

ALLA RICERCA DELLE ONDE

GRAVITAZIONALI

Valeria Ferrari

Universita' di Roma "La Sapienza"

Napoli 22 – 2 – 2007

- effetti prodotti da un'onda gravitazionale quando interagisce con un sistema fisico : strumenti per rivelarle, bande di frequenza in cui operano
- come stimare l'energia emessa da un sistema che si evolve
- alcune delle sorgenti piu' interessanti
- informazioni di fisica fondamentale

l'effetto di un'onda gravitazionale e' quello di far variare la distanza propria tra due punti dello spaziotempo

onda

PRIMA : $ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$

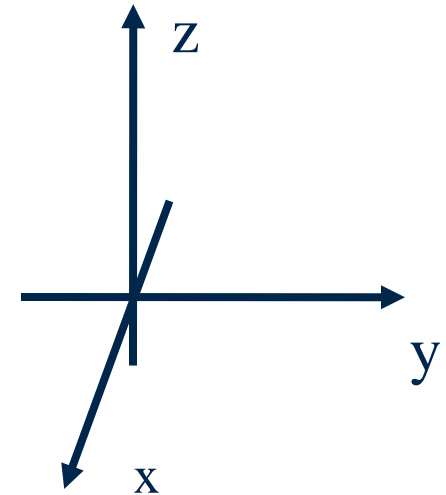
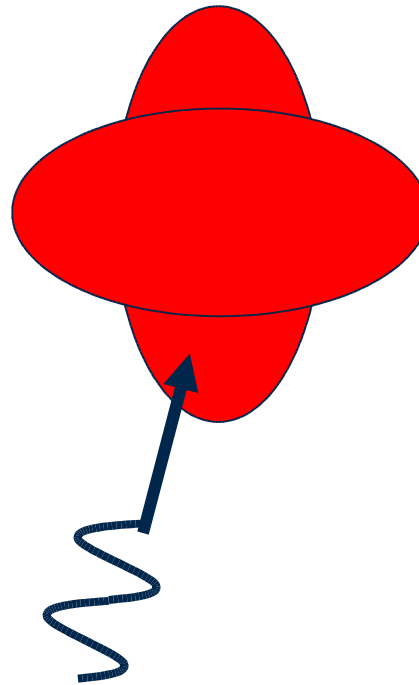
Arriva l'onda:

Trasversa

A traccia nulla

Due stati di polarizzazione

$$h_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} (t) & (x) & (y) & (z) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_+ & h_x \\ 0 & 0 & h_x & -h_+ \end{pmatrix}$$



$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 -$

$[1+h_+(ct -x)] dy^2 + [+ h_+(ct -x)]dz^2 - h_x(ct -x)dy dz$

Rivelatori di onde gravitazionali

ricerca iniziata in Italia da Edoardo Amaldi negli anni sessanta

Antenne risonanti:

EXPLORER (CERN) in funzione dal 1990

NAUTILUS (Frascati)

AURIGA (Legnaro)

$\nu \sim 1 \text{ kHz}$

ALLEGRO (Lousiana)

per es. **EXPLORER** e' un cilindro di una lega di alluminio

lungo 3 metri, 60 cm di diametro, peso 2300 kg, opera a 2 K

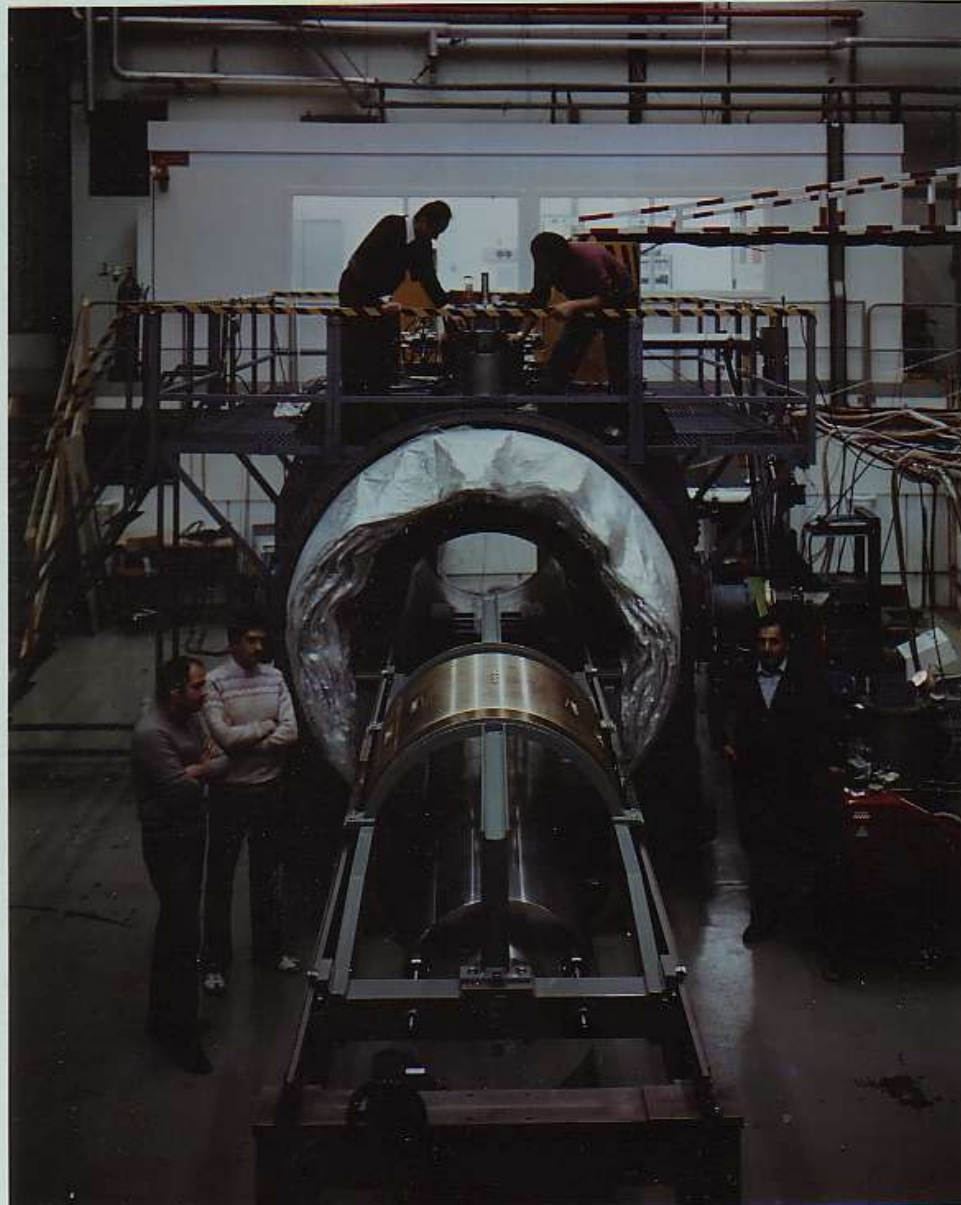
Rivelatori proposti o in sviluppo:

Sfera piena $d \sim 3 \text{ m}$, $\nu \sim 1 \text{ kHz}$ Sfera cava $d \sim 3 \text{ m}$, $\nu \sim 200 \text{ Hz}$

DUAL: rivelatore risonante a banda larga $\nu \sim 1\text{-}3 \text{ kHz}$

EXPLORER (CERN)

In funzione
dal 1990



Interferometri terrestri:

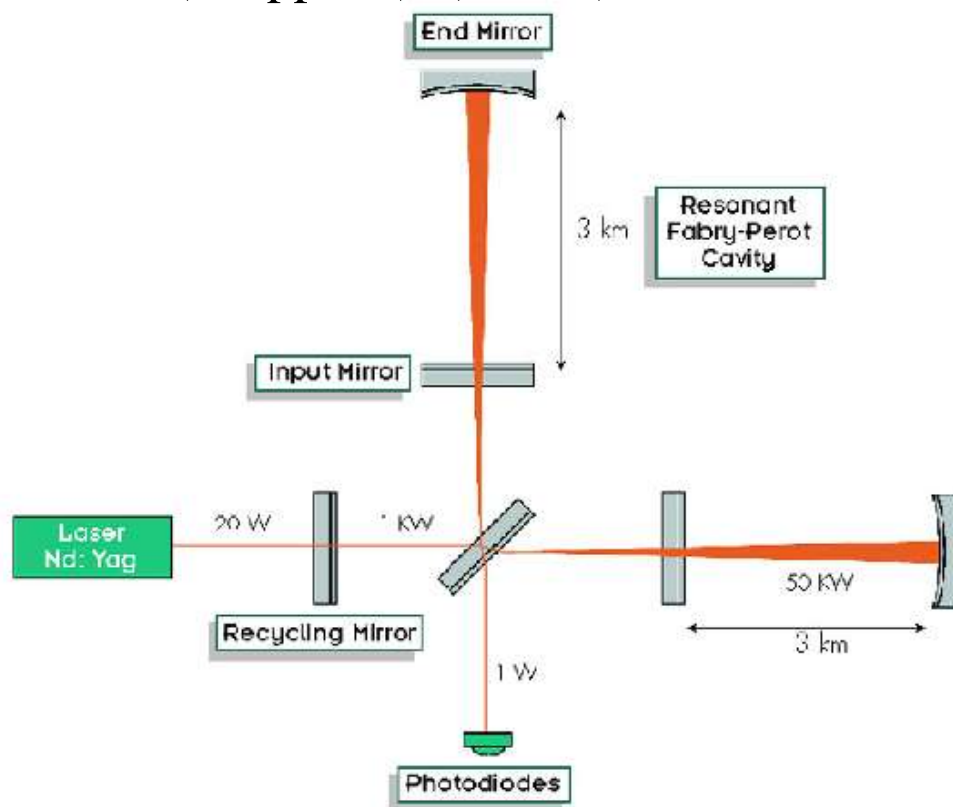
VIRGO (Pisa) (3 km)

LIGO 3 interferometri: 2 a Hanford (WA) di 4 e 2 km,

1 a Livingston (CA) di 4 km

GEO600 (Hannover) (600 m)

TAMA300 (Giappone) (300 m)



10 - 40 Hz < ν < 1-2 kHz

Perche' i bracci dell'interferometro devono essere cosi' lunghi?

