

Firenze, 11.05.2018

Spazio, tempo, materia attraverso un secolo di rivoluzioni

Gabriele Veneziano



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—



Il secolo della fisica?

Penso di sì:

Un secolo che ha cambiato la fisica e, con essa, la
nostra vita

(il laser, il computer, internet, la medicina, le
risorse energetiche, ahimé le armi...)

Due periodi particolarmente fecondi:

- 1900-1930
- 1965-1975 (per mia fortuna!)

CV (1960-1967)

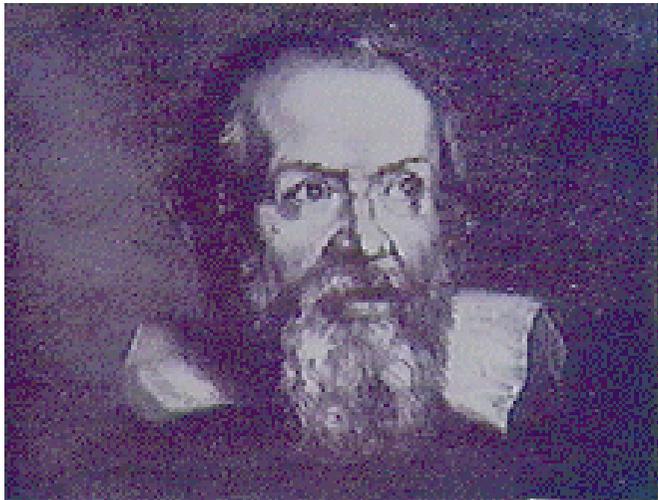
- 1960: iscritto a Fisica all'Università di Firenze.
- 1963: stavo per prendere una tesi di Laurea in **fisica sperimentale** delle particelle.
- 1963: **Raoul Gatto** (deceduto lo scorso anno a 87 anni) prende la cattedra di **fisica teorica** a Firenze. Poco dopo, gli chiedo di darmi una tesi in fisica teorica.
- Fine 1965: Laurea
- Autunno 1966: inizio studi per Ph.D. al Weizmann Institute, Israele.
- Fine 1967: Ph.D. in fisica

Due rivoluzioni all'inizio del XX secolo:

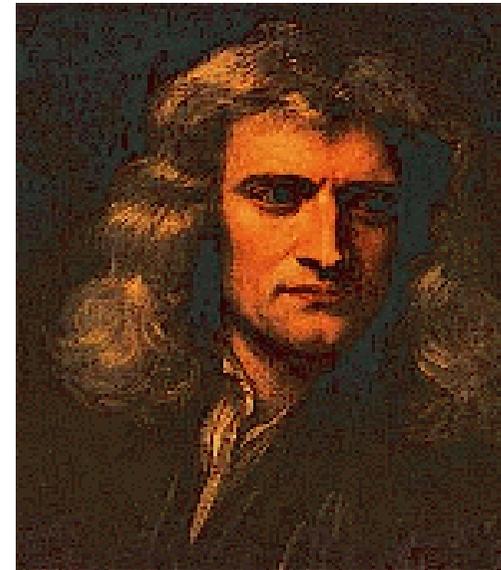
- **1905-1916** : Relatività ristretta e generale = nuova descrizione del **tempo** e dello **spazio**
- **1900-1930** : Meccanica quantistica (non relativistica) = nuova descrizione della **materia**

Il Tempo nella fisica prima di Einstein

Galileo
(1564-1642)



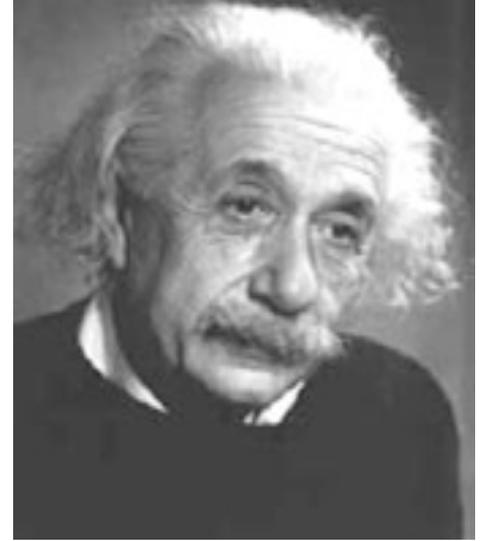
Newton
(1642-1727)



Il Tempo (meglio: un intervallo di tempo) è sempre lo stesso indipendentemente dall'osservatore che lo misura

Albert Einstein (1905)

Relatività Ristretta



Fine del tempo assoluto

Intervalli di tempo dipendono dal moto relativo dell'osservatore e dell'osservato

Esempio: la vita media di una particella instabile ha un preciso valore per un osservatore che viaggia insieme ad essa, ma è dilatata di un fattore :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \geq 1$$

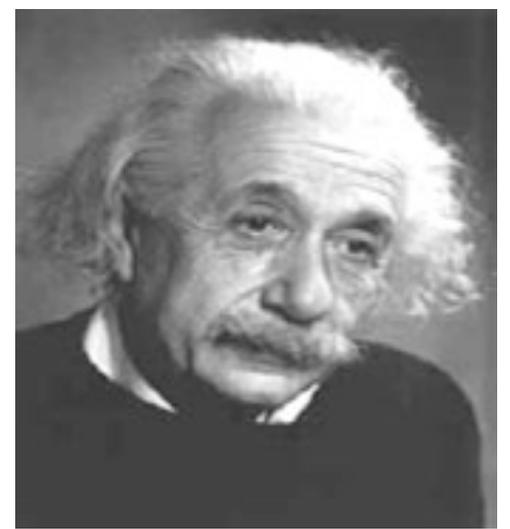
per un osservatore che si muove con velocità v rispetto a lei (uso in fisica degli acceleratori, ad es. al CERN)

$$E = mc^2$$

- Massa ed energia possono trasformarsi l'una nell'altra:
- **Massa** → **energia** (centrali nucleari)
- **Energia** → **massa** (collisioni fra particelle)

Albert Einstein (1915)

Relatività Generale



Fine di una geometria assoluta

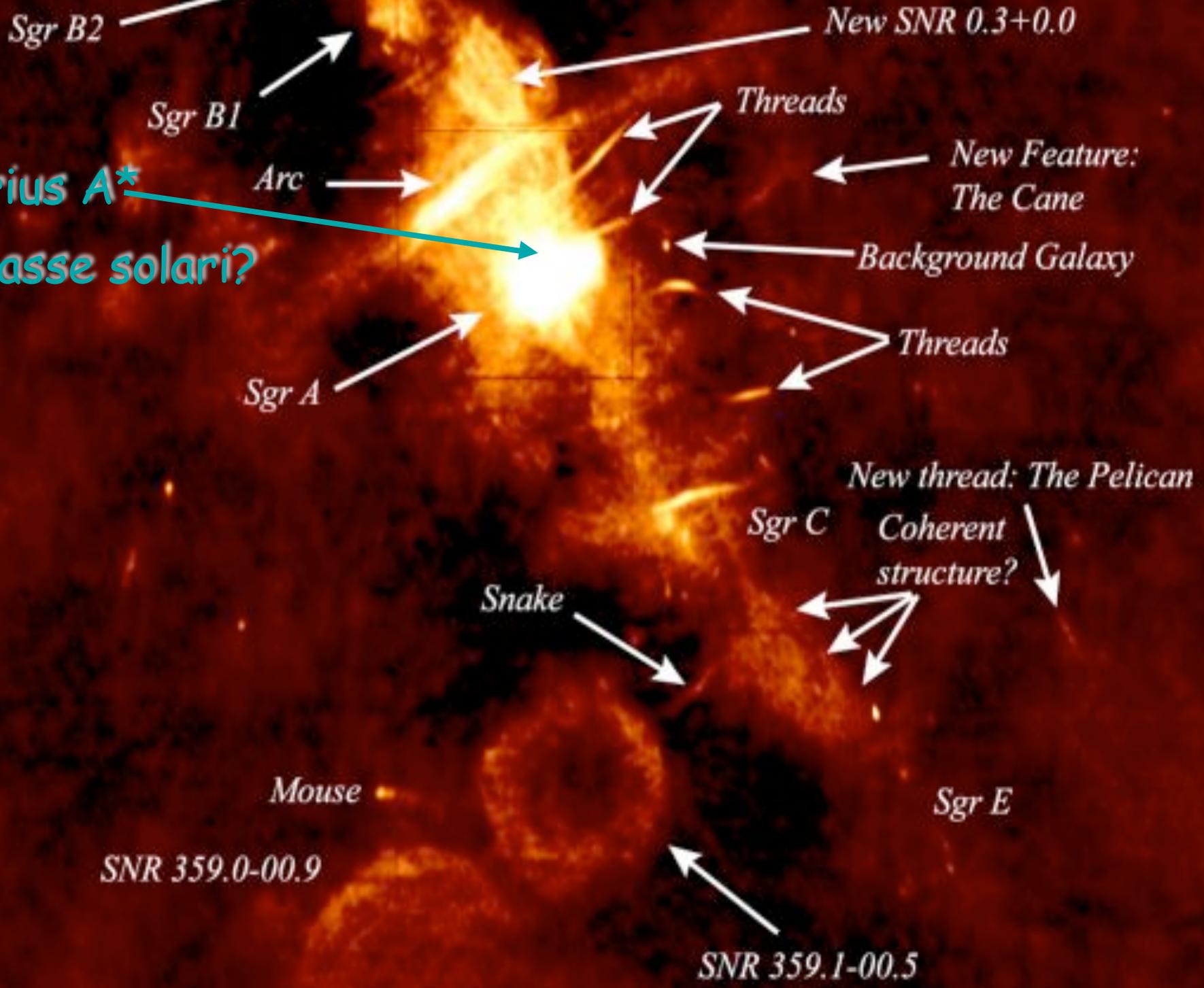
Gli intervalli di **tempo** dipendono anche dal valore del **campo gravitazionale** ove si trova l'orologio

Esempio: Se sincronizziamo due orologi sulla terra e ne portiamo uno ad alta quota per un certo tempo, troveremo che, una volta riportato su terra, quest'ultimo sarà leggermente in anticipo sul primo.

Un effetto della RG verificato e perfino **usato nel GPS**.

- Solo in assenza di materia la geometria é quella di Euclide. La **materia/energia curva lo spazio** e in modo che dipende dal tempo ("curva lo spazio-tempo") => cosmologia
- Una **teoria geometrica della gravità**.
- Buchi neri, onde gravitazionali, deflessione della luce, espansione dell'Universo, big bang...sono esempi di predizioni confermate della teoria.

