

# Relatività Generale, Buchi Neri & Onde Gravitazionali

Gianluca Grignani



Perugia, 23 marzo 2023

# Il gruppo di ricerca

Prof. Gianluca Grignani, Prof. Marta Orselli, membri anche della collaborazione Virgo

## dottorandi e postdoc:

Dr. Filippo Camilloni

Dr. Andrea Placidi (Virgo)

Dr. Daniele Pica

Dr. Tetyana Pitik (NBI)

*(High energy neutrinos from astrophysical sources)*



Joint Ph.D. Program between the University of Perugia and the Niels Bohr Institute (NBI-Danimarca)

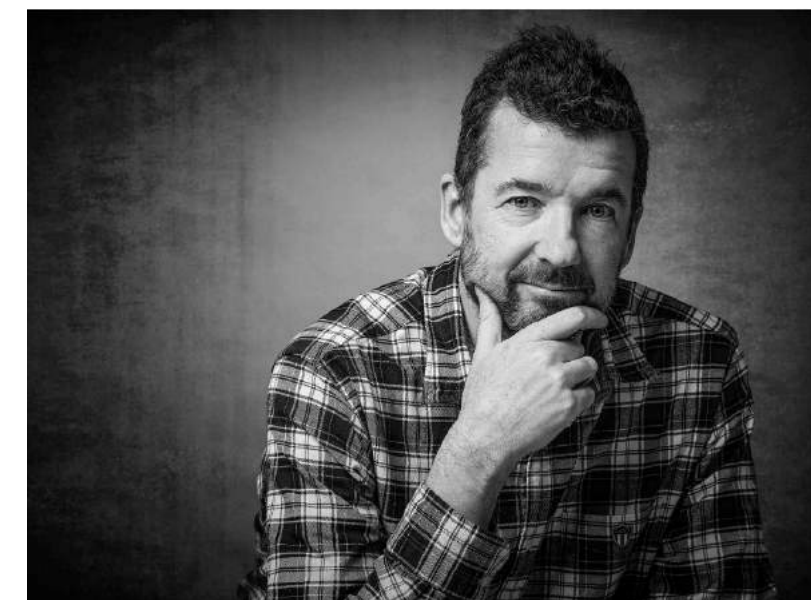


## laureandi magistrali (attuali):

Marta Cocco, Elisa Grilli, Marco Vasallucci

## ...+ collaborazioni attive in Italia e all'estero

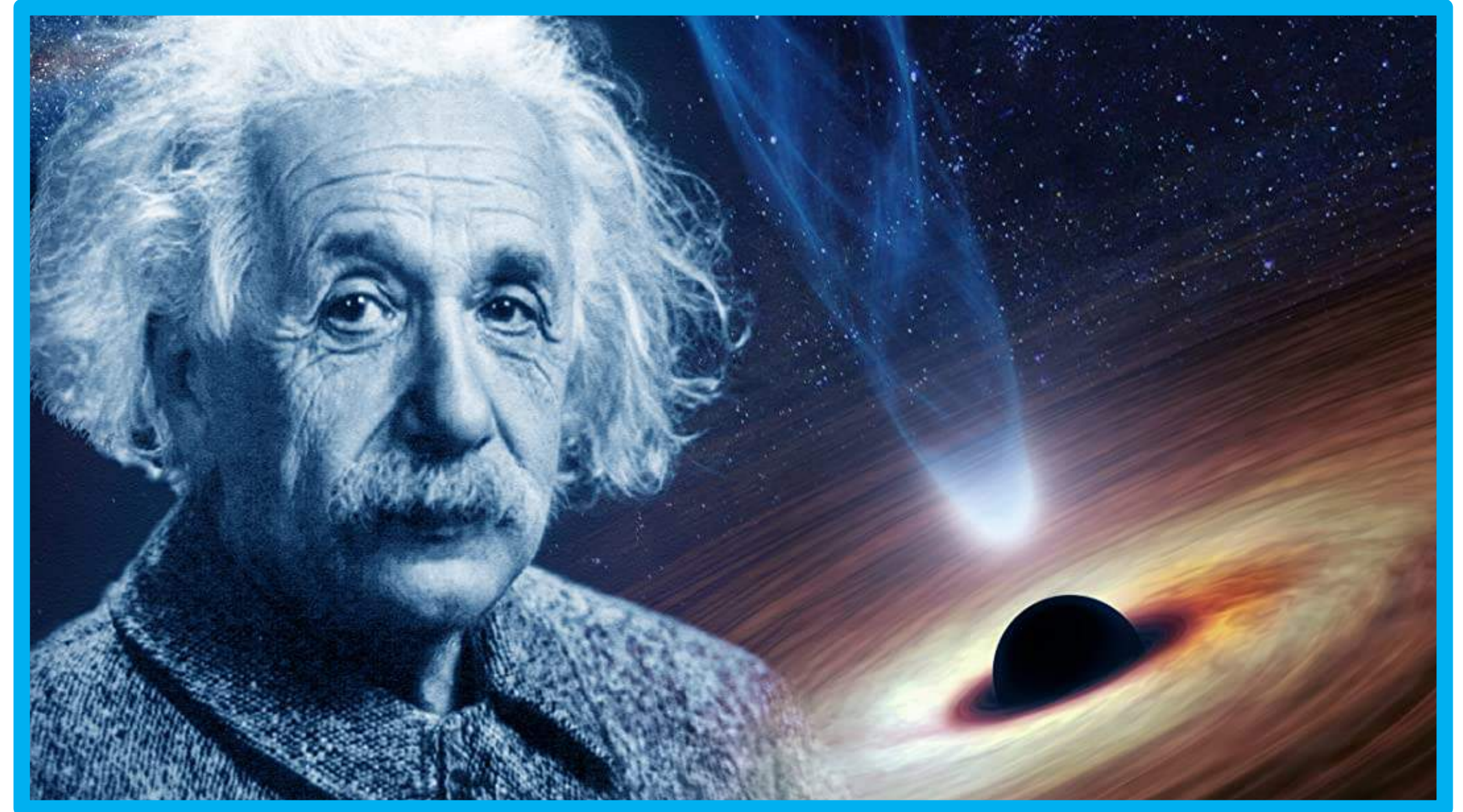
Troels Harmark (NBI), Roberto Oliveri (LUTH), see later...



