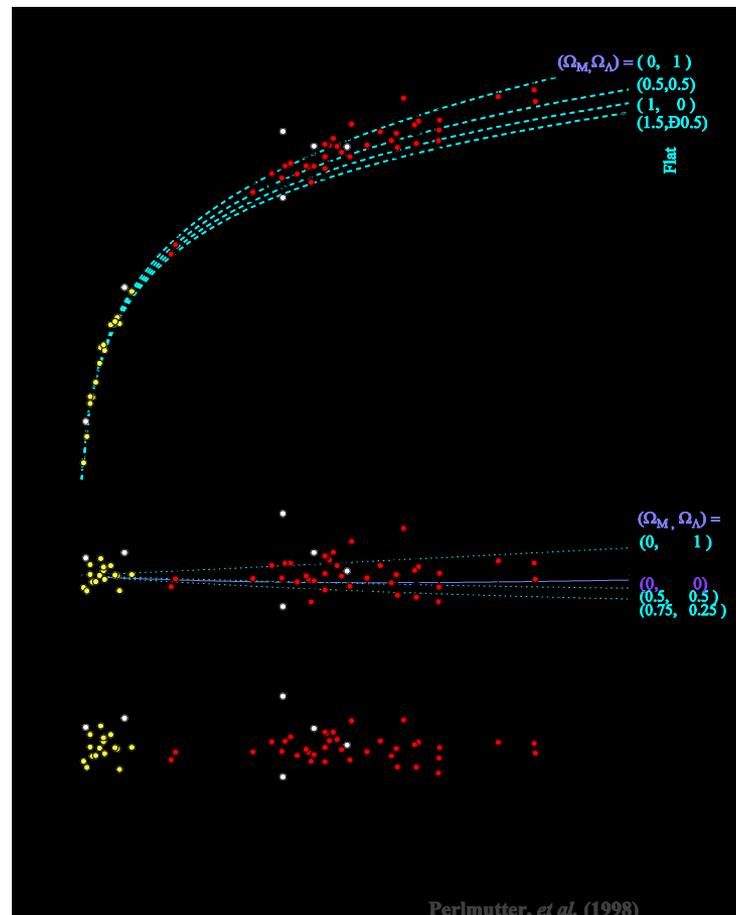
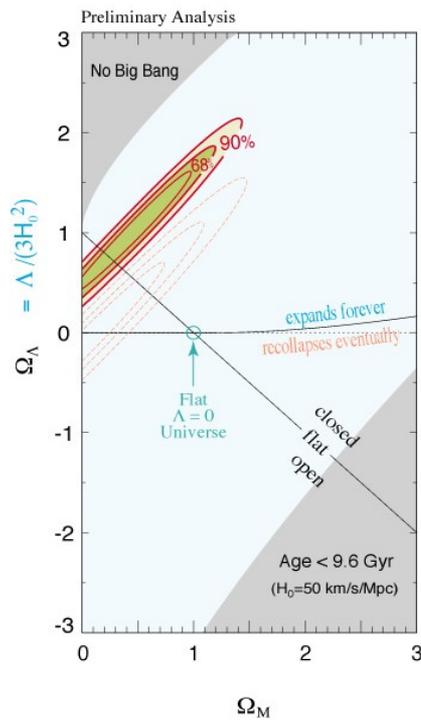
*Evidenza di
energia oscura*

Evidenza di accelerazione cosmica dalle Supernovae piu' distanti

Results: Ω vs Λ from 6 supernovae



Results: Ω vs Λ from 40 supernovae

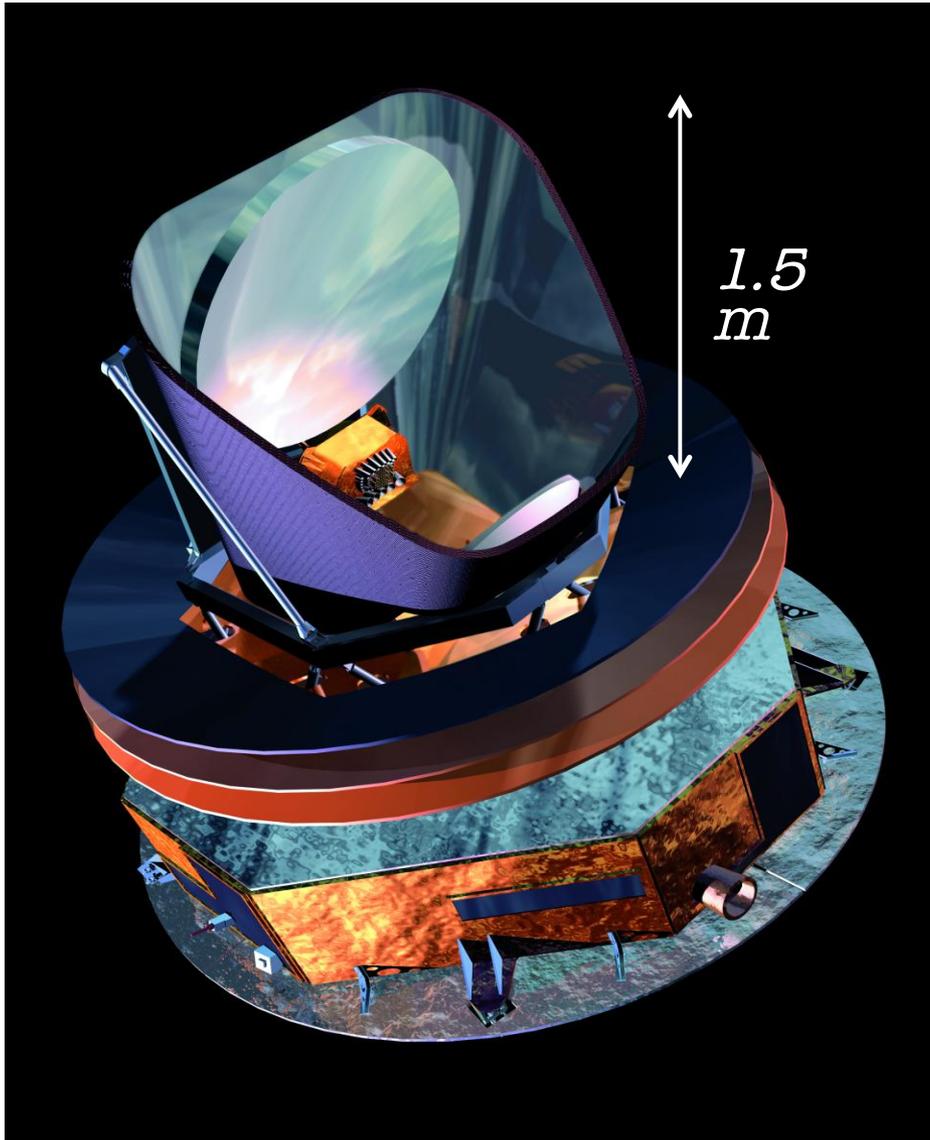


L'espansione dell' Universo accelera

L'espansione accelerata sembra richiedere
l'esistenza di un fluido cosmico con
pressione negativa:

