Onde gravitazionali da sorgenti astrofisiche: a che punto siamo

Valeria Ferrari

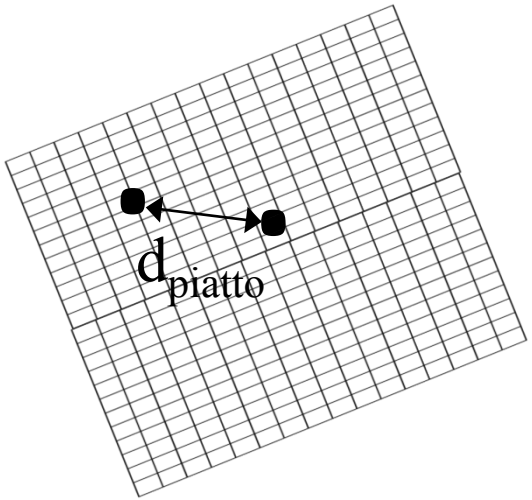
SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

INFN
Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare

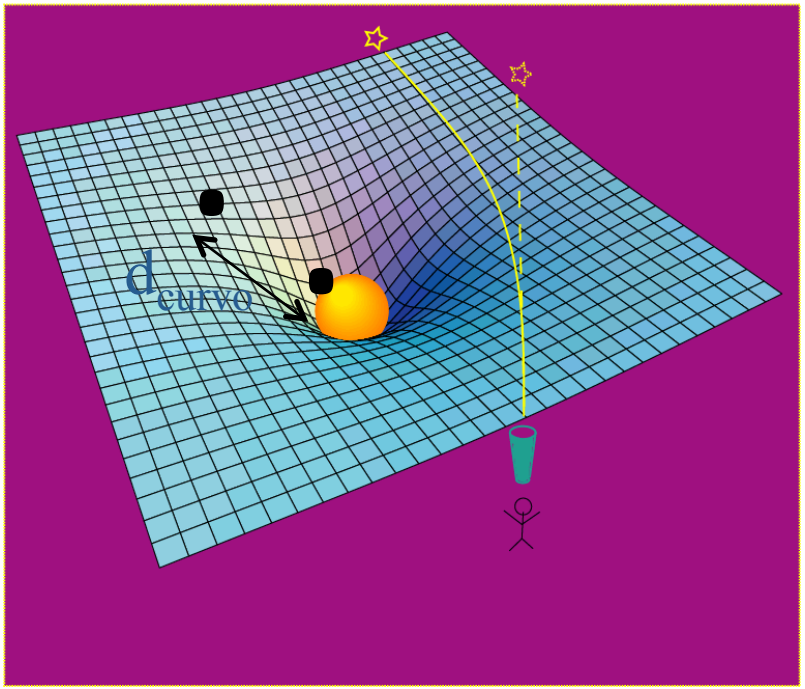
VESF
VIRGO EGO SCIENTIFIC FORUM

NAPOLI, 7 maggio 2012

Cosa intendiamo dicendo che le masse (e l'energia) curvano lo spaziotempo



Distanza tra due punti nello spazio piatto



Spazio "curvato" dalla massa: la distanza tra i due punti varia

Quando le masse si movono, esplodono, interagiscono, la distanza tra punti cambia nel tempo: le onde gravitazionali sono increspature nella curvatura dello spaziotempo prodotte dal moto di massa-energia, che si propagano nello spazio alla velocità della luce

Come si stima l'ampiezza delle onde gravitazionali?

(Valutazione approssimata)

- Si calcola come la massa e l'energia sono distribuite nello spazio e come questa distribuzione varia nel tempo
- Si calcola una grandezza, detta momento di quadrupolo **Q(t)**

$$h = \left[\frac{2G}{c^4}\right] \times \left[\frac{1}{r}\right] \times \left[\frac{d^2}{dt^2}(Q(t))\right]$$

ampiezza dell'onda

$$\left[\frac{2G}{c^4}\right] = 8 \times 10^{-45}\, s^2 / kg \cdot m$$

le onde gravitazionali sono debolissime!

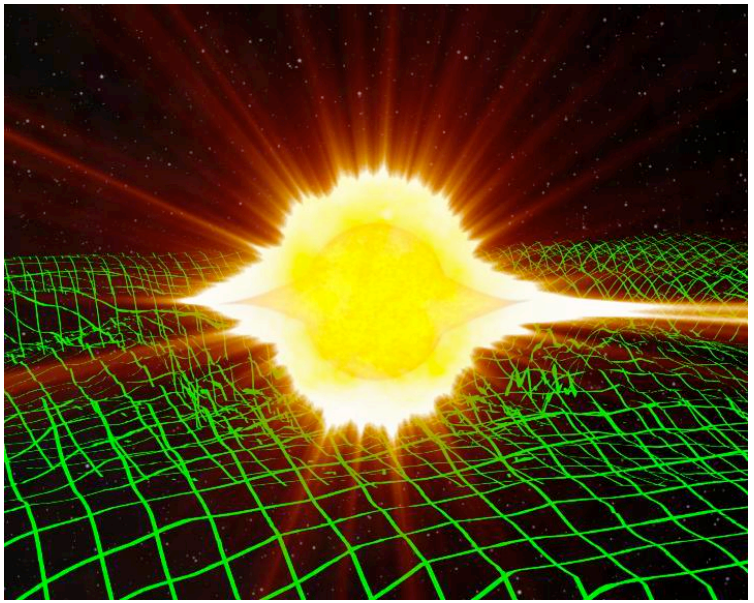
La Relatività Generale prevede che le onde gravitazionali siano di natura quadrupolare:

Una distribuzione di cariche accelerate emette onde elettromagnetiche

Affinchè una distribuzione di masse accelerate emetta onde gravitazionali deve avere un certo grado di asimmetria

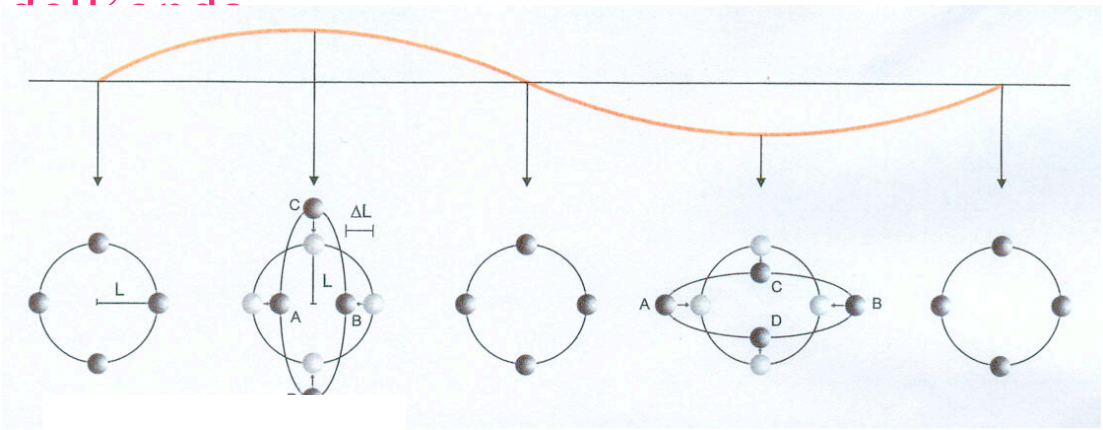
Un collasso gravitazionale perfettamente sferico non emette onde gravitazionali

Un collasso gravitazionale non sferico, oppure la coalescenza di stelle e buchi neri, si.



Effetto di un'onda gravitazionale

sistema di prova anellino flessibile di masse
posto nel piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda



l'onda gravitazionale produce spostamenti solo sul piano perpendicolare alla direzione di propagazione:

$$\Delta L = \tfrac{1}{2} h L$$

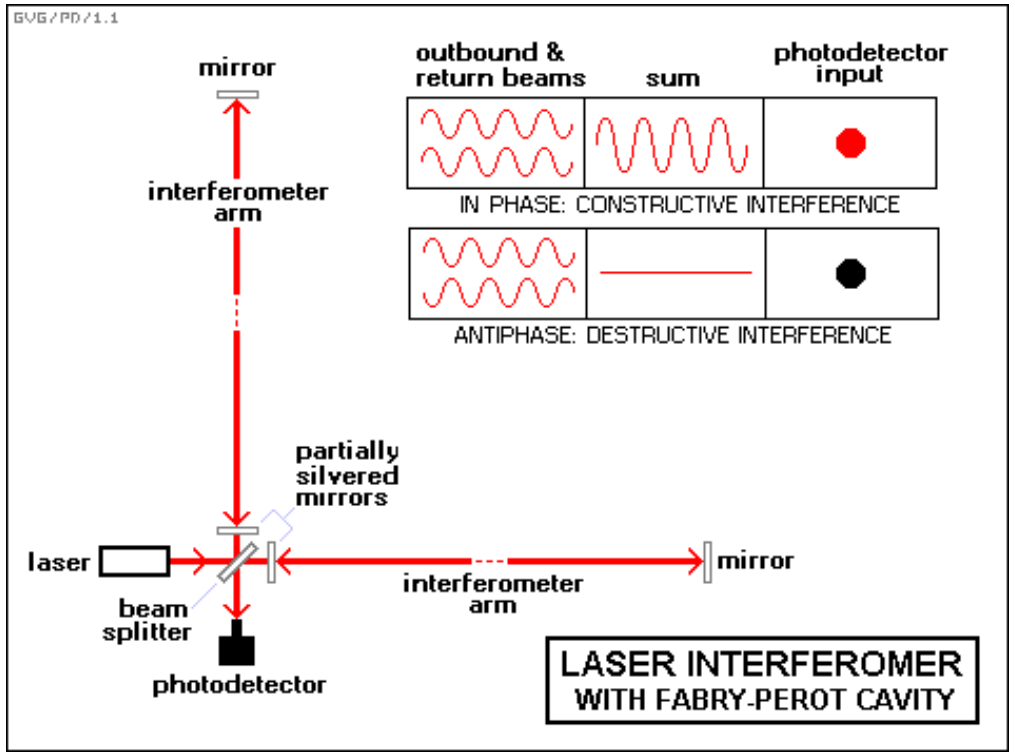
supernova che esplode nella Galassia $h \approx 10^{-18}$

