

Test della Relatività Generale

G. Cella – INFN Pisa

On behalf of the LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration

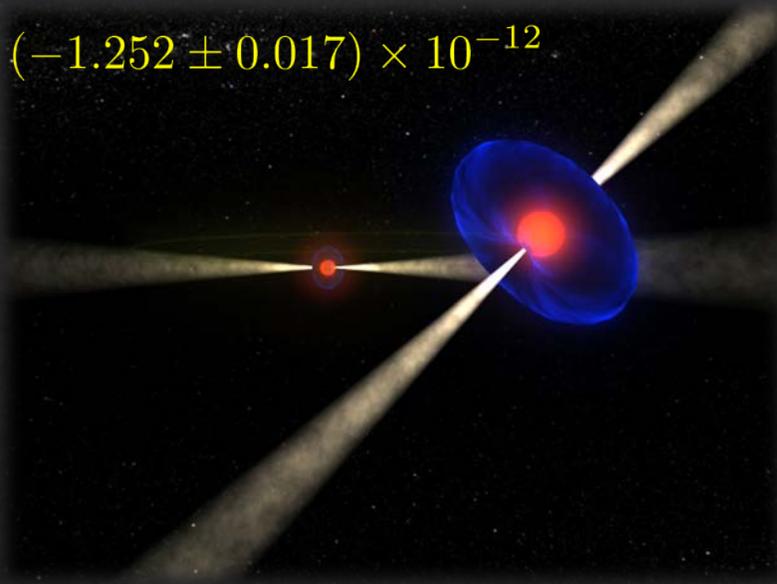
Gravitational Wave Festival



DIPARTIMENTO DI FISICA
UNIVERSITÀ DI PISA

GW150914: una sonda per il regime di gravità forte

$$\dot{T}_b = (-1.252 \pm 0.017) \times 10^{-12}$$



Binaria più relativistica nota fino da oggi: PSR J0737-3039

Raggio di Schwarzschild: $R_s \sim 4.8\text{km}$

Distanza tra le due pulsar: $d \sim 9 \times 10^5\text{km}$

Velocità orbitale: $\left(\frac{v}{c}\right)^2 \sim 4 \times 10^{-6} \sim \frac{R_s}{d}$

