

Test di Relatività Generale con rivelatori di onde gravitazionali

Francesco Fidecaro, Università di Pisa e INFN-Pisa
Workshop sulla Gravitazione Sperimentale, misure laser,
fisica fondamentale e applicazioni in CSN2
12-13 novembre 2020

Relatività Generale

Fondata sul Principio di Equivalenza di Einstein (EEP)

Universalità della caduta dei corpi

$$m_i = m_p$$

m_p : massa gravitazionale passiva

m_i : massa inerziale

Pendoli (Galileo, Gauss), Bilancia di torsione e rotazione terrestre (Eötvös) o intorno al Sole (Dicke, Braginsky, Eöt-Wash), Lunar Laser Ranging, Microscope

Invarianza di Poincaré (traslazioni, rotazioni, boost)

Righe atomiche delle stelle, red shift gravitazionale, reazioni nucleari passate, cavità Fabry-Perot ruotante, g-2 del μ

-> Teorie metriche della gravità, dove la gravità è una forza apparente

Onde gravitazionali e Relatività Generale

Equazioni di Einstein

$$R^{\alpha\beta} - Rg^{\alpha\beta} + \Lambda g^{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T^{\alpha\beta}$$

$R^{\alpha\beta}$: tensore di curvatura di Ricci

R : curvatura scalare

Λ : costante cosmologica

$T^{\alpha\beta}$: tensore stress-energia

Parametrizzazione post Newtoniana

Accoppiamento tra tensore energia-impulso e curvatura: γ deviazione della luce, ritardo echo radar, Cassini

Non linearità: β Precessione di Mercurio, PSR1913+16

Costante cosmologica

Soluzioni

Proprietà di oggetti compatti e buchi neri di Schwarzschild e Kerr

Moto di sistemi fortemente legati, soluzioni numeriche

Generazione di radiazione gravitazionale

Onde gravitazionali

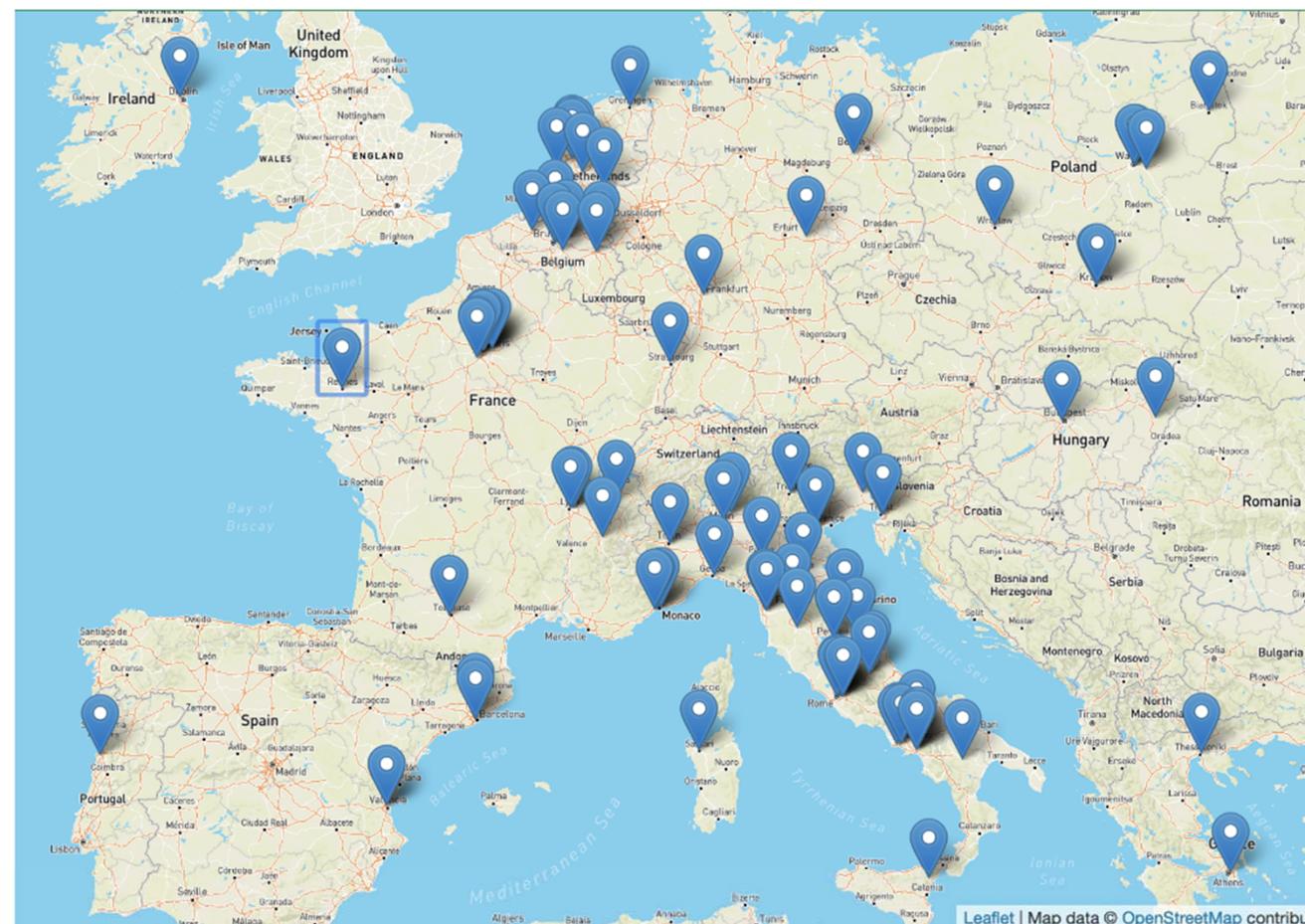
Velocità c

Due polarizzazioni + e x



Virgo Collaboration

- >600 members, ~400 authors, 110 institutions from 13 countries
- 28 Groups:
 - 25 full members
 - 3 in the first year (*GSSI, Utrecht, AUPh*)
 - 1 new application (*VU Amsterdam*)
- 9 countries represented in the VSC



GW190412

April 12, 2019, 5:30:44 UTC

detected in low-latency
by 5 pipelines

(4 modeled + 1 unmodeled)

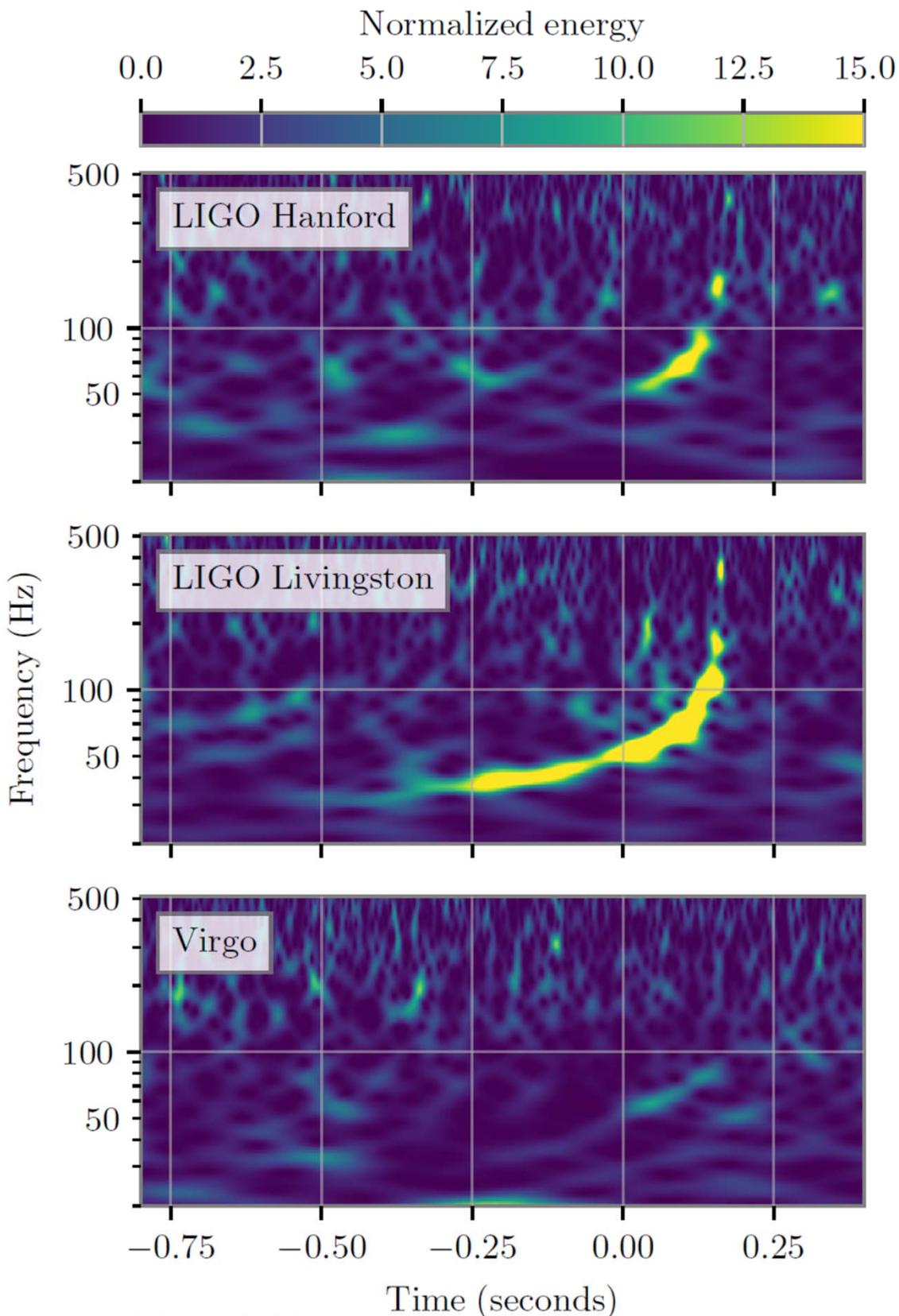
detected offline

false-alarm rate

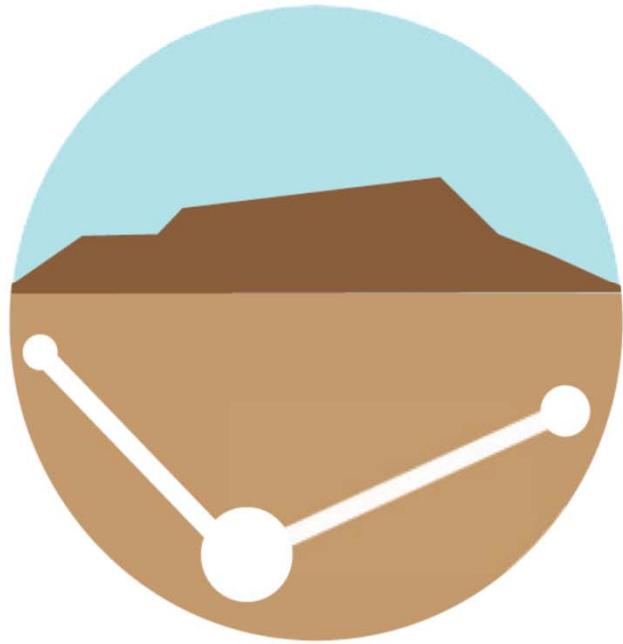
$\text{FAR} \leq 1 \text{ per } 10^5 \text{ yr}$