# I corsi della Laurea Magistrale:

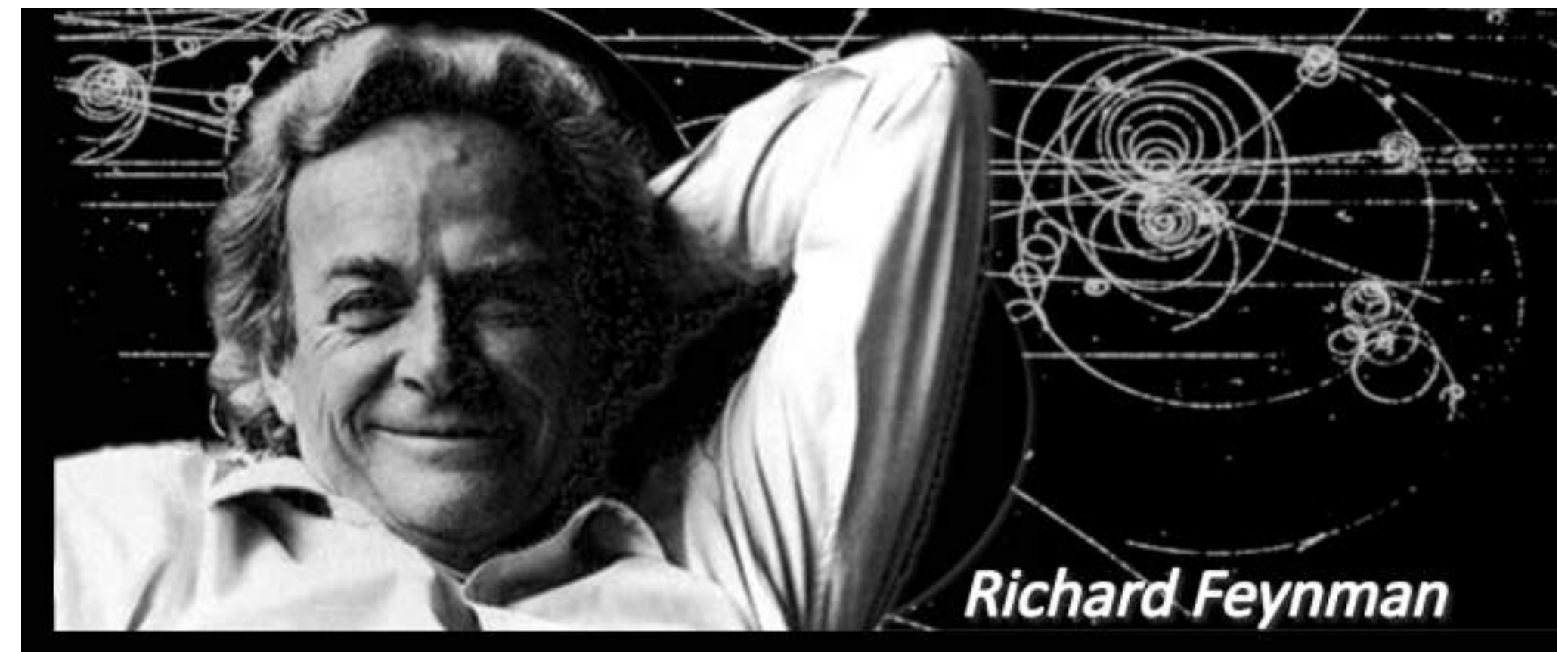
## Relatività Generale (II semestre)

Redshift gravitazionale e time dilation; Geodetiche di tipo tempo e luce nella geometria di Schwarzschild; Soluzioni di buco nero delle equazioni di Einstein in 4 dimensioni; Termodinamica dei Buchi Neri. Spazio di Rindler; Radiazione di Hawking e information loss paradox; Onde gravitazionali. (Grignani)



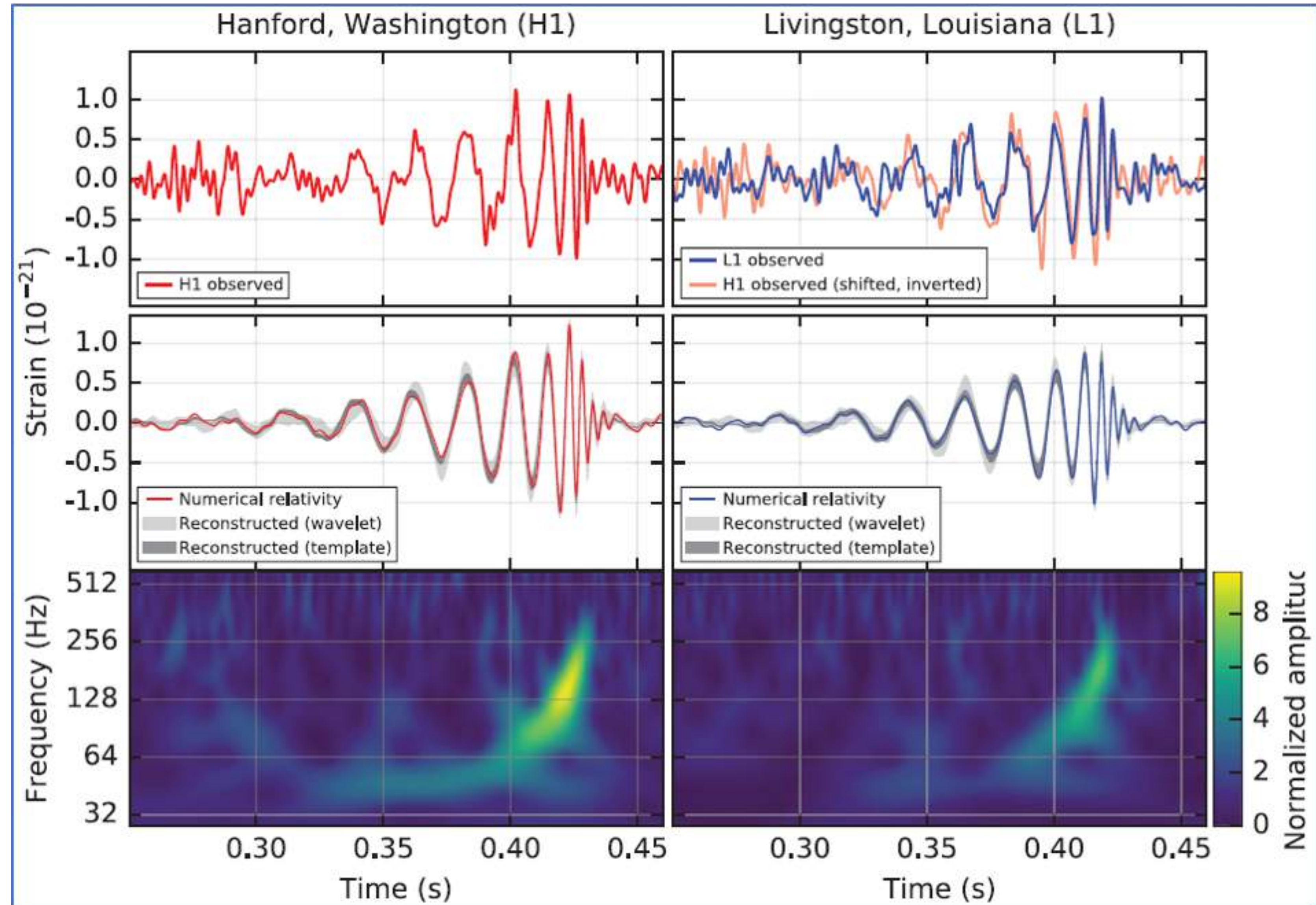
## Quantum Field Theory (I semestre, secondo anno)

Studio della tecnica del path integral. Azione effettiva. Teoria classica e teoria interagente. Regularizzazione dimensionale. Rinormalizzazione. Traiettorie del Gruppo di Rinormalizzazione. Beta function. Equazione di Callan-Symanzik. Identità di Ward per la QED. (Orselli)



# Gravitational Waves

Il 14 Settembre 2015 LIGO registra il primo segnale d'onda gravitazionale GW150914 (vedi figura)