Coalescenza: tra $85 \times 10^6\text{yr}$

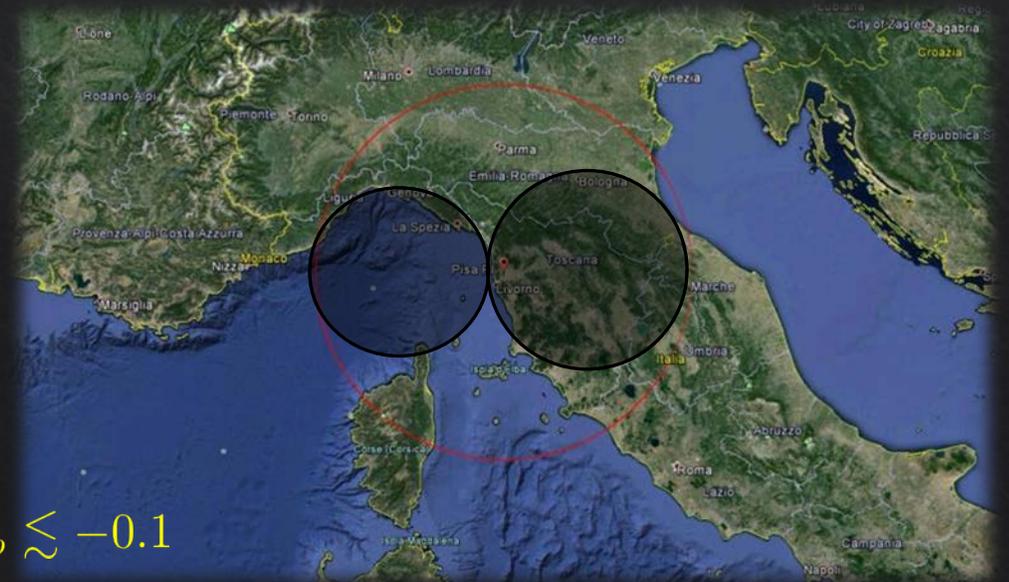
GW150914

Raggio di Schwarzschild: $R_s \sim 90\text{km}$

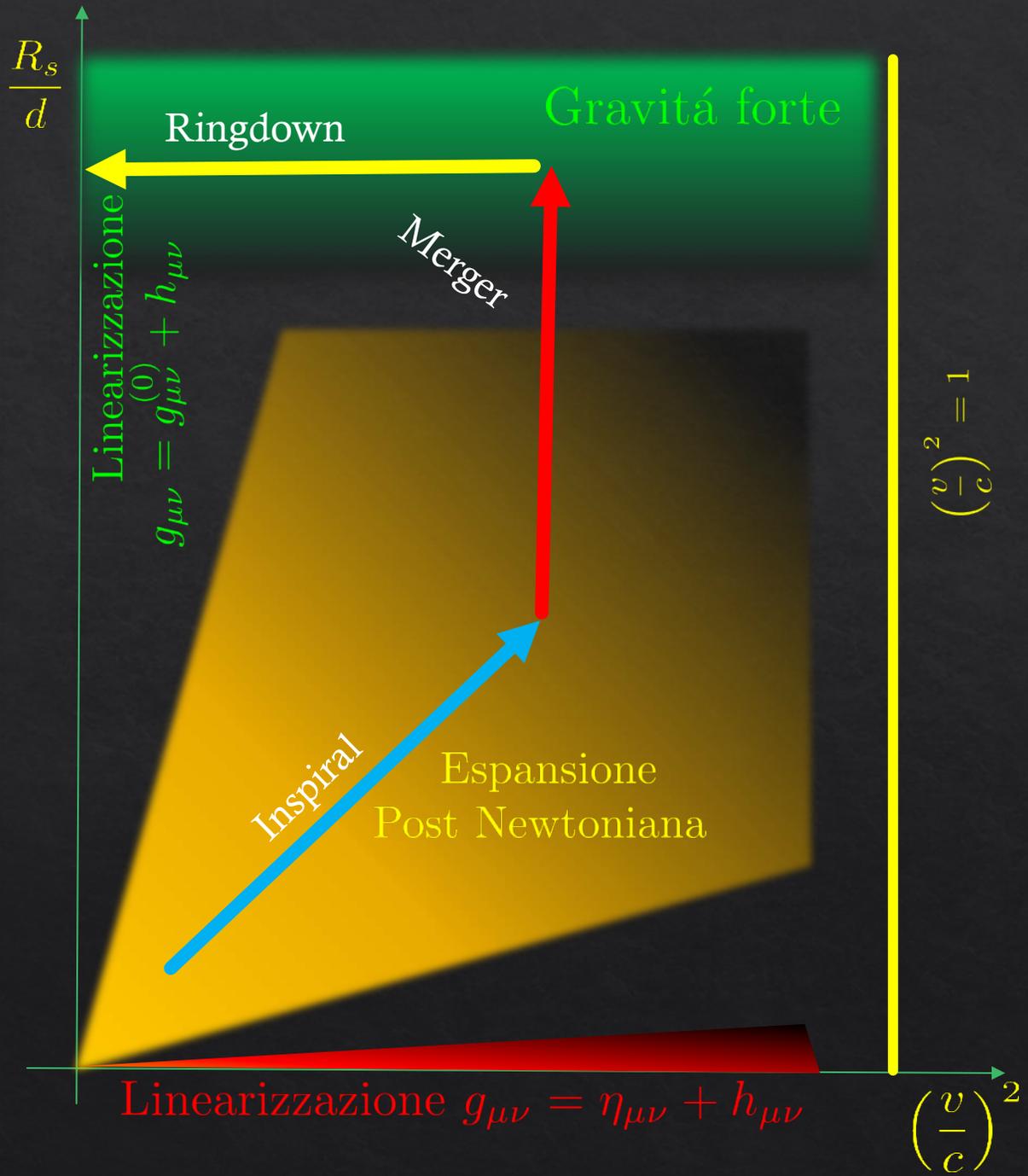
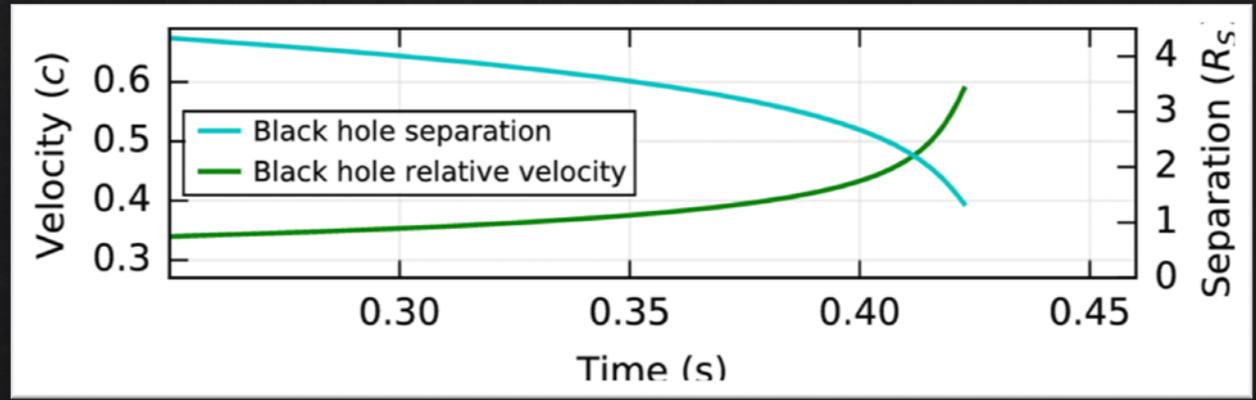
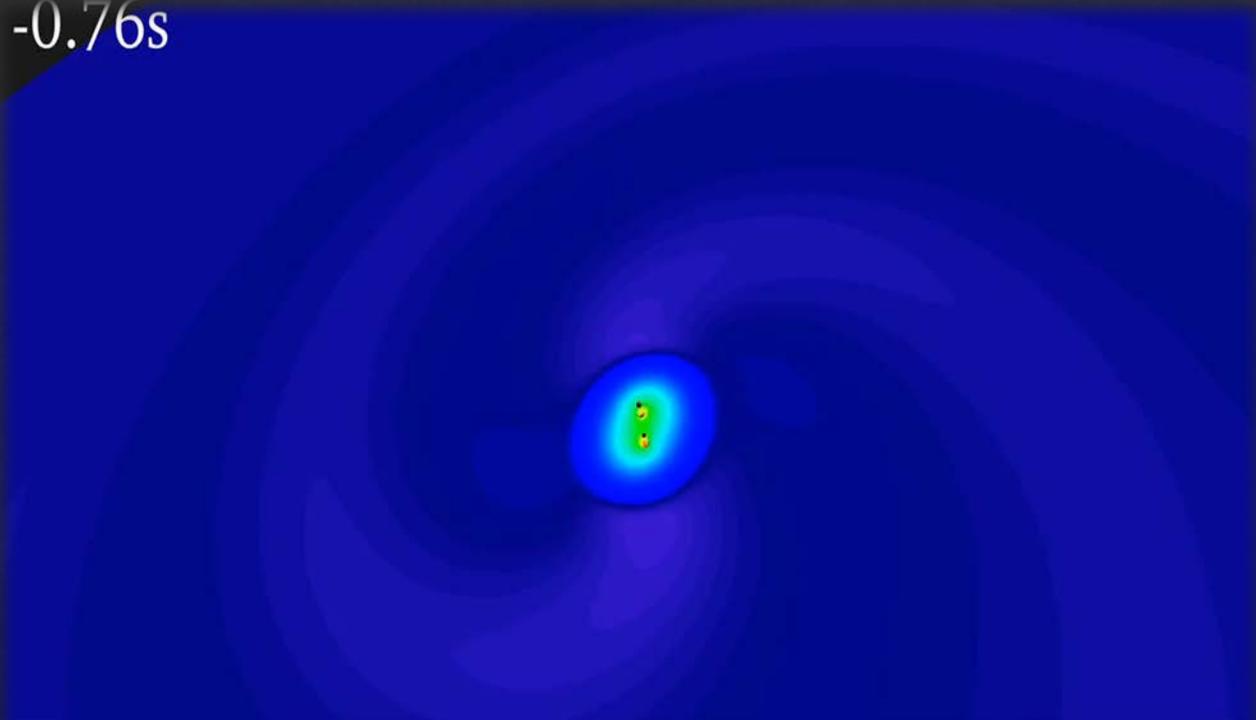
Distanza tra le due pulsar: $d \gtrsim 180\text{km}$

