

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):

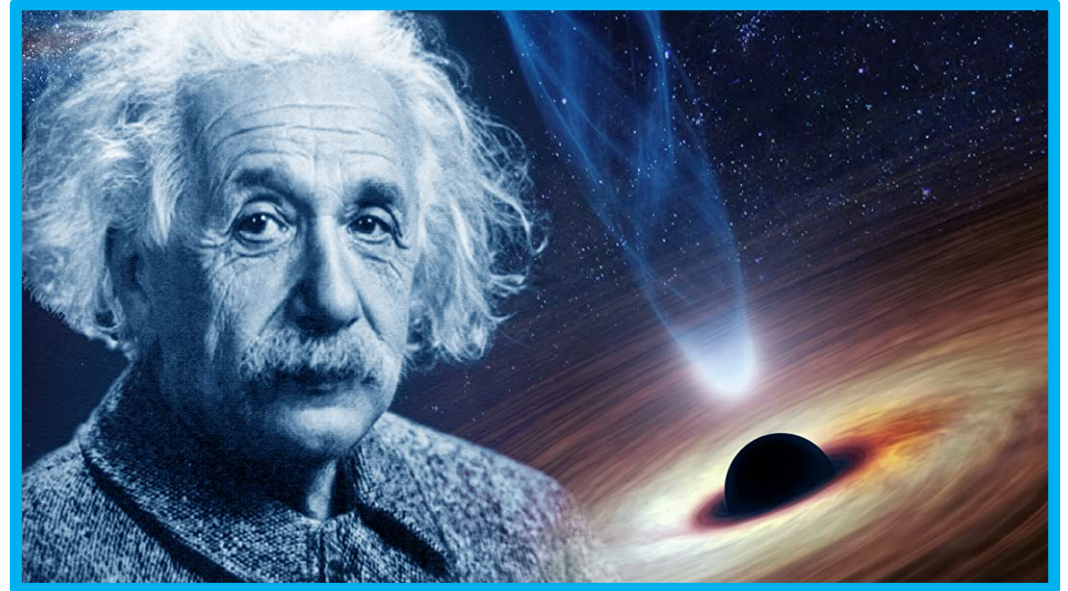
Sara Gliorio

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

I corsi della Laurea Magistrale:

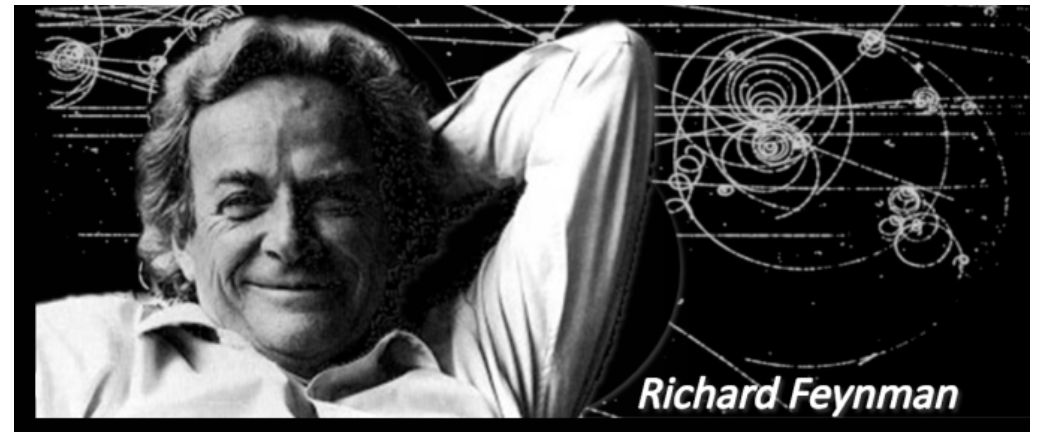
Relatività Generale (II semestre)

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)



