

# Decoding the Message of Gravitational Waves:

The role of theoretical models

Marta Orselli

**Kick-off Meeting**

**Piano Triennale della Ricerca e Terza  
Missione (2021-2023)**

**Dipartimento di Fisica e Geologia**

**Perugia, 10-11 Gennaio 2022**



Image credit: Carl Knox, OzGrav, Swinburne University of Technology

A.D. 1308  
**unipg**

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI PERUGIA

 VIRGO

  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

 **ET** EINSTEIN  
TELESCOPE

**Ambito del PTSR : Ambito di ricerca nuovo: 6**

**TITOLO: Onde Gravitazionali e Astrofisica Multimessenger, Scienza e Tecnologia**

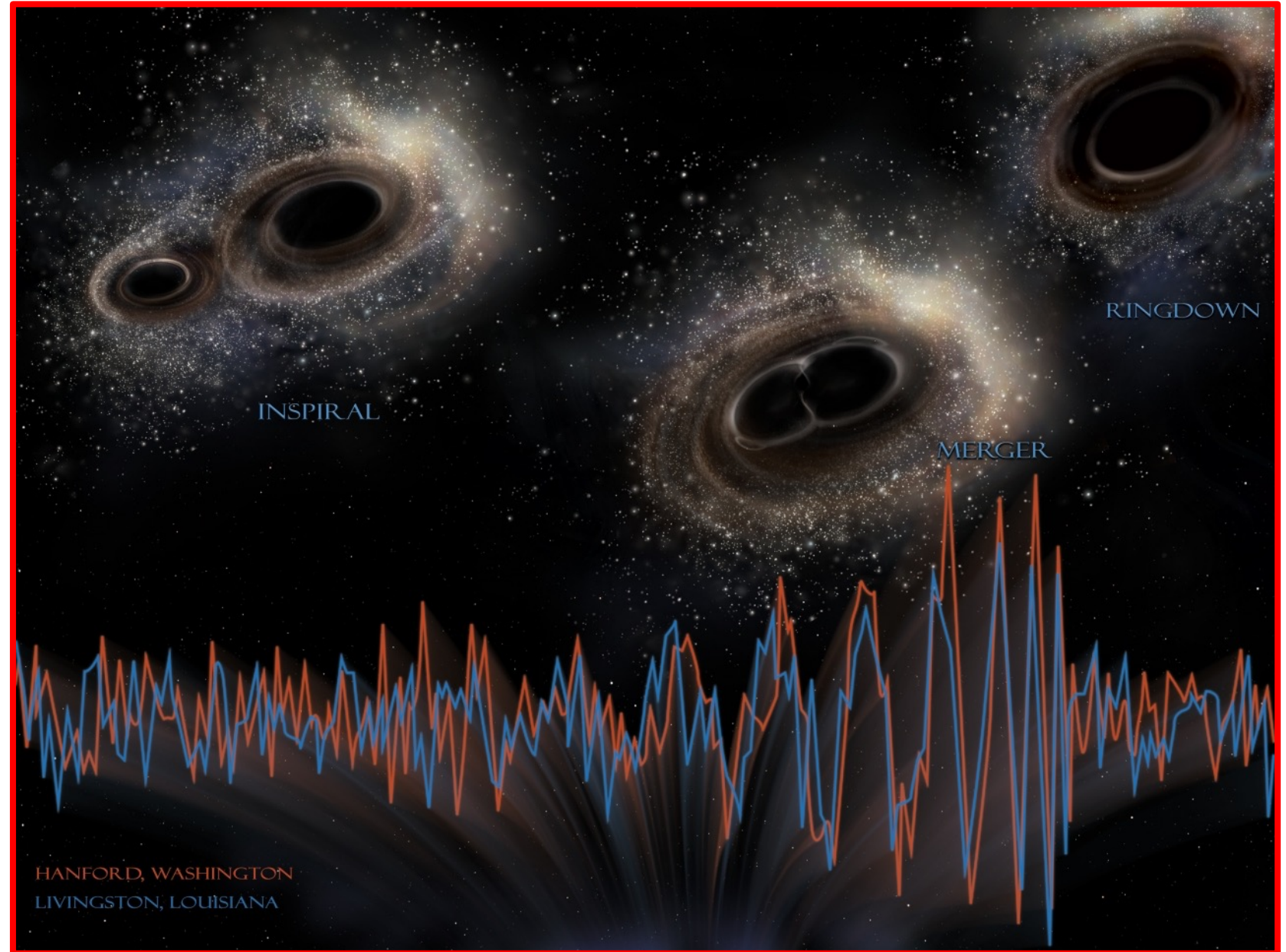
**SSD:** FIS/01, FIS/02, FIS/03, FIS/04, FIS/05, GEO/10

**SETTORI ERC:** *PE2, PE9, PE10*

**Partecipanti** Strutturati universitari (compresi studenti di dottorato) e INFN:  
Massimiliano Rinaldo Barchi, Mateusz Bawaj, Filippo Camilloni, Sara Cutini,  
Stefano Germani, Gianluca Grignani, Marta Orselli, Daniele Pica, Andrea Placidi,  
Michele Punturo, Gino Tosti, Helios Vocca.