Energia Oscura

La missione *Planck*



3^a missione spaziale per lo studio del CMB –
1^a missione ESA in collaborazione con la
comunita' scientifica di Europa, USA e
Canada

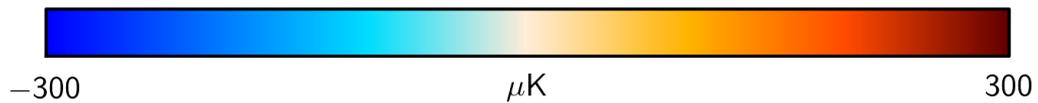
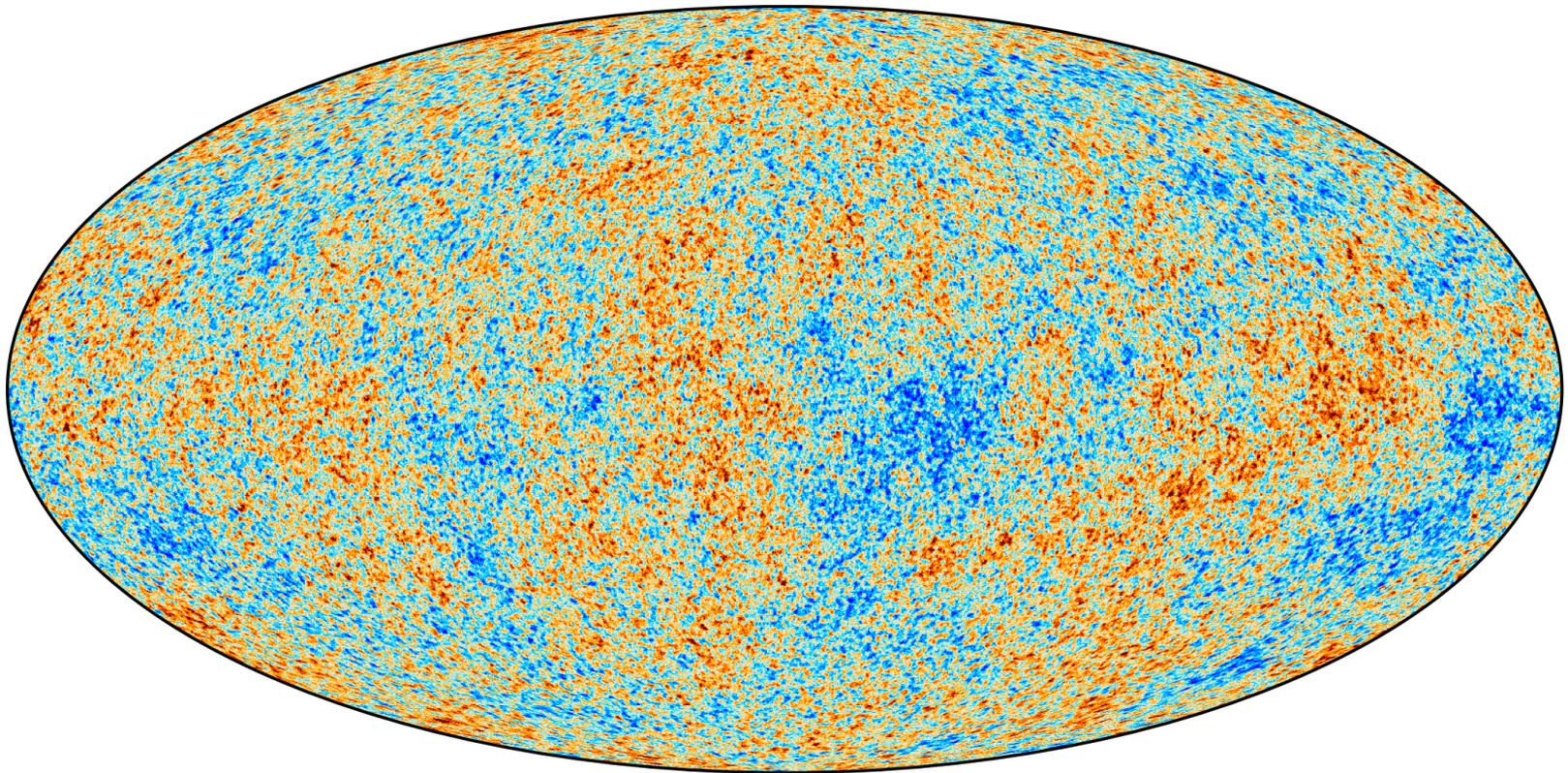
Massa	2'000 kg
Potenza	1600 W
Dimensioni	4.2 × 4.2 m
Costo	600 milioni di €