signal-to-noise ratio $\text{SNR} = 19$

Slides Max Isi
APS April 2019



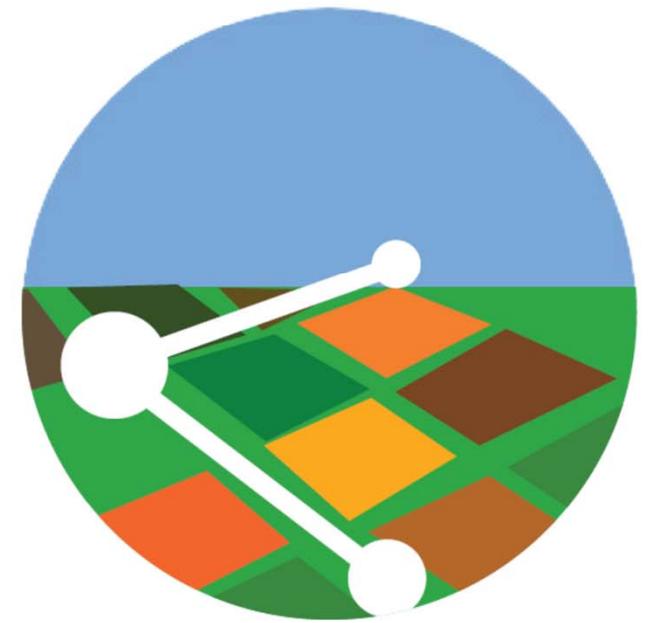
contributions from three detectors



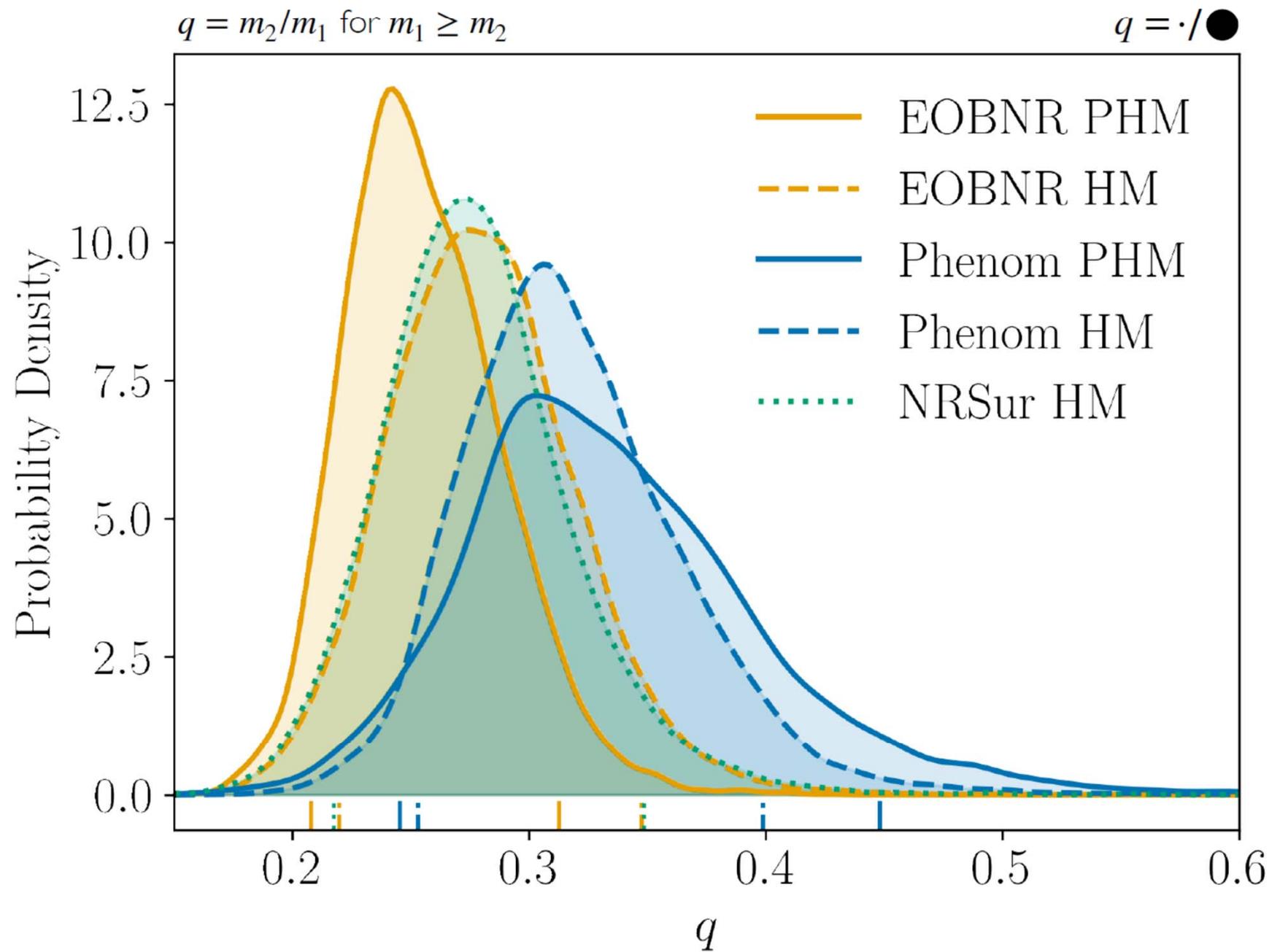
H SNR
9.5



L SNR
16.2



V SNR
3.6

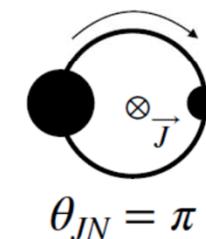
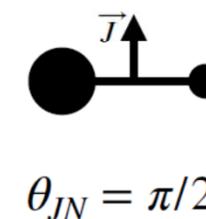
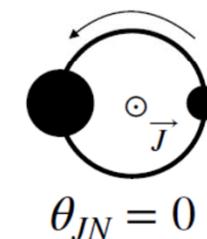
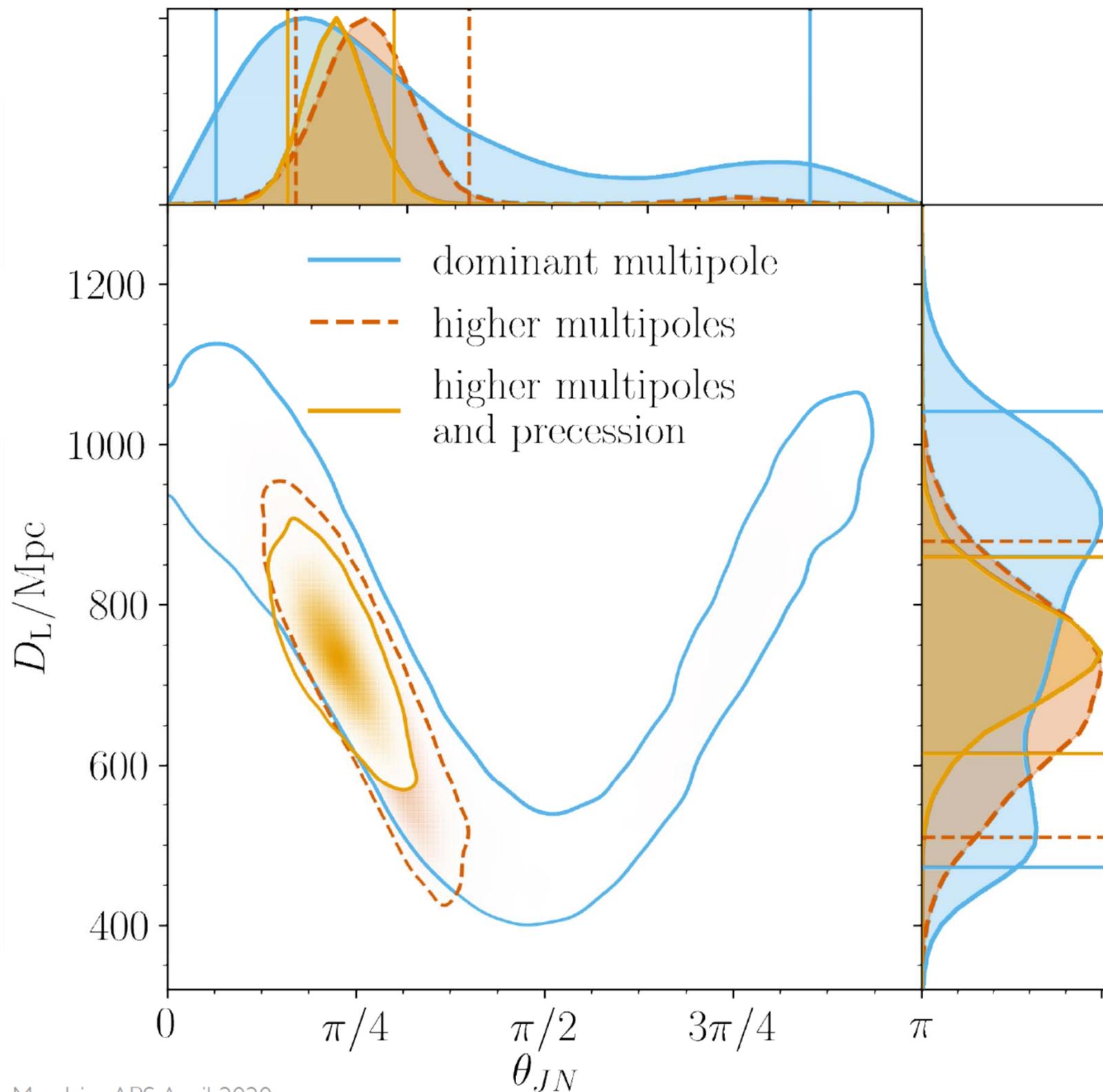


