



# Relatività Generale, Onde Gravitazionali & Astrofisica Teorica delle Alte Energie

Gianluca Grignani



Perugia, 14 aprile 2022

## Il gruppo di ricerca

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

### **dottorandi:**

Dr. Filippo Camilloni

Dr. Andrea Placidi (Virgo)

Dr. Daniele Pica



Joint PhD Program between the University of  
Perugia and the Niels Bohr Institute  
(Danimarca)

### **laureandi magistrali (attuali):**

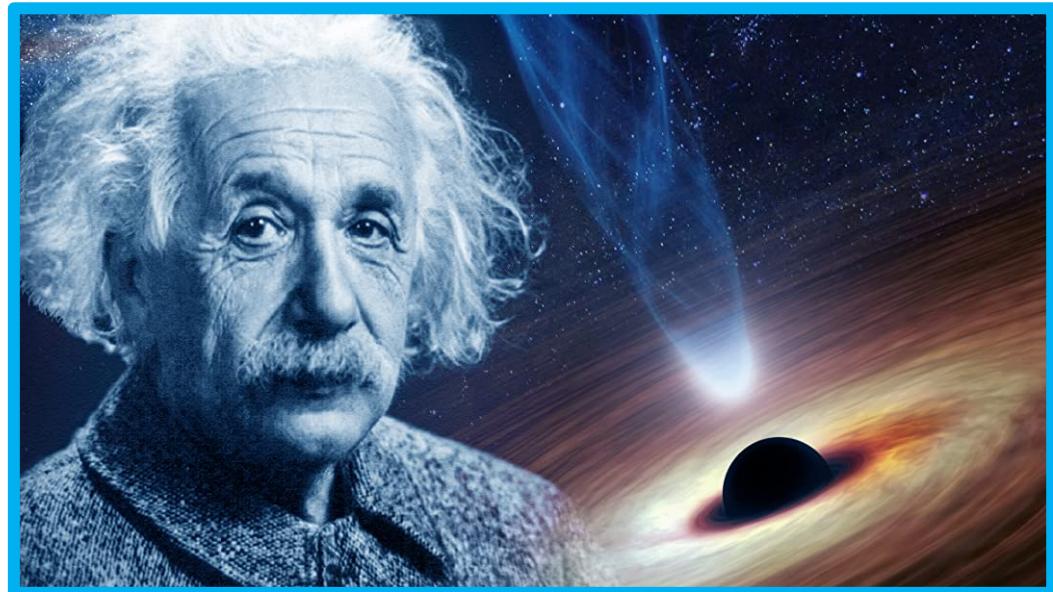
Sara Gliorio

**...+ collaborazioni attive in Italia e all'estero (see later...)**

# I corsi della Laurea Magistrale:

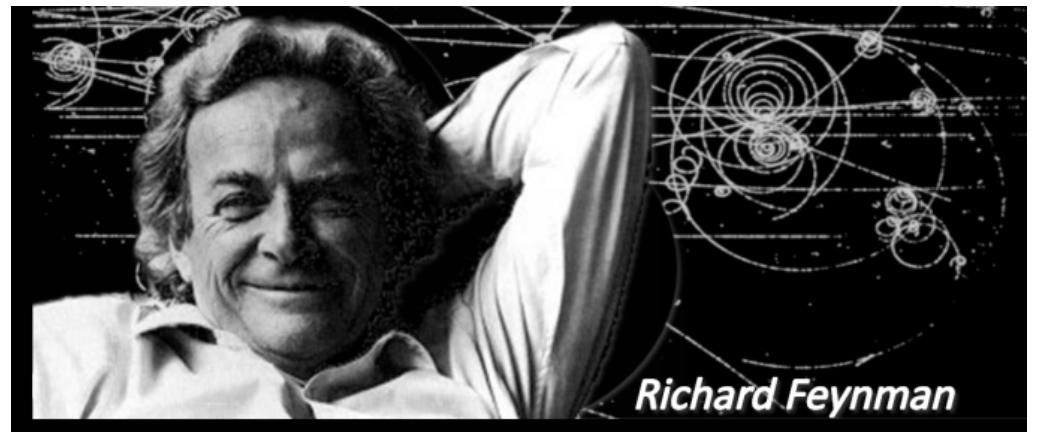
## Relatività Generale (II semestre)