- ◆ Se l'onda e' perpendicolare al braccio, integrando l'equazione della deviazione geodetica si trova che la distanza tra gli specchi varia

$$l = \frac{1}{2} h l$$

- ◆ Le fluttuazioni nel numero di fotoni laser che vengono usati simula una variazione della lunghezza del braccio pari a

$$l = \sqrt{\left(\frac{h c \lambda}{\pi P} \nu \right)}$$

λ lunghezza d'onda della luce di potenza P

ν banda di frequenza del segnale

- ◆ Quindi la minima ampiezza dell'onda rivelabile e'

$$h > 2 \quad l / l = 2 \sqrt{\left(\frac{h c \lambda}{\pi P} \nu \right)}$$

Se $P = 1000 \text{ W}$, $\lambda = 0.6 \text{ } \mu\text{ m}$ $\nu \sim 1000 \text{ Hz}$

per avere $h > 10^{-21}$

Dovrebbe essere $l = 30 \text{ km!!!}$

Interferometri terrestri:

VIRGO (Pisa) (3 km)

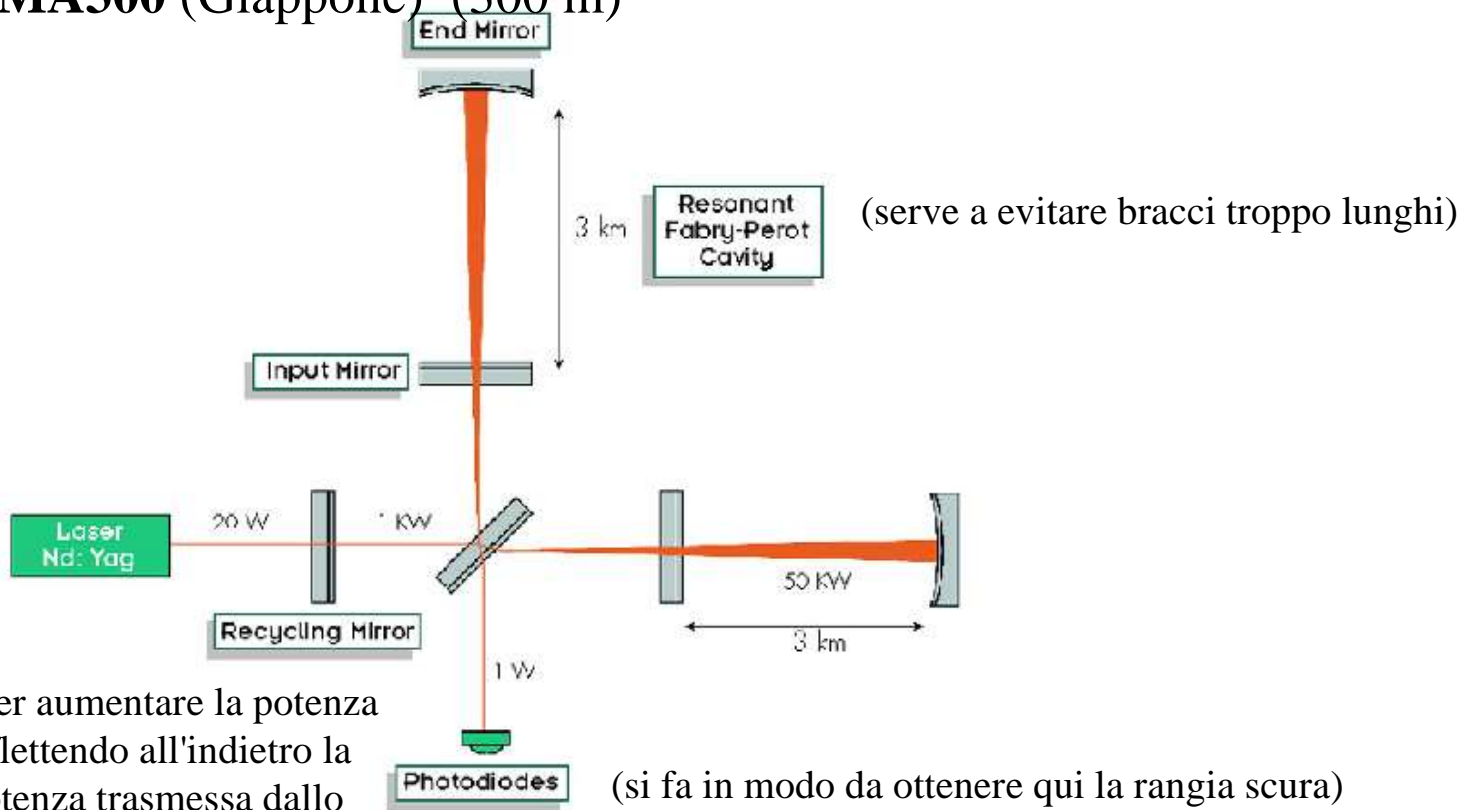
LIGO 3 interferometri: 2 a Hanford (WA) di 4 e 2 km,

1 a Livingston (CA) di 4 km

GEO600 (Hannover) (600 m)

10-40 Hz < ν < 1-2 kHz

TAMA300 (Giappone) (300 m)



(per aumentare la potenza riflettendo all'indietro la potenza trasmessa dallo specchio centrale)

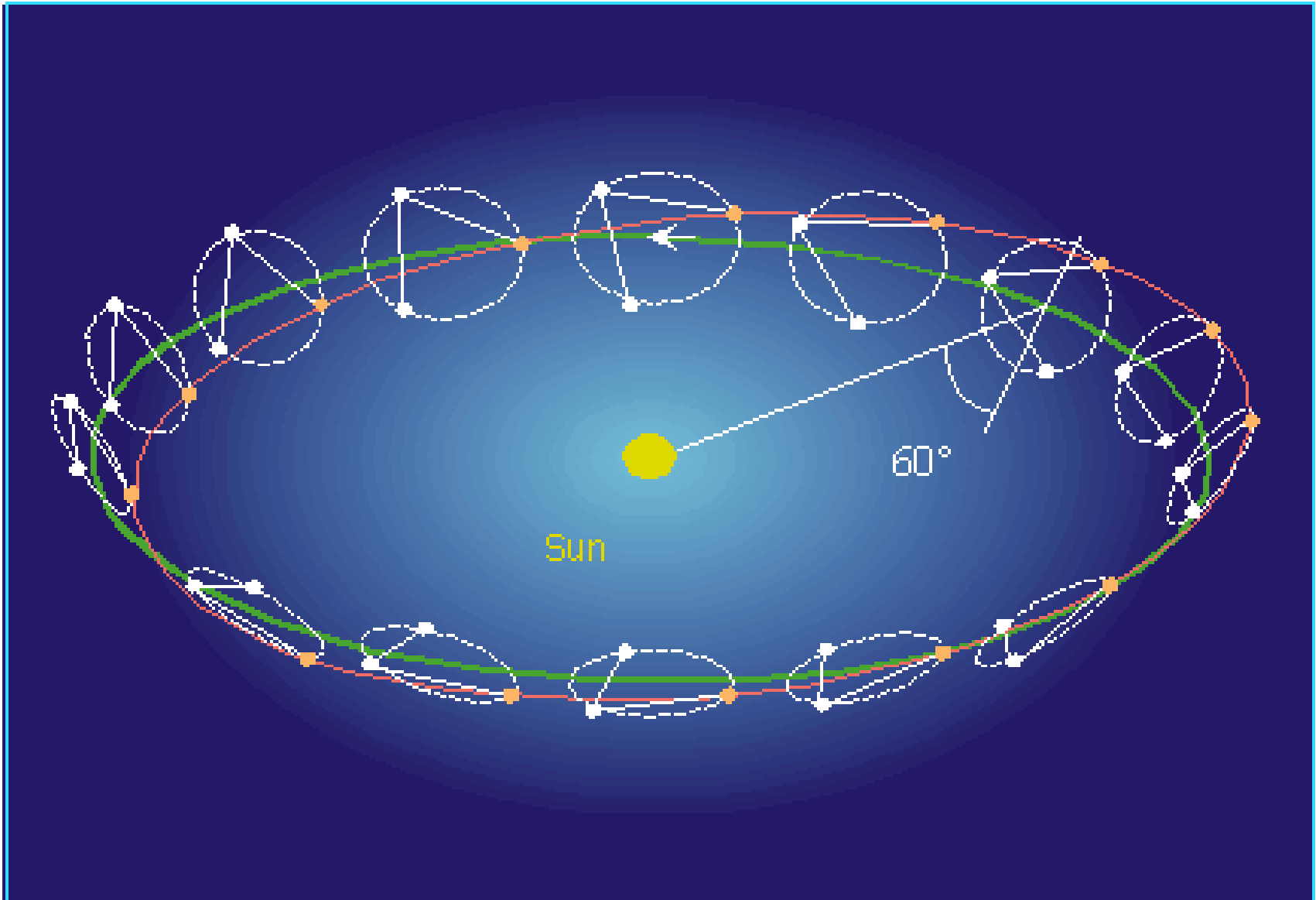
(si fa in modo da ottenere qui la rangia scura)

Interferometro nello spazio: LISA

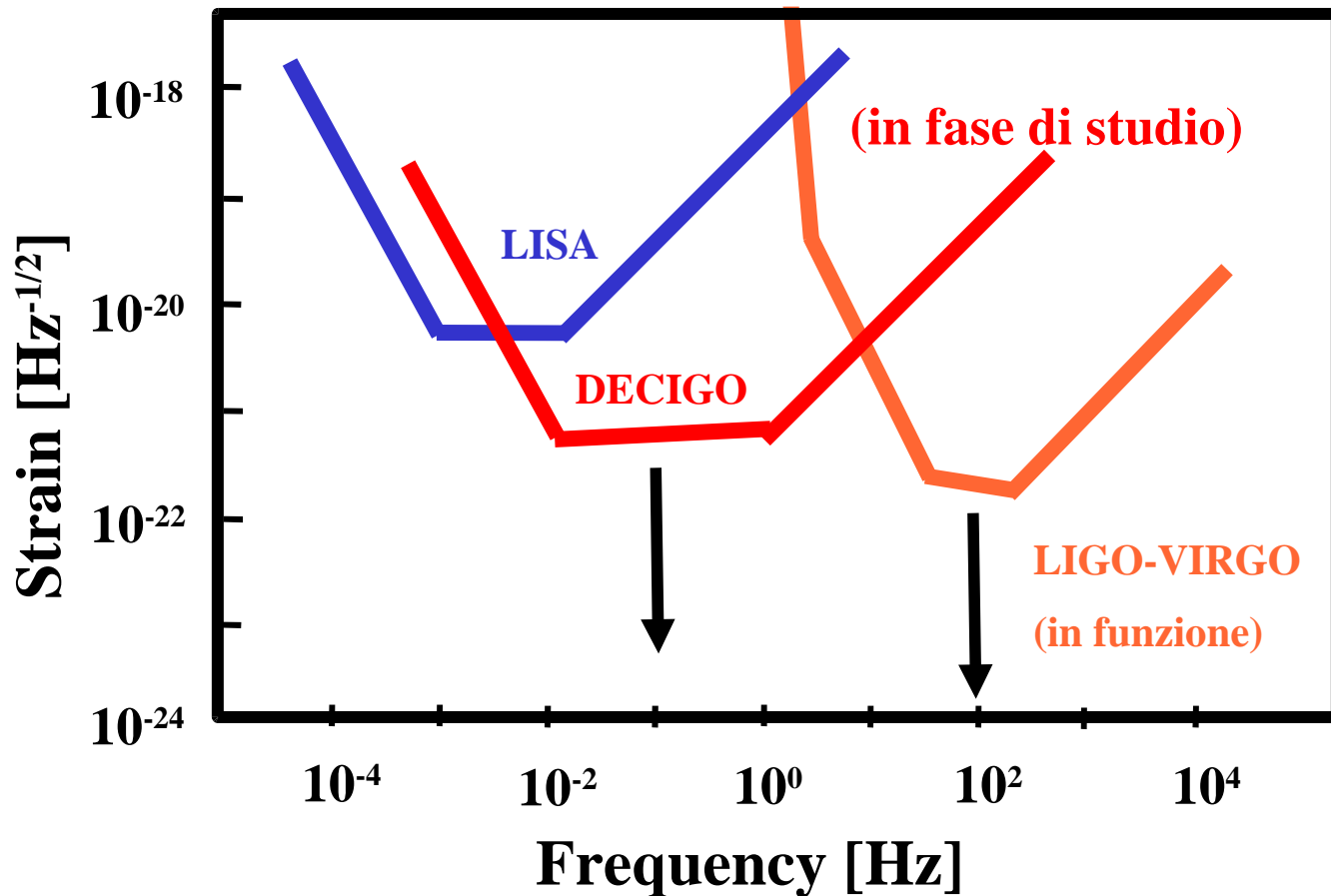
$10^{-4} \text{ Hz} < \nu < 10^{-1} \text{ Hz}$

$L = 5 \times 10^6 \text{ km}$

(nello spazio c'e' meno rumore!)



