

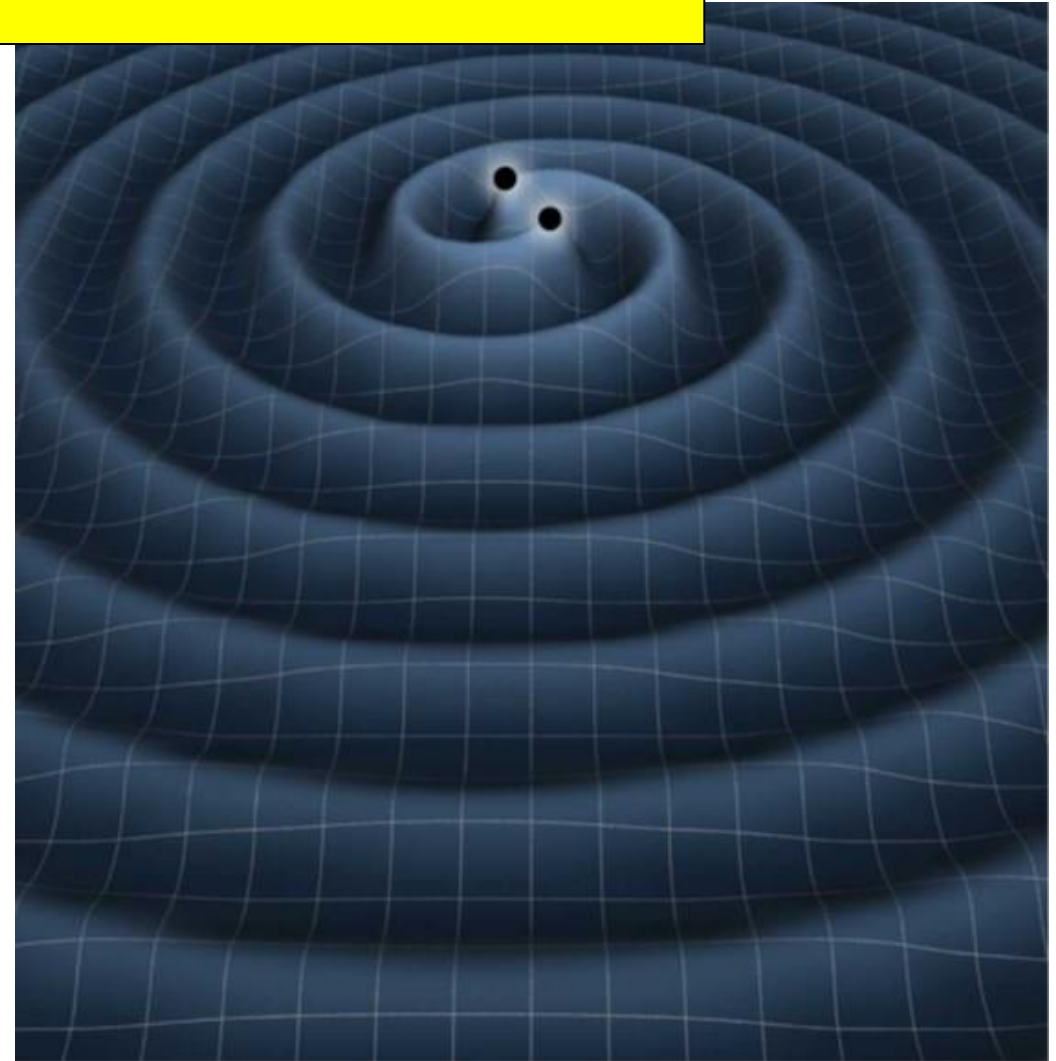
Buchi Neri, Onde Gravitazionali e Fisica Quantistica

Marco Giammarchi

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – Sezione di Milano

<http://pcgiammarchi.mi.infn.it/giammarchi>

- Le Onde Gravitazionali
- Coalescenza di due buchi neri
- Termodinamica semplice dei buchi neri
- La ricerca di Gravità Quantistica





Vittorio Gorini (1940 – 2025)

Era un maestro nel senso forte del termine, non solo un docente. La sua curiosità era leggendaria: parlando con lui si passava senza soluzione di continuità dalla relatività generale all'antropologia, dal funzionamento del cervello alla geografia di regioni remote, dalla storia allo sport, fino ai dialetti e alle sfumature delle lingue.

Era difficile trovarlo impreparato su un argomento, e ancora più difficile sentirlo usare le sue conoscenze per ostentazione: la sua cultura "enciclopedica" era messa al servizio della conversazione, della conoscenza. Mai dell'ego.

1. Le Onde Gravitazionali

Campo E

(in un campo elettrico)

$$F = q E$$

$$F = m a$$

$$q E = m a$$

$$a = \frac{q E}{m}$$

Il moto dipende da come è fatta la particella

Campo G

(in un campo g)

$$F = m g$$

$$F = m a$$

$$m g = m a$$

$$a = g$$

Il moto NON dipende da come è fatta la particella

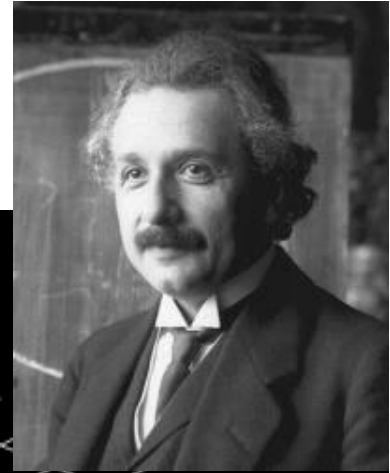
Immaginiamo una particella m, q che si muova in un campo elettrico o uno gravitazionale

Ma se la gravitazione non dipende da nessuna caratteristica del corpo allora essa è una proprietà dello spaziotempo.

