



Iniziativa specifica gr.IV

FLAG ^{$\mu\nu$} _{$\mu\nu$}

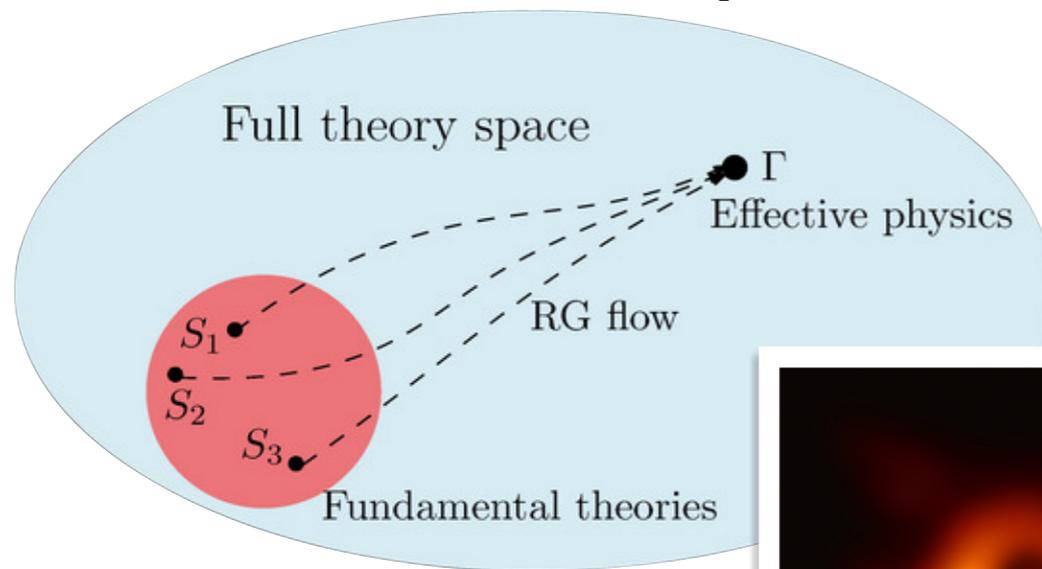
Fields And Gravity

QUANTUM (?)

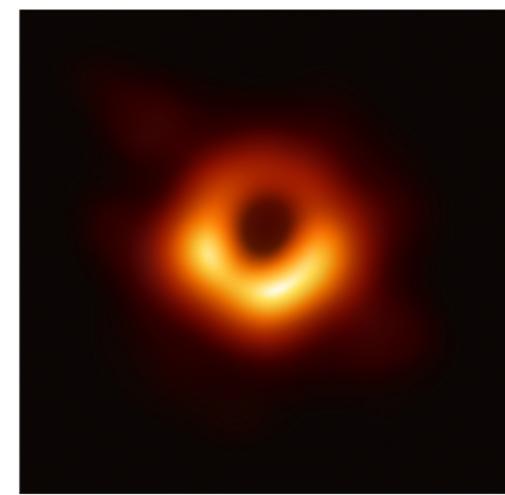
Assemblea di Sezione

20/3/2023

L'attività dell'IS è principalmente rivolta allo studio dei **fenomeni quantistici** in presenza di un **campo gravitazionale**. In particolare fenomeni derivanti dalla **quantizzazione della gravità**.

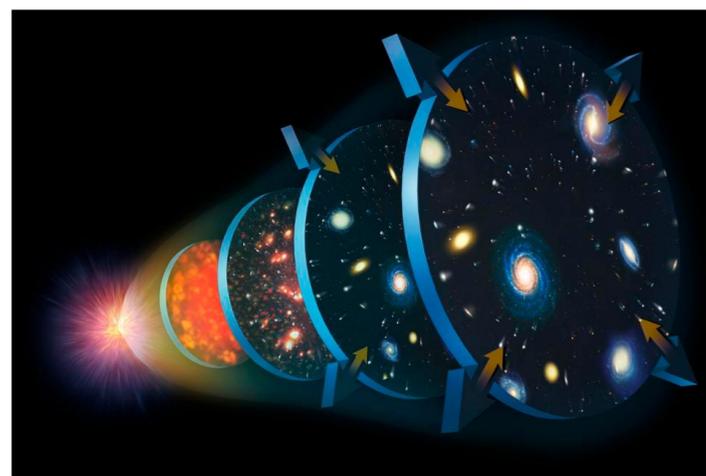


**Teorie di campo
effettive della gravità**
FRG, Modelli
corpuscolari, teorie $F(R)$



Cosmologia (Semi)Classica e Quantistica

Inflazione, DE, DM, GW



Buchi Neri (Primordiali)

Formazione,
Evaporazione,
Paradosso informazione
Singolarità, Orizzonti

Partecipanti Locali

Strutturati

- Roberto Casadio
- *Gabriele Gionti*
- Alexander Kamenshchik
- Alessandro Pesci
- Alessandro Tronconi
- Gian Paolo Vacca
- Gianmassimo Tasinato

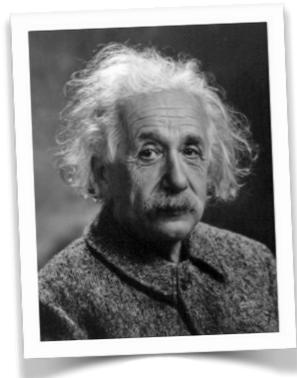
Post-Doc, PhD

- Leonardo Chataignier
- Nicola Pedron
- Polina Petriakova
- Feng Wenbin

INFN La Gravità Quantistica è necessaria?