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. Cosmologia. (Grignani)



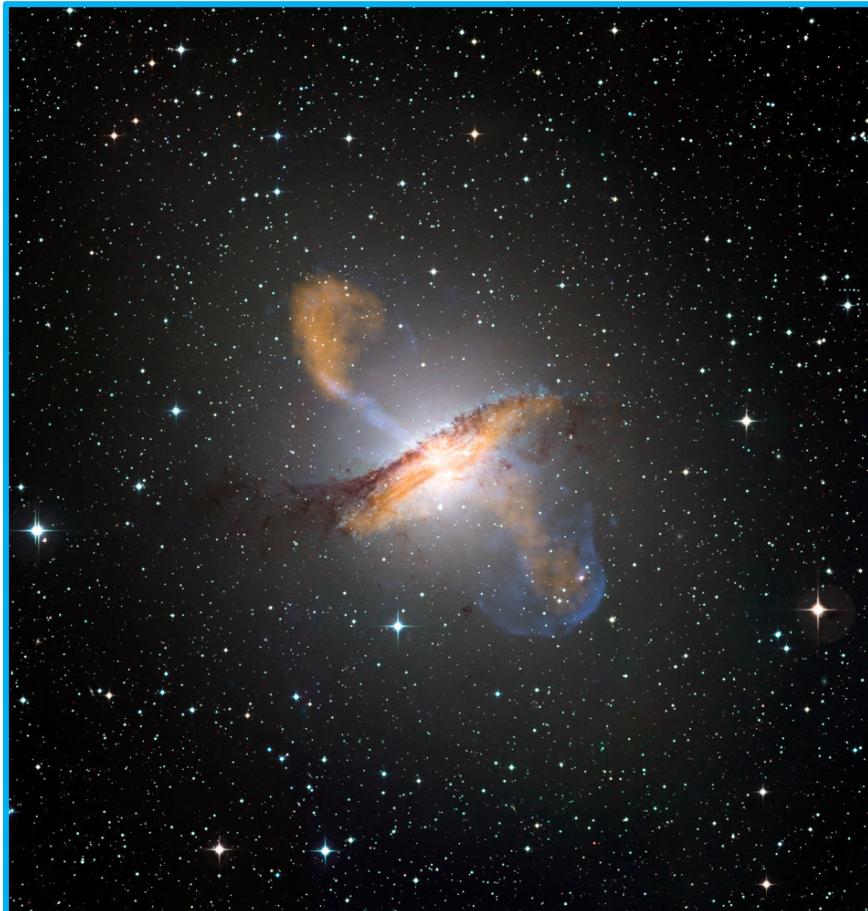
## Quantum Field Theory (I semestre, secondo anno)

