



# Il rivelatore interferometrico di onde gravitazionali Virgo: stato e prospettive future

---

**Claudia Taranto**  
per la collaborazione Virgo

[claudia.taranto@roma2.infn.it](mailto:claudia.taranto@roma2.infn.it)

# Le onde gravitazionali

- Increspature dello spazio-tempo che viaggiano alla velocità della luce;

- Soluzione dell'equazione di Einstein:

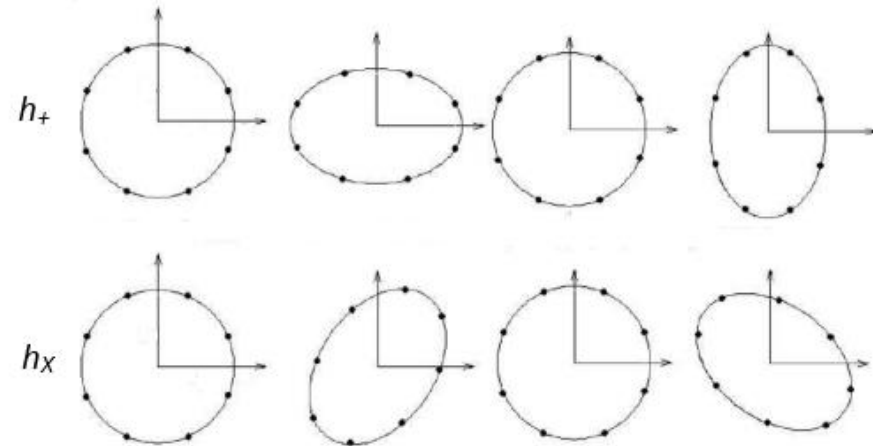
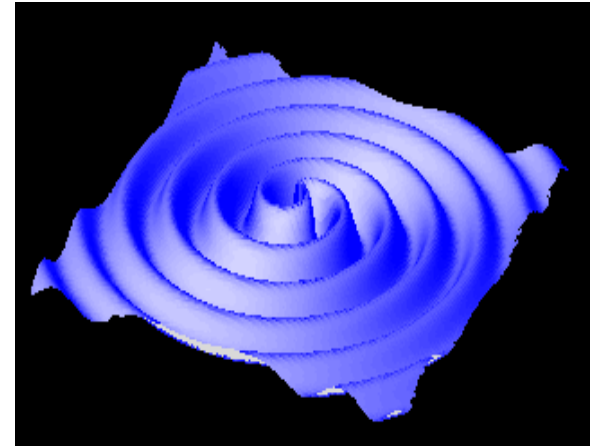
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu};$$

- Nel limite di campo debole:  $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$ ,

$$\rightarrow \square h_{\mu\nu} = 0.$$

- Stati di polarizzazione:

$$h_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_\times & 0 \\ 0 & h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} e^{ikz}.$$



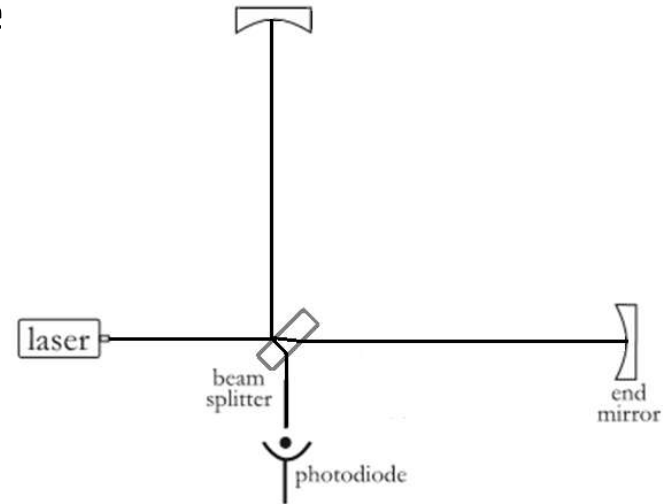
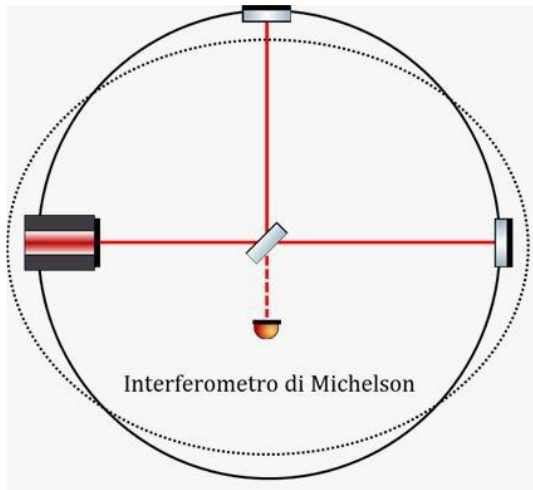
# Rivelazione interferometrica

L'effetto del passaggio di un'onda gravitazionale è quello di cambiare la metrica localmente:

$$h = \frac{2\Delta L}{L}$$



$$\Delta \phi_L = \frac{4\pi}{\lambda_L} \Delta L$$



# Sorgenti di onde gravitazionali

Potenza emessa parametrizzata in funzione delle caratteristiche delle sorgenti:

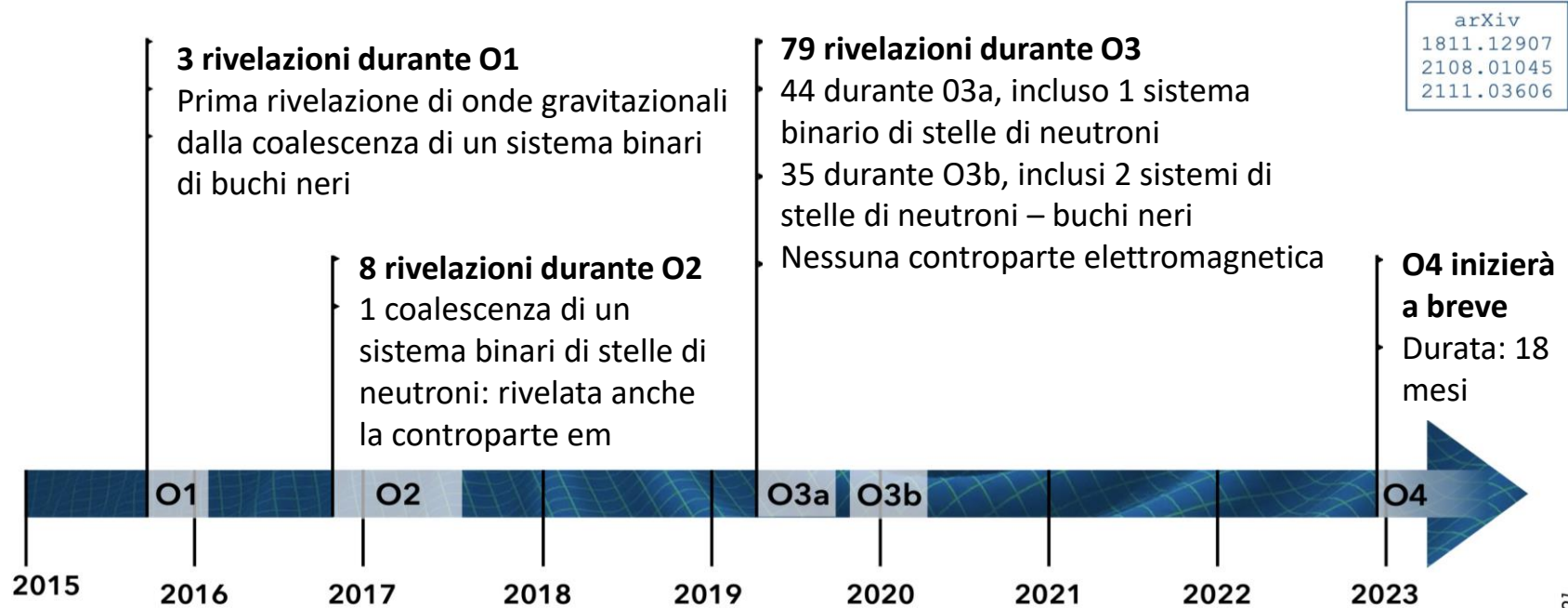
$$L \sim \varepsilon^2 \frac{c^5}{G} \left(\frac{R_S}{R}\right)^2 \left(\frac{v}{c}\right)^2 \rightarrow \text{asimmetrica, compatta and relativistica.}$$

- **Sorgenti periodiche:** segnali sinusoidali con ampiezza costante (NS);
- **Sorgenti transienti:** breve durata e legati ad eventi catastrofici (coalescenza di sistemi binari compatti e collasso di supernovae);
- **Fondo Stocastico:**
  - Sorgenti astrofisiche non risolte;
  - Fondo gravitazionale di origine cosmologico.



*Rappresentazione artistica della  
coalescenza di due buchi neri.  
Credit: LIGO*

# Stato dell'arte



**90 GW**  
Rivelazioni



**Coalescenza**  
Di buchi neri e  
stelle di neutroni



**1 evento**  
**multimessaggero**  
(osservazione GW  
+ EM)



**Intervallo di massa**  
1.2 → 107  $M_{\odot}$

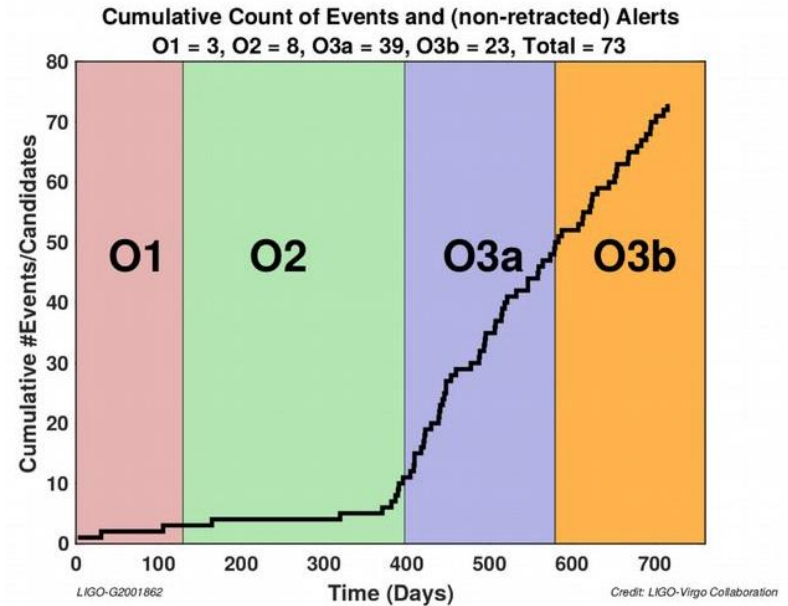
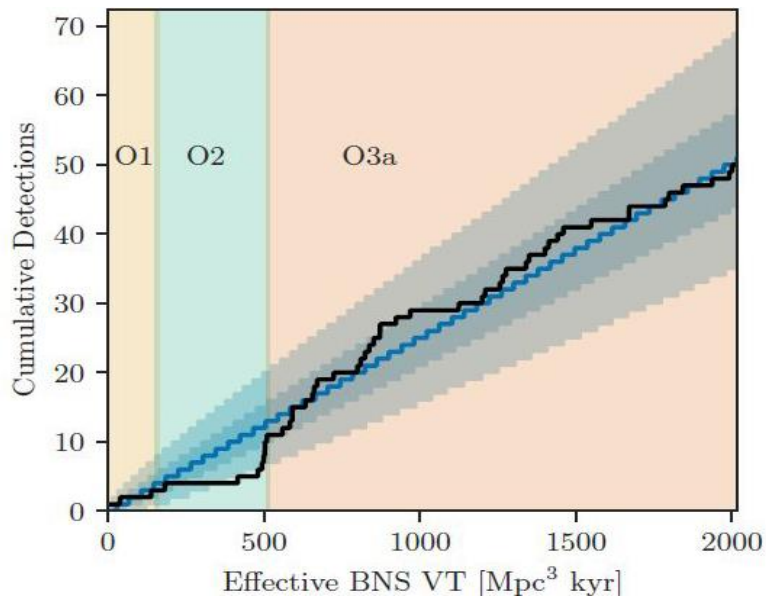