Velocità orbitale: $\left(\frac{v}{c}\right)^2 \lesssim 0.36$

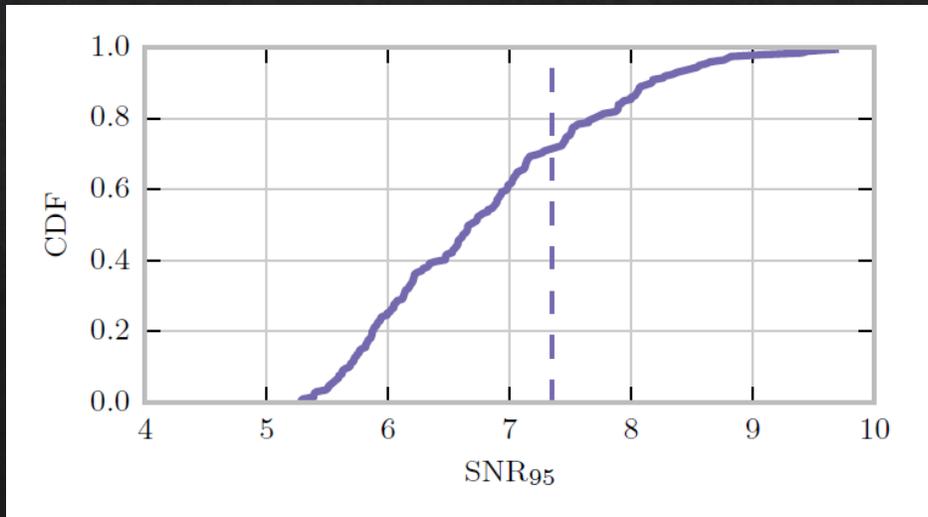
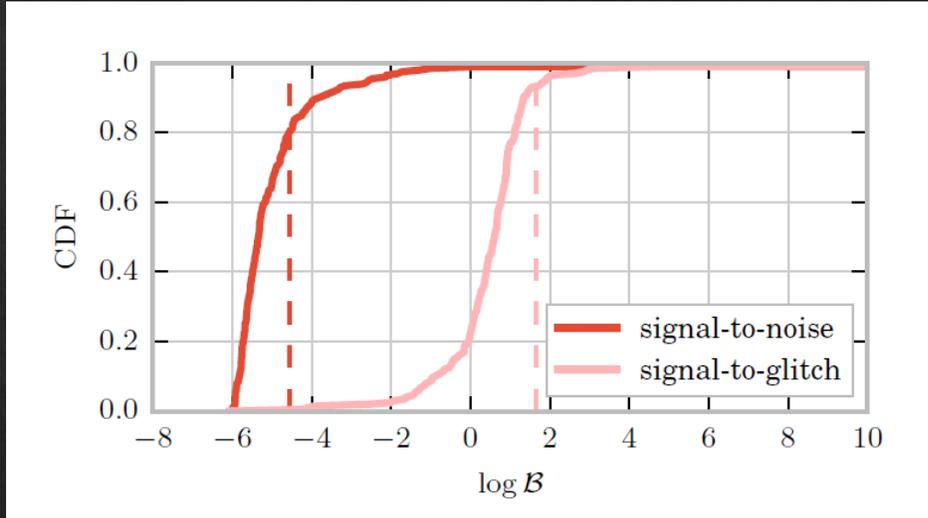
$$-1 \lesssim \dot{T}_b \lesssim -0.1$$



-0.76s



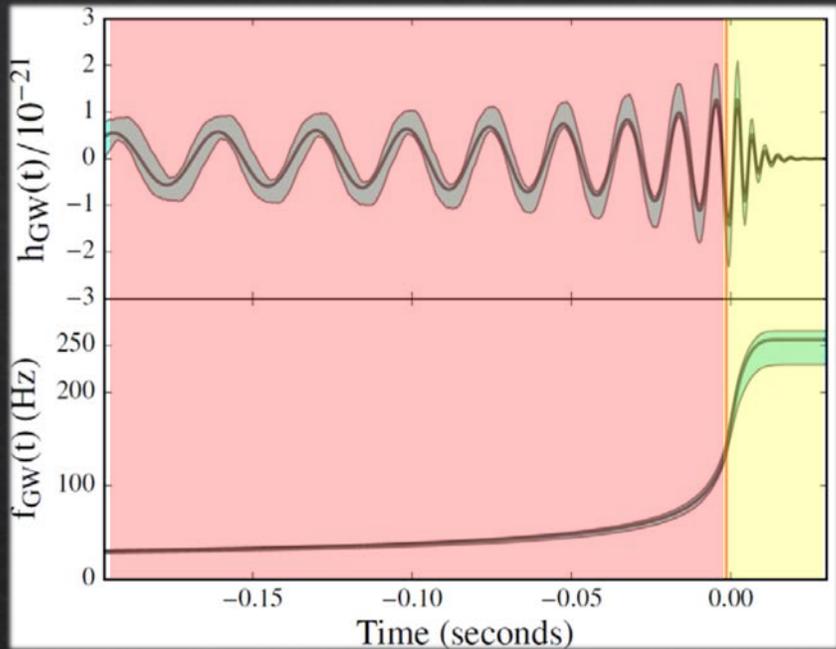
Test consistenza interna



$$SNR_{res}^2 = (1 - FF^2) FF^{-2} SNR_{det}^2$$

1. Identificazione Bayesiana dei parametri più probabili per il segnale
 2. Sottrazione del segnale MAP (Massimo A Posteriori) così determinato dai dati
 3. I residui vengono sottoposti ad una pipeline di analisi per transienti (BayesWave)
 4. Altri segmenti dei dati (temporalmente vicini) vengono sottoposti a BayesWave
 5. Confronto con alcune statistiche:
 - Logaritmo del fattore di Bayes (segnale/rumore)
 - Logaritmo del fattore di Bayes (segnale/glitch)
 - Limite superiore al 95%
- Consistente con assenza di segnale residuo.
 - Risultati simili con diverse parametrizzazioni del segnale.
 - $FF=0.96$