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



# 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

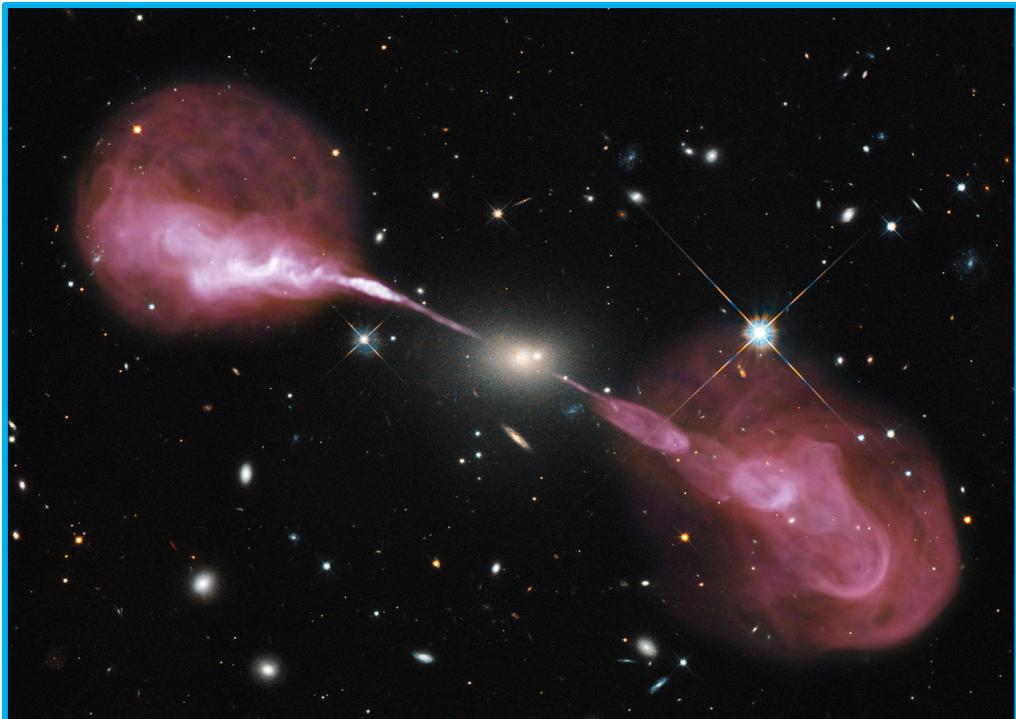


ESO/WFI (visible); MPIfR/ESO/APEX/A. Weiss et al. (microwave); NASA/CXC/CfA/R. Kraft et al. (X-ray)

**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)



ASA, ESA, S. BAUM AND C. O'DEA (RIT), R. PERLEY AND W. COTTON (NRAO/AUI/NSF), AND THE HUBBLE HERITAGE TEAM (STSCI/AURA)

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

$$\nabla_{[\mu} F_{\nu\rho]} = 0$$

$$\nabla_\nu F^{\mu\nu} = \mathcal{J}^\mu$$

Maxwell's equations



$$F_{\mu\nu} \mathcal{J}^\nu = 0$$

Force Free condition

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. Grab 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)