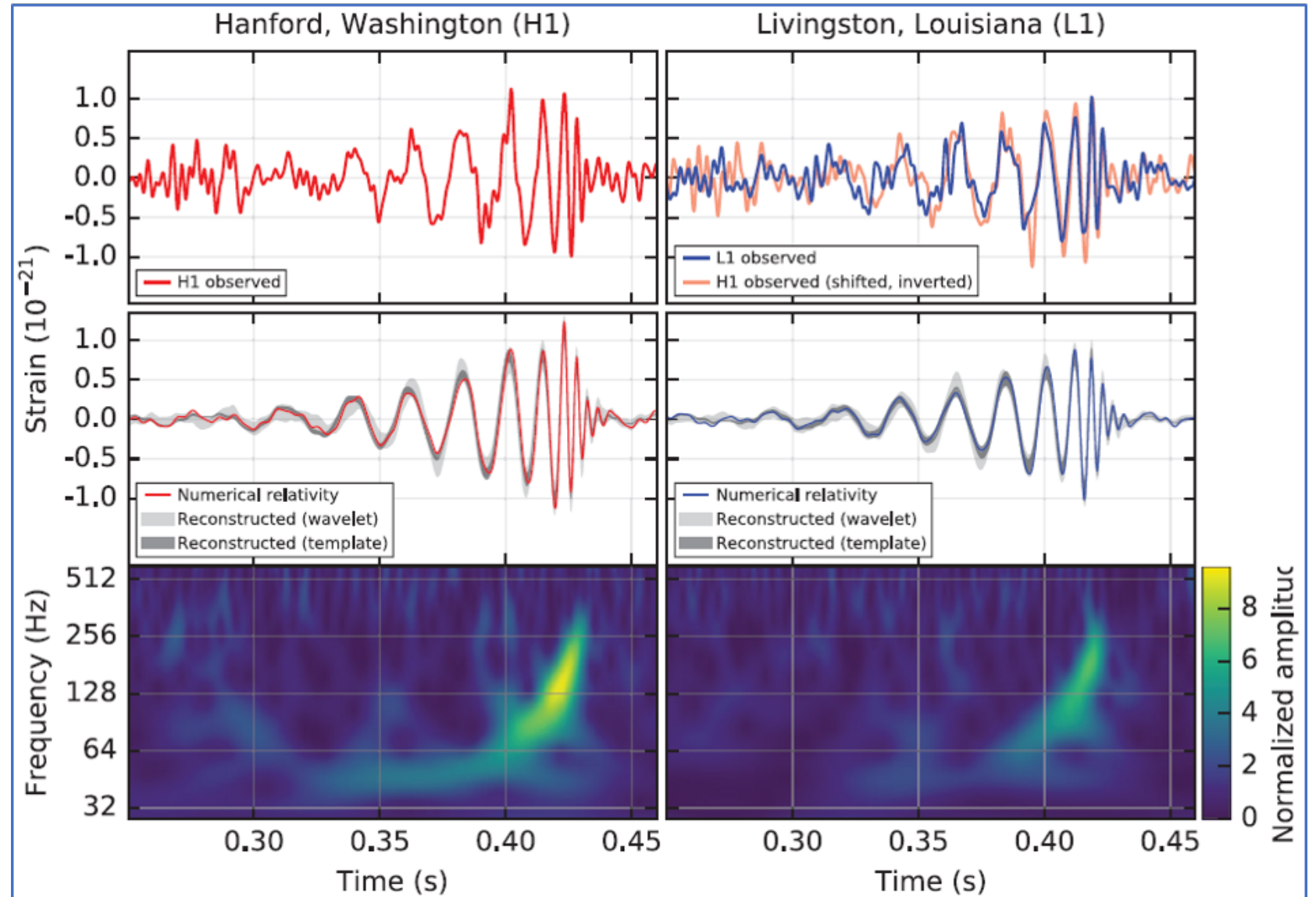
# GRAVITATIONAL WAVES

*GW150914 was the first ever direct detection and proof of the existence of gravitational waves. The waveform, detected by both LIGO observatories, Hanford and Livingston, matched the predictions of general relativity for a gravitational wave emanating from the inward spiral and merger of a pair of black holes of around 36 and 29 solar masses and the subsequent “ringdown” of the single resulting black hole. ([Credit](#): Aurore Simonnet/LIGO Scientific Collaboration)*



# GRAVITATIONAL WAVES

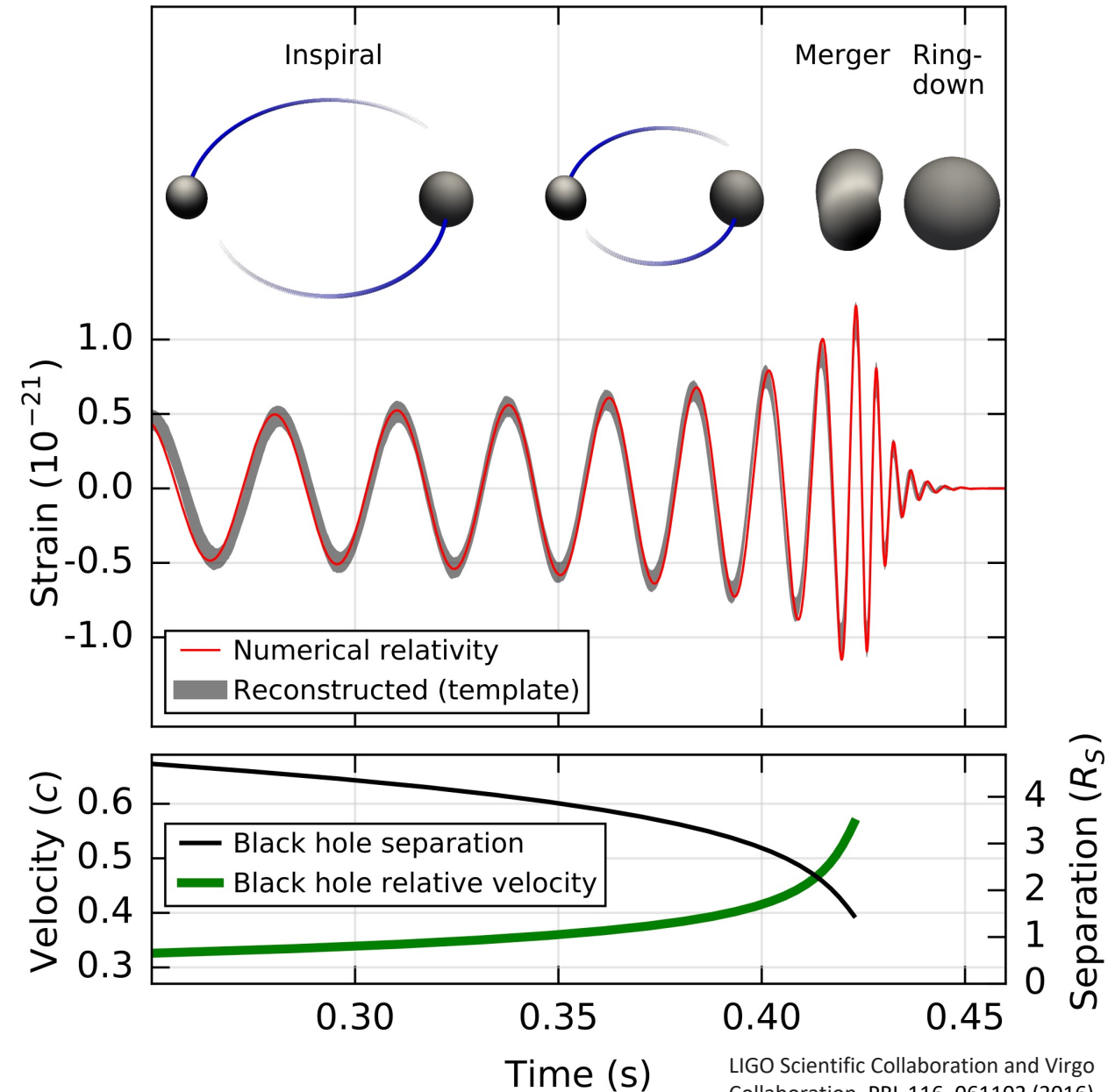
Il 14 Settembre 2015 LIGO registra il primo segnale d'onda gravitazionale GW150914 (vedi figura)