La descrizione della **materia** e delle sue interazioni fondamentali è fondata sui principi della **meccanica quantistica** e della **relatività speciale**.



$$\eta_{\mu\nu}, |\psi\rangle$$



Il **Modello Standard** descrive le interazioni fondamentali (**teorie di gauge**) in un'unica teoria unificata. È possibile unificare l'interazione gravitazionale? No, non è rinormalizzabile: $[G_N] = m^{-2}$

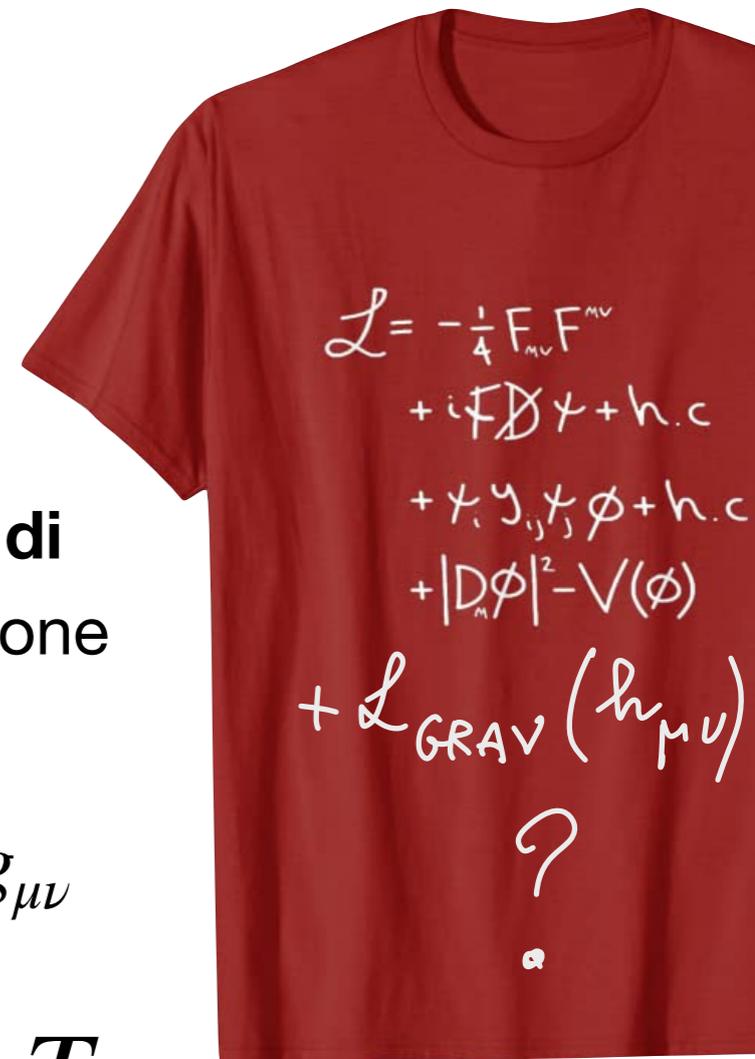
Lo **spazio-tempo** è **curvo** perché risente della materia: $\eta_{\mu\nu} \rightarrow g_{\mu\nu}$

$$F_G = G_N \frac{mM}{r^2} \longrightarrow R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu}$$

Classico

Quantistico

Le Eq. di Einstein esprimono una relazione matematica **incompleta!**



Scala a cui **forza gravitazionale** e **MQ** si devono necessariamente coniugare

Velocità di fuga: $\frac{1}{2}v^2 = \frac{G_N M}{r} \rightarrow r_{\text{lim}} = \frac{2G_N M}{c^2}$

Principio di indeterminazione di **Heisenberg**

$$\Delta x \cdot \Delta p \sim \hbar \rightarrow \lambda \sim \frac{\hbar}{m}$$

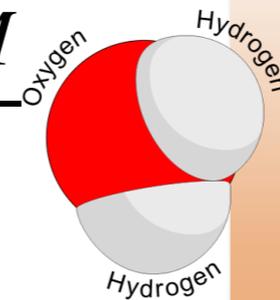
Se cerco di localizzare una particella di massa M ho bisogno di fotoni con la lunghezza d'onda $\lambda_M \sim \hbar/M$
 E per poter essere riflessi ed arrivare all'osservatore

$$\lambda_M > r_{\text{lim}} \rightarrow \frac{M^2}{M_P^2} < 1$$

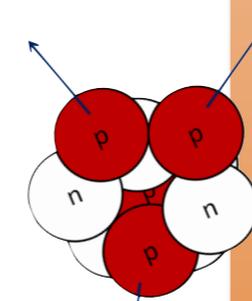
$$M_P \simeq 2 \cdot 10^{-5} g$$



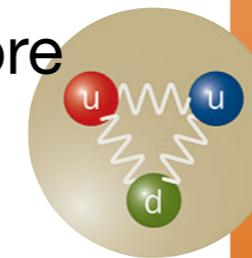
Fisica Classica (Gravità)



