

Relatività e Meccanica Quantistica: concetti e idee
Relativity and Quantum Mechanics: concepts and ideas



Settimana 8

Lezione 8.1

**John Bell propone un esperimento per
verificare la località della realtà**

Carlo Cosmelli



Dove eravamo rimasti...



Dall'esperimento concettuale proposto da EPR si era giunti alla conclusione che:

- Nell'ipotesi di «realismo locale» e della validità della Relatività Speciale, posso immaginare un esperimento in cui un sistema non è descritto completamente dalla Meccanica Quantistica.
- Quindi: o non valgono le ipotesi di partenza, oppure la meccanica quantistica è **INCOMPLETA**.

Nel 1964 John S. Bell immagina un esperimento ideale per mostrare che nessun modello locale, in cui cioè non posso avere una comunicazione immediata a distanze arbitrarie, può essere in accordo con la meccanica quantistica.

Con la sua proposta Bell non vuole direttamente falsificare o provare la MQ o altre teorie: **propone un test per verificare la località dei fenomeni naturali.**

La proposta di Bell - 1964

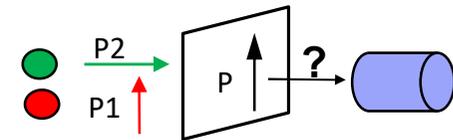


Bell propone un “gedanken experiment”, esperimento ideale, per verificare **la località** dei fenomeni naturali [Qui ne mostreremo una versione semplificata, ma concettualmente equivalente].

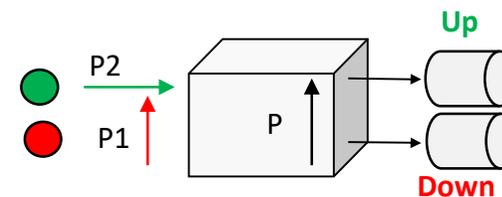
- Supponiamo di avere una sorgente luminosa che emette coppie di fotoni (**A e B**) **entangled**, **interlacciati**. Quindi fotoni che, se misurati, forniscono **sempre** la stessa polarizzazione.
- Su questo sistema si fanno dei test di polarizzazione, con una differenza nello «**strumento**» usato nel test EPR che abbiamo discusso, non un polarizzatore, ma un **crystallo birifrangente**.

Qual è la differenza:

- Con un polarizzatore ho due possibilità: Il fotone **PASSA**, oppure **NON PASSA** [P1 passa, P2 NON passa]. La cosa non è della massima eleganza concettuale: metà dei fotoni «sariscono». Cosa fanno?



- Il crystallo fa sempre passare i fotoni, ma gli cambia direzione, il fotone non va mai «perso», solo che l'uscita sarà UP o DOWN.



La proposta di Bell – 1964 2

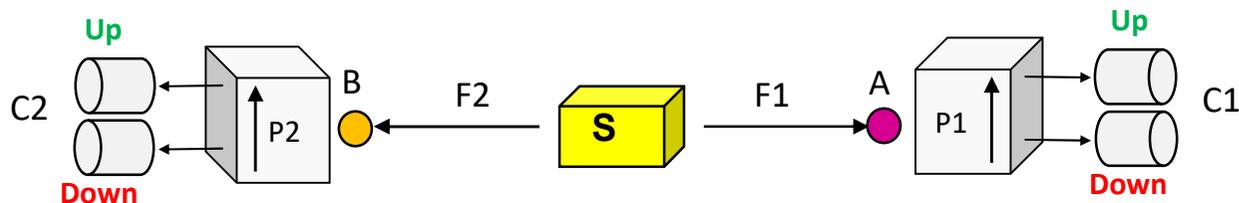


- Su questo sistema si fanno dei test di polarizzazione con due cristalli birfrangenti con asse di polarizzazione P1 e P2. Dopo ogni cristallo ci sono due contatori C1 e C2 che misurano se il fotone è UP o DOWN.

L'equivalenza del sistema con i polarizzatori è questa:

Se con il polarizzatore: il fotone PASSA \rightarrow : con il cristallo «clicca» il **Down**

Se con il polarizzatore: il fotone NON PASSA \rightarrow : con il cristallo «clicca» l'**UP**

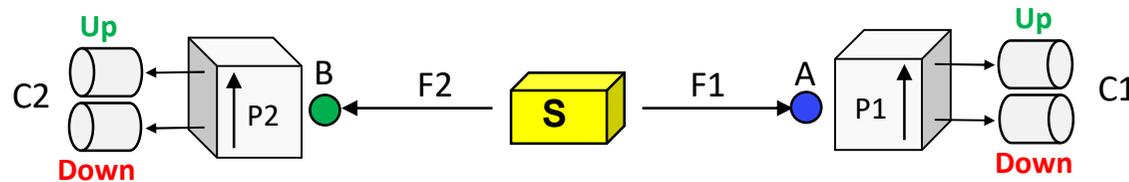


La differenza con l'esperimento EPR è che Bell cambia le direzioni di polarizzazione dei due polarizzatori uno rispetto all'altro...e calcola cosa succede (meglio: le probabilità di quello che potrebbe succedere).

Le misure proposte da Bell



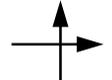
Le misure sono fatte inviando **N coppie di fotoni [F1,F2]** ai cristalli e contando i fotoni **Up** e **Down**. Le possibili misure sono tipicamente tre, con differenti configurazioni dei cristalli, cioè dei relativi angoli dell'asse di riferimento del cristallo rispetto alla verticale



Per ogni fotone i contatori possono dare come risultato:

Up=U oppure **Down=D**

Ho tre casi:

1. I cristalli hanno la stessa direzione: $P1//P2$  $\Rightarrow C1=C2 : [UUDUD, UUDUD]$
2. I cristalli hanno direzioni ortogonali: $P1 \perp P2$  $\Rightarrow C1 \neq C2 : [UDUUD, DUDDU]$
3. I cristalli fanno un certo angolo $\theta (P1, P2)$  $\Rightarrow C1 \text{ e } C2 ?$

Misura n° 1



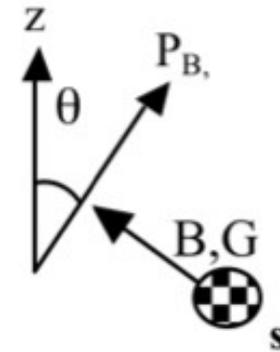
B e **G** sono i due fotoni entangled; **s** è la sorgente dei fotoni; **z** è un asse di riferimento (il laboratorio); $\mathbf{P}_{B,G}$ è la direzione dell'asse dei cristalli che misurano rispettivamente il fotone B e il fotone G; θ è l'angolo fatto da ogni cristallo con la direzione di riferimento **z**

Caso 1 – guardo un solo fotone alla volta:

Si misura la Polarizzazione $\mathbf{P}(\theta)$ per **un singolo fotone** B oppure G
 $P(\theta)$: per qualunque angolo θ ho il 50% di probabilità di avere U o D.