Sagittarius A*
 $M > 10^6$ masse solari?



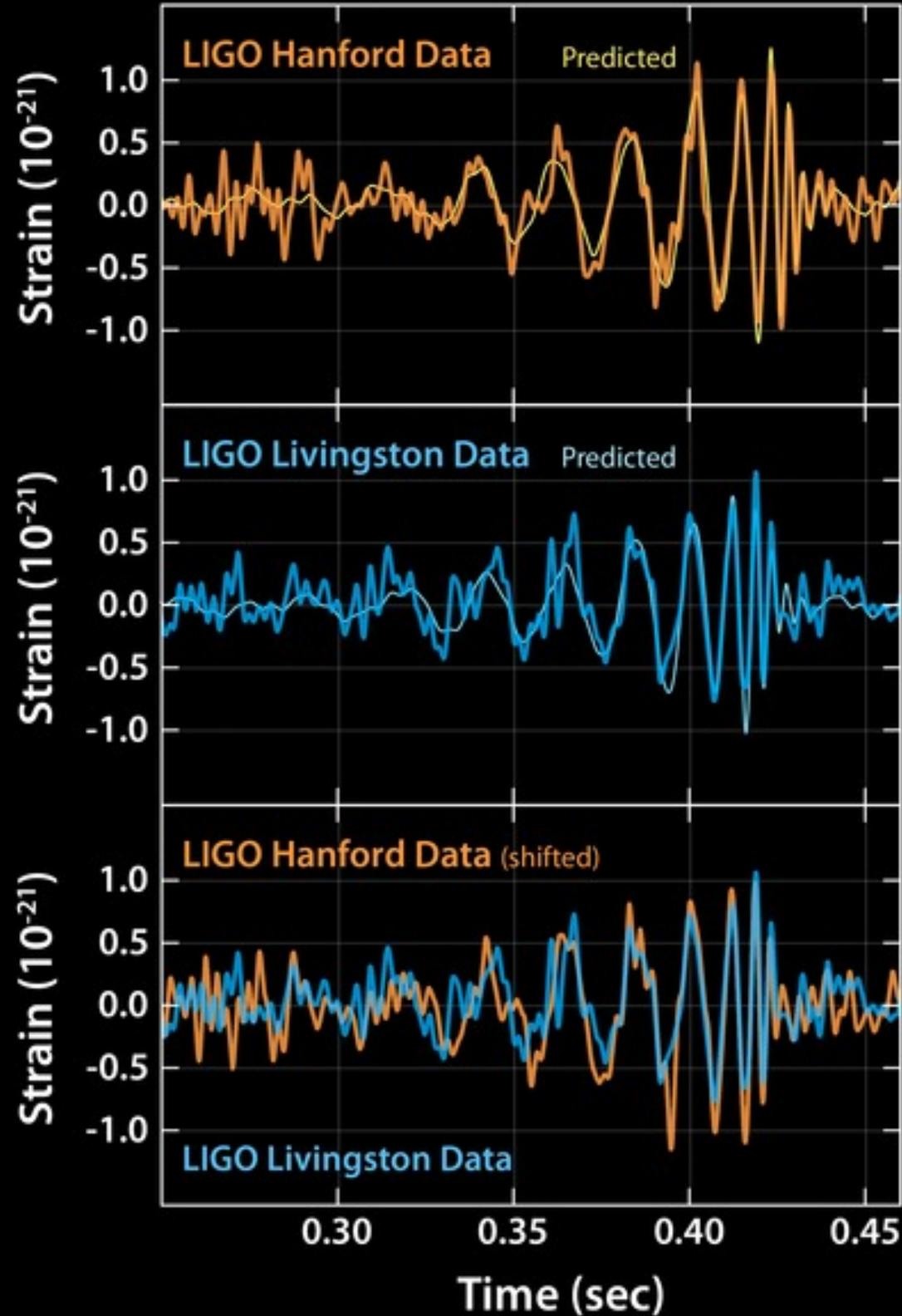
LIGO (USA)

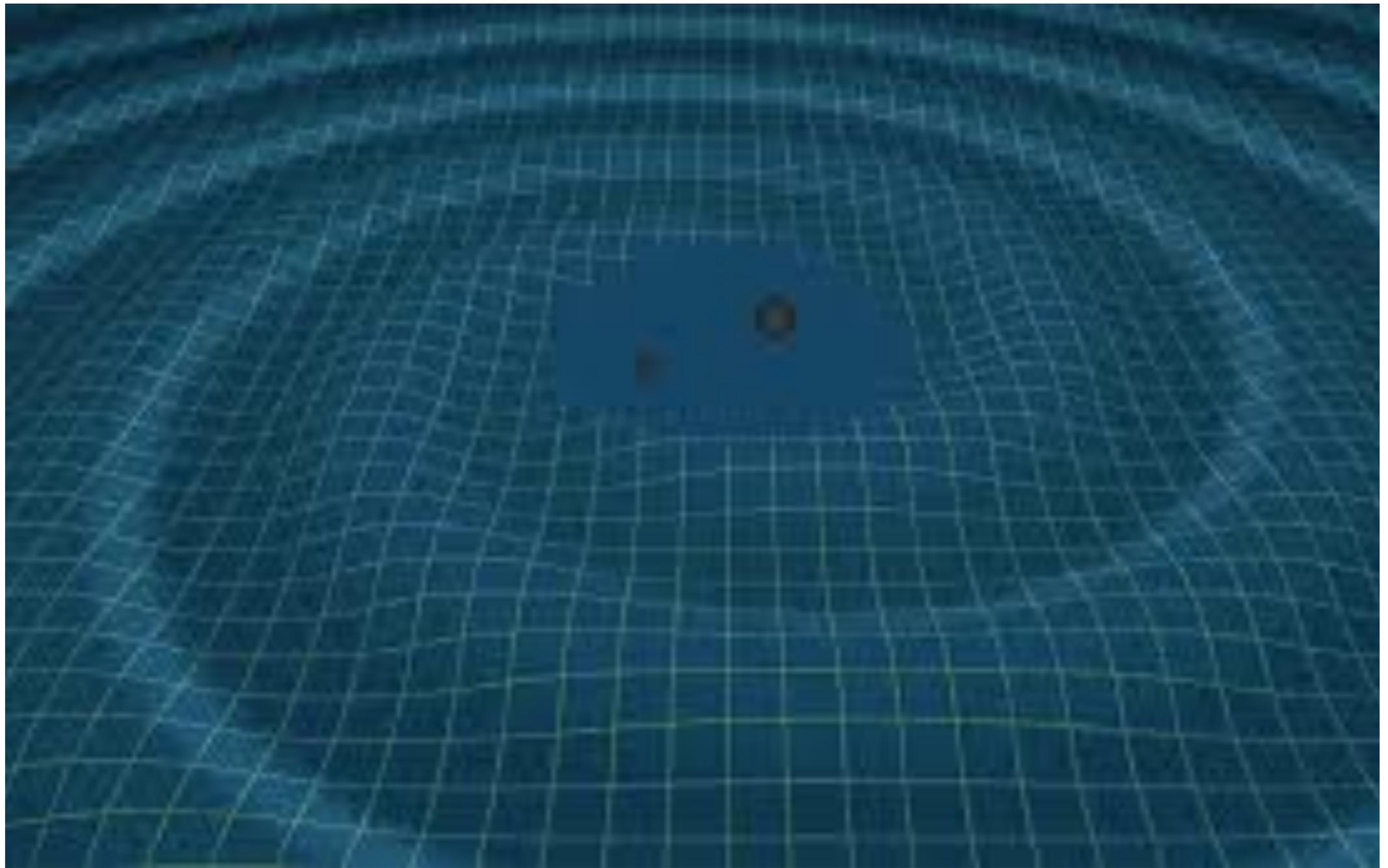


VIRGO (Cascina)

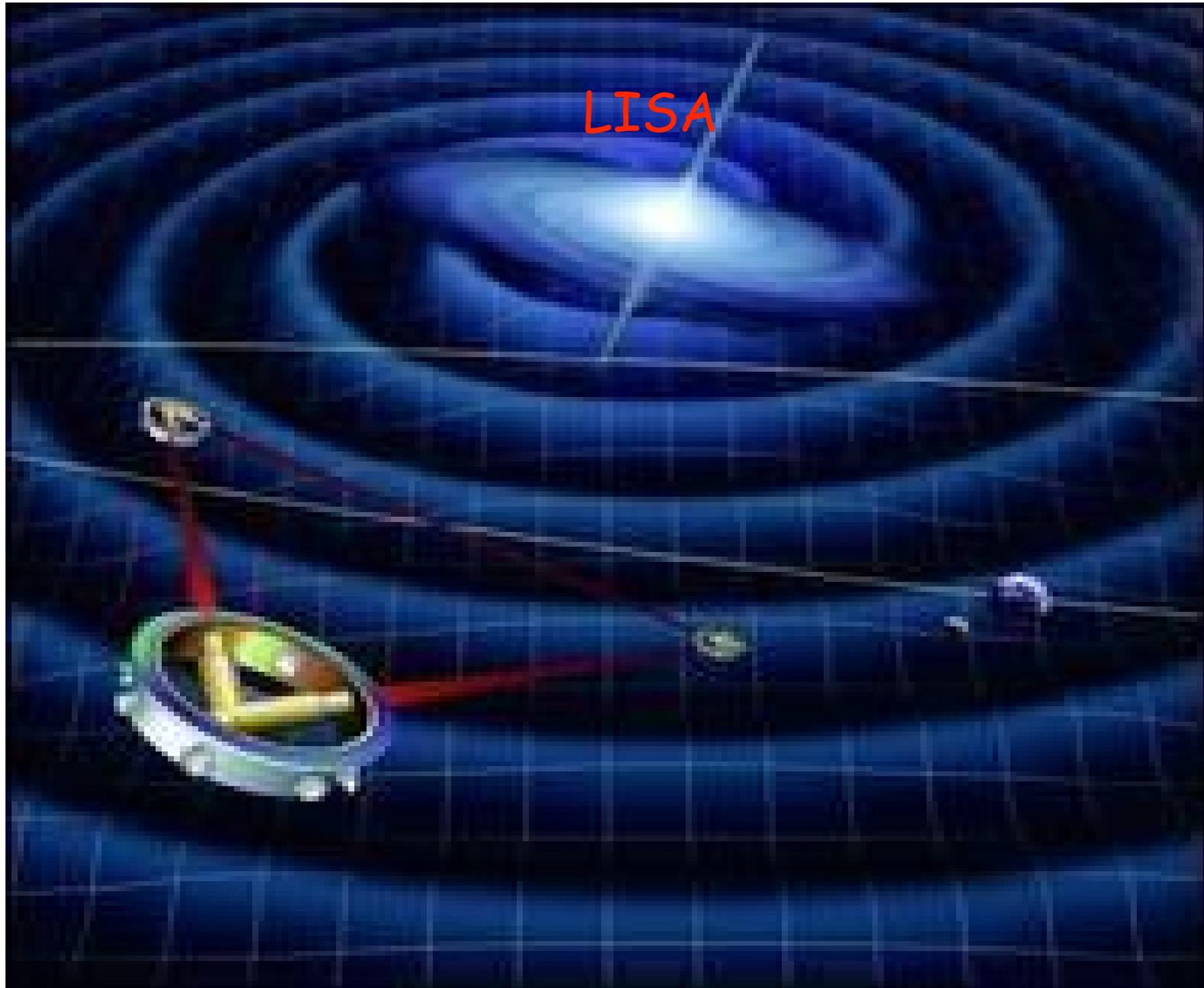


(15.09.2015)
Rivelazione di
OG a LIGO
+ conferma
dell'esistenza
dei buchi neri





Ormai approvato : lancio ~ 2032?