Teoria geometrica della gravità.
Curvatura dello spaziotempo

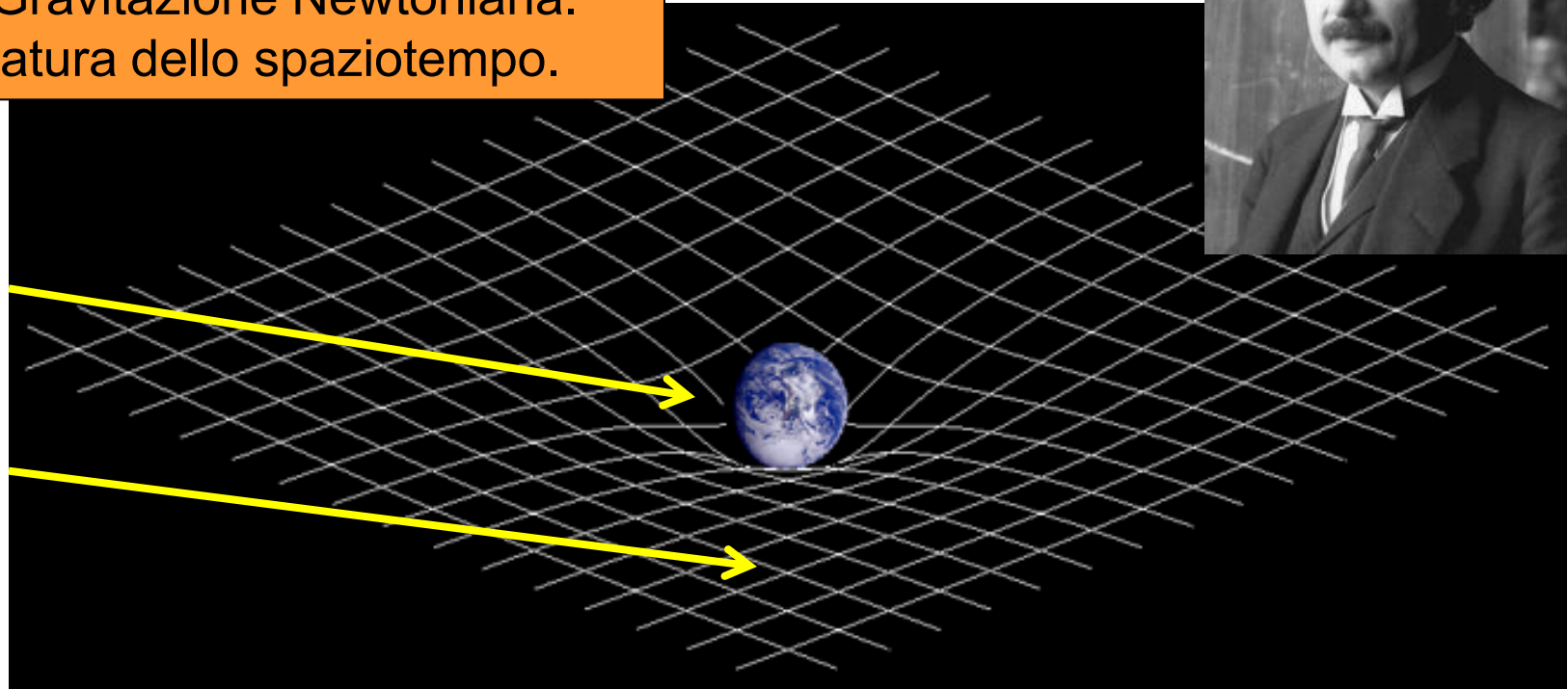
La Relatività Generale è una teoria della Gravitazione che rispetta il principio di equivalenza (Einstein – 1915).

Relatività Generale: una teoria geometrica della Gravità proposta da Albert Einstein nel 1915. Comprende Relatività Speciale e Gravitazione Newtoniana. Descrive la gravità come una curvatura dello spaziotempo.



Massa - Energia

Rappresentazione dello spaziotempo



La curvatura dello spaziotempo è correlata a energia/momento di materia e radiazione. Questa correlazione è data dalle Equazioni di Einstein

Tensore di Einstein

Tensore Energia-Momento

Tensore metrico

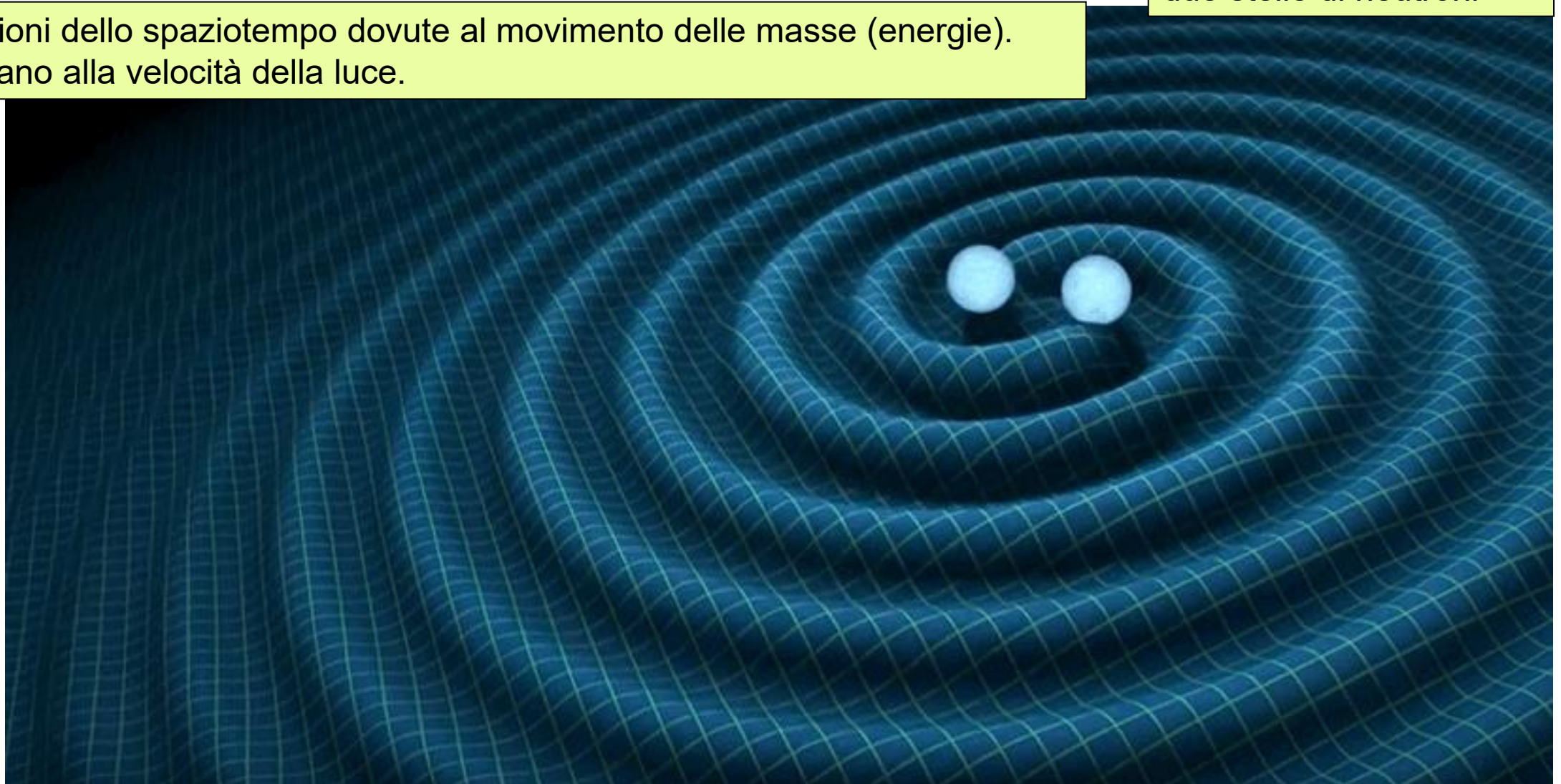
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$G_{\mu\nu} = G_{\mu\nu}(\partial_\theta \partial_\varepsilon g_{\alpha\beta})$$

Relatività Generale all'opera: le Onde Gravitazionali

Esempio: un sistema di due stelle di neutroni

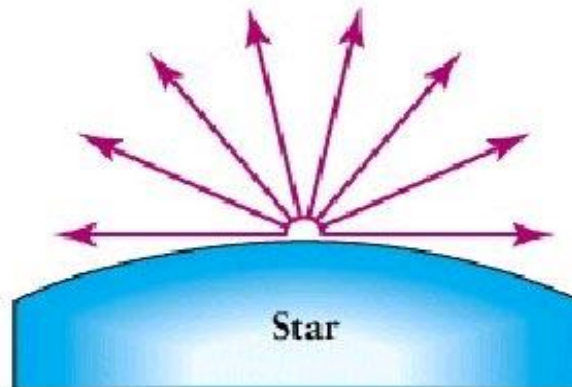
Perturbazioni dello spaziotempo dovute al movimento delle masse (energie).
Si propagano alla velocità della luce.