Molecole (QED)



Nucleoni (Yukawa)



Quarks e gluoni (QCD)

Mondo quantistico



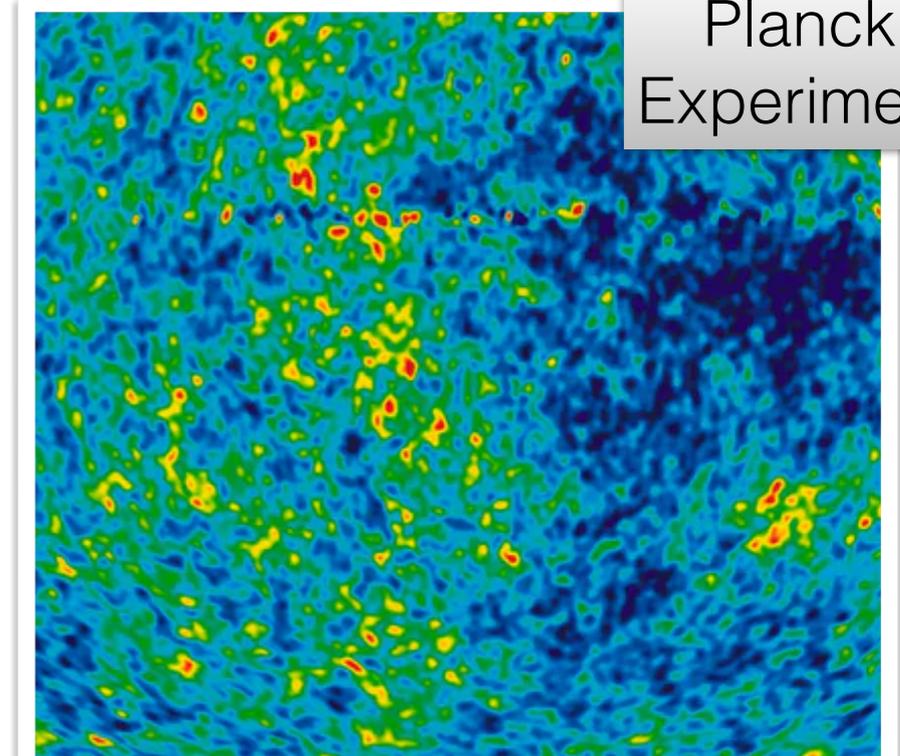
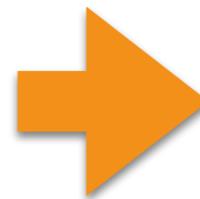
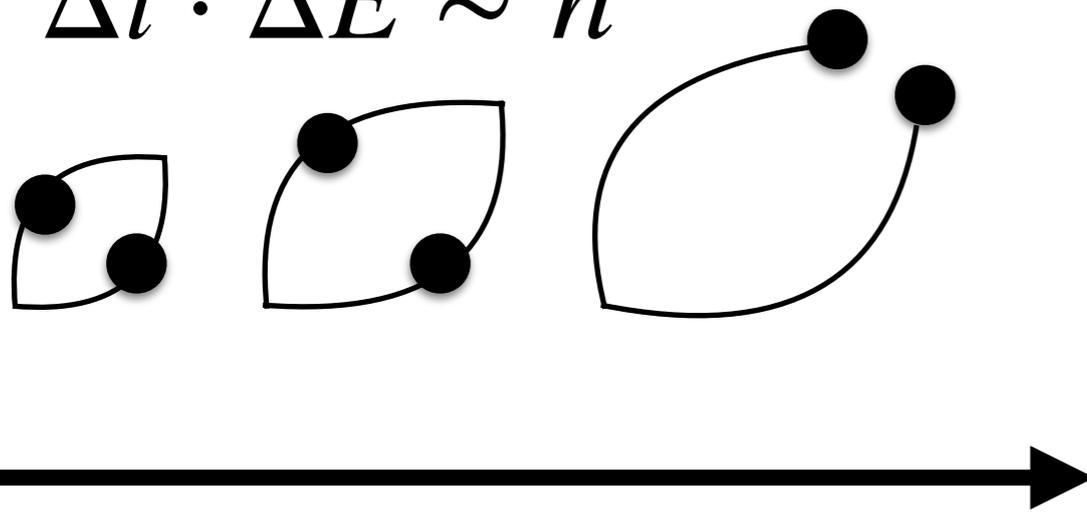
Relatività generale è una teoria solida, confermata sperimentalmente con estrema precisione. Ha predetto l'esistenza di BH e GW poi confermata dalle osservazioni

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G_N \langle T_{\mu\nu} \rangle$$

La materia evolve secondo leggi quantistiche in uno spazio-tempo "classico"

La teoria dell'Inflazione cosmica e l'osservazione della radiazione cosmica di fondo (CMB) sono la prova che la trattazione semi-classica funziona molto bene