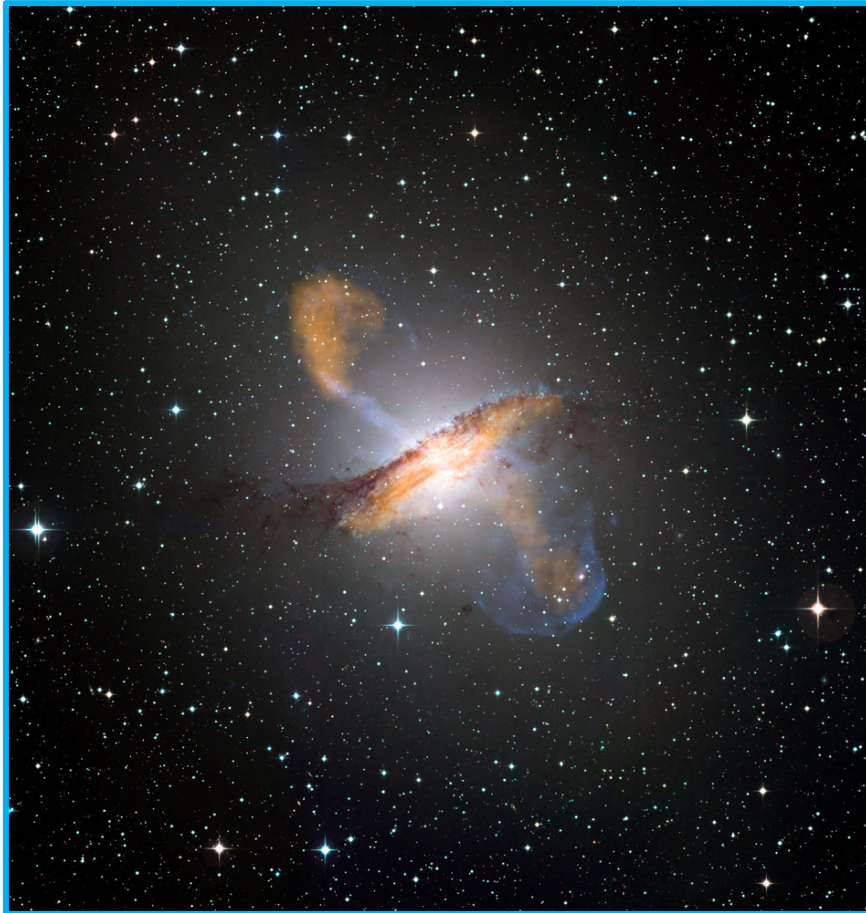
Quantum Field Theory (I semestre, secondo anno)

Studio della tecnica del path integral. Azione effettiva. Teoria classica e teoria interagente. Regularizzazione 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

