

MATLAB EXPO 2018

La ricerca delle onde gravitazionali
presso il gruppo Virgo di Roma

Sergio Frasca, Pia Astone



La legge di gravitazione di Newton: grandi successi e piccoli problemi

- **Urbain Le Verrier**, che nel 1846 aveva previsto l'esistenza del pianeta Nettuno dalle perturbazioni del moto di Urano, trovò anomalie nel moto del pianeta Mercurio, il cui perielio, che, a causa del disturbo degli altri pianeti, dovrebbe ruotare di 531 secondi d'arco al secolo (circa 0.15 gradi, un giro completo in circa 24000 anni), in realtà ruota di 574 secondi d'arco al secolo (circa 0.16 gradi).
- Questa differenza di 0.01 gradi al secolo era l'unico "errore" della teoria di Newton trovato fino a cento anni fa.
- **Un altro problema, questa volta concettuale, della teoria di Newton era l'«azione a distanza» della gravità.**

La “Relatività Generale” di Einstein

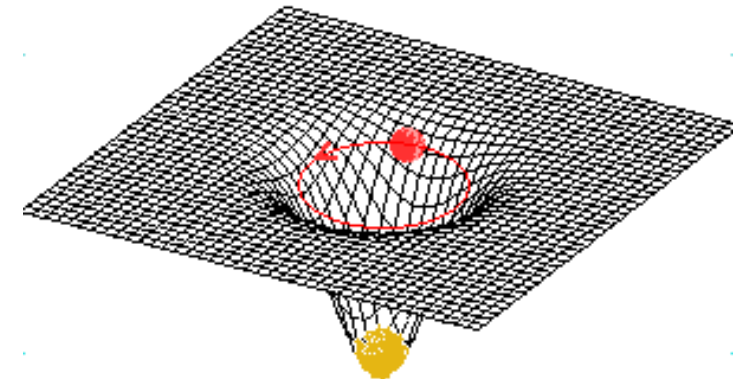
- Nel 1915, 10 anni dopo la pubblicazione della teoria della relatività ristretta, Albert Einstein pubblicò la teoria della relatività generale, per generalizzare le idee sviluppate nella prima teoria e risolvere i problemi presenti nella teoria di Newton.
- La Relatività Generale è la teoria einsteiniana della gravitazione. La base è il principio di equivalenza.
- J.A.Wheeler dette la seguente definizione della Teoria della Relatività Generale:

La materia dice allo spazio-tempo come curvarsi, lo spazio-tempo dice alla materia come muoversi.

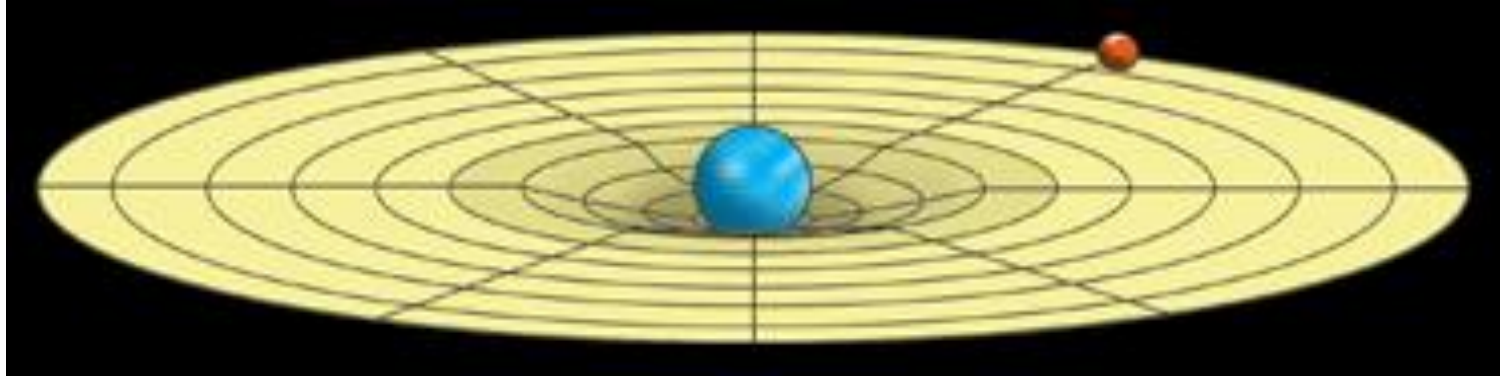
Cioè il campo gravitazionale di un corpo incurva lo spazio-tempo, le traiettorie di un corpo in un campo gravitazionale sono **geodetiche** dello spazio-tempo curvo. In altre parole la presenza di massa modifica la “geometria” dello spazio-tempo e nello spazio-tempo curvo il principio d’inerzia diventa il moto in un campo gravitazionale.

Equazione di campo

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



La gravitazione per Einstein

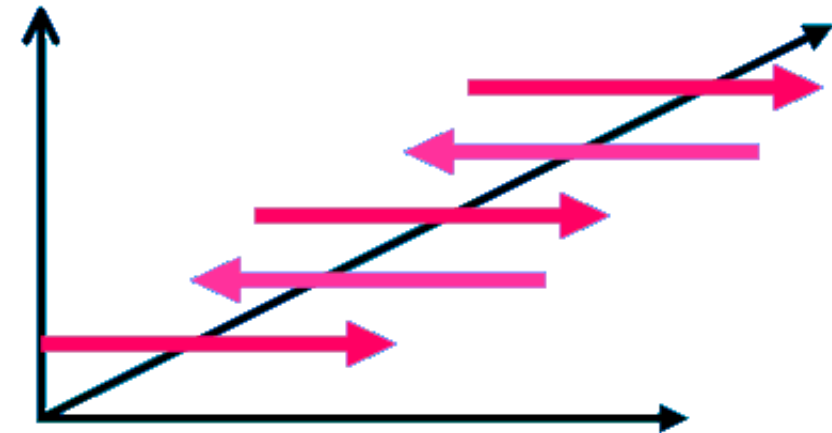
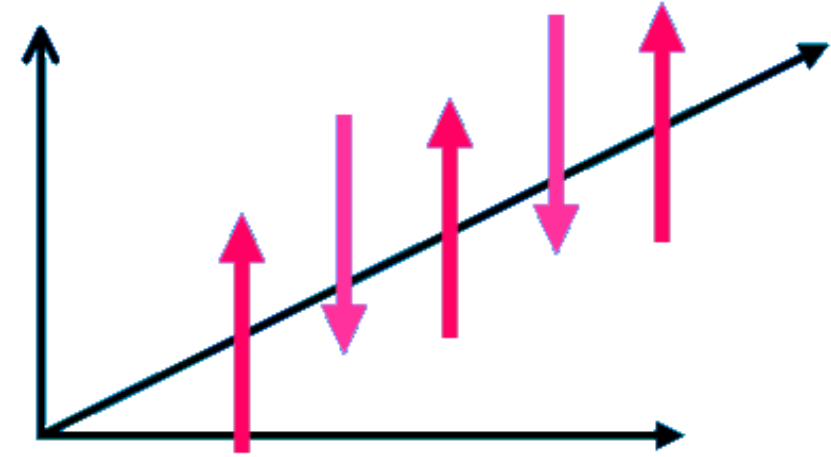