Dopo il nuovo tempo e il
nuovo spazio:

La nuova materia

(1900-1930) La meccanica quantistica:
nuova descrizione del mondo microscopico
Fine del determinismo ($\Delta x \Delta p > h$, Heisenberg)



1900 Max Planck introduce la costante **h**

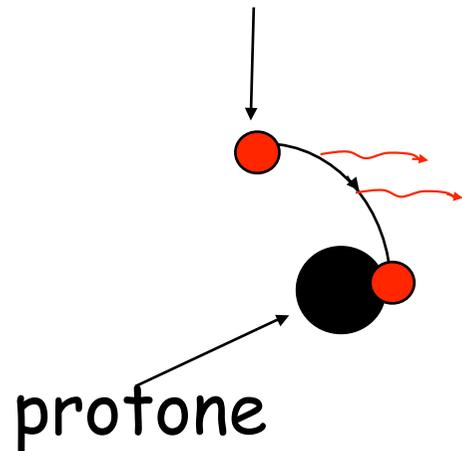
Una nuova descrizione della materia al livello microscopico (atomi, molecole, luce => laser, computers,...)

La stabilità degli atomi: es. atomo d'idrogeno

meccanica classica

($h=0$)

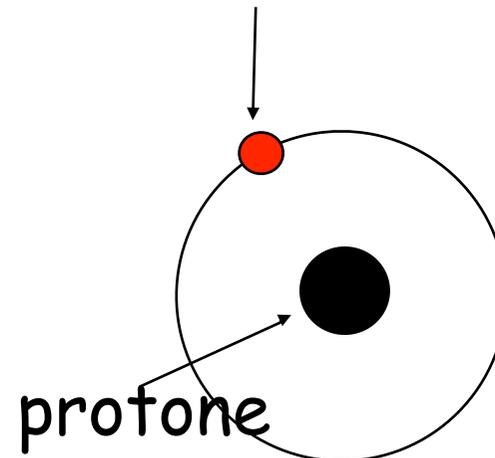
elettrone



meccanica quantistica

($h \neq 0$)

elettrone



0,00000000001 m = 10^{-10} m

La MQ impedisce all'atomo di collassare

Le due rivoluzioni, sebbene parallele, si svilupparono indipendentemente

- La **relatività** ignorando la **meccanica quantistica** (es. gravità per sistemi macroscopici).
- La **meccanica quantistica** ignorando la **relatività** ristretta (limitandosi a $v \ll c$) e, ancor più a lungo, quella generale (trascurando la gravità).

1940-65

Il mondo delle particelle si arricchisce

Nuove particelle e nuove forze vengono evidenziate e studiate

Queste particelle, leggere, si muovono con $v \sim c$ (il fotone con $v=c$) e la necessità di combinare MQ e RS inizia a farsi sentire

Subito dopo la 2^a g.m. il problema fu affrontato in modo serio.

Il connubio fra MQ e RS non fu facile ma, alla fine, si giunse (1946-1949) a una **teoria altamente predittiva** per i fenomeni elettromagnetici quantistici, la **QED** (Nobel FST, 1965). Esempio: $(g-2)_\mu$

Esper. 0.0011659209

Teoria: 0.0011659180

Discrepanza $\sim 3\sigma$
con errore teorico
dovuto ad altre interazioni



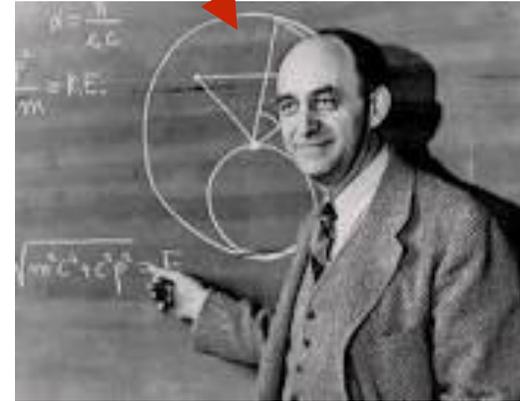
Le quattro forze elementari

- La forza **elettromagnetica** (atomi, molecole)
- La forza **debole** (radioattività)
- La forza **forte** (o nucleare)
- La **gravità** (sistema solare, gravità terrestre)

Alla fine degli anni '40 si poteva dire che sia la forza **gravitazionale** che quella **elettromagnetica** erano sotto controllo (sebbene trattate diversamente v.a.v. della MQ).

Cosa ne era delle **altre due forze** (entrambe a corto raggio)?

Entrambe erano state affrontate negli anni 30 da lavori indipendenti di **Fermi (1933)** per le interazioni deboli e di **Yukawa (1935)** per quelle forti.



Nel secondo caso si postulava l'esistenza di una particella con massa, il **pione**, per spiegare il corto raggio di azione delle interazioni nucleari, particella poi identificata (1947).

Ma, nonostante molti tentativi, **non** si era riusciti a rendere queste teorie **altrettanto coerenti** che la QED o la RG.

Verso la metà degli anni sessanta la **situazione** appariva per lo meno **confusa**.

Per le interazioni deboli era stato appena proposto (1964) il meccanismo di **Brout-Englert-Higgs**, ma non era chiaro come usarlo.

Questo ci porta al **decennio magico (1965-1975)** durante il quale la situazione cambio' radicalmente nel giro di qualche anno..

Il secondo periodo aureo: 1965-1975

Una volta capito ('tH-V ~1970) come il meccanismo BEH poteva rimuovere gli ostacoli trovati nella teoria di Fermi si giunse velocemente a **combinare interazioni deboli e elettromagnetiche** nella cosiddetta teoria elettro-debole (premio Nobel **GWS 1979**), una teoria altrettanto predittiva che la QED e che **unifica** concettualmente quelle **due interazioni**, pur spiegandone le marcate differenze.

Le conferme sperimentali si sono succedute: le "correnti neutre", i bosoni **W^+ -e Z^0** (CERN, 1983, PN **Rubbia 1984**) ... per finire con la scoperta del **bosone di Higgs** (CERN, 2012).

Una storia a parte fu quella delle interazioni forti sulla quale spenderò qualche minuto in più.

Particelle < 1967

1. I leptoni

L' **elettrone**, già noto dalla fine del 1800.

Il **muone**, una specie di elettrone pesante (scoperto nel 1936), il **neutrino** (postulato da Pauli nel 1930, rivelato nel 1956) e poi (1962) scoperto manifestarsi in due varietà, il ν_e e il ν_μ (più tardi una terza "coppia" è stata identificata).

I leptoni non **sentono** la forza nucleare. La teoria elettro-debole é sufficiente a descriverne le interazioni.

2. Gli adroni

Prima degli anni 60 si pensava che le particelle **elementari** soggette alla forza nucleare (detti adroni) **fossero** i costituenti dei nuclei: il **protone**, il **neutrone**, nonché i “**mesoni**” come il **pione di Yukawa**, visti come i vettori di tale forza.

•Ma, al contrario dei leptoni, la famiglia degli adroni era estremamente prolifica. Nuovi membri (per lo più meta-stabili) venivano scoperti via via che cresceva l'energia disponibile agli acceleratori: uno **zoo** che sembrava voler **crescere senza fine**.

Le interazioni forti ~ 1967

I metodi usati per trattare le interazioni elettrodeboli sembravano totalmente inadeguati.

Nessuna teoria convenzionale sembrava a portata di mano. In sua mancanza si usava una manciata di **modelli** capaci di catturare l'**uno o l'altro** aspetto di quella forza come:

- Il suo **corto raggio** di azione;
- Il rispetto di certe **simmetrie** (ad es. sotto scambio destra-sinistra) violate nelle int. deboli.
- Ma la **situazione** appariva del tutto **bloccata**

Fu in quel clima che nacque, **50 anni fa**, la **teoria delle stringhe**.

Nel giro di pochi anni venne formulata una teoria rivoluzionaria in cui gli adroni, al contrario dei leptoni, avevano una **struttura estesa, unidimensionale**, cordiforme, "stringhesca" (con cattivo inglesismo)

La ricchezza dello zoo adronico era il risultato delle **molte possibili vibrazioni** della stringa.

Queste, grazie alla MQ, davano luogo a **valori discreti della massa** (da confrontare con quelli osservati).

Secondo questa nuova filosofia, una teoria di adroni puntiformi era destinata a fallire. Le interazioni forti andavano trattate in modo completamente diverso da quello sperimentato con successo per le interazioni elettro-deboli.

Ma la teoria più convenzionale, apparentemente sconfitta, non aveva ancora detto la sua ultima parola... e tirò fuori un'arma insospettata.

Pur accettando che protone, neutrone, pioni etc. fossero oggetti non puntiformi, stipulò che questi fossero composti di altre particelle elementari (i quark), esse invece sì puntiformi.