# **Ruolo della fisica teorica nel contesto delle onde gravitazionali**

# Ruolo della fisica teorica nel contesto delle onde gravitazionali

Image credit: LIGO & Virgo



# Ruolo della fisica teorica nel contesto delle onde gravitazionali

## ruolo fondamentale

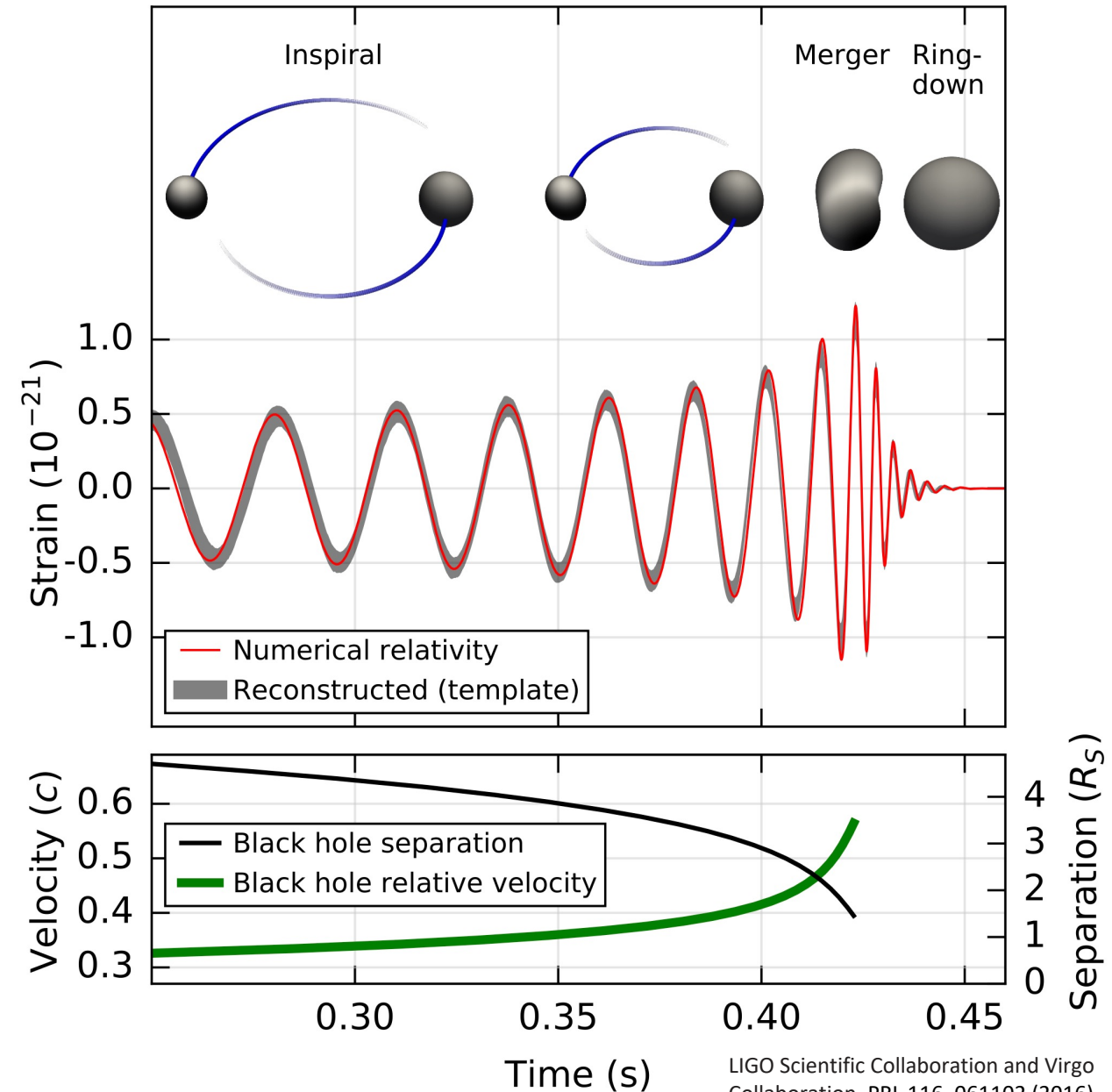
rivela quali oggetti hanno dato luogo al segnale misurato

- Analisi dati
- Parameter estimation

► Source: coalescence of a binary system of stellar black holes

- Merging BH masses:  
 $29_{-4}^{+4}M_{\odot}$  and  $36_{-4}^{+5}M_{\odot}$
- 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



LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, PRL 116, 061102 (2016)

Le tecniche impiegate consistono in:

- Modelli analitici basati su approcci perturbativi:
  - **Post-Newtonian**: espansione in piccole  $\frac{v}{c}$ .
  - **Post-Minkowskian**: espansione per campi gravitazionali ( $GM/(rc^2)$ ) deboli.

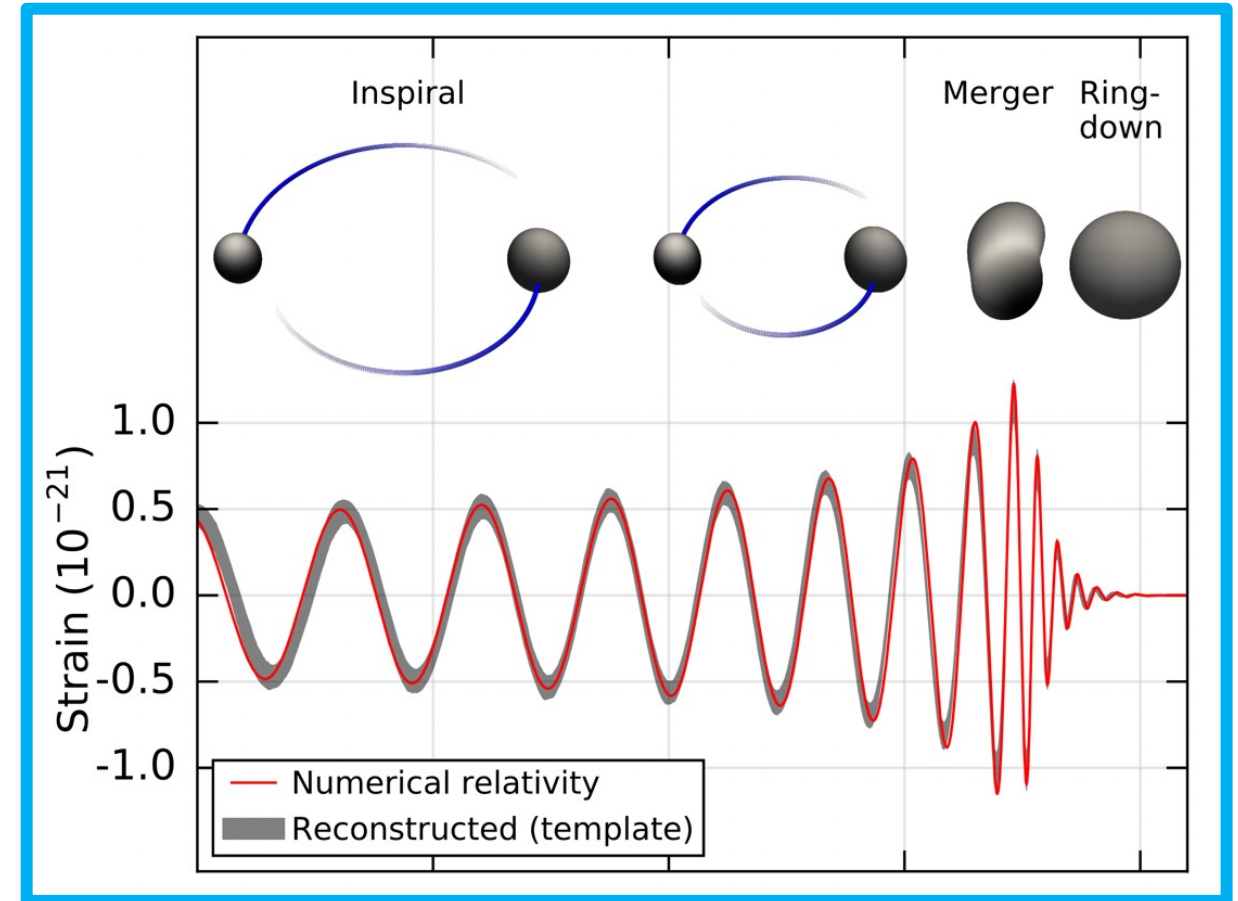
Funzionano bene nella fase di early inspiral.