# Che ruolo ha la fisica teorica?

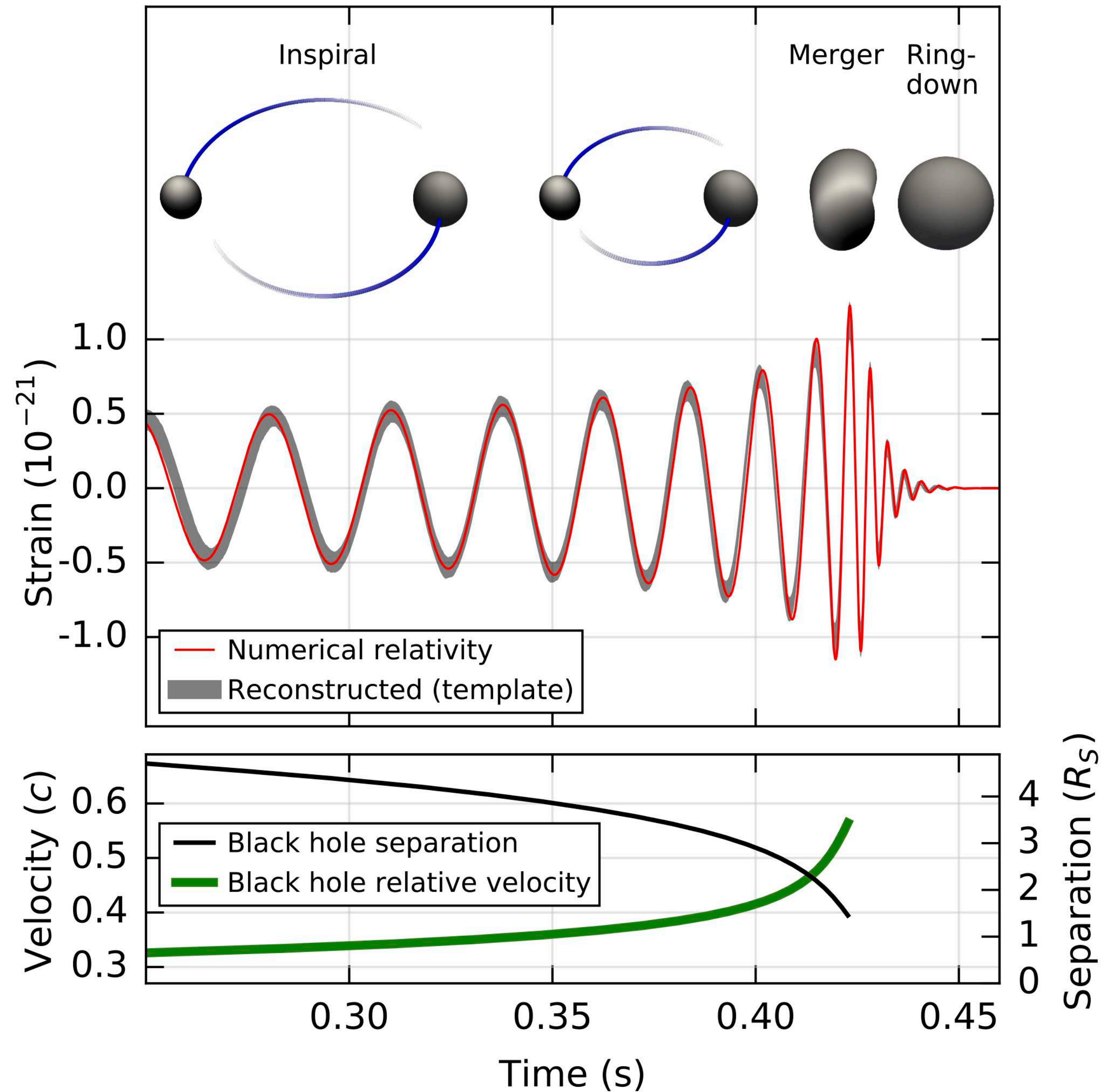
## ruolo fondamentale

rivela quali oggetti hanno dato luogo al segnale misurato

GW150914

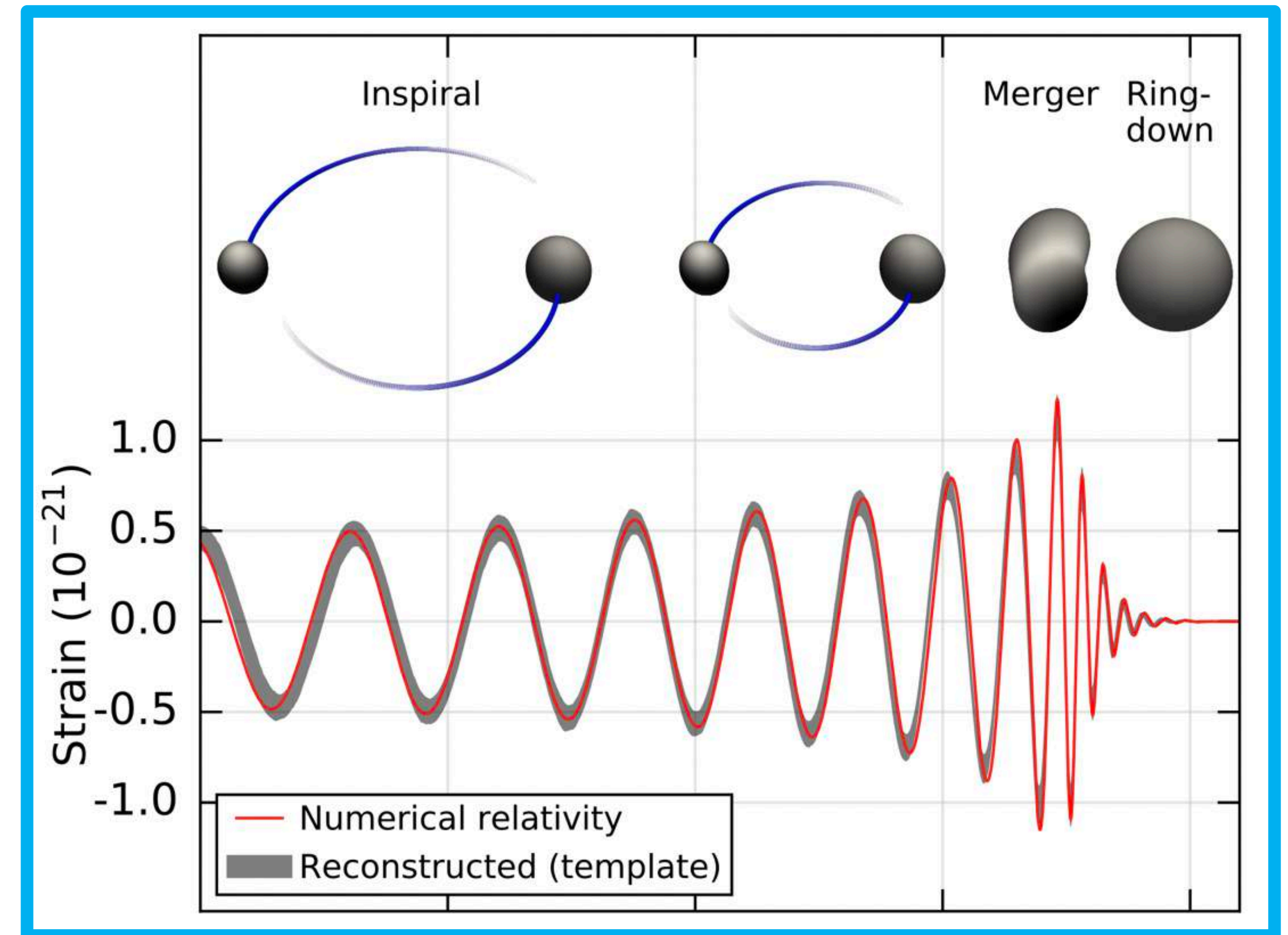
- Source: coalescence of a binary system of stellar black holes
  - Merging BH masses:  $29^{+4}_{-4}M_{\odot}$  and  $36^{+5}_{-4}M_{\odot}$
  - Resulting BH mass:  $62^{+4}_{-4}M_{\odot}$
  - Energy emitted in GWs:  $3^{+0.5}_{-0.5}M_{\odot}c^2$

Image credit: LIGO & Virgo



Le tecniche impiegate consistono in:

- Modelli analitici basati su approcci perturbativi: **Post-Newtonian** e **Post-Minkowskian** approximations che però descrivono al massimo fino alla fase di inspiral.
- **Effective One Body (EOB)** approach: descrizione effettiva della dinamica di un sistema binario. Descrive sia la fase di inspiral che di merger.