## 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

# GRAVITATIONAL WAVES

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

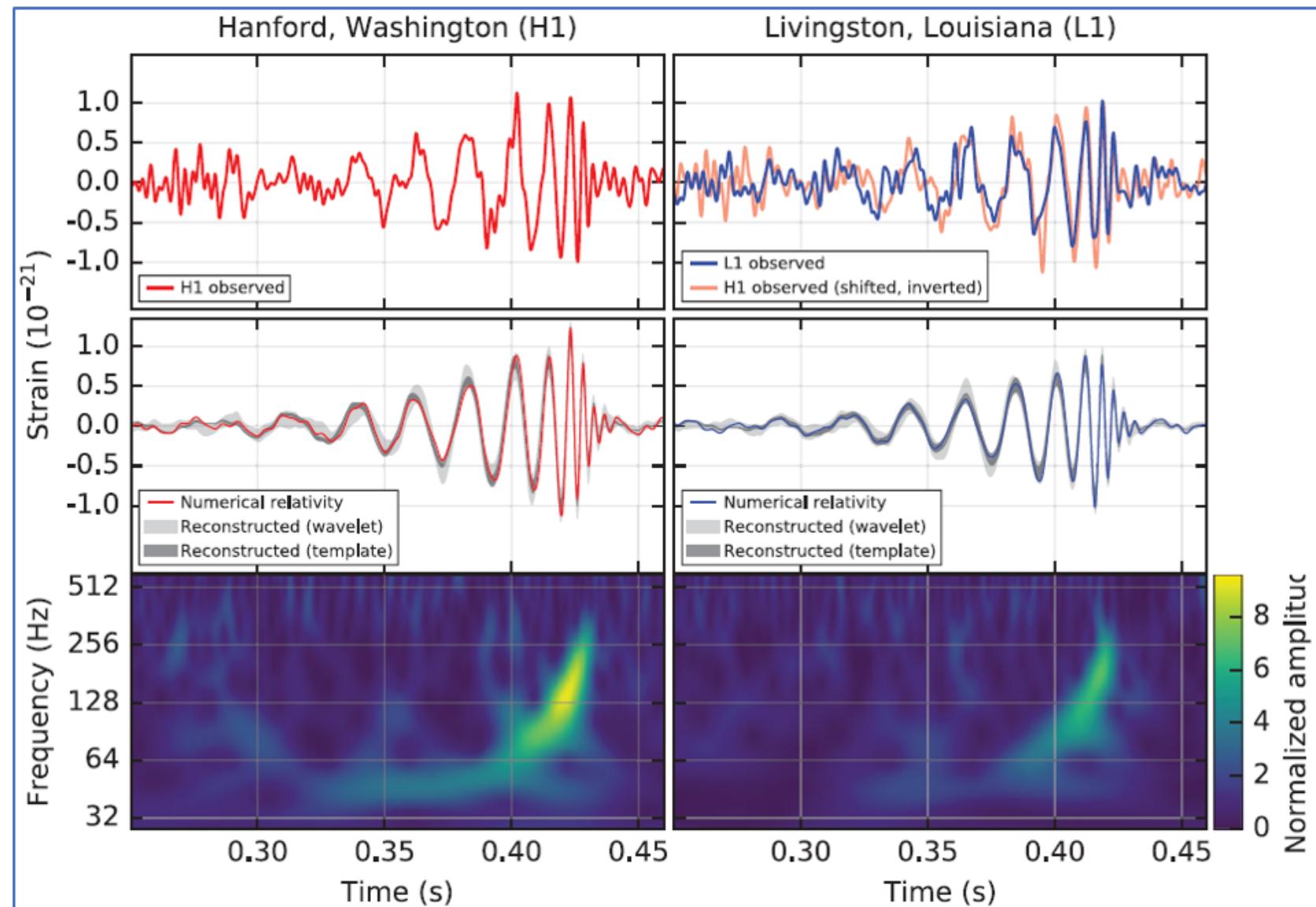


Image credit: LIGO & Virgo

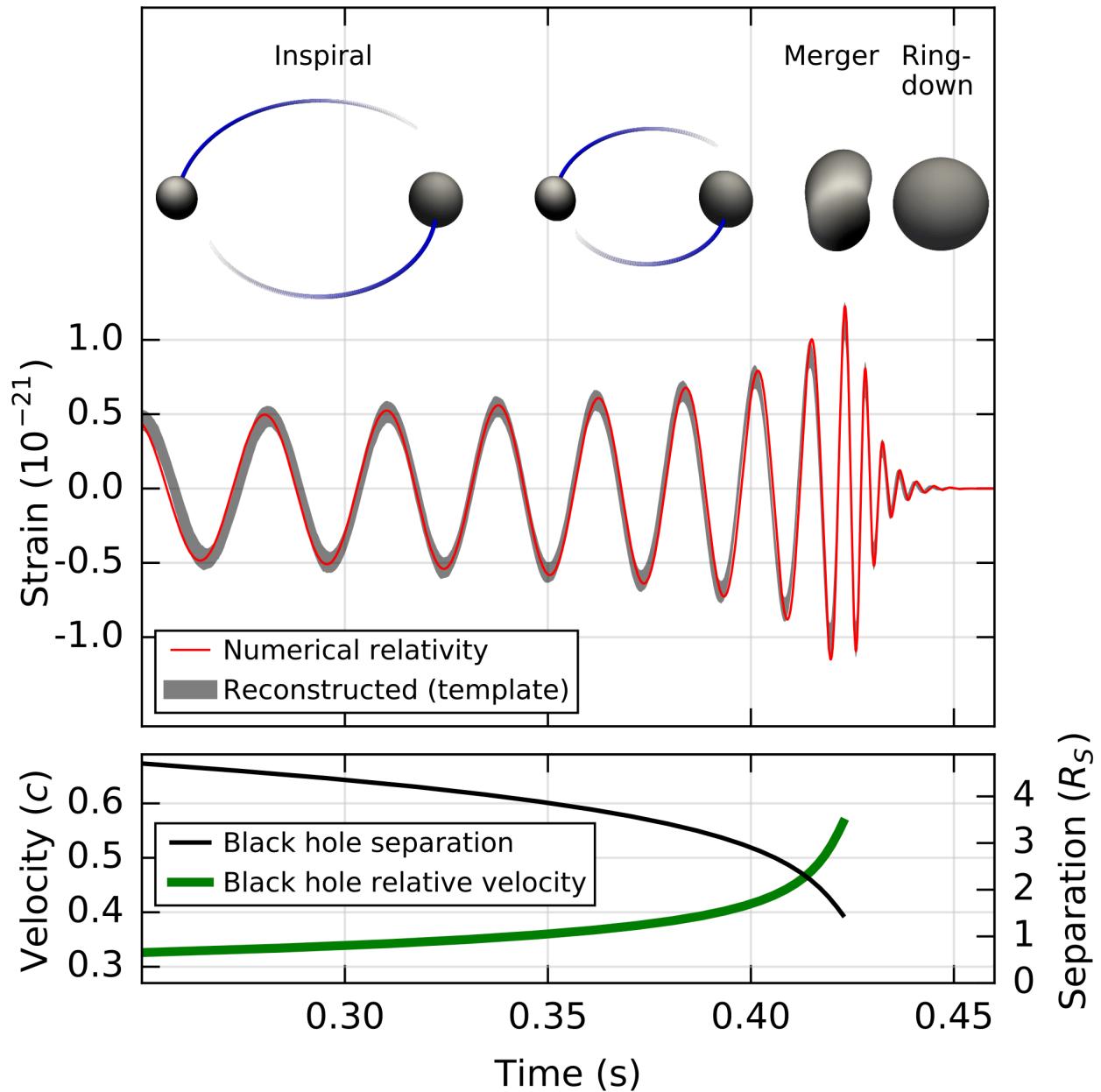
# Che ruolo ha la fisica teorica?