mass ratio

$$q \leq 0.5$$

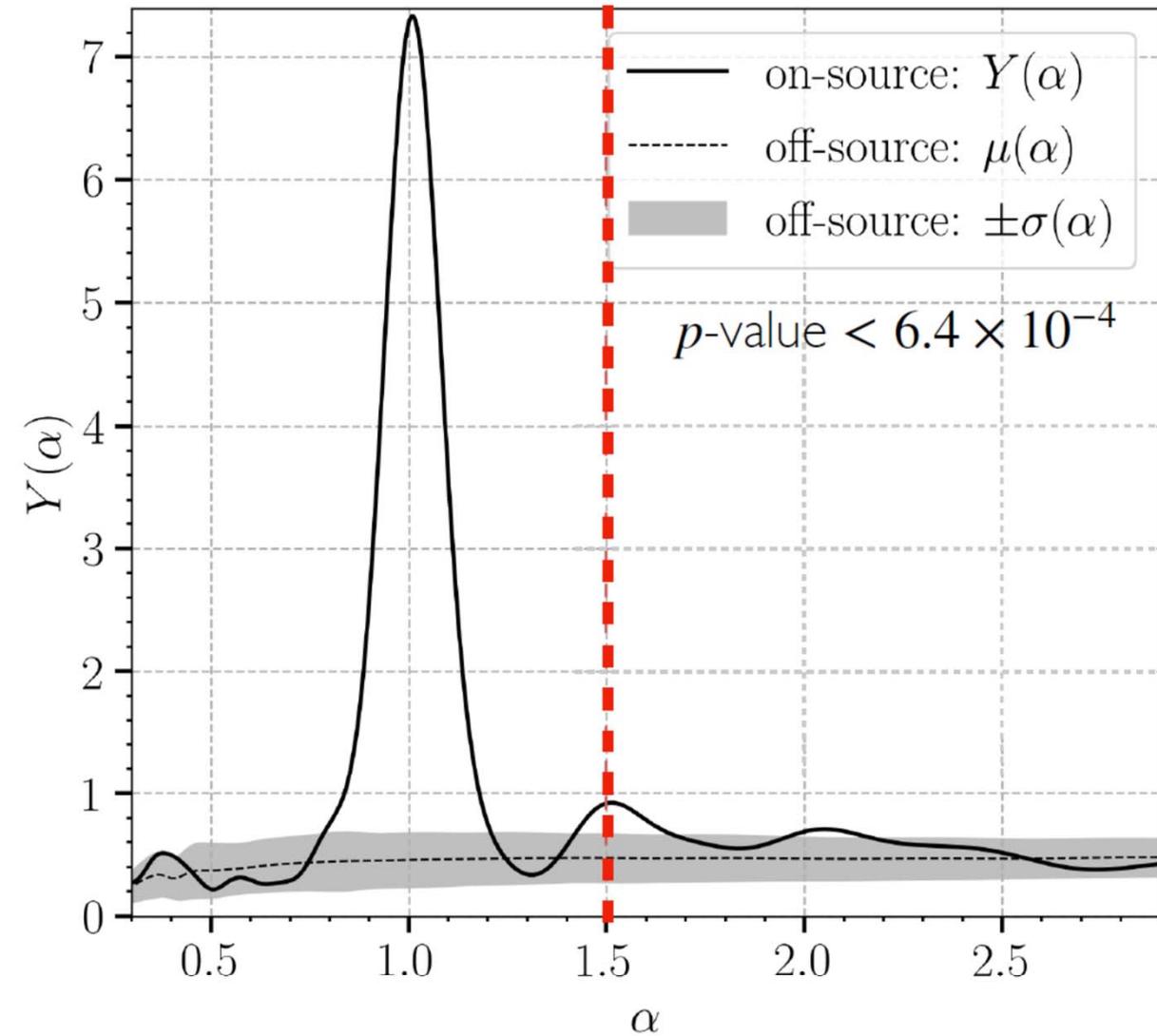
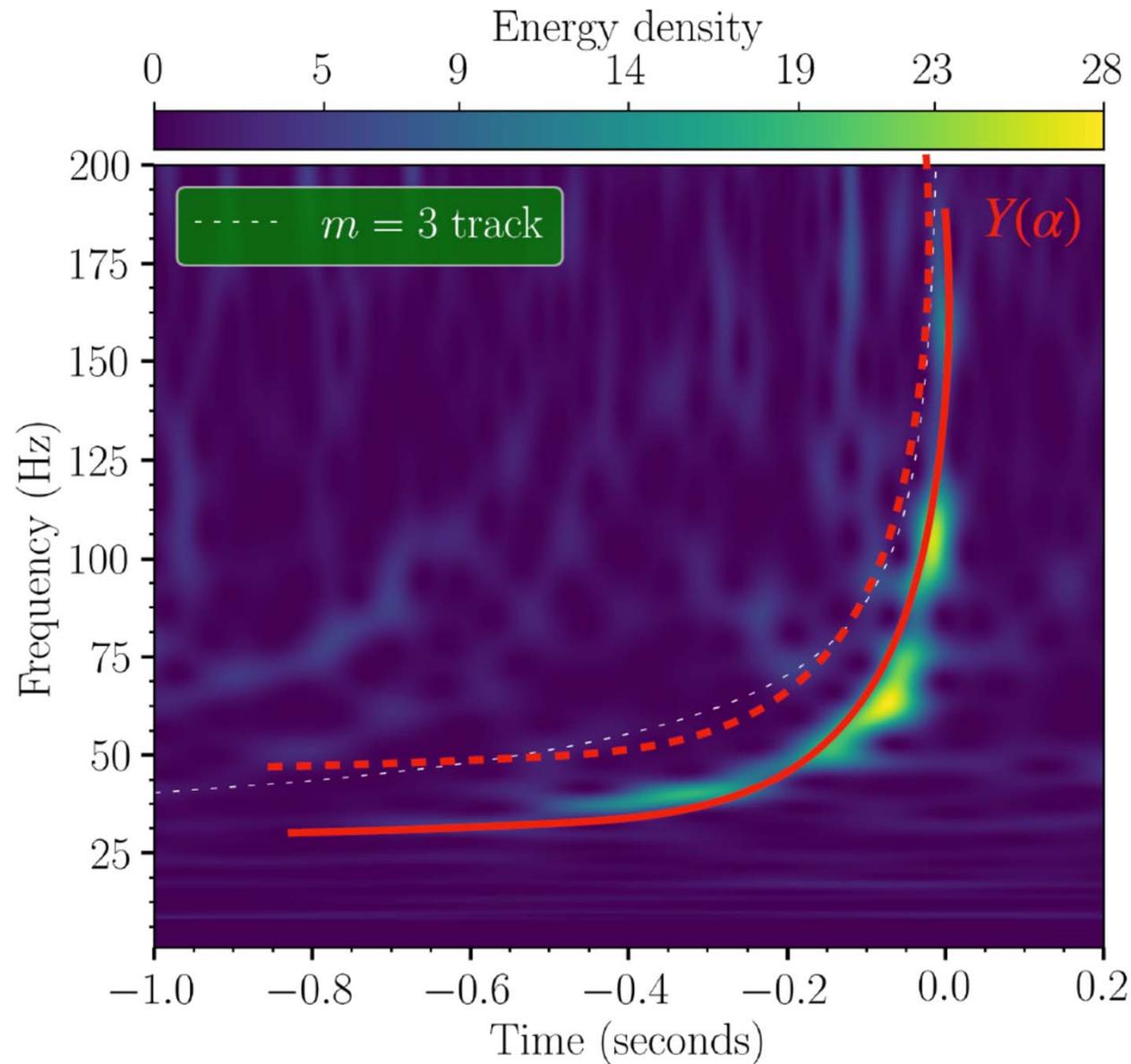
with 99% credibility

inference robust against
waveform systematics



**higher multipoles
break
degeneracies**

measurable SNR in 33 mode



Stato attuale

Run osservativi O1 (2015), O2 (2017)

Terminato O3: 11 mesi con 45% con 3 osservatori, 81% con 2 e 3 osservatori

GW190412: Observation of a Binary-Black-Hole Coalescence with Asymmetric Masses
<https://arxiv.org/abs/2004.08342>

GWTC-2: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the First Half of the Third Observing Run <https://arxiv.org/abs/2010.14527>

Population Properties of Compact Objects from the Second LIGO-Virgo Gravitational-Wave Transient Catalog <https://arxiv.org/abs/2010.14533>

Tests of General Relativity with Binary Black Holes from the second LIGO-Virgo Gravitational-Wave Transient Catalog <https://arxiv.org/abs/2010.14529>

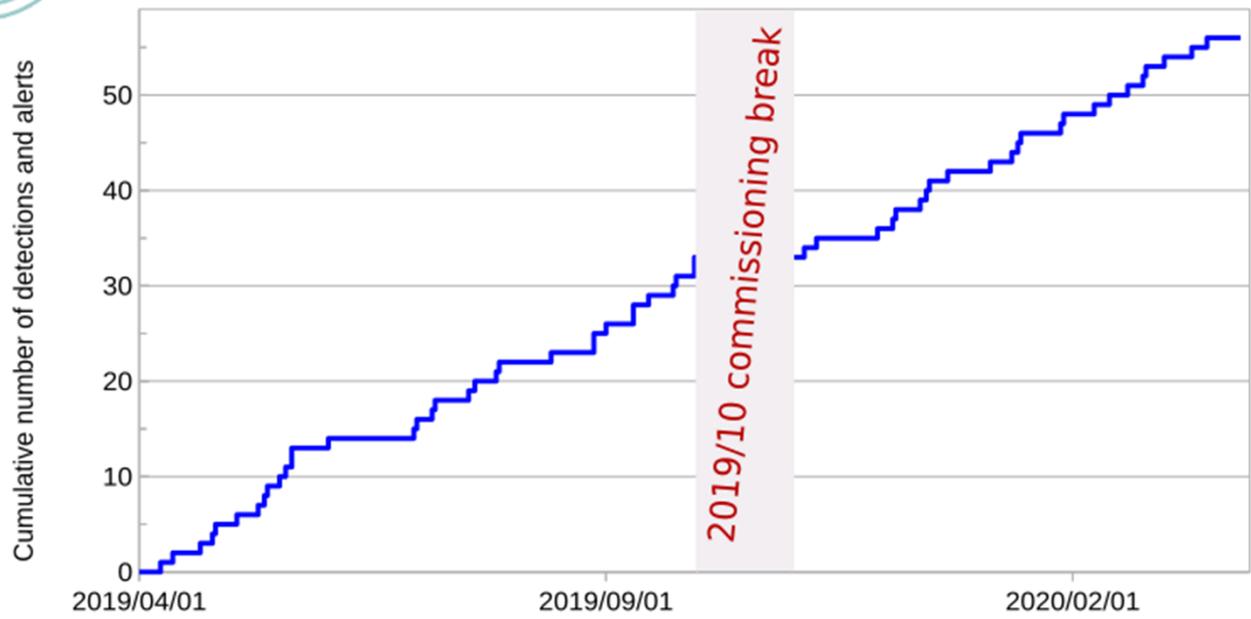
Lavori in corso:

Ricerca di segnali periodici da stelle di neutroni ruotanti

Ricerca di segnali transienti: supernovae, sorgenti non modellate

Ricerca del fondo stocastico cosmologico e astrofisico

DETECTIONS AND NON-RETRACTED ALERTS DURING O3

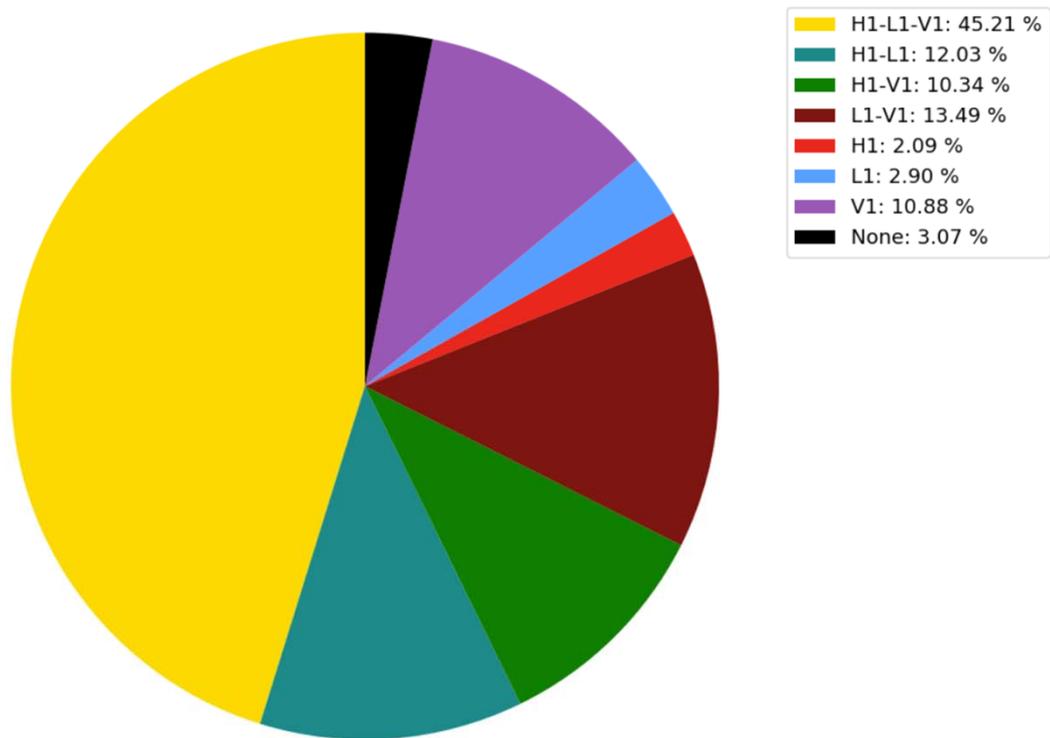


VIR-0365B-20

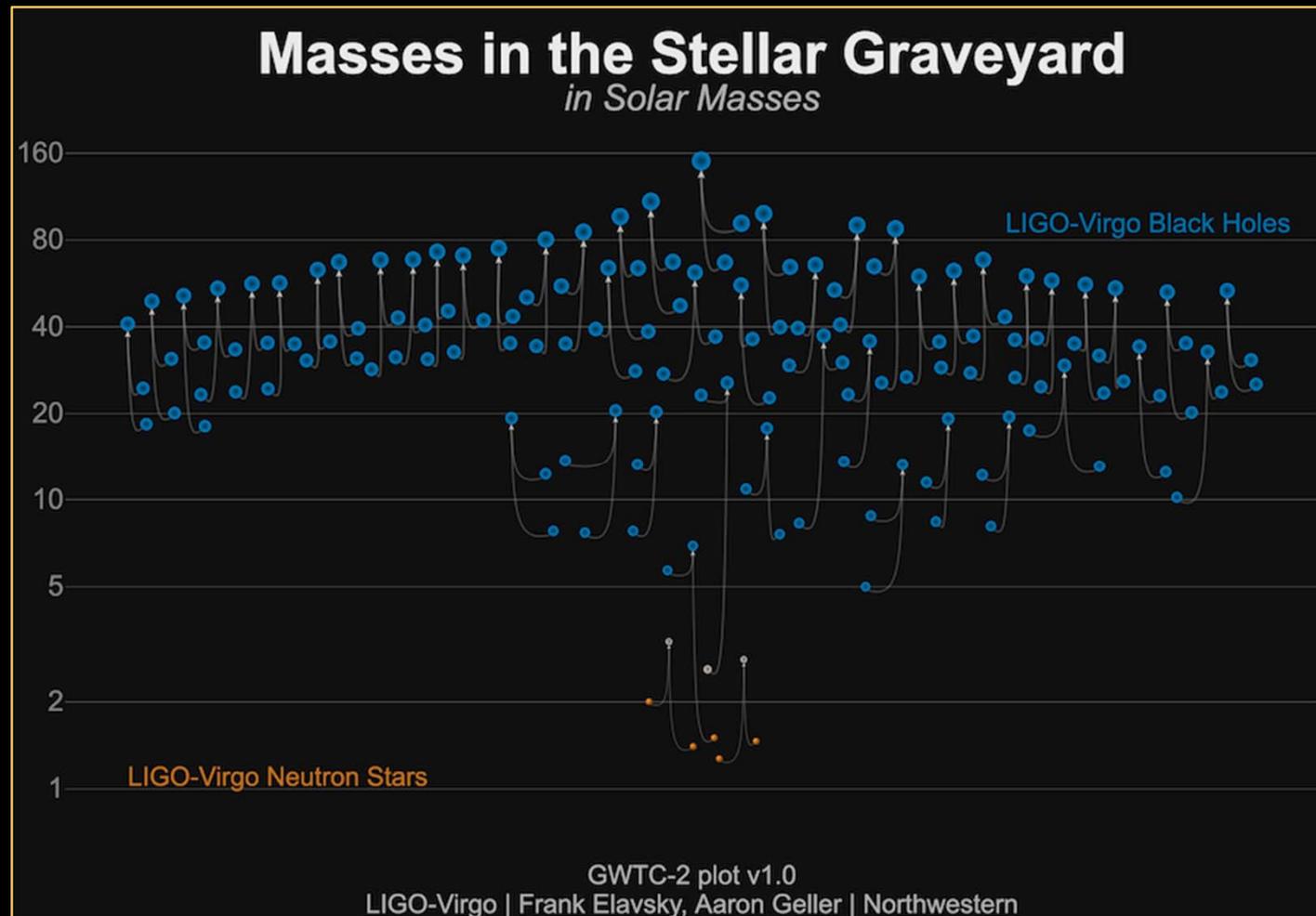
[dated April 2020]

plot_HLV_duty_cycle_O3: Number of detectors online

2019-04-01 15:00:00+00:00 UTC -> 2019-07-08 12:17:03+00:00 UTC -- segments: DMT-ANALYSIS_READY (H1-L1), SCIENCE (V1)



Campione: 1/3 O2



Confronto tra esperimento e RG

Tests of General Relativity with Binary Black Holes from the second LIGO-Virgo Gravitational-Wave Transient Catalog <https://arxiv.org/abs/2010.14529>

Deviazioni da orbite quasi circolari di buchi neri

Fit con famiglie di forme d'onda:

SEOBNRv4: Effective One Body post Newtoniano+perturbazioni del buco nero+simulazioni numeriche

IMRPHENOMPv2: Fenomenologico, forme d'onda delle diverse fasi raccordate, con aggiustamenti per gli spin

Se opportuno

IMRPHENOMPv3HM con precessione degli spin e i multipoli $(\ell, |m|) = (2,2), (2,1), (3,3), (3,2), (4,4), (4,3)$

SEOBNRv4HMROM con $(\ell, |m|) = (2,2), (2,1), (3,3), (3,2), (4,4), (5,5)$

NRSUR7DQ4: Interpolazione da simulazioni numeriche

Simulazioni numeriche con problem di convergenza non triviali, prime soluzioni solo nel 2005

Pretorius, F. Evolution of Binary Black-Hole Spacetimes PRL 2005, 95, 121101

Confronto tra esperimento e RG

Tests of General Relativity with Binary Black Holes from the second LIGO-Virgo Gravitational-Wave Transient Catalog

<https://arxiv.org/abs/2010.14529>

Compatibilità dei residui di fit con il rumore strumentale

Compatibilità dei segnali di coalescenza e ringdown

Modifiche delle forme d'onda nell'emissione

Propagazione

Proprietà del corpo finale

ECOs

Polarizzazione

Compatibilità dei residui

Migliore fit tra le forme d'onda al segnale rivelato: fitting factor

$$FF_{90} = \text{SNR} / (\text{SNR}_{GR}^2 + \text{SNR}_{res}^2)^{1/2}$$

Verifica che i residui siano compatibili con il rumore strumentale valutato in 193 intervalli di 1 s intorno a ogni evento

$$p = P(\text{SNR}_{90}^n \geq \text{SNR}_{90} | \text{noise})$$

FF_{90} tra 0.81 – 0.97 : possibile componente nonGR o rumore
p compresa tra 0.15 e 0.97 che il residuo sia rumore

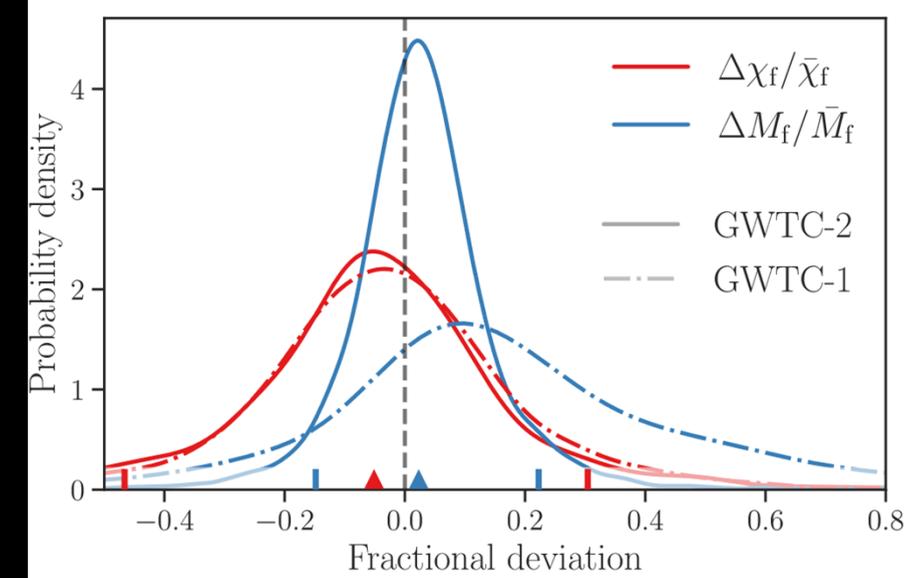
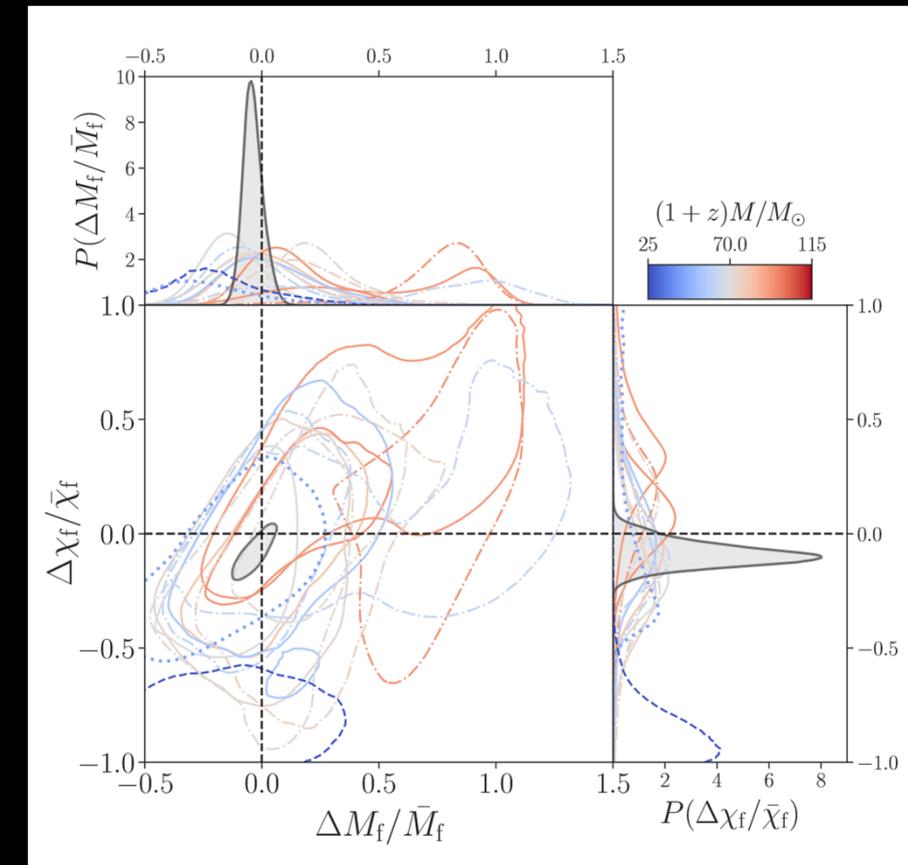
Compatibilità di inspiral, coalescenza e ringdown