50000 componenti elettroniche
36000 litri di ⁴He
12000 litri di ³He

20 anni tra il progetto e i risultati

2 strumenti & consorzi
16 nazioni
circa 400 ricercatori

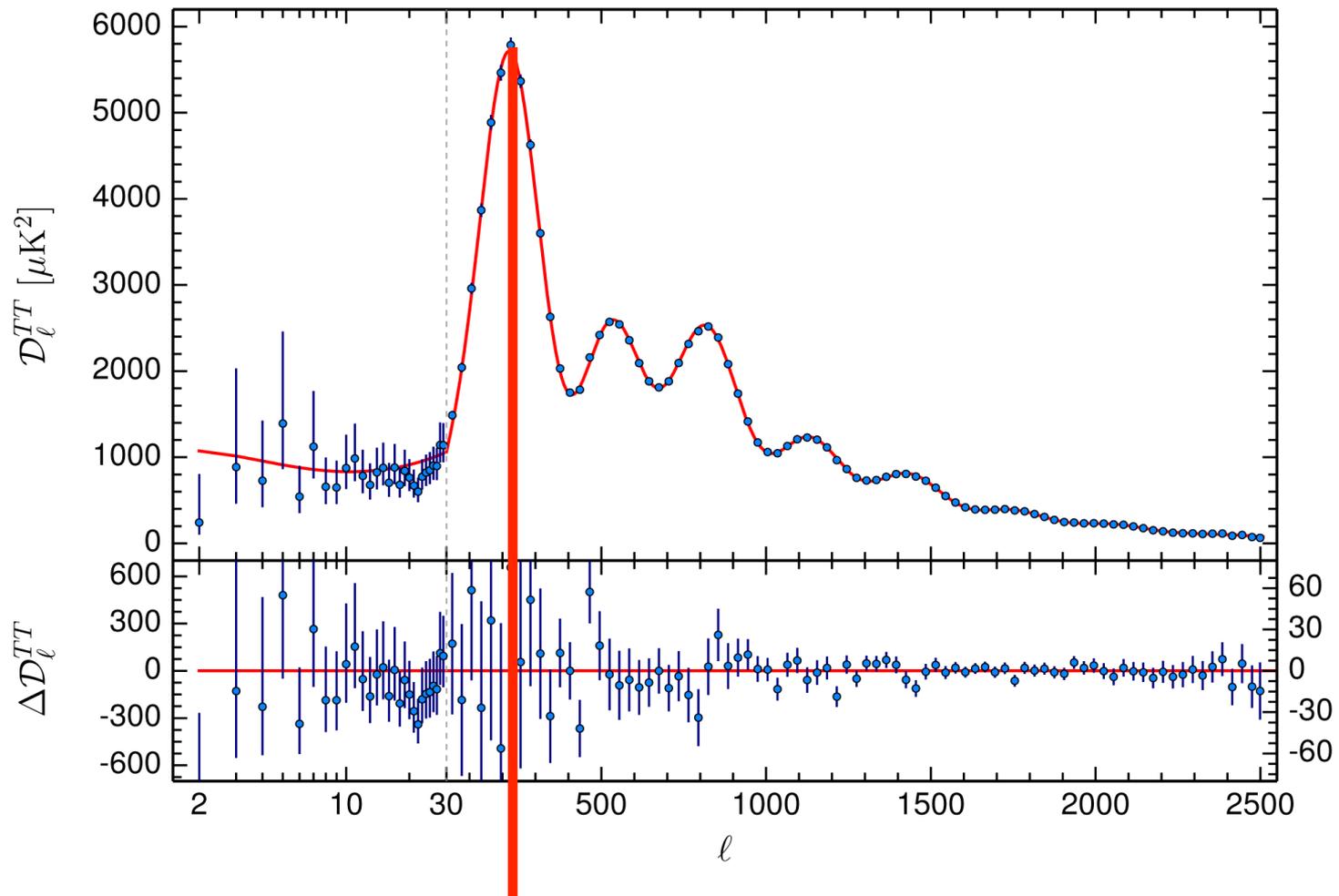
Il CMB alla risoluzione di *Planck*



The SMICA CMB map (with 3 % of the sky replaced by a constrained Gaussian realization).

Temperatura

Il “suono” dell’Universo primordiale ... secondo *Planck*

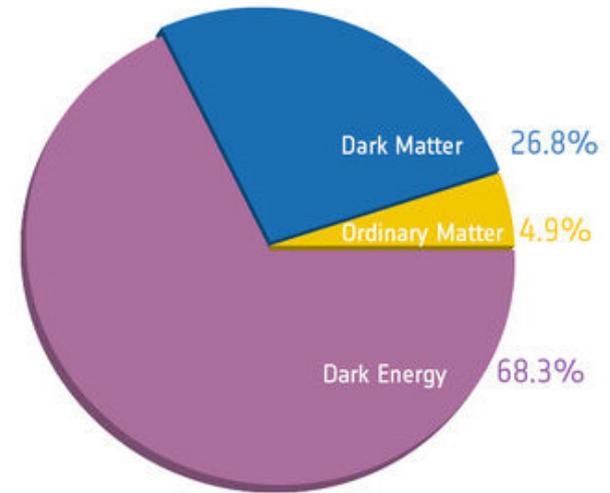


7 acoustic peaks detected!

Evidenza di spazio piatto \rightarrow DE

Planck collaboration 2015

Il “budget” energetico cosmico



- Circa il 4% del budget cosmico e' sotto forma di materia ordinaria (“barioni”), della quale solo una piccola frazione brilla nelle galassie (molto probabilmente la maggior parte della materia ordinaria e' localizzata in “filamenti” di gas ad alta temperatura nel mezzo intergalattico).
- Circa il 26% del budget cosmico e' fatto di Materia Oscura, una componente della quale percepiamo la presenza solo gravitazionalmente.
- Circa il 70% del contenuto energetico del nostro Universo e' sotto forma di una componente “esotica”, detta Energia Oscura, (“Quintessenza”, quando e' causata dall'energia di un campo scalare dinamico), che causa una forma di repulsione cosmica su grande scala tra gli oggetti celesti, mimando una sorta di effetto di anti-gravita'.

*Di cos'è fatta
l'energia oscura?*

Energia oscura ed energia del vuoto

- L'accelerazione cosmica sembra richiedere l'esistenza di un fluido capace di sviluppare una forza repulsiva, una sorta di antigravità'.
- Tale forza repulsiva è generata se l'Universo è permeato da un fluido con pressione isotropa negativa, detto Energia Oscura.
- Per ottenere un sistema con pressione negativa appare naturale ricorrere alle proprietà dell'energia del vuoto nella Teoria Quantistica dei Campi (esempio: l'effetto Casimir in elettrodinamica quantistica).

La Costante Cosmologica

geometria



materia

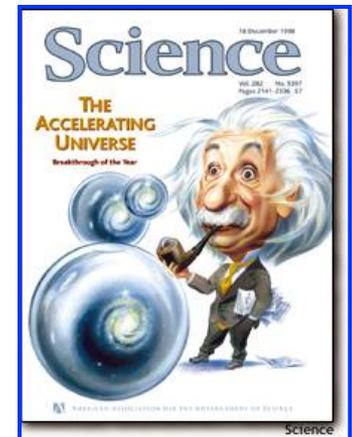


$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Quanto grande e' Λ ?