Banda di frequenza coperta dai rivelatori interferometrici



Come stimare l'energia emessa in onde gravitazionali da un sistema che si sta evolvendo dinamicamente

FORMALISMO DI QUADRUPOLO

- $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}, \quad |h_{\mu\nu}| \ll 1,$ Campo debole
- $v \ll c \rightarrow \Omega R \ll c,$ Basse velocità

$$h_{00} = 0, \quad h_{k0} = 0,$$

$$h_{kn}(t-r/c) = (2G/c^4) (1/r) d^2/dt^2 [q_{kn}(t)] \quad k,n=1,3$$

$$q^{kn}(t) = \int_{\text{source volume}} \rho(t, \mathbf{x}^i) x^k x^n d^3x \quad \rho = \text{densità di energia}$$

$$2G/c^4 = 8 \cdot 10^{-50} \text{ s}^2/\text{g cm}$$

STELLE TRIASSIALI ROTANTI $v_{GW} = 2 \times \text{freq. rot}$

$$h \sim 4.2 \times 10^{-24} \left(\frac{ms}{P} \right)^2 \left(\frac{r}{10 \text{ kpc}} \right)^{-1} \frac{I}{10^{45} \text{ g cm}^2} \left(\frac{\epsilon}{10^{-6}} \right)$$

I = momento di inerzia

ϵ = oblateness

Visibili da VIRGO/LIGO

con un anno di integrazione

se $h \geq 10^{-26}$

La conoscenza di ϵ

e' molto importante

DA STUDI TEORICI

$$10^{-8} < \epsilon < 10^{-6}$$

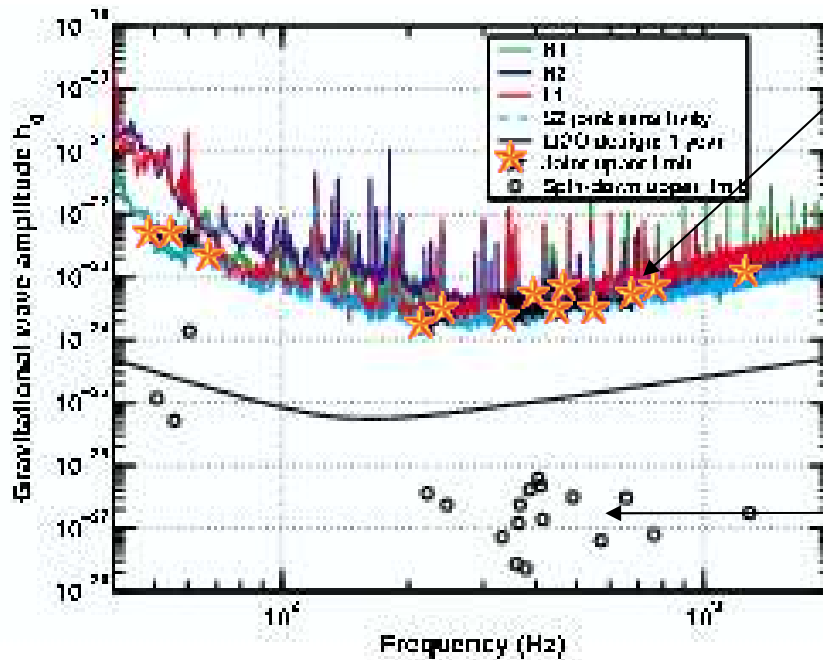
Ushmirsky, Cutler, Bildsten 2000

Pulsar :	v_{GW}	ϵ_{\max}
Vela	22Hz	$1.8 \cdot 10^{-3}$
Crab	60Hz	$7.5 \cdot 10^{-4}$
Geminga	8.4 Hz	$2.3 \cdot 10^{-3}$
PSR B 1509-68	13.2Hz	$1.4 \cdot 10^{-2}$
PSR B 1706-44	20Hz	$1.9 \cdot 10^{-3}$
PSR J 0437-4715	348 Hz	$2.9 \cdot 10^{-8}$

Gourghoulon-Bonazzola 1996

Risultati di LIGO: limiti superiori all'emissione GW di 28 pulsars isolate
 2 mesi di dati 14 febbraio-14 aprile 2003 *PRL 94, 181103 2005*

Limiti superiori trovati analizzando i dati

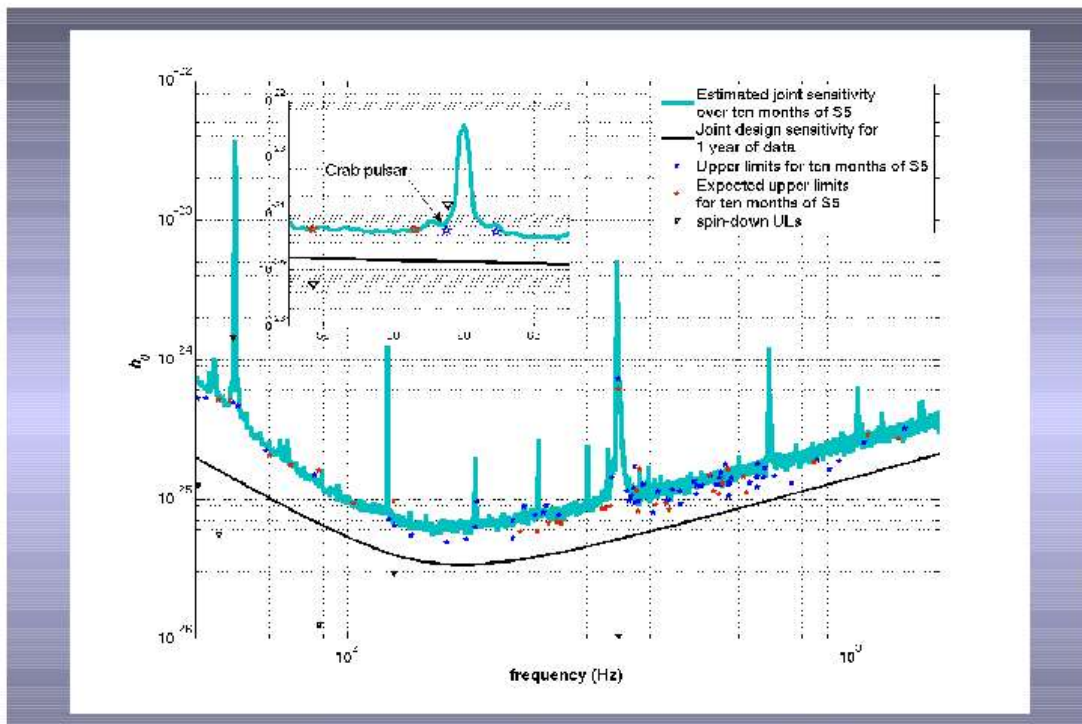


ϵ (oblateness) $< 10^{-5}$
 per le 4 pulsars piu' vicine

10^{-25}

Limiti superiori dallo spin-down delle pulsars
 (assumendo tutta l'energia persa va in GW)

Ultimi Risultati di LIGO: nuovi limiti superiori con 10 mesi di dati
 Risultati presentati da *M. Pitkin al GWDAW11 Potsdam 19-12-2006*



$$h_0 < 10^{-25} \text{ per 35 PSR}$$

$$10^{-25} < h_0 < 5 \cdot 10^{-25} \text{ per 56 PSR}$$

$$\epsilon \text{ (oblateness)} < 5 \cdot 10^{-6} \text{ per 25 pulsars}$$

Notare che: le misure astrofisiche di spin down non sono accurate; infatti molte pulsars sono in globular clusters e hanno accelerazioni locali che, per effetto Doppler, mascherano lo spin-down intrinseco (a volte addirittura simulano uno spin-up)

Le osservazioni di LIGO per la prima volta danno informazioni sulla frequenza di spin-down indipendenti dalla dinamica del cluster

L'EVOLUZIONE DI UN SISTEMA BINARIO FORMATO DA OGGETTI COMPATTI E' GOVERNATA DALL'EMISSIONE DI GW:

a causa della perdita di energia:

- ♠ l'orbita si contrae
- ♠ la velocità orbitale aumenta
- ♠ l'emissione aumenta
- ♠ il processo di inspiralling diventa sempre più veloce fino al merging e alla formazione di un unico oggetto

◆ **Sistemi binari lontani dal merging**

◆ **Sistemi binari nelle ultime fasi della coalescenza**

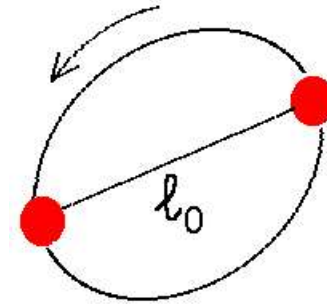
◆ Sistemi binari lontani dal merging

PULSAR BINARIA **PSR 1913 + 16 (1975)**

$$M_1 = M_2 \sim 1.4 M_\odot \quad l_0 = 2 R_\odot$$

$$P = 7\text{h } 45\text{m } 7\text{s} \quad e = 0.617$$

$$d \sim 5000\text{pc}$$



- Energia irradiata in GW (formula di quadrupolo)

$$\frac{dE}{dSdt} = \frac{c^3}{16\pi G} \langle \dot{h}_{\mu\nu} \dot{h}^{\mu\nu} \rangle$$

$$\text{Stimato} = \frac{dP}{dt} = -7.2 \cdot 10^{-5} \text{ yr}^{-1} = -2.4 \cdot 10^{-12}$$

$$\text{Osservato} = \frac{dP}{dt} = -(2.4184 \pm 0.0009) 10^{-12}$$

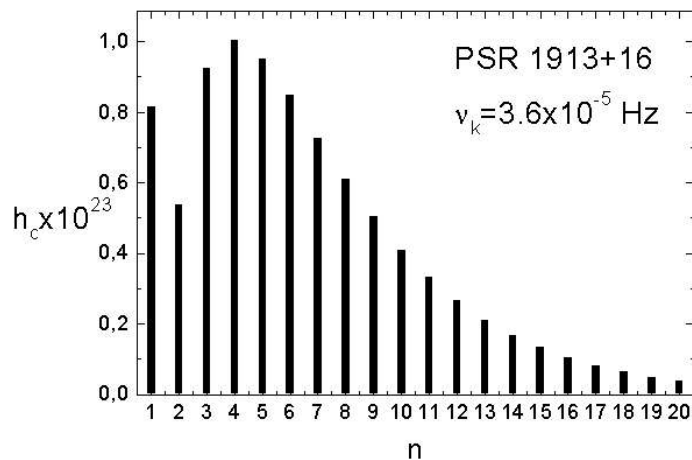
Prima evidenza indiretta dell'esistenza delle onde gravitazionali

Nobel a Hulse e Taylor nel 1993

Possiamo rivelare queste onde **direttamente**?