Consistenza tra diverse fasi



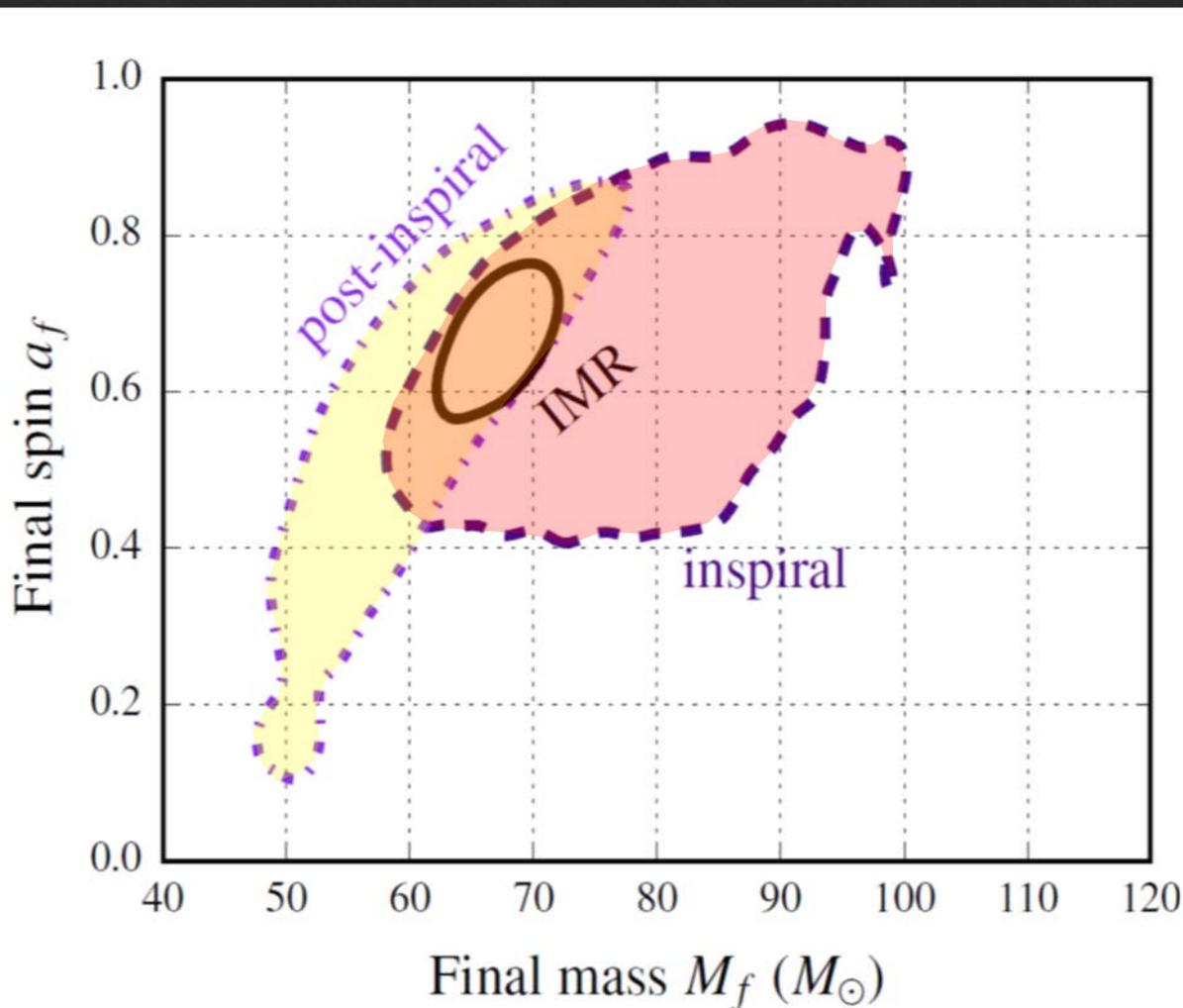
1. Stima di massa e spin finali usando *solo il segnale di inspiral*

$$SNR_{det} \simeq 19.5$$

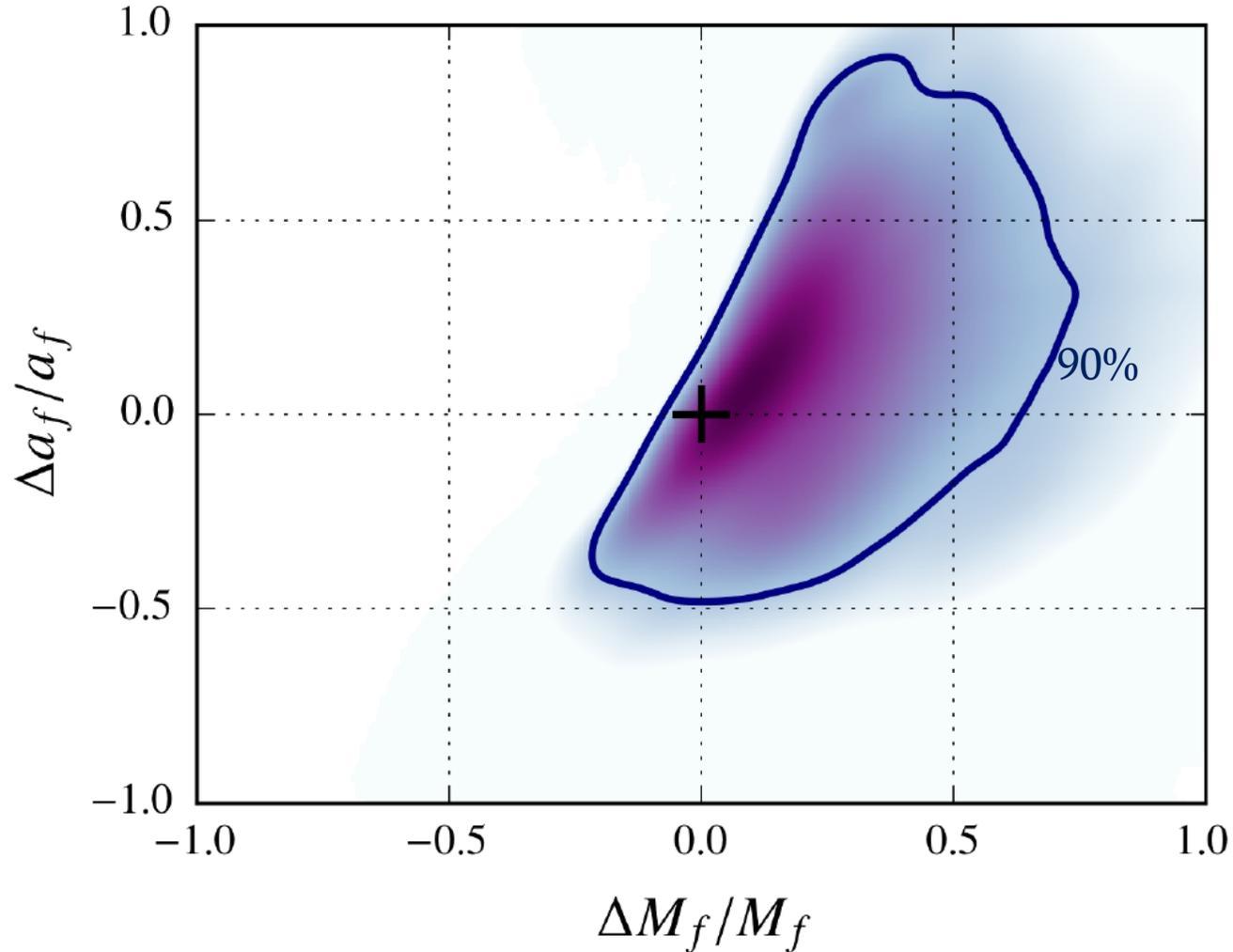
2. Stima di massa e spin finali usando *solo il segnale di merger e ringdown*