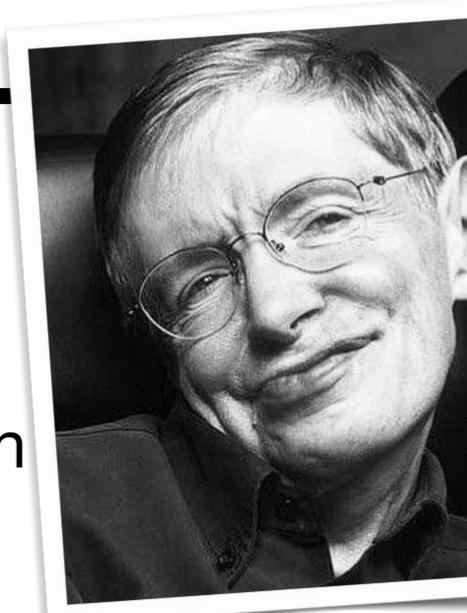
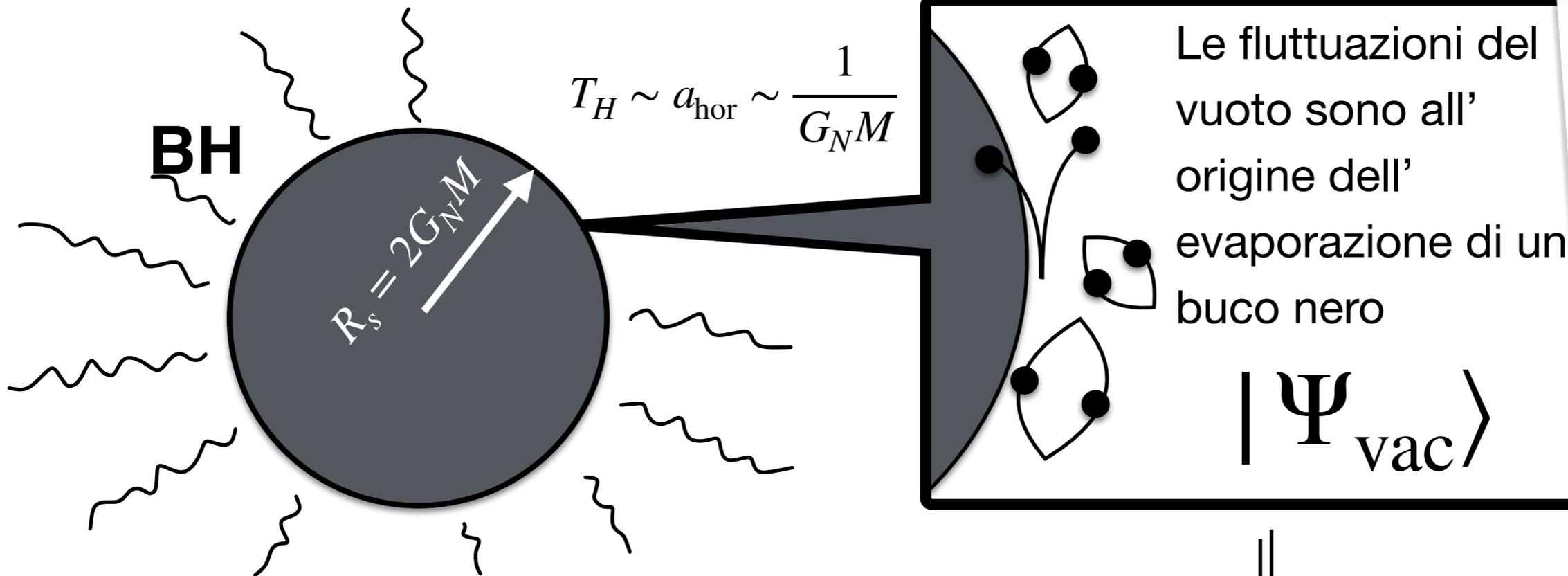
$$\Delta t \cdot \Delta E \sim \hbar$$



Planck
Experiment

Time

Evaporazione dei buchi neri (Hawking)



Termodinamica dei BH: $S_{BH} = \frac{A_H}{l_P^2}$, $dE_{BH} = T dS_{BH}$

Il valore dell'**entropia** può, ad esempio

contenere informazioni sui **microstati** del BH: $S = \ln W$
 essere la misura dell'**entanglement** $S = -\text{Tr} \rho_A \log \rho_A$

Violazione dell'Unitarietà

$$|\psi_f\rangle = U(t_i, t_f) |\psi_i\rangle$$

Lo stato finale è termico e viola l'**unitarietà** che è un principio generale della **QM**



- Come si giustifica l'origine dell'**entropia dei buchi neri** e l'apparente **violazione dell'unitarietà**?
- Qual è il significato delle **singolarità dello spazio tempo** presenti nella descrizione matematica (classica) di BH e dell'universo primordiale ("big bang")?