- **Effective Field Theory**: tecnica recente che fa uso di diagrammi di Feynman e tecniche di calcolo di ampiezze di scattering.

- **Effective One Body (EOB)** approach: descrizione effettiva della dinamica di un sistema binario. Descrive sia la fase di inspiral che di merger.

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, PRL 116, 061102 (2016)

Image credit: LIGO & Virgo





Le tecniche impiegate consistono in:

- Modelli analitici basati su approcci perturbativi:
  - **Post-Newtonian**: espansione in piccole  $\frac{v}{c}$ .
  - **Post-Minkowskian**: espansione per campi gravitazionali ( $GM/(rc^2)$ ) deboli.

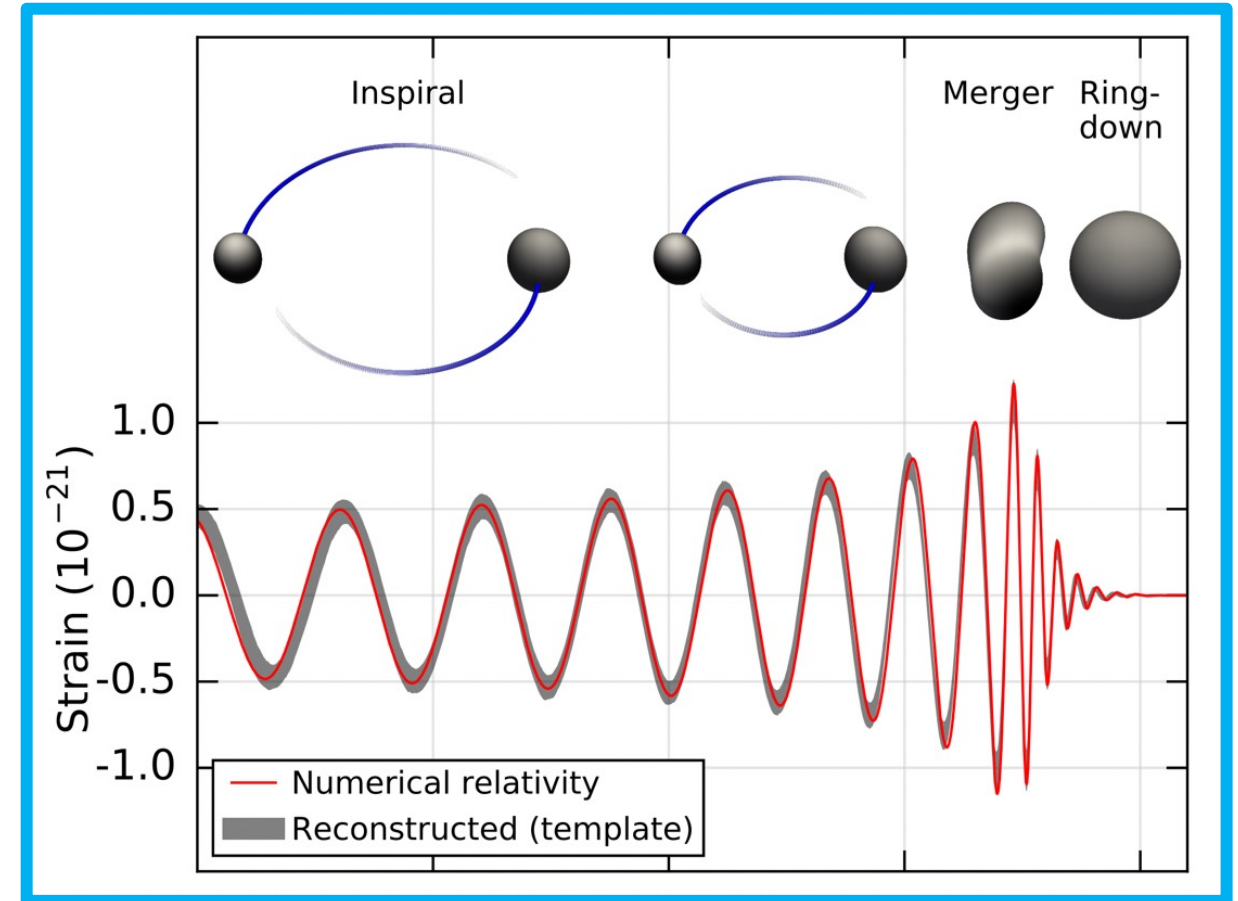
Funzionano bene nella fase di early inspiral.

- **Effective Field Theory**: tecnica recente che fa uso di diagrammi di Feynman e tecniche di calcolo di ampiezze di scattering.

- **Effective One Body (EOB)** approach: descrizione effettiva della dinamica di un sistema binario. Descrive sia la fase di inspiral che di merger.

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, PRL 116, 061102 (2016)

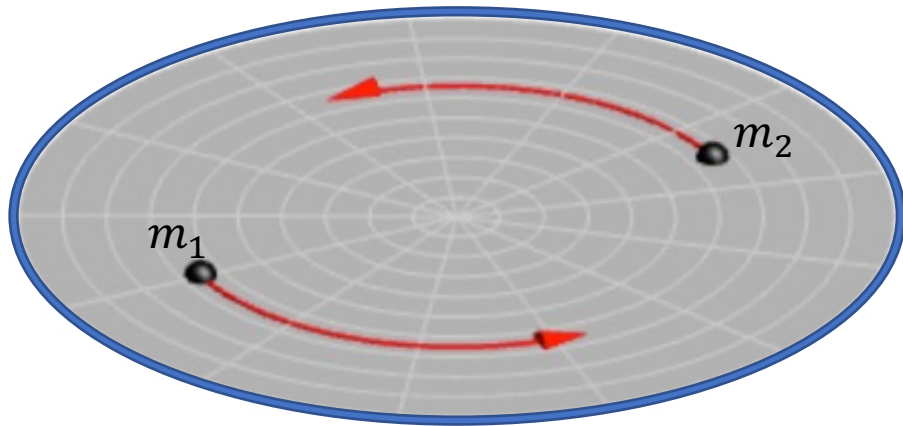
Image credit: LIGO & Virgo



➔ L' **EOB** approach è il modello analitico che al momento riproduce in maniera più precisa i segnali ottenuti con simulazioni numeriche...e lo fa impiegando poche ore (in contrapposizione ai mesi richiesti per simulazioni numeriche)