Prodotto della coalescenza: buco nero di Kerr eccitato

Massa e spin sono previsti dall'inspiral a bassa frequenza (orbite larghe) e a alta frequenza (orbite strette)

LF-HF discriminate dalla frequenza di OG della orbita stabile più interna (ISCO) del buco nero di Kerr stimato

Richiesta di SNR >6 nelle due parti



Generazione di onde gravitazionali

Ordine postnewtoniano N: termini in $(v/c)^{2N}$

Modifiche nell'energia di legame e momento angolare, oppure nel flusso di energia e di momento angolare

Parametri della fase: $p_i \rightarrow (1 + \delta\hat{p}_i)p_i$

Inspiral: $\varphi_i \propto f^{(i-5)/3}$ fino a $i = 7$, ordine PN=3.5

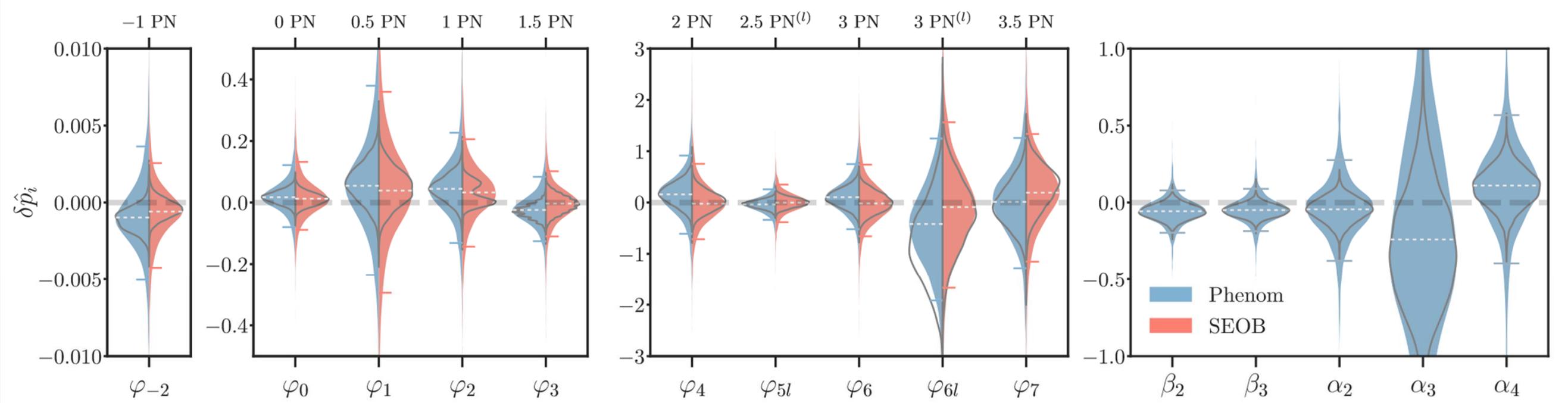
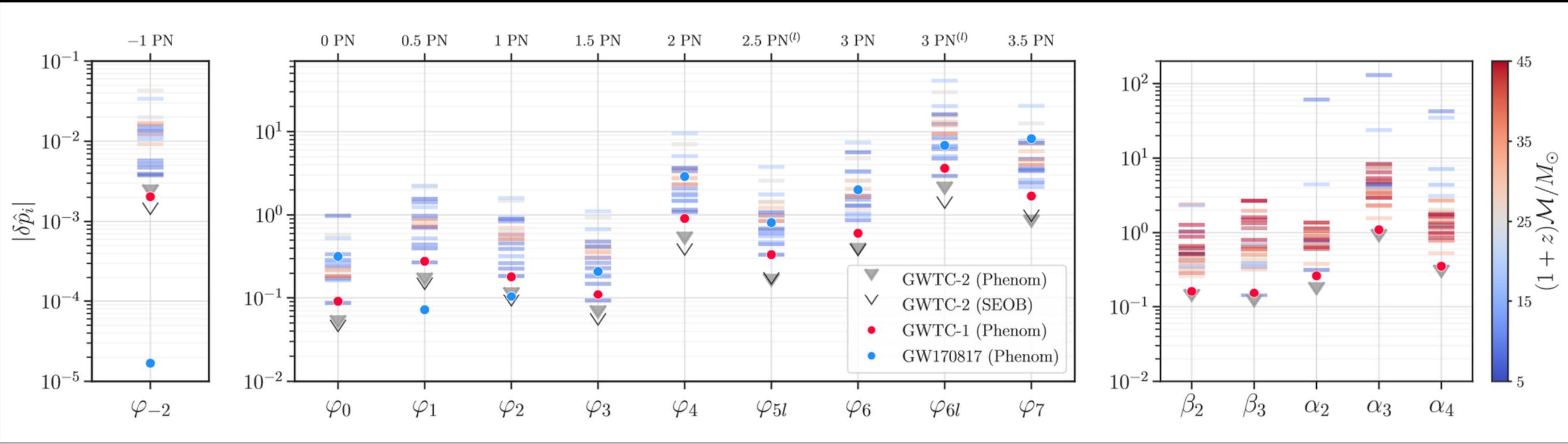
$$\{\delta\hat{\varphi}_{-2}, \delta\hat{\varphi}_0, \delta\hat{\varphi}_1, \delta\hat{\varphi}_2, \delta\hat{\varphi}_3, \delta\hat{\varphi}_4, \delta\hat{\varphi}_{5l}, \delta\hat{\varphi}_6, \delta\hat{\varphi}_{6l}, \delta\hat{\varphi}_7\}$$

-2: interpretato come termine di dipolo, $5l, 6l$: dipendenza logaritmica

Parametri regime intermedio e ringdown

$$\{\beta_2, \beta_3, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4\}$$

Generazione di onde gravitazionali



Momento di quadrupolo indotto dallo spin

Ellitticità indotta dallo spin

$$Q = -\kappa\chi^2 m^3$$

Coefficiente k dipende dall'equazione di stato, 1 per buco nero.

Possibilità di riconoscere oggetto nella coalescenza: stella di neutroni, stella di bosoni

Ipotesi che tutti gli eventi del catalogo siano buchi neri favorita contro l'ipotesi che nessuno lo sia con fattore di Bayes

$$\log_{10} BF = 11.7$$

Propagazione

Onde gravitazionali si propagano lungo geodetiche a velocità c

$$E^2 = p^2 c^2$$

Relazione di dispersione

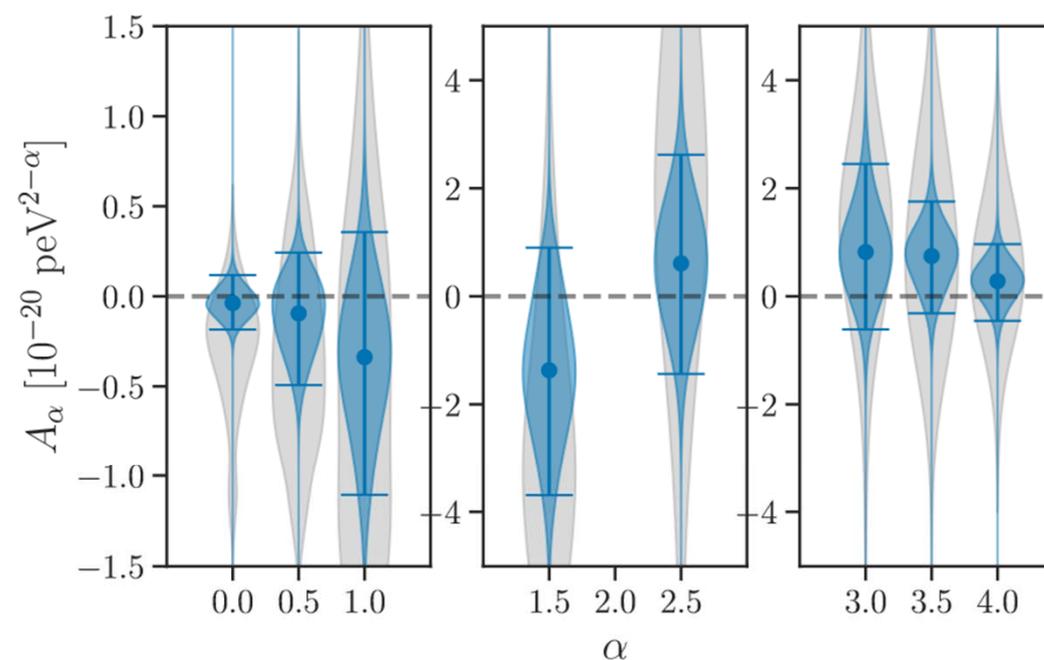
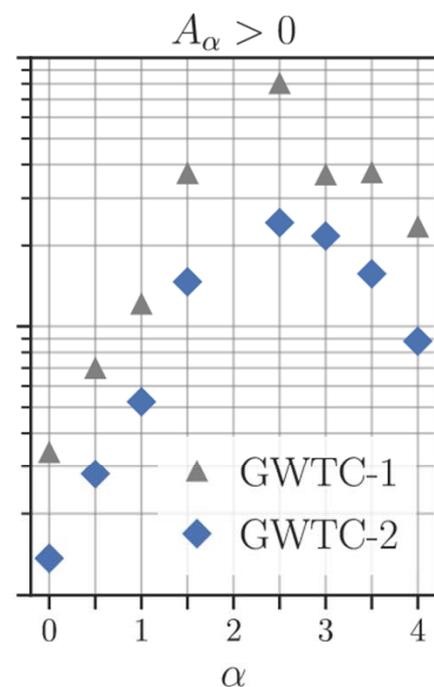
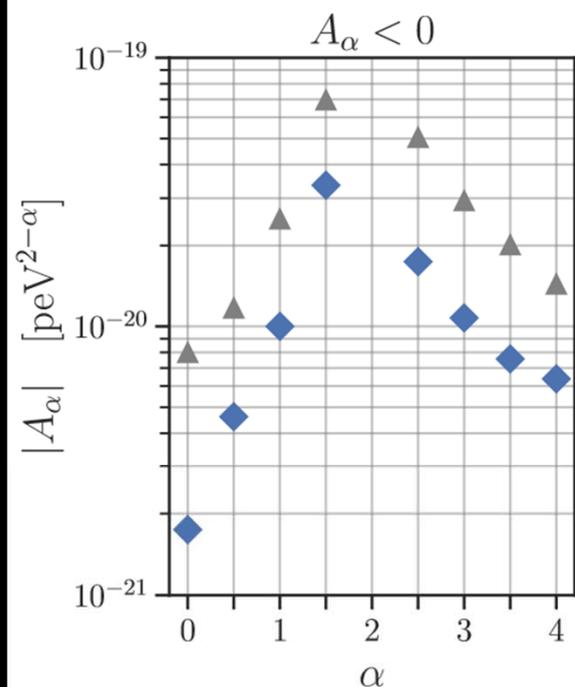
$$E^2 = p^2 c^2 + A_\alpha p^\alpha c^\alpha$$