Una sequenza tipica sarà:

UUDUDUDUDDUDUDDDUUDU ~ (50% U ; 50% D)



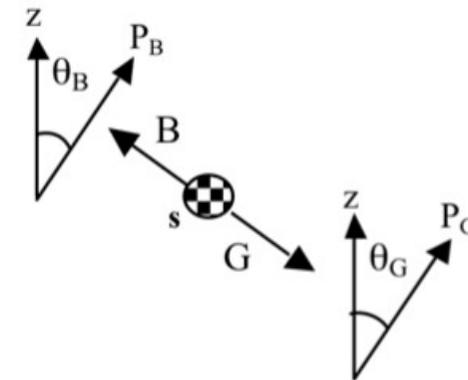
Misura n° 2, con 2 fotoni entangled – angoli uguali



Si può misurare la “Paired Polarization” $PP(\theta)$, ossia la **Polarizzazione accoppiata**

$PP(\theta)$: l'angolo è uguale, è la stessa situazione dell'EPR, le sequenze dei risultati U e D sono sempre casuali, ma sono uguali.

$$PP(\theta): \theta_B = \theta_G = \theta$$



B : UUDUDUDUDDUDUDDDUUUDU

circa 50% U ; 50% D

G : UUDUDUDUDDUDUDDDUUUDU

“ “

La sequenza
è la stessa

Misura n° 3a: due fotoni entangled, angoli diversi



Si può misurare la “Polarization Correlation”, correlazione della Polarizzazione

PC(θ): gli angoli sono diversi, $\theta = \theta_G - \theta_B$.

Le sequenze saranno diverse, per ogni conteggio ho un **Match (M)** se il risultato è lo stesso, un **Errore (E)** se è diverso

B : UUDU DUDU DDD UDDD UUDU

(N=20 fotoni misurati)

G : UUDD DUDD DUUD UDDU UDDU

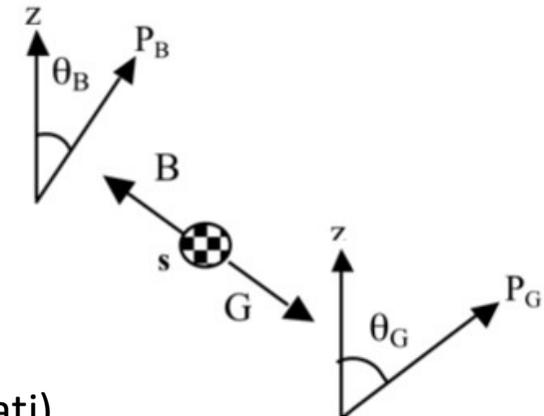
(N=20 fotoni misurati)

Match: MMM MMM M MM MMM M MM

(N_M = numero di M=15)

ERRORE: E E E E E

(N_E = numero di E=5)



Misura n° 3b



Si conta quindi la **frequenza dei Match = $PC(\theta)$** e quella degli errori **$E(\theta)$** , come il numero di eventi relativi (N_M o N_E) diviso il numero di eventi(conteggi) totali N :

$$PC = \frac{\text{Numero di Match}}{\text{Numero totale di conteggi}} = \frac{N_M}{N} \quad ; \quad E = \frac{\text{Numero di Errori}}{\text{Numero totale di conteggi}} = \frac{N_E}{N}$$

Risultati possibili per alcuni angoli particolari:

$\theta = 0$ $PC(0) = 100\% = 1$ $E = 0\% = 0$ tutti i valori sono uguali

$\theta = 90^0$ $PC(90^0) = 0\% = 0$ $E = 100\% = 1$ tutti i valori sono diversi

Per gli angoli fra 0^0 e 90^0 E assumerà dei valori intermedi fra 0 e 1: **scelgo sperimentalmente l'angolo θ per cui $E=1/4$** (1 errore ogni 4 fotoni). Si trova che $\theta=30^0$. **Nota: non presuppone nessun calcolo...è una misura (mentale per ora).**

Misura n°3c: la misura di Bell



Misure di $\theta = \theta_G - \theta_B$: riepilogo

| | B | G |
|--|---|---|
| Allineati con z : $\theta_B = 0$; $\theta_G = 0$; $\theta = 0 \rightarrow PC=1 \ E=0$ | ↑ | ↑ |
| G non allineato: $\theta_B = 0$; $\theta_G = 30^\circ$; $\theta = 30^\circ \rightarrow PC=3/4 \ E=1/4$ | ↑ | ↗ |
| Allineati: $\theta_B = 0$; $\theta_G = 0$; $\theta = 0 \rightarrow PC=1 \ E=0$ | ↑ | ↑ |
| G non allineato: $\theta_B = 0$; $\theta_G = -30^\circ$; $\theta = -30^\circ \rightarrow PC=3/4 \ E=1/4$ | ↑ | ↘ |

La misura di Bell:

Entrambi non allineati: $\theta_B = 30^\circ$; $\theta_G = -30^\circ$; $\theta = 2 \cdot 30^\circ \rightarrow PC=? \ E=?$

B G



Il calcolo di Bell



Se vale la località allora ruotare uno dei due cristalli non può influire sul risultato dell'altro perché le misure sono praticamente istantanee e non ci può essere una influenza istantanea a distanza (località).

Quindi i risultati della misura dei due contatori sono **eventi casuali indipendenti**, la cui **probabilità di accadimento congiunto è semplicemente la somma delle due probabilità singole**.

Quindi gli "Errori" (come i Match) totali devono essere la somma degli Errori misurati da ogni singolo [cristallo + contatore].

Quindi $E(\theta=60^\circ) = 2 \cdot E(\theta=30^\circ) = 2 \cdot 1/4 = 2/4 = 1/2 = 50\%$

La disuguaglianza di Bell, la previsione della MQ



Tuttavia, nella sequenza, potrebbero esserci due errori nella stessa posizione, che darebbero un risultato giusto.

Sequenza “giusta” : UUDU DUDU DDUD

B : UDDU DUDD DDD (3 errori nella sequenza B)

G : UUDD DUDD DUUD (3 errori nella sequenza G)

Errori fra B e G: E E EE (4 errori totali < 3+3)

Il numero degli errori totali sarà **minore o uguale** a quello del massimo teorico ($\frac{1}{2}$)

La disuguaglianza di Bell: $E(\text{località} | 60^\circ) \leq \frac{1}{2} = 0,5$

La Meccanica Quantistica prevede: $E(\text{QM, teoria} | 60^\circ) = \sin^2\theta = 0,75$

Quindi:

1. Se la realtà è locale devo avere un certo risultato [$E(60^\circ) \leq 0,5 = 50\%$]
2. La MQ **deve** dare $E(60^\circ) = 0,75 = 75\%$, quindi NON PUO' essere locale.