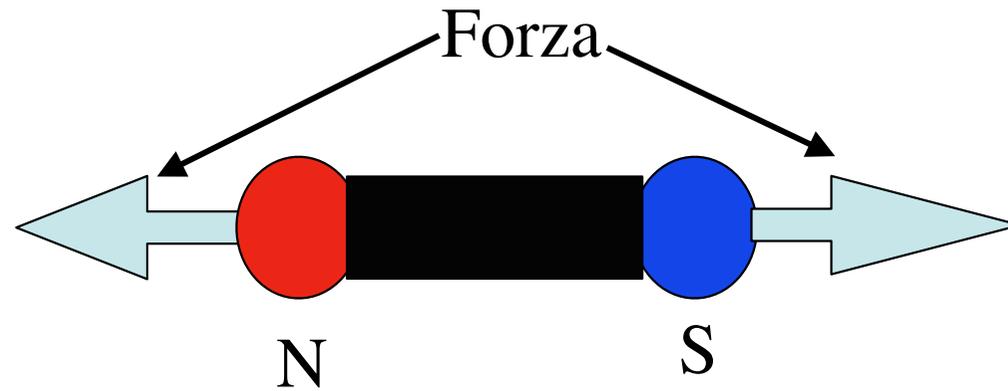
Era in termini di questi ultimi che si doveva formulare una teoria **simile** a quella delle altre **due interazioni!**

Uno solo piccolo problema: nessun esperimento aveva **mai osservato un quark** (con la sua carica frazionaria)!

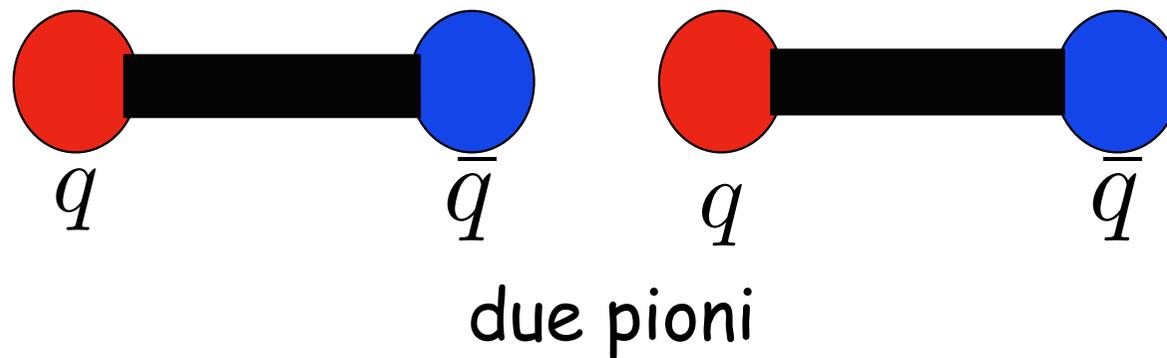
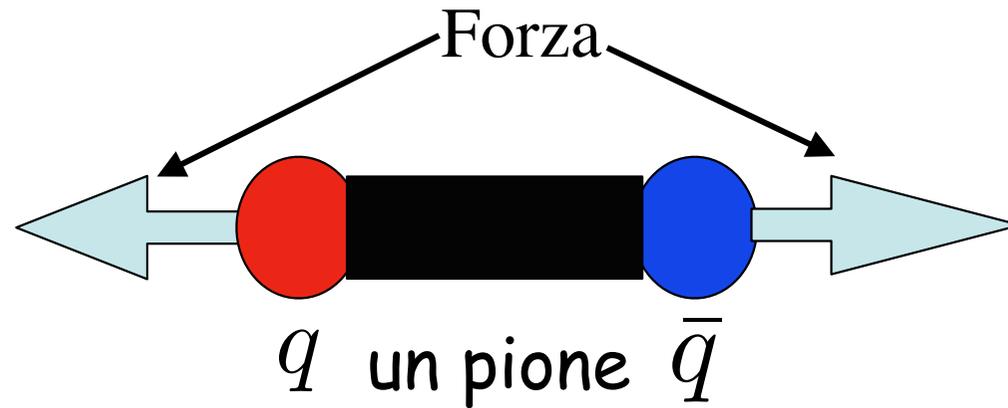
Una teoria convenzionale, ma per particelle mai osservate? Sembrava poco serio... e invece.

Si postulò che questa teoria, battezzata **QCD** (per cromo-dinamica quantistica), godesse di **una proprietà inedita**: un'interazione attrattiva fra i quark che cresce con il crescere della loro separazione cosicchè **nessuna quantità di energia**, per quanto grande, avrebbe mai potuto **"ionizzare"** un "atomo" fatto da un quark e un antiquark (es. un pione) o da tre quark (es. un protone).

Analogia con un magnete (quarks => poli)



Analogamente



- Questi tubi di campo (cromo)elettrico **somigliano a delle stringhe** uni-dimensionali.
- Ma la stringa della QCD **non** può essere **così semplice** come quella trovata negli anni sessanta.
- Cercare di descriverla in termini precisi è divenuto nuovamente **un problema alla moda** (legato a uno dei "7 quesiti del millennio" del Clay Institute of Mathematics).
- Dal 1973-74 l'insieme della teoria **elettro-debole** e della **QCD** hanno definito il cosiddetto **Modello Standard** delle interazioni **non gravitazionali** e delle particelle elementari ad esse soggette.
- Un altro vero **trionfo della fisica del XX secolo!**

Il Modello Standard

Standard Model of Elementary Particles

		three generations of matter (fermions)				
		I	II	III		
QUARKS	mass	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
	charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
	spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
		u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs
		$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
		d down	s strange	b bottom	γ photon	
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	0	
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
		e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS		$\approx 2.2 \text{ eV}/c^2$	$\approx 1.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
		0	0	0	± 1	
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

SCALAR BOSONS

GAUGE BOSONS

Morte e rinascita della stringa

- Fu **un duro colpo** per la vecchia teoria delle stringhe che venne praticamente accantonata per un buon decennio... fin quando un famoso articolo di **M. Green** e **J. Schwarz** (1984) riportò di nuovo le stringhe alla ribalta (altrimenti non saremmo qua a celebrarne il compleanno!)
- **G&S** dimostrarono la viabilità di una proposta (**J. Scherk** e **J. Schwarz**, 1974) secondo la quale la teoria delle stringhe **nella sua versione originale** andava usata per descrivere le particelle **considerate come puntiformi nel MS**, dunque i quark stessi, gli elettroni, i fotoni, il bosone di Higgs e, *dulcis in fundo*, il **gravitone**.

Le nuove stringhe

Standard Model of Elementary Particles

		three generations of matter (fermions)				
		I	II	III		
mass		$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
charge		$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
		u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs
	QUARKS					SCALAR BOSONS
		$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
		d down	s strange	b bottom	γ photon	
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	0	
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
		e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	LEPTONS				GAUGE BOSONS	
		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
		0	0	0	± 1	
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

+ il gravitone

- Il **gravitone** e' un **quanto di onda gravitazionale** come il fotone lo è per un'onda elettromagnetica.
- Una **teoria quantistica della gravità** che concilia le **due grandi rivoluzioni** dell'inizio del secolo XX di cui abbiamo parlato.
- Fu battezzata, con non poca presunzione, la teoria di tutto (**TOE**).
- É basata su alcuni "**miracoli**" della stringa quantizzata su cui non ho tempo di soffermarmi (vedasi conferenza all'AISF, Pisa, 21.04.2018)

CISF, Pisa, 21.04.2018

La teoria delle stringhe: vita, morte, miracoli

Gabriele Veneziano



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—



*Cambiamo invece argomento, almeno
momentaneamente*

La cosmologia moderna

L'inizio

Hubble, 1929

- **Spostamento verso il rosso** della luce emessa dalle stelle più lontane:

➔ L' Universo è in **espansione!**

Penzias & Wilson, 1964

- Fondo di **radiazione fossile** a $T_0 \sim 2,7$ K:

➔ L'Universo è stato caldo, anzi caldissimo!

La vecchia (<1980) cosmologia

- L'Universo è nato, circa 13,5 miliardi di anni fa, in uno stato ad altissima **temperatura** e **densità**. Una **singularità***) ci impedisce di rimontare oltre.
- Da allora, l'Universo **è cresciuto** enormemente, all'inizio in maniera molto rapida, poi sempre più lentamente.
- Così facendo, si è **diluito** e **raffreddato**.
- È la cosiddetta **cosmologia del big bang caldo**

*⁾ Istante in cui queste grandezze fisiche divengono infinite

Questo istante, invalicabile, rappresenta la definizione tradizionale del **Big Bang** come **inizio del tempo**.

È anche quella comunemente nota al (e accettata dal) pubblico.

I: Successi della cosmologia del BB caldo

1. **Fondo fossile** di radiazione a 2,7 K
2. **Sintesi dei nuclei leggeri** nell'universo primordiale
3. **Formazione delle stelle** e sintesi dei nuclei pesanti (es. carbonio!)

II: Misteri della cosmologia del BB caldo

1. Materia oscura
2. Energia oscura
3. Asimmetria materia-antimateria
4. Omogeneità e isotropia

1. Materia Oscura

Esiste nell'Universo una forma di materia che **non emette alcuna radiazione osservabile** e che si manifesta solo tramite l'attrazione gravitazionale che essa esercita sulla materia "visibile" delle galassie.

Rappresenta circa il **25%** dell'energia totale nell'Universo

Attualmente intensamente "ricercata" sia in esperimenti astrofisici che agli acceleratori (LHC del CERN)

Galassia
spirale M74



2. Energia Oscura

Da qualche miliardo di anni la velocità d'espansione dell'Universo, invece di diminuire, è aumentata ("Accelerazione Cosmica")

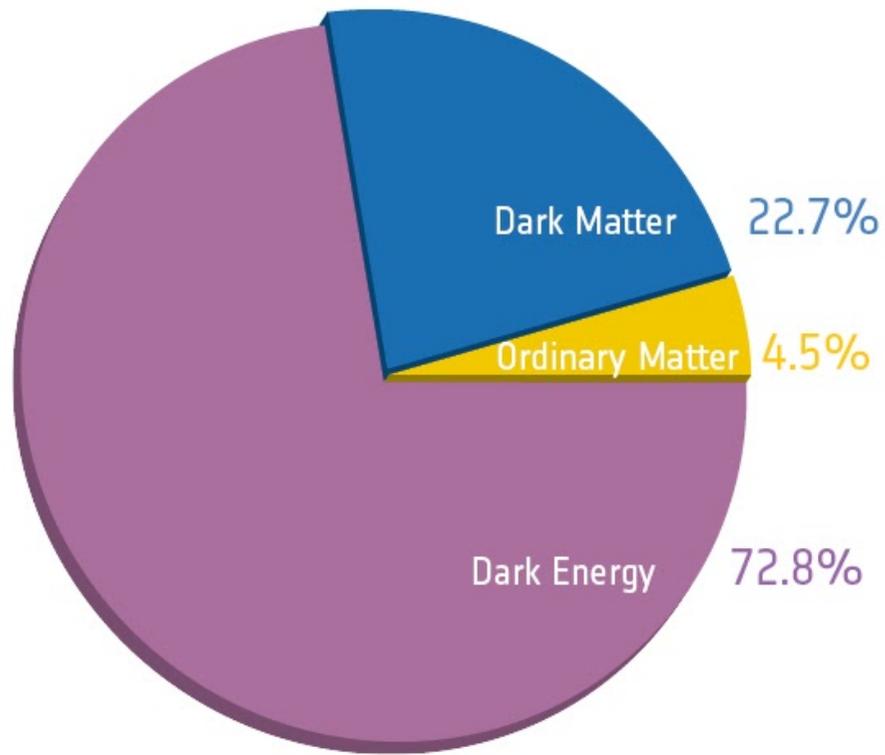
Per spiegare il fenomeno si deve postulare un tipo di energia piuttosto particolare che genera **repulsione** piuttosto che attrazione.