Se il sistema fosse in orbita circolare emetterebbe GW a una frequenza pari a due volte quella del moto orbitale

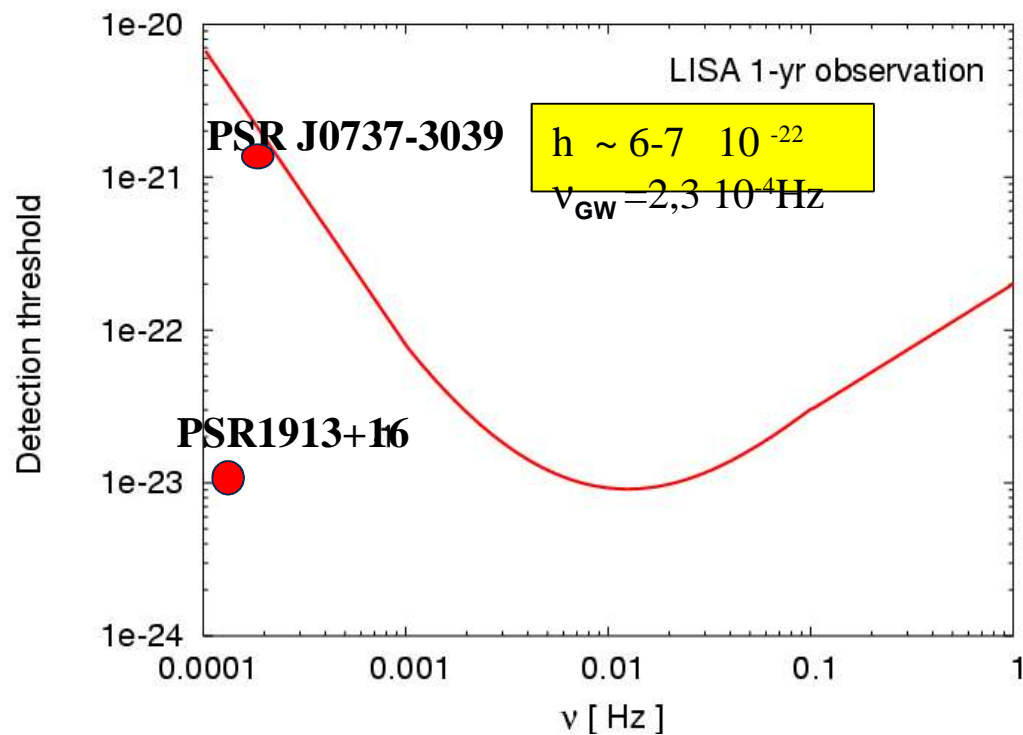
Se l'orbita e' ellittica, l'emissione avviene a righe a frequenze multiple della orbitale; il numero di righe spettrali cresce con l'ellitticita'



$h_c \approx 10^{-23}$
 $\nu \approx 1.4 \times 10^{-4} \text{ Hz}$

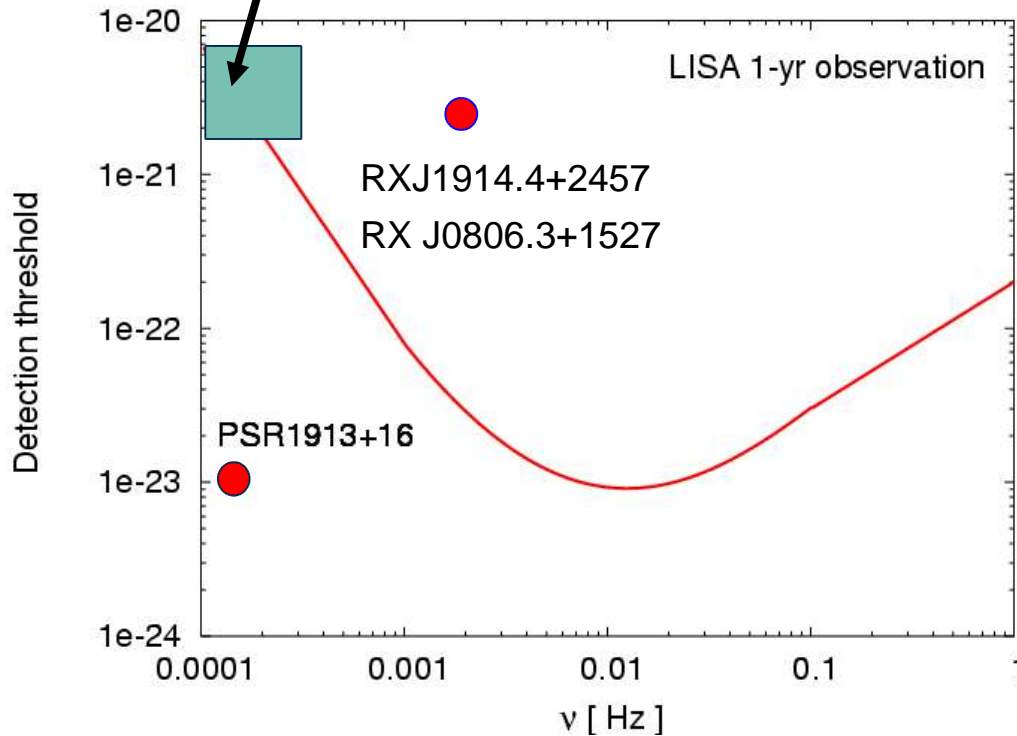
PSR J0737-3039
 Burgay, D'amico, Possenti et al,
 Letter to Nature vol.426, 531, 2003
 Porb=2.4 ore
 e=0.088 orbita quasi circolare
 m1=1.337 Msun
 m2=1.250 Msun
 distanza dalla Terra: 5-600 pc
 (circa 10 volte piu' vicina di PSR1913+16)

S/N = 5



LISA (Laser Interferometer Space Antenna)

Variabili Cataclismiche con piccolo periodo orbitale: Primaria: Nana Bianca, Secondaria: stella che riempie il suo Roche-lobe e trasferisce materia sulla compagna



Double-degenerate binary systems
(WD-WD, WD-NS)

observed system ~ 10

Ultra-short period : < 10 minutes
Strong X-ray emitter

RXJ1914.4+2457

$M_1 = 0.5 M_{\text{sun}}$ $M_2 = 0.1 M_{\text{sun}}$

$P = 9.5$ min

◆ Sistemi binari nelle ultime fasi della coalescenza:

main target degli interferometri terrestri

Approccio di quadrupolo: masse puntiformi in orbita

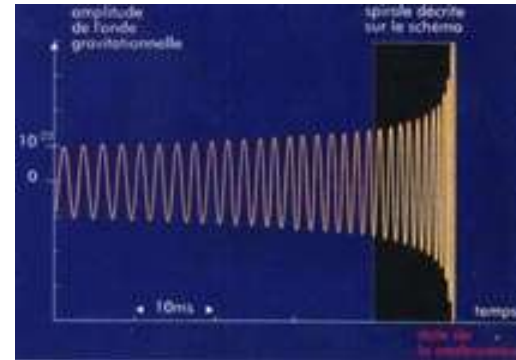
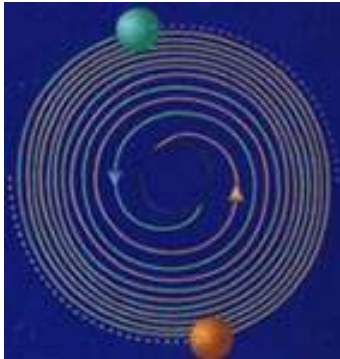
circolare+ reazione di radiazione

Il raggio dell'orbita diminuisce

La frequenza aumenta

$$R(t) = R_{in} (1 - t/t_{coal})^{1/4}$$

$$\nu = \frac{1}{\pi} \left[\frac{5}{256} \frac{1}{\mu M^{2/3}} \frac{1}{(t_{coal}-t)} \right]^{3/8}$$



CHIRP

$$t_{coal} = \frac{5}{256} \frac{R_{in}^4}{\mu M^2}$$

$$\mu = M_1 M_2 / M$$

massa ridotta del sistema

Questo e' il segnale emesso fino a poco prima dell'ultima orbita

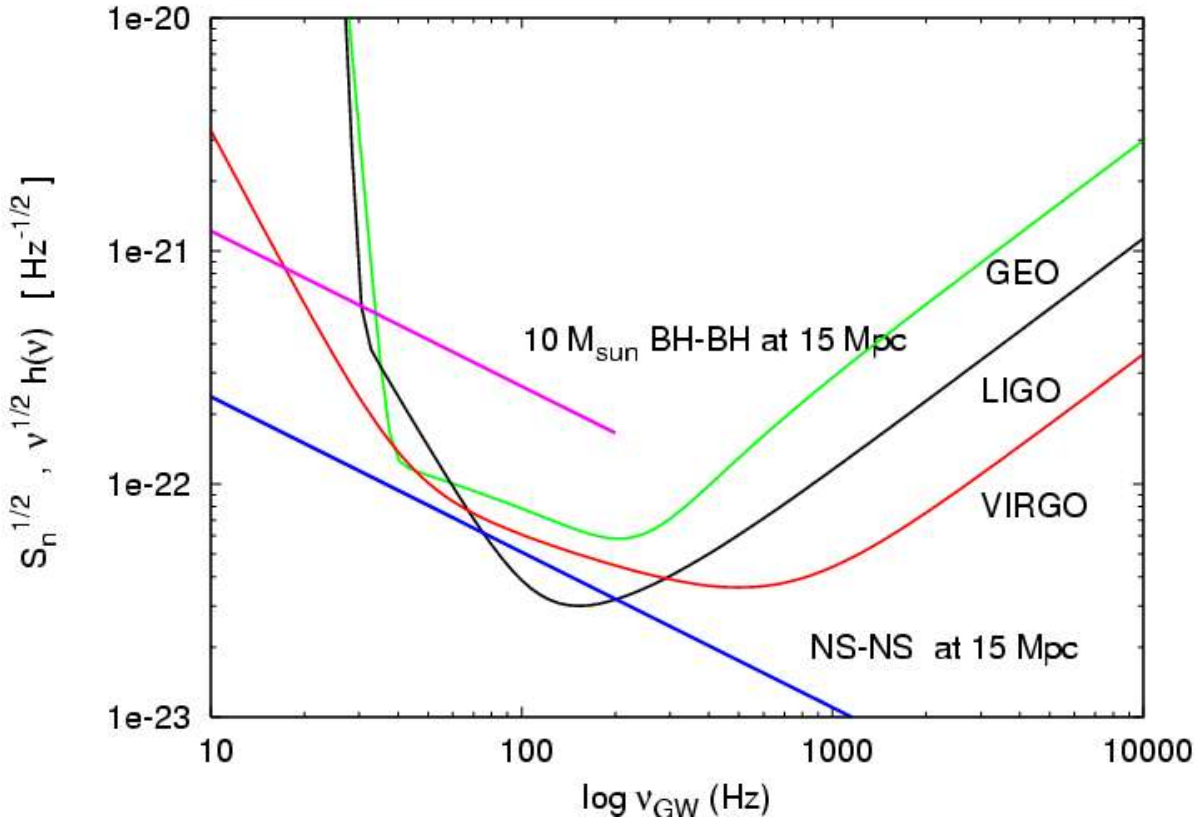
circolare stabile (ISCO)

$$R_{ISCO} \sim 6 G M / c^2$$

$$M = M_1 + M_2$$

Un sistema binario coalesce nel VIRGO cluster (d ~ 15 Mpc):

Segnale prodotto durante la fase di spiraleggiamento (prima del merging)