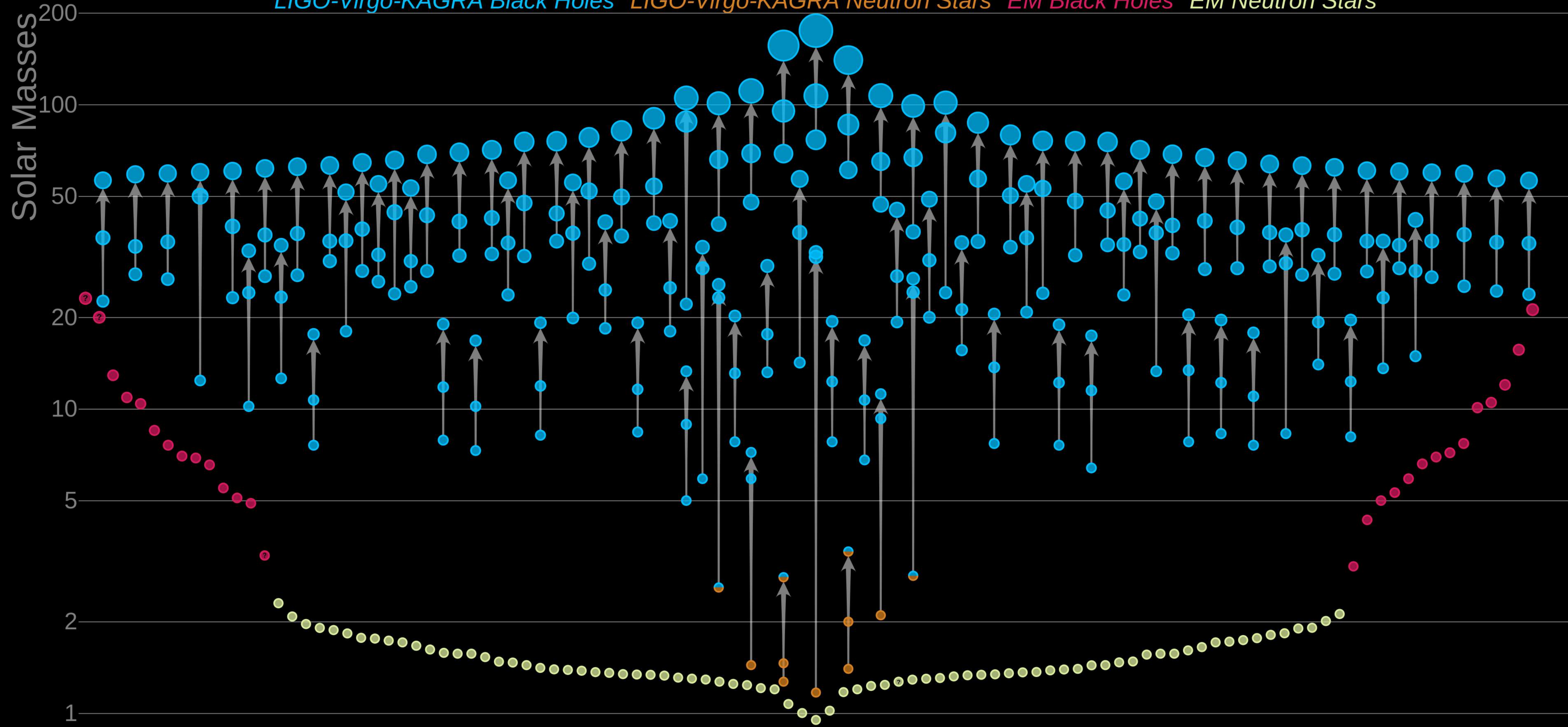


In collaborazione con **Alessandro Nagar (INFN Torino)** e **LIGO/Virgo collaboration**:

- **Miglioramento dei modelli di waveform attuali includendo risultati analitici ad ordini più alti nel contesto dei modelli "quasi-circolari".**
- **Go beyond circular orbits, sviluppando modelli che siano in grado di incorporare orbite eccentriche (di interesse per i futuri esperimenti come Einstein Telescope).**
- **...e molto altro ancora.**

# Masses in the Stellar Graveyard

*LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes* *LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars* *EM Black Holes* *EM Neutron Stars*



● ***2.5PN accurate waveform information for generic-planar-orbit binaries in effective one-body models***

Andrea Placidi, Gianluca Grignani, Troels Harmark, Marta Orselli, Sara Gliorio, Alessandro Nagar, (April 2023) in preparation

● ***Nouvelle Vague: a New Avenue to Accurate Analytical Waveforms and Fluxes for Eccentric Compact Binaries***

Simone Albanesi, Andrea Placidi, Alessandro Nagar, Marta Orselli, Sebastiano Bernuzzi (Mar 30, 2022) e-Print: 2203.16286 [gr-qc], *Phys.Rev.D* 105 (2022) 12, L121503

● ***Assessment of Effective-One-Body Radiation Reactions for Generic Planar Orbits***

Simone Albanesi, Alessandro Nagar, Sebastiano Bernuzzi, Andrea Placidi, Marta Orselli (Feb 21, 2022) e-Print: 2202.10063 [gr-qc], *Phys.Rev.D* 105 (2022)

● ***Exploiting Newton-factorized, 2PN-accurate, waveform multipoles in effective-one-body models for spin-aligned noncircularized binaries***

Andrea Placidi, Simone Albanesi, Alessandro Nagar, Marta Orselli, Sebastiano Bernuzzi, Gianluca Grignani (Dec 10, 2021) e-Print: 2112.05448 [gr-qc], *Phys.Rev.D* 105 (2022) 10, 104030

## **Collaborazioni coinvolte**

- Dr. Alessandro Nagar, INFN, Torino
- Prof. Sebastiano Bernuzzi, Jena University, Germany
- Prof. Troels Harmark, Niels Bohr Institute, Copenhagen, Denmark



# Next Generation Detectors

Binary system orbital frequency in the inspiral regime (Kepler)