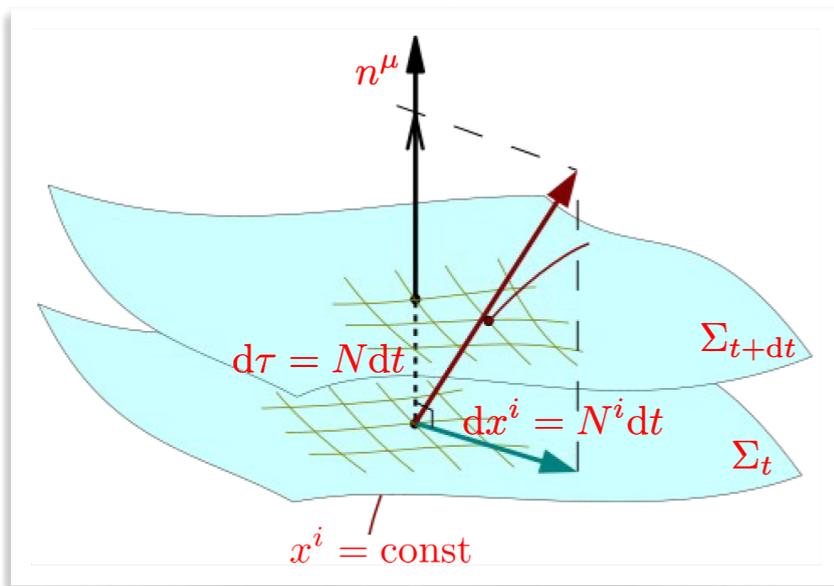
- Il **vuoto quantistico** non è uno stato inerte e contiene energia (infinita?)

$$E_{\text{vac}} \sim \int_0^{\bar{k}} k^2 dk (\hbar\omega_k/2) \rightarrow \bar{k}^4/2$$

- Qual'è il suo effetto sulla curvatura dello spazio-tempo? (Back-reaction, **Energia Oscura**)
- La relatività generale è una teoria classica di campo, con un'invarianza (di gauge) e un accoppiamento $[G_N] = m^{-2}$. Quindi a livello quantistico **non è rinormalizzabile**. Non è una teoria accettabile a livello quantistico

Un teoria accettata che unifichi la gravità e la MQ non esiste (Teoria delle stringhe?)
 Diverse possibilità sono studiate per modellare possibili effetti quanto-gravitazionali

Quantizzazione Canonica $\hat{H}|\Psi\rangle = 0$



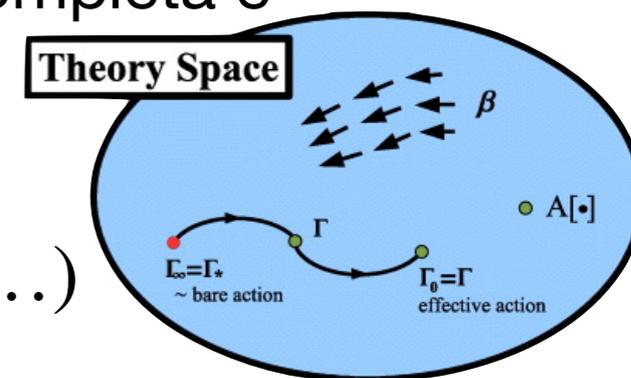
Ipotesi corpuscolare

Lo spazio-tempo e la gravità sono la manifestazione di altro: un gas di gravitoni pervade lo spazio la sua interazione con la materia ordinaria simula l'effetto della curvatura dello spazio-tempo

Teorie di campo effettive-*sicurezza asintotica*

GR descrizione effettiva di bassa energia di una teoria (quantistica) completa e rinormalizzabile

$$S = \int d^4x \mathcal{L}(R, \phi, R_{\mu\nu}, \dots)$$



Principio di indeterminazione generalizzato

L'esistenza di una lunghezza "minima" l_P associata alla scala di Planck modifica la struttura dello spazio-tempo e le relazioni di commutazione canoniche della MQ

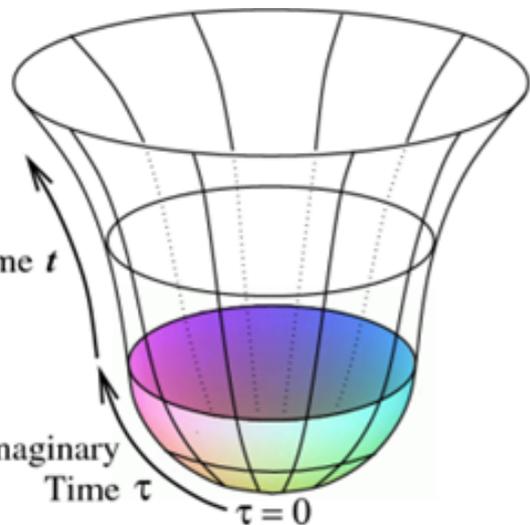
$$\Psi(g_{\mu\nu}, \{\phi, \psi, A_\mu\})$$

La descrizione quantistica dell'universo mediante una funzione d'onda, non può essere interpretata in modo tradizionale:

- Esiste un solo universo
- Non esiste il concetto di osservatore (classico) esterno al sistema
- L'interpretazione dei "molti mondi" di Everett sembra più appropriata
- La funzione d'onda non è sempre normalizzabile in senso tradizionale



Equazione di Wheeler-DeWitt: $\hat{H} |\Psi\rangle = 0$



- L'equazione è analoga all'eq. di Schroedinger indipendente dal tempo
- L'energia totale del sistema gravità+materia è zero
- Il tempo (classico) non compare nella descrizione