L = 1 km : $\Delta L = h L/2 \approx 10^{-18}\ 10^{3} = 10^{-15}$ m ≈ **raggio protone**

Antenne gravitazionali: i rivelatori Interferometrici

Un'onda gravitazionale fa variare la distanza tra gli specchi: quindi i raggi laser percorrono un cammino di lunghezza diversa rispetto a quando l'onda non c'è, e i segnali luminosi si "sfasano"

Misurando come variano le frange di interferenza si può dire se è passata un'onda gravitazionale



Esperimento italo-francese Virgo

Cascina, Pisa

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

Se l'onda e' perpendicolare al braccio, questo varia di $\Delta L \sim h_0 L$

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

$$\Delta L = \sqrt{(\hbar c \lambda \Delta\nu / \pi P)}$$

λ lunghezza d'onda della luce di potenza P

$\Delta\nu$ banda di frequenza del segnale

Quindi il limite per la misura e'

$$h_0 > 2 \Delta l / l = 2 \sqrt{(\hbar c \lambda \Delta\nu / \pi P l^2)}$$

Se P = 1000 W , λ =0.6 μ m $\Delta\nu \sim$ 1000 Hz

per avere $h_0 > 10^{-20}$ l= 3 km

BANDA DI OSSERVAZIONE: da qualche decina di Hz a qualche kHz

GEO600 (British-German)
Hannover, Germany

LIGO- I (USA)
Hanford, WA

LIGO-II (USA)
Livingston, LA

KAGRA-LCGT (Japan)
Kamioka

INDIGO (India),
Project for the LIGO-III 4km Interferometer

VIRGO (French-Italian)
Cascina, Italy

Le antenne risonanti Auriga (Legnaro) e Nautilus (Frascati) continuano a funzionare a ~ 2 k

EXPLORER left CERN starting a new life at the EGO site

The project of an open air museum at the EGO site in Cascina where EXPLORER will be the main attraction

LIGO e Virgo hanno preso dati per anni; alcuni periodi di dati di buona qualita' si sovrappongono

Science runs

- LIGO S5 (November 4, 2005 to October 1, 2007)

&

- VIRGO VSR1 (May 18, 2007 to October 1, 2007)

- LIGO S6 (July7, 2009 to October 20, 2010.)

&

- VIRGO VSR2 (July 07, 2009 to January 08, 2010)

+ VSR3 (August 11, 2010 to October 20, 2010)

Sorgenti interessanti di onde gravitazionali:

Stelle di neutroni

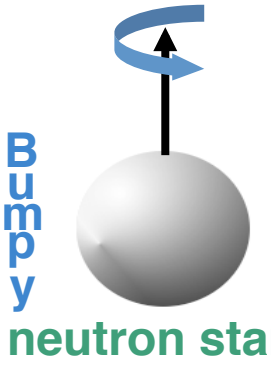
Coalescenza di sistemi binari

"Bursts" dovuti a eventi catastrofici

Background di onde gravitazionali

Dall'analisi dei dati non emerge rivelazione di segnali da nessuna di queste sorgenti: solo upper limits

GW da distorsioni Non-assisimmetriche di stelle di neutroni (NS)



Una stella di neutroni a distanza **d**, che ruota con frequenza ν_{rot} intorno a un asse principale, per es. Izz, emette un'onda monocromatica di frequenza $\nu_{gw} = 2\nu_{rot}$, che viene osservata con ampiezza h_0 :

$$h_0 = \frac{4\pi^2 G}{c^4}\frac{I_{zz}\nu_{gw}^2}{d}\epsilon$$

La "strain amplitude" h_0 si riferisce a un'onda da una sorgente orientata in modo ottimale rispetto al rivelatore.

L'ellitticita' equatoriale ε e' data da

$$\varepsilon = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}}$$

Quale livello di asimmetria dobbiamo aspettarci in una NS?

effetto della crosta

Modelli dettagliati dello sforzo massimo che puo' sopportare la crosta danno

$$\epsilon \leq 2 \times 10^{-5} \left(\frac{u_{break}}{10^{-1}} \right) \qquad (Haskell,\ Jones,\ Andersson,\ MNRAS\ 2006)$$

Studi recenti di dinamica molecolare indicano $U_{break} \cong 0.1$
(Horowitz, Kadau PRL 2009)
(Per i materiali terrestri $U_{break} \cong 10^{-4} - 10^{-2}$)

la crosta di una stella di neutroni si spacca se le deformazioni sono > 20 cm.

effetto dell'equazione di stato nel core

A densita' superiori di quella della materia nucleare la materia potrebbe presentarsi allo stato solido ed essere piu' deformabile

Basandosi su un modello di stella di quark solida, Owen stima

$$\epsilon \leq 6 \times 10^{-4} \left(\frac{u_{break}}{10^{-2}} \right) \qquad (Owen,\ PRL\ 2005)$$

Se invece I quarks sono in una fase superconduttrice di colore

$$\epsilon \leq 10^{-3} \left(\frac{u_{break}}{10^{-2}} \right) \qquad (Haskell\ et\ al,\ PRL\ 2007)$$

effetto del campo magnetico

Il campo magnetico *interno* induce deformazioni nella stella.
Se il core e' composto da un fluido

$$\epsilon \sim 10^{-12} \left(\frac{B}{10^{12} G} \right)^2$$

(Haskell et al, MNRAS 2008)

(Colaiuda, Ferrari, Gualtieri, MNRAS 2008)

(Lander,Jones, MNRAS 2009)

Un core superconduttore (di tipo II) produrrebbe asimmetrie maggiori

$$\epsilon \sim 10^{-9} \left(\frac{B}{10^{12} G} \right) \left(\frac{H_{crit}}{10^{15} G} \right)$$

(Cutler, PRD 2002, Akgun, Wasserman, MNRAS 2008)

effetto del campo magnetico

Nelle prime fasi di vita della stella il campo magnetico interno potrebbe essere molto piu' intenso di quello osservato oggi, e avere forti componenti toroidali, confinate in una regione toroidale (Twisted torus configurations)

$$\epsilon \lesssim k \left(\frac{B[G]}{10^{16}} \right)^2 \cdot 10^{-4}$$

$Ciolfi, Ferrari, Gualtieri, MNRAS(2009)$

$Ciolfi, Ferrari, Gualtieri, (2010)$

K ~(5-10) a seconda della compattezza della stella.

Per campi magnetici iniziali sufficientemente forti la stella potrebbe essere sorgente di onde gravitazionali intense

CONCLUSIONI: sull'ellitticità abbiamo molte stime, ma poche certezze

Cosa ci dicono

a) le osservazioni astrofisiche

b) i dati gravitazionali?