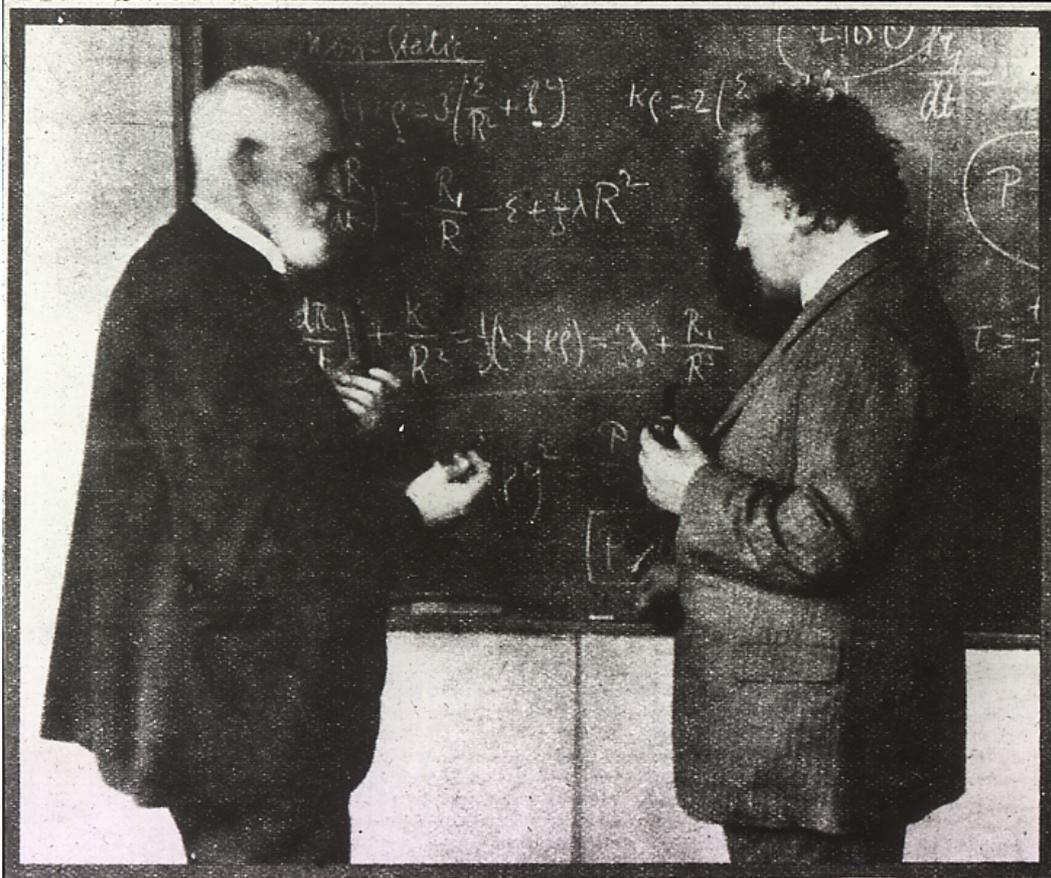
$$\rho_{\Lambda} \equiv \frac{\Lambda c^2}{8\pi G} \approx 0.7 \rho_{0c} \approx 10^{-124} m_{\text{Planck}}^4$$

$$m_{\text{Planck}} \equiv G^{-1/2} \approx 10^{19} \text{ GeV}$$



Albert Einstein

L'errore di Einstein



W. de Sitter e A. Einstein

1917: Einstein propone di introdurre una Costante Cosmologica per ottenere una soluzione statica delle sue equazioni: la gravita' e' attrattiva, la materia tende a far decelerare l'Universo; Λ spinge gli oggetti ad allontanarsi reciprocamente rendendo cosi' possibile una soluzione statica se i due effetti si bilanciano esattamente

Giugno 1922: Friedmann dimostra che la soluzione statica di Einstein e' instabile

Settembre 1922: Einstein pubblica una nota: "ho dei sospetti", "le soluzioni non appaiono compatibili"

Maggio 1923: Einstein torna sui suoi passi: "La mia obiezione si basava su un errore di calcolo."

1929: Edwin Hubble scopre l'espansione dell'Universo

1934: Einstein confessa a Gamow che l'introduzione della Costante Cosmologica nelle sue equazioni era stato il piu' grosso errore della sua vita"

1998: L'Osservazione di Supernovae di tipo Ia (+ dati su CMB e LSS) fanno risorgere la Costante Cosmologica per spiegare l'espansione accelerata dell'Universo

Problemi con la Costante Cosmologica

$\Lambda \neq 0$ e in accordo coi dati osservativi pone due problemi:

- ✓ *fine-tuning (sintonizzazione fine): perche' Λ e' cosi' piccola?*
- ✓ *coincidenza cosmica: perche' differenti forme di energia (DE, DM, barioni) hanno oggi abbondanza confrontabile?*

