A satellite with two large solar panels is positioned in space, observing the Earth. A bright, blue-white beam of light, representing a gamma-ray burst, originates from the top left and passes through the satellite towards the Earth. The Earth is shown in a curved perspective, with the continents of Asia and Australia visible. The background is a dark blue space filled with stars.

**Fenomenologia delle relazioni di  
dispersione modificate in gravità  
quantistica attraverso osservazioni  
di gamma ray bursts.**

Domenico Frattulillo

Università degli Studi di Napoli «Federico II»

---

**IFAE 2023, Catania**



# Introduzione

- In molti approcci alla gravità quantistica, a livello effettivo, si considerano deformazioni delle leggi di dispersione delle particelle alla scala di Planck  $\rightarrow E_{QG} \sim E_{Pl} \sim 10^{19} \text{Gev}$ .
- Velocità di propagazione dei fotoni dipendente dall'energia  $v \approx 1 + k \frac{E}{E_{QG}}$  (con k parametro numerico).
- Differenze nei tempi di volo amplificati dalle distanze cosmologiche  $\Delta t \propto L \frac{\Delta E}{E_{QG}}$

“Tests of quantum gravity from observations of gamma-ray bursts”, Amelino-Camelia, Ellis, Mavromatos, Nanopoulos, *Nature* 393 (1998) 763-765



# LIV vs DSR

- LIV

- Deformazioni delle leggi di dispersione senza modificare le trasformazioni che connettono i riferimenti inerziali → **rottura** dell'invarianza relativistica alla scala di Planck → esistenza di un sistema di riferimento privilegiato.

- DSR

- Deformazioni delle leggi di dispersione, delle leggi di composizione dei momenti e delle trasformazioni tra osservatori inerziali, per accomodare la nuova scala invariante di energia  $E_{QG}$ , ottenendo un quadro relativistico.

“Relativity in space-times with short distance structure governed by an observer independent (Planckian) length scale”, Amelino-Camelia, *Int.J.Mod.Phys.D* 11 (2002) 35-60

# Spazio-tempo piatto 1+1D (Minkowski)



# Relazioni di dispersione modificate (LIV)

- Legge di dispersione modificata al primo ordine in  $\frac{1}{E_{QG}}$ .

$$m^2 = E^2 - P^2 + \frac{1}{E_{QG}} (\alpha E^3 + \beta EP^2)$$

- Trasformazioni di Poincarè (non deformate) per connettere due riferimenti inerziali

$$[E, P] = 0; \quad [N, E] = P; \quad [N, P] = E$$

- Tempi di volo dei fotoni che dipendono dall'energia

$$m = 0 \rightarrow v = \frac{\partial E}{\partial P} = 1 - \frac{1}{E_{QG}} P(\alpha + \beta) \rightarrow \Delta t = \frac{1}{E_{QG}} L \Delta E(\alpha + \beta)$$

# Relazioni di dispersione modificate (DSR)

- Legge di dispersione modificata al primo ordine in  $\frac{1}{E_{QG}}$ .

$$m^2 = E^2 - P^2 + \frac{1}{E_{QG}} (\alpha E^3 + \beta EP^2)$$

- Trasformazioni relativistiche **deformate** per connettere due riferimenti inerziali

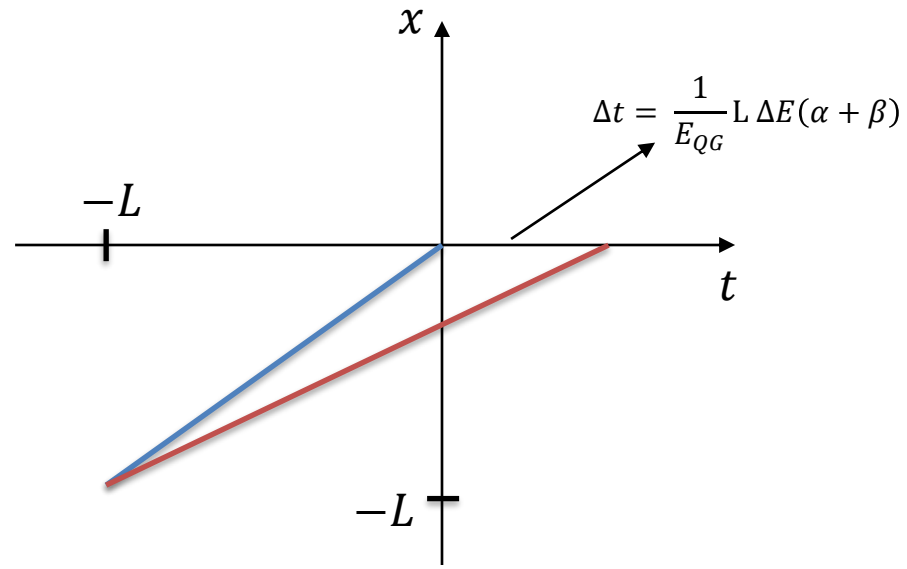
$$[E, P] = 0; \quad [N, E] = P - \frac{1}{E_{QG}} EP(\alpha + \beta); \quad [N, P] = E + \frac{1}{2 E_{QG}} \alpha E^2 + \frac{1}{2 E_{QG}} \beta P^2$$

- Tempi di volo dei fotoni che dipendono dall'energia

$$m = 0 \rightarrow \Delta t = \frac{1}{E_{QG}} L \Delta E (\alpha + \beta)$$

“Taming Nonlocality in Theories with Planck-Scale Deformed Lorentz Symmetry”, Amelino-Camelia, Matassa, Mercati, Rosati, *Phys.Rev.Lett.* 106 (2011) 071301

# Ritardo temporale



- In blu la worldline di una particella poco energetica per cui trascuriamo le deformazioni alla scala di Planck.
- In rosso la worldline di una particella molto più energetica.