Osservazioni astrofisiche: Nella Galassia ci sono circa ~10^8 stelle di neutroni, ~2000 sono radio pulsars

Di molte conosciamo

d = distanza

ν_{rot} = frequenza di rotazione (quindi di emissione GW $\nu_{gw} = 2\,\nu_{rot}$

$\dot{\nu}_{rot} < 0$ (le NS rallentano)

Se assumiamo che tutta l'energia rotazionale persa vada in emissione di GW , possiamo ricavare un limite superiore sull'ampiezza dell'onda:

$$E_{rot} = \frac{1}{2} I \Omega^2 \rightarrow \dot{E}_{rot} = I \Omega \dot{\Omega}, \qquad \dot{E}_{GW} = \frac{2c^3}{5G} \Omega^2 d^2 h_0^2$$

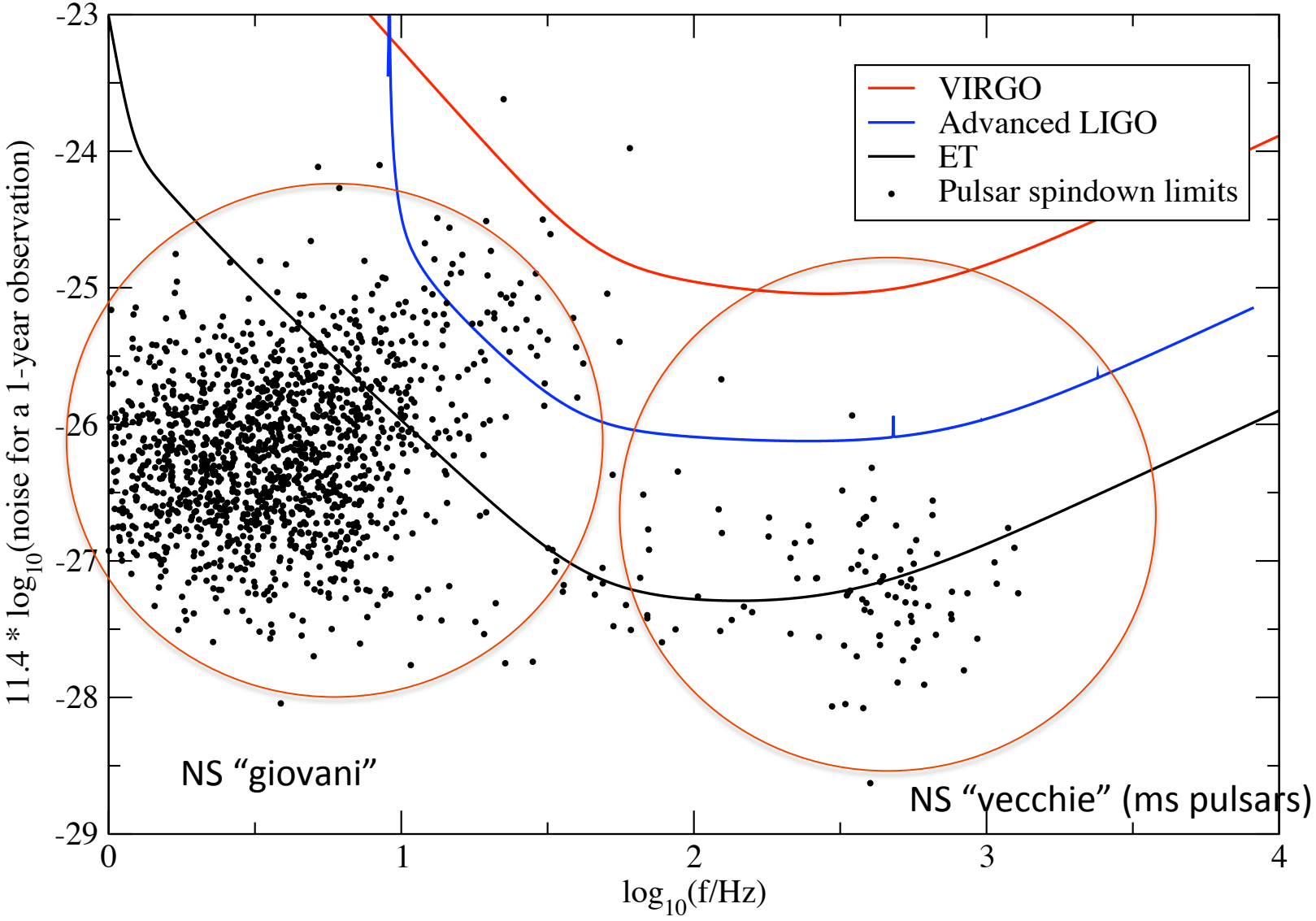
imponendo

$$\dot{E}_{rot} = \dot{E}_{GW} \rightarrow \text{upper limit per } h_0$$

che chiameremo

$$h_0^{spindown}$$

Limiti superiori per l'ampiezza del segnale gravitazionale emesso da stelle di neutroni:
teoria+osservazioni astrofisiche



Andersson, Ferrari, Jones, Kokkotas, Krishnan, Read, Rezzolla, Zink GRG, 43 2011

LIGO e Virgo hanno preso dati per anni; alcuni periodi di dati di buona qualita' si sovrappongono

Science runs

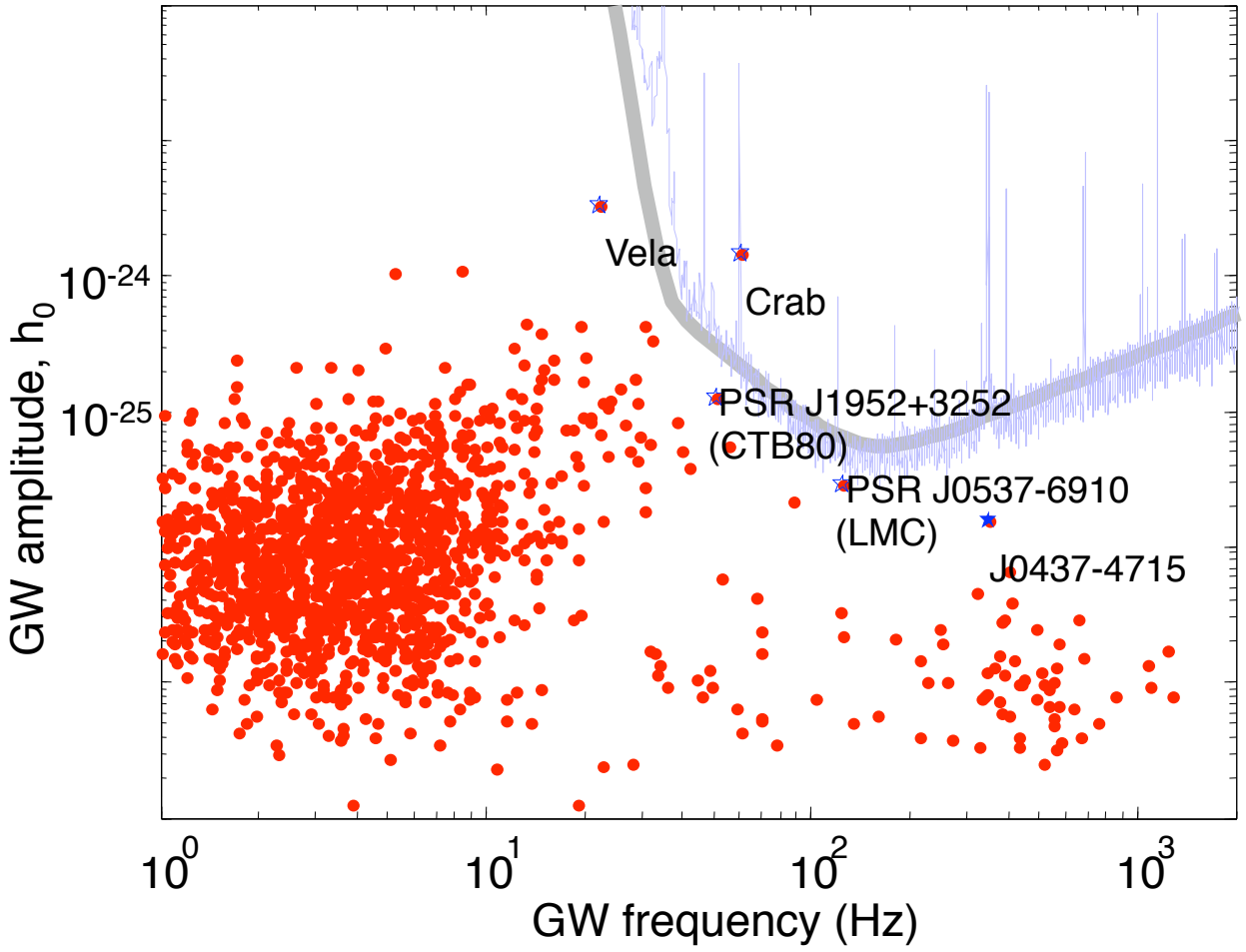
- LIGO S5 (November 4, 2005 to October 1, 2007)
  &
- VIRGO VSR1 (May 18, 2007 to October 1, 2007)

} Risultati pubblicati

- LIGO S6 (July7, 2009 to October 20, 2010.)
  &
- VIRGO VSR2 (July 07, 2009 to January 08, 2010)
  + VSR3 (August 11, 2010 to October 20, 2010)

ANALISI DEI DATI GRAVITAZIONALI

La maggior parte delle pulsars sono fuori banda: **il loro h_0 e' inferiore alla sensibilita' di LIGO in S5 (assumendo 1 anno di integrazione)**



LIGO collab. ApJ 713 (2010): analisi mirata su 200 pulsar note con frequenza di rotazione > 20 Hz

LIGO collab. ApJ (2012): all sky blind search tra 50 e 800 Hz

Risultati principali dell'analisi dati per le pulsars

ApJ 713 (2010): analisi mirata su 200 pulsar note con ν > 20 Hz

★ CRAB pulsar

$$h_0 < 2.4 \times 10^{-25} \qquad (1)$$

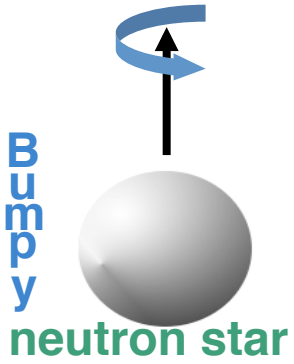
~ 7 volte inferiore al limite di spindown

$$\dot{E}_{rot} = \dot{E}_{GW}$$

$$\dot{E}_{rot} = I\Omega\dot{\Omega}, \;\; \dot{E}_{GW} = \frac{2c^3}{5G}\Omega^2 d^2 h_0^2 \;\rightarrow\; h_0^{spindown} < 1.4 \times 10^{-24}$$