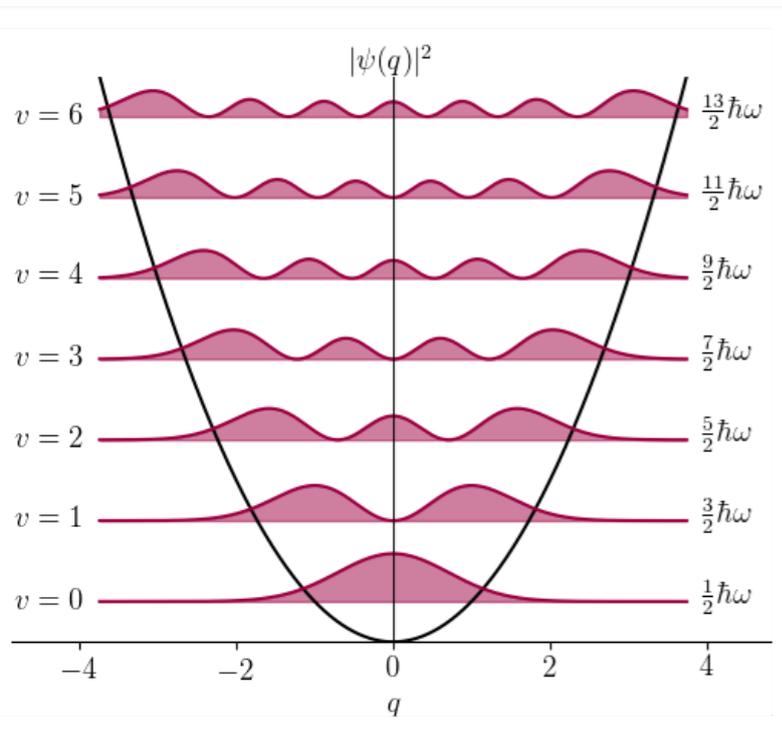
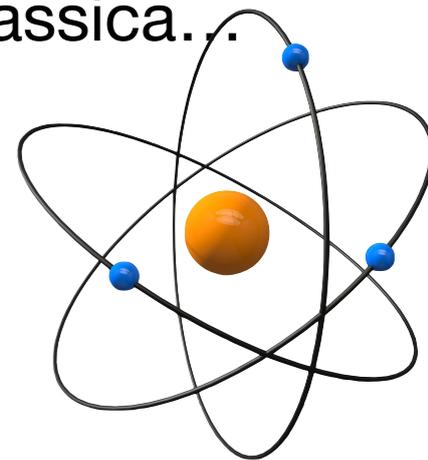
Problema del tempo

Il tempo (classico) è operativamente una **grandezza relazionale**: la posizione (di una lancetta di orologio) è messa in relazione con la configurazione di un sistema fisico.



In un sistema chiuso una parte del sistema serve da orologio per il resto. Ma le lancette devono seguire una traiettoria classica...

Fattorizzazione di Born-Oppenheimer $\Psi = \psi_G \cdot \chi_{\text{mat},G}$



$$\hat{H}\Psi = \left(\hat{H}_G + \hat{H}_{\text{mat}}(G) \right) \Psi = 0$$

Eq. di Einstein quantistica: $\left(\hat{H}_G + \langle \hat{H}_{\text{mat}} \rangle_\chi \right) \psi_G = \langle \hat{O}_{\text{NA}} \rangle_\chi \psi_G$

Definizione del tempo $|\psi_G|^2 \sim 1/\dot{G} \rightarrow G = G(t)$

Eq. quantistica della materia: $\left(i \frac{d}{dt} - \hat{H}_{\text{mat}}(t) \right) \chi_{\text{mat}}(t) = \left(\hat{\Omega}_{\text{NA}} - \langle \hat{\Omega}_{\text{NA}} \rangle_\chi \right) \chi_{\text{mat}}(t)$

Gli effetti quantistici gravitazionali sono attesi nell'universo primordiale e nei buchi neri

Inflazione: l'Universo è omogeneo a meno di fluttuazioni $ds^2 = a(\eta)^2 (d\eta^2 - d\vec{x} \cdot d\vec{x})$

$$\hat{H}(a, \phi, \{v_k\})\Psi = \left(\hat{H}_G(a) + \hat{H}_{\text{inf}}(a, \phi) + \sum_k \hat{H}_k(a, v_k) \right) \Psi = 0$$

Fattorizzazione di Born-Oppenheimer: $\Psi = \psi_G(a) \cdot \chi_{\text{inf}}(a, \phi) \prod_k \chi_k(a, v_k)$