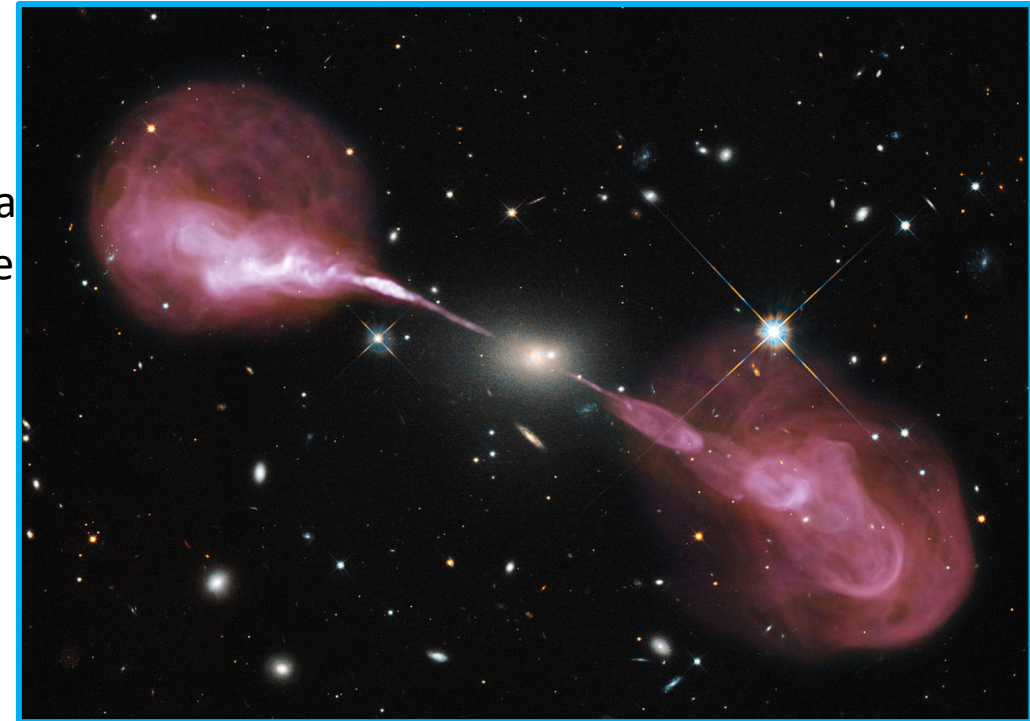


ESO/WFI (visible); MPIfR/ESO/APEX/A. Weiss et al. (microwave); NASA/CXC/CfA/R. Kraft et al. (X-ray)

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

$$\begin{array}{ccc} \nabla_{[\mu} F_{\nu\rho]} = 0 & & \\ \nabla_{\nu} F^{\mu\nu} = \mathcal{J}^{\mu} & + & F_{\mu\nu} \mathcal{J}^{\nu} = 0 \\ \text{Maxwell's equations} & & \text{Force Free condition} \end{array}$$

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)

Collaborazioni coinvolte

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

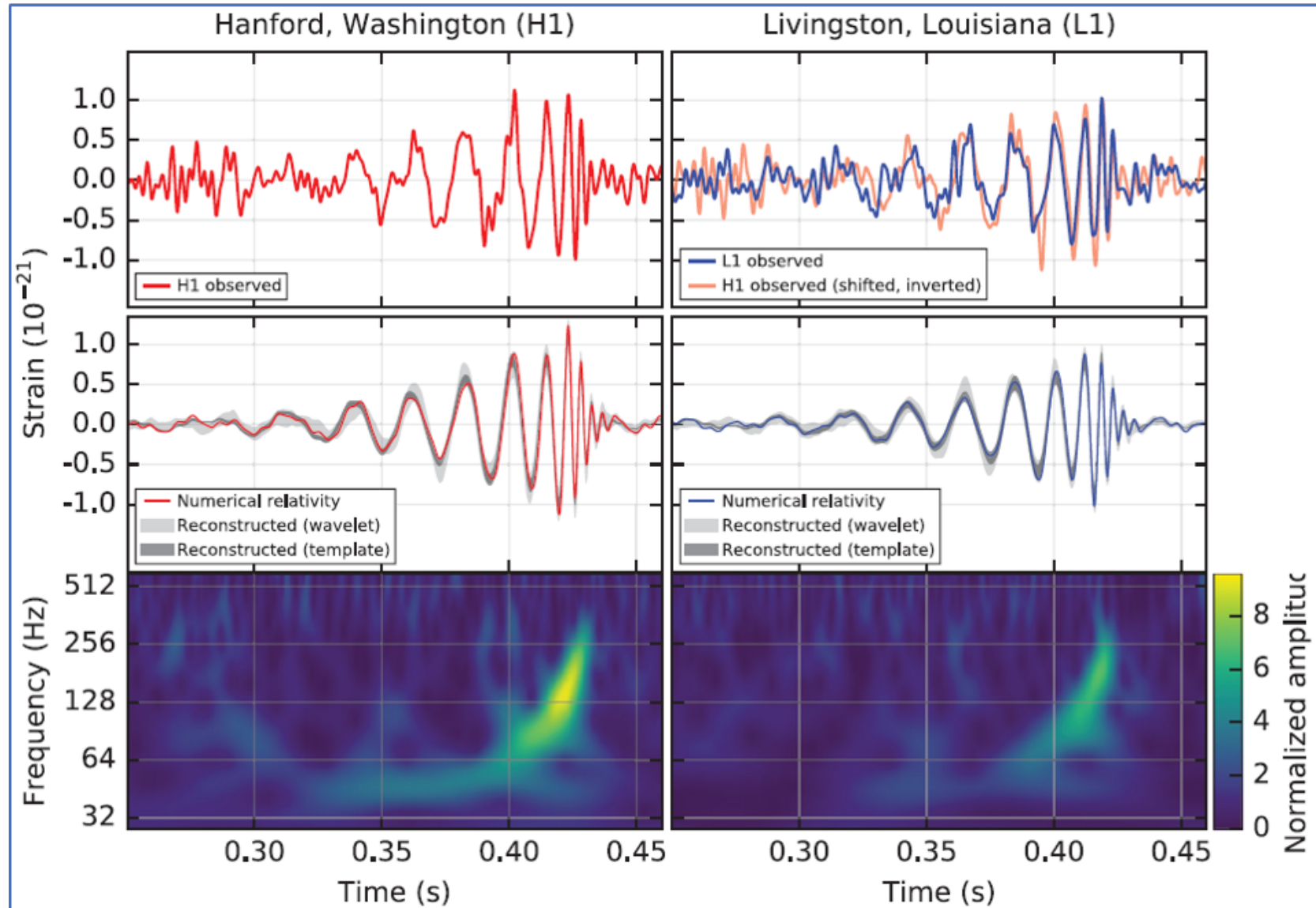
■ Dr. Roberto Oliveri, Laboratoire Univers et Théories (LUTH), Paris, France