$$SNR_{det} \simeq 16$$

3. Confronto



Consistenza tra diverse fasi



1. Distribuzione congiunta delle differenze relative tra la due stime di massa e spin
2. La predizione della Relatività Generale è sul contorno corrispondente al 68%

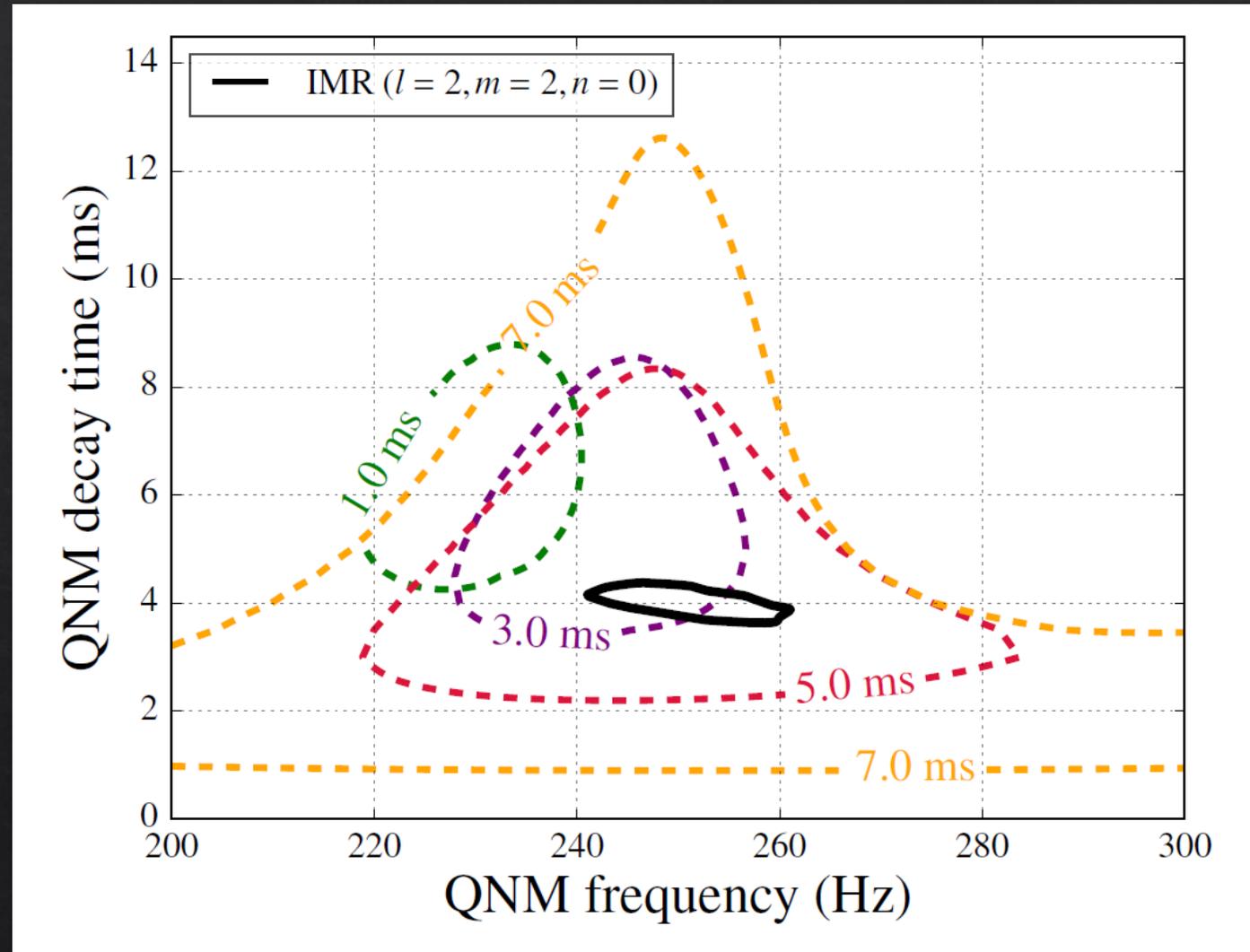
Quasi Normal Modes

Ricerca di 1 solo modo (quello con minore dissipazione)