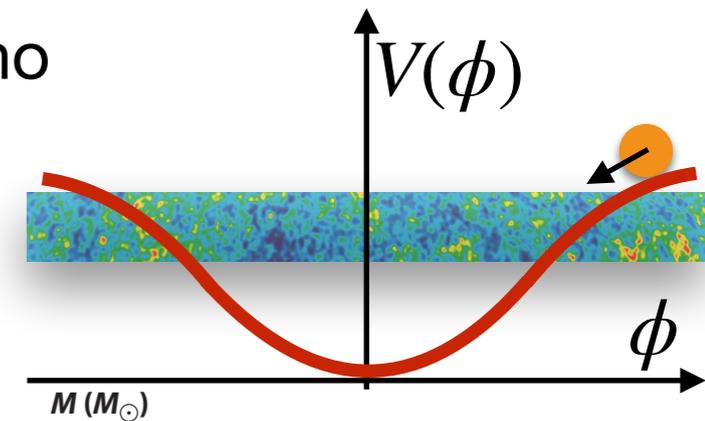
$$\text{Eq. di Einstein } \left(\hat{H}_G + \langle \hat{H}_{\text{inf}} \rangle_\chi \right) \psi_G \simeq \left(\frac{1}{2m_p^2} \frac{d^2}{da^2} + V_{\text{inf}}(a) \right) \psi_G(a) \simeq 0$$

Variazioni repentine del potenziale inflazionario possono produrre **un'onda riflessa (universo in contrazione)** che **interferisce** con la fase inflazionaria in espansione!

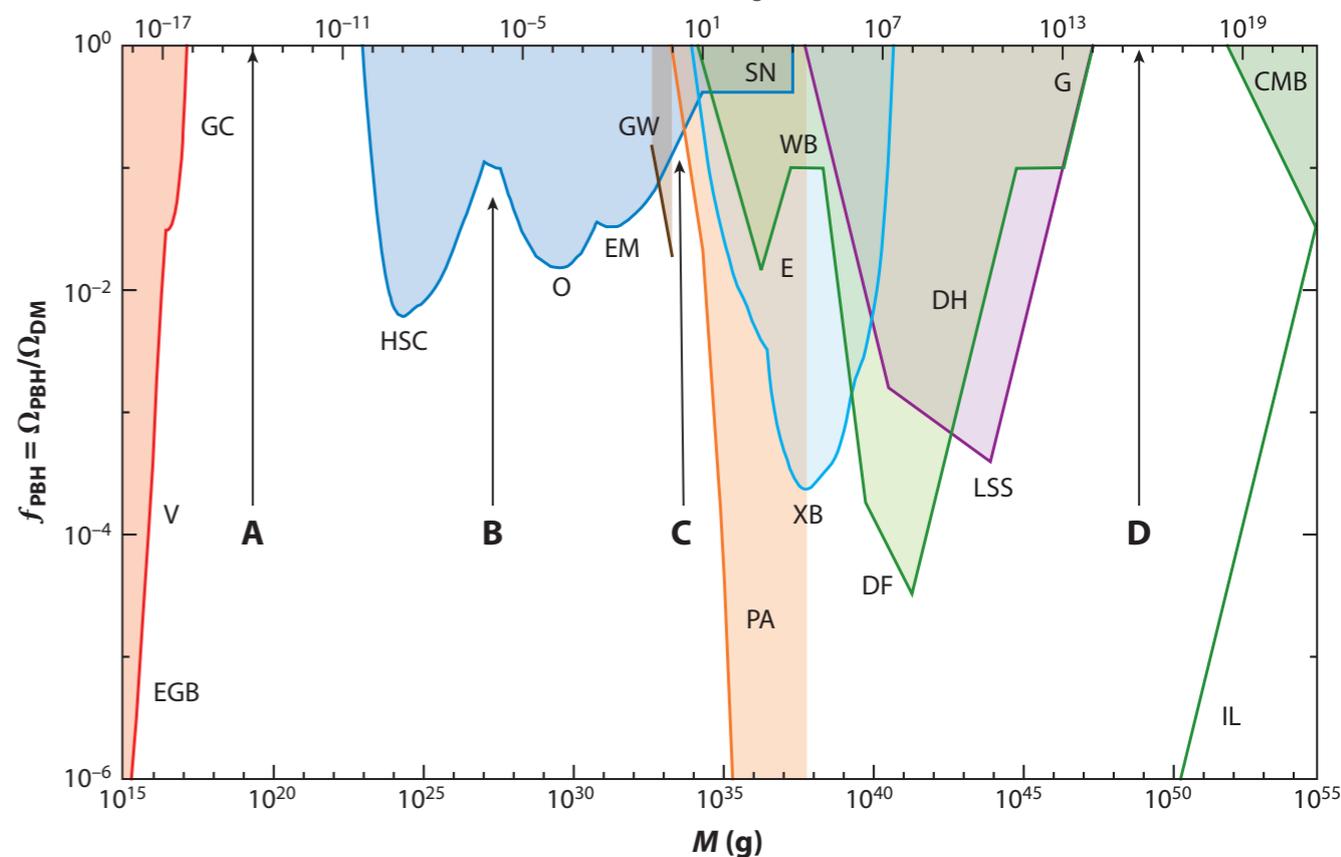
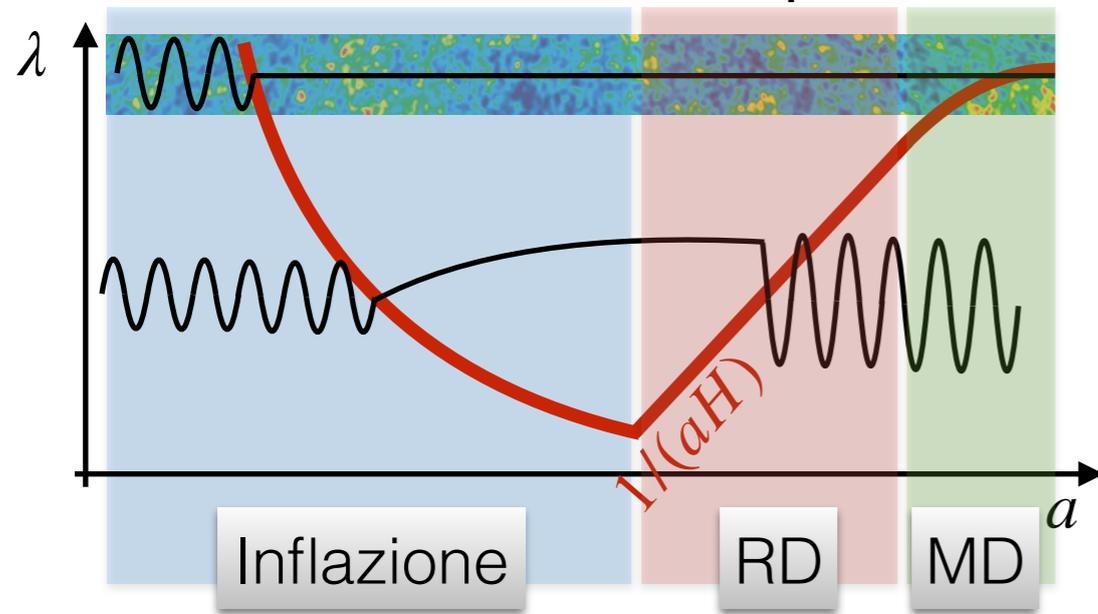
$$\text{Eq. di Mukhanov-Sasaki } \left(i \frac{d}{d\eta} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial v_k^2} - \frac{\omega_k^2(\eta)}{2} v_k^2 \right) \chi_k(v_k, \eta) = \left(\hat{\Omega} - \langle \hat{\Omega} \rangle_k \right) \chi_k(v_k, \eta)$$