# EFFECTIVE ONE BODY APPROACH

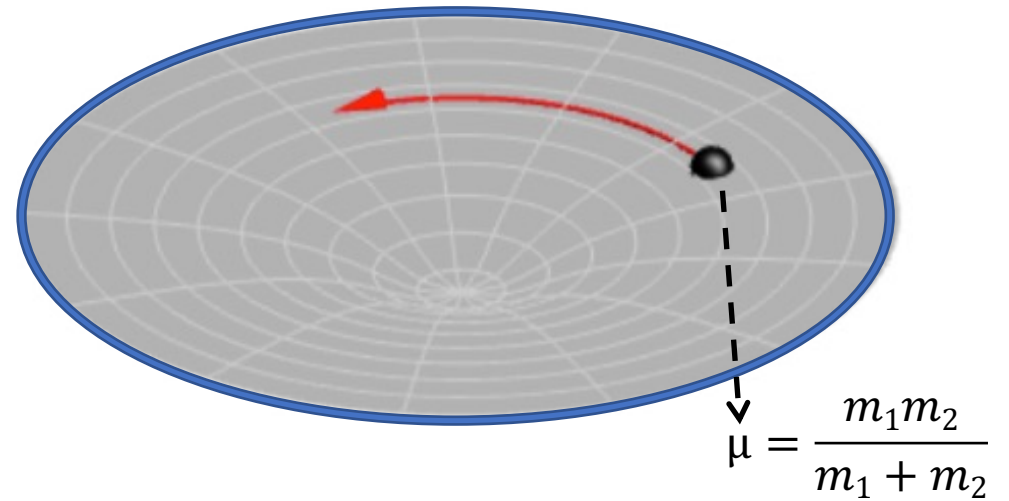
Buonanno Damour 1998  
Buonanno Damour 2000



Sistema a 2 corpi



viene mappato in



Dinamica di un corpo effettivo  
in una metrica effettiva

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

$$g_{\mu\nu}^{\text{eff}} dx^\mu dx^\nu = -A(R; \nu) c^2 dT^2 + B(R; \nu) dR^2 + R^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

$$\nu \equiv \frac{\mu}{M} \equiv \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \quad \text{Parametro di deformazione} \quad M = m_1 + m_2 \quad \text{Massa totale}$$

$$A(R; \nu) = 1 + \tilde{a}_1 \frac{GM}{c^2 R} + \tilde{a}_2 \left( \frac{GM}{c^2 R} \right)^2 + \tilde{a}_3 \left( \frac{GM}{c^2 R} \right)^3 + \tilde{a}_4 \left( \frac{GM}{c^2 R} \right)^4 + \dots$$

$$B(R; \nu) = 1 + \tilde{b}_1 \frac{GM}{c^2 R} + \tilde{b}_2 \left( \frac{GM}{c^2 R} \right)^2 + \tilde{b}_3 \left( \frac{GM}{c^2 R} \right)^3 + \dots$$

I coefficienti si fissano richiedendo che nel limite  $\nu \rightarrow 0$  la metrica si riduca a quella di Schwarzschild cioè

$$A(R; \nu = 0) = 1 - 2GM/c^2 R = B^{-1}(R; \nu = 0) \quad \longrightarrow \quad \text{Questo fissa } \begin{matrix} \tilde{a}_1 = -2 \\ \tilde{b}_1 = +2 \end{matrix}$$

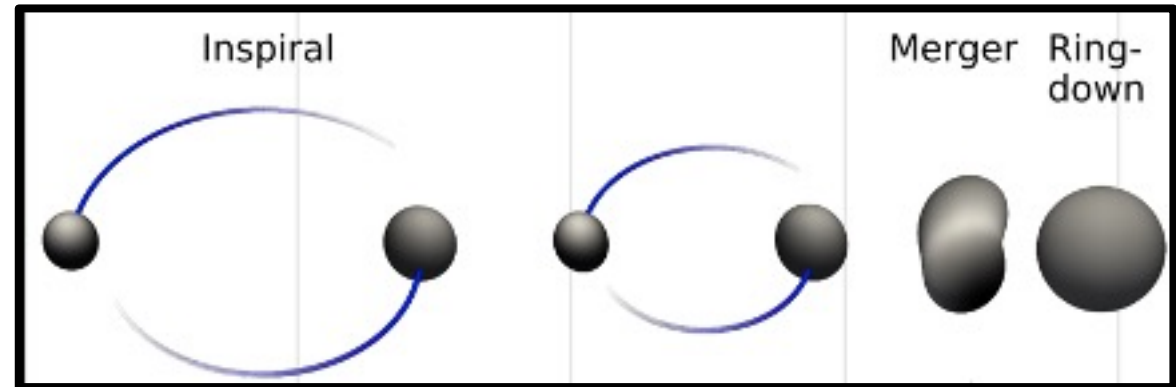
I coefficienti successivi si fissano mappando le espressioni dell'energia nelle due descrizioni, calcolata in un'espansione Post Newtoniana. Per esempio si trova:

$$\tilde{a}_2 = 0, \quad \tilde{a}_3 = 2\nu, \quad \tilde{b}_2 = 4 - 6\nu,$$

**Come si inserisce la nostra ricerca in questo contesto?**

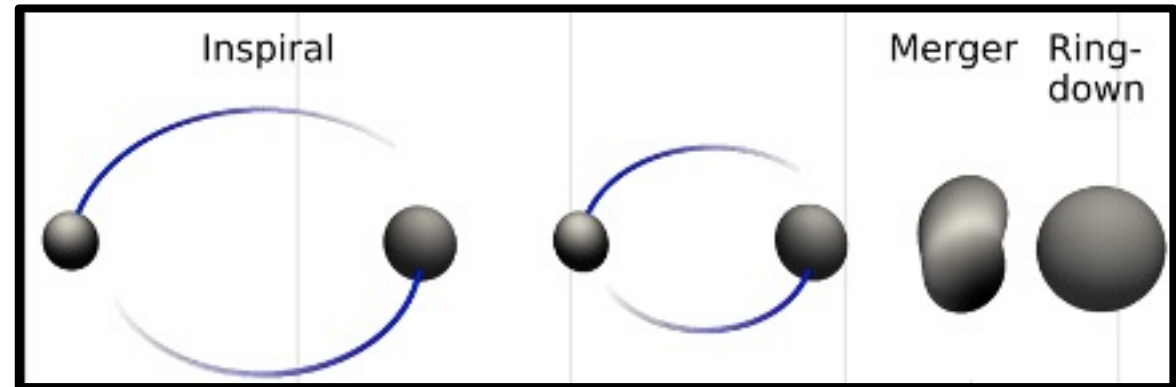
# Come si inserisce la nostra ricerca in questo contesto?