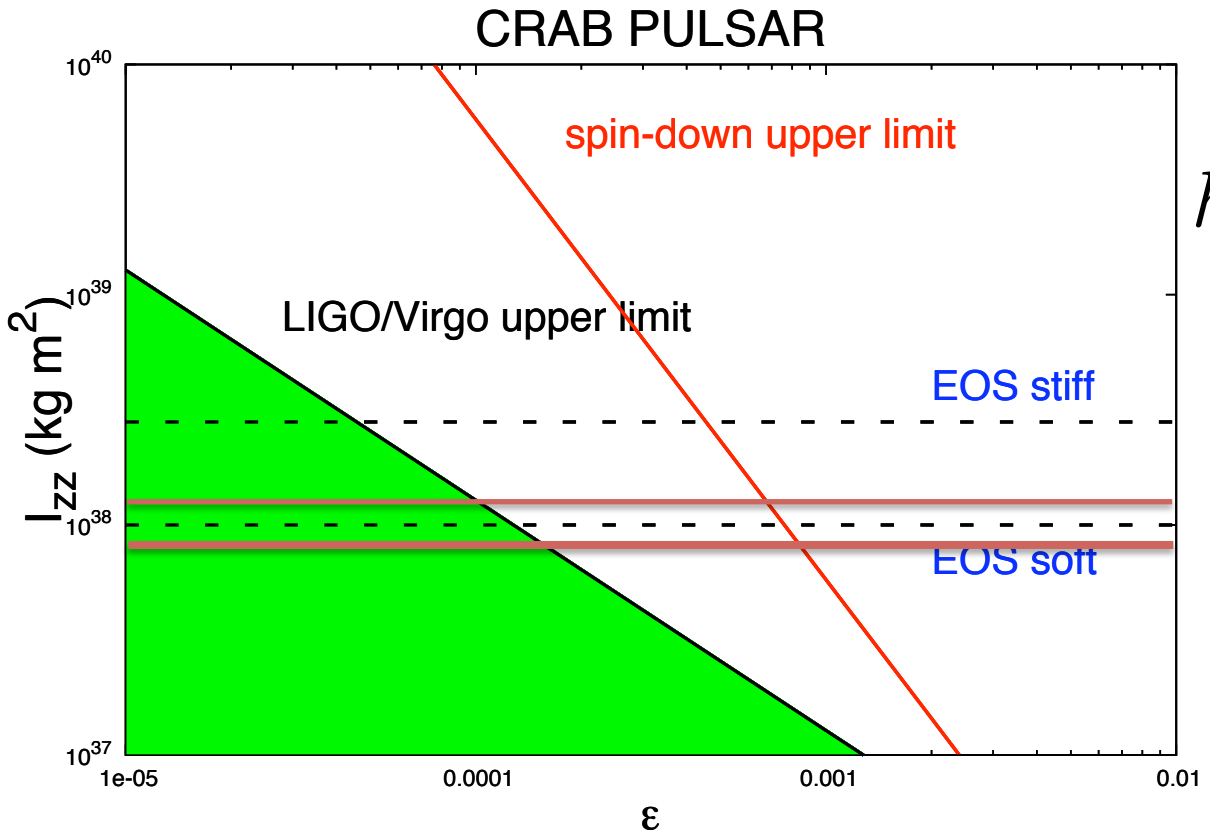
(1) implica che < 2% dell'energia rotazionale persa va in onde gravitazionali

Ricordando che la relativita' generale prevede che



$$h_0 = \frac{4\pi^2 G}{c^4}\frac{I_{zz}\nu_{gw}^2}{d}\epsilon$$

$$\epsilon < 1.3 \times 10^{-4}$$



$$h_0 = \frac{4\pi^2 G}{c^4}\frac{I_{zz}\nu_{gw}^2}{d}\epsilon$$

Se invece la stella e' fatta di quarks

La regione permessa per il momento d'inerzia e l'ellitticita' e' in verde

Se teniamo conto degli studi sull'equazione di stato delle NS la regione permessa si restringe tra le due righe tratteggiate

Benhar, Ferrari, Gualtieri, Marassi Phys. Rev. D 72, 2005

Bejer, Bulik Haensel MNRAS 364 2005

Anche per la pulsar della Vela lo spindown limit e' stato battuto
Questa volta con I soli dati di Virgo e piu' recenti VSR2

Dati Vela pulsar

$$\text{frequenza di rotazione} \qquad \nu_{rot} = 11.19 \text{ Hz}$$

$$\text{frequenza di emissione GW:} \qquad \nu_{gw} = 22.38 \text{ Hz}$$

$$\dot{\nu}_{rot} \simeq -1.56 \times 10^{-11} \text{ Hz s}^{-1}$$

Assumendo $I = 10^{38} \text{ hg m}^2$ $\qquad \dot{E}_{rot} = \dot{E}_{GW}$

$$h_0^{spindown} = 3.29 \times 10^{-24}, \qquad \epsilon^{spindown} = 1.8 \times 10^{-3}$$

Dall'analisi dei dati di Virgo si trova

$$h_0 \simeq= 2 \times 10^{-24}, \qquad \epsilon = 1.1 \times 10^{-3}$$

L'energia che va in GW e' < 35%

♦ **Sistemi binari nelle ultime fasi della coalsecenza**

main target degli interferometri terrestri

Forme d'onda generate con approccio Post-newtoniano :
masse puntiformi in orbita circulare + reazione di radiazione

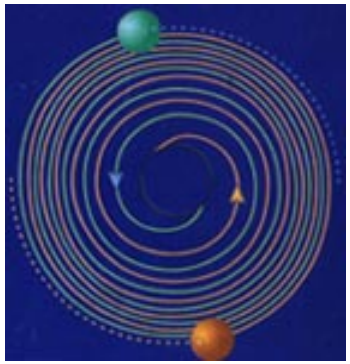
La distanza orbitale l_0 diminuisce **La frequenza aumenta**

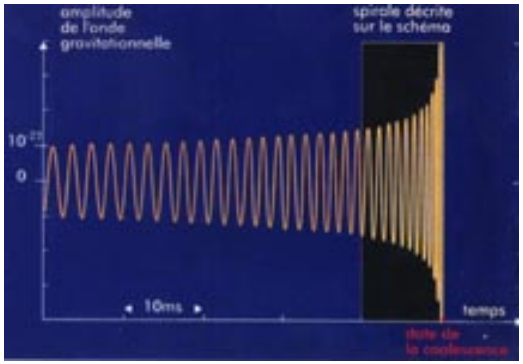
$$l_0 = l_0^{in}\left(1 - t/t_{coal}\right)^{1/4}$$