Verifiche sperimentali - 1982



ntale
ano
un

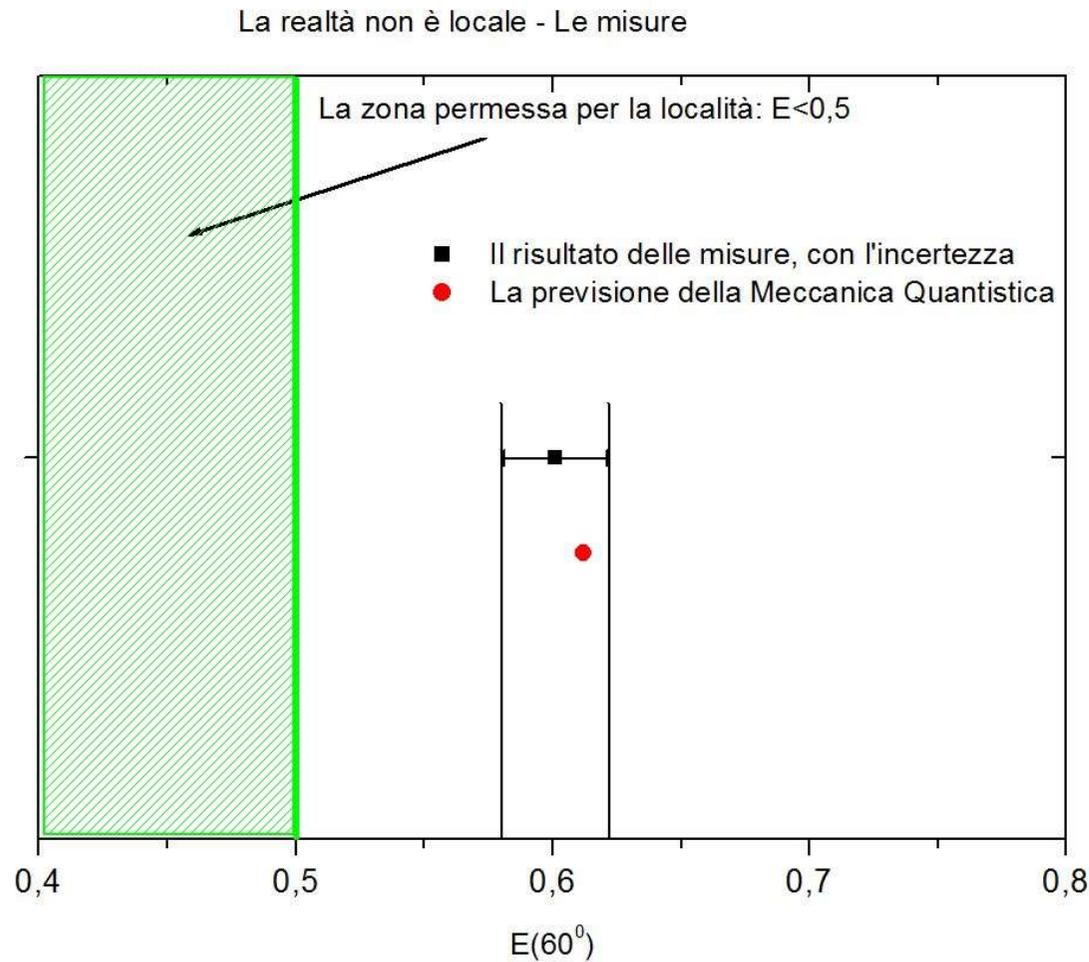
Le misure, v
particolare,
stati emessi
mondo «oli

- L'ipote
- Il risul
- La pre

Un grafico:

Nota:

Le misure e
probabilità
bassa, i puri
completa ve



ndi i valori delle
za di misura è molto
. La misura conclusiva e

Conclusioni - 1



Conclusione 1. L'ipotesi di località è falsificata, la realtà è (può essere) non locale. Possono esistere interazioni non-locali, cioè con una correlazione immediata anche a grandi distanze, MA SOLO PER SISTEMI QUANTISTICI ENTANGLED (INTERLACCIATI).

Conclusione 2. Il risultato sperimentale è quello previsto dalla meccanica quantistica, che quindi non è locale.

L'argomentazione di EPR era giusta, ma non la conclusione: questo perché l'ipotesi di partenza non era vera.

Non è la MQ ad essere incompleta, è l'ipotesi di località che non è corretta.

Conclusioni - 2



Fraintendimenti 1: Ma allora è possibile che dei segnali viaggino a velocità maggiore della luce?

NO. La teoria della relatività è corretta.

Ciò che viaggia **non è un segnale**, infatti le sequenze di Up e Down che misuro da ogni parte sono sempre sequenza casuali di Up e Down con il 50% di probabilità. Non posso usarle per trasmettere alcuna informazione, non ho inviato nessun «segnale».

Esempio:

Sequenza di B, se A è stato misurato, quindi con la correlazione non-locale.

UUDU DDUU DUDU DDUD UDDU DUDU : 12U - 12D 50% - 50%

Sequenza di B, se fosse un fotone singolo...

DDUU UUDU DDUD DUDU DUDU UDDU : 12U - 12D 50% - 50%

Ciò che si trasmette è la **CORRELAZIONE** fra i due fotoni, l'interazione non-locale esiste ed è:
unmediated, unmitigated, and immediate,

Non mediata // non mitigata (non decresce con la distanza) // immediata

Conclusioni - 3

Fraintendimenti 2: Ma allora siamo tutti «collegati» per sempre? Il mondo è tutto collegato? E' vero che posso fare delle teorie «olistiche» del mondo?



NO! Perché?

- 1) Il fenomeno della non-località avviene **SOLO** se ho dei sistemi entangled (interlacciati quantisticamente).
- 2) Qualunque sistema entangled, appena incontra un “oggetto” esterno che interagisce con la “proprietà” che era interlacciata (nel caso dei fotoni era la polarizzazione), subisce il collasso della funzione d’onda...e cessa di essere correlato al “compagno”. Da quel momento in poi i due fotoni non saranno più correlati, ma si comporteranno come due fotoni liberi, indipendenti, senza nessun legame.