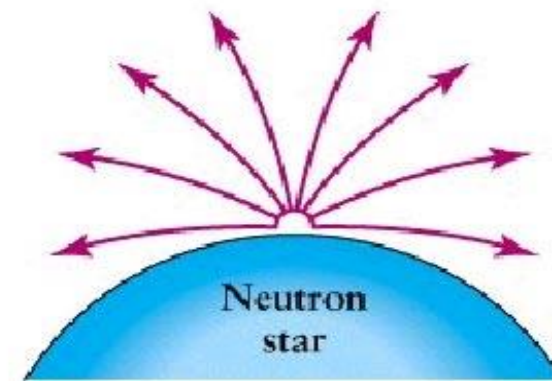
2. Coalescenza di due Buchi Neri

La gravità devia il percorso della luce

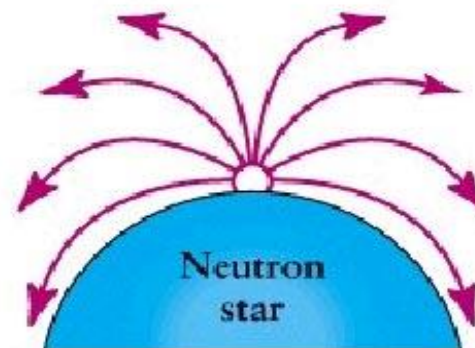
Nel buco nero la deviazione è tale da intrappolare i raggi di luce



a



b

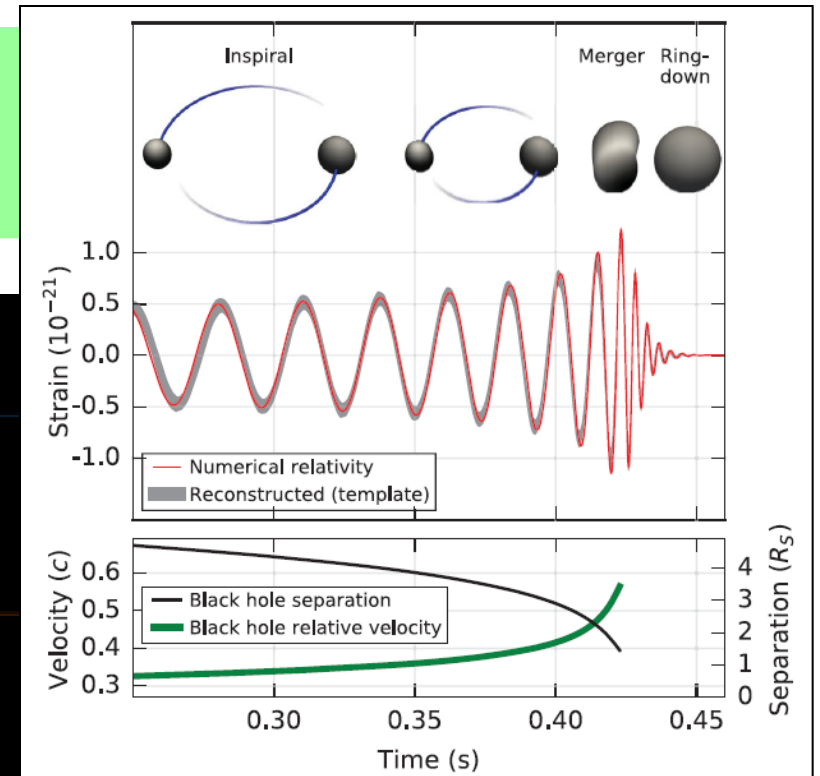
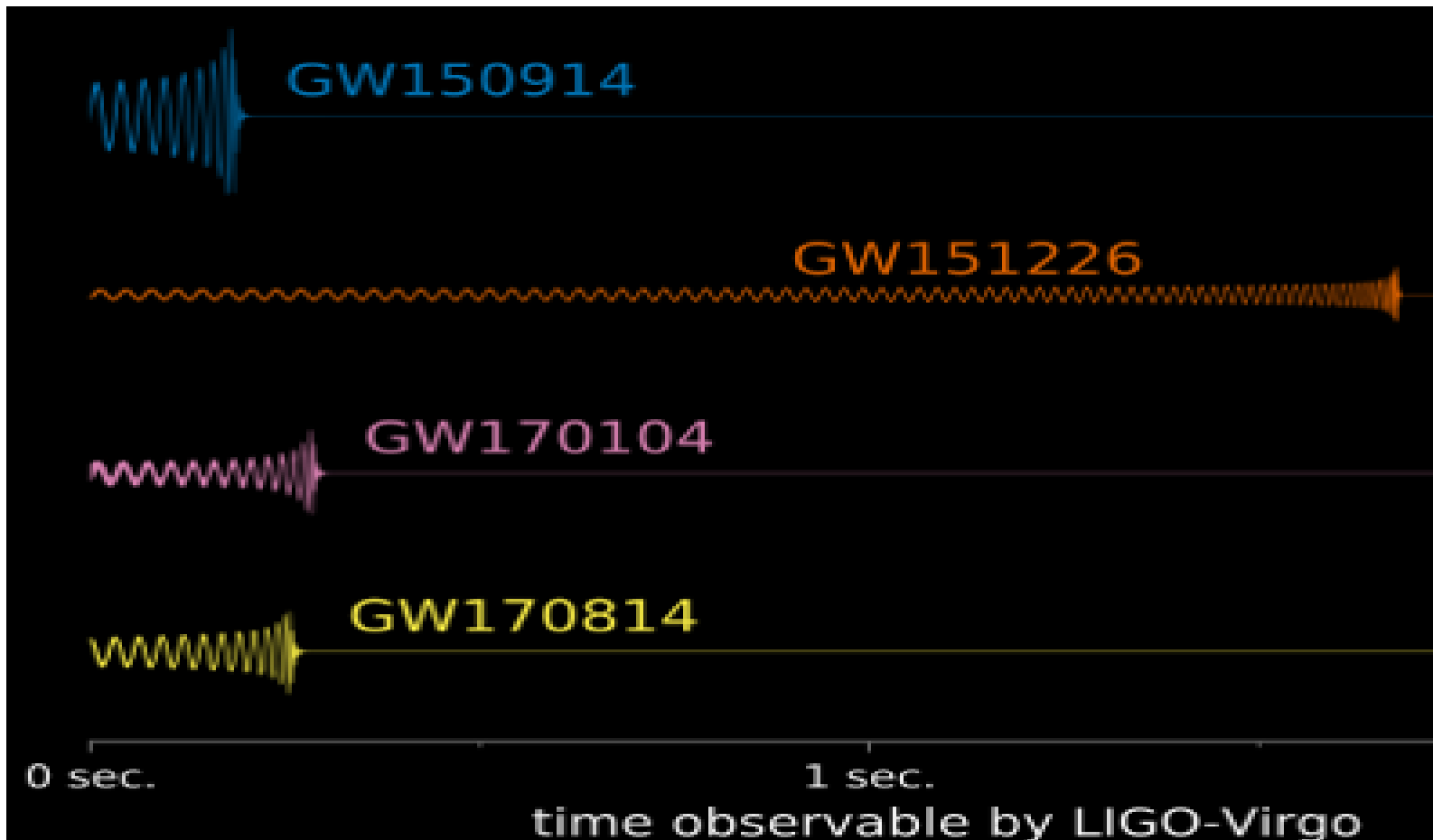