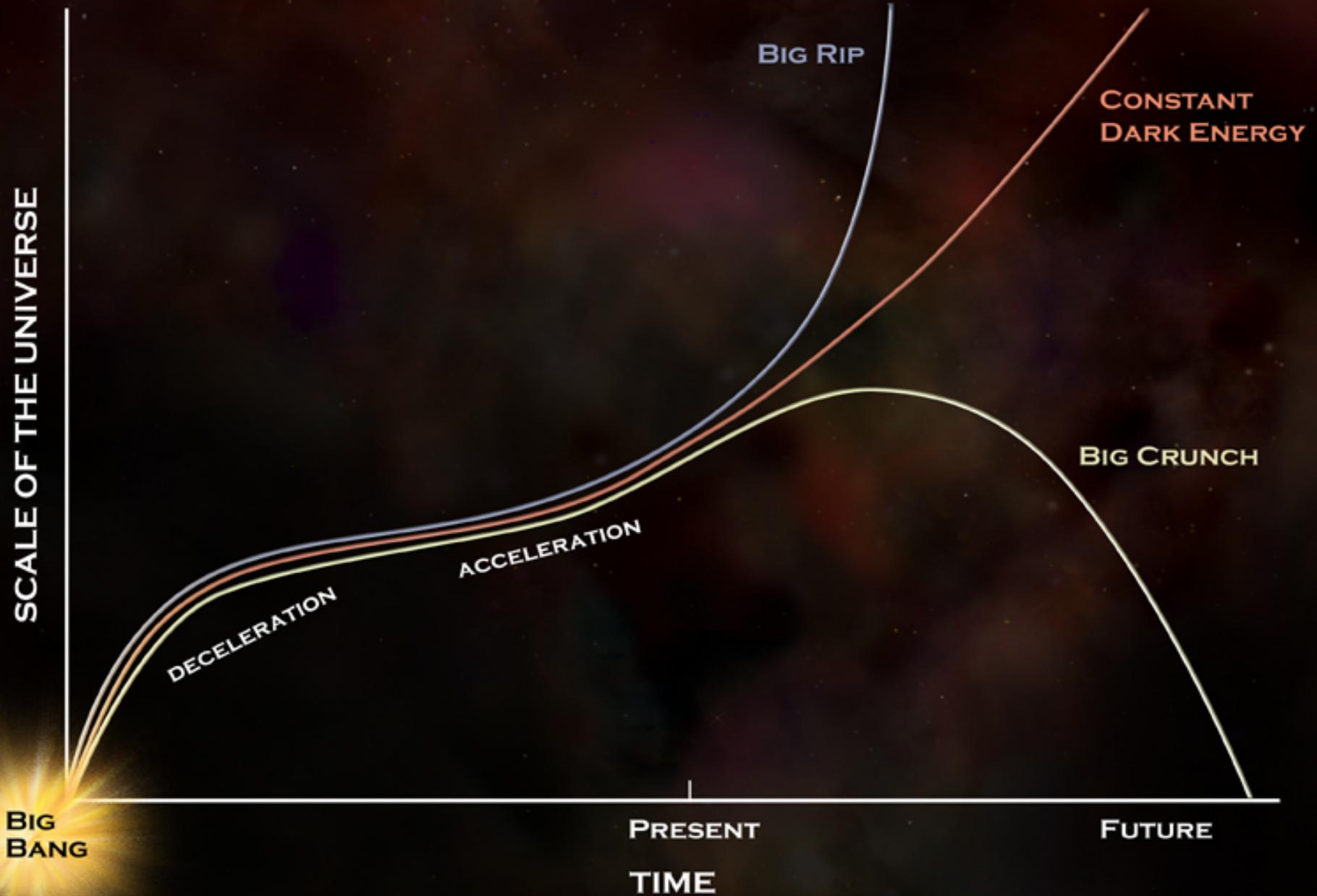
Modelli per l'Energia Oscura:

- Costante Cosmologica
- “Quintessenza”
- Modifiche della legge di Gravitazione
- “Backreaction” delle disomogeneità locali

Il destino (probabile) dell' Universo

- In tutta generalita' la presenza dell' Energia Oscura porta a ritenere piu' probabile un futuro dell' Universo di mera espansione accelerata (“cosmic no-hair theorem”) con una graduale scomparsa di tutte le strutture cosmiche: una sorta di lentissimo (infinito) congelamento e svuotamento dell' Universo.

Modello Standard": il destino dell' Universo



Falsificabilita' dell'energia oscura?

?

Prospettive osservative

- Misurare le proprietà attuali dell'Energia oscura
- Studiarne l'evoluzione cosmica
- Dedurne la natura microscopica

*Una nuova finestra sul
cosmo: le onde
gravitazionali*

14 settembre 2015: l'interferometro LIGO rivela per la prima volta un segnale di onde gravitazionali: spettacolare conferma di una delle predizioni della Relatività Generale di Einstein, **a 100 anni dalla sua formulazione!**



Albert Einstein (1879-1955)

La scoperta

- 14 settembre 2015: un team internazionale, che comprende anche molti ricercatori italiani riconosce tra i dati dell'antenna interferometrica statunitense LIGO il segnale di onde gravitazionali provenienti dal “merging” di due buchi neri di circa 30 masse solari l'uno, che nella fase finale del loro collasso in un unico sistema emettono in modo esplosivo onde gravitazionali che trasportano un'energia pari a 3 masse solari. Il sistema dista da noi un miliardo e trecento milioni di anni luce.
- Si tratta della prima rivelazione diretta di onde gravitazionali.

La scoperta delle onde gravitazionali

LE ONDE GRAVITAZIONALI

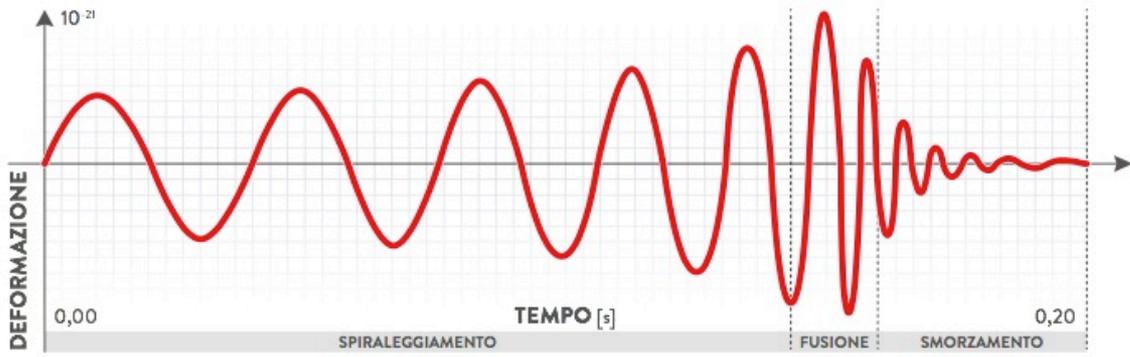
Secondo la Relatività Generale di Einstein cataclismi cosmici come scontri di buchi neri o stelle rotanti producono increspature dello spazio tempo che si propagano nel cosmo alla velocità della luce

IL SEGNALE

24 settembre 2015
Ore 09:50:45 UTC

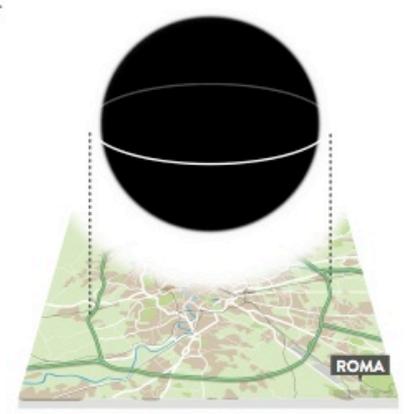
Prodotto dal passaggio di un'onda gravitazionale, è stato osservato simultaneamente dai due interferometri gravitazionali LIGO, distanti migliaia di km, in Louisiana e nello stato di Washington (USA)

Ha una durata di qualche frazione di secondo e una frequenza variabile: da 30 a 250 Hz