**Intervallo di distanza**  
40 Mpc → 8 Gpc  
( $z \rightarrow 1.14$ )

Leila Haegel for the LVK collaboration [2022]

# Rivelazioni durante O3

- O3 concluso il 27 Marzo 2020
  - 1 mese prima per il COVID



- Cataloghi rivelazioni delle coalescenze di binari compatti:
    - GWTC-1 (Physical Rev. X 9, 031040, 2019): 11 rivelazioni sicure durante O1 e O2 (rivelazione ~ ogni pochi mesi);
    - GWTC-2 (Phys. Rev. X 11, 021053, 2021): 44 rivelazioni sicure durante O3a (rivelazione ~ ogni settimana).
- La rivelazione di 44 eventi candidati in 26 settimane è coerente con GWTC-1, data la maggior sensibilità di Advanced LIGO e Advanced Virgo.
- GWTC-3 (arXiv:2111.03606): 35 rivelazione sicure durante O3b.

# Eventi eccezionali durante O3 [1/2]

PHYSICAL REVIEW X 11, 021053 (2021)

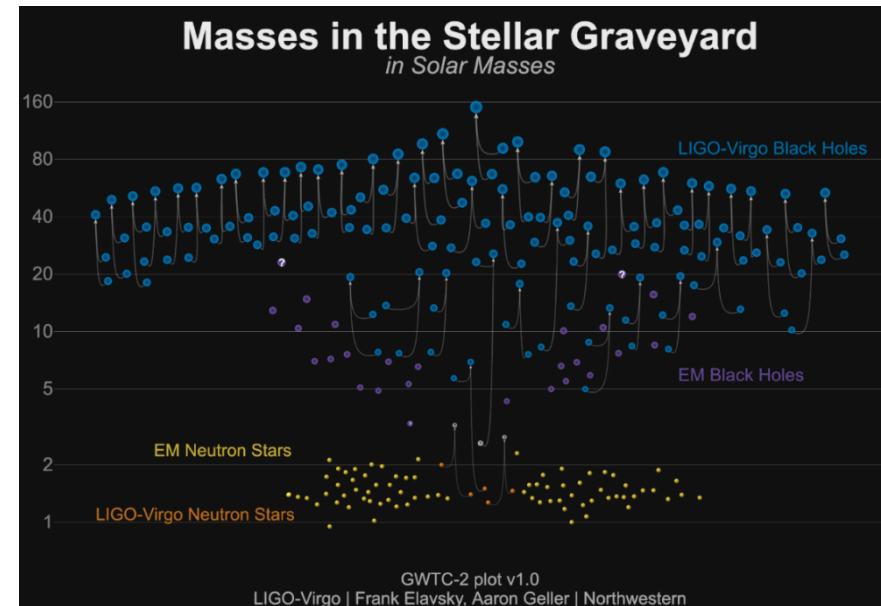
**GWTC-2: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo during the First Half of the Third Observing Run**

R. Abbott *et al.*\*

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

➤ Sei eventi astrofisici interessanti:

- **GW190412**: primo asimmetrico BBH, evidenze di armoniche di ordine superiore.
- **GW190425**: seconda fusion di BNS.
- **GW190521**: BBH con massa totale di circa  $150 M_{\odot}$ 
  - osservazione diretta della formazione di un IMBH.
- **GW190814**: fusione con rapporto di massa più asimmetrico mai osservata ( $m_1/m_2=9$ ). La massa secondaria è di  $2.6 M_{\odot}$  giace nella parte più bassa del “mass gap”
  - o il BH più leggero o la NS più pesante mai osservato!