c



d

- La coalescenza di due buchi neri forma onde gravitazionali
- Rivelazione a terra con gli interferometri LIGO-Virgo
- Le prime coalescenze osservate:



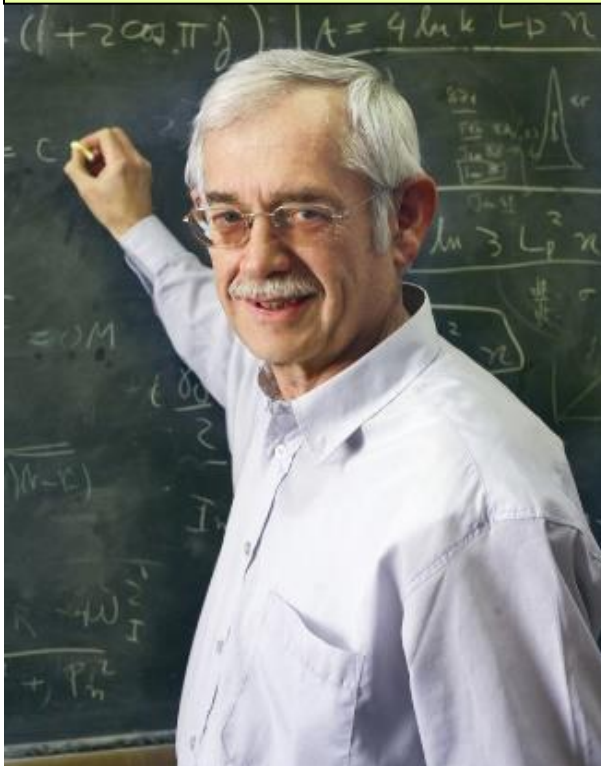
GW150914 : 62 Masse Solari
 GW151226 : 21 Masse Solari
 GW170104 : 49 Masse Solari
 GW170814 : 56 Masse Solari

3. Termodinamica semplice dei Buchi Neri

Buchi Neri = Black Holes

Bekenstein & Hawking

Jakob Bekenstein (1947-2015)

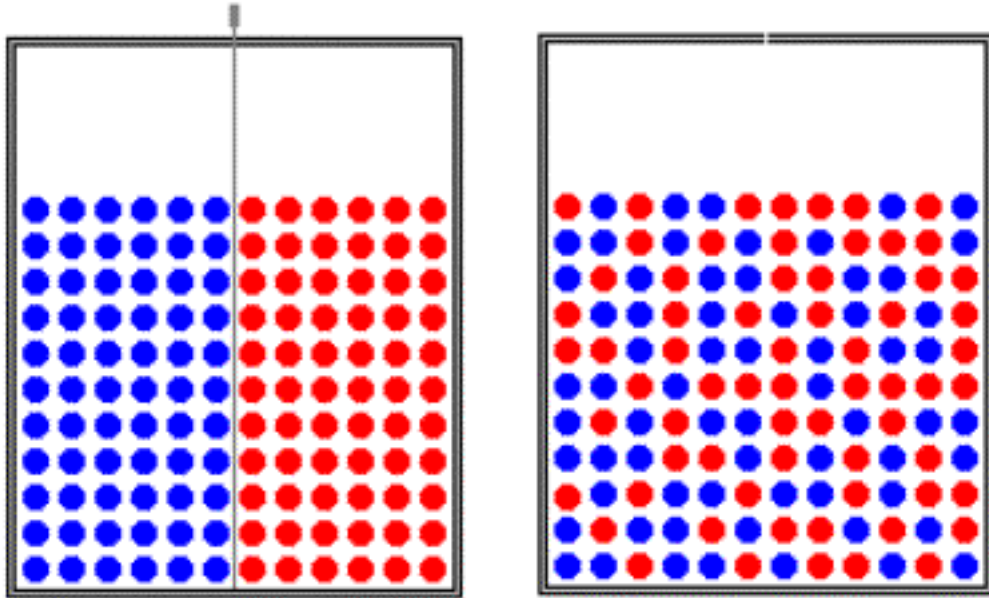


Stephen Hawking (1942-2018)



Entropia

Entropia dal punto di vista della Meccanica Statistica



Bassa Entropia

Alta Entropia

L'equazione dell'entropia di Boltzmann, permette di calcolare l'entropia di uno stato del sistema in relazione alla sua probabilità:

$$S = k \ln W$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ costante di Boltzmann

W = Molteplicità della configurazione, numero di permutazioni della configurazione.

Alcune osservazioni (in forma semplice):

- l'entropia può solo aumentare
- L'entropia è naturalmente associata a una temperatura

Entropia per i Buchi Neri?

Prima



$$S = 10000 \text{ J/K}$$



$$S = 0 ?$$

Dopo



$$S = 0 ?$$

E' necessario che i Buchi Neri abbiano Entropia!

Emissione di Radiazione da Buchi Neri: Radiazione di Hawking

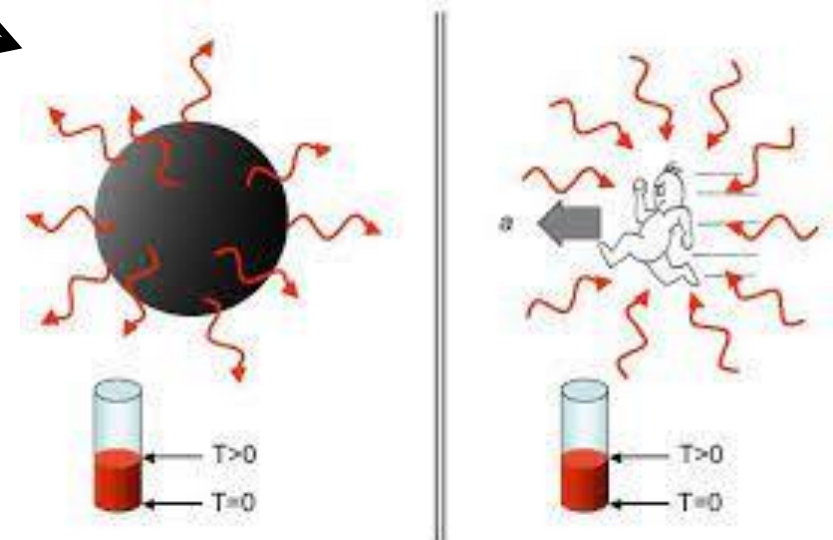
Effetto Unruh (relativistico e quantistico):
Una particella in modo ACCELERATO vede il VUOTO ad una Temperatura