NUOVE FRONTIERE DELLA GRAVITÀ

Lo studio dei dati raccolti aiuterà a descrivere meglio come agisce la forza gravitazionale in condizioni estreme mai esplorate prima, in cui le leggi della gravitazione e quelle della meccanica quantistica devono essere unificate



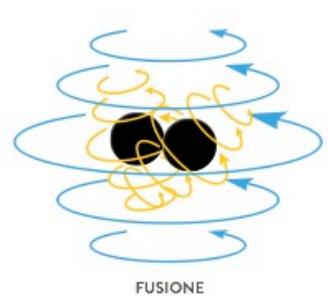
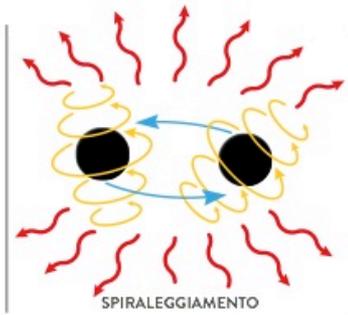
La materia è in una condizione estrema. È come se confinassimo una massa tre volte più grande del Sole in una sfera del diametro di 20 chilometri, come quello del grande raccordo anulare di Roma

UNO SCONTRO DI BUCHI NERI

L'onda è stata prodotta da un gigantesco scontro di due buchi neri distante da noi 1,3 miliardi di anni luce e quindi avvenuto più di un miliardo di anni fa

I due buchi neri di massa circa uguale (36 e 29 masse solari) si sono scontrati a una velocità di 150.000 km/s (la metà della velocità della luce)

È la prima osservazione diretta mai realizzata di un fenomeno di questo tipo



LA SCOPERTA

I dati sono stati analizzati e studiati dalle collaborazioni di LIGO e VIRGO, che è il terzo interferometro della rete internazionale. VIRGO è stato costruito presso l'European Gravitational Observatory (EGO) a Cascina (Pi), dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e dal Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

L'analisi dei dati ha confermato la prima rivelazione diretta di onde gravitazionali, che è stata annunciata l'11 Febbraio 2016 in modo congiunto a Washington e Cascina



IL FUTURO

Si inaugura una nuova stagione di esplorazione del Cosmo, in cui potremo ascoltare i fenomeni più remoti e violenti dell'universo e i sussurri dell'universo primordiale

Il segnale dell'onda gravitazionale ricevuto da LIGO

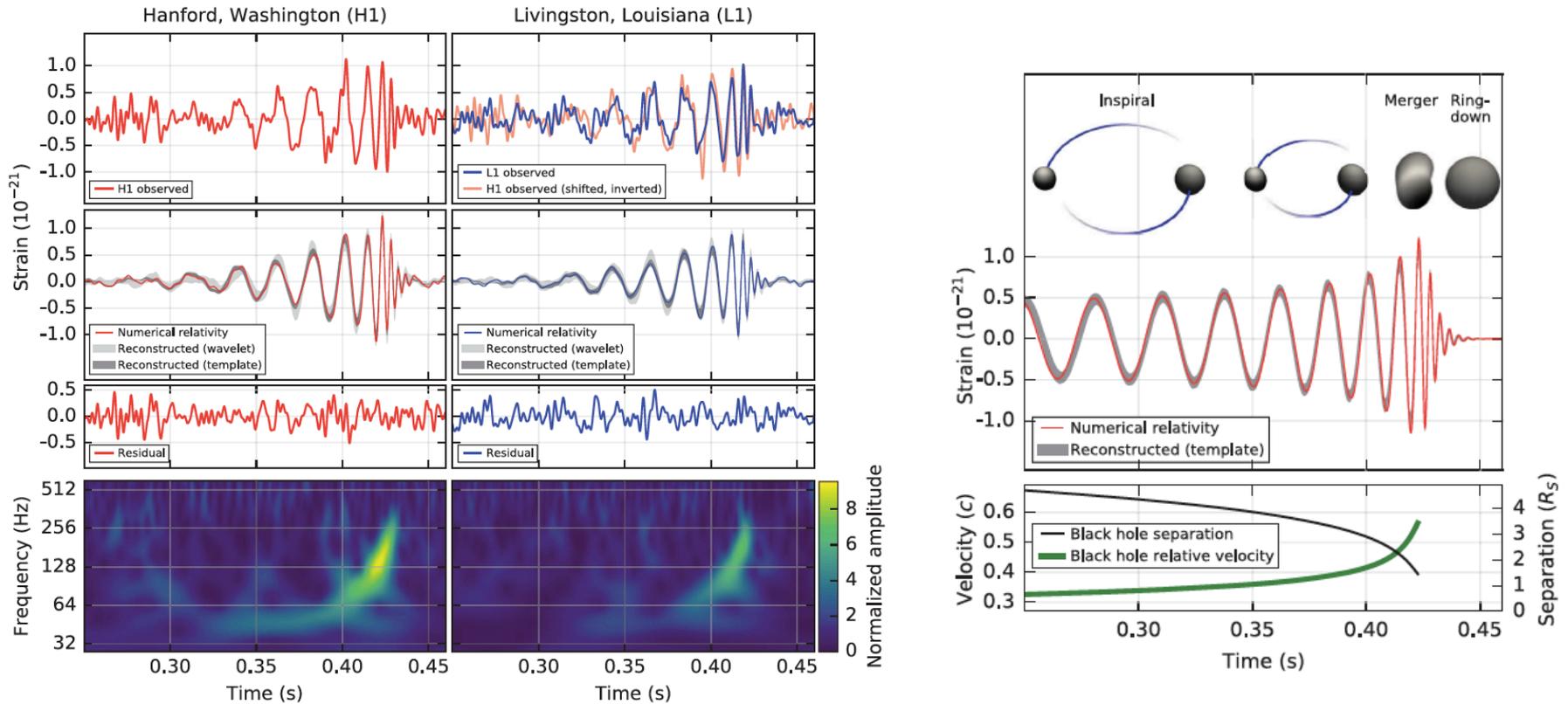
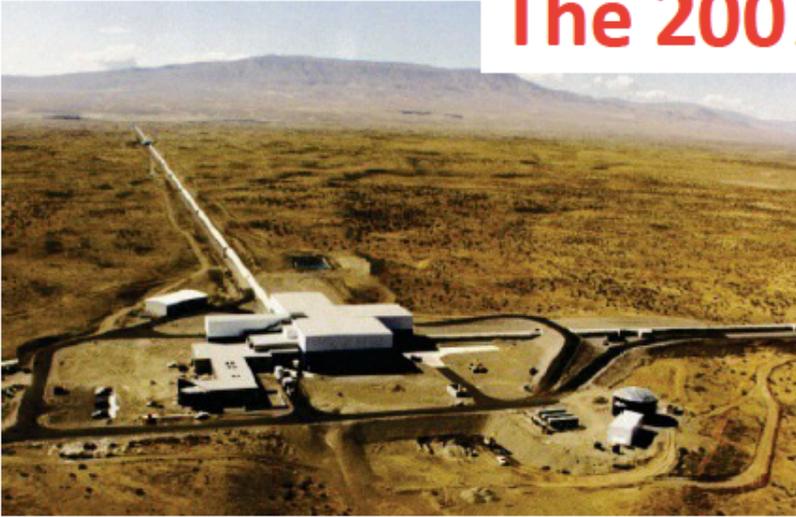


FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For visualization, all time series are filtered with a 35–350 Hz bandpass filter to suppress large fluctuations outside the detectors’ most sensitive frequency band, and band-reject filters to remove the strong instrumental spectral lines seen in the Fig. 3 spectra. *Top row, left:* H1 strain. *Top row, right:* L1 strain. GW150914 arrived first at L1 and $6.9_{-0.4}^{+0.5}$ ms later at H1; for a visual comparison, the H1 data are also shown, shifted in time by this amount and inverted (to account for the detectors’ relative orientations). *Second row:* Gravitational-wave strain projected onto each detector in the 35–350 Hz band. Solid lines show a numerical relativity waveform for a system with parameters consistent with those recovered from GW150914 [37,38] confirmed to 99.9% by an independent calculation based on [15]. Shaded areas show 90% credible regions for two independent waveform reconstructions. One (dark gray) models the signal using binary black hole template waveforms [39]. The other (light gray) does not use an astrophysical model, but instead calculates the strain signal as a linear combination of sine-Gaussian wavelets [40,41]. These reconstructions have a 94% overlap, as shown in [39]. *Third row:* Residuals after subtracting the filtered numerical relativity waveform from the filtered detector time series. *Bottom row:* A time-frequency representation [42] of the strain data, showing the signal frequency increasing over time.

The 2007 GW network



H1- Hanford – Washington state



Virgo – Cascina (Pisa) – EGO site

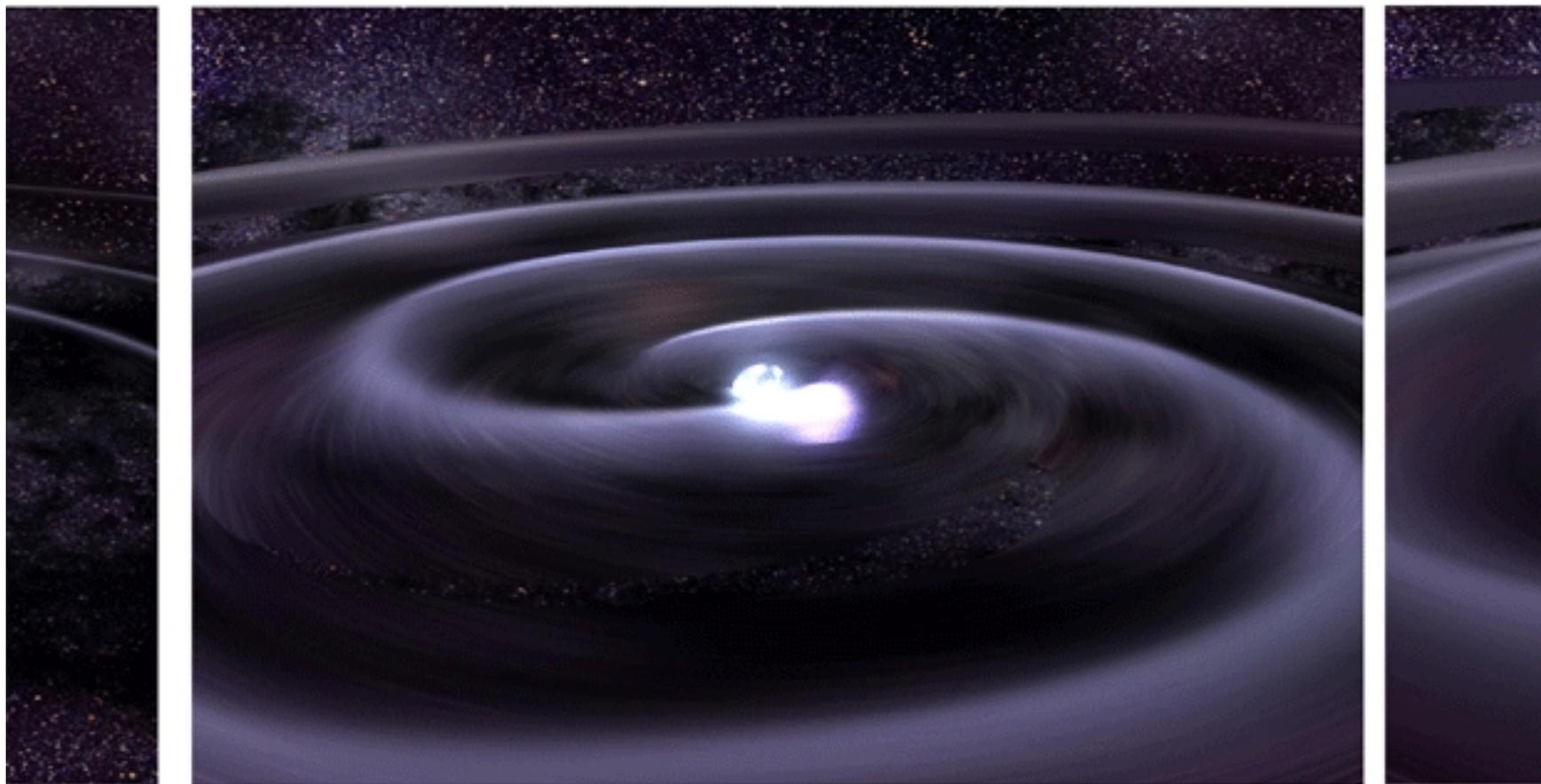


GEO600 – Hannover - Germany



L1- Livingston – Louisiana state

BH-BH merging



Finally, we have detected GWs.

But the best is yet to come!