# Eventi eccezionali durante O3 [2/2]

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 915:L5 (24pp), 2021 July 1

© 2021. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac082e>



## Observation of Gravitational Waves from Two Neutron Star–Black Hole Coalescences

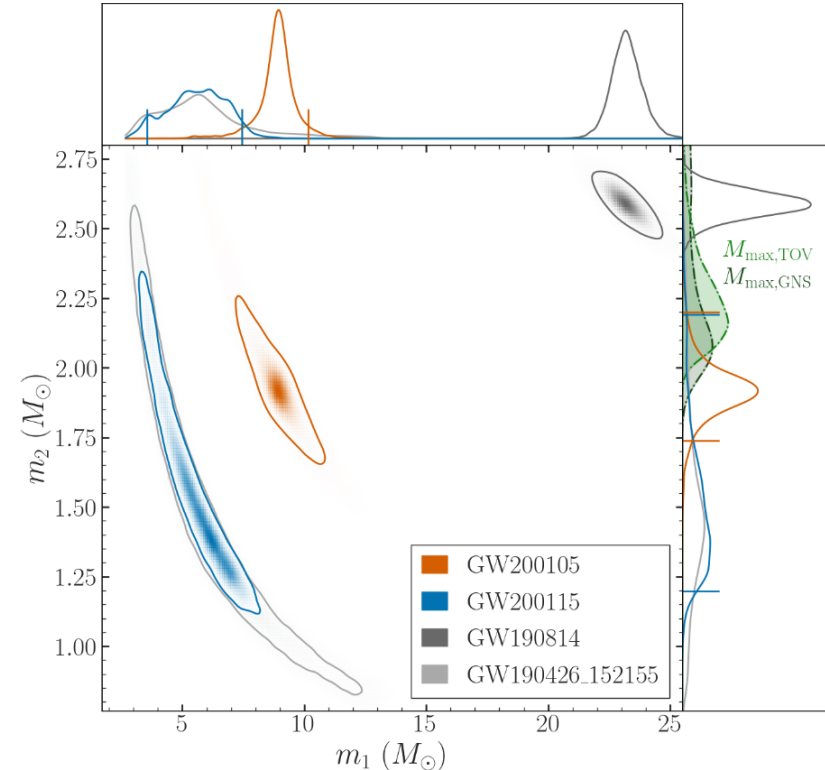
R. Abbott<sup>1</sup>, T. D. Abbott<sup>2</sup>, S. Abraham<sup>3</sup>, F. Acernese<sup>4,5</sup>, K. Ackley<sup>6</sup>, A. Adams<sup>7</sup>, C. Adams<sup>8</sup>, R. X. Adhikari<sup>1</sup>, V. B. Adya<sup>9</sup>, C. Affeldt<sup>10,11</sup>, D. Agarwal<sup>3</sup>, M. Agathos<sup>12,13</sup>, K. Agatsuma<sup>14</sup>, N. Aggarwal<sup>15</sup>, O. D. Aguiar<sup>16</sup>, L. Aiello<sup>17,18,19</sup>, A. Ain<sup>20,21</sup>, P. Ajith<sup>22</sup>, T. Akutsu<sup>23,24</sup>, K. M. Aleman<sup>25</sup>, G. Allen<sup>26</sup>, A. Allocca<sup>5,27</sup>, P. A. Altin<sup>9</sup>, A. Amato<sup>28</sup>, S. Anand<sup>1</sup>, A. Ananyeva<sup>1</sup>, S. B. Anderson<sup>1</sup>, W. G. Anderson<sup>29</sup>, M. Ando<sup>30,31</sup>, S. V. Angelova<sup>32</sup>, S. Ansoldi<sup>33,34</sup>, J. M. Antelis<sup>35</sup>, S. Antier<sup>36</sup>, S. Appert<sup>1</sup>,

### ➤ GW200105

- 8.9 - 1.9  $M_{\odot}$
- 170 - 390 Mpc
- Livingston-Virgo
- 7700  $deg^2$

### ➤ GW200115

- 5.7 - 1.5  $M_{\odot}$
- 240 - 400 Mpc
- Hanford-Livingston-Virgo
- 900  $deg^2$

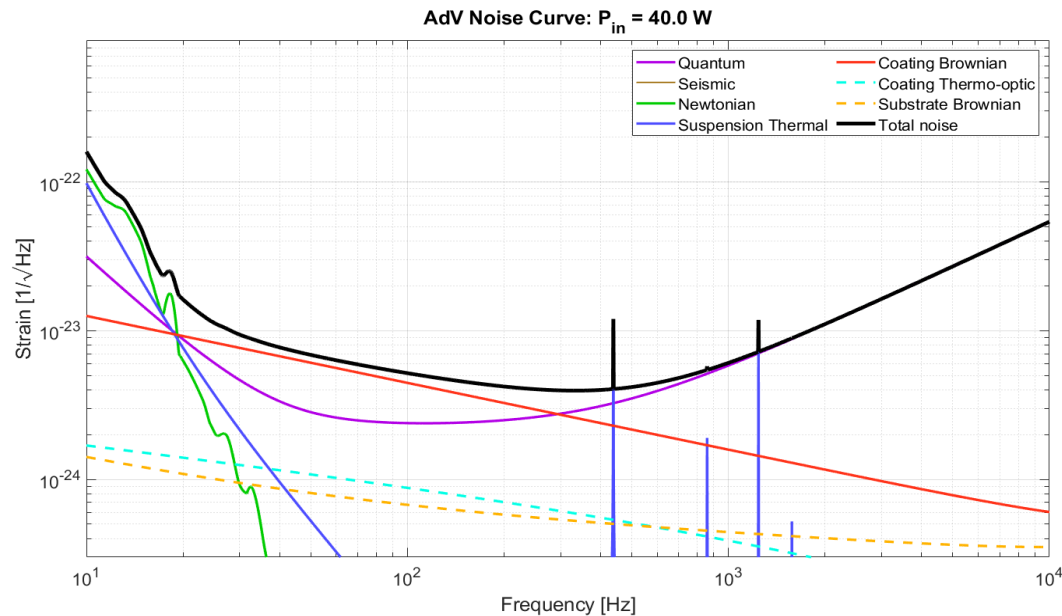




# Sensibilità di Advanced Virgo

Curva di sensibilità:

- Somma in quadratura dei contributi di rumore;
- Intensità minima del segnale gravitazionale rilevabile.