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

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

$$\mu = M_1 M_2 / M$$



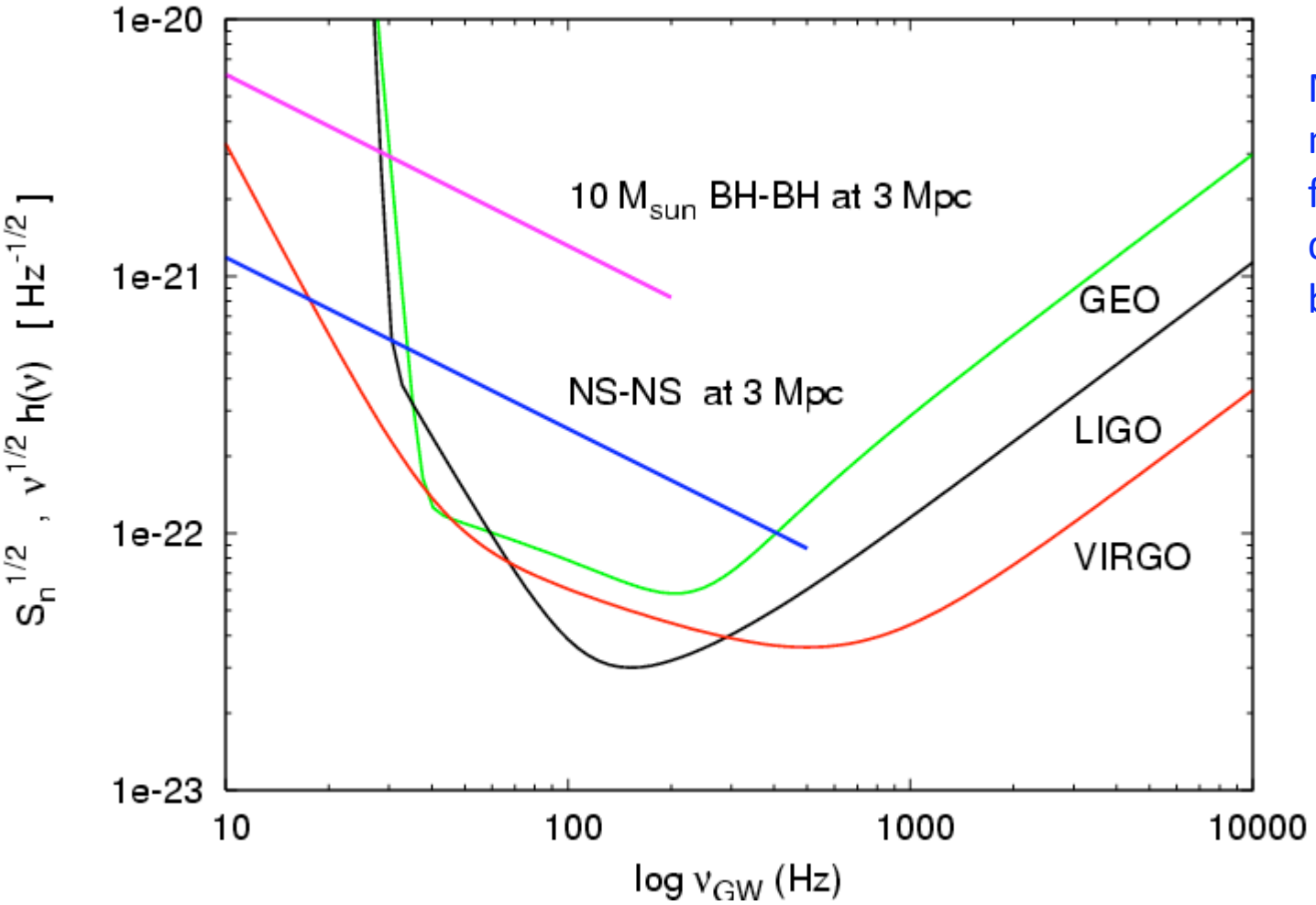


CHIRP

Questo e' il segnale emesso fino a poco prima dell'ultima orbita circolare stabile (ISCO)

$$l_0^{ISCO} \sim 6GM_{tot}/c^2, \quad \nu_{GW}^{ISCO} = \frac{c^3}{\pi G\sqrt{6^3}}\frac{1}{M_{tot}}$$

VIRGO: distanza di orizzonte per coalescenza di NS-NS **d ~ 3 Mpc** :
Segnale emesso durante la fase di spiraleggiamento (prim del merging)



Maggiore e' la massa, minore e' il range di frequenza del segnale di inspiralling nella banda del rivelatore

I Segnali stanno nella banda di VIRGO per un tempo piu' lungo:

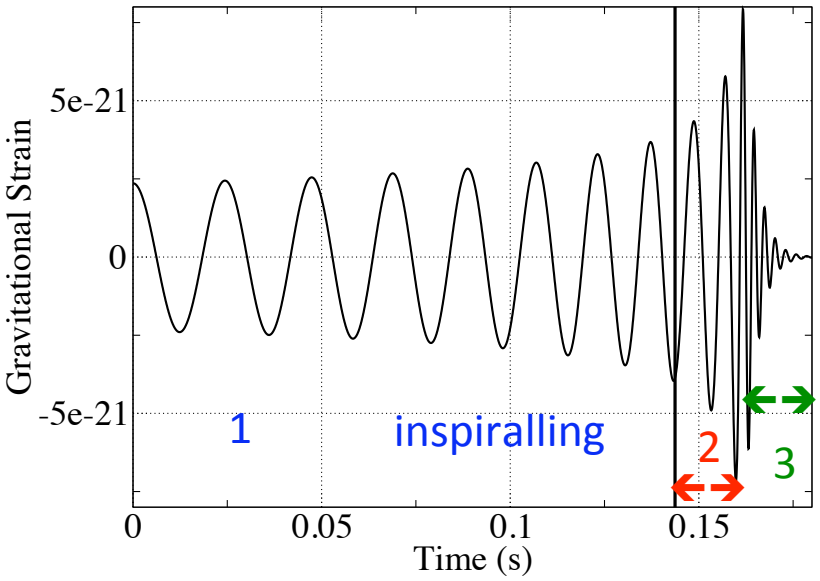
NS-NS : LIGO ~ 25 seconds VIRGO ~ 17 minutes

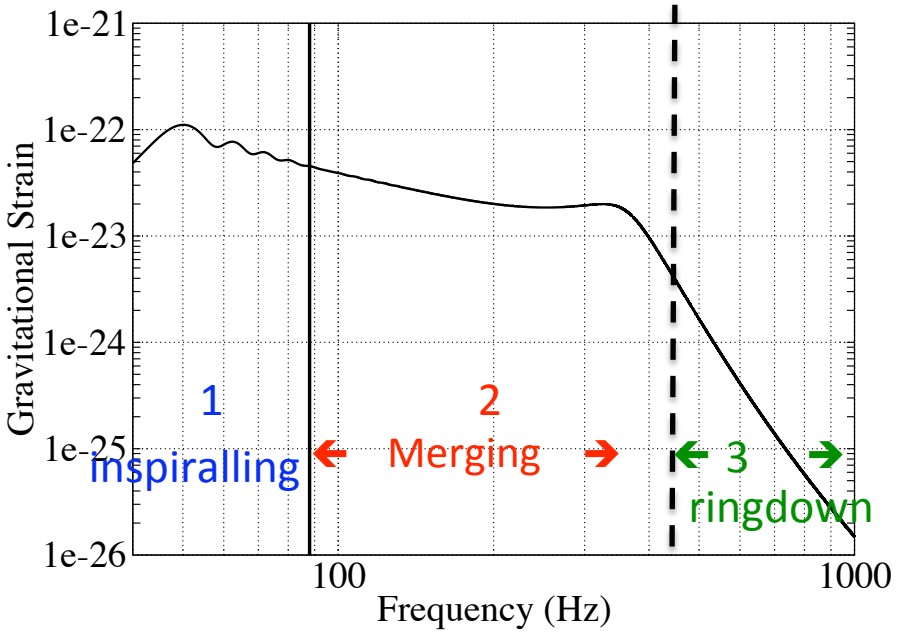
BH-BH: LIGO ~1 second VIRGO ~ 38 seconds

Maximum mass that can be seen ~ 130 M_{sun}

Cosa succede quando le due stelle (o buchi neri) coalescono?

BUCHI NERI





Baker, Campanelli, Pretorius, Zlochower PRD 2007

Agganciando la fase dell'onda nella fase di inspiralling si puo' misurare la massa di chirp, e avendo strumenti sufficientemente sensibili, avere informazioni sugli spin e sulle singole masse

La forma d'onda nella fase di merging puo' essere determinata solo integrando le eq. di Einstein

Il ringdown e' dovuto alle oscillazioni del buco nero che si forma

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 (le frequenze di determinano con approcci perturbativi)

Se il buco nero non ruota

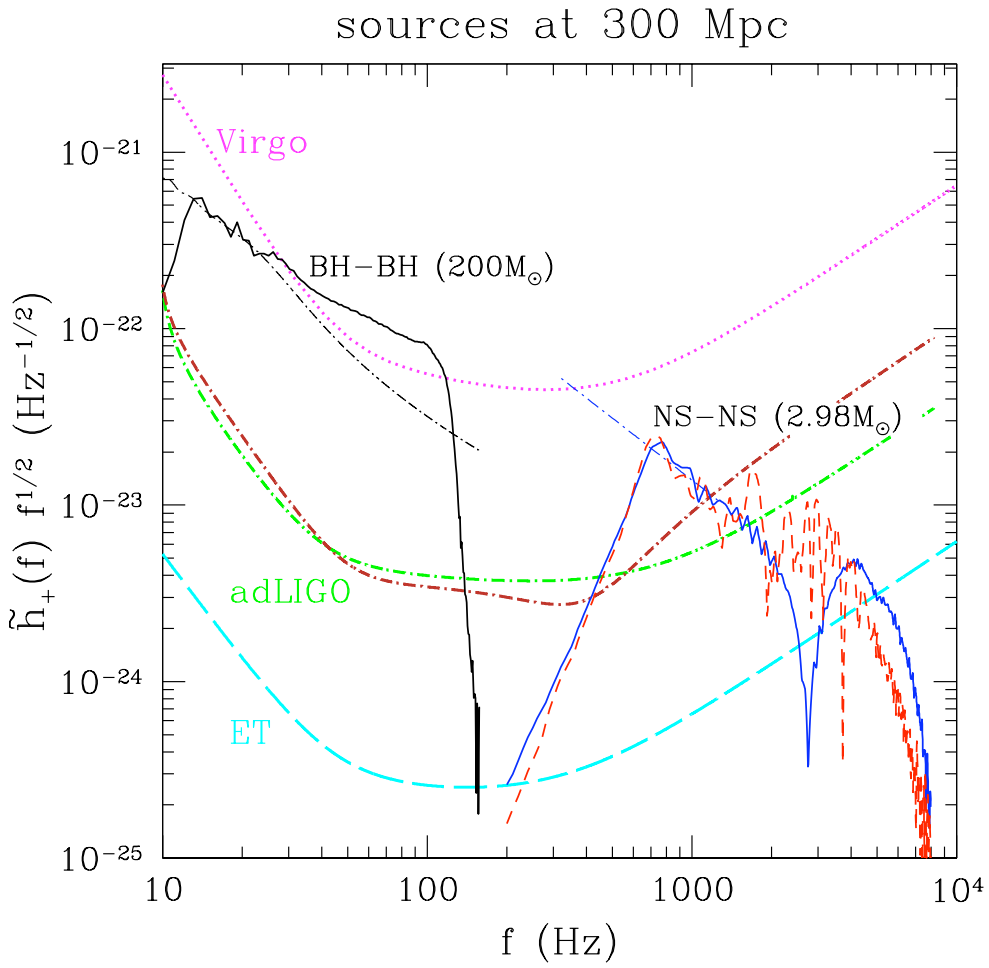
se $M = n\ M_\odot$ $\qquad \nu_o \sim (12/n)$ kHz $\qquad \tau \sim n\ 5.5\ 10^{-5}$ s

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

$M = 10^6\ M_\odot$ $\quad \nu_o \sim 12$ mHz $\quad \tau \sim 55$ s (LISA)

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

E se invece di due buchi neri a coalescere sono due stelle di neutroni?