"Recording a GW for the first time has never been a big motivation for LIGO [and Virgo]. The motivation has always been to open a new window on the Universe, to see the warped side of the Universe, an aspect never seen before: objects and phenomena made entirely or partially of warped spacetime"



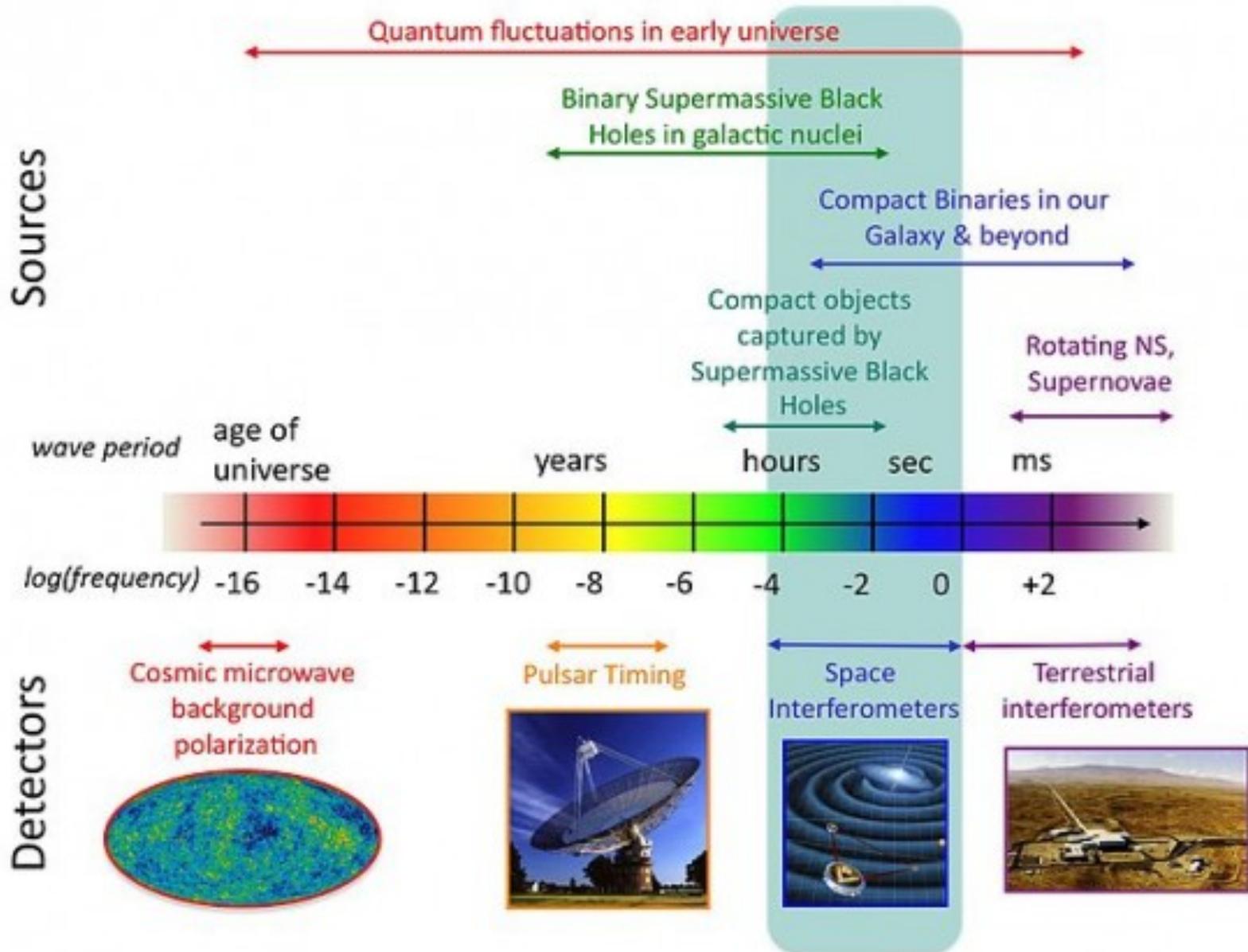
Kip Thorne

Credits: Leonardo Gualtieri

What Next?

Rome, 16/2/2016

The Gravitational Wave Spectrum



Il prossimo passo: LISA, antenna interferometrica spaziale

- La Laser Interferometer Space Antenna (LISA) è una missione dell'[European Space Agency](#) dedicata alla ricerca di onde gravitazionali di bassa frequenza emesse da sorgenti astrofisiche. Una missione di esplorazione, [LISA Pathfinder](#), è stata lanciata da ESA il 3 Dicembre 2015 ed è attualmente in presa dati; LISAPathfinder non farà ricerca diretta di onde gravitazionali ma servirà a testare le tecnologie che saranno utilizzare da eLISA
- LISA sarà la prima antenna gravitazionale spaziale ed ambisce a misurare direttamente onde gravitazionali, utilizzando una tecnica interferometrica. L'idea di LISA è quella di utilizzare tre satelliti con distanze di 1 milione di km, su un'orbita eliocentrica. Il lancio è attualmente previsto attorno al 2034.

Conclusioni 1

- A partire dalla metà degli anni '80 e' gradualmente emersa una lettura della cosmologia secondo la quale l'Universo su scale di distanza molto maggiori di quelle accessibili (in linea di principio) alle osservazioni e' verosimilmente dotato di proprietà del tutto diverse da quelle a noi familiari. La regione del cosmo da noi abitata e l'epoca cosmica in cui viviamo appaiono avere caratteristiche peculiari che possono venir considerate come una sorta di criterio di selezione nella costruzione delle leggi fisiche che regolano il nostro essere nel cosmo ed analizzarne le proprietà'.
- In questo quadro appare del tutto ragionevole pensare che l'Universo nel suo insieme non abbia mai avuto inizio e non avra' mai fine.

Conclusioni 2

- Abbiamo convincente evidenza da molte osservazioni indipendenti che l'energia dell'Universo attuale sia dovuta per circa un quarto a materia prevalentemente oscura e di origine particellare, e per i restanti tre quarti da una misteriosa forma di energia oscura che ne causa l'espansione accelerata.
- Prospettive future: i) rivelare la composizione della materia oscura; ii) studiare le proprietà e l'evoluzione dell'energia oscura attuale; iii) comprenderne la natura!
- Dal superamento di questa "crisi" dei nostri modelli fisici potrà nascere un nuovo livello di comprensione delle leggi del Cosmo.

“L’eternita’ e’ lunghissima, specialmente verso la fine”

Woody Allen