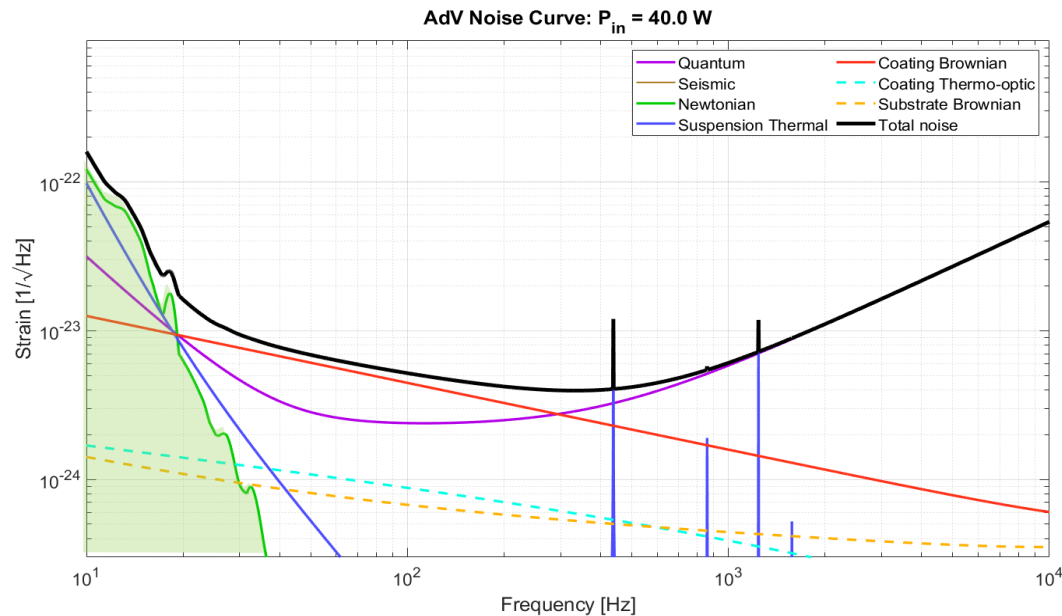


- Rumore Newtoniano <10 Hz;
- Rumore Termico [10-300] Hz;
- Rumore Quantistico >kHz:
- Shot noise  $\propto \sqrt{1/P_{in}}$ ;
- Pressione di radiazione  $\propto \sqrt{P_{in}}$ .

# Sensibilità di Advanced Virgo

Curva di sensibilità:

- Somma in quadratura dei contributi di rumore;
- Intensità minima del segnale gravitazionale rilevabile.

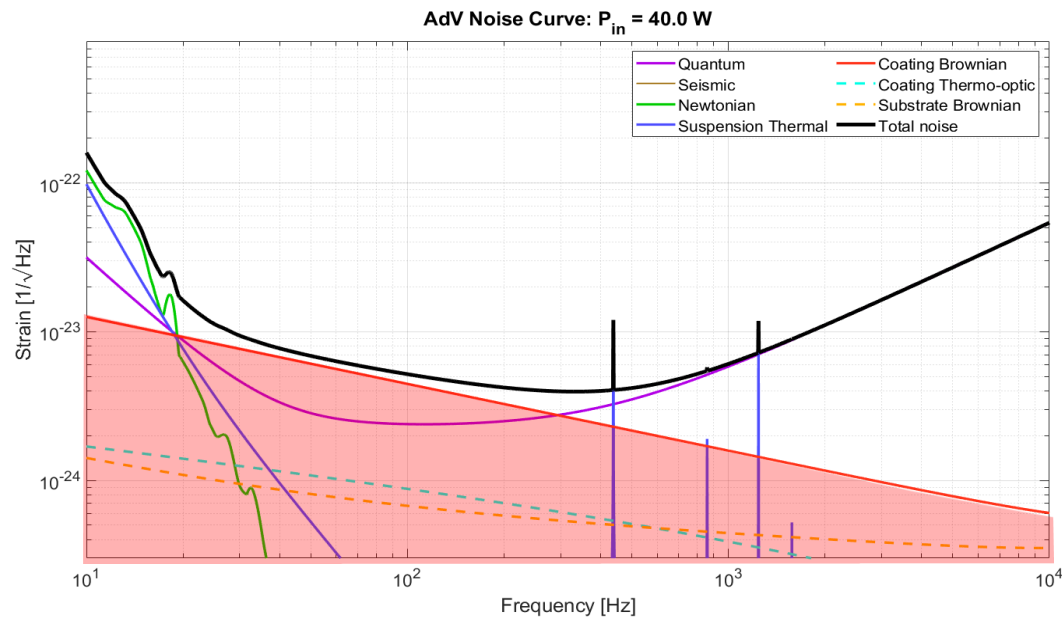


- **Rumore Newtoniano <10 Hz;**
  - Rumore Termico [10-300] Hz;
  - Rumore Quantistico >kHz:
- Shot noise  $\propto \sqrt{1/P_{in}}$ ;
  - Pressione di radiazione  $\propto \sqrt{P_{in}}$ .

# Sensibilità di Advanced Virgo

Curva di sensibilità:

- Somma in quadratura dei contributi di rumore;
- Intensità minima del segnale gravitazionale rilevabile.