Viene chiamata "**Energia Oscura**" e rappresenta circa il **70%** dell'energia presente nell'Universo.

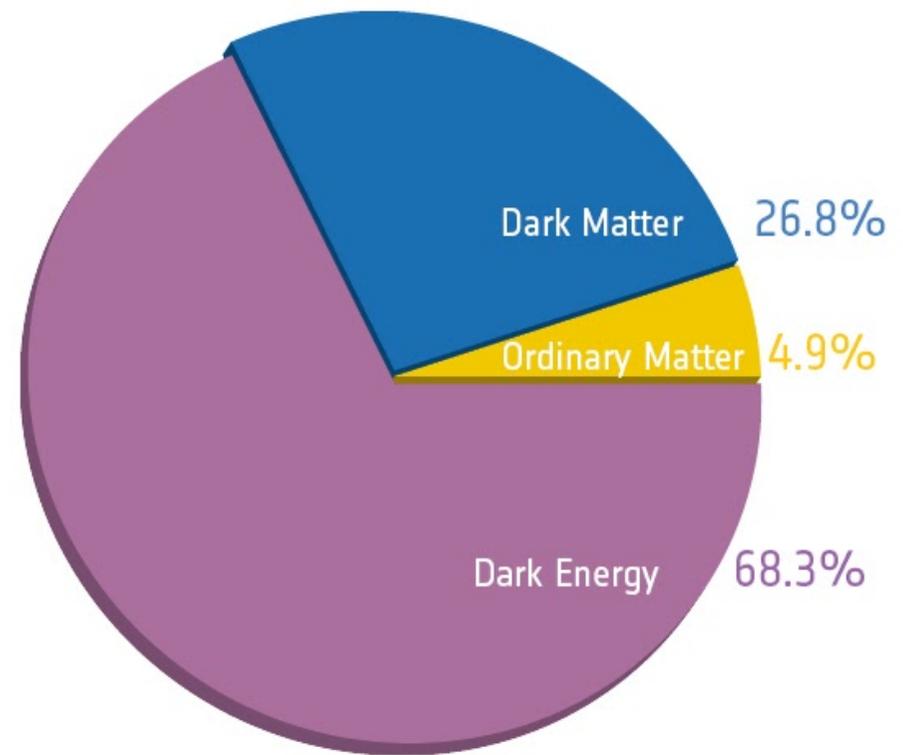
Le sue caratteristiche sono compatibili con la "**costante cosmologica**" introdotta (e poi ritratta) da Einstein nel 1917.



La torta del cosmo



Before Planck



After Planck

Non capiamo ancora il **95%** della composizione del cosmo!

3. Asimmetria materia-antimateria

Anche quel 5% di materia ordinaria presenta un mistero:

Vi è un **eccesso di materia** rispetto all' antimateria nonostante che abbiano essenzialmente le stesse proprietà?

Un altro mistero sul quale l'LHC cercherà di far luce...

4. Omogeneità e isotropia

Anche se pieno di strutture (stelle, galassie, ammassi), l'Universo appare **omogeneo e isotropo su grandi scale**.

Inoltre, la temperatura della radiazione fossile, se misurata in diverse direzioni del cielo, varia solo di **una parte su 100.000**.

Un mistero, se l'Universo neonato consisteva di 10^{90} regioni che non avevano mai potuto comunicare fra di loro.

Questo è necessariamente il caso se:

1. Il Big Bang è l'inizio del tempo, e
2. L'espansione dell'Universo è decelerata.

tempo
adesso

acqua

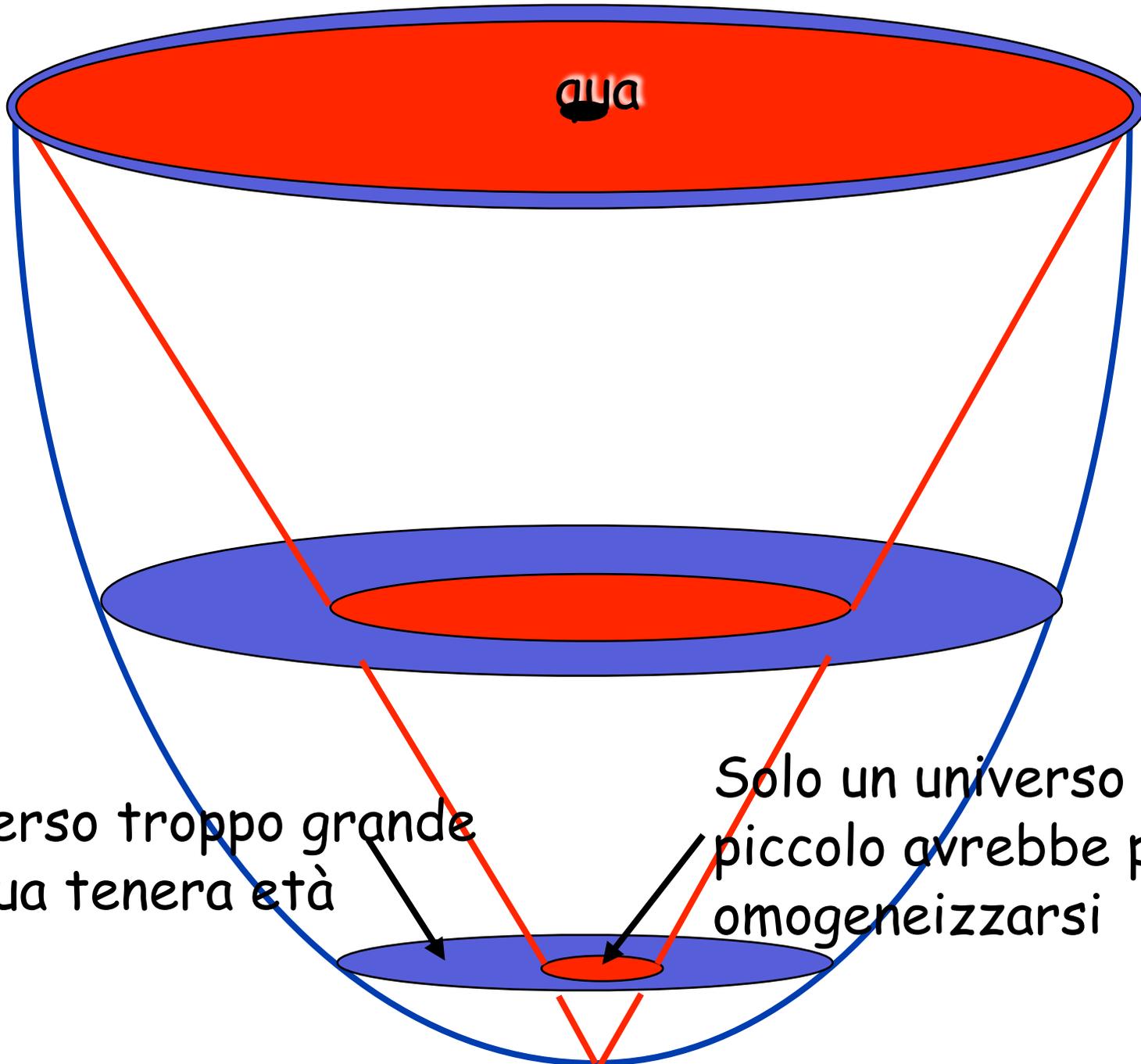
Un universo troppo grande
per la sua tenera età