Gravitone con massa: $A_\alpha > 0$, $\alpha = 0$

Dispersione: sfasamento dipendente dalla frequenza

Limite su massa del gravitone: $m_g < 1.76 \times 10^{-23} \text{ eV}/c^2$

Sistema solare: $m_g < 3.16 \times 10^{-23} \text{ eV}/c^2$



1 peV = $h / 250 \text{ Hz}$

Proprietà del buco nero finale

Due buchi neri astrofisici \rightarrow buco nero di Kerr perturbato \rightarrow buco nero di Kerr
Stato fondamentale raggiunto con l'emissione di onde gravitazionali alla
frequenza dei modi quasinormali, con frequenza f e tempo di smorzamento τ
 f e τ dipendono solo dalla massa e dallo spin

$$h_+(t) - ih_\times(t) = \sum_{\ell=2}^{+\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \sum_{n=0}^{+\infty} \mathcal{A}_{\ell mn} \exp\left[-\frac{t-t_0}{(1+z)\tau_{\ell mn}}\right] \exp\left[\frac{2\pi i f_{\ell mn}(t-t_0)}{1+z}\right] {}_{-2}S_{\ell mn}(\theta, \phi, \chi_f)$$

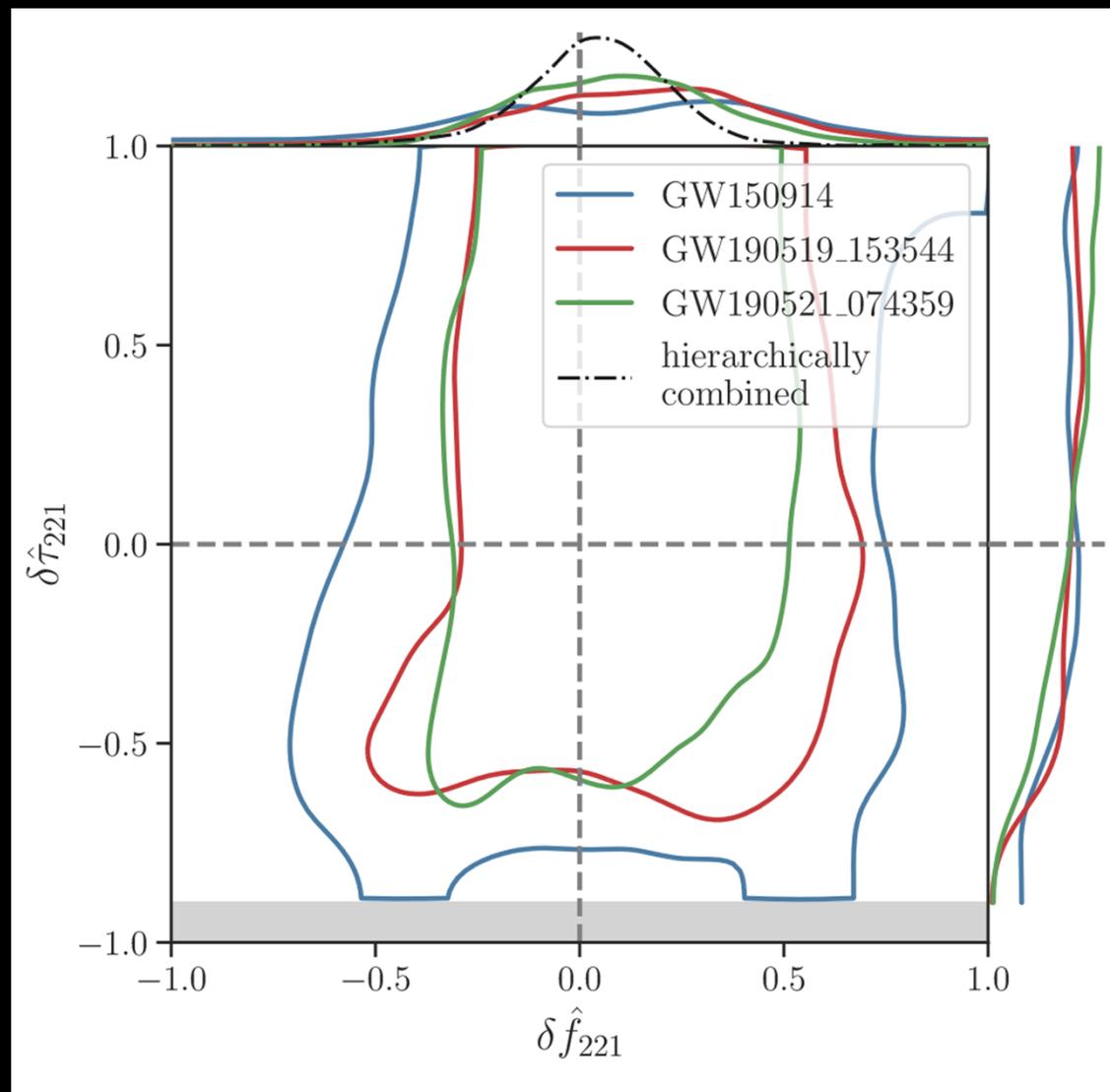
Analisi dei parametri del buco nero \rightarrow compatibilità con la previsione dall'inspiral

PYRING: Analisi nel dominio del tempo: ricerca di una deviazione nel modo 221
tenendo fisso 220.

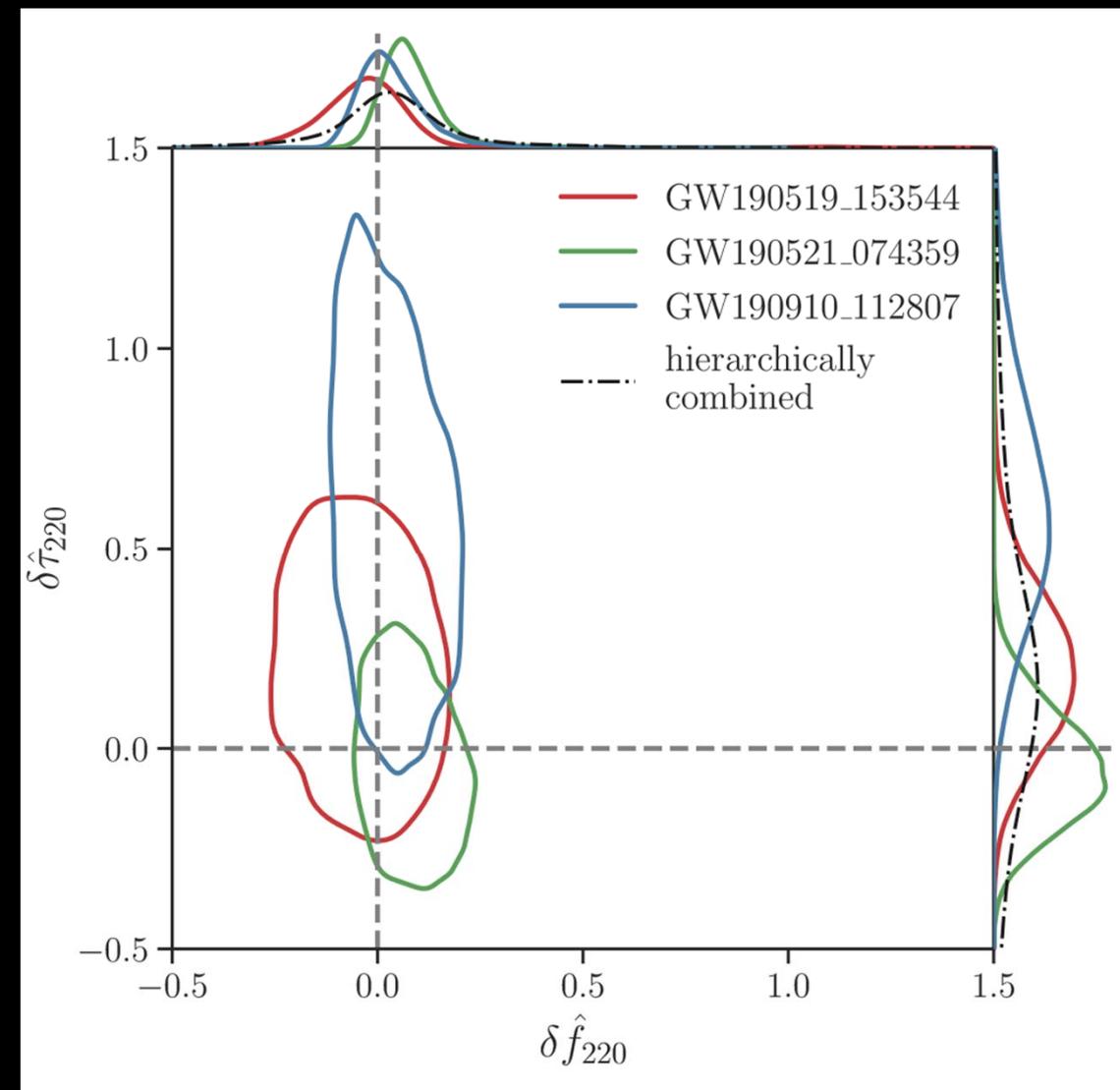
PSEOBNRv4HM: Analisi nel dominio delle frequenze e previsione del modo 220

Proprietà del buco nero finale

PYRING



PSEOBNRV4HM



ECOs invece di buchi neri

Exotic Compact Objects

Fuori dall'orizzonte degli eventi: superficie riflettente e anello luminoso

Cavità risonante tra la barriera di potenziale e la superficie

Treni di impulsi (echi di onde gravitazionali) durante il ringdown

Ricerca attraverso templates: preferita l'ipotesi di assenza di ECOs

Polarizzazioni

Risultato da GW170817: direzione della sorgente nota precisamente

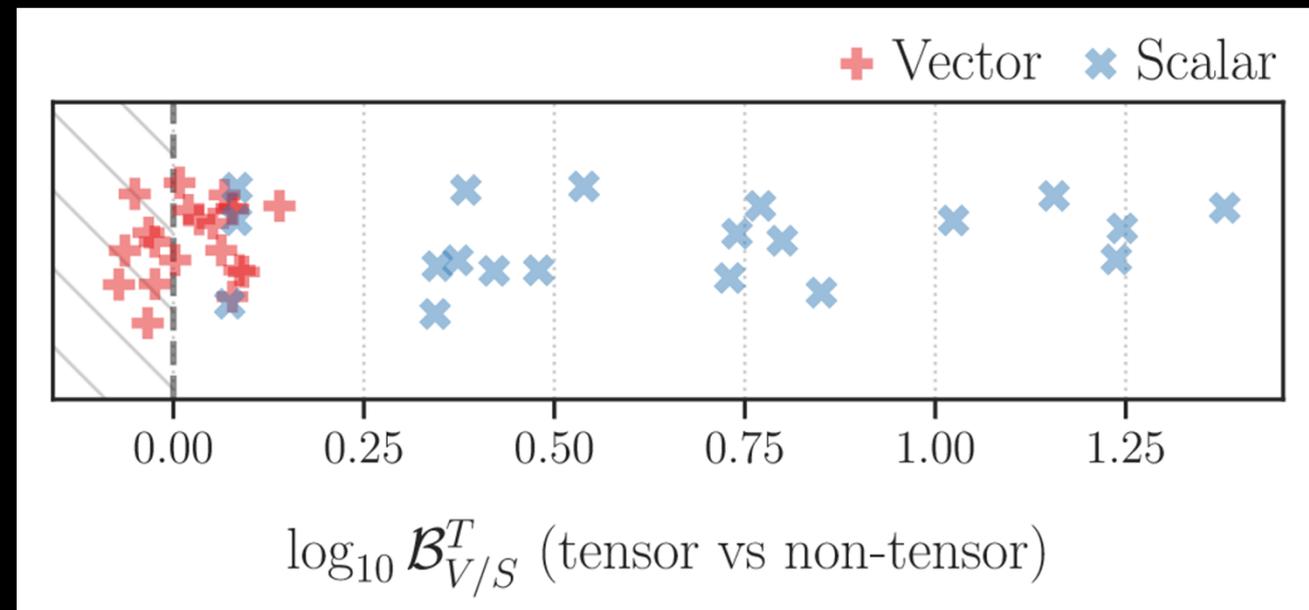
Ipotesi di polarizzazione vettoriale : fattore di Bayes 20.8 a sfavore