$$\omega = \sqrt{G \frac{(m + M)}{d^3}}$$

- ▶  $\omega \sim 10^{-2} \div 10$  kHz  $\longrightarrow$  **LIGO-VIRGO**

Ex

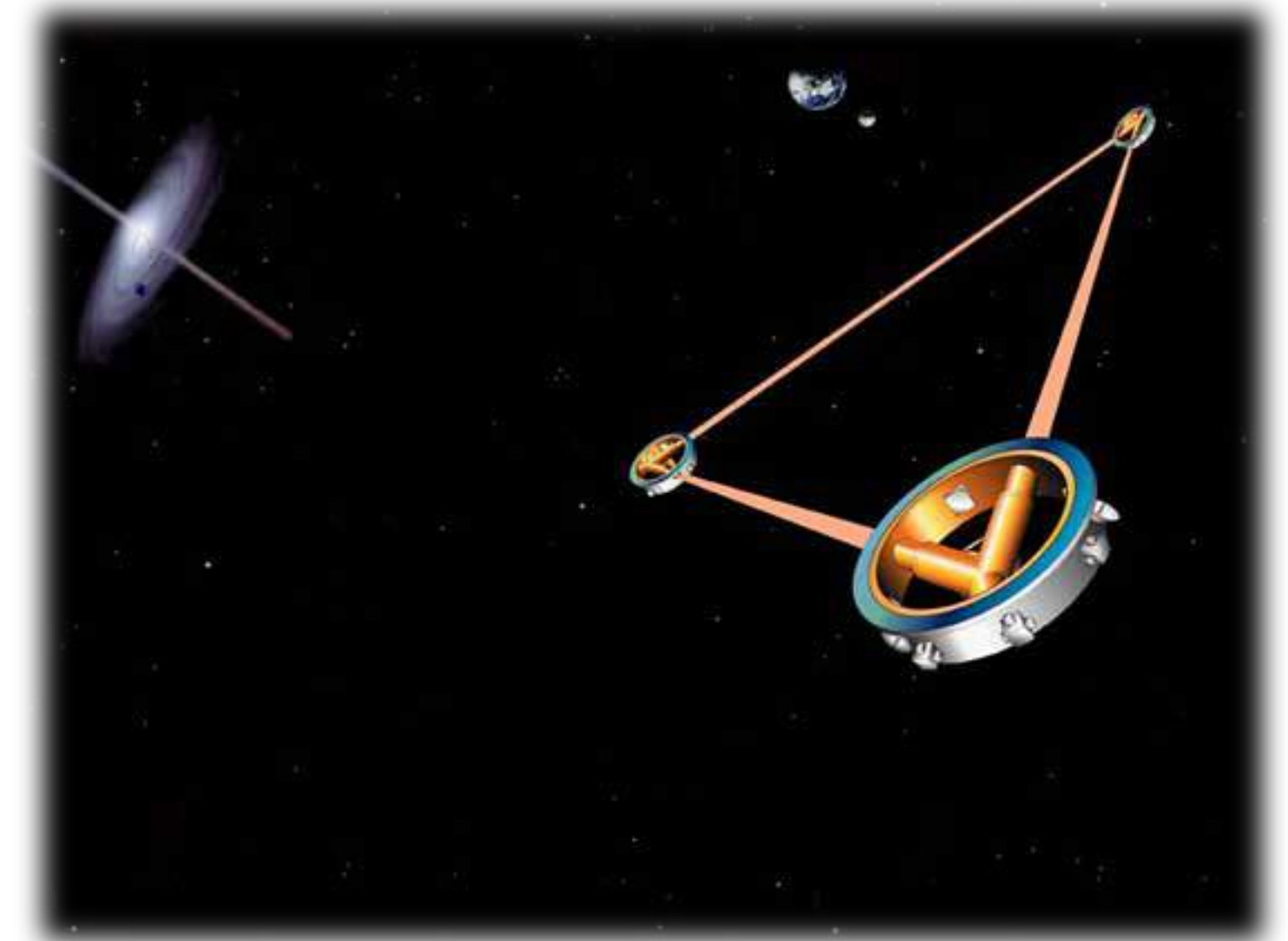
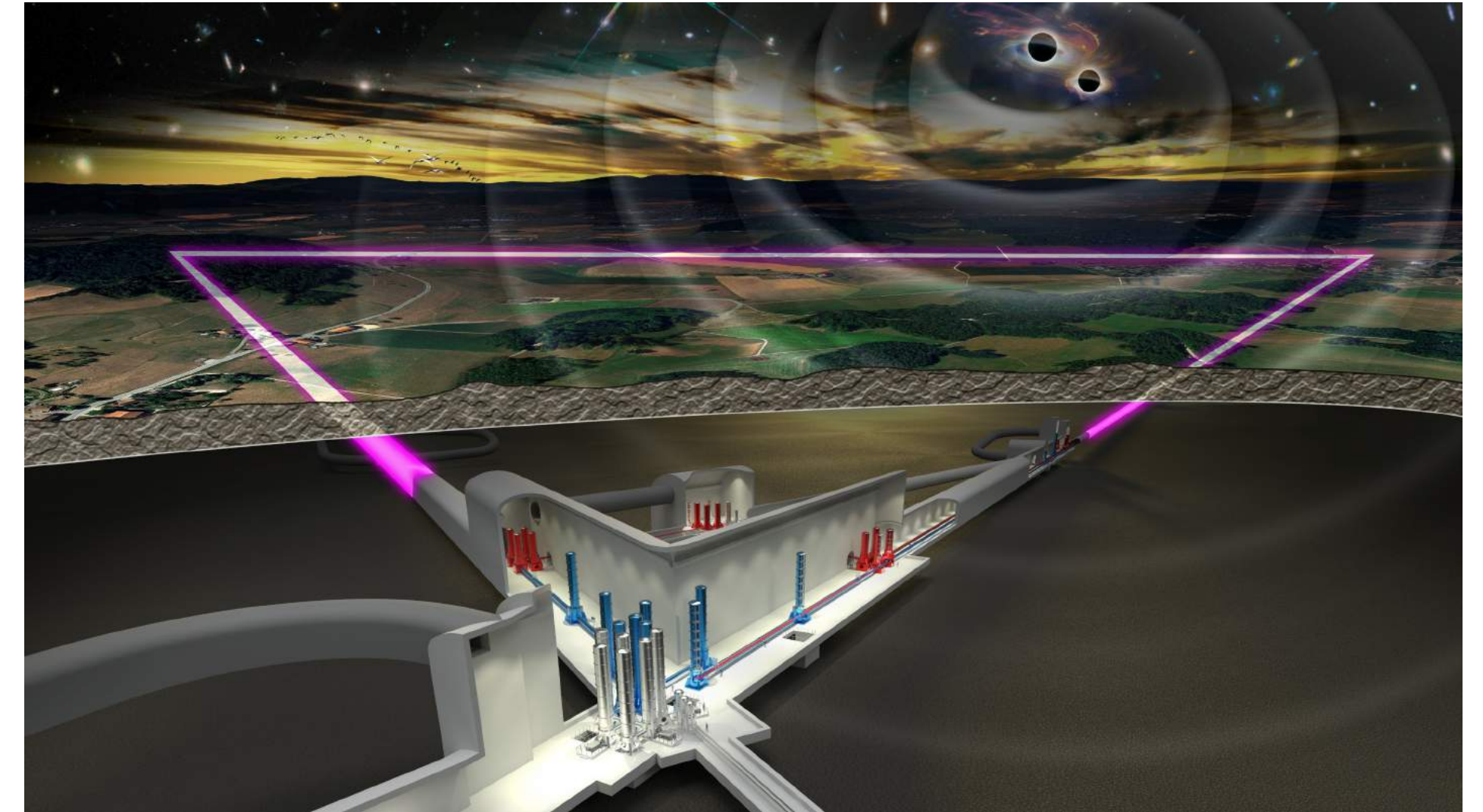
$$\begin{array}{l} m \sim 50 M_{\odot} \\ M \sim 50 M_{\odot} \end{array} \implies \omega \sim 2 \text{ kHz}$$

- ▶  $\omega \sim 10^{-2} \div 10$  Hz : a sensitivity at least 10 times better than the advanced detectors on a large fraction of the detection frequency band, a dramatic improvement in sensitivity in the low frequency range  $\longrightarrow$  **ET** (Einstein Telescope)