■ 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)



Che ruolo ha la fisica teorica?

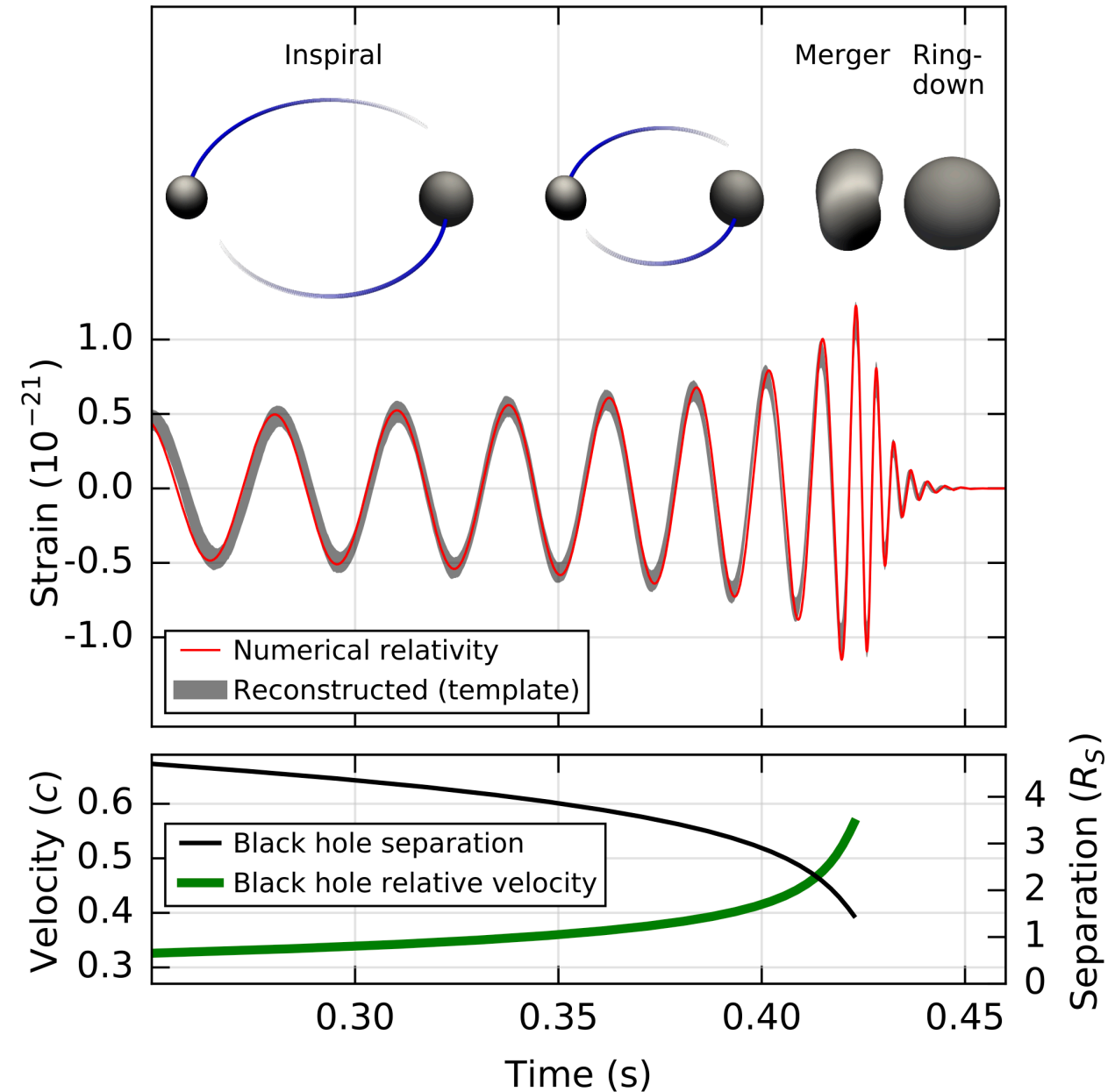
ruolo fondamentale

rivela quali oggetti hanno dato
luogo al segnale misurato

GW150914

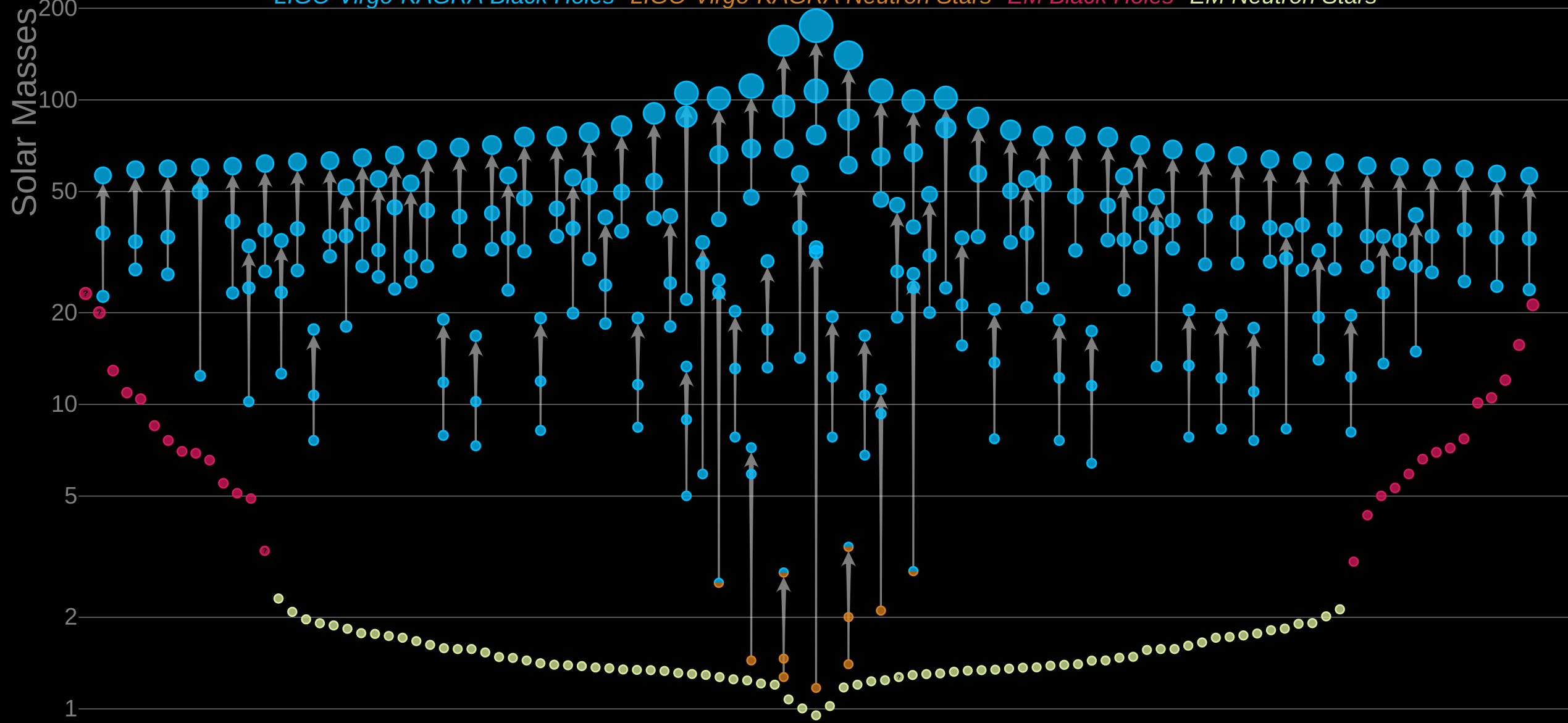
- Source: coalescence of a binary system of stellar black holes
 - Merging BH masses:
 $29^{+4}_{-4}M_{\odot}$ and $36^{+5}_{-4}M_{\odot}$
 - Resulting BH mass: $62^{+4}_{-4}M_{\odot}$
 - Energy emitted in GWs:
 $3^{+0.5}_{-0.5}M_{\odot}c^2$