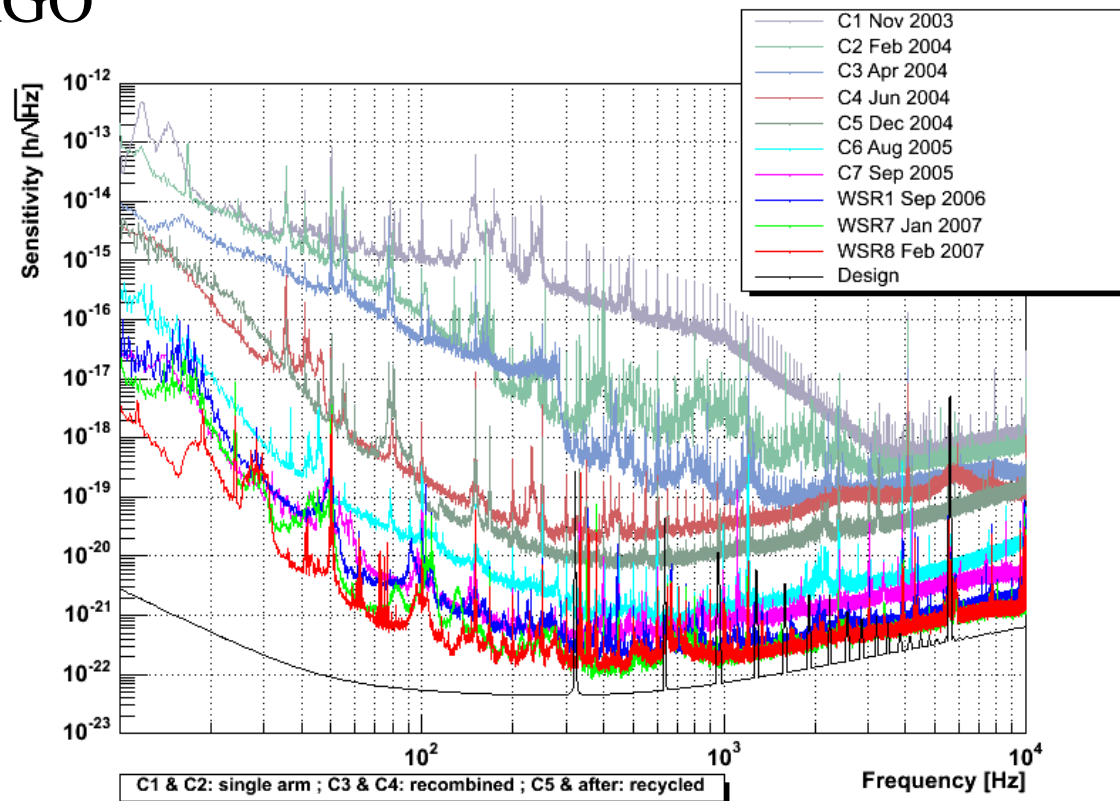


I segnali stanno nella banda di VIRGO piu' a lungo :
NS-NS : LIGO ~ 25 secondi VIRGO ~ 17 minuti
BH-BH: LIGO ~1 secondo VIRGO ~ 38 secondi

Mtot massima che si puo' vedere
~ 130 M_{sun}

Situazione attuale degli interferometri terrestri

VIRGO

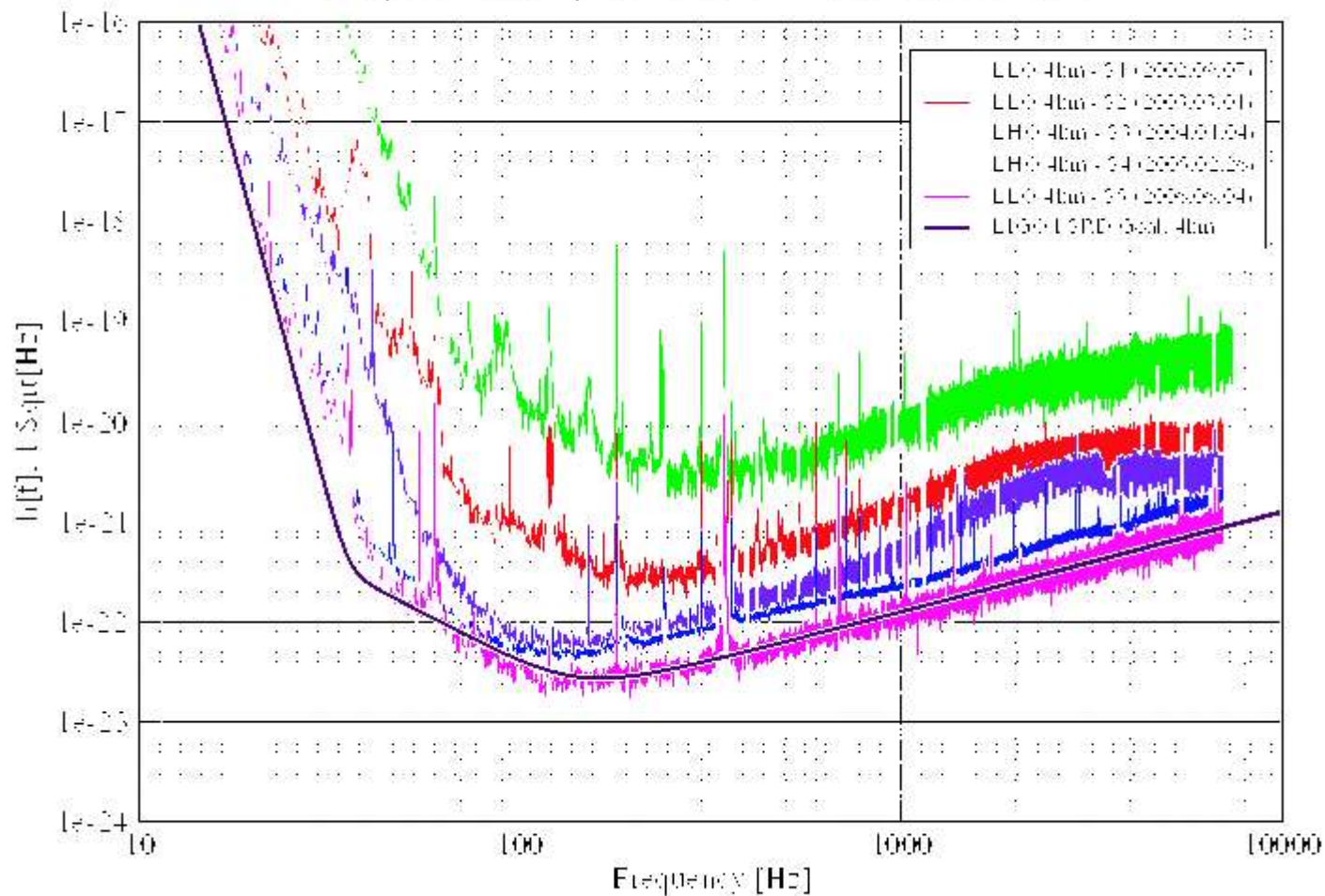


Situazione attuale degli interferometri terrestri

LIGO

Best Strain Sensivities for the LIGO Interferometers

Comparisons among S1 - S5 Runs LIGO-G060009-02-Z



Risultati pubblicati di LIGO riguardo la coalescenza

Phys Rev D 72, 082001, 2005

Sistemi coalescenti di stelle di neutroni con masse 1-3 masse solari

15 giorni di dati analizzati; sensibilità dello strumento tale da vedere sorgenti nel raggio di 1.5 Mpc

(include Andromeda e alcune galassie del gruppo locale:

nessun evento osservato. Questo pone un limite superiore agli eventi di questo tipo

47 eventi per anno per galassia

in condizioni di sensibilità massima per LIGO si stima di poter vedere 0.7 eventi l'anno

Phys Rev D 73, 062001, 2006

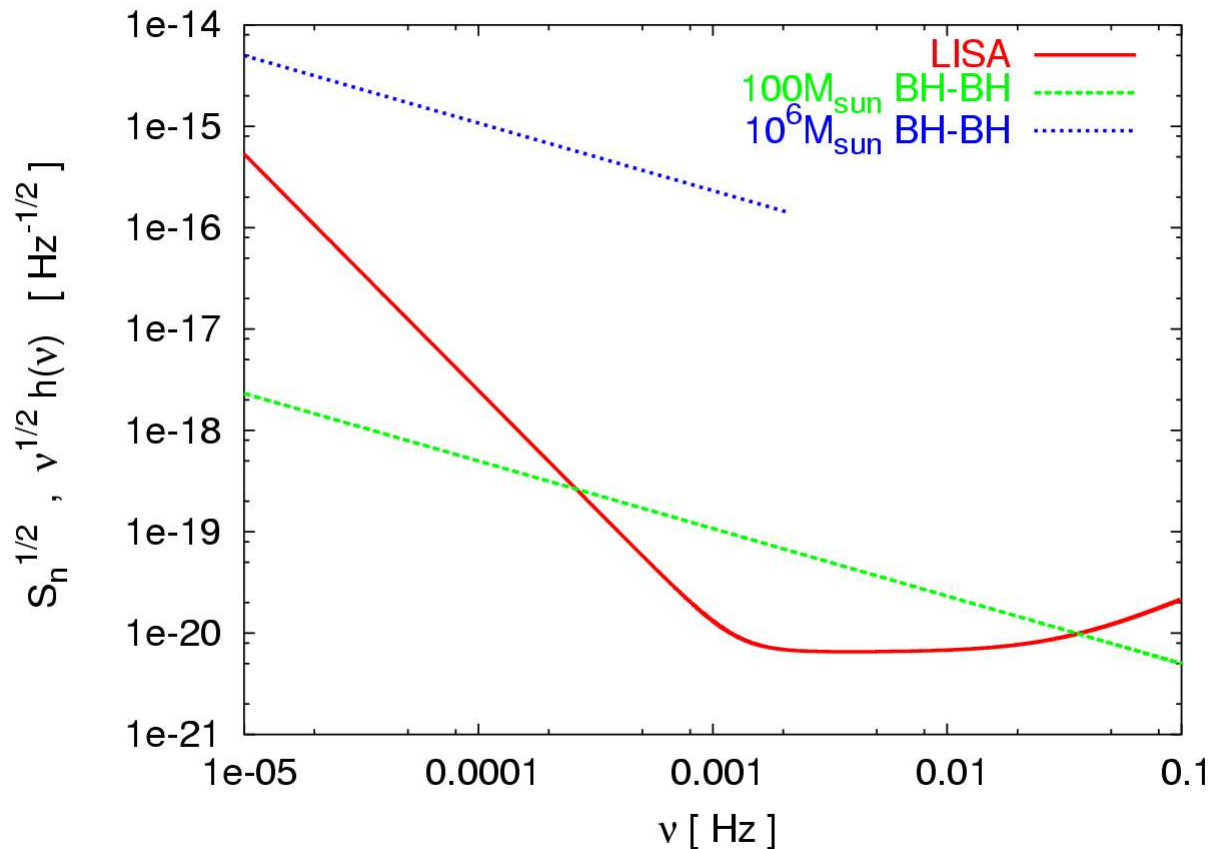
Sistemi coalescenti di stelle di buchi neri con masse 3-20 masse solari

16 giorni di dati analizzati; sensibilità dello strumento tale da vedere sorgenti nel raggio di 1. Mpc

se i sistemi in coalescenza avessero orientazione ottima

nessun evento osservato

Segnale emesso da binarie coalescenti a distanza di 3 Gpc



LISA dovrebbe poter vedere ~ 3 BH-BH binarie/anno con massa compresa tra $3 \cdot 10^3 M_{\text{sun}} < M < 10^5 M_{\text{sun}}$ che sono a circa 30 anni dalla coalescenza

Dovrebbe anche vedere la cattura di NS e piccoli BH dal buco nero al centro della galassia, ma i rates sono sconosciuti