Principio di Equivalenza (tra accelerazione e gravitazione)

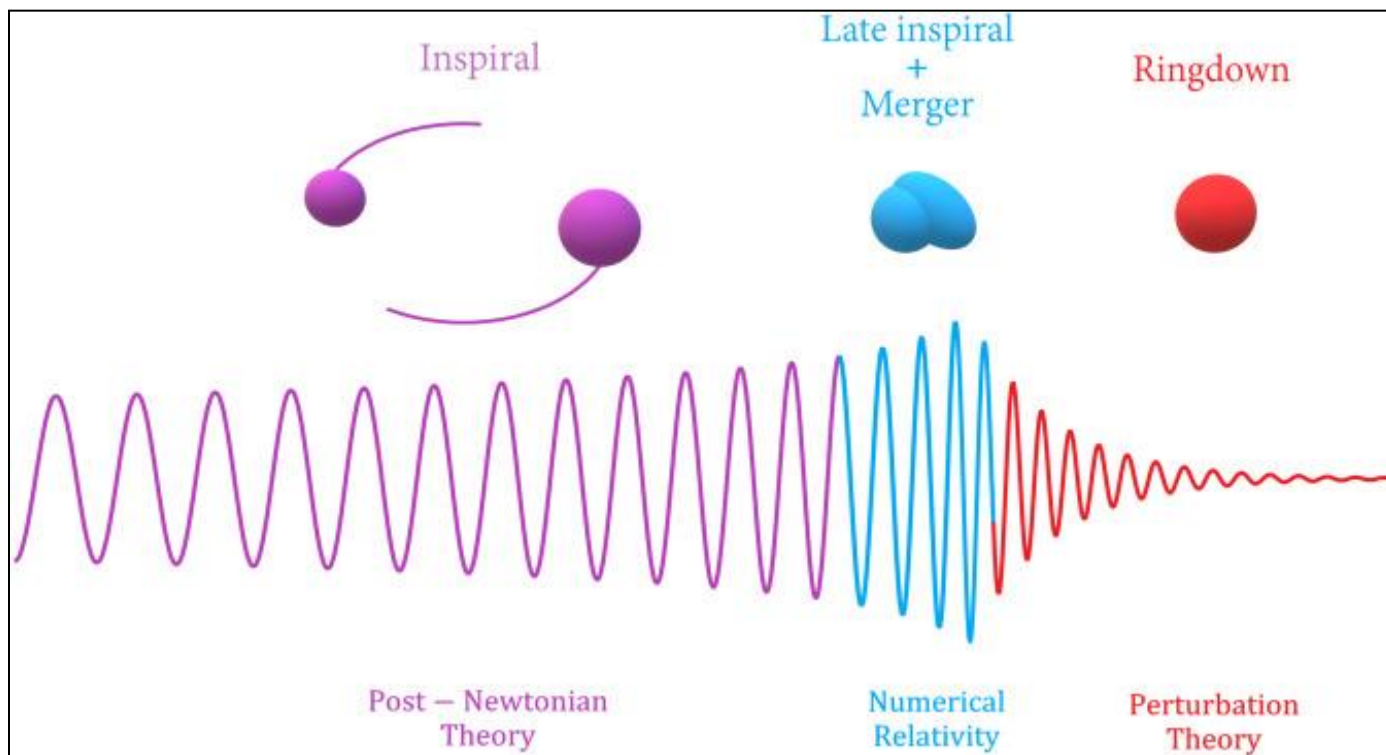
Il Buco Nero (visto da un osservatore che non vi cade dentro) deve emettere una radiazione (Hawking), quindi è a una T

I Buchi Neri hanno una grande entropia (sono lo stato finale di una evoluzione gravitazionale)

$$S = \frac{k A}{4 l_P^2}$$



3. La ricerca della Gravità Quantistica



Testing Quantum Gravity with Gravitational Waves from the ringdown of binary Black Holes coalescences : A New Frontier in Fundamental Physics

M.D.C. Torri^{ab1} F. Ricci^{cd} M. Giammarchi^{ab} L. Miramonti^{ab}
V. Toso^{ab} C. Sigala^a

^aDipartimento di Fisica, Università degli Studi di Milano,
via Celoria 16, I - 20133 Milano, Italy

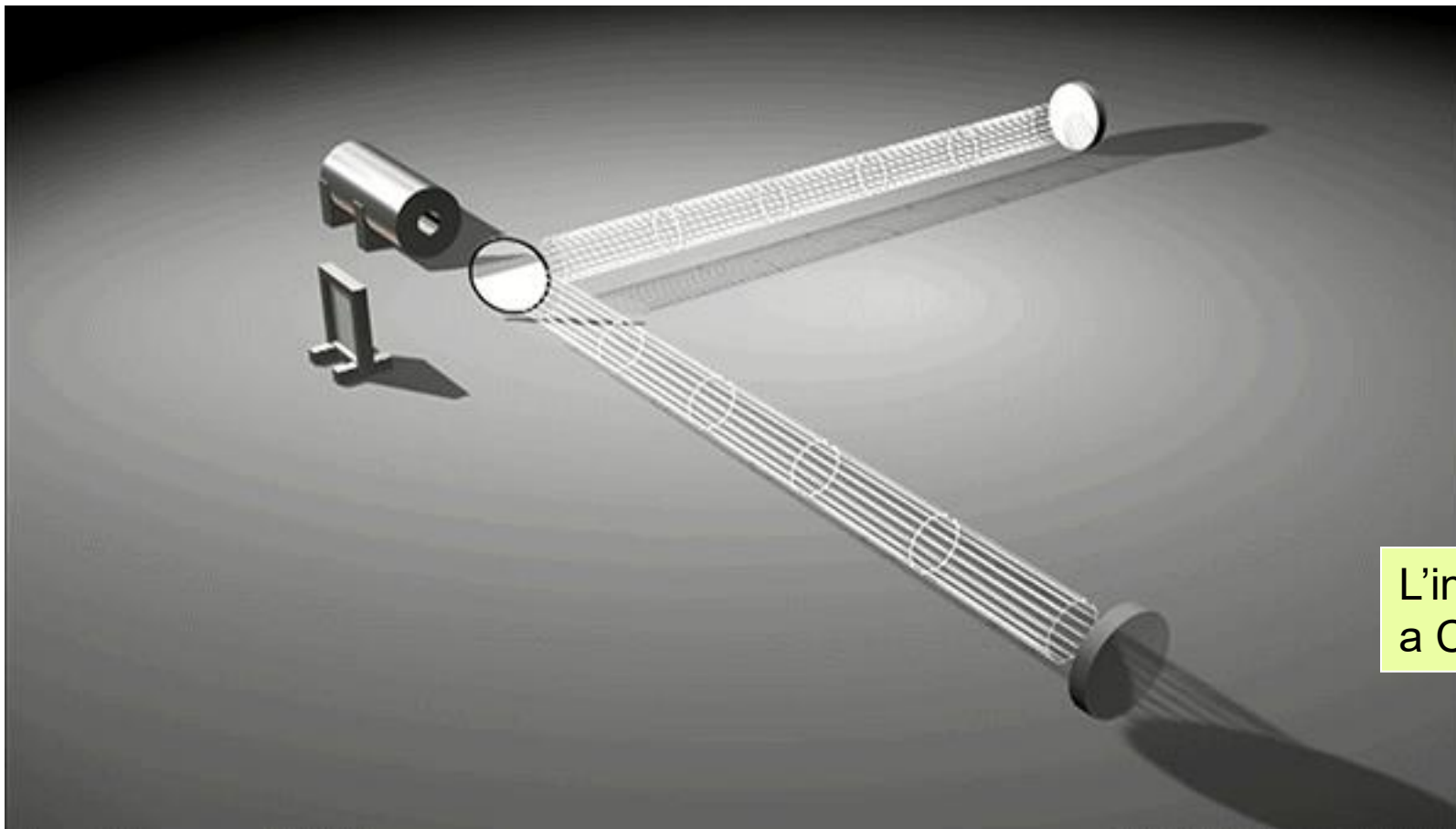
^bINFN Milano,
via Celoria 16, I - 20133 Milano, Italy

^cDipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma,
Piazza Aldo Moro 5, I - 00185 Roma, Italy

^dINFN Roma,
Piazza Aldo Moro 5, I - 00185 Roma, Italy

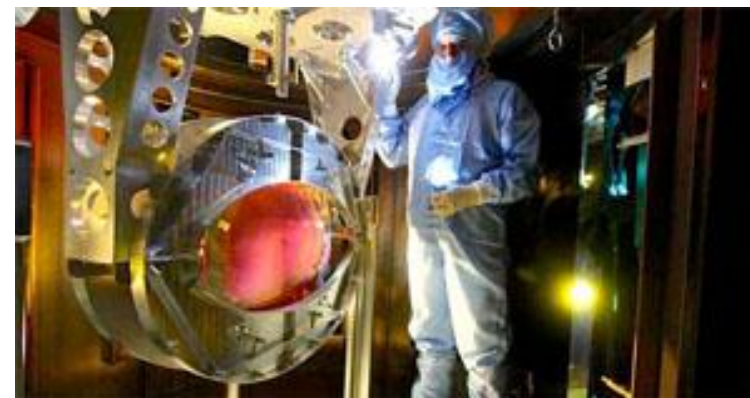
E-mail: marco.torri@unimi.it, marco.torri@mi.infn.it

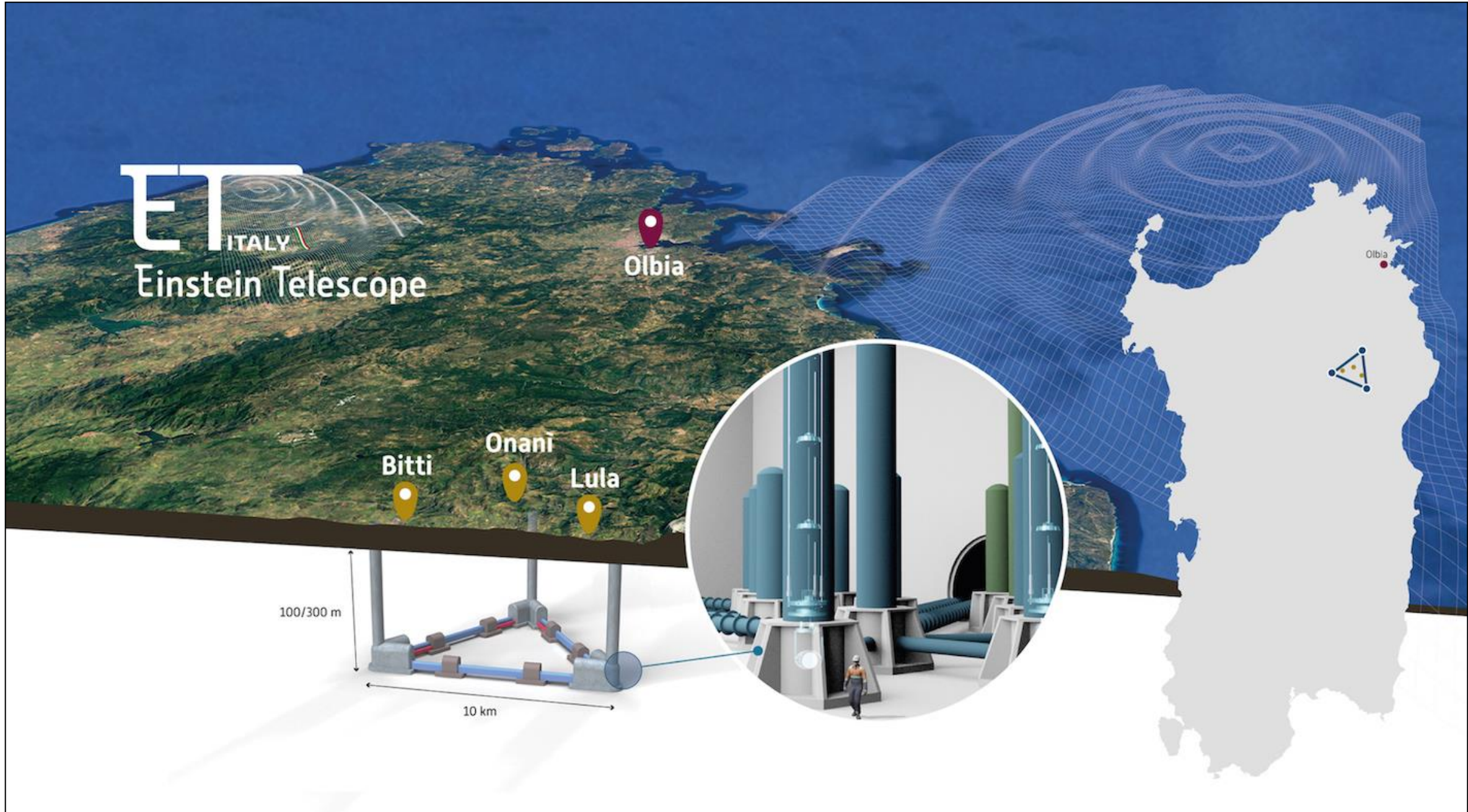
Ringdown: riassetamento di bolla spaziotemporale che contiene (magari) 70 masse solari... oscillazioni smorzate sensibili alla struttura (anche quantistica) dello spaziotempo



L'interferometro gravitazionale di Virgo a Cascina (Pi)

- Ligo Hanford (USA) 150 Mpc
- Ligo Livingston (USA) 150 Mpc
- Virgo (Italia) 60 Mpc
- KAGRA (Giappone) 15 Mpc