Image credit: LIGO & Virgo



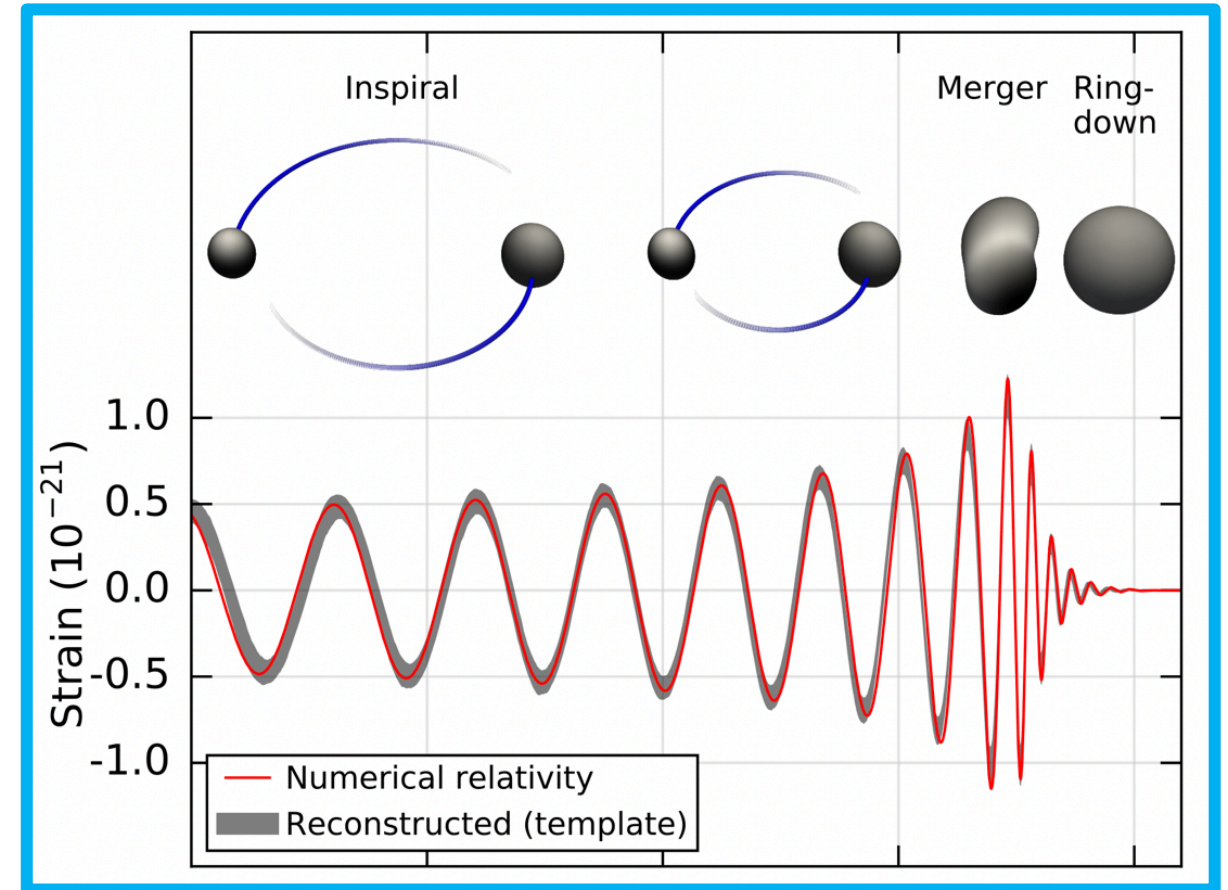
Masses in the Stellar Graveyard

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



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** (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)