Conclusioni - 3



3) E noi? I corpi macroscopici (noi, i gatti...), non possono risultare entangled, l'alta temperatura e il fatto che siamo fatti di miliardi di miliardi di miliardi di particelle impedisce che si possano avere sistemi "grandi" interlacciati. Così come non è possibile che io passi attraverso il muro per effetto tunnel.

Non pensate di poter utilizzare la non-località per fare il Voodoo a chi vi è antipatico... non è possibile!



La non-località può essere utilizzata per fare qualcosa (di utile)?

SI!

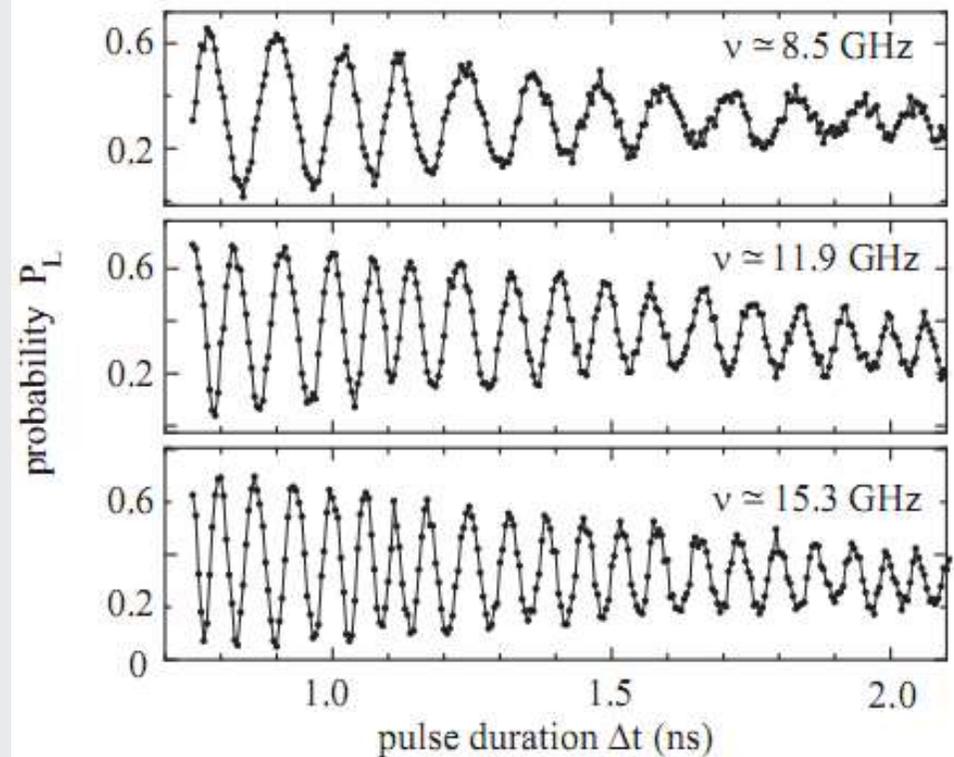
Conclusioni - 4

4) Per quanto tempo “vive” uno stato quantistico entangled “macroscopico”?
Molto poco...

Questo è fatto di Niobio, sono circa 10^{12} Atomi... raffreddati alla temperatura di $30\text{mK} = 0,030\text{ K} = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$

La vita media è di circa 2 ns, 2 miliardesimi di secondo....

$T=30\text{ mK}$

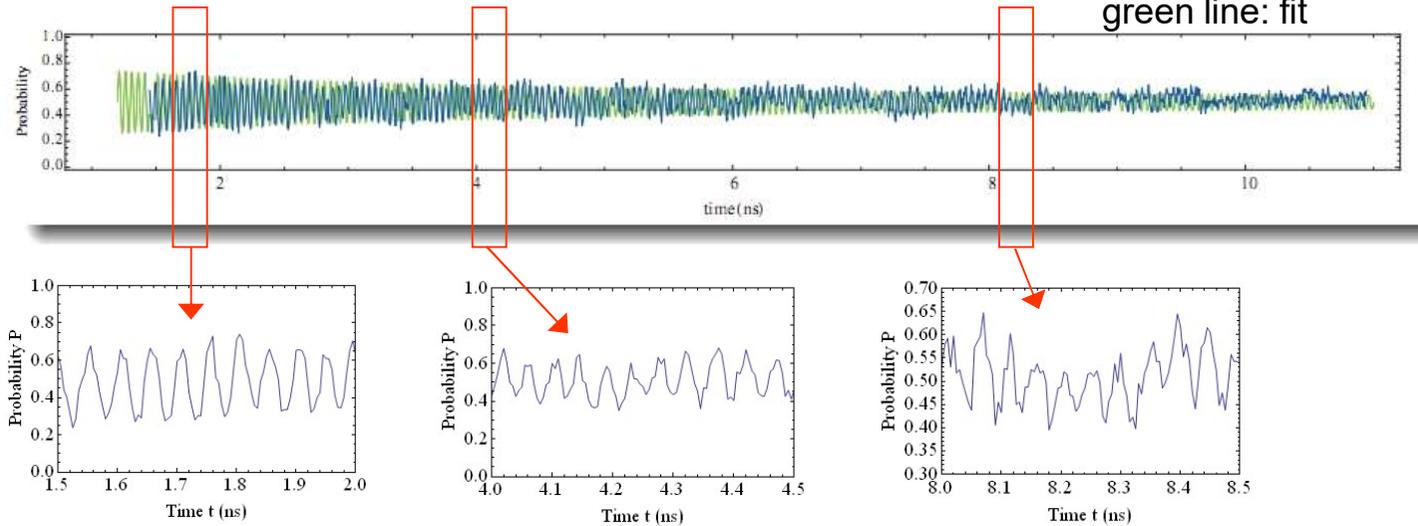


Free oscillations at different depths of the potential well

Oscillation decay time

With reduced fluctuation on Φ_x :

blue line: data
green line: fit



$\tau \sim 8 \text{ ns}$ *Comparable with results on similar devices with different techniques*

$f = 20 \text{ GHz}$ *Very high operation frequency*

$N_{osc} \sim 160$ *Large number of oscillations within τ*

CERBERIS QUANTUM KEY DISTRIBUTION (QKD) SERVER

IDQ's Cerberis solution offers a radically new approach to network security, combining the sheer power of the Centauris high-speed layer 2 encryption solution with the proven forward secrecy of quantum key distribution (QKD) technology.

Cerberis ensures long term data protection on point-to-point backbone and storage networks.



Overview
Applications
Features
Tech Specs

NETWORK DIAGRAM

Location A: Encryptor n_k

Location B: Encryptor n_k

Encrypted Network

Network Plane: Layer 2 Link Encryption Up to 12 encryptors

Key Management Plan

A cosa serve un codice sicuro?