Baiotti, Giacomazzo, Rezzolla, PRD (2008)

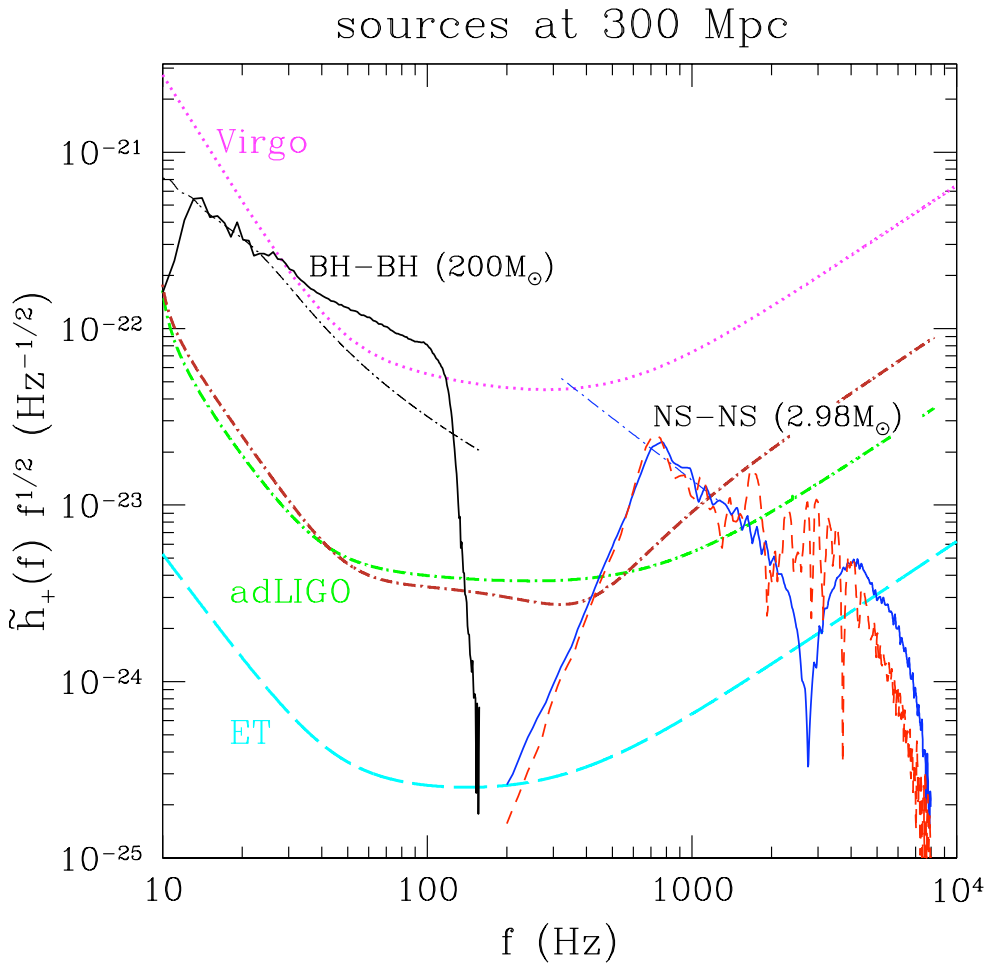
Quando le due stelle sono vicine al merging gli effetti dell'equazione di stato cominciano a influenzare la forma d'onda

- EOS fredda
- EOS calda

L'evoluzione e' molto diversa

EOS fredda: il merging termina bruscamente e il picco a ~ 4 kHz e' associato alla formazione di un BH. Il cutoff a ~6.7 kHz corrisponde al modo fondamentale di oscillazione.

E se invece di due buchi neri a coalescere sono due stelle di neutroni?



Baiotti, Giacomazzo, Rezzolla, PRD (2008)

Quando le due stelle sono vicine al merging gli effetti dell'equazione di stato cominciano a influenzare la forma d'onda

- EOS fredda
- EOS calda

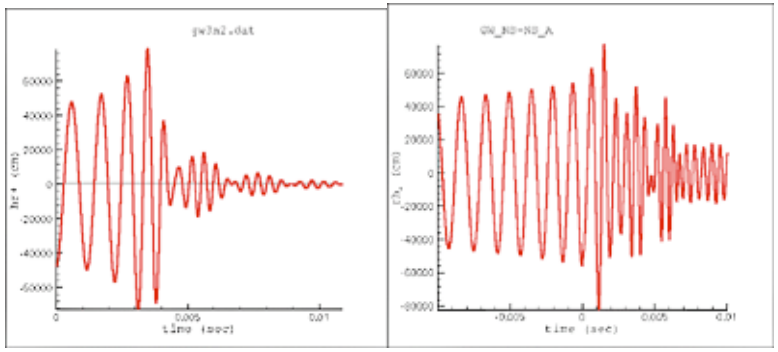
L'evoluzione e' molto diversa

EOS calda: le due stelle mergono e rimbalzano diverse volte (da qui I numerosi picchi)
Quindi si forma una NS supermassiva che alla fine collassa a BH.
Il cutoff di nuovo e' a 6.7 kHz.

Se i corpi coalescenti sono una stella di neutroni e un buco nero, si possono avere scenari diversi, a secondo del rapporto di massa, dei momenti angolari
e dell'equazione di stato della materia all'interno della stella

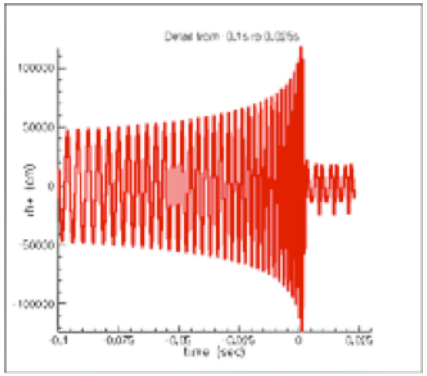
1) La stella viene ingoiata dal buco nero e la forma d'onda e' simile a quelle viste prima

stella di neutroni - stella di neutroni



astrogravs.nasa.gov/images/catalog

2) La stella viene distrutta dall'interazione mareale con il BH prima di venire ingoiata; quando accade, il segnale gravitazionale ha una brusca caduta, e la frequenza corrispondente indica a che distanza tra I corpi e' avvenuta la distruzione della stella.
POSSIBILE MECCANISMO DI INNESCO DI Short Gamma-Ray Burts



La frequenza di cutoff dipende dall'equazione di stato della stella.
V. Ferrari, L. Gualtieri, F. Pannarale, CQG 26, 2009,
V. Ferrari, L. Gualtieri, F. Pannarale, PRD 81, 2010

Ricerca di segnali di coalescenza BH-BH nei dati di LIGO-Virgo:

LIGO-Virgo collab. PRD 83, 2011
analisi dati run S5, Novembre 2005-Ottobre 2007
forma d'onda completa: inspiral, merger, ringdown
ricerca di sistemi coalescenti con massa tra 25 e 100 $M_\odot$

Upper limit sul rate di coalescenza per sistemi con masse $19\ M_\odot < m1,m2 < 28\ M_\odot$,

rate di eventi $\leq 2.0\ Mpc^{-3}\ Myr^{-1}$

LIGO-Virgo collab. , 2012, arXiv 1111.7314v4

ricerca di sistemi coalescenti con massa tra 2 e 25 $M_\odot$ (NS-NS, NS-BH, BH-BH)
dati raccolti tra
il 7 luglio 2009 e il 20 ottobre 2010

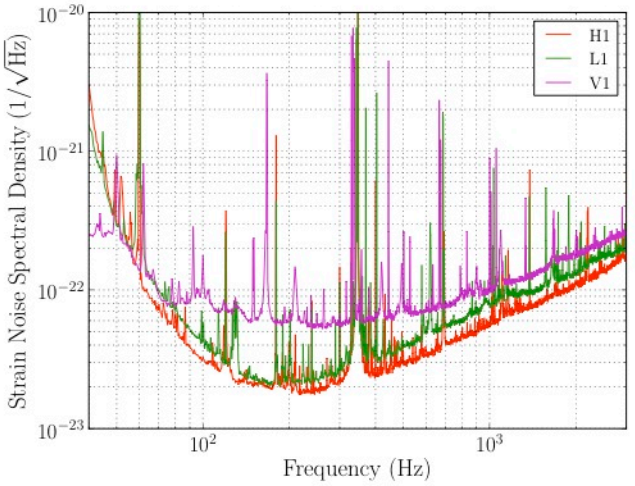


FIG. 1: Typical detector strain noise spectral density for the LIGO S6 and Virgo VSR2/3 runs. From lowest to highest at 10^2 Hz, the curves are for the H1, L1 and V1 detectors.