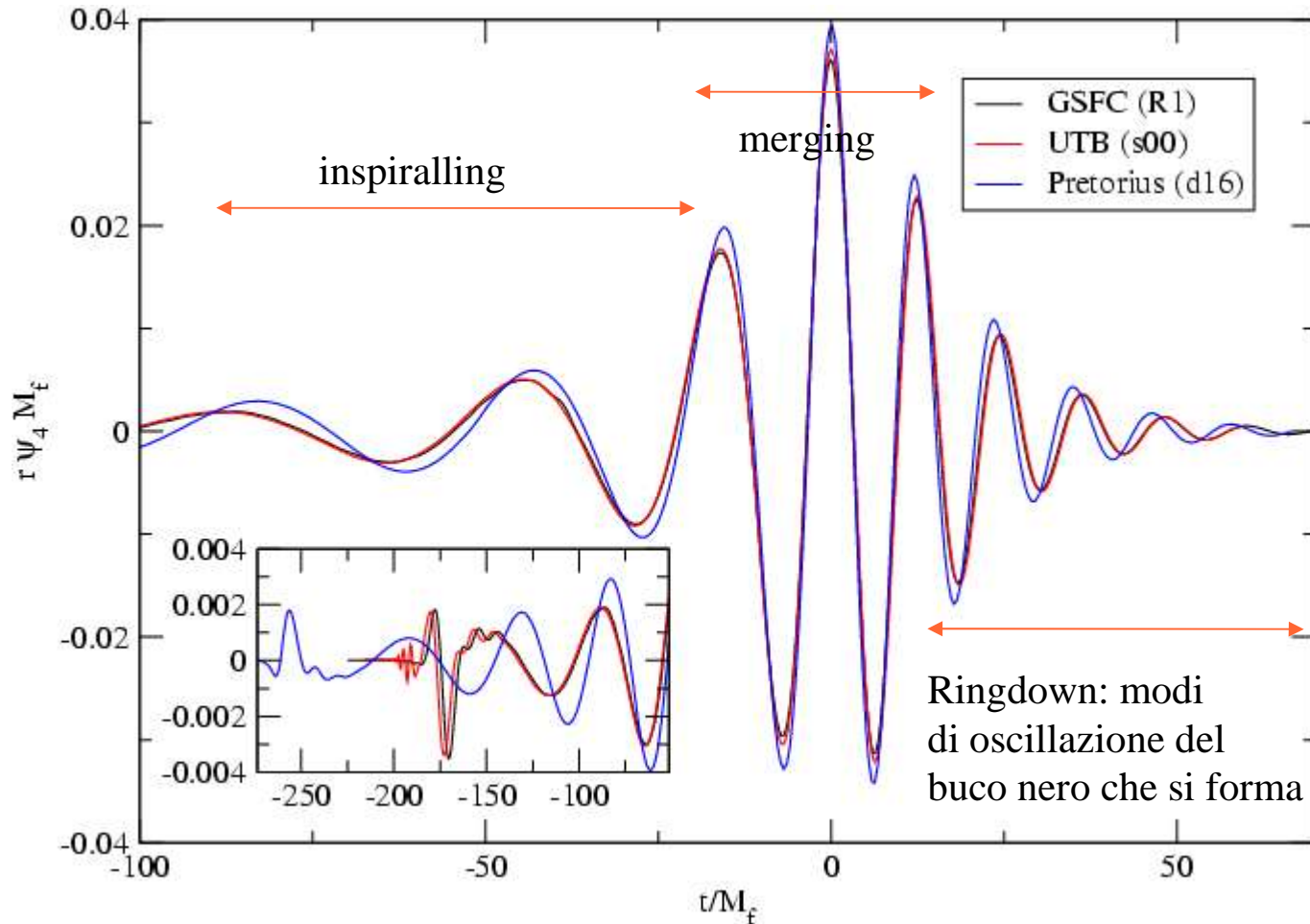
Finora abbiamo considerato la fase della coalescenza che precede il merging:

cosa sappiamo dire di quello che succede dopo?

Simulazioni numeriche della fase di merging sono allo studio (computational challenge)

Ancora non abbiamo templates sufficientemente generali pero' e' stato fatto un grosso passo avanti nella simulazione del segnale emesso nella coalescenza di due buchi neri

Segnale completo emesso nella coalescenza di due buchi neri, ottenuto da tre gruppi diversi, integrando con metodi diversi le equazioni non lineari di Einstein: impossibile fino allo scorso anno!



avere forme d'onda attendibili e' molto importante!

(matched filter) Baker, Campanelli, Pretorius, Zlochower PRD 2007

RINGDOWN:

il buco nero che nasce dalla coalescenza oscilla violentemente nei suoi **modi quasi-normali** ed emette onde gravitazionali a frequenze e con tempi di decadimento che dipendono dalla sua massa e dal suo momento angolare: il segnale e' una sovrapposizione di **sinusoidi smorzate** (si studiano con approcci perturbativi)

Se il buco nero non ruota

$$\text{se } M = n M_{\odot} \quad \nu_{\circ} \sim (12/n) \text{ kHz} \quad \tau \sim n \cdot 5.5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

$$\text{es. } M = 10 M_{\odot} \quad \nu_{\circ} \sim 1,2 \text{ kHz} \quad \tau \sim 0.55 \text{ ms} \quad (\text{VIRGO/LIGO})$$

$$M = 10^6 M_{\odot} \quad \nu_{\circ} \sim 12 \text{ mHz} \quad \tau \sim 55 \text{ s} \quad (\text{LISA})$$

Se il buco nero ruota : la frequenza cresce fino al 30% in piu' per valori molto alti del momento angolare

RINGDOWN:

se l'oggetto compatto che nasce dalla coalescenza e' una stella di neutroni, le frequenze dei modi di oscillazione (e di emissione GW) **dependono dall'equazione di stato della materia al suo interno.**

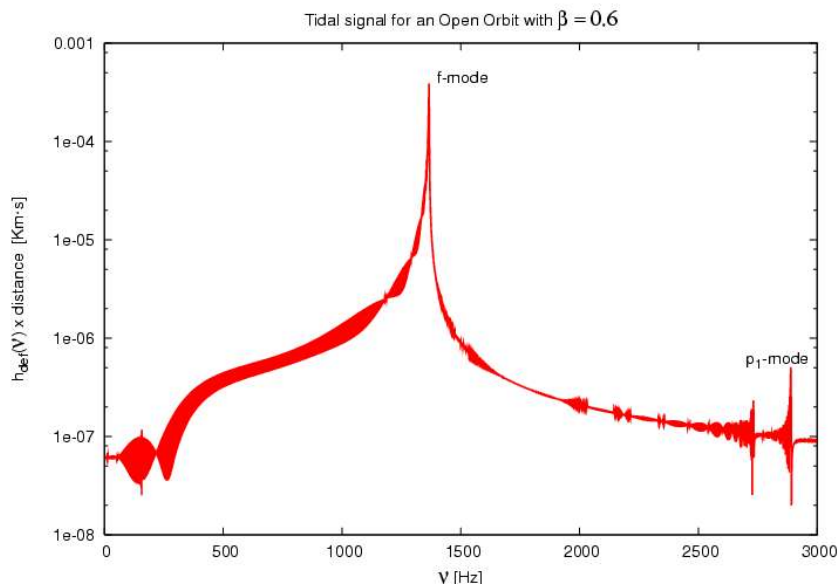
Valori tipici

~ 1-3 kHz

τ ~ decimi di secondo

Fourier-transform di un segnale gravitazionale emesso in un incontro ravvicinato tra una stella di neutroni e un buco nero di $10 M_{\odot}$