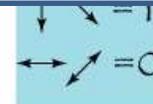
- Transazioni finanziarie – Carte di credito – banche...
- Trasmissione di dati di votazioni – voto elettronico
- Trasmissione di dati personali, medici, legali, sensibili.
- Trasmissione di codici di soccorso per emergenze...

TECHNICAL SPECIFICATIONS

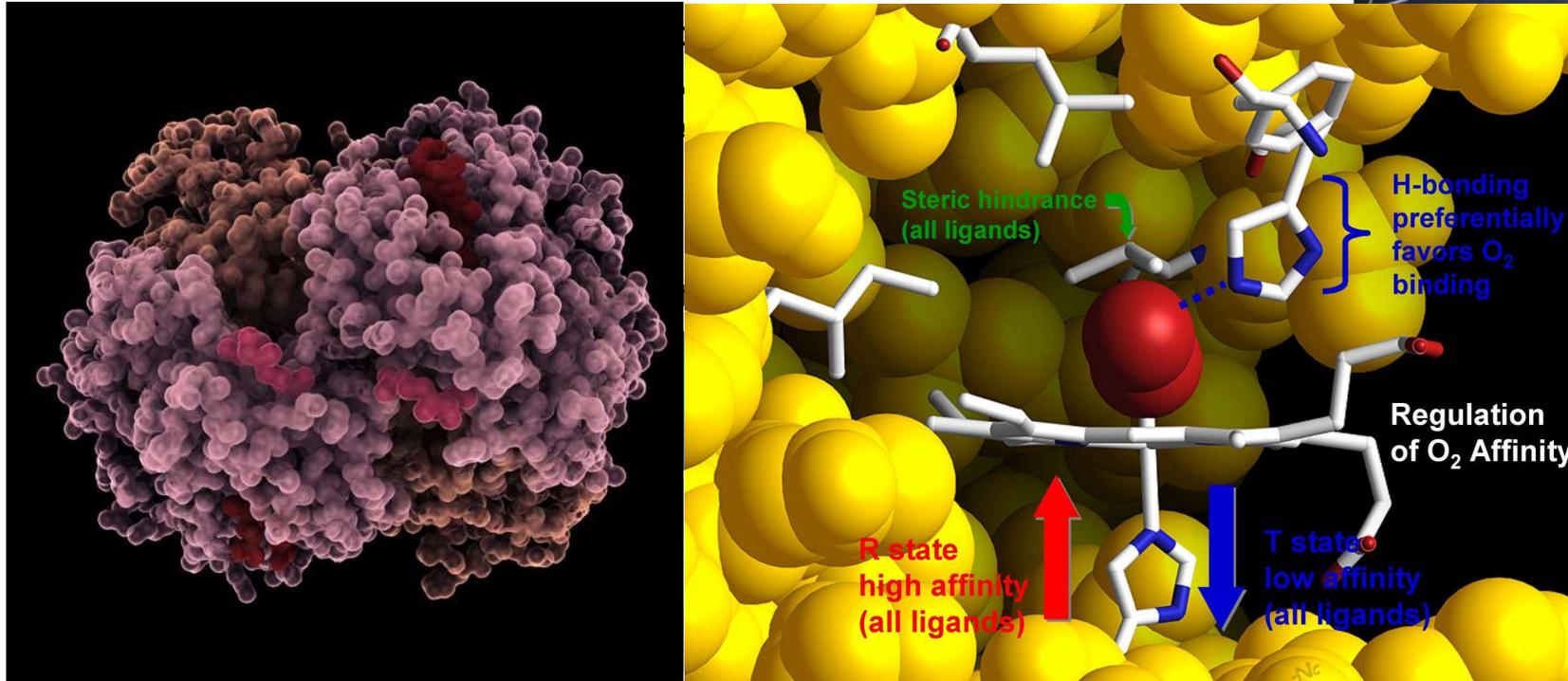
Secure Management QKD Server: SNMPv3, Ethernet 10/100 Rj45, touch panel

Indicators QKD Server: Touch panel, 240x180 pixels

Environmental: Operating temperature 5° to 40° C, Non-operating temperature -10° to 60° C, Operating humidity 0 to 80% RH @ 40° C, Non-operating humidity 95% RH @ 40° C



La non-località nel mondo – Cosa ancora non esiste



Emoglobina (PM 64'000)

Se l'emoglobina avesse un problema nel legare l'ossigeno, e volessi «calcolare» come fare a risolverlo...non avrei il tempo per farlo classicamente! Con un QC sì.



La visione del mondo della Relatività e della Meccanica Quantistica

Settimana 8

Lezione 8.3
Conclusioni

Carlo Cosmelli



coursera



Cosa abbiamo visto 1: Relatività Speciale (ristretta) (1905)

- **La velocità della luce nel vuoto c è costante, per qualunque osservatore.**
- **Le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi inerziali.**
- L'etere non esiste.
- Trasformazioni di Coordinate.
- Spazio-tempo di Minkowski.
- Presente-Passato-Futuro- Altrove.
- Contrazione delle Lunghezze.
- Dilatazione dei tempi.
- « c » è la velocità limite...per i segnali o i corpi.
- Il contenuto di energia di un corpo dipende dalla sua massa: $E=mc^2$



Cosa abbiamo visto 2: Relatività Generale (1915)