Ipotesi di polarizzazione scalare : fattore di Bayes 23.1 a sfavore

Basata su modelli di forme d'onda, unico evento

Metodo di zero: combinazione lineare dei rivelatori che non contiene segnale di onda gravitazionale

Fattore di Bayes a favore di T



Propagazione

Osservazione di coalescenza di stelle di neutroni con controparte elettromagnetica: GW170817
Differenza di tempo tra GRB e GW: 1.75 ± 0.05 s su 26 Mpc, $2.6 \cdot 10^9$ s

Assumendo che il GRB sia stato emesso con al più 10s di ritardo

$$-3 \times 10^{-15} < \frac{c_{GW} - c_{EM}}{c_{EM}} < 7 \times 10^{-16}$$

Ritardo di propagazione in campo gravitazionale

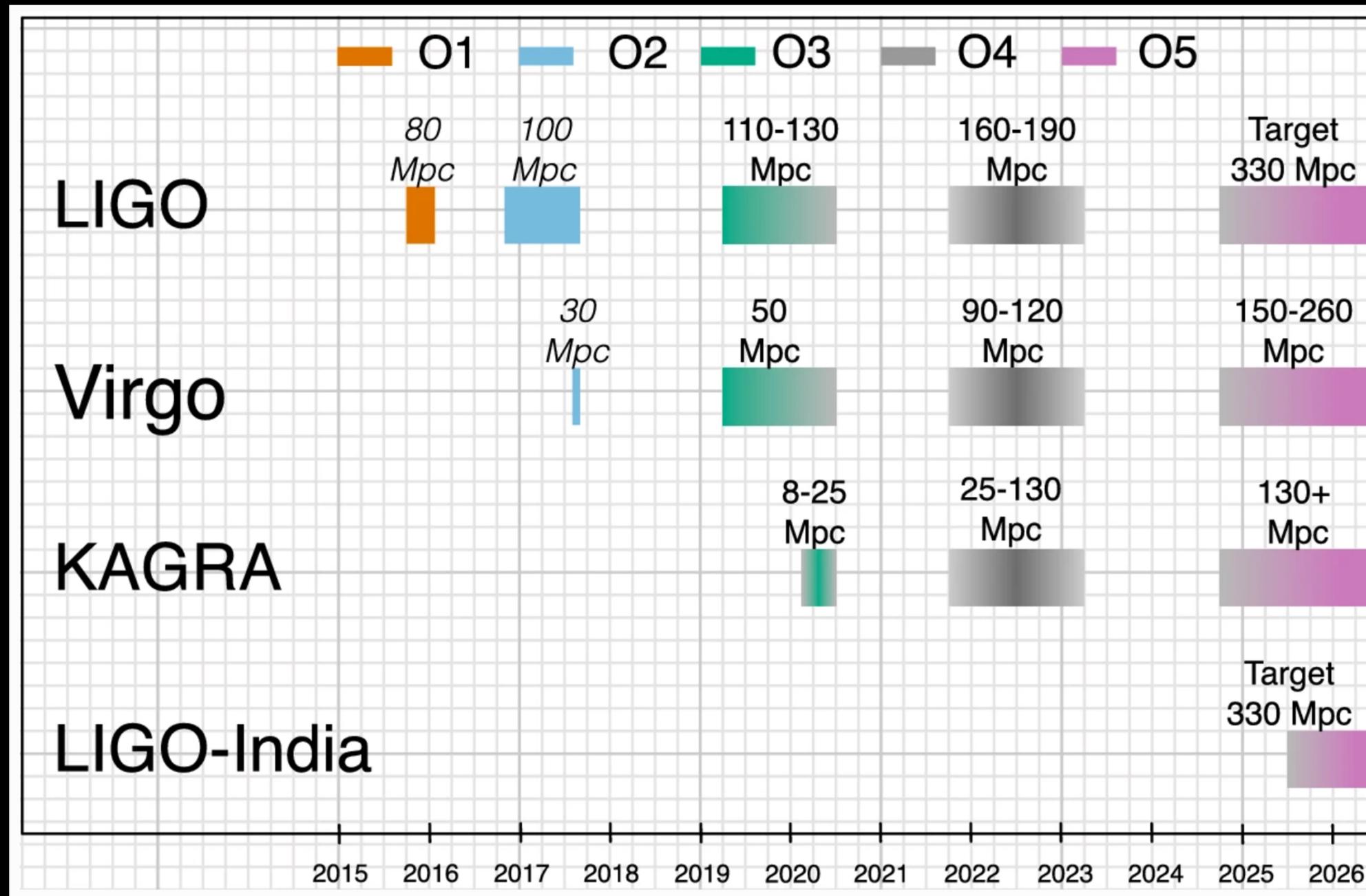
$$\delta t = \frac{1 + \gamma}{c^3} \int_{sorgente}^{rivelatore} U(x) dx$$

Effetto della Galassia considerando una sfera di 100 kpc e $2.5 \cdot 10^{11} M_{\odot}$

$$-2.6 \times 10^{-7} < \gamma_{GW} - \gamma_{EM} < 1.2 \times 10^{-6}$$

Onde gravitazionali e onde elettromagnetiche cascano nello stesso modo

Piani per la seconda generazione



Prospettive per Einstein Telescope

Einstein Telescope: progetto europeo per un interferometro con sensibilità 10 volte migliore dei rivelatori advanced
Estensione a bassa e alta frequenza

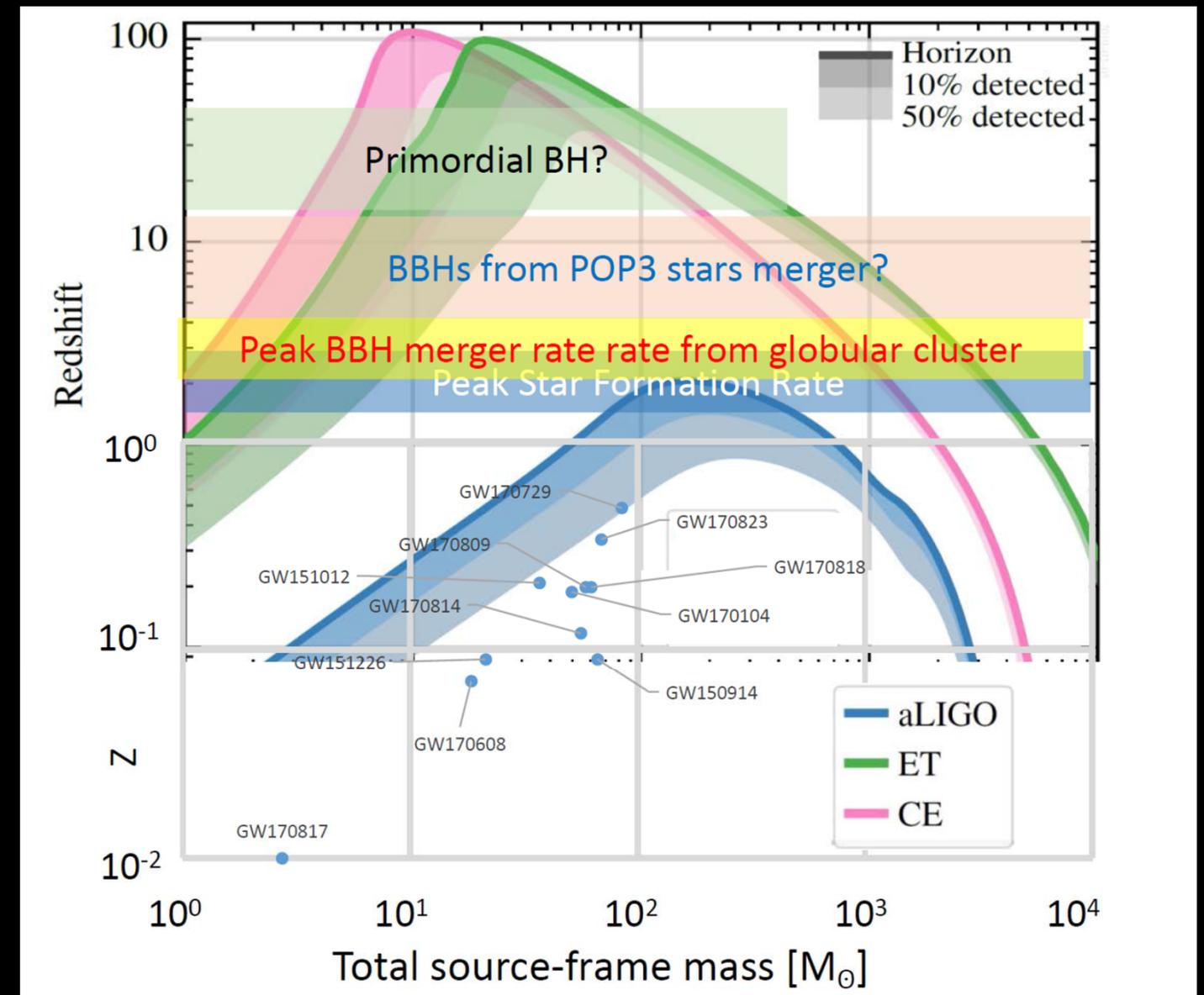
Bracci O(10 km) sotterranei, interferometro caldo e criogenico

10^5 - 10^6 eventi di buchi neri / anno, forma d'onda precisa

Red shift fino a 20

Masse accessibili fino a O(1000 M_{\odot})

Science Case for the Einstein Telescope
arXiv:1912.02622v4 [astro-ph.CO]



Buchi neri

Coefficienti PPN valutati con precisione

Studio dei modi quasi normali possibile per $O(50)$ eventi con SNR 30
 $O(10)$ eventi con SNR 100 danno accesso significativo ai termini «post-Kerr»
ECOs identificabili attraverso

deformazione mareale durante la coalescenza, discriminabili dalle stelle di neutroni
dal quadrupolo indotto dallo spin

Nei modi quasi normali

Ipotizzate modifiche dello spazio-tempo quantistiche $O(\log(l_{Pl}/R_S))$

Echi accessibili in ET.

Buchi neri osservati prima delle prime stelle: di origine primordiale

Ipotesi di nubi di bosoni 10^{-11} - 10^{-21} eV intorno al buco nero. Emissione quasi monocromatica

Propagazione

Rivelazioni a grande z con misura della distanza di luminosità gw

Regolata da un settore tensoriale di energia oscura, inaccessibile alla parte elettromagnetica

Effetto della Dark Energy diventa apprezzabile

$$d_L(z) = \frac{1+z}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_M(1+z')^3 + \frac{\rho_{DE}(z')}{\rho_0}}},$$

Λ CDM: ρ_{DE} costante confronto tra distanza di luminosità elettromagnetica e gravitazionale per estensioni di RG

Potenziale di scoperta

Grande volume ascoltabile

Oggetti compatti:

altri, oltre buchi neri e stelle di neutroni?