I modelli attuali sono in grado di interpretare e riprodurre in modo eccellente i segnali gravitazionali prodotti da sistemi binari nella fase in cui il moto diventa circolare (o quasi circolare)



# Come si inserisce la nostra ricerca in questo contesto?

I modelli attuali sono in grado di interpretare e riprodurre in modo eccellente i segnali gravitazionali prodotti da sistemi binari nella fase in cui il moto diventa circolare (o quasi circolare)



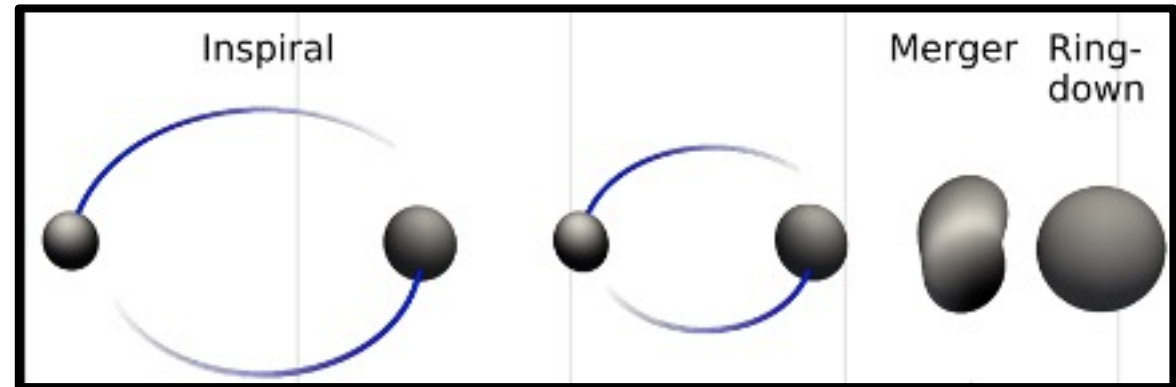
Argomento attualmente di grande interesse:

Studio di modelli di forme d'onda per **orbite ellittiche** → importante per migliorare i modelli attuali e per confronti con le rilevazioni degli interferometri di futura generazione come Einstein Telescope (in Europa), Cosmic Explorer (in USA) e LISA (missione spaziale).

10<sup>6</sup> eventi all'anno! Questo richiede modelli teorici estremamente accurati

# Come si inserisce la nostra ricerca in questo contesto?

I modelli attuali sono in grado di interpretare e riprodurre in modo eccellente i segnali gravitazionali prodotti da sistemi binari nella fase in cui il moto diventa circolare (o quasi circolare)



Argomento attualmente di grande interesse:

Studio di modelli di forme d'onda per **orbite ellittiche** → importante per migliorare i modelli attuali e per confronti con le rilevazioni degli interferometri di futura generazione come Einstein Telescope (in Europa), Cosmic Explorer (in USA) e LISA (missione spaziale).

10<sup>6</sup> eventi all'anno! Questo richiede modelli teorici estremamente accurati

[Exploiting Newton-factorized, 2PN-accurate, waveform multipoles in effective-one-body models for spin-aligned noncircularized binaries](#), e-Print: [2112.05448](#) [gr-qc]. Autori: A. Placidi, S. Albanesi, A. Nagar, M. Orselli, S. Bernuzzi and G. Grignani :



Abbiamo per la prima volta incorporato nei templates EOB il contributo dovuto all' eccentricità fino all'ordine 2PN ottenendo un **notevole miglioramento** rispetto ai modelli precedenti senza eccentricità e rispetto ad altri modelli che includono eccentricità

## Multipolar decomposition

$$h_+ - ih_\times = D_L^{-1} \sum_{\ell=2}^{\ell_{\max}} \sum_{m=-\ell}^{\ell} h_{\ell m} {}_{-2}Y_{\ell m}$$

Inverso della distanza dalla sorgente

Armoniche sferiche  
per spin 2

Quello che si calcola è

$$h_{\ell m} = 4\nu \sqrt{\frac{\pi}{5}} e^{-im\varphi} \hat{H}_{\ell m}$$

$$\nu \equiv \frac{\mu}{M} \equiv \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2}$$

symmetric mass ratio

$$\hat{H}_{\ell m} = \hat{H}_{\ell m}^{\text{inst}} + \hat{H}_{\ell m}^{\text{tail}}$$

Tengono conto della normale propagazione dell'onda

Effetti dovuti alla non linearità della Relatività Generale



## Waveform produced by a test particle plunging into a Schwarzschild black hole

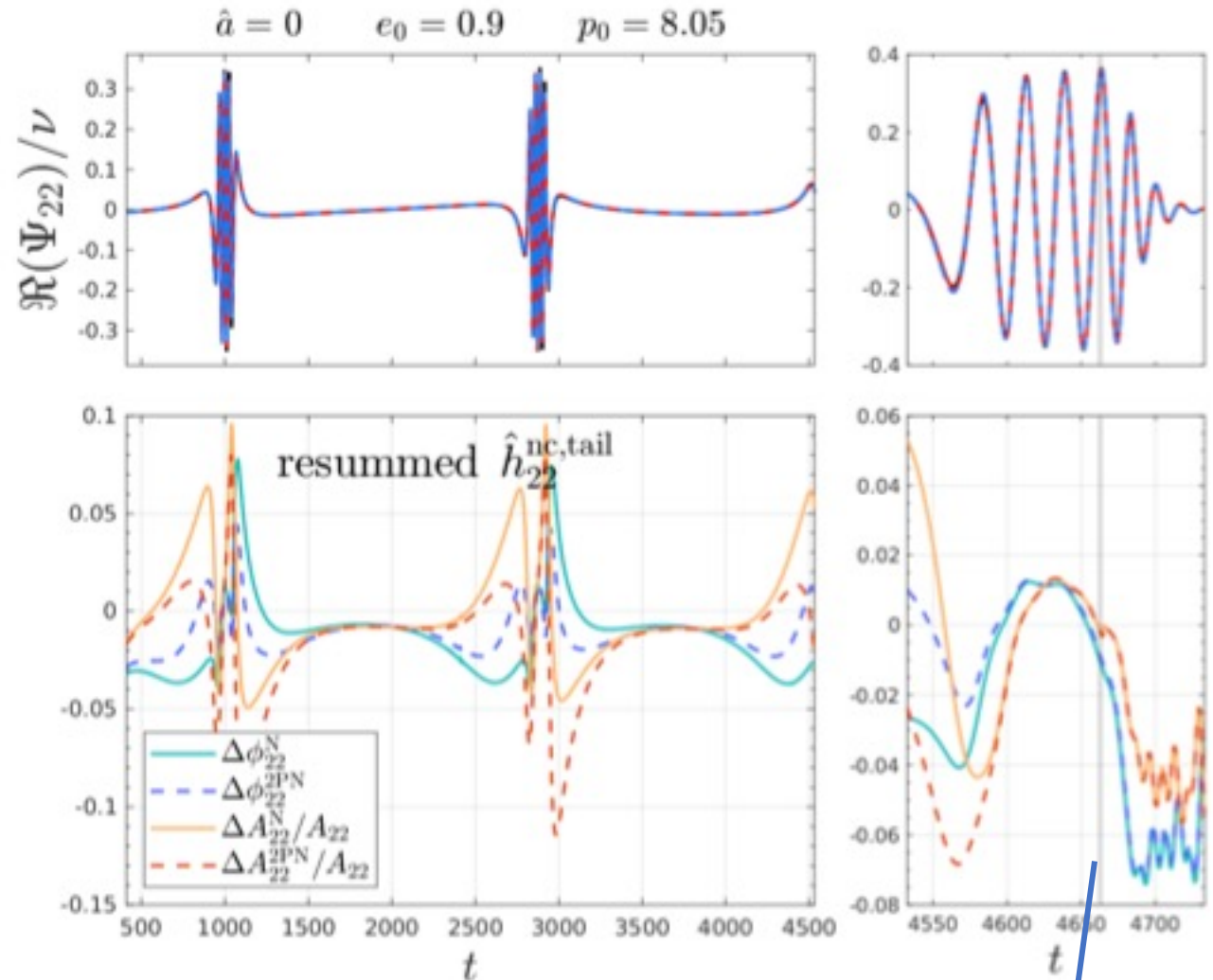
Confronto tra una simulazione numerica e la predizione analitica del nostro modello per il modo  $l = m = 2$  con  $\nu = 10^{-3}$  nel caso di spin  $\hat{a} = 0$  per un valore molto alto di eccentricità  $e_0 = 0.9$  e con semi-latus rectum  $p_0 = 8.05$