distanza di orizzonte pari a 40 Mpc per NS-NS, e oltre per gli altri sistemi

rate di eventi di coalescenza

$\leq 1.3 \times 10^{-4}$ Mpc^{-3} yr^{-1} per NS-NS
3.1×10^{-5} Mpc^{-3} yr^{-1} per NS-BH
6.4×10^{-6} Mpc^{-3} yr^{-1} per BH-BH

upper limits circa 1.4 volte piu' bassi dei precedenti

Gli upper limits sui rates di coalescenza vanno confrontati con gli studi teorici.

codici di sintesi di popolazioni stellari :
a partire da una distribuzione di stelle progenitrici in una galassia, ne seguono l'evoluzione. Forniscono la statistica dei sistemi binari di vario tipo che si formano, e la loro evoluzione.

rate di formazione stellare in funzione del redshift, dalle osservazioni astrofisiche

rates di colescenza e di rivelazione da un dato interferometro

I rates di rivelazione teorici sono ancora molto inferiori agli upper limits forniti da Virgo-LIGO

presente

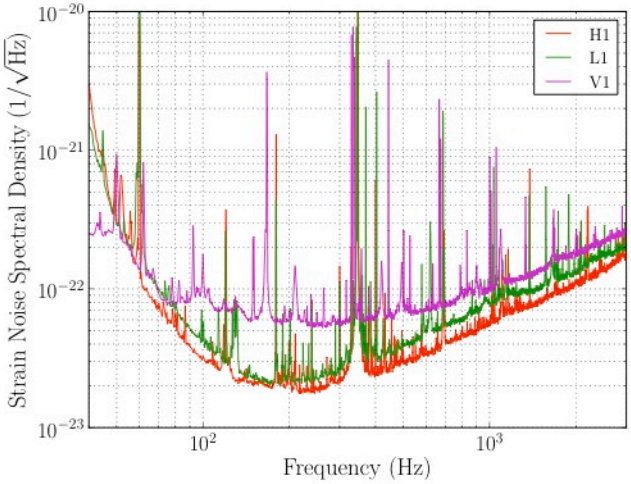
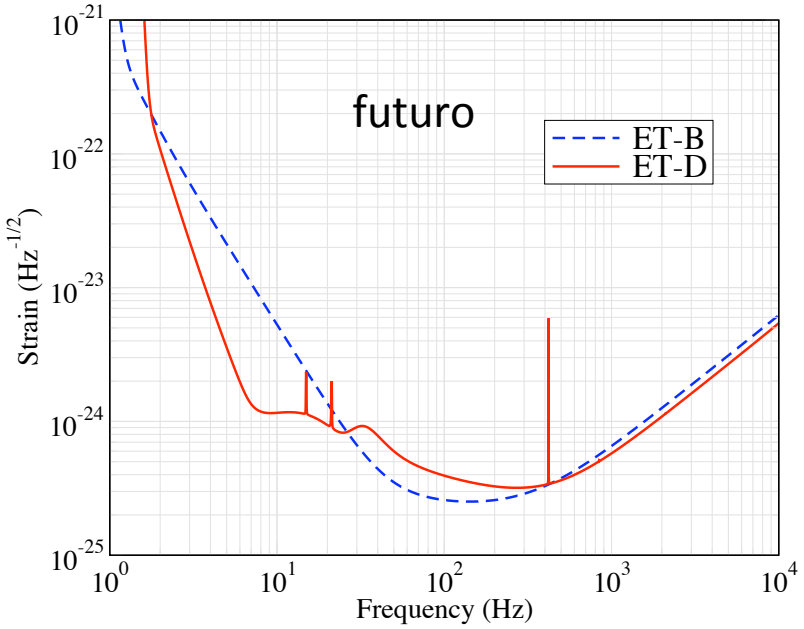
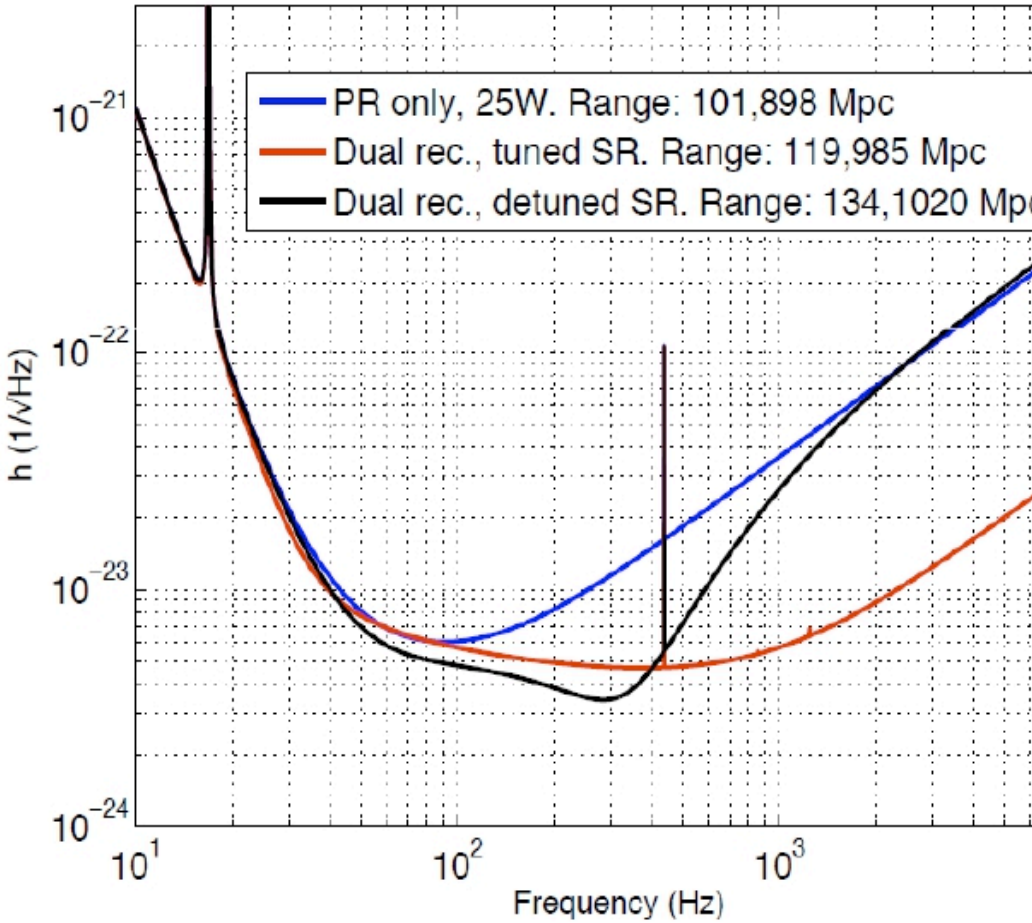


FIG. 1: Typical detector strain noise spectral density for the LIGO S6 and Virgo VSR2/3 runs. From lowest to highest at 10^2 Hz, the curves are for the H1, L1 and V1 detectors.