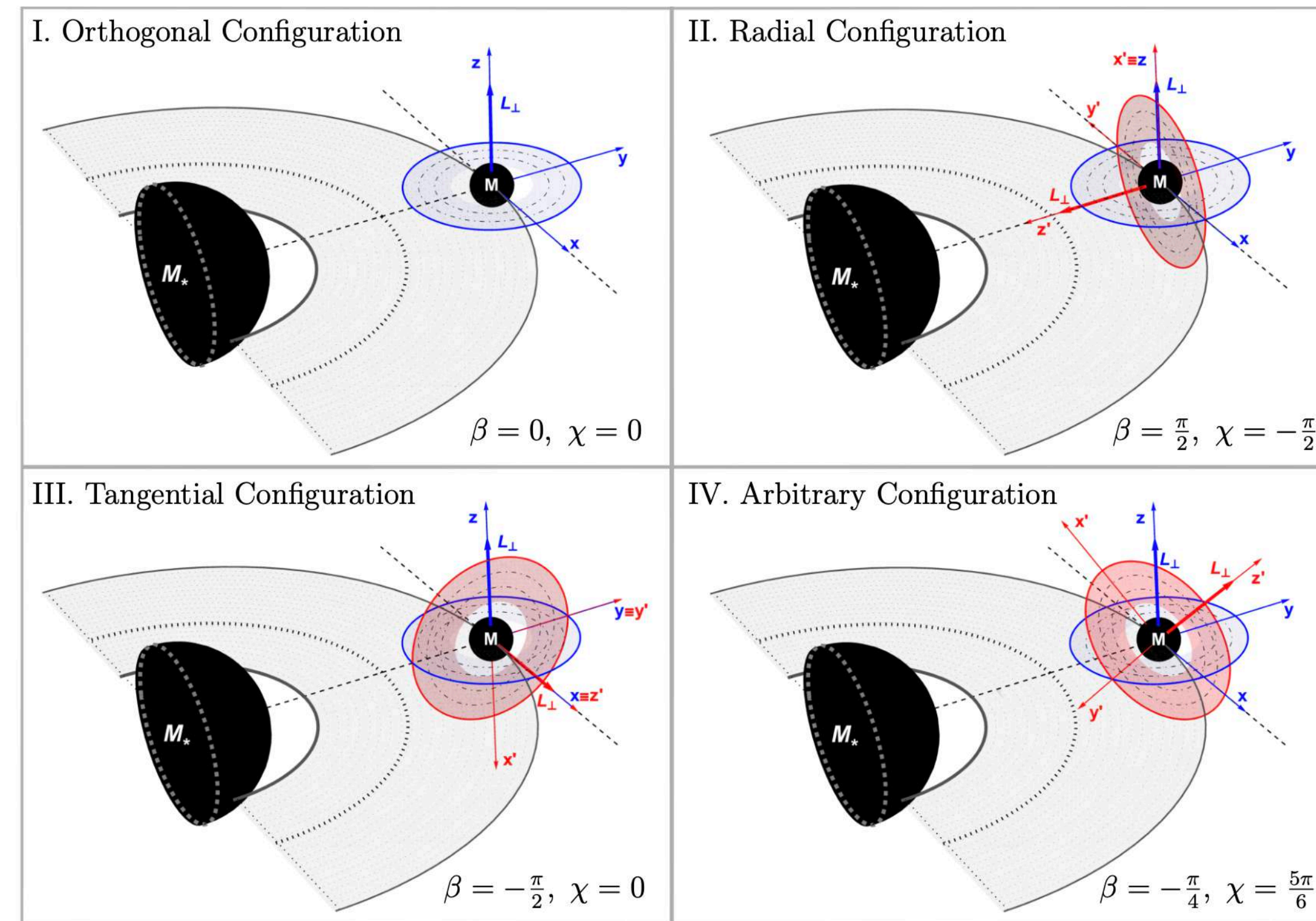
- ▶  $\omega \sim 0.1 \div 100$  mHz  $\longrightarrow$  **LISA**  
(Laser Interferometer Space Antenna)

Ex

$$\begin{array}{l} m \sim 10 M_{\odot} \\ M \sim 10^6 M_{\odot} \end{array} \implies \omega \sim 10 \text{ mHz}$$



# Binary system in a supermassive Kerr black hole background



Four possible configurations of the binary system. The names refer to the orientation of the orbital angular momentum  $L_{\perp}$  of the binary system with respect to the Kerr orbital plane. The grey orbit represents the orbits around the Kerr Black hole. The blue orbit marks the “initial” orthogonal configuration for the Schwarzschild reference frame, with the Cartesian axis oriented according to the Marck tetrad (Panel I.). The red orbits in Panel II, III, and IV are obtained from the initial configuration by an Euler rotation.

## ● ***Tidal deformations of a binary system induced by an external Kerr black hole,***

Filippo Camilloni, Gianluca Grignani, Troels Harmark, Roberto Oliveri, Marta Orselli, Daniele Pica, (Jan 2023) in press

# ASTROPHYSICAL electromagnetic JETS

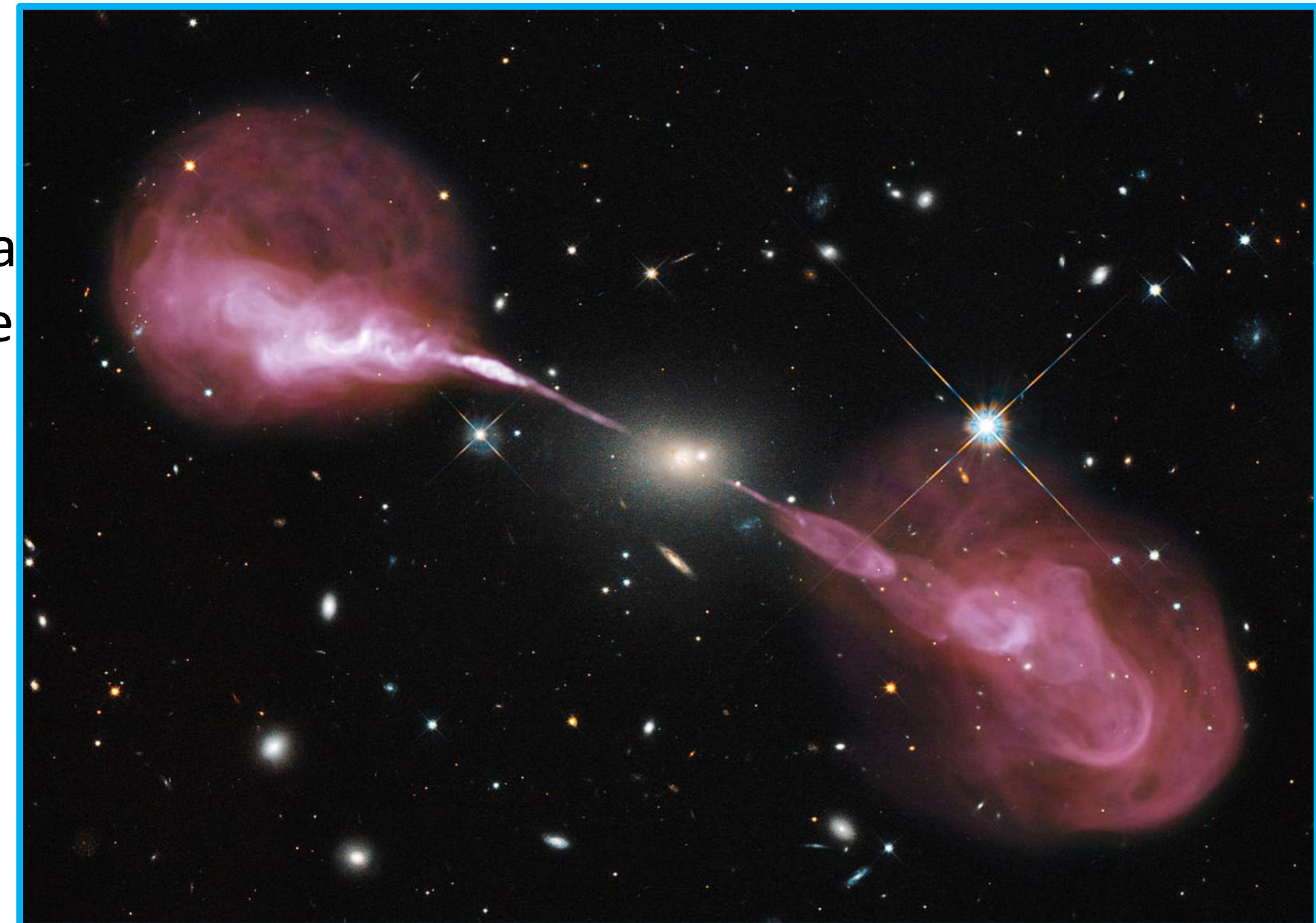
Esistono nel nostro universo degli oggetti molto affascinanti (per esempio le **quasars**) che producono jets di radiazione elettromagnetica altamente collimati che sono tra i segnali energetici più potenti conosciuti