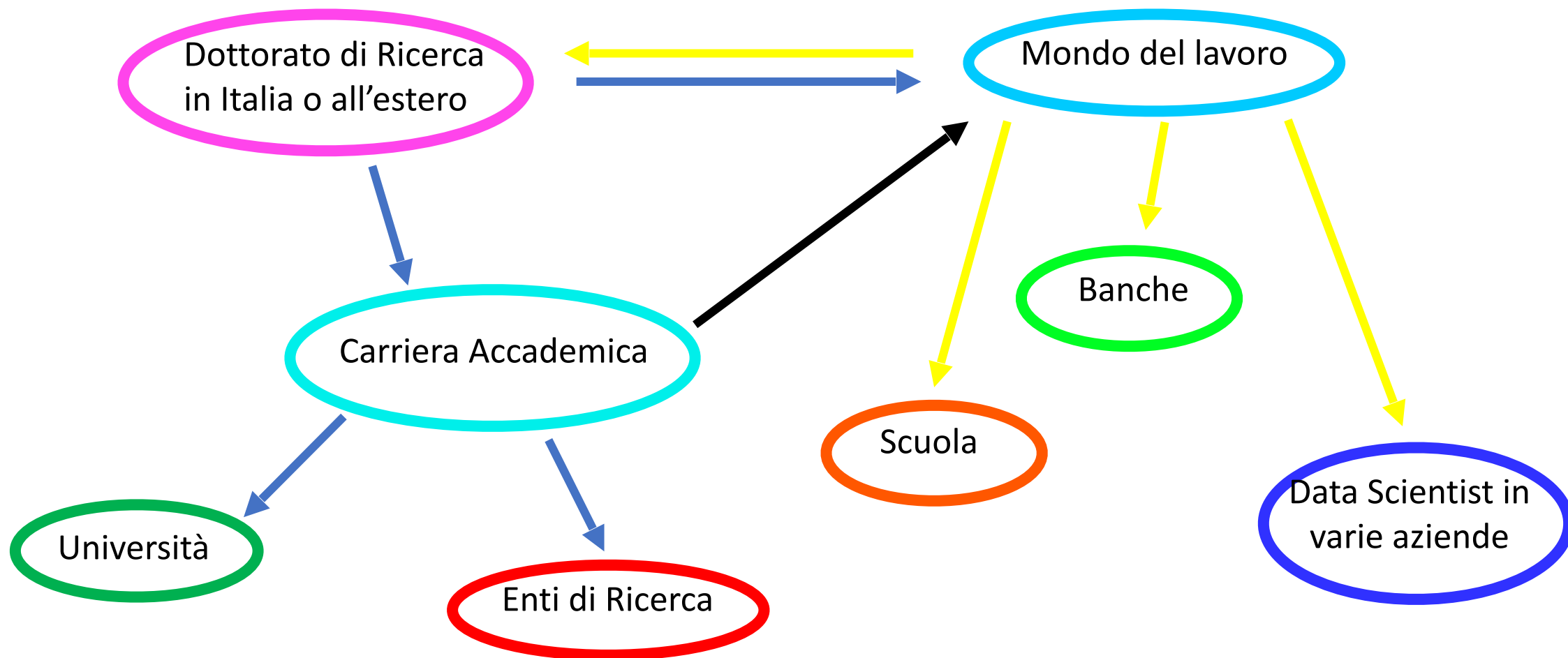
Proposte tesi triennali:

- 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 **Queen 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)
- Nicolás 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 Champaign, 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 (Lussenburgo)
- ☀️ 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** – Eurosystem, 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