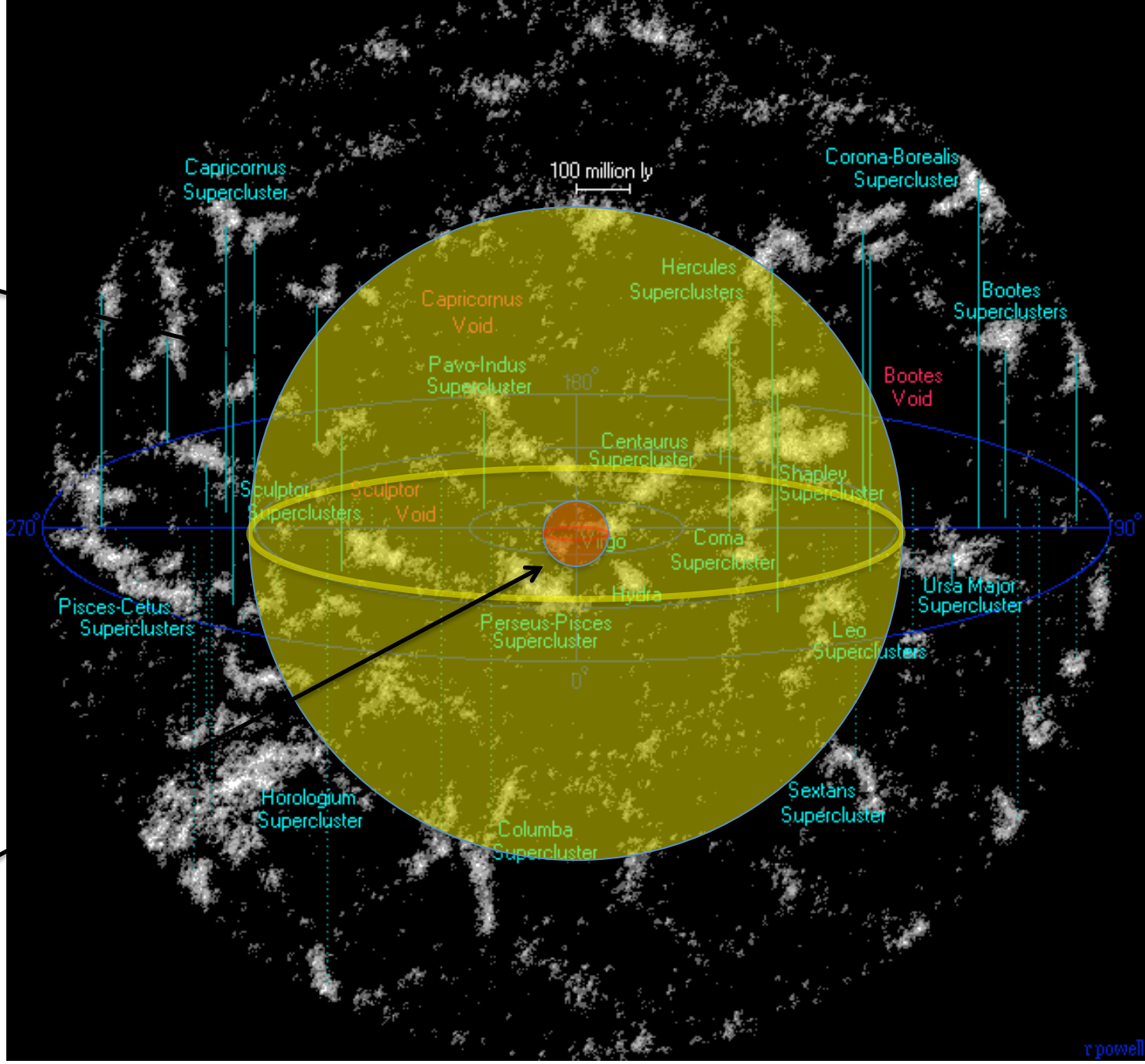
prossimo futuro (2014 LIGO, 2015 Virgo)



distanza di orizzonte: 140 Mpc NS-NS
1Gpc BH-BH

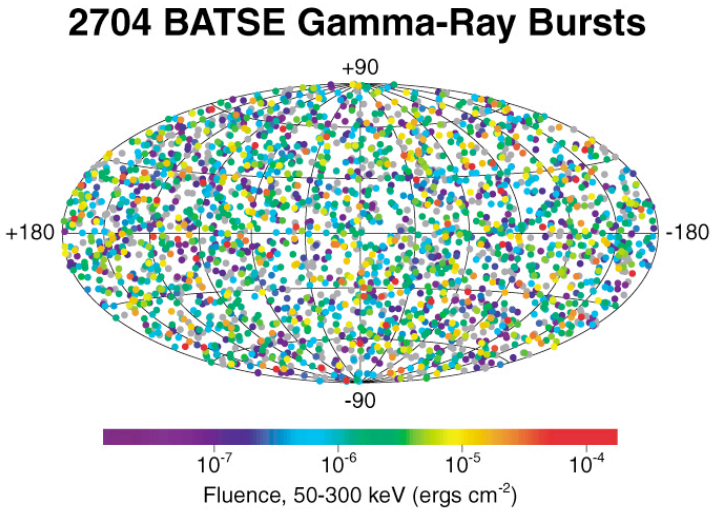
Advanced detectors

Initial detectors



GRBs are the most luminous events in the universe after the Big Bang (energy released 10^{51} erg or larger):

- isotropically distributed in sky; rate $\sim$ one per day;



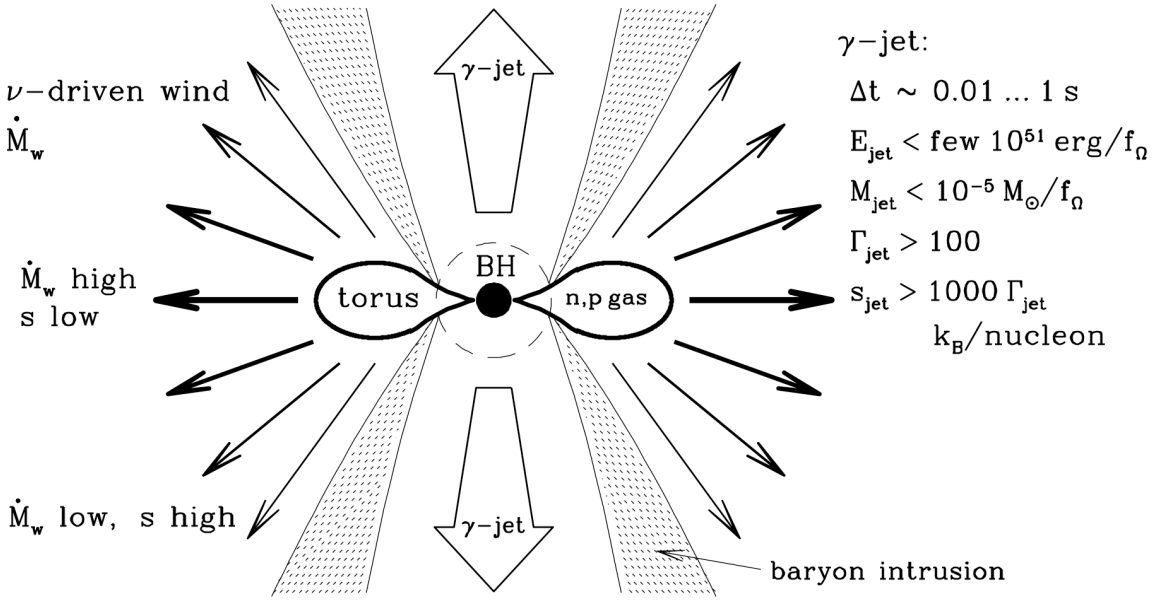
GRBs Sky distribution.

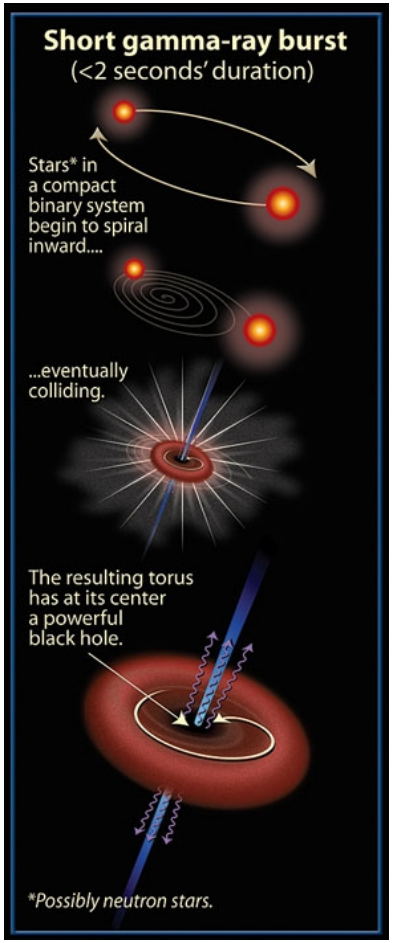
(http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/skymap/).

- they are cosmological objects with a bimodal distribution:
  - Long GRB: $\gtrsim 2\,\mathrm{s}$ (collapsar)
  - Short GRB: $\lesssim 2\,\mathrm{s}$ (harder spectrum) (NS-NS or BH-NS coalescing binaries)

Short GRB fundamental ingredients:

1. Hot massive accretion disk
2. Baryon-free funnel around the rotation axis





Ruffert, Janka, Eberl (1998)

Encyclopedia of Science

OSSERVAZIONI DI SHORT GAMMA-RAY BURSTS

LIGO collab. *Implications For The Origin Of GRB 051103 From LIGO Observations* arXiv:1201.4413, 2012

SGRB osservato il 3 novembre 2005 in M81, una galassia spirale nella costellazione Ursa Major

d_{M81} =3.6 Mpc dalla Terra

Se la sorgente fosse stata la coalescenza di NS-NS o NS-BH, LIGO aveva la sensibilita' per osservare le onde gravitazionali prodotte.

" We exclude a binary neutron star merger in M81 as the progenitor with a confidence of 98%. Neutron star-black hole mergers are excluded with > 99% confidence. If the event indeed occurred in M81, it seems likely on the basis of LIGO observations that this was indeed the most distant SGR giant flare observed to date."

CONCLUSIONI

- I rivelatori di prima generazione hanno permesso di fissare solo upper limits sull'emissione di varie sorgenti astrofisiche

- Solo ora cominciano a essere pubblicati I risultati dell'analisi dei dati presi nel periodo 2009-2010

- Gli interferometri di seconda generazione saranno 10 volte piu' sensibili

- e nel futuro Et ci aspetta.