Nel pannello in alto, la simulazione numerica è in nero ed è indistinguibile dal segnale prodotto con il nostro modello EOB

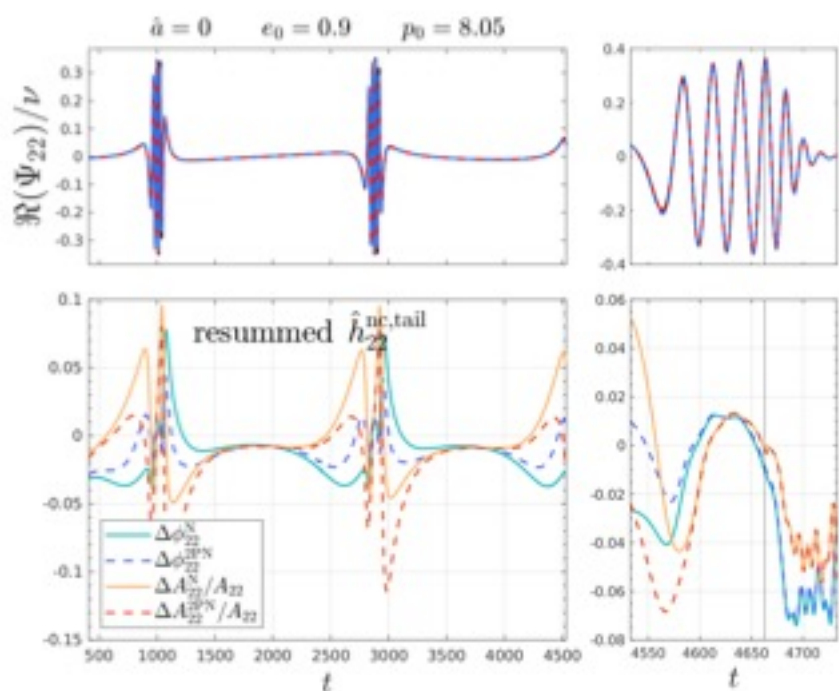
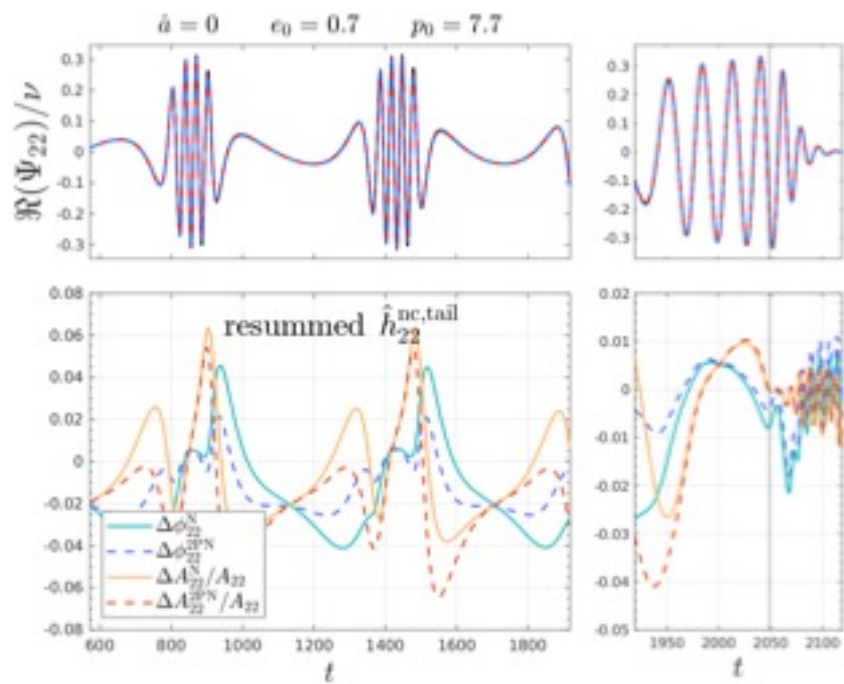
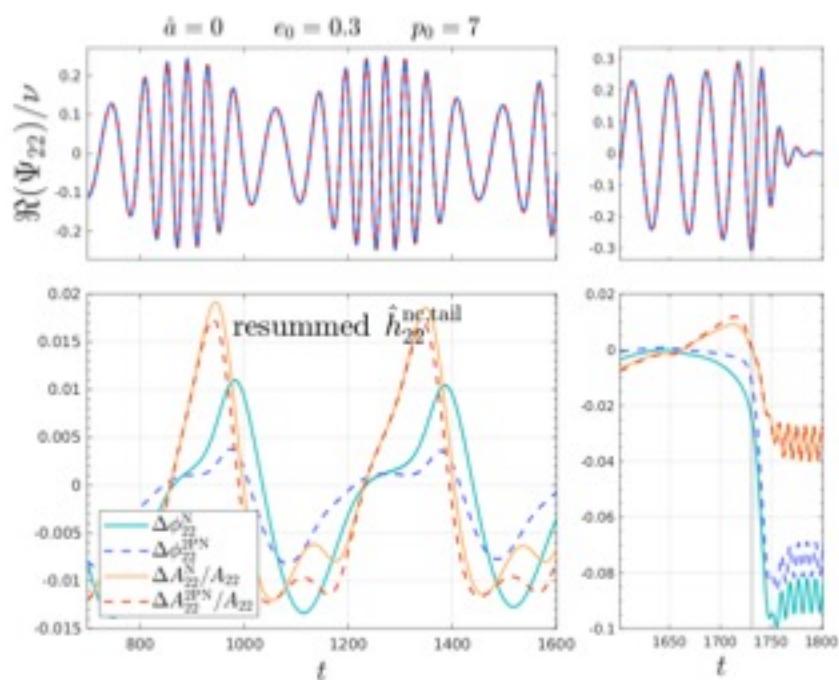
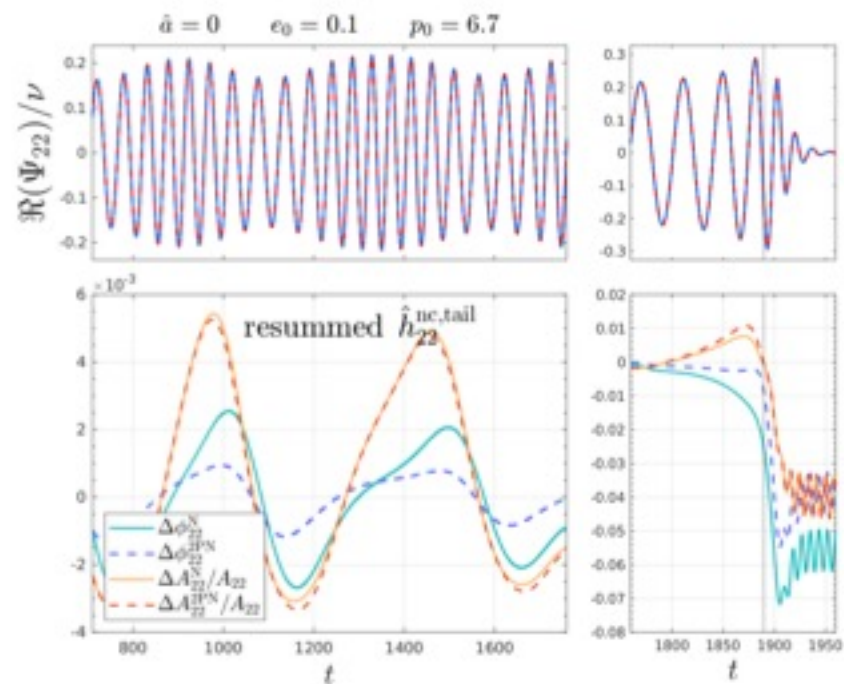
Il pannello in basso mostra le differenze di fase ed ampiezza rispetto alla simulazione numerica nel caso del modello senza correzioni eccentriche (linea solida) e nel caso con correzioni eccentriche da noi calcolate (linea tratteggiata)