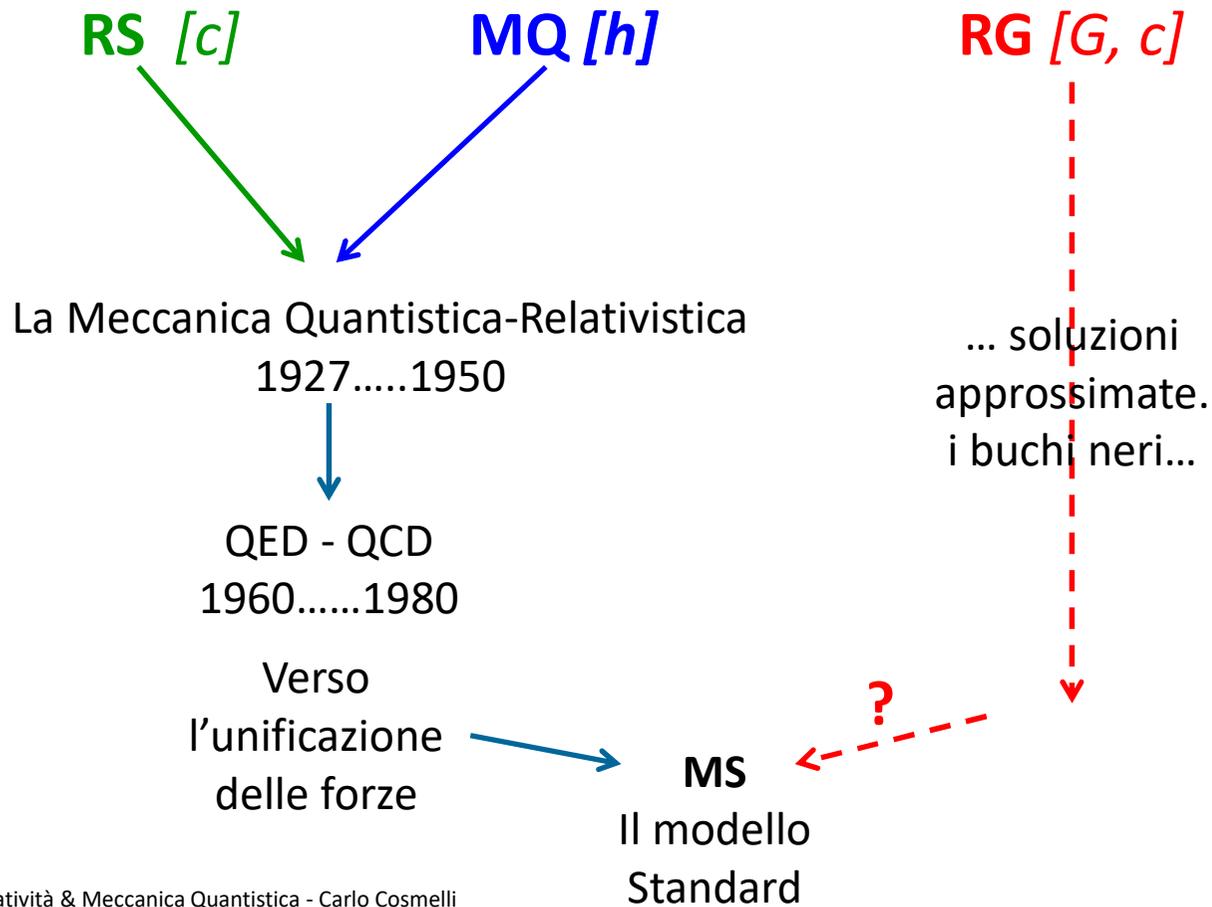
- **La massa inerziale è uguale alla massa gravitazionale: $M_i = M_g$**
- Un'accelerazione costante è equivalente alla forza di gravità,
➔ **Sistemi non inerziali sono localmente equivalenti.**
- Lo spazio-tempo, in presenza di massa (energia) è curvo.
- I corpi (con massa o senza massa) si muovono secondo delle geodetiche.
- Deflessione della luce in un campo gravitazionale... la luce «cade»
- Contrazione radiale delle lunghezze.
- Contrazione dei tempi.
- Quando una massa è grande, e sta in uno spazio molto piccolo...succedono cose strane.

Cosa abbiamo visto 3: Meccanica Quantistica «ortodossa» (Copenhagen) (1900-1927) + (Bell 1964 – Aspect 1982)

- L'energia e.m è scambiata per quanti indivisibili : $E = hf$
- **L'energia e.m. è composta di quanti indivisibili: i fotoni.**
- Le orbite atomiche sono quantizzate.
- **Ad ogni particella è «associata» un'onda di lunghezza d'onda $\lambda = h/p$.**
- **Ogni sistema è «completamente» descritto da una funzione d'onda $\psi(r,t)$.**
- **La funzione d'onda $\psi(r,t)$ è un'ampiezza di probabilità.**
- **L'evoluzione nel tempo e nello spazio della funzione d'onda è completamente deterministica [l'equazione di Schrödinger].**
- **Principio di Indeterminazione: per ogni sistema esistono coppie di grandezze che non possiedono contemporaneamente valori determinati.**
- **Vale la sovrapposizione degli stati .**
- **La realtà, per sistemi interlacciati (entangled), non è locale.**



Come si sono evolute queste tre teorie?

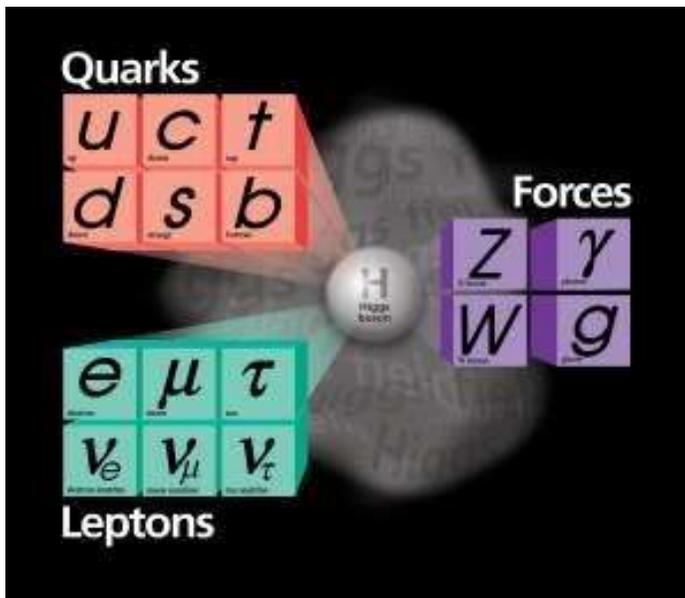


Il modello del nostro mondo, oggi - MS + la Gravità

Il catalogo delle particelle «elementari»...