Solo un universo molto più
piccolo avrebbe potuto
omogeneizzarsi

$t=0$

big-bang

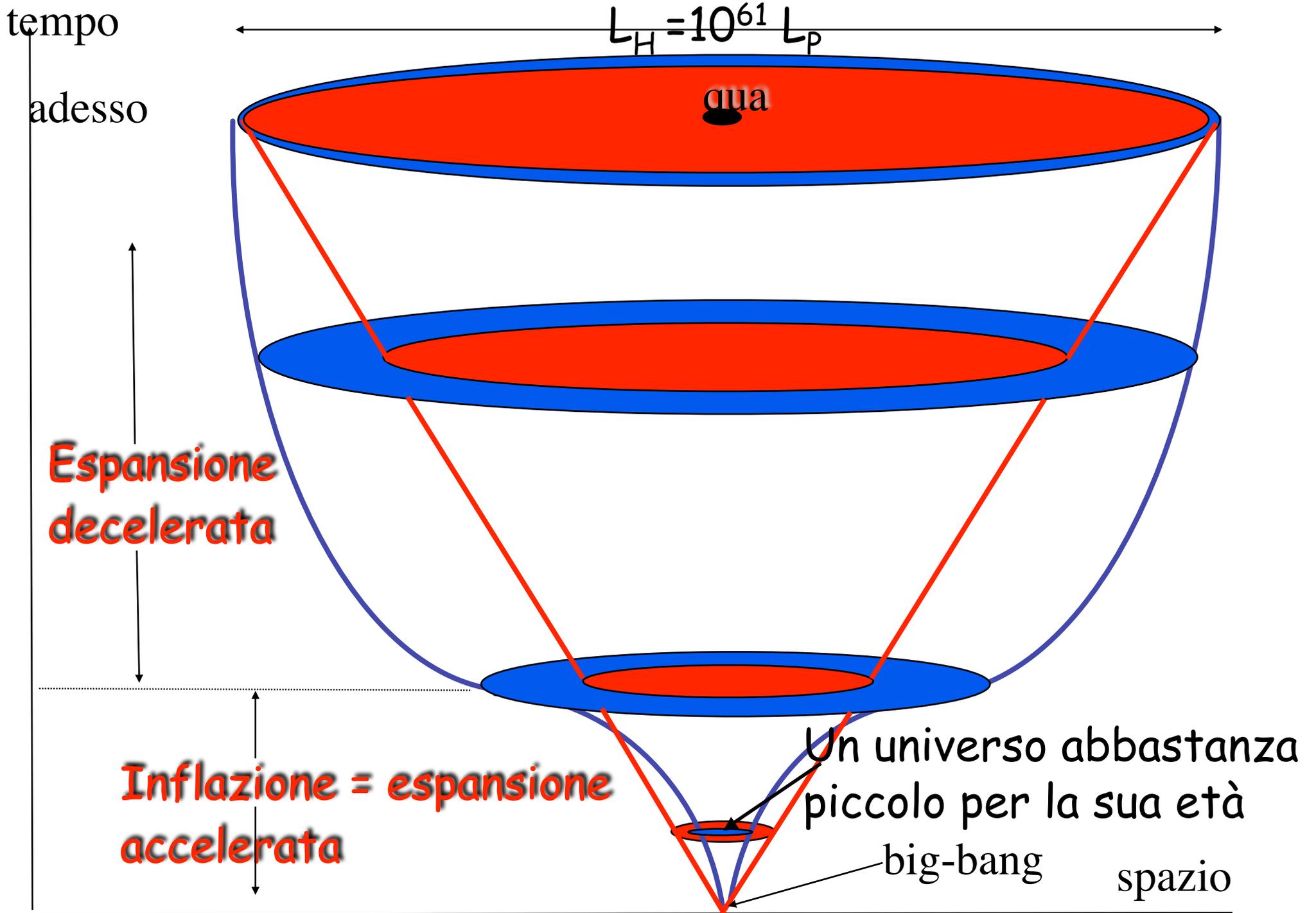
spazio



Cosmologia inflazionaria

La cosmologia inflazionaria (anni '80) ovvia a questi problemi inserendo, nella storia dell'Universo **primordiale**, una fase di **espansione accelerata**, detta "**inflazione**"

Questo fa sì che l'Universo primordiale sia **molto più piccolo** che nella cosmologia tradizionale e quindi facilmente "omogeneizzabile"

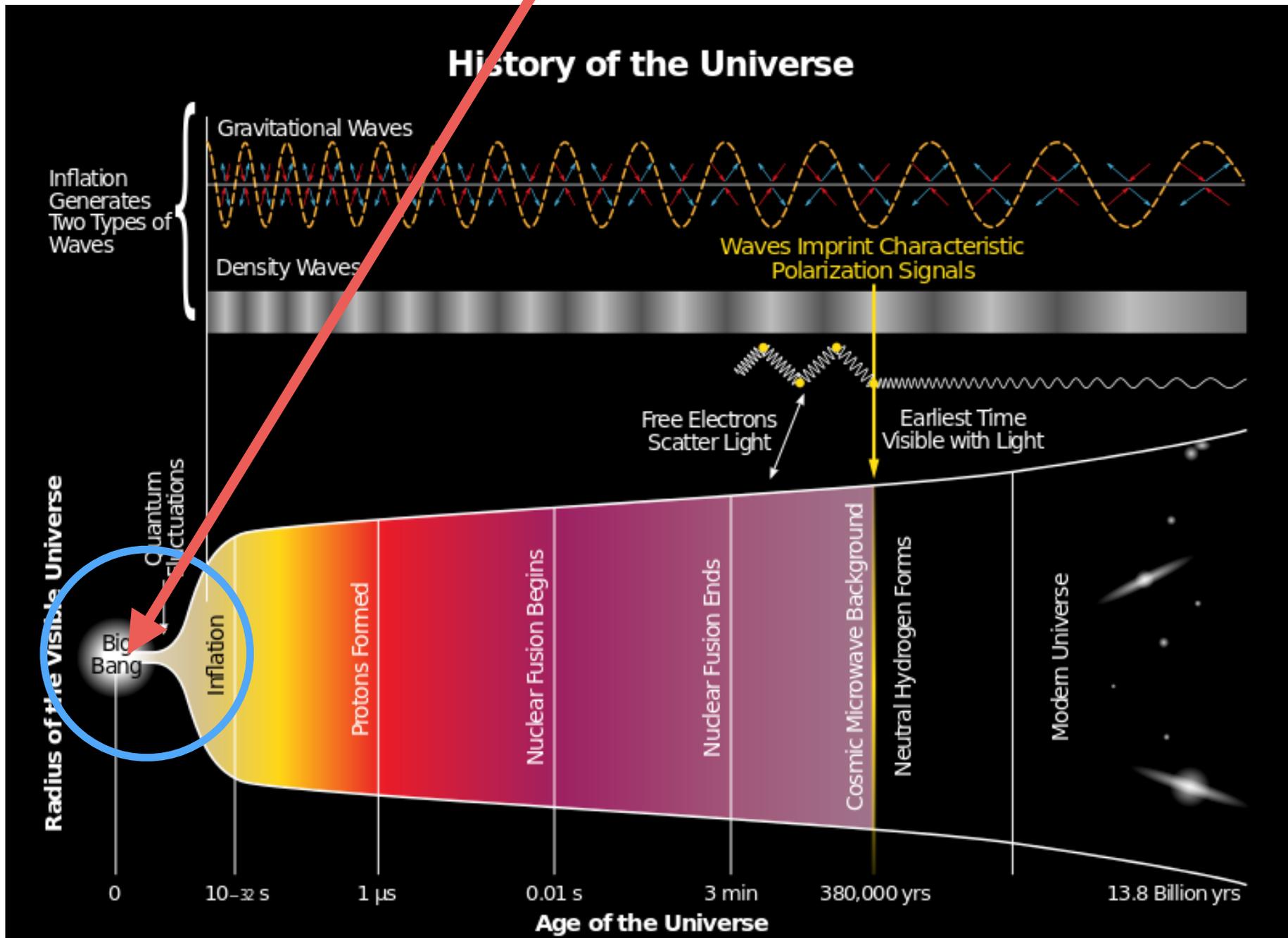


Quello appena descritto (a grandi linee) è il
Modello Standard (attuale)
della *Cosmologia*

Il Big Bang nella cosmologia inflazionaria

- L'inflazione (rapida espansione adiabatica) **raffredda** terribilmente **l'Universo**.
- Ma sappiamo (ad. es. dalla NS primordiale) che **l'Universo deve essere stato molto caldo**
- Nella cosmologia inflazionaria questo è avvenuto **alla fine** dell'inflazione. Si parla di "(re)heating", un fenomeno quantistico **irreversibile**.
- In nessun modo corrisponde all'inizio del tempo, ma **sostituisce** a tutti gli effetti **il BB** della vecchia cosmologia