# Spazio-tempo curvo





# Formula di Jacob e Piran in FRW

$$\Delta t = \frac{D(z)}{E_{QG}} \Delta E = \frac{1}{E_{QG}} \Delta E \int_0^z \frac{d x}{H(x)} (1 + x)$$

- Questa formula è ricavata considerando che le particelle percorrono la stessa distanza cosmologica comovente e tenendo conto di come le energie scalano con il redshift ( $E = \frac{E_0}{1+z}$ )
- $\Delta E$  è la differenza tra le energie misurate delle due particelle.
- $z$  è il redshift della sorgente e  $H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_M (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}$

“Lorentz-violation-induced arrival delays of cosmological particles”, Jacob, Piran, *JCAP* 01 (2008) 031



# Formula LIV in FRW (generalizzazioni)

- Poiché le simmetrie in una teoria LIV possono essere rotte in moltissimi modi **la formula LIV più generale per il  $\Delta t$  presenta molti altri contributi** oltre al termine di Jacob e Piran.
- Un esempio di formula LIV più generale di quella di Jacob e Piran è data da:

$$\Delta t = \frac{\tilde{D}(z)}{E_{QG}} \Delta E = \frac{1}{E_{QG}} \Delta E \int_0^z \frac{d x}{H(x)} \left( \lambda_1 (1+x) + \lambda_2 + \lambda_3 (1+x)^2 + \lambda_4 \frac{1}{(1+x)} + \dots \right)$$

“ Planck-scale-modified dispersion relations in FRW spacetime” , Rosati, Amelino-Camelia, Marciano, Matassa, *Phys.Rev.D* 92 (2015) 12, 124042

# DSR in de Sitter

- Legge di dispersione modificata più generale al primo ordine in  $\frac{1}{E_{QG}}$ .

$$m^2 = E^2 - P^2 - 2HNP + \frac{1}{E_{QG}} (\alpha E^3 + \beta EP^2 + 2\gamma HNEP + 4\mu H^2N^2E)$$

- Deformando le trasformazioni relativistiche per connettere due riferimenti inerziali si costruisce un quadro relativistico.
- E' possibile connettere i risultati in de Sitter con quelli in FRW attraverso la tecnica dello "slicing".

# Formula DSR più generale in FRW

$$\Delta t = \frac{\Delta E}{E_{QG}} \int_0^z \frac{d x}{H(x)} (1+x) \left( A_1 + A_2 \left( \left( 1 - \frac{H(x)}{1+x} \int_0^x \frac{d y}{H(y)} (1+y) \right)^2 - 1 \right) + A_3 \left( \left( 1 - \frac{H(x)}{1+x} \int_0^x \frac{d y}{H(y)} (1+y) \right)^4 - 1 \right) \right)$$

- $\Delta E$  è la differenza di energia tra le due particelle (al telescopio).
- $z$  è il redshift della sorgente e  $H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_M (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}$
- La formula DSR più generale contiene il termine di Jacob e Piran ( $A_1$ ) e in più presenta solo altri due termini.

“ Planck-scale-modified dispersion relations in FRW spacetime” , Rosati, Amelino-Camelia, Marciano, Matassa, *Phys.Rev.D* 92 (2015) 12, 124042

Amelino-Camelia, Frattulillo, Gubitosi, Rosati, Bedic, a breve su Arxiv.

# Fenomenologia



# GRBs per testare il ritardo temporale

- I GRBs emettono in uno spettro di energia molto ampio.
- Le sorgenti sono in un intervallo di redshift piuttosto ampio (da  $z < 1$ , fino a  $z \sim 9$ ).
- I GRBs sono quindi ideali per testare il ritardo temporale che dipende dalla differenza di energia tra le particelle ed è amplificato dalla distanza alla quale si trova la sorgente.





# Analisi del ritardo

- Il ritardo osservato sarà la somma di un contributo di QG e di un contributo dovuto ad effetti intrinseci alla sorgente.

$$\Delta t_{oss} = \Delta t_{QG} + (1 + z)\Delta t_{em}$$

- Poiché il  $\Delta t_{em}$  è incognito riscriviamo la formula precedente come:

$$\frac{\Delta t_{oss}}{(1+z)} = \frac{\Delta t_{QG}}{(1+z)} + \Delta t_{em} = \Delta t_{em} + \frac{D(1)}{E_{QG}} \frac{E^*}{1+z}$$

Dove  $E^*$  è l'energia riscalata con la distanza  $E^* = E \frac{D(z)}{D(1)}$ .

- Analizzando i dati alla ricerca di una relazione lineare tra  $\frac{\Delta t_{oss}}{(1+z)}$  e  $\frac{E^*}{1+z}$  si può vincolare  $E_{QG} \sim E_{Pl}$ .



# Conclusioni

---

- E' possibile testare, con gli attuali apparati sperimentali, effetti legati a deformazioni delle leggi di dispersione alla scala di Planck grazie all'amplificazione dovuta alle distanze cosmologiche.
- Usando la formula di Jacob e Piran, attualmente si riesce a vincolare la scala di nuova fisica  $E_{QG} \sim E_{Pl}$ . Si raggiunge quindi una sensibilità per cui ha senso considerare delle formule più generali.

**Grazie!**