12/02/2026

Planetario di Milano - Dicembre 2025

EINSTEIN TELESCOPE A LULA

Prime quindici "antenne" a Sos Enattos

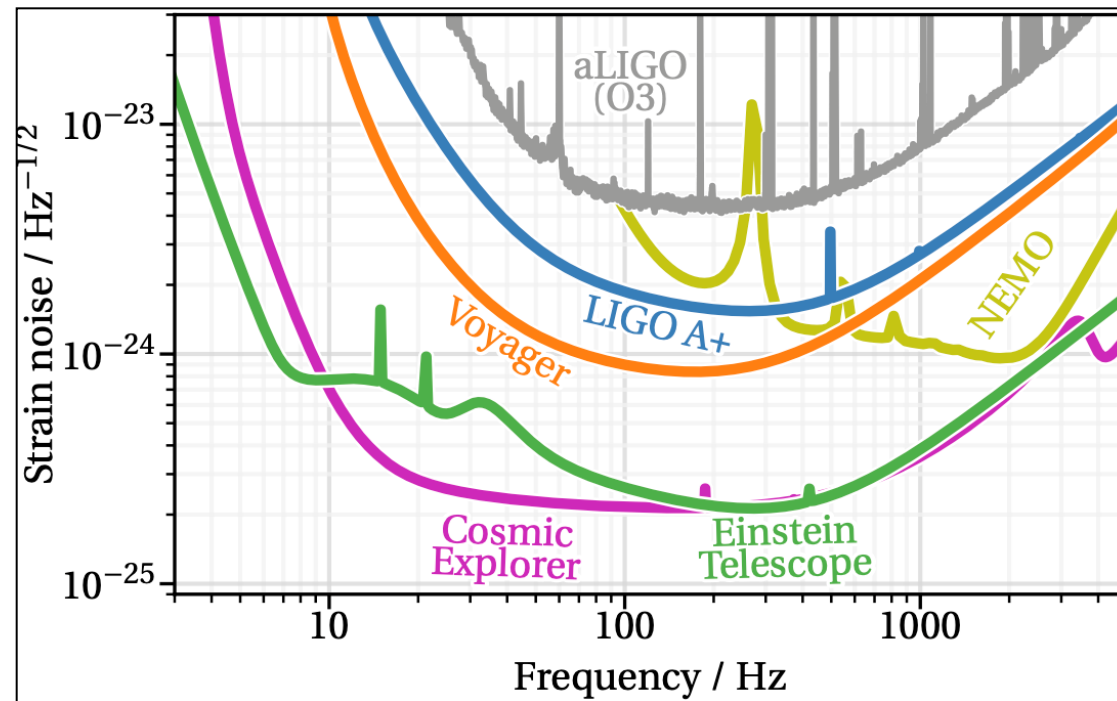
I tecnici dell'università di Pisa, in collaborazione con i colleghi di Sassari e Cagliari, registrano i silenzi dell'ex miniera

di Luca Uргу
LULA

Araccontarla tutta sembra quasi impossibile crederci. Tanto appare futuristica e incredibile l'intera vicenda. Lula e il suo territorio, un tempo luoghi di miniere e di lavori sfiancanti, potrebbe diventare uno dei pochi centri all'avanguardia a livello mondiale della fisica. Tutto potrebbe passare per la realizzazione del progetto Einstein Telescope legato allo studio delle onde gravitazionali. Il centro, che sorgerebbe negli spazi nelle ex miniere di Sos Enattos sarebbe in grado di attrarre qui in Sardegna il gotha della comunità scientifica internazionale. Un'industria pulita ed altamente tecnologica che porterebbe oltre che un know



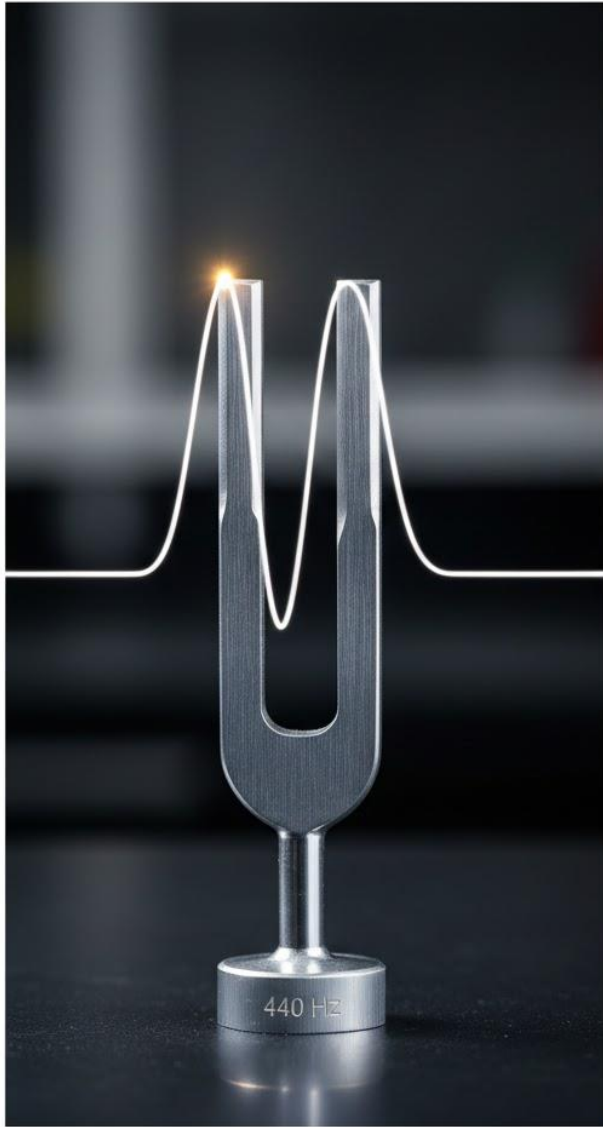
I tecnici dell'università al lavoro nell'agro di Lula
gruppo di ricerca del Dipartimento a questo territorio», dice il lu-
stallare le 15 stazioni sismome-



Sensibilità alla ricerca di Onde Gravitazionali:

- Collocazione sotterranea
- Criogenia (per le basse frequenze)
- Luce "squeezed" per i laser
- Rete internazionale