**Sinistra:** immagine della galassia Centaurus A. La radiazione in blu (raggi X) è prodotta dall'emissione di jets relativistici al centro della galassia.

**Destra:** Sorgente radio Hercules A nella galassia ellittica 3C 348. I jets emessi dal nucleo della galassia sono estremamente collimati, come evidente dall'immagine.

L'immagine è ottenuta sovrapponendo un'osservazione ottica con una radio (in rosso)



Molti dei jets osservati si pensa abbiano origine in prossimità del centro di nuclei galattici attivi (AGN)

Queste galassie ospitano buchi neri e sono proprio i buchi neri a produrre i jets osservati attraverso il

Il meccanismo in grado di spiegare l'emissione di jets astrofisici si chiama



## **Processo di BLANDFORD & ZNAJEK**

(Blandford and Znajek, 1977)

Sfruttando le proprietà della magnetosfera che circonda i buchi neri, si innesca un meccanismo in grado di estrarre energia dal buco nero e convertirla in energia elettromagnetica

Per descrivere questo processo si devono risolvere le equazioni estremamente complicate della

## FORCE FREE ELECTRODYNAMICS

$$\begin{array}{l} \nabla_{[\mu} F_{\nu\rho]} = 0 \\ \nabla_{\nu} F^{\mu\nu} = \mathcal{J}^{\mu} \end{array} \quad + \quad \begin{array}{l} F_{\mu\nu} \mathcal{J}^{\nu} = 0 \\ \text{Force Free condition} \end{array}$$

Maxwell's equations

In questa descrizione il contributo di materia al tensore energia-impulso può essere trascurato. ([Blandford and Znajek 1977](#), [Macdonald and Thorne 1982](#), [McKinney, Tchekhovskoy and Blandford 2012](#), [Gralla and Jacobson 2014](#) e molti altri)

Questo significa che

$$T^{\mu\nu} = T_{\text{EM}}^{\mu\nu} + T_{\text{Matter}}^{\mu\nu} \approx T_{\text{EM}}^{\mu\nu}$$

$$\rightarrow \nabla_{\nu} T_{\text{EM}}^{\mu\nu} = 0$$

● *Existence of the Blandford-Znajek rotating Kerr black hole,*

Grignani, Harmark, Orselli, Phys. Rev. D (2018) 8, 084056

● *Force-free electrodynamics near rotation axis of a Kerr black hole.*

Grignani, Harmark, Orselli, Class. Quant. Grav 37 (2020) 8, 085012

● *Moving away from the Near-Horizon attractor of the Extreme Kerr Force-Free Magnetosphere,*

Camilloni, Grignani, Harmark, Oliveri, Orselli, JCAP 10 (2020) 048

● *Force-Free magnetosphere attractors for near-horizon extreme and near-extreme limits of a Kerr black-hole*

Camilloni, Grignani, Harmark, Oliveri, Orselli, Class.Quant.Grav. 38 (2021) 7, 075022

● *Blandford-Znajek monopole expansion revisited: novel non-analytic contributions to the power emission*

Camilloni, Dias, Grignani, Harmark, Oliveri, Orselli, Santos (2022), JCAP 07 (2022) 07, 032

## Collaborazioni coinvolte

■ Prof. Troels Harmark, Niels Bohr Institute (NBI), Copenhagen, Denmark

■ Dr. Roberto Oliveri, Laboratoire Univers et Théories (LUTH), Paris, France

■ Prof. J. E. Santos, Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics (DAMTP), Cambridge, England

■ Prof. O. Dias, University of Southampton, England

## **Tesi Magistrali del gruppo degli ultimi 3-4 anni su argomenti di:**

### **Relatività Generale, Astrofisica, Onde Gravitazionali, String Theory**

- **Force-free Foliation for Schwarzschild Black Holes (Lupattelli, 2018)**
- **Near Horizon Extremal Kerr Magnetosphere (Pitik, 2018)**
- **Force-Free Electrodynamics Approach to Kerr Black Hole Magnetospheres (Quintavalle, 2018)**
- **From scattering amplitudes to general relativity (Mezzasoma, 2018)**
- **Non-relativistic Geometry in the context of the AdS/CFT correspondence (Bidussi, 2018)**
- **Entanglement entropy at finite temperature in holographic matter (Signorini, 2018)**
- **Post-Newtonian and Post-Minkowskian Two-Body Potentials From Scattering Amplitudes (Placidi, 2019)**
- **Near-extreme Kerr Magnetospheres (Pompili, 2021)**
- **Light surfaces in force free electrodynamics (Fabri, 2021)**
- **Event horizon of charged black holes binary systems (Pica, 2021)**
- **Gravitational and electromagnetic radiation from binary black holes with charges (Becchetti, 2021)**
- **Effective One Body Waveform Model for Eccentric Black Hole Binary Systems (Stella, 2021)**
- **Effective One Body gravitational waveforms (Gliorio, 2022)**

## **Tesi Triennali del gruppo degli ultimi 3/4 anni**

- **Wormhole solutions in general relativity (Ubaldi, 2019)**
- **Il paradosso EPR (Lolli, 2019)**
- **Introduction to Anti de Sitter space (Giuli, 2019)**
- **Informatica quantistica e simulazione di sistemi quantistici (Arnone, 2019)**
- **Approssimazione force-free per la magnetosfera delle pulsar (Stella, 2019)**
- **Dall'entanglement al quantum teleportation (Pica, 2019)**
- **Energia del vuoto: analisi e conseguenze (Baldicchi, 2019)**
- **Generazione di onde gravitazionali da sorgenti post-newtoniane (Malaspina, 2020)**
- **Perturbazioni gravitazionali della metrica di Schwarzschild (Bianchi, 2020)**
- **Entanglement quantistico, paradosso EPR e disuguaglianze di Bell (Marsili, 2020)**
- **Effetto Hall Quantistico (Rosa, 2020)**
- **La supersimmetria nella meccanica quantistica (Babbo, 2020)**
- **La soluzione di Schwarzschild e il limite di Buchdahl (Cocco, 2021)**
- **Slowly rotating Blandford and Znajek vertical solution in force free electrodynamics (Panella, 2021)**
- **Reinterpretazione di Feynman della Meccanica Quantistica (Marcuccini, 2021)**
- **Onde Gravitazionali ed effetto memoria (Grilli, 2021)**
- **Entropia di entanglement (Vasallucci, 2021)**
- **Sulla struttura fisica e geometrica delle soluzioni di wormhole (Forti, 2021)**
- **Fasi Geometriche in meccanica quantistica: fase di Berry ed effetto di Aharonov-Bohm (Segaricci, 2022)**
- **Generazione di onde gravitazionali da sorgenti post-newtoniane (Castellani, 2022)**
- **Transizioni di fase in modelli di spin (Alunno, 2022)**