Un disegno fuorviante ma spesso mostrato



tempo

adesso

qua

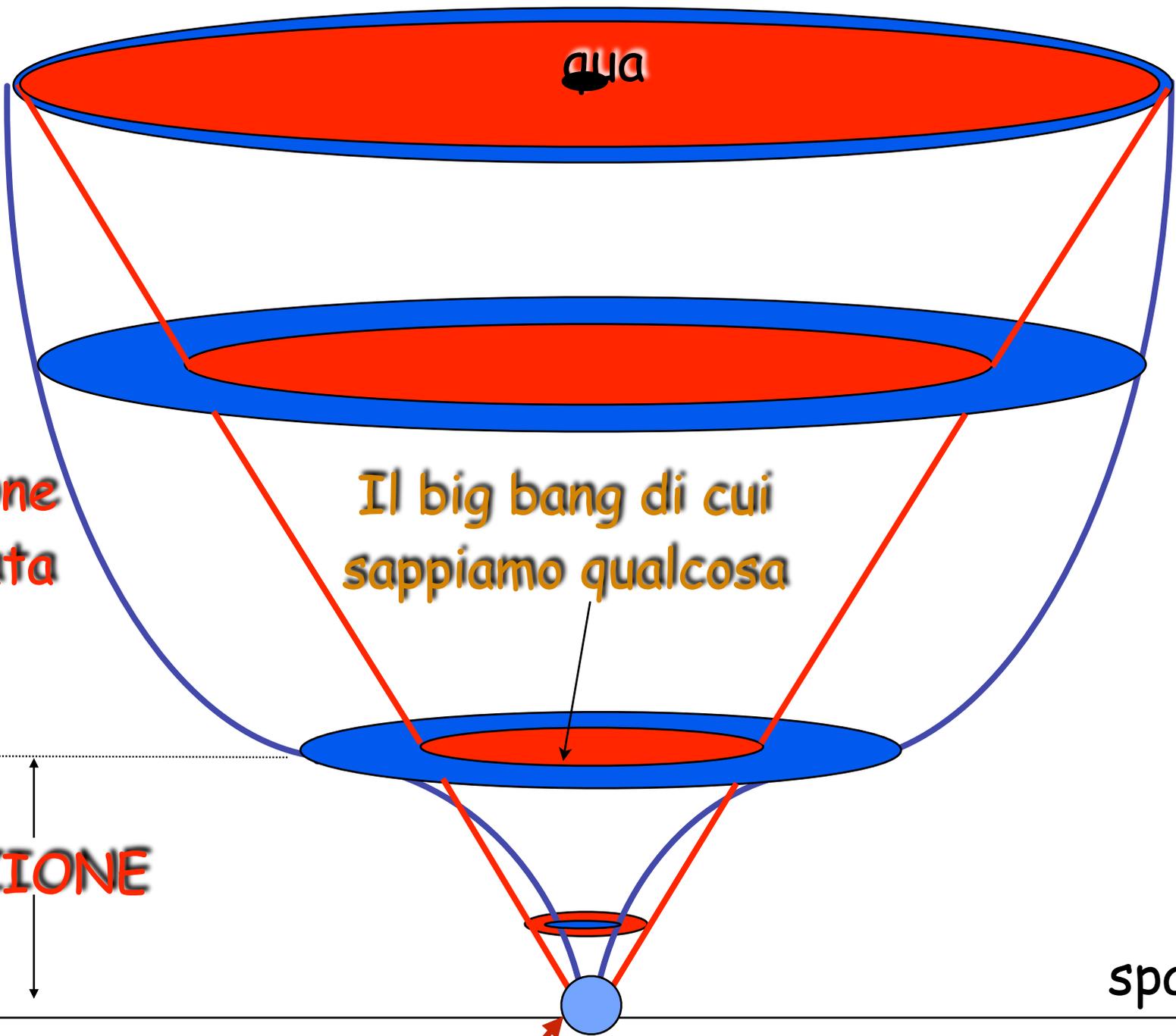
Espansione
decelerata

Il big bang di cui
sappiamo qualcosa

INFLAZIONE

spazio

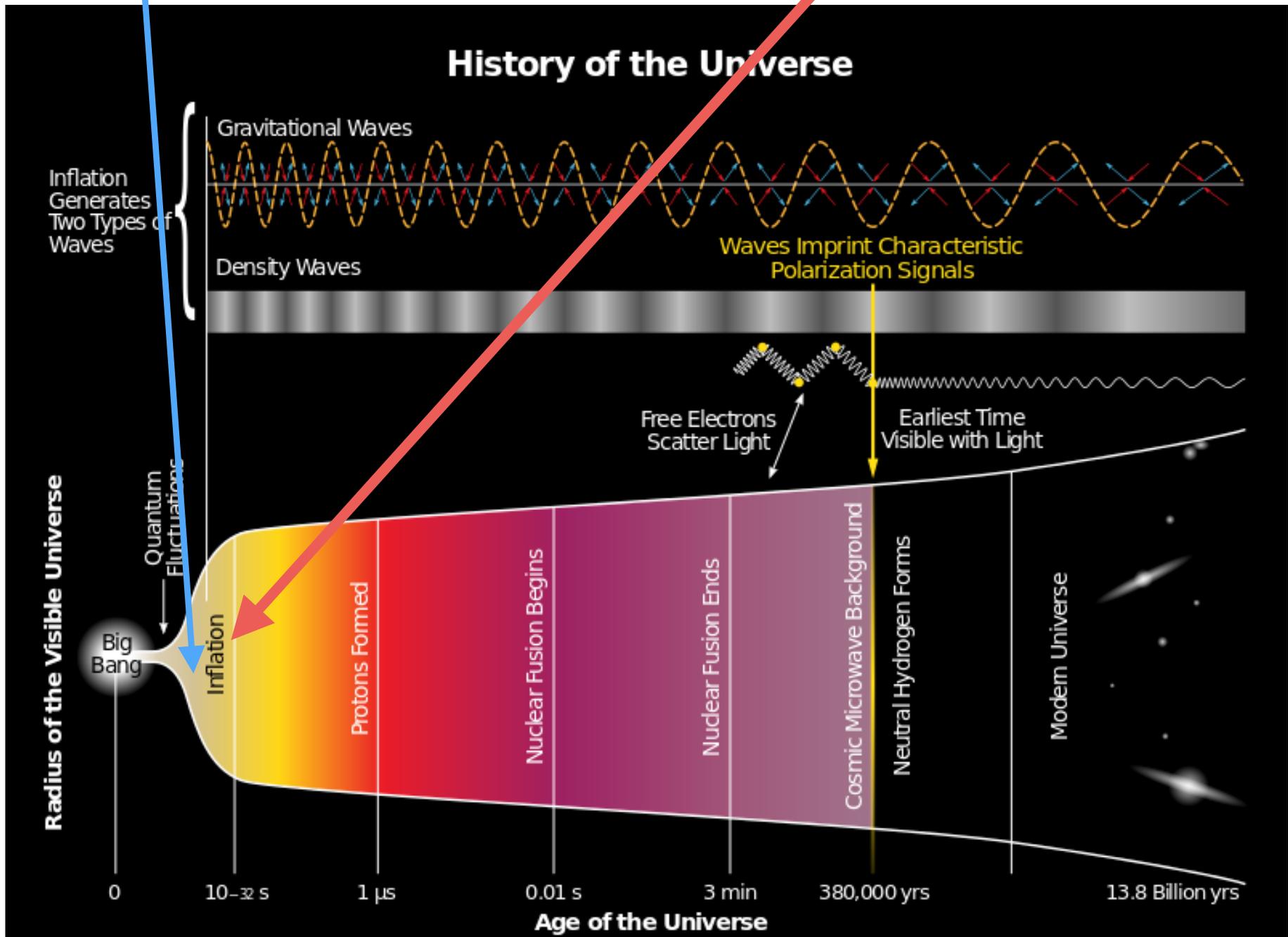
Il big bang di cui non sappiamo nulla, neppure se c'è stato



- Tramite **fluttuazioni quantistiche**, successivamente amplificate e spostate verso il rosso, l'inflazione **genera i semi** di quelle che diverranno le **strutture** su grande scala dell'Universo (galassie, ammassi...)
- Un tempo **la domanda era**: il tempo ha avuto davvero un **inizio** con il **BB**?
- Oggi la domanda è: cosa esattamente è successo **prima del BB**? Una domanda che può essere affrontata **sperimentalmente**.

Origine delle strutture

Il nuovo big bang

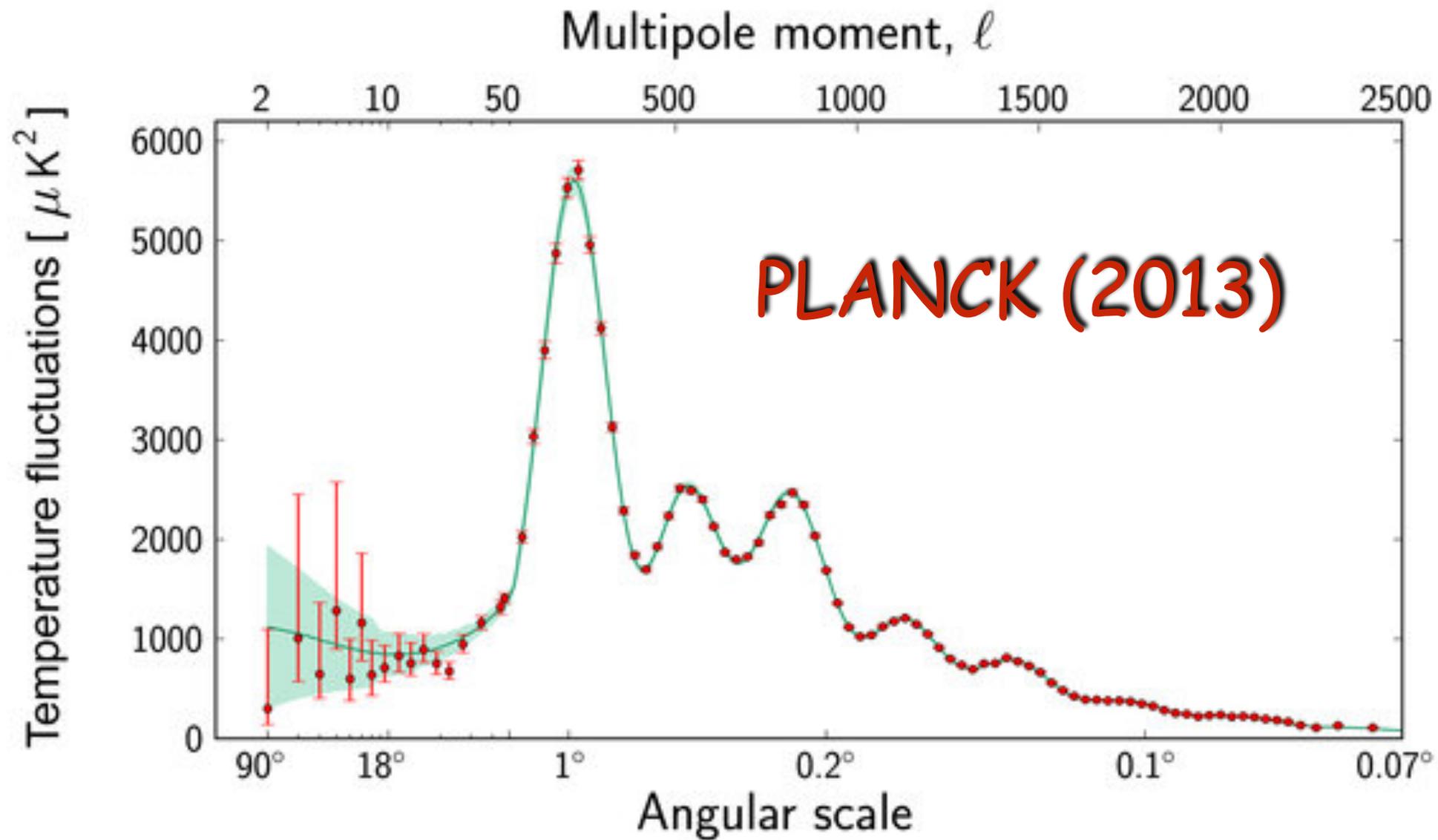


Scienza o fantascienza?