Image credit: LIGO & Virgo

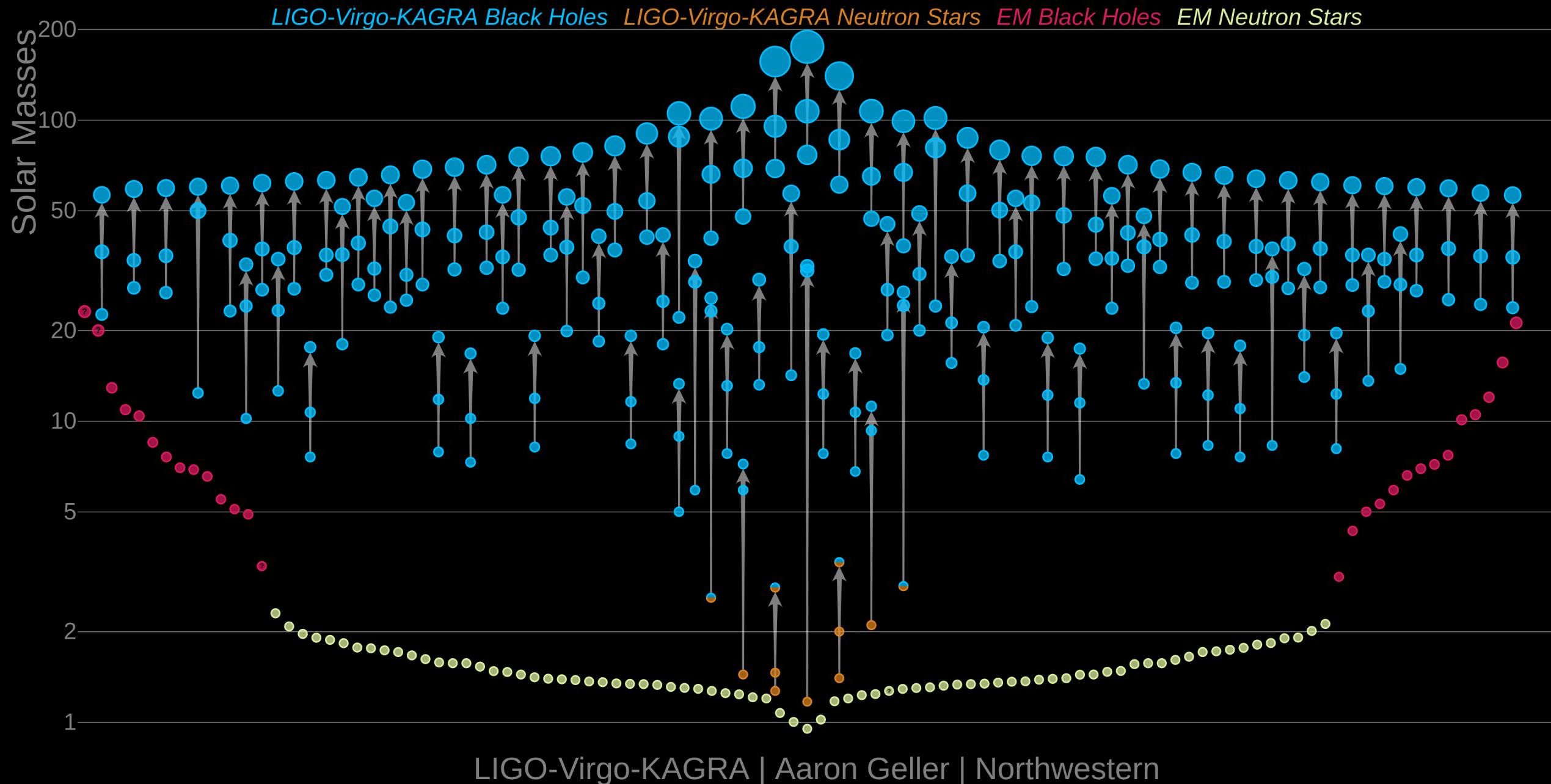


GW150914

- ▶ 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:  $3^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$