Le fluttuazioni del vuoto quantistico durante l'inflazione producono disomogeneità

- Piccole disomogeneità alle scale della CMB $\Delta T/T \sim 10^{-5}$
- Grandi disomogeneità possibili ad altre scale



Grandi disomogeneità possono collassare al termine dell'inflazione e produrre PBHs



- possibili candidati a materia oscura
- permettono di verificare l'inflazione a scale a cui la CMB non ha accesso
- originano buchi neri (super)massivi
- producono un fondo di onde gravitazionali primordiali potenzialmente osservabile.

L'energia di vuoto da un contributo non banale alle equazioni di Einstein (Zeldovich) dinamicamente equivalente ad una **costante cosmologica**

$$E_{\text{vac}} \sim \int_0^{M_P} k^2 dk (\hbar\omega_k/2) \rightarrow M_P^4/2 \sim 10^{120} \Lambda$$

Bosoni e **fermioni** danno contributi opposti all'energia di vuoto (**Pauli**) e per questo se esistesse la **supersimmetria** (rotta ad una scala $\sim \Lambda^{1/4}$) saremmo in grado di giustificare il valore osserva dell'energia oscura.

Bosoni=# Fermioni

divergenze quartiche

$$\sum_{\text{scalars}} m_i^2 + 3 \sum_{\text{vectors}} m_i^2 = 2 \sum_{\text{fermions}} m_i^2$$

divergenze quadratiche

$$\sum_{\text{scalars}} m_i^4 + 3 \sum_{\text{vectors}} m_i^4 = 2 \sum_{\text{fermions}} m_i^4$$

divergenze quadratiche

$$\sum_{\text{scalars}} m_i^4 \ln m_i + 3 \sum_{\text{vectors}} m_i^4 \ln m_i = 2 \sum_{\text{fermions}} m_i^4 \ln m_i$$

	mass →	charge →	spin →					
QUARKS	≈2.3 MeV/c ²	2/3	1/2	u up	≈1.275 GeV/c ²	2/3	1/2	c charm
					≈173.07 GeV/c ²	2/3	1/2	t top
					0	0	1	g gluon
					≈126 GeV/c ²	0	0	H Higgs boson
					≈4.8 MeV/c ²	-1/3	1/2	d down
					≈95 MeV/c ²	-1/3	1/2	s strange
				≈4.18 GeV/c ²	-1/3	1/2	b bottom	
				0	0	1	γ photon	
LEPTONS	0.511 MeV/c ²	-1	1/2	e electron	105.7 MeV/c ²	-1	1/2	μ muon
					1.777 GeV/c ²	-1	1/2	τ tau
					91.2 GeV/c ²	0	1	Z Z boson
					<2.2 eV/c ²	0	1/2	ν_e electron neutrino
				<0.17 MeV/c ²	0	1/2	ν_μ muon neutrino	
				<15.5 MeV/c ²	0	1/2	ν_τ tau neutrino	
				80.4 GeV/c ²	±1	1	W W boson	
								GAUGE BOSONS

Modelli compatibili in genere prevedono l'esistenza di almeno un fermione massivo

SM: 96 fermioni, 28 bosoni

Planck Scale

Standard Model

Grazie!