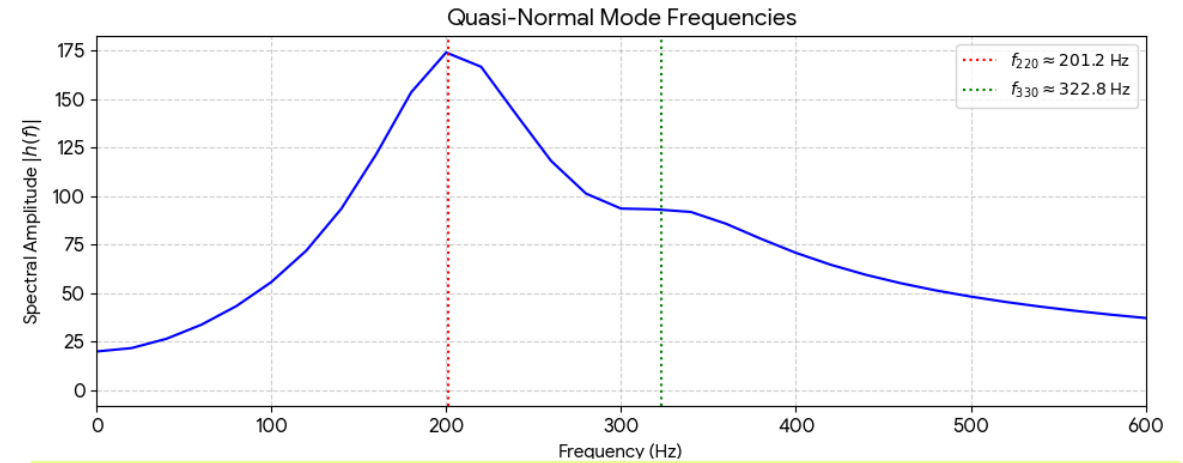
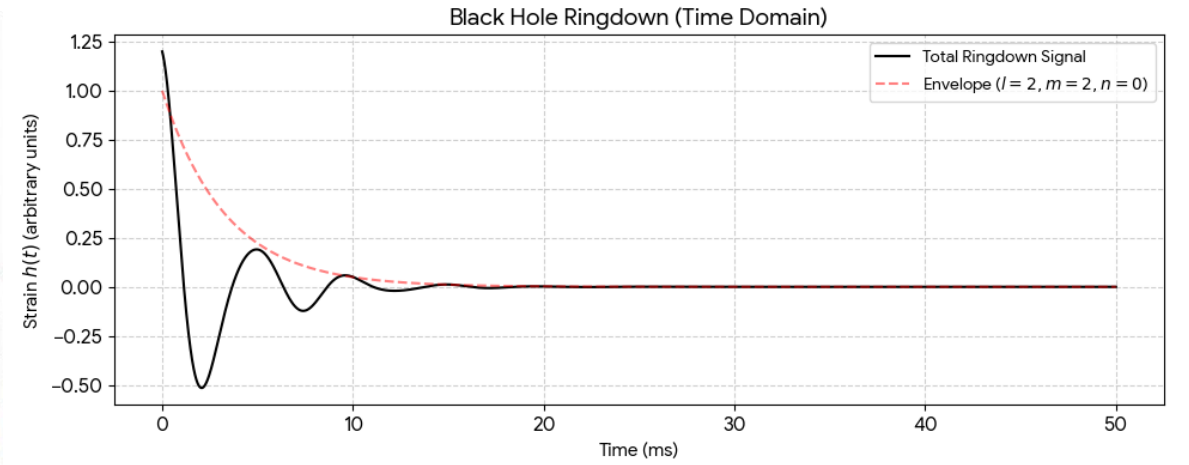
Deformazione dello spaziotempo
alle diverse frequenze



DIAPASON: SINGLE VIBRATIONAL MODE



DRUM: MANY VIBRATIONAL MODES

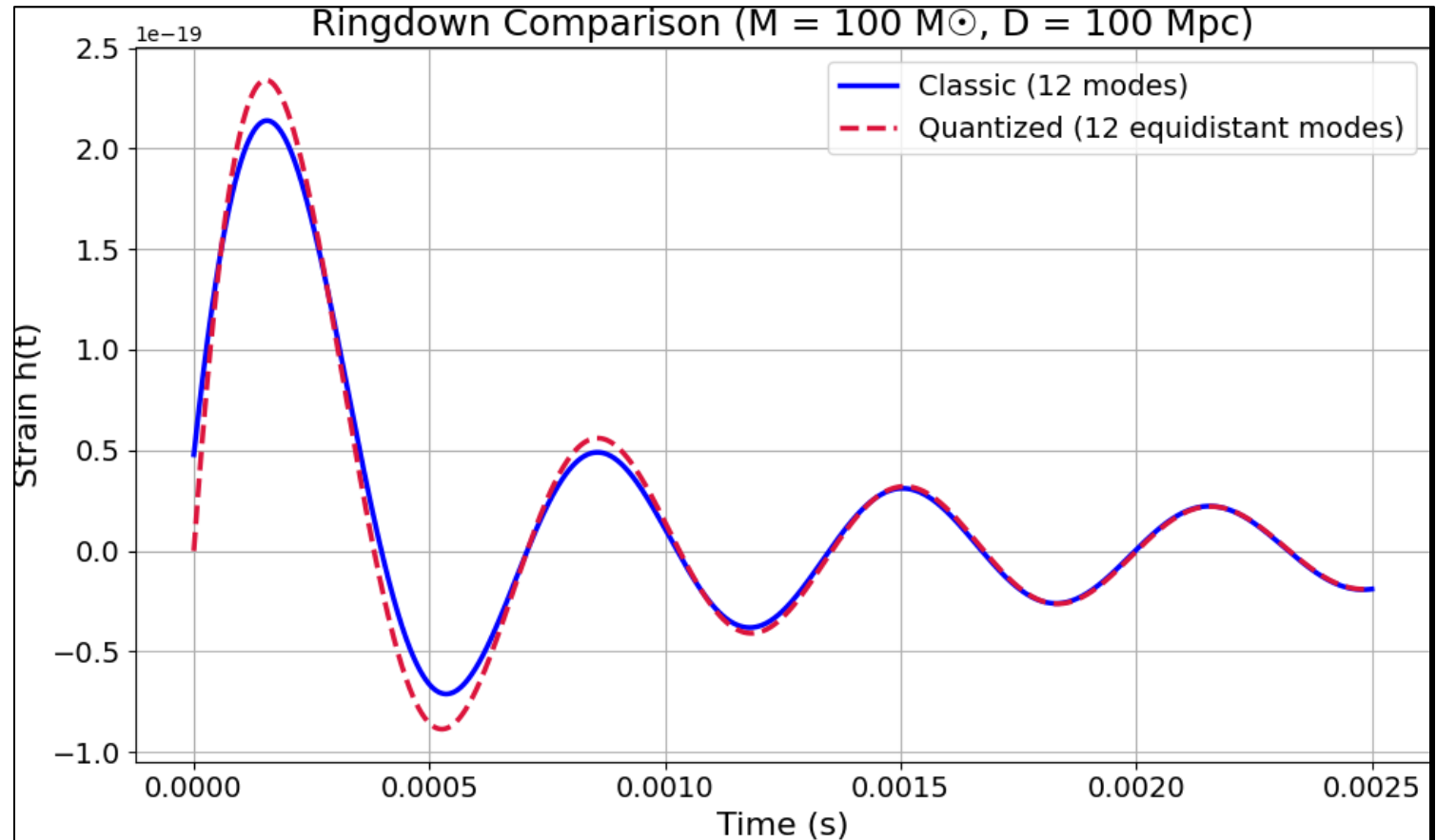


Vibra come un diapason (una sola nota?)

No. Vibra come un tamburo (molte note)

Conclusione

Possibili effetti quantistici
Nella vibrazione dei modi



Grazie per l'attenzione