$$h(t) = A\theta(t - t_0)e^{-(t-t_0)/\tau} \cos[\omega_0(t - t_0) + \phi_0]$$

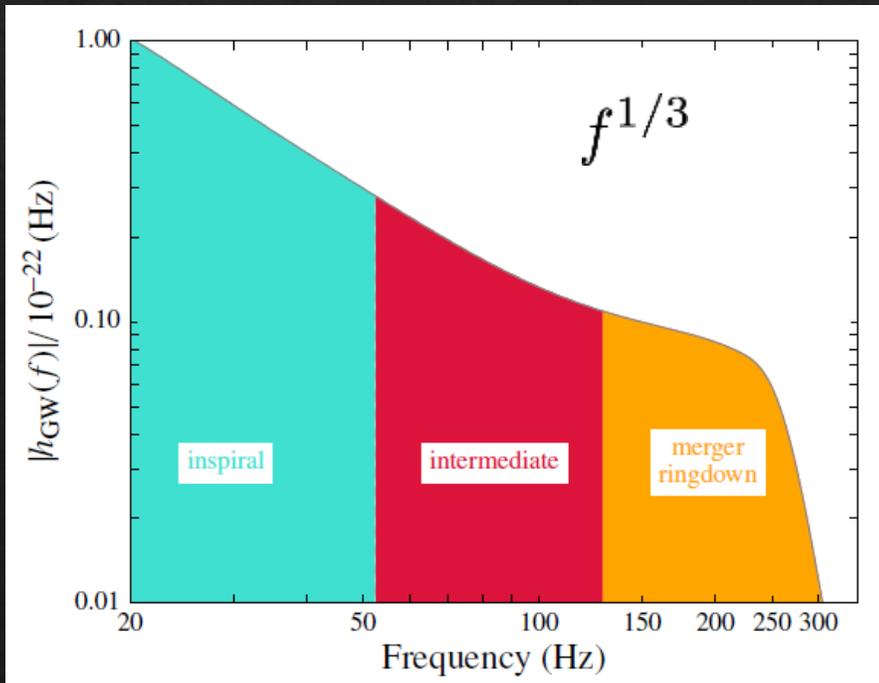
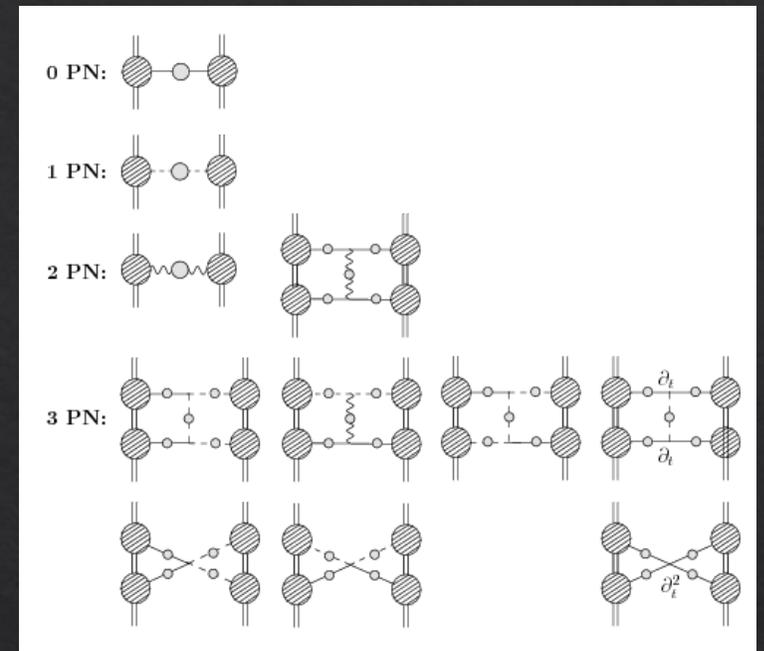
$$t_0 = t_M + \Delta t$$

- I contorni corrispondono a una confidenza del 90%
- Viene variato Δt
- Il contorno scuro: la predizione basata sui parametri Inspiral+Merger+Ringdown



Deviazioni dalla Relatività Generale

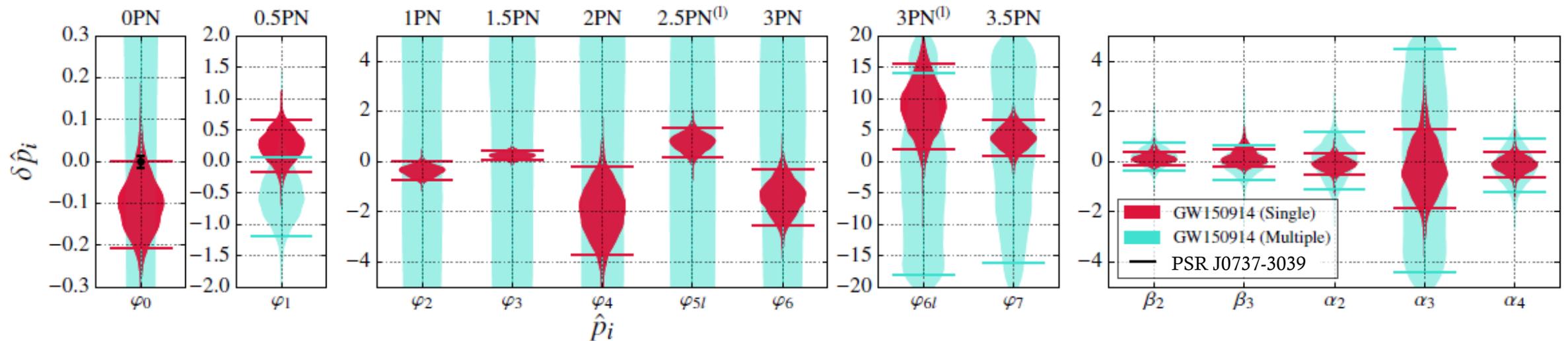
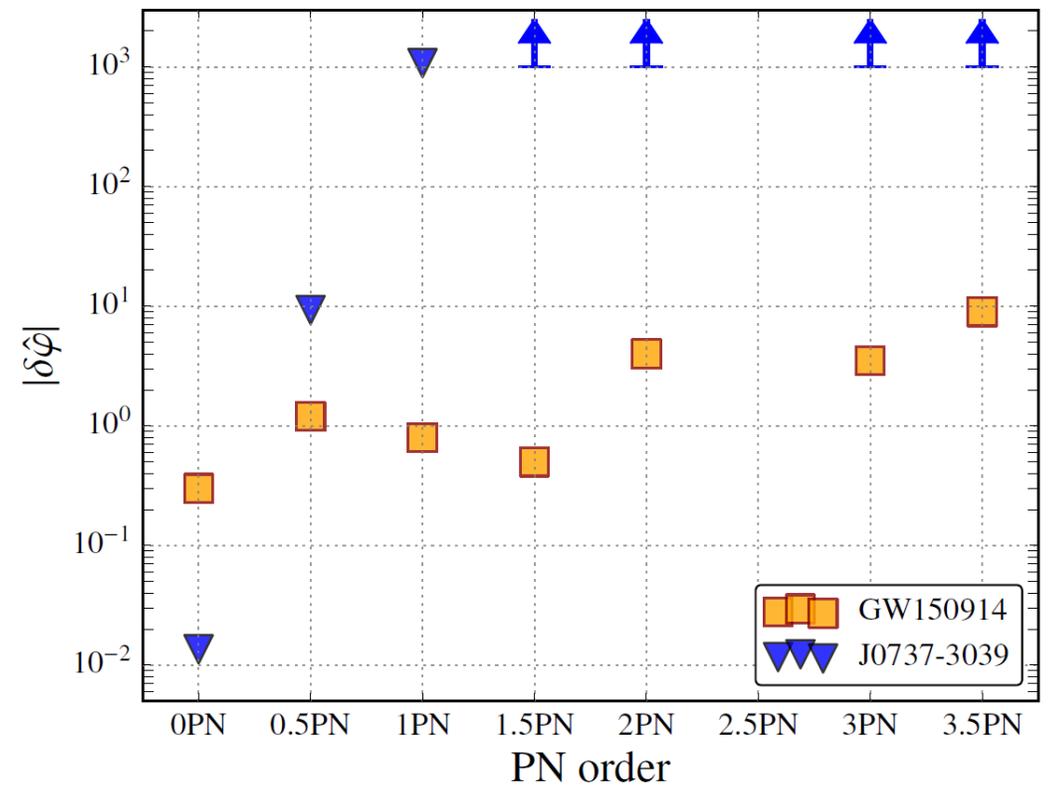
- ◆ Formalismo Post-Newtoniano
- ◆ La fase del segnale è una serie di potenze in $f^{1/3}$
- ◆ Parametri liberi: correzione alle predizioni della Relatività Generale