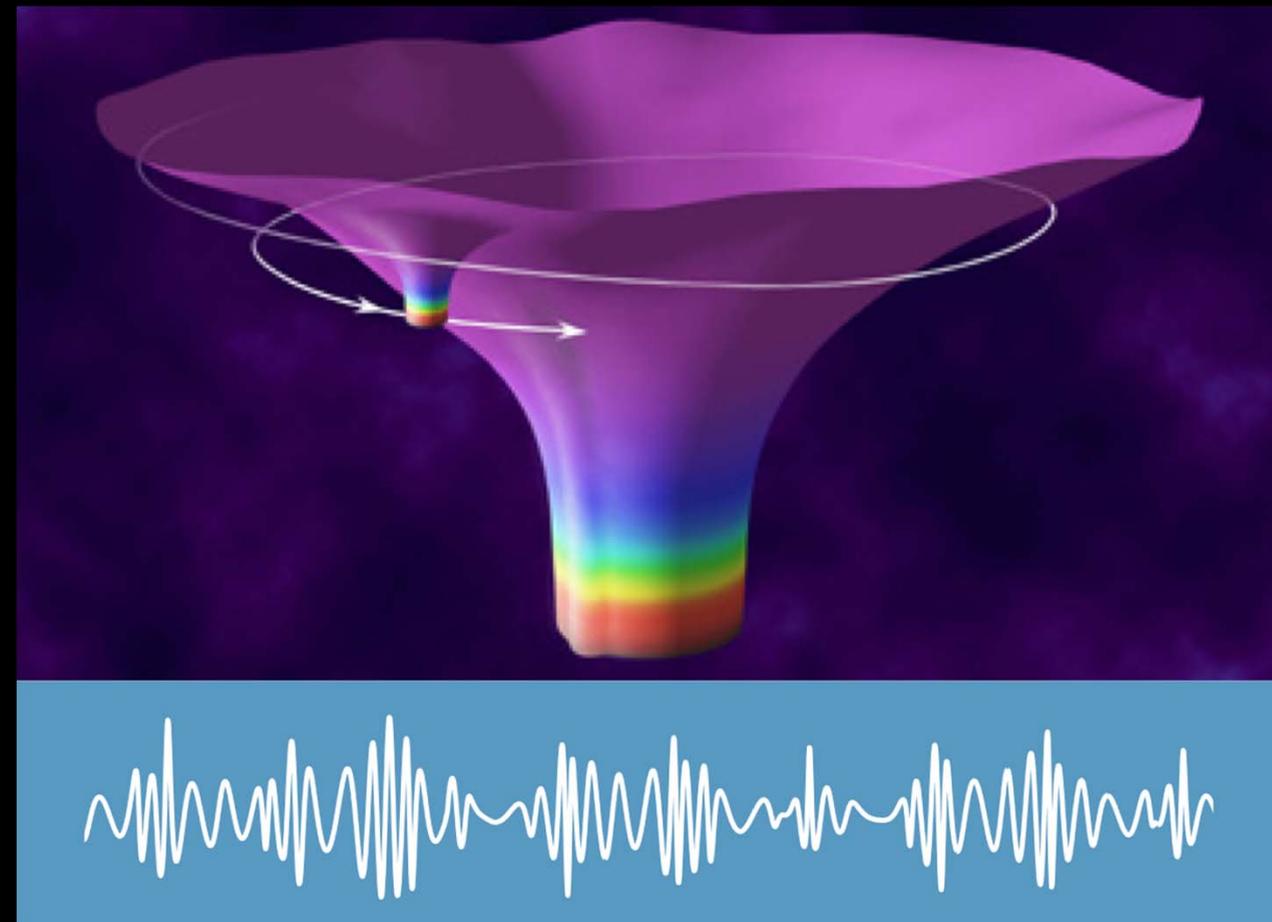
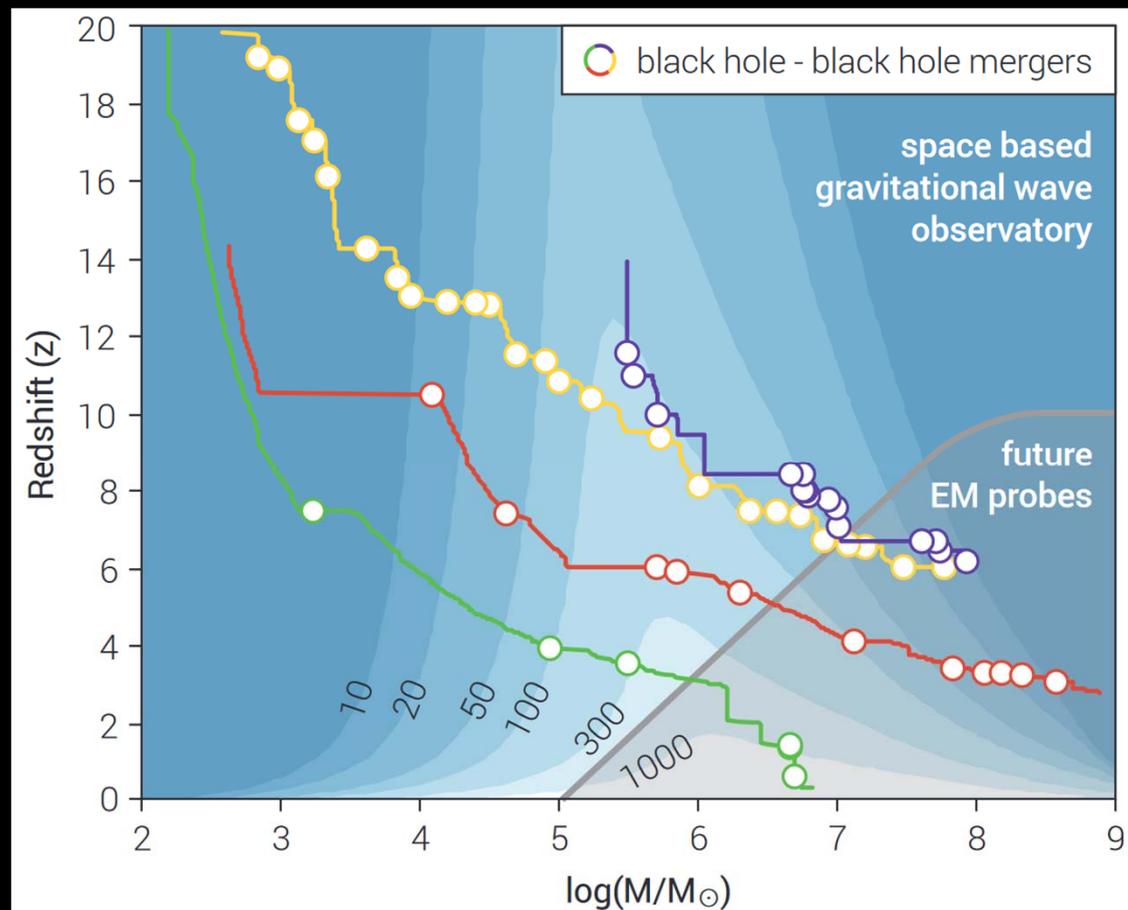
conosciamo la loro struttura? RG all'interno dell'oggetto compatto, stelle strane o stelle di quark, hanno raccolto materia oscura?

come si sono formati

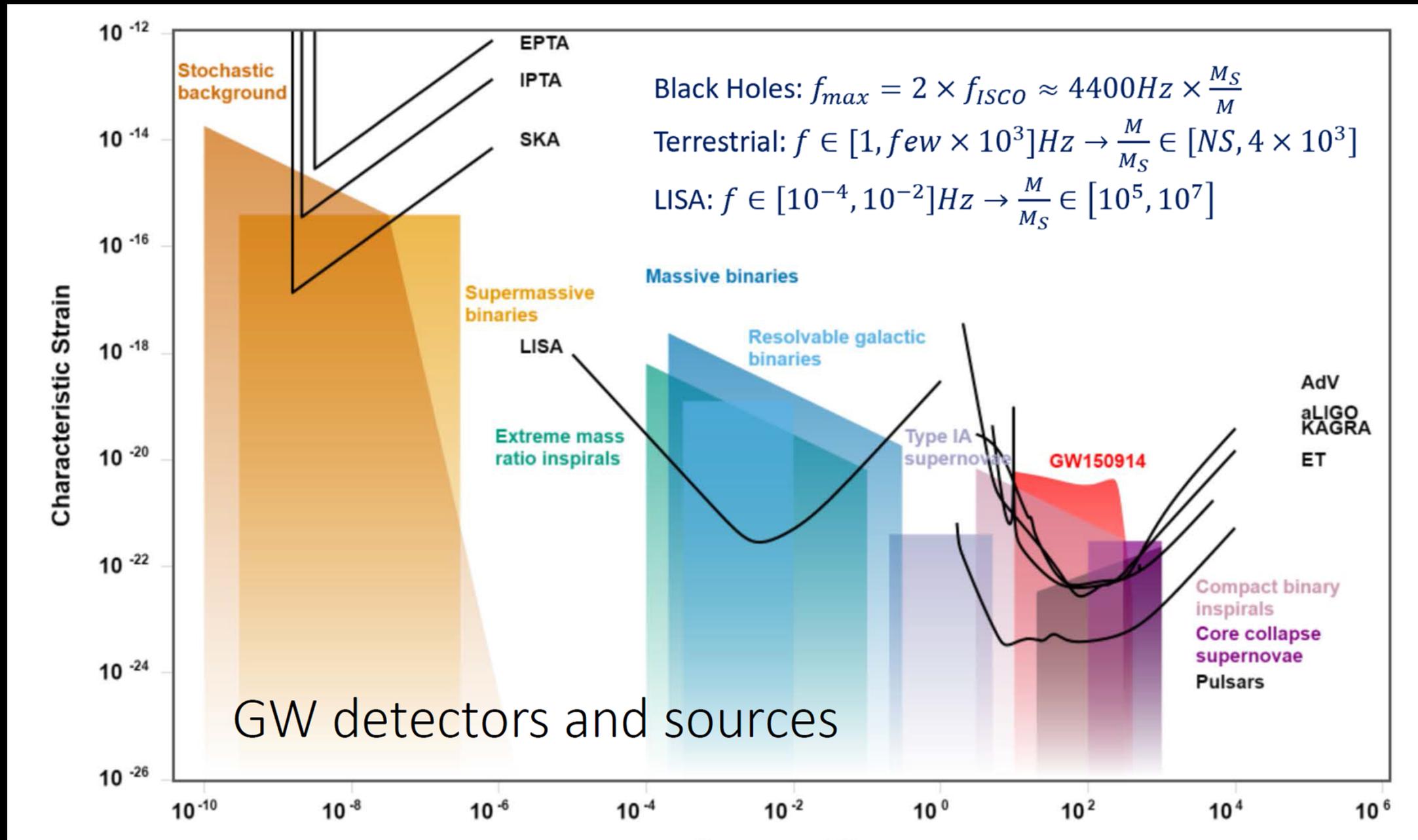
cosmologia

LISA e la Relatività Generale

Programmi simili ai rivelatori di seconda e terza generazione,
Periodo dei segnali 10 - 10^4 secondi
Coalescenza di buchi neri più massivi e più lontani



Lo spettro gravitazionale



E' iniziata l'esplorazione di un territorio quasi
senza mappe

Occorre essere preparati per le sorprese