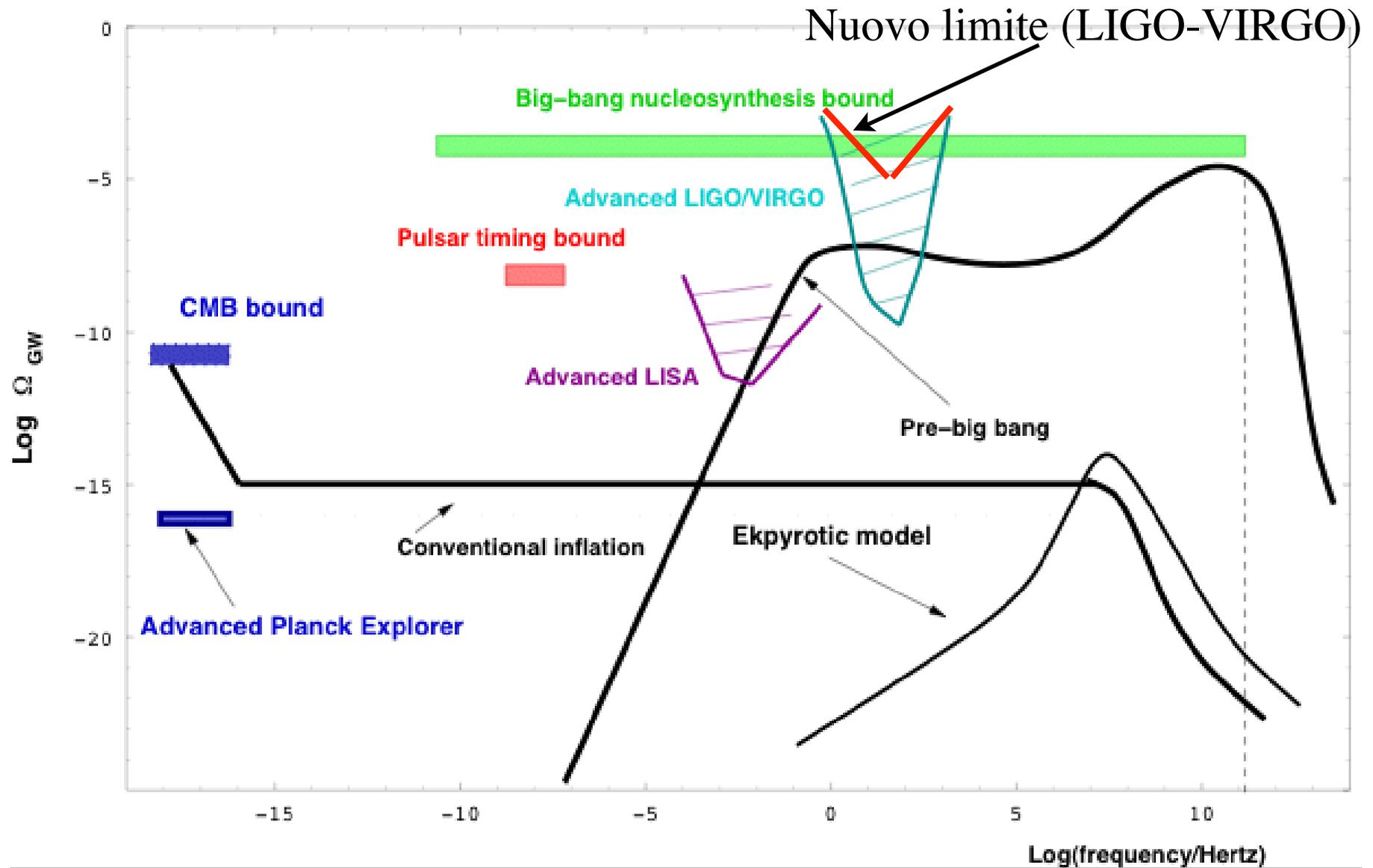
- A prima vista sembrerebbe che questo dibattito su cosa abbia preceduto il big bang abbia un interesse **puramente intellettuale**, ma che sia privo di conseguenze osservabili.
- Questo non è il caso. La ragione: un noto fenomeno di **"congelamento"** di strutture su scale di lunghezza che eccedono quelle dell'**orizzonte cosmologico**.
- Come un animale preistorico sepolto nel ghiaccio ci rivela oggi, scongelandosi, quali forme di vita esistevano milioni di anni fa, così queste strutture, **rientrando dentro il nostro orizzonte cosmologico**, ci rivelano oggi le caratteristiche dell'Universo **prima del Big Bang caldo**.

- Possono manifestarsi oggi in vari modi, ad es. tramite:
 1. Fluttuazioni nella temperatura della radiazione fossile e sua **polarizzazione** dovuta a **onde gravitazionali primordiali**.
 2. Un fondo **stocastico di onde gravitazionali** che LIGO e VIRGO potrebbero scoprire (magari con l'aiuto di LISA) nel prossimo futuro.
 3. **Campi magnetici** su scale cosmologiche la cui origine è tuttora misteriosa.
- Altrettante finestre sull'Universo **prima del BB caldo**.

PLANCK POWER SPECTRUM

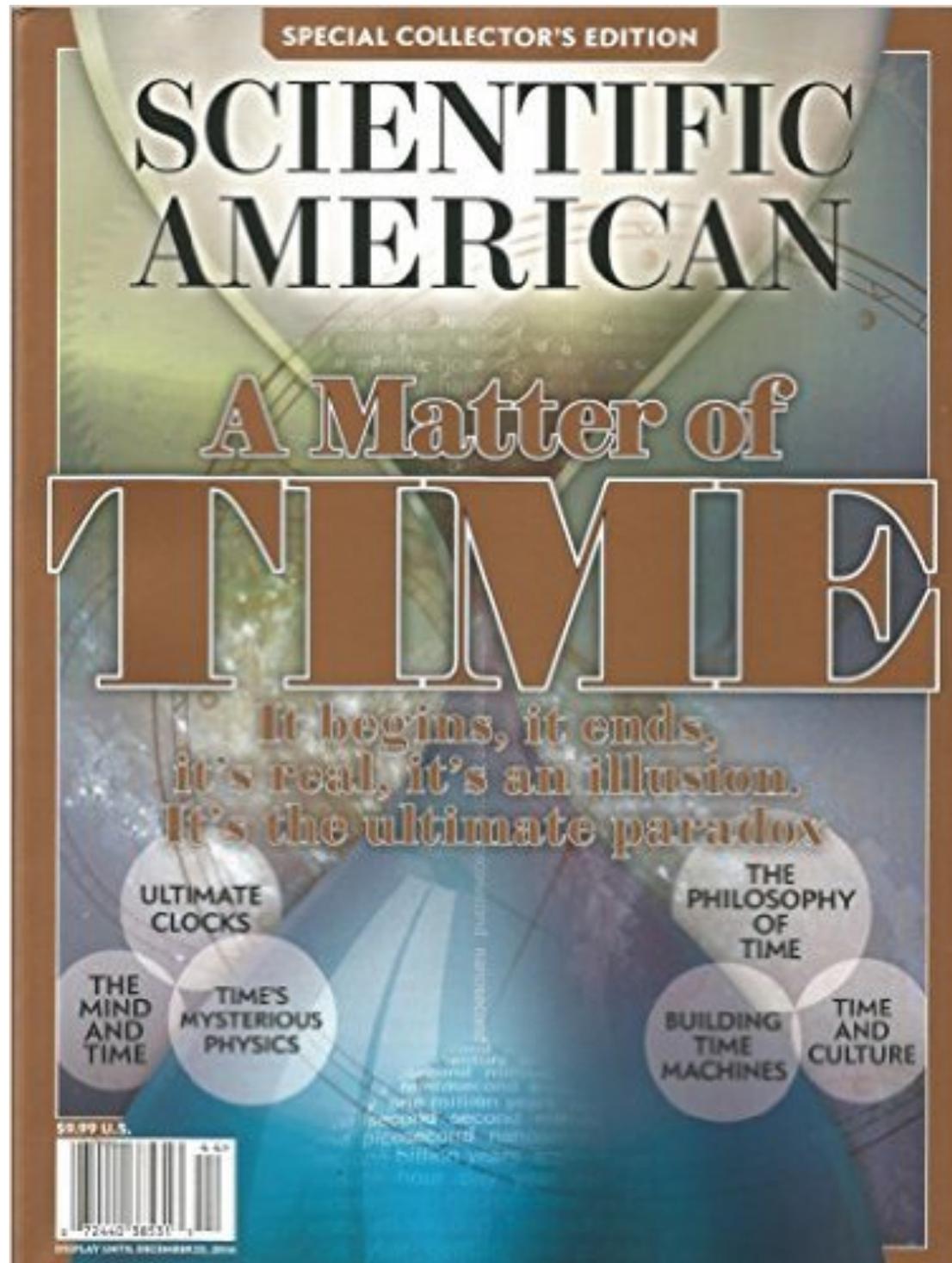


Fondo stocastico di onde gravitazionali



- La cosmologia inflazionaria è **agnostica** su cosa sia successo **prima** dell'inflazione.
- Domanda del tutto indipendente dal resto: il tempo **ha avuto** davvero **un inizio**?
- Potrebbe restare un dibattito **puramente teorico**... alcuni possibili scenari sono discussi in una raccolta di articoli di **Scientific American**

Our # 1 Best Seller of all ...Time



Grazie della vostra attenzione!

Riassunto

Come ogni altra disciplina scientifica, anche la fisica compie continui passi avanti. Ma lo scorso secolo è stato testimone di vere e proprie rivoluzioni concettuali la cui portata va ben oltre il campo stesso della fisica.

Cercherò di illustrare, in termini non tecnici, i cambiamenti più significativi che sono avvenuti dall'inizio del secolo scorso nella nostra comprensione dell'Universo, toccando temi quali i buchi neri, le onde gravitazionali, i quark, il bosone di Higgs, per terminare con i misteri della materia e energia oscura, del big bang e di cosa lo ha necessariamente preceduto.

Schema

- Le grandi rivoluzioni dell'inizio del XX secolo:
 - 1905: La relatività speciale (RS)
 - 1915-1916: La relatività generale (RG)
 - 1900-1930: La meccanica quantistica (MQ)
- Le 4 interazioni e le particelle elementari che le subiscono
- 1948-1950: La prima unificazione fra MQ e RS: QED (elettroni, positroni, fotoni)
- 1965-1975: la seconda unificazione fra MQ e RS:
 - La teoria elettrodebole: bosoni pesanti, neutrini, bosone di Higgs...
 - Le interazioni forti e le stringhe
 - Le interazioni forti e QCD: quark e gluoni uccidono la vecchia stringa
 - Il Modello Standard delle interazioni non gravitazionali

Schema

- 1984: La rinascita della stringa: verso una completa unificazione (MQ+RS+RG)?
- 1980: La cosmologia tradizionale vacilla
 - Un big bang troppo speciale, la cosmologia inflazionaria.
 - Materia oscura
 - Un'accelerazione inaspettata: energia oscura
 - Il Modello Standard della gravità e della cosmologia
- Prima del big bang caldo

Firenze, 11.05.2018

Space, time, matter through a century of revolutions

Gabriele Veneziano



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—



Outline

- The big revolutions at the beginning of the XXth century:
 - 1905: Special relativity (SR)
 - 1915-1916: General relativity (GR)
 - 1900-1930: Quantum mechanics (QM)
- The four interactions and the elementary particles that feel them
- 1948-1950: The first unification of QM and SR: QED (electrons, photons)
- 1965-1975: The second unification of QM and SR:
 - The electroweak theory: heavy bosons, neutrinos, the Higgs boson...
 - Strong interactions and strings
 - Strong interactions and QCD: quarks kill the old string
 - The Standard Model of non-gravitational interactions

- 1984: The resurrection of strings: towards a complete unification (QM+SR+GR)?
- 1980: Traditional cosmology is shaken
 - A highly improbable Big Bang, inflationary cosmology.
 - Dark matter
 - Dark energy
 - The Standard Model of gravity and cosmology
- Before the hot big bang