waveform regime	parameter	f -dependence	median		GR quantile		$\log_{10} B_{\text{model}}^{\text{GR}}$	
			single	multiple	single	multiple	single	multiple
early-inspiral regime	$\delta\hat{\varphi}_0$	$f^{-5/3}$	$-0.1^{+0.1}_{-0.1}$	$1.3^{+3.0}_{-3.2}$	0.94	0.30	1.9 ± 0.2	
	$\delta\hat{\varphi}_1$	$f^{-4/3}$	$0.3^{+0.4}_{-0.4}$	$-0.5^{+0.6}_{-0.6}$	0.16	0.93	1.6 ± 0.2	
	$\delta\hat{\varphi}_2$	f^{-1}	$-0.4^{+0.3}_{-0.4}$	$-1.6^{+18.8}_{-16.6}$	0.96	0.56	1.2 ± 0.2	
	$\delta\hat{\varphi}_3$	$f^{-2/3}$	$0.2^{+0.2}_{-0.2}$	$2.0^{+13.4}_{-13.9}$	0.02	0.42	1.2 ± 0.2	
	$\delta\hat{\varphi}_4$	$f^{-1/3}$	$-1.9^{+1.6}_{-1.7}$	$-1.9^{+19.3}_{-16.4}$	0.98	0.56	0.3 ± 0.2	3.7 ± 0.6
	$\delta\hat{\varphi}_{5l}$	$\log(f)$	$0.8^{+0.5}_{-0.6}$	$-1.4^{+18.6}_{-16.9}$	0.01	0.55	0.7 ± 0.4	
	$\delta\hat{\varphi}_6$	$f^{1/3}$	$-1.4^{+1.1}_{-1.1}$	$1.2^{+16.8}_{-18.9}$	0.99	0.47	0.4 ± 0.2	
	$\delta\hat{\varphi}_{6l}$	$f^{1/3} \log(f)$	$8.9^{+6.8}_{-6.8}$	$-1.9^{+19.1}_{-16.1}$	0.02	0.57	-0.3 ± 0.2	
	$\delta\hat{\varphi}_7$	$f^{2/3}$	$3.8^{+2.9}_{-2.9}$	$3.2^{+15.1}_{-19.2}$	0.02	0.41	-0.0 ± 0.2	
intermediate regime	$\delta\hat{\beta}_2$	$\log f$	$0.1^{+0.4}_{-0.3}$	$0.2^{+0.6}_{-0.5}$	0.24	0.28	1.4 ± 0.2	2.3 ± 0.2
	$\delta\hat{\beta}_3$	f^{-3}	$0.1^{+0.6}_{-0.3}$	$-0.0^{+0.8}_{-0.7}$	0.31	0.56	1.2 ± 0.4	
merger-ringdown regime	$\delta\hat{\alpha}_2$	f^{-1}	$-0.1^{+0.4}_{-0.4}$	$0.0^{+1.0}_{-1.2}$	0.68	0.50	1.2 ± 0.2	
	$\delta\hat{\alpha}_3$	$f^{3/4}$	$-0.3^{+1.9}_{-1.5}$	$0.0^{+4.4}_{-4.4}$	0.60	0.51	0.7 ± 0.2	2.1 ± 0.4
	$\delta\hat{\alpha}_4$	$\tan^{-1}(af + b)$	$-0.1^{+0.5}_{-0.5}$	$-0.1^{+1.1}_{-1.0}$	0.68	0.62	1.1 ± 0.2	

Risultati in accordo con la Relatività Generale

- In rosso: variazione di un singolo parametro
- In verde: variazione contemporanea dei parametri
- Barre di errore al 90%



«Massa del gravitone»