Il Modello Standard



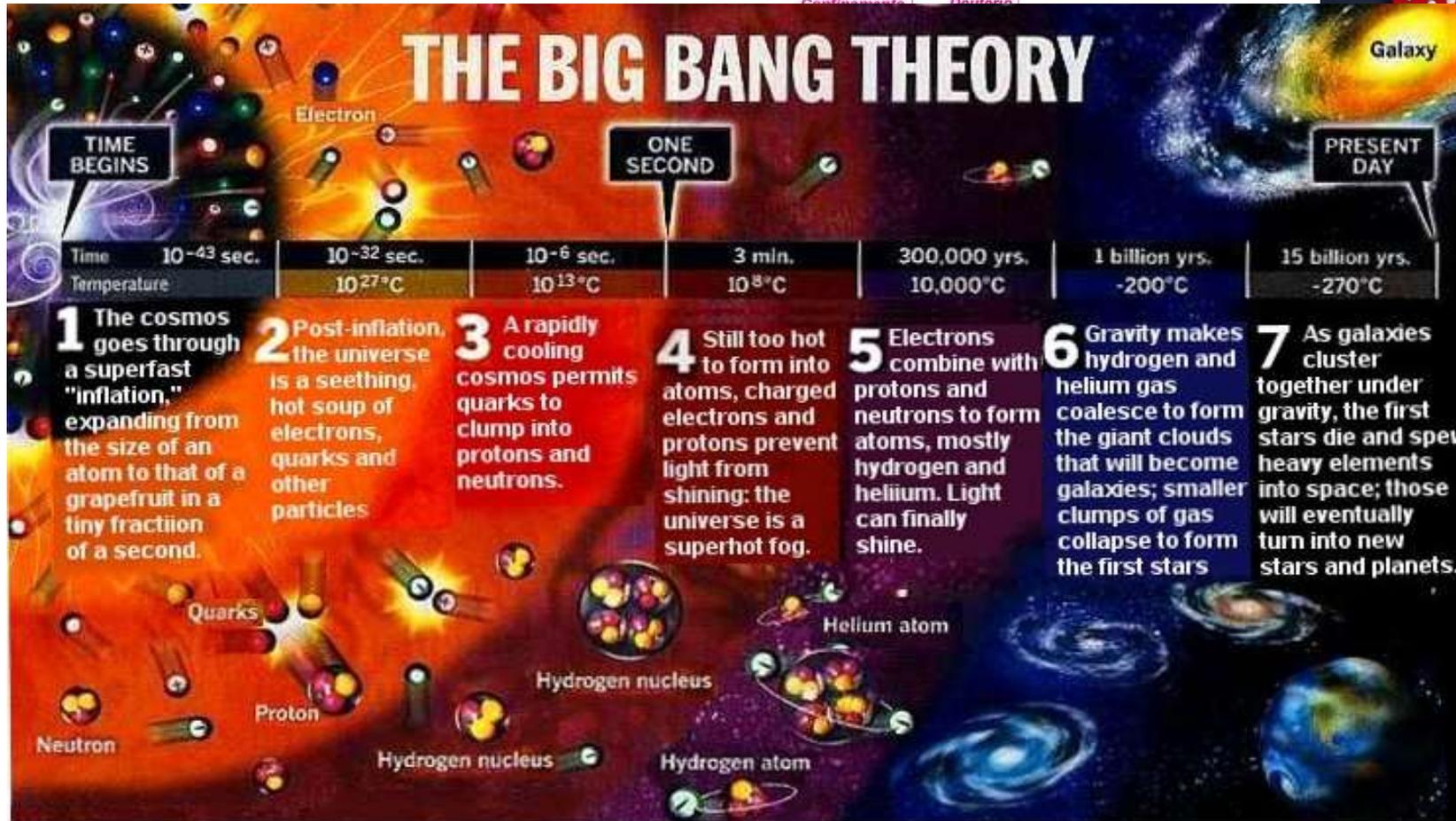
Con i Quarks ci facciamo i Barioni:
Protoni – Neutroni [3Q]
– Mesoni [2Q]...

I Leptoni sono gli Elettroni, i Muoni
e i Tauoni con i rispettivi neutrini.

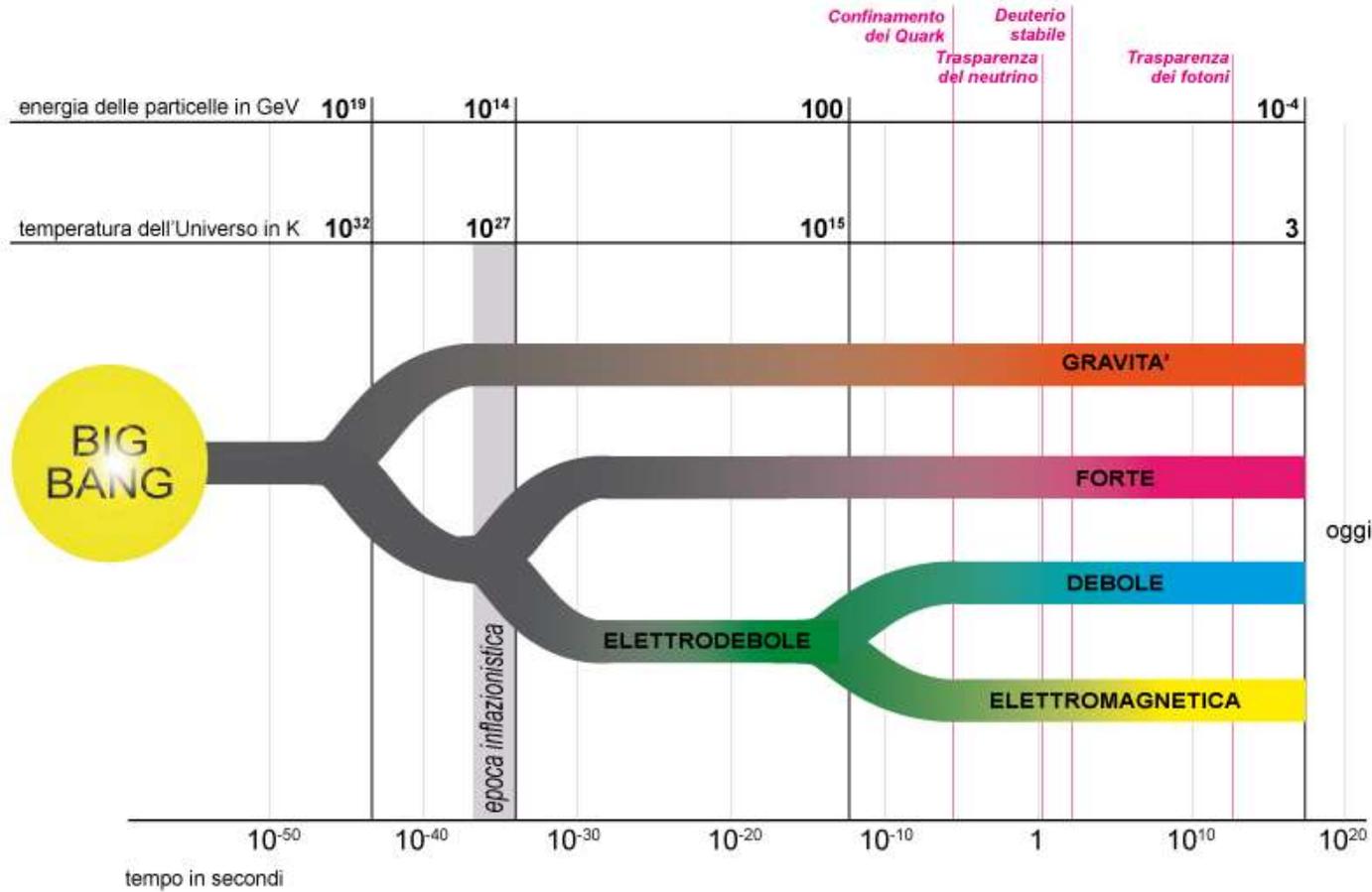
Le «Forze», o interazioni, sono
trasportate dai bosoni:
 γ - il fotone – e.m.
 g - il gluone – interazione forte
 Z, W - interazione debole
 H – Higgs – «dà» la massa