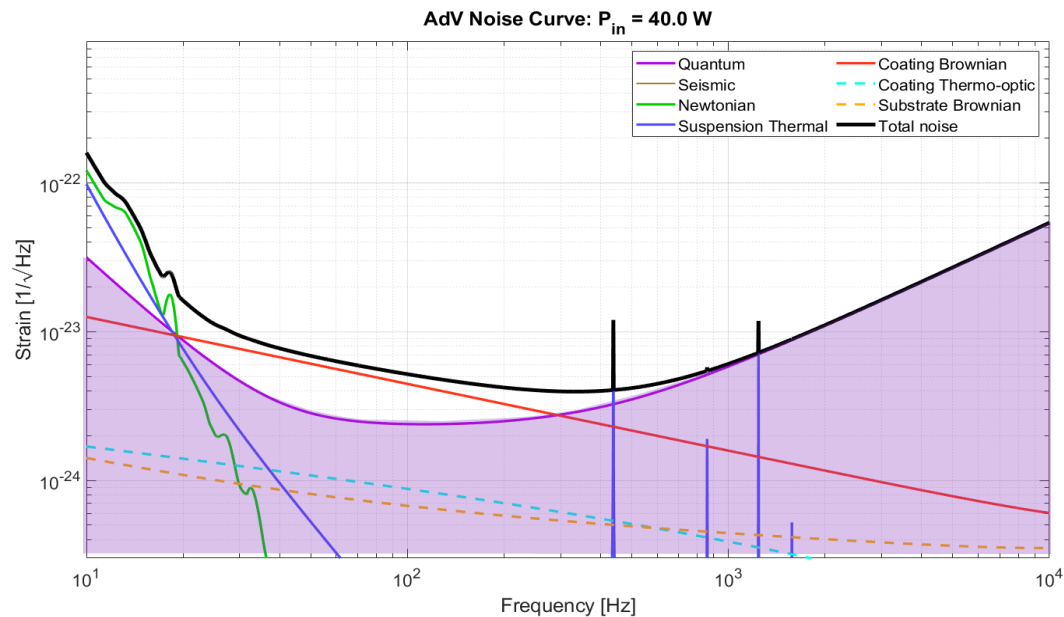


- Rumore Newtoniano <10 Hz;
- **Rumore Termico [10-300] Hz;**
- Rumore Quantistico >kHz:
- Shot noise  $\propto \sqrt{1/P_{in}}$ ;
- Pressione di radiazione  $\propto \sqrt{P_{in}}$ .

# Sensibilità di Advanced Virgo

Curva di sensibilità:

- Somma in quadratura dei contributi di rumore;
- Intensità minima del segnale gravitazionale rilevabile.



- Rumore Newtoniano <10 Hz;
- Rumore Termico [10-300] Hz;
- **Rumore Quantistico >kHz:**
  - Shot noise  $\propto \sqrt{1/P_{in}}$ ;
  - Pressione di radiazione  $\propto \sqrt{P_{in}}$ .

# Scienza gravitazionale

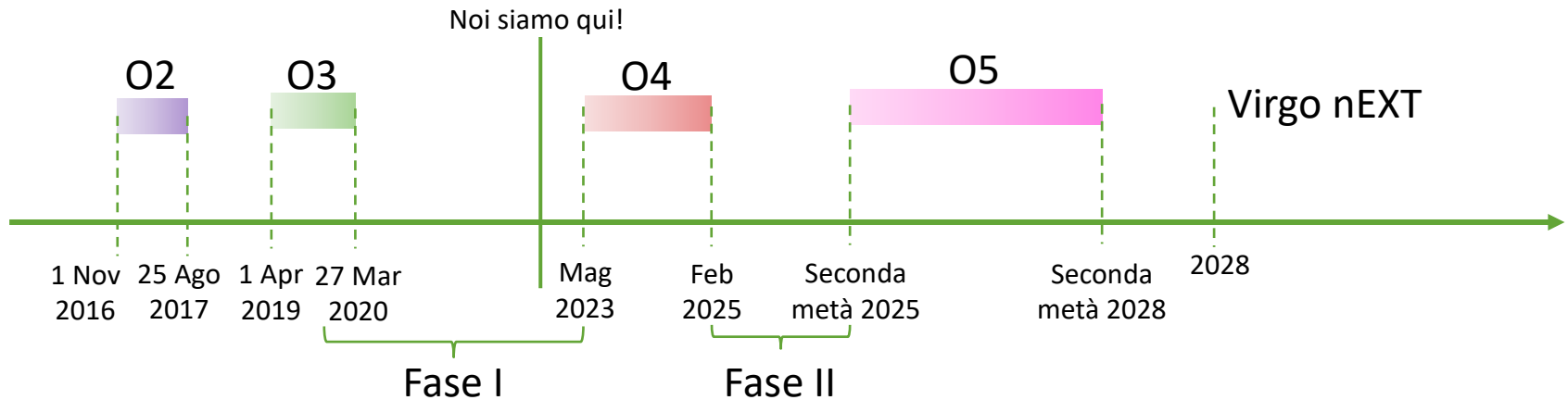
- **Coalescenza di buchi neri (BBH):**
  - Test della Relatività Generale
    - possibili violazioni
  - Distribuzione delle masse dei BH
  - Merger di BBH primordiali ( $M < M_{\text{sun}}$ )
    - Candidati di Materia Oscura

- **Coalescenza di stelle di neutroni (BNS)**  
(Astrofisica Multi-Messaggera)
  - Emissione Gravitazionale
  - Emissione elettromagnetica
  - Emissione di neutrini
  - Osservazione di gamma-ray burst
  - Investigazione dei meccanismi all'origine dei jet relativistici
  - Studio delle equazioni di stato dalle ultime fasi di spiraleggiamento
  - Misura della costante di Hubble

- **Segnali gravitazionali continui emessi stelle di neutroni:**
  - Misura dell'ellitticità
  - Info sulle equazioni di stato
- **Segnali gravitazionali continui emessi da nubi di bosoni ultra-leggeri attorno a buchi neri rotanti**
  - Candidati di Materia Oscura

- **Radiazione gravitazionale emessa dalle esplosioni di Supernova:**  
(Astrofisica Multi-Messaggera)
  - Investigazione dei meccanismi all'origine dell'esplosione
  - Osservazione in coincidenza con un gamma-ray burst lungo ( $> 2$  s)

# Futuro di Virgo



## Advanced Virgo+:

- **Fase I:** costruzione, installazione e commissioning in vista del periodo osservativo **O4** e completamento R&D per **O5**;
- **Fase II:** costruzione, installazione e commissioning per **O5** (Seconda metà del 2025-Seconda metà del 2028).