Ferrari, Pannarale, in preparation

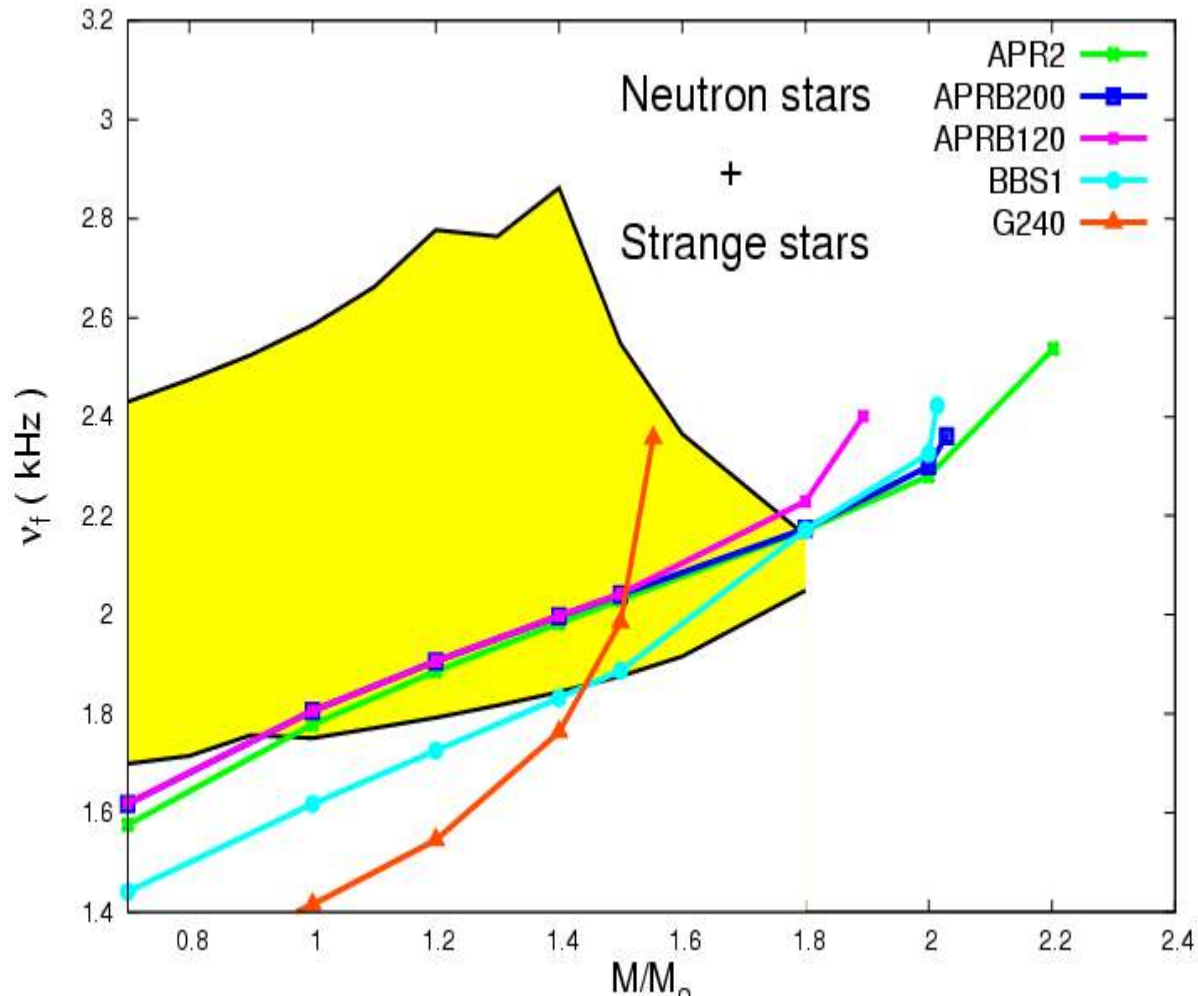


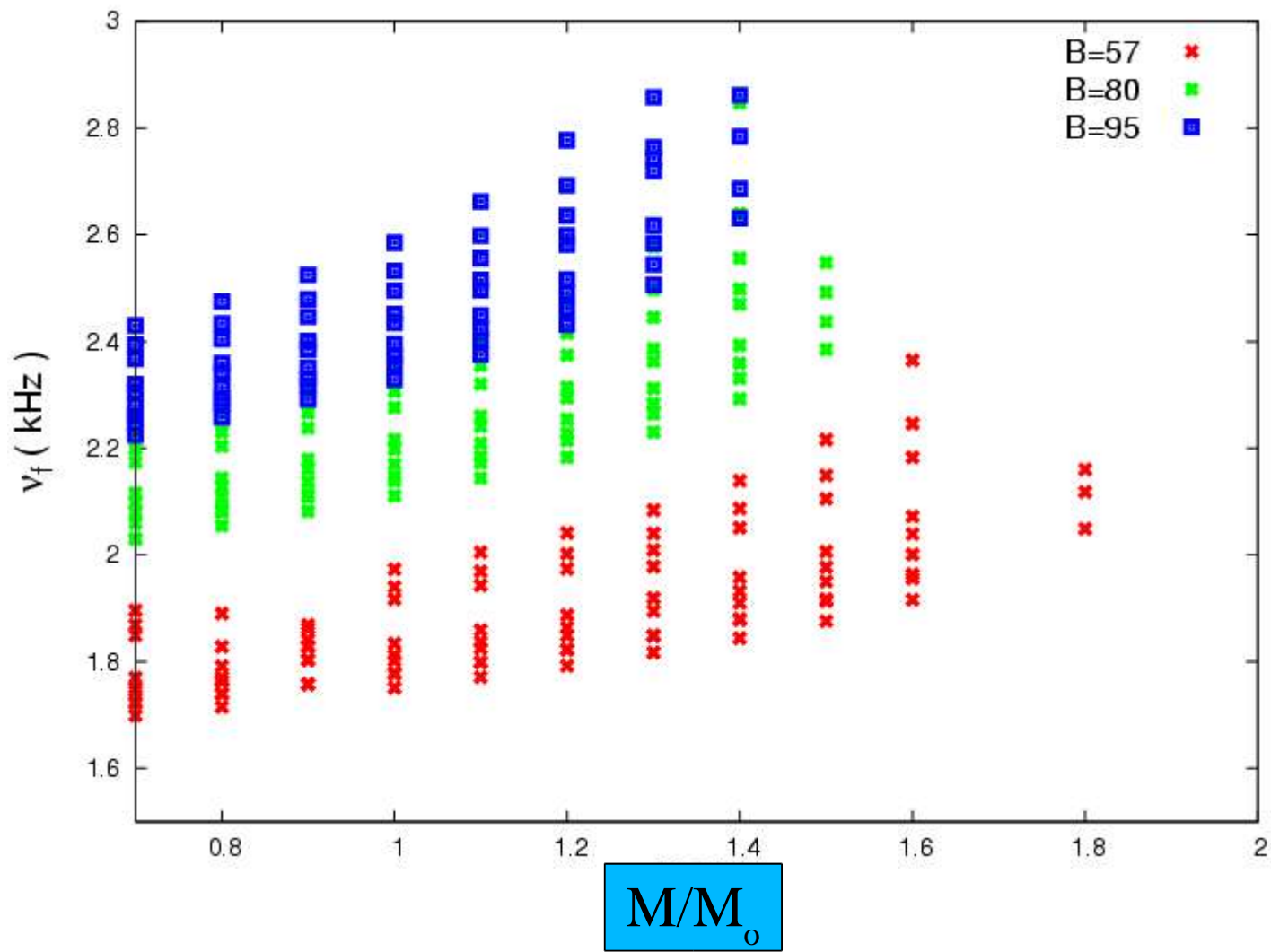
La conoscenza di queste frequenze da' informazioni sull'evoluzione della stella e sull'equazione di stato della materia a densita' superiori alla densita' nucleare $\rho_0 = 2.67 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$, inaccessibili ad esperimenti in laboratorio!

LE ONDE GRAVITAZIONALI DANNO INFORMAZIONI SULLO STATO FONDAMENTALE DELLA MATERIA A DENSITA' NON ACCESSIBILI IN LABORATORIO

costruiamo modelli di stella di neutroni con diverse equazioni di stato nel core e calcoliamo la frequenza dei modi di oscillazione (e di emissione GW)

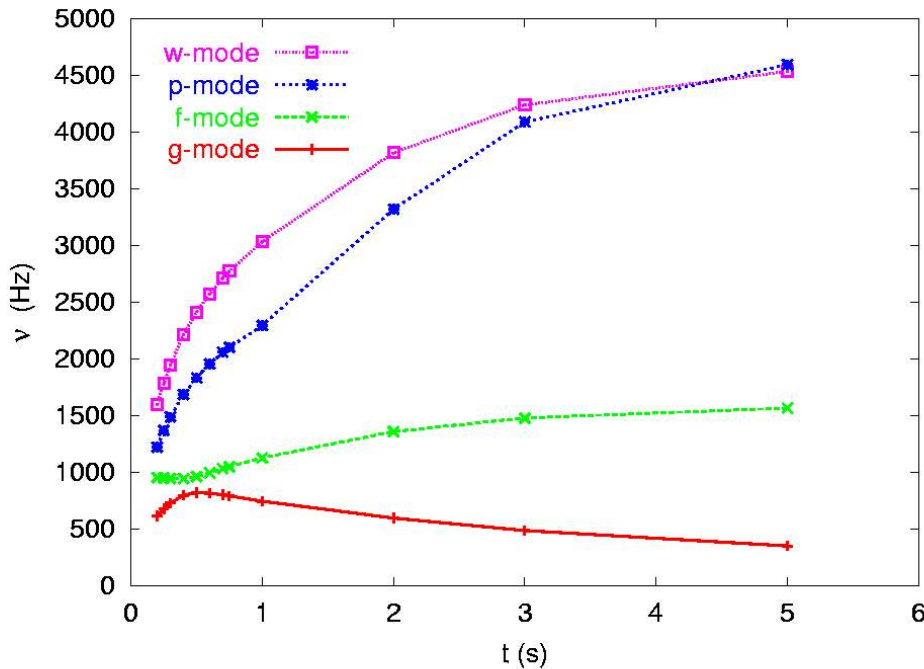
Benhar, Ferrari, Gualtieri *Phys. Rev. D* 70 n.12, 2004, Benhar, Ferrari, Gualtieri, Marassi *GRG*, 2007
in press





Le onde gravitazionali danno informazioni sull'evoluzione delle sorgenti astrofisiche

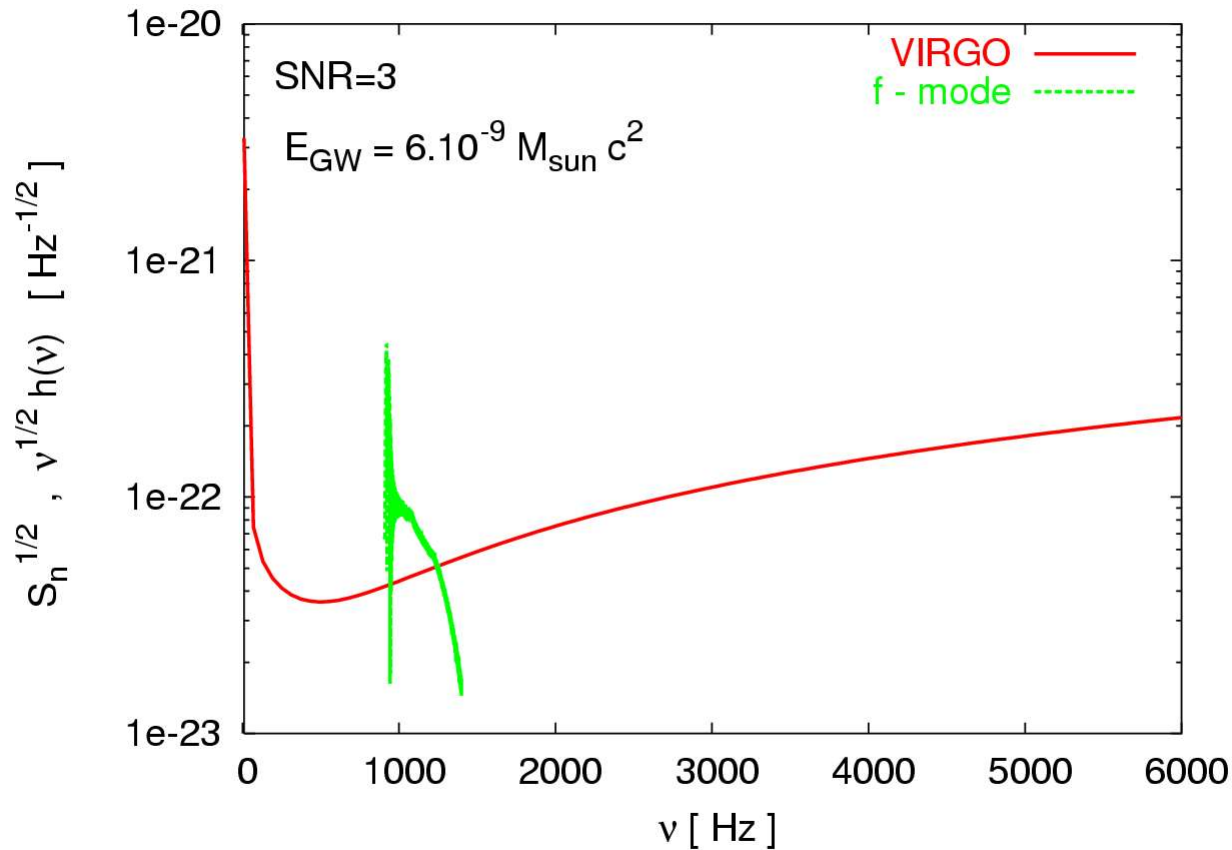
Evoluzione delle frequenze dei modi in una NS appena nata



Il modo in cui queste frequenze variano nel tempo da' informazioni sulla dinamica della fase immediatamente successiva alla formazione (che sia avvenuta in una coalescenza o in un collasso gravitazionale)

Note le frequenze dei modi al variare del tempo, possiamo costruire la forma d'onda del segnale gravitazionale

VIRGO + segnale emesso da una NS appena nata nella galassia



Gravitational waves from newly born, hot neutron Stars

V. Ferrari, G. Miniutti, J. Pons, MNRAS 2003

Per rivelare questi segnali ci vogliono rivelatori molto piu' sensibili alle alte frequenze ($\sim 1-3$ kHz) degli attuali VIRGO-LIGO

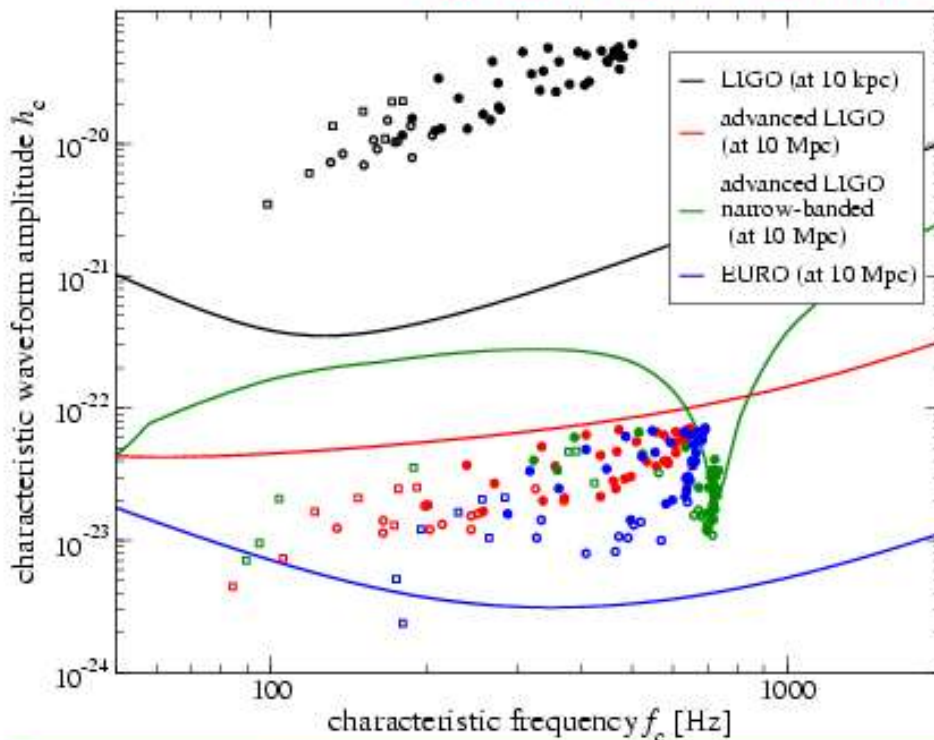


Detection Prospects for Gravitational Wave Detectors

In principle (for not too slow rotation):

- Burst signal from Galactic core collapse supernova **detectable by current detectors**.
- Signal from supernova in Virgo cluster **maybe detectable by 2nd or 3rd generation detectors** (particularly if high frequency sensitivity can be finetuned).