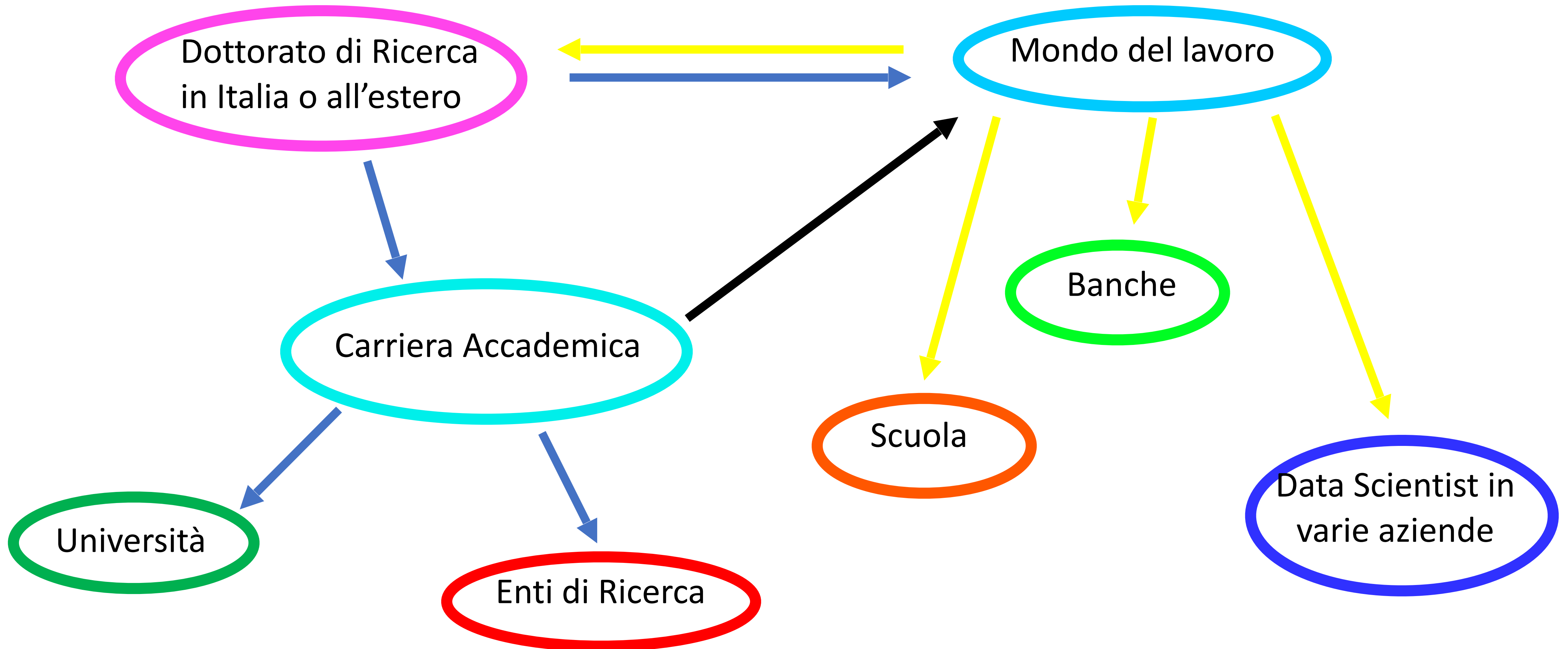
## Proposte tesi triennali:

- Effetto memoria nelle onde gravitazionali.
- Onde gravitazionali emesse da sistemi binari.
- The Post-Newtonian approximation in general relativity.
- Fluidodinamica in spazi-tempi curvi.
- L'entanglement quantistico.
- Effetti topologici in Meccanica Quantistica, fase di Berry ed Effetto Aharonov-Bohm
- Gravitational wave generation by post-Newtonian sources.
- Meccanica statistica e transizioni di fase.
- Approssimazione semiclassica in meccanica quantistica.
- **Neutrini di alta energia da sorgenti astrofisiche.**

## Proposte tesi magistrali:

- La reazione di radiazione nell'Effective One Body approach.
- Effetti di tail e di memory nelle waveform di onde gravitazionali.
- The vertical solution in force-free electrodynamics.
- Tidal forces of Kerr black holes on black hole binary systems.
- **...ma soprattutto: affinché le tesi magistrali siano attuali e competitive, gli argomenti sono legati ai temi di ricerca su cui lavoriamo al momento della richiesta di tesi e a possibili nuovi interessanti sviluppi nella ricerca internazionale.**

# Che fare dopo la Laurea?



## Se si sceglie la strada del Dottorato di Ricerca, ecco dove sono finiti i nostri studenti (negli ultimi 4 anni)

- Lorenzo Rossi, Ph.D. student at **Queen Mary University of London** (United Kingdom)
- Andrea Colcelli, Ph.D. student at **SISSA**, Trieste (Italia)
- Stefano Speziali, Ph.D. student at the Department of Physics, **Swansea University**, Swansea, United Kingdom
- Alfredo Glioti, Ph.D. student at **Institute of Physics, EPFL**, Lausanne, Switzerland
- Roberto Bruschini, PhD student in Theoretical Physics at **Instituto de Física Corpuscular** (University of Valencia - CSIC)
- Lorenzo Papini, PhD student at **Padova University** (Italia)
- Tetyana Pitik, Ph.D. student in the Theoretical Particle Physics and Cosmology Group at the **Niels Bohr Institute** (Denmark)
- Nicolò Primi, Ph.D. student at the Department of Mathematics, **King's College**, London (United Kingdom)
- Leo Bidussi, Ph.D. student at the **University of Edinburgh**, Edinburgh, Scotland
- Simone Mezzasoma, Ph.D. student at **Urbana Champaign, University of Illinois** (USA)
- Michele Lupattelli, Ph.D. student at Institute for Theoretical Particle Physics and Cosmology, **Aachen University** (Germany)
- Lorenzo Quintavalle, Ph.D. student at **DESY**, Hamburg (Germany)
- Giordano Cintia, Ph.D. student in Theoretical Physics at **Ludwig-Maximilians-Universität**, Munich (Germany)
- Lorenzo Menculini, Double Ph.D. Degree - **joint Ph.D. program between Perugia University and the Niels Bohr Institute**
- Filippo Camilloni, Double Ph.D. Degree - **joint Ph.D. program between Perugia University and the Niels Bohr Institute**
- Andrea Placidi, Double Ph.D. Degree - **joint Ph.D. program between Perugia University and the Niels Bohr Institute**
- Daniele Pica, Double Ph.D. Degree - **joint Ph.D. program between Perugia University and the Niels Bohr Institute**
- Noemi Fabri - Ph.D. student at the **University of Zurich**, Switzerland
- Sara Gliorio, Ph.D. student, **GSSI**, Gran Sasso, Italia

**Titolo congiunto tra Dottorato in Fisica a Perugia e Dottorato dell'Università di Copenhagen presso il Niels Bohr Institute**