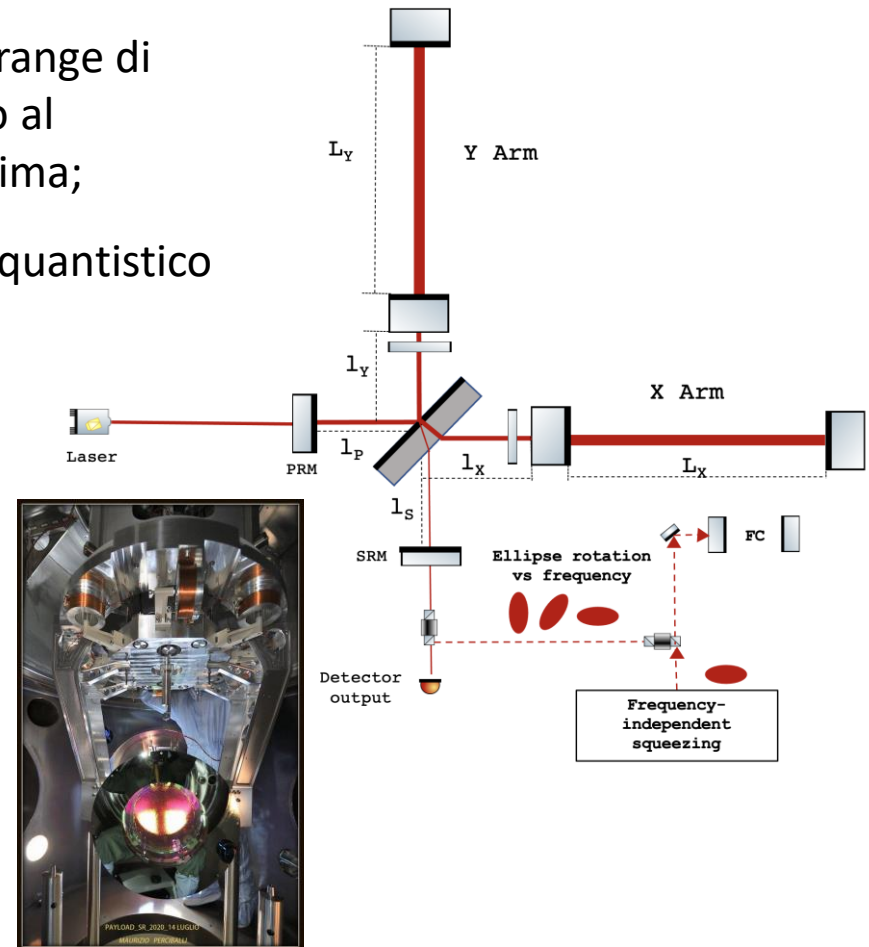
## Virgo nEXT (*exploiting the present infrastructure to its **EXTremes***):

- Studio di fattibilità per un ulteriore miglioramento della sensibilità di Virgo nella decade Post-O5 (2028-203X);
- Obiettivi: preparare la transizione verso la 3G.

# Advanced Virgo+ Fase I

## Configurazione per O4:

- Cavità di ricircolo di segnale: per estendere il range di frequenze dove la risposta dell'interferometro al passaggio di un segnale gravitazionale è massima;
- Cavità di filtraggio (FC): riduzione del rumore quantistico in tutto il range di frequenze di rivelazione.
- **Installazione completata in Aprile 2021;**
- **Commissioning dell'interferometro in corso.**