For microphysical EOS: **Parameter space dependence** of signal is significantly smaller.



⇒ **Implications on signal analysis and signal inversion!**

Signals with moderate or slow rotation:
Almost identical frequency.

Three possible **factors of influence**:

- General relativistic gravity.
- Microphysical EOS.
- Deleptonization (most important).

Courtesy of H. Dimmelmeier

Risultati pubblicati di LIGO sulla ricerca di bursts di onde gravitazionali

Class. Quantum Gravity 23, S29, 2006

Nessun evento trovato con una sensibilita' media su tutto il cielo di
 $\sim 10^{-20} - 10^{-19} \text{ Hz}^{-1/2}$

analisi su 8 giorni di dati

Le onde gravitazionali trasportano informazioni sulle prime fasi della vita dell'universo: Background Stocastico

Grandezza che lo descrive

$$\Omega_{\text{GW}}(\nu) = (\nu/\rho_c) (d\rho_{\text{GW}}/d\nu)$$

ρ_c = densita' critica
 $d\rho_{\text{GW}}$ = densita' di energia in GW tra ν e $\nu + d\nu$

Molte possibili sorgenti

- amplificazione di fluttuazioni quantistiche del vuoto durante la fase di inflazione (*Grishchuk 1975,1997*)
- Pre-Big-Bang models di teoria di stringa (*Gasperini & Veneziano 1993,2003*)
- transizioni di fase (*Kosowsky et al 1992*)
- cosmic strings (*Damour & Vilenkin 2000, 2005*)
- background di origine astrofisica (*Ferrari, Schneider Matarrese, 2000,2001*)
(core collapse to BH, stellar instabilities, etc. saranno visibili da Advanced LIGO-VIRGO)

Altri esperimenti/osservazioni non GW che pongono constraints sul background di onde gravitazionali

- Big-Bang Nucleosintesi (BBN)

- tempi d'arrivo del segnale delle millisecond pulsars

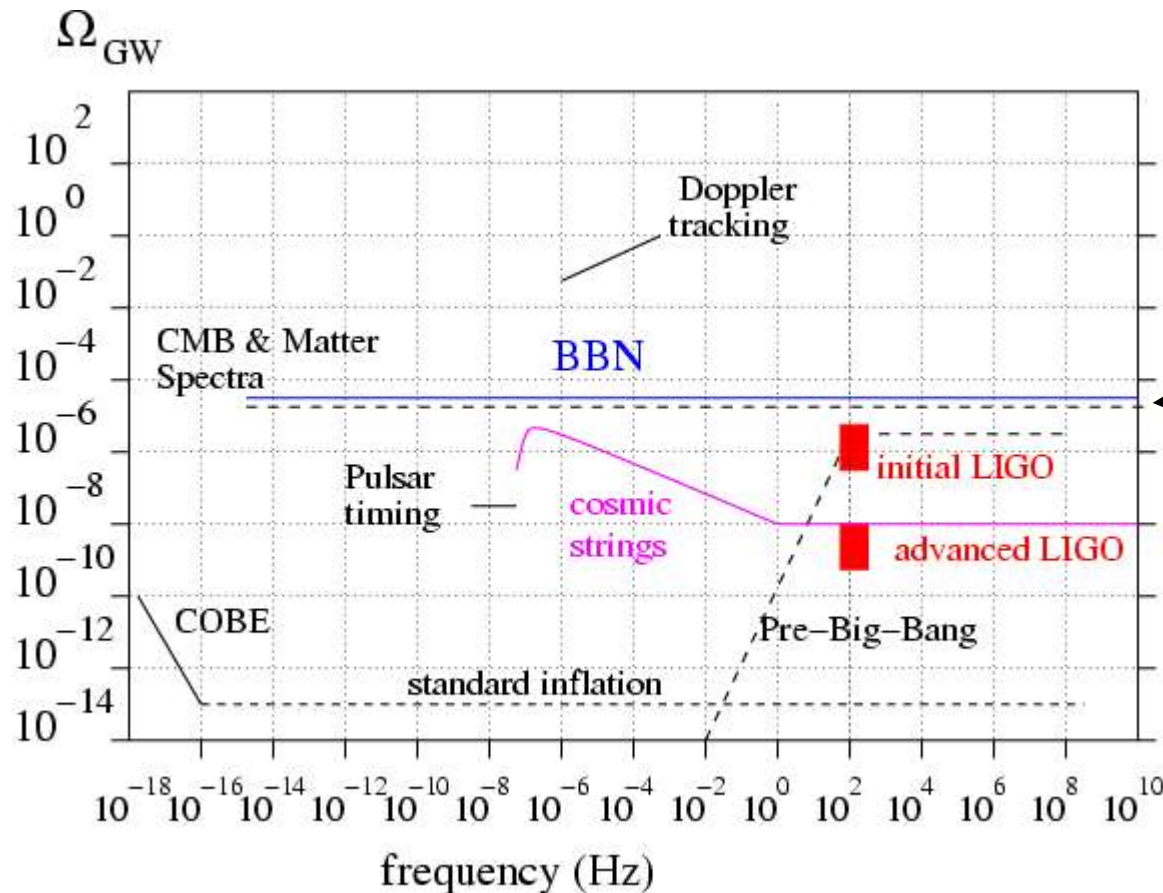
(B1937+21 $1.557\ 806\ 468\ 819\ 794\ 5 \mp 0.000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 4\ ms$)

- Doppler tracking della sonda Cassini

- large-angle correlation nella radiazione di fondo cosmico (CMB)

dai dati di LIGO

$$\Omega_{GW}(\nu) < 6.5 \times 10^{-5}$$



← $1.5 \cdot 10^{-5}$
Light elements abundance + WMAP data

In conclusione: ragioni per cui cercare di rivelare e studiare le onde gravitazionali e' importante

- ♣ Ci permetteranno di verificare la teoria della Relativita' Generale in regime di campo forte
- ♣ Se una sorgente emette fotoni e gravitoni allo stesso tempo e se e' sufficientemente lontana da consentire un ritardo temporale rivelabile tra il segnale gravitazionale e quello elettromagnetico, si potrebbe verificare se le GW si propagano o meno alla velocita' della luce
- ♣ Le onde gravitazionali daranno informazioni sull'equazione di stato della materia a densita' supranucleari, irraggiungibili in esperimenti in laboratorio, attraverso lo studio delle frequenze di oscillazione ed emissione delle stelle di neutroni
- ♣ La rivelazione del **background stocastico di origine cosmologico** ci darebbe informazioni sulle fasi iniziali dell'universo primordiale che sono inaccessibili alle osservazioni elettromagnetiche.
- ♣ GWs forniscono un test per le teorie alternative della gravita'

- ♣ Infine, le onde gravitazionali ci permetteranno di scoprire sorgenti sconosciute che sfuggono all'osservazione perché troppo deboli elettromagneticamente, e “illumineranno” regioni dell'universo **inaccessibili a ogni altro tipo di osservazione.**

Stochastic background of astrophysical origin

V.Ferrari, S. Matarrese, R. Schneider, MNRAS 303, 247, 1999

V.Ferrari, S. Matarrese, R. Schneider, MNRAS 303, 259, 1999

R. Schneider, V.Ferrari, S.Matarrese, S.Portegies Zwart, MNRAS 324, 797, 2001

R. Schneider, A.Ferrara, B.Ciardi, V.Ferrari, S.Matarrese, MNRAS 317, 385, 2000

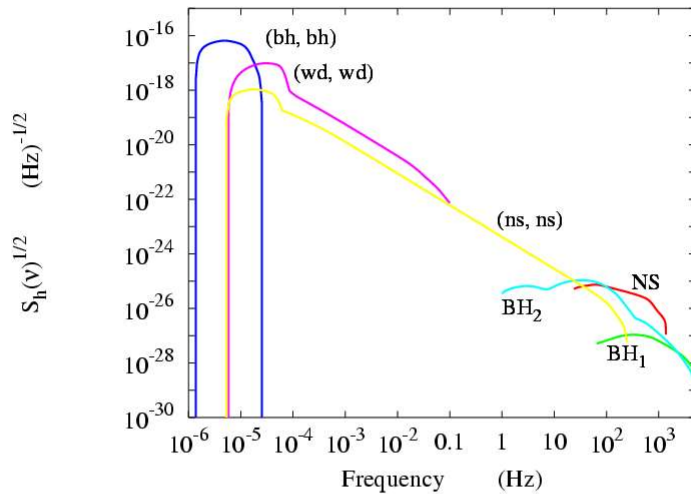


Figure 2: The predicted strain amplitude of the stochastic backgrounds produced by the following extragalactic populations of gravitational sources: r-mode instability of rotating neutron stars, two possible signals emitted by populations of massive stars collapsing to black holes, three different populations of coalescing binary systems.

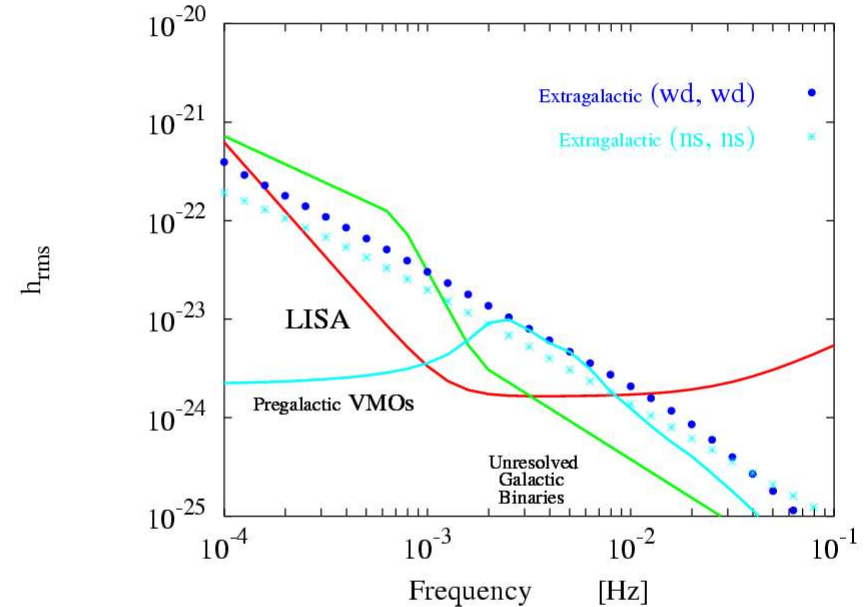


Figure 4: The sensitivity of LISA to a stochastic background after one year of observation. The extragalactic background from the collapse of pregalactic VMOs is compared to the signals emitted at $z \lesssim 5$ by extragalactic populations of (wd, wd) and (ns, ns) binaries and to the signal emitted by (wd, wd) binaries within the Galaxy.