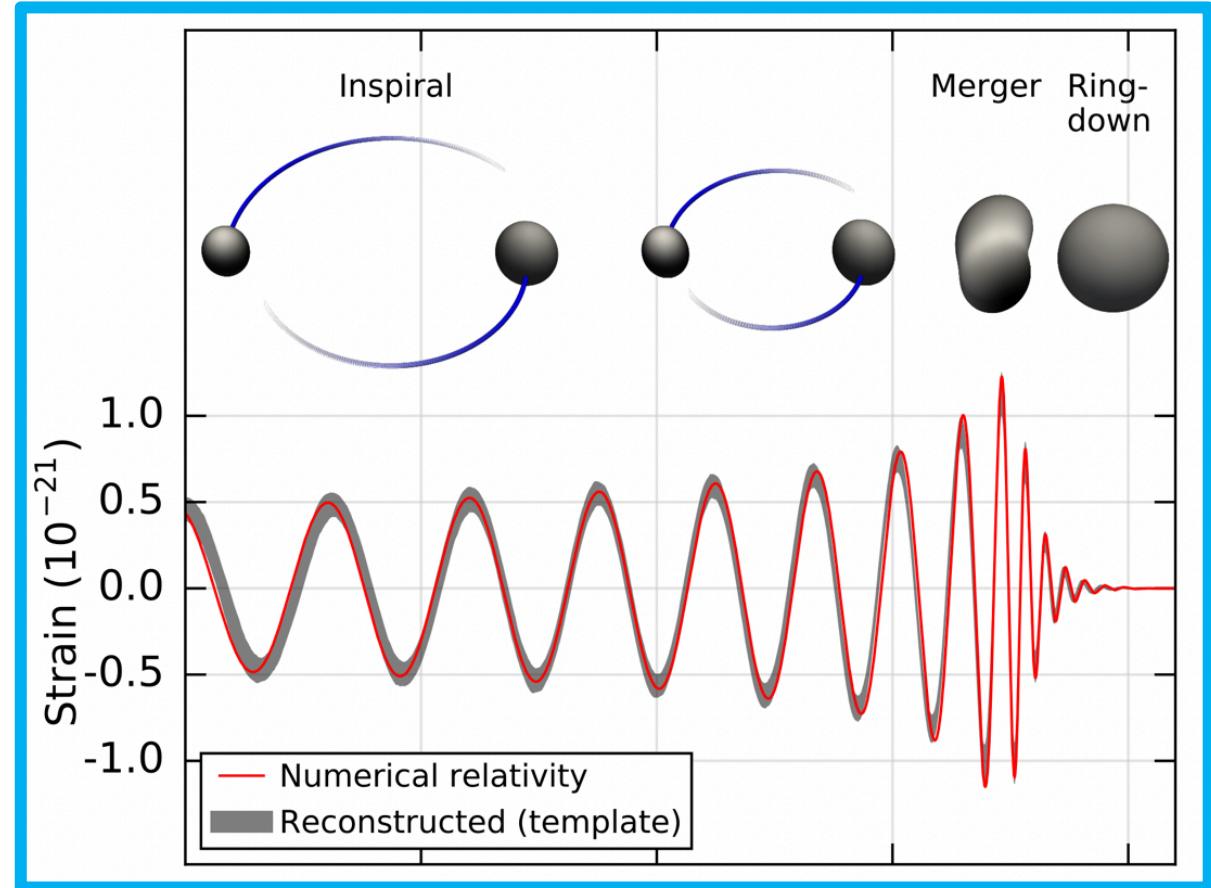


# Masses in the Stellar Graveyard



Le tecniche impiegate consistono in:

- Modelli analitici basati su approcci perturbativi: **Post-Newtonian e Post-Minkowskian** approximation 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.**

- ***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]

- ***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]

- ***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]

## Collaborazioni coinvolte

- Dr. Alessandro Nagar, INFN, Torino

- Prof. Sebastiano Bernuzzi, Jena University, Germany

**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)

## **Tesi Triennali del gruppo degli ultimi 3 anni su argomenti di:**

- **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** (Balducchi, 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)

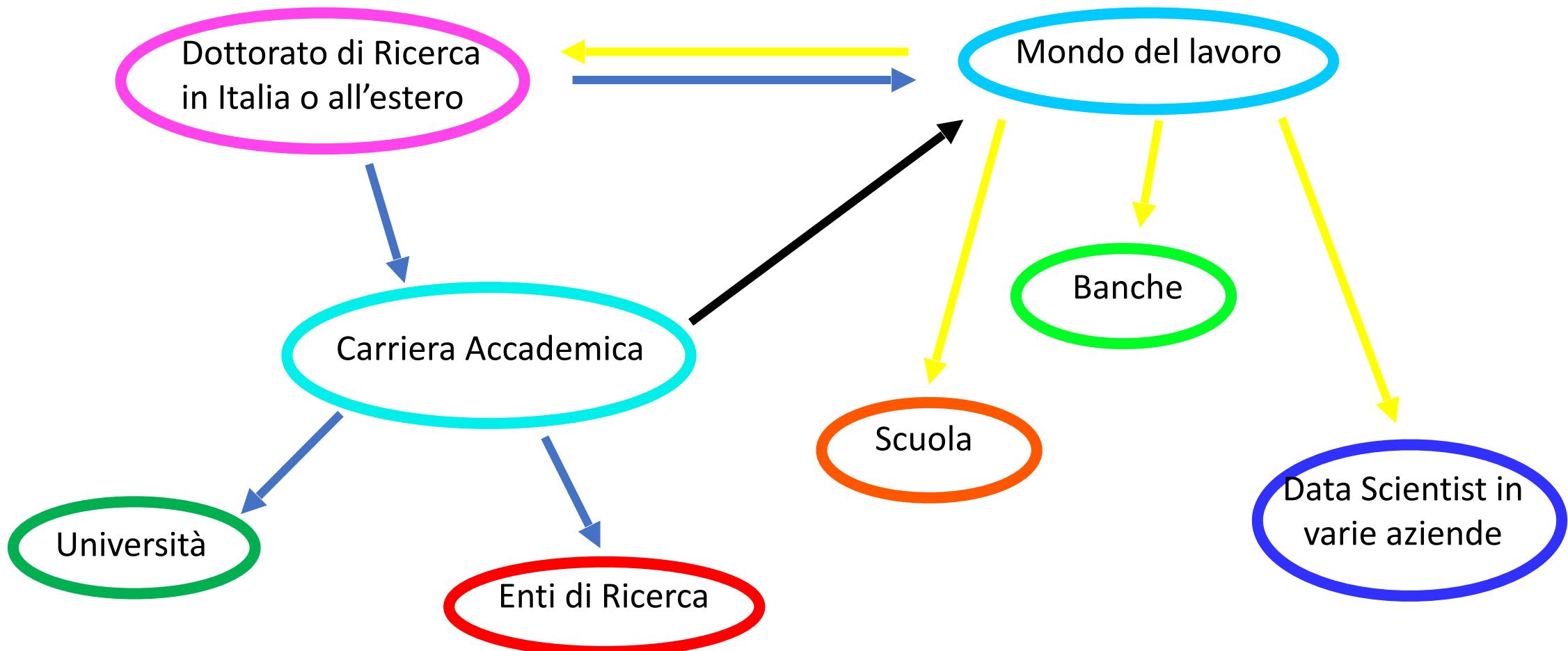
## Proposte tesi triennali:

- 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.

## 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.
- **...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, PhD student at **Qeen Mary University of London** (United Kingdom)
- Andrea Colcelli, PhD student at **SISSA**, Trieste (Italia)
- Stefano Speziali, PhD student at the Department of Physics, **Swansea University**, Swansea SA2 8PP, United Kingdom
- Alfredo Glioti, PhD 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)
- Tetiana Pitik, PhD student in the Theoretical Particle Physics and Cosmology Group at the **Niels Bohr Institute** (Denmark)
- Nicoló Primi, PhD student at the Department of Mathematics, **King's College**, London (United Kingdom)
- Leo Bidussi, PhD student at the **University of Edinburgh**, Edinburgh, Scotland
- Simone Mezzasoma, PhD student at **Urbana Champain, University of Illinois** (USA)
- Michele Lupattelli, PhD student at Institute for Theoretical Particle Physics and Cosmology, **Aachen University** (Germany)
- Lorenzo Quintavalle, PhD student at **DESY**, Hamburg (Germany)
- Giordano Cintia, PhD student in Theoretical Physics at **Ludwig-Maximilians-Universität**, Munich (Germany)
- Lorenzo Menculini, Double PhD Degree - **joint PhD program between Perugia University and the Niels Bohr Institute**
- Filippo Camilloni, Double PhD Degree - **joint PhD program between Perugia University and the Niels Bohr Institute**
- Andrea Placidi, Double PhD Degree - **joint PhD program between Perugia University and the Niels Bohr Institute**
- Daniele Pica, Double PhD Degree - **joint PhD program between Perugia University and the Niels Bohr Institute**
- Noemi Fabri - PhD student at the **University of Zurich**, Switzerland

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

# Alternative al Dottorato e alla carriera accademica

- ☀ Giacomo Signorini (No PhD): Data & Portfolio Analyst presso GEB - **Generali** Employee Benefits (Lussemburgo)
- ☀ Claudio Marcantonini (PhD MIT, postdoc in Paris): **Funzionario** Segreteria Tecnica di Divisione at Autorità per l'energia elettrica e il gas (sede di Milano)
- ☀ Erasmo Coletti (PhD at MIT): Head of VaR framework at **Credit Suisse** (London)
- ☀ Daniele Bertolini (PhD at MIT, postdoc at Berkeley): Data Scientist at **Unlearn.AI**, San Francisco
- ☀ Matteo Mancini (No PhD): Advisor presso **Banca d'Italia** – Eurosistema, Perugia
- ☀ Alessandra Cagnazzo (PhD at Padova University, postdoc at NORDITA): Data Scientist at **AIMS Innovation: Solving the challenges of modern IT Operations with Artificial Intelligence**, Oslo, Norway
- ☀ Andrea Marini e Lorenzo Menculini (PhD at Perugia & NBI): Research Scientist at **Idea-Re S.r.l.**, Perugia
- ☀ **...e ovviamente si può insegnare matematica e fisica nelle scuole** 😊 ...dopo aver acquisito 24 CFU in discipline antropo – psico – pedagogiche ed in metodologie e tecnologie didattiche

**GRAZIE**