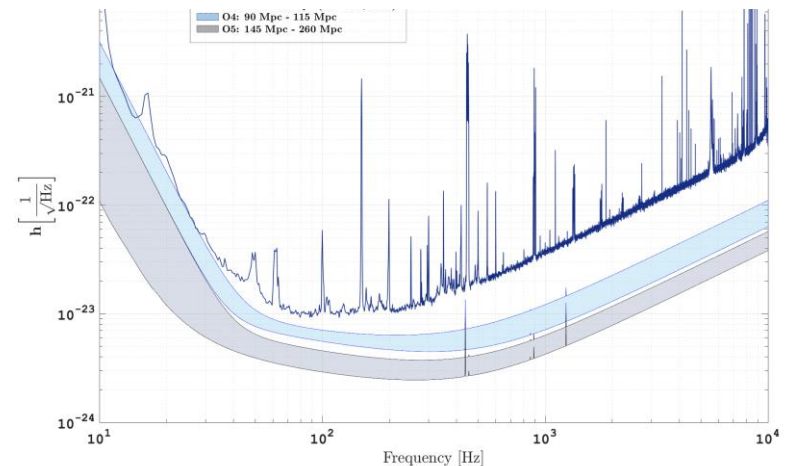
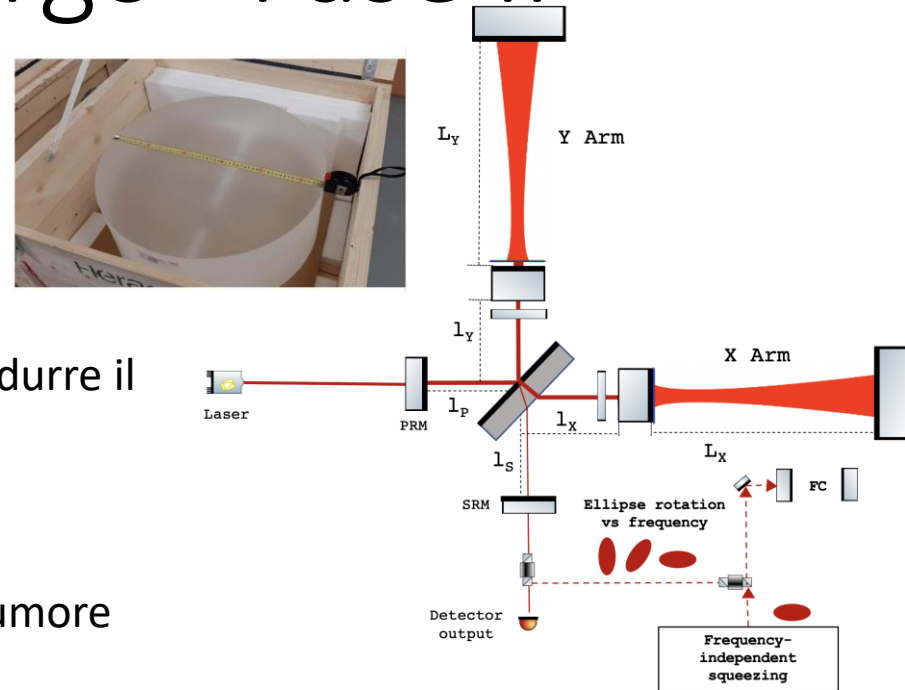


# Advanced Virgo+ Fase II

## Configurazione per O5:

- Fasci più grandi sugli specchi terminali per ridurre il rumore termico:
  - Diametro: 35 cm → 55 cm;
- Specchi terminali più pesanti per ridurre il rumore quantistico nell'intervallo [10 - 40] Hz:
  - Peso: 40 kg → 100 kg.

Periodo osservativo	Range di rivelazione BNS
O4	[80-115] Mpc
O5	[145-258] Mpc

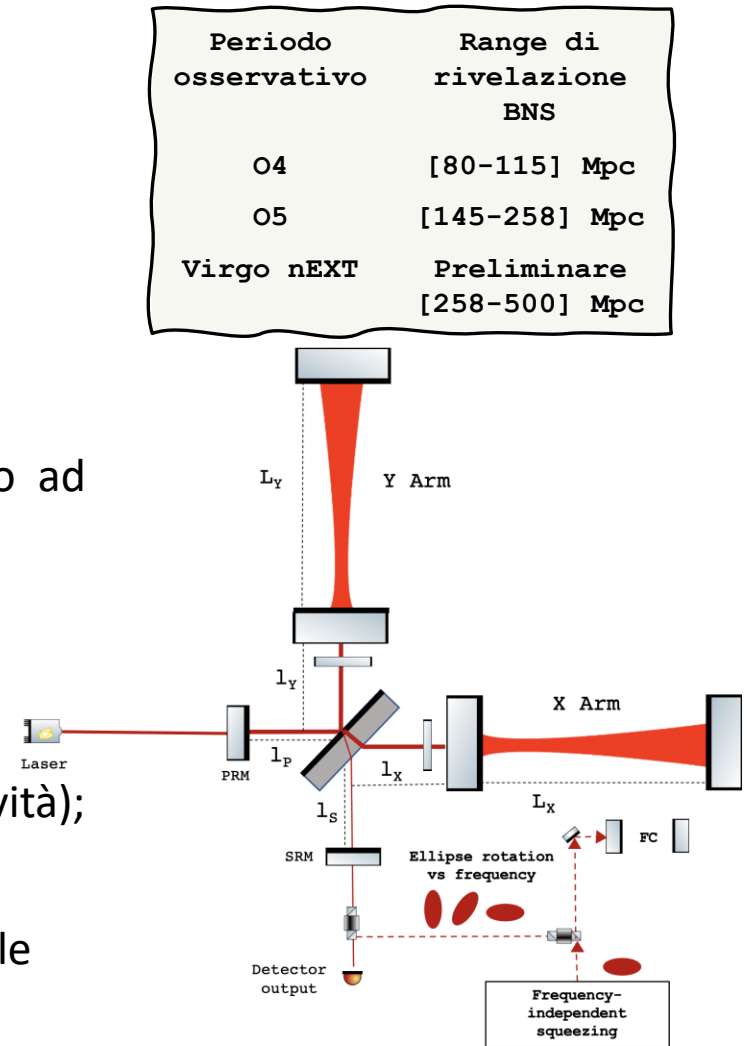




# Virgo nEXT

## Configurazione:

- nEXT: exploiting the present infrastructure to its EXTremes;
- Test su scala  $\sim 1:1$  di alcune tecnologie per la terza generazione (3G):
  - Riduzione del rischio per 3G;
- Aumento della sensibilità di circa un fattore 2 rispetto ad Advanced Virgo+;
- Inizio dell'installazione: fine O5
- Configurazione ottica: cavità di ricircolo stabili.
- Potenza Target: 250 W ( $\sim 1.5$  MW circolante nelle cavità);
- Specchi d'ingresso più pesanti per ridurre il rumore quantistico nell'intervallo [10 - 40] Hz e per mitigare le instabilità parametriche:
  - Peso: 40 kg  $\rightarrow$  100 kg.





**Claudia Taranto**  
per la collaborazione Virgo  
[claudia.taranto@roma2.infn.it](mailto:claudia.taranto@roma2.infn.it)