◇ Supponendo una relazione di dispersione $E^2 = p^2 c^2 + m_g^2 c^4$

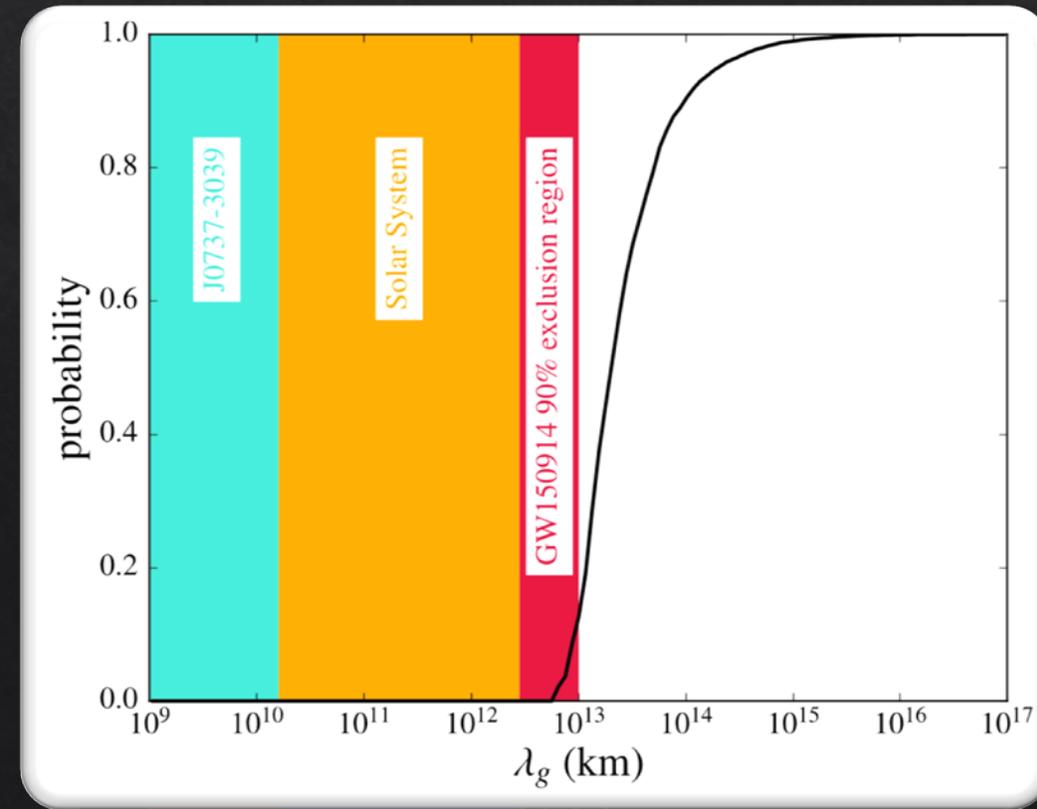
troviamo $\frac{v_g^2}{c^2} = 1 - \frac{c^2}{\lambda_g^2 f^2}$ $\varphi(r) = \frac{GM}{r} e^{-r/\lambda_g}$

◇ Miglioramento di un fattore 3 rispetto al limite da osservazioni del sistema solare:

$$\lambda_g > 10^{13} \text{ km}$$

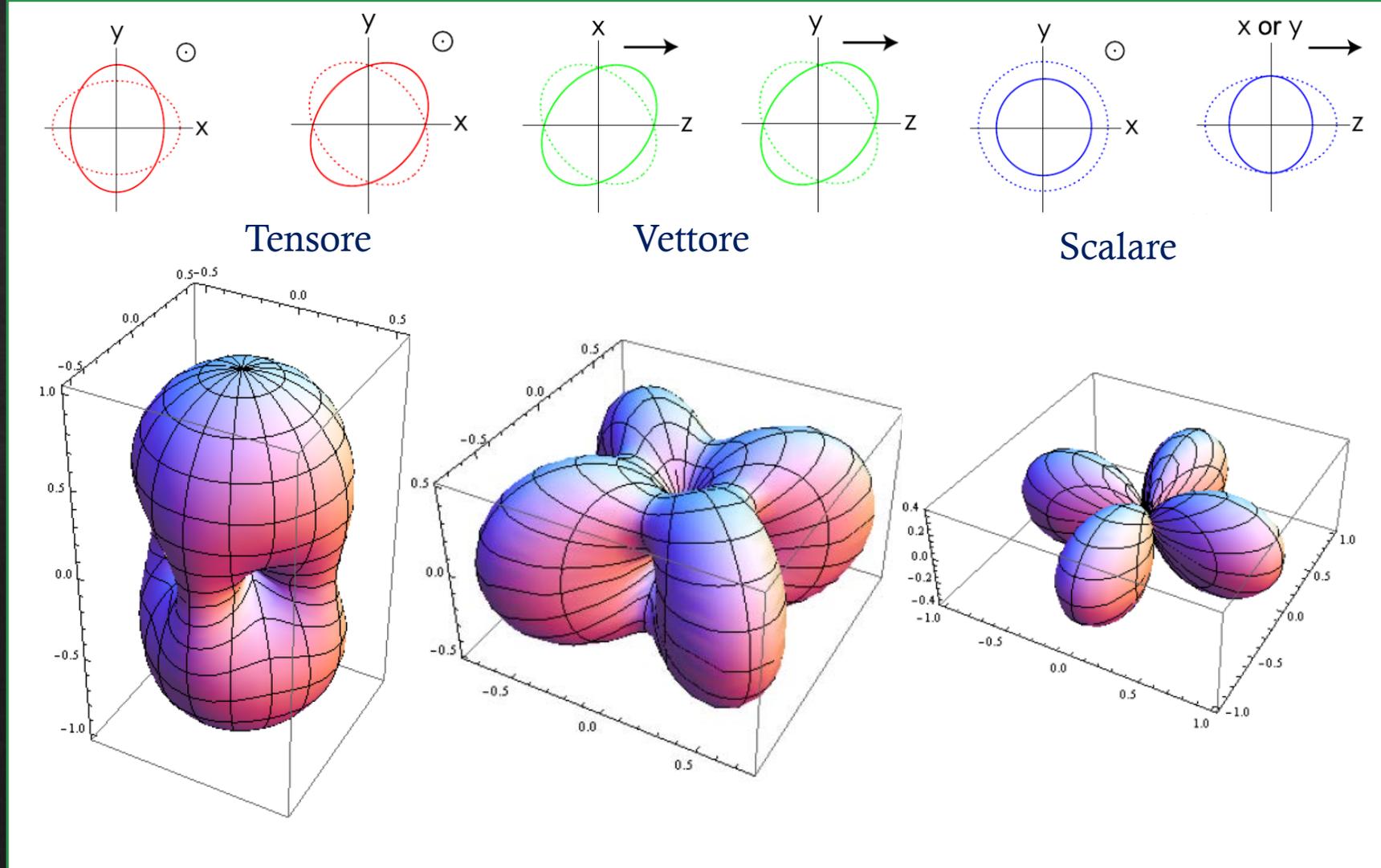
$$m_g < 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2$$

◇ Risultati basati su gravitational lensing e cluster di galassie sono migliori, ma dipendenti dal modello



Studio delle polarizzazioni

- ◇ I due interferometri LIGO sono all'incirca allineati
- ◇ Impossibile usare la dipendenza della *angular pattern function* per discriminare diverse polarizzazioni
- ◇ Questo cambierà con Virgo in presa dati



Referenze



The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration, *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*. Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016) arXiv:1602.03837



The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration, *Test of General Relativity with GW150914* arXiv:1602.03841



Khan et al., *Frequency-domain gravitational waves from nonprecessing black-hole binaries. II. A phenomenological model for the advanced detector era*. Phys. Rev. D 93, 044007



Zhu et al., *Testing Theories of Gravitation Using 21-Year Timing of Pulsar Binary J1713+0747*, ApJ 809, 1 (2015)