→ **notevole miglioramento**

$$\Psi_{lm} = h_{lm} / \sqrt{(\ell + 2)(\ell + 1)\ell(\ell - 1)}$$



La linea verticale indica il merger time che corrisponde al picco della simulazione numerica



# Progetti Futuri

- Miglioramento dei modelli di waveform attuali includendo risultati analitici ad ordini più alti nel contesto dei modelli “quasi-circolari”
- Includere ulteriori termini di correzione nell’ eccentricità
- Incorporare lo spin nel nostro modello
- Sistemi binari diversi da buchi neri.
- Sviluppare un modello analitico per studiare come la dinamica di un sistema a due corpi sia modificata da un influenza esterna (per esempio un terzo corpo o una geometria curva).
- **...e molto altro ancora.**

## **Ambito del PTSR : Ambito di ricerca nuovo: 6**

### **Onde Gravitazionali e Astrofisica Multimessenger, Scienza e Tecnologia**

**SSD:** FIS/01, FIS/02, FIS/03, FIS/04, FIS/05, GEO/10

**SETTORI ERC:** *PE2, PE9, PE10*

**Partecipanti** Strutturati universitari (compresi studenti di dottorato) e INFN:

Massimiliano Rinaldo Barchi,

Mateusz Bawaj,

Filippo Camilloni,

Sara Cutini,

Stefano Germani,

Gianluca Grignani,

Marta Orselli,

Daniele Pica,

Andrea Placidi,

Michele Punturo,

Gino Tosti,

Helios Vocca.



**People:**

- Vocca Helios (responsible)
- Bawaj Mateusz
- Corezzi Silvia
- Greco Giuseppe
- Grignani Gianluca
- Harmark Troels
- Oliveri Roberto
- Orselli Marta
- Petrillo Caterina
- Placidi Andrea
- Punturo Michele
- Travasso Flavio
- Trapananti Angela

Prin 2020:

**METE**

Multimessenger astronomy in the Einstein Telescope Era



### People:

- Vocca Helios (responsible)
- Bawaj Mateusz
- Corezzi Silvia
- Greco Giuseppe
- Grignani Gianluca
- Harmark Troels
- Oliveri Roberto
- Orselli Marta
- Petrillo Caterina
- Placidi Andrea
- Punturo Michele
- Travasso Flavio
- Trapananti Angela

Prin 2020:

**METE**

Multimessenger astronomy in the Einstein Telescope Era

## Il gruppo teorico nell'ambito n.6: Onde Gravitazionali e Astrofisica Multimessenger, Scienza e Tecnologia

Prof. Gianluca Grignani, Prof. Marta Orselli

### dottorandi:

Dr. Filippo Camilloni  
Dr. Andrea Placidi  
Dr. Daniele Pica



Joint PhD Program tra  
Univeristà di Perugia e  
il Niels Bohr Institute  
(Danimarca)

### laureandi magistrali (attuali):

Sara Gliorio

### collaborazioni attive in Italia e all'estero:

Dr. Alessandro Nagar (INFN Torino)  
Prof. Sebastiano Bernuzzi (Jena University)  
Dr. Roberto Oliveri (CEICO, Institute of Physics of the Czech Academy of Sciences & LUTH - Laboratoire Univers et Théories, Observatoire de Paris)  
Prof. Troels Harmark (Niels Bohr Institute, University of Copenhagen)  
Prof. George E. Santos (DAMTP, University of Cambridge)  
Prof. Oscar J. Dias (STAG Research Centre and Mathematical Sciences, University of Southampton)

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

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

- **Idrodinamica relativistica** (Pompili, 2018)
- **Force Free Electrodynamics** (Mazza, 2018)
- **Teoria ad un corpo efficace per il problema a due corpi in relatività generale** (Fabri, 2018)
- **Wormhole solutions in general relativity** (Ubaldi, 2019)
- **Introduction to Anti de Sitter space** (Giuli, 2019)
- **Approssimazione force-free per la magnetosfera delle pulsar** (Stella, 2019)
- **Generazione di onde gravitazionali da sorgenti post-newtoniane** (Malaspina, 2020)
- **Perturbazioni gravitazionali della metrica di Schwarzschild** (Bianchi, 2020)
- **La soluzione di Schwarzschild e il limite di Buchdahl** (Cocco, 2021)
- **Onde gravitazionali ed effetto memoria** (Grilli, 2021)
- **Slowly rotating Blandford and Znajek vertical solution in force free electrodynamics** (Panella, 2021)

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

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

- **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 em radiation from binary black holes with charges** (Becchetti, 2021)
- **Effective One Body Waveform Model for Eccentric Black Hole Binary Systems** (Stella, 2021)
- **Improved Effective One Body Model for Eccentric Binary Systems** (Gliorio, da discutere nel 2022)



# Onde Gravitazionali e Astrofisica

## Multimessenger, Scienza e Tecnologia

La rilevazione delle onde gravitazionali consente di studiare l'universo in un modo rivoluzionario e di esplorare fenomeni astrofisici in condizioni estreme.

**Un aspetto cruciale in questo contesto è l'avere a disposizione un modello teorico accurato in grado di predire forme d'onda gravitazionali che riproducano in modo eccellente i segnali osservati.**

Questa è una sfida in cui ci stiamo cimentando e che ha bisogno di modelli nuovi in grado di incorporare importanti aspetti fisici dei segnali d'onda gravitazionale rilevati.

Nei prossimi 20+ anni la ricerca in questo settore fornirà contributi importanti nello studio della natura della dark matter e della dark energy, studio della radiazione gravitazionale primordiale, stelle di neutroni, ecc.

→ È importante che il nostro Dipartimento sia presente!