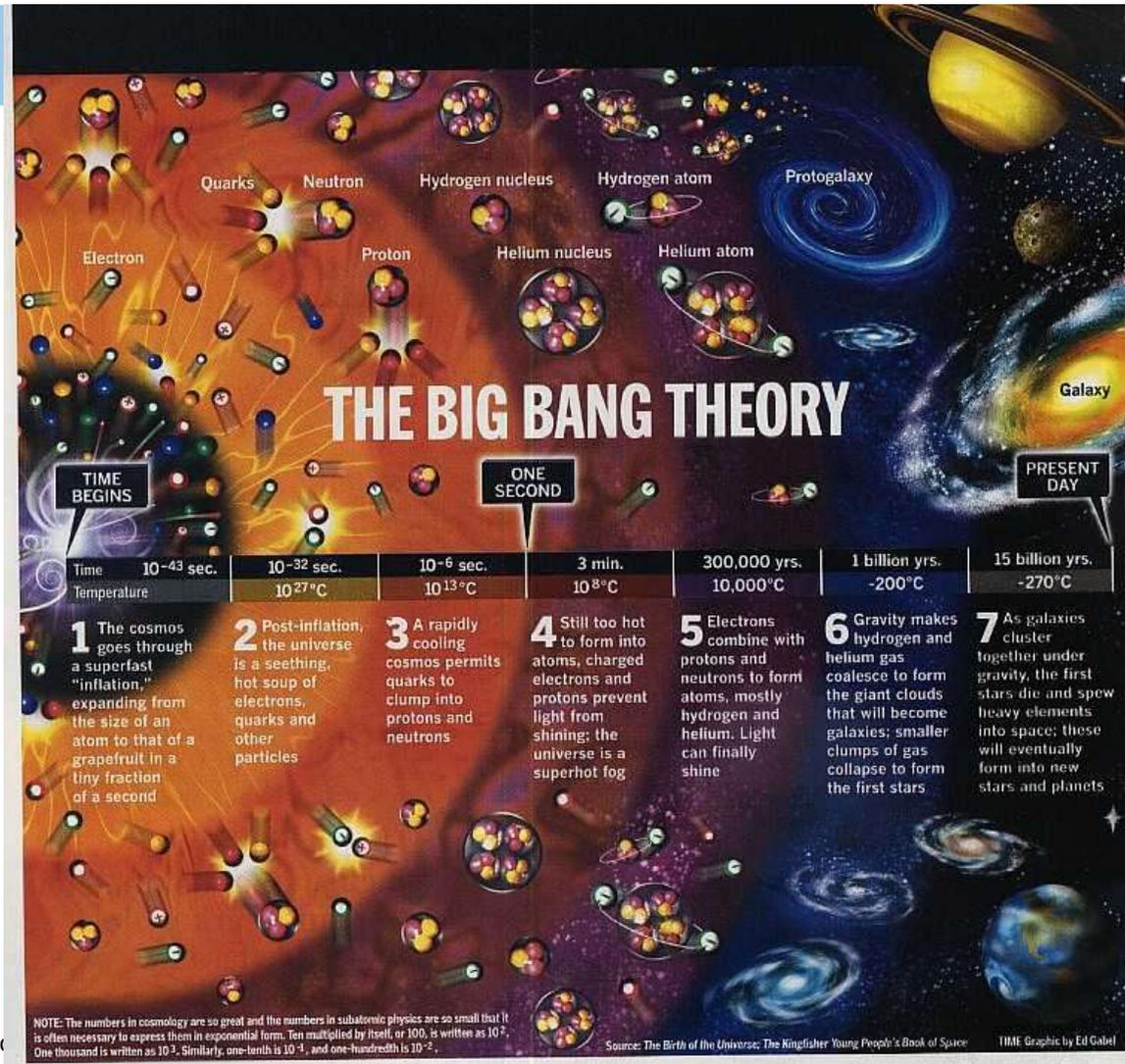
Il «gravitone» non è stato visto, l'interazione gravitazionale non è compresa nel MS...

Tutte insieme, ma separate



Tutte insieme, ma separate





Conclusione

Non può esserci una conclusione.

Abbiamo capito una grossa parte di come funziona il nostro mondo, ma ancora non sappiamo tante, troppe cose.



E continueremo a cercare di capirle, qualche volta scoprendo qualcosa di utile a tutta l'umanità, ma sempre spinti da quello che dice Galileo in «Vita di Galileo» di B. Brecht:

« lo devo sapere »



Shanghai - MAGLEV Train (Germany)



L'effetto tunnel nei superconduttori – 1908, 1956, 1969, 1970, 1980...

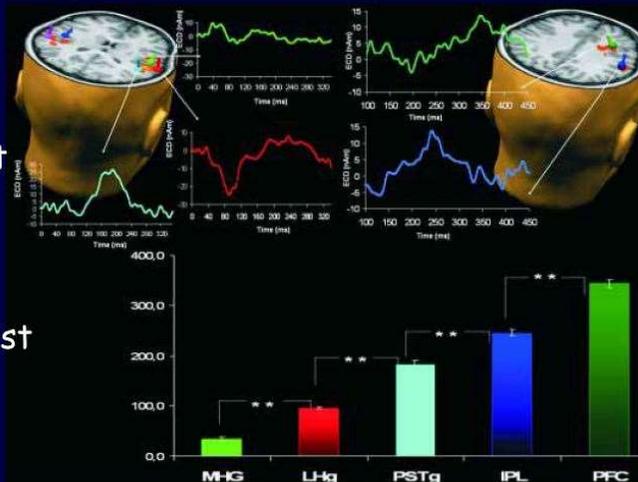
Multimodal integration

Team members:

Gian Luca Romani, Physicist
Vittorio Pizzella, Physicist
Cosimo Del Gratta, Physicist
Stefania Della Penna, Physicist
Raffaella Franciotti, Physicist
Paolo Belardinelli, Physicist
Luca Ciancetta, Engineer
Francesco de Pasquale, Physicist
Dante Mantini, Engineer
Laura Marzetti, PhD student
Gianni Perrucci, PhD student

Activities:

Methods for EEG/MEG-fMRI data fusion and combined analysis
Neuronavigation for fMRI guided TMS
Data pre-processing for EEG-fMRI and EEG-TMS
Brain connectivity studies using multimodal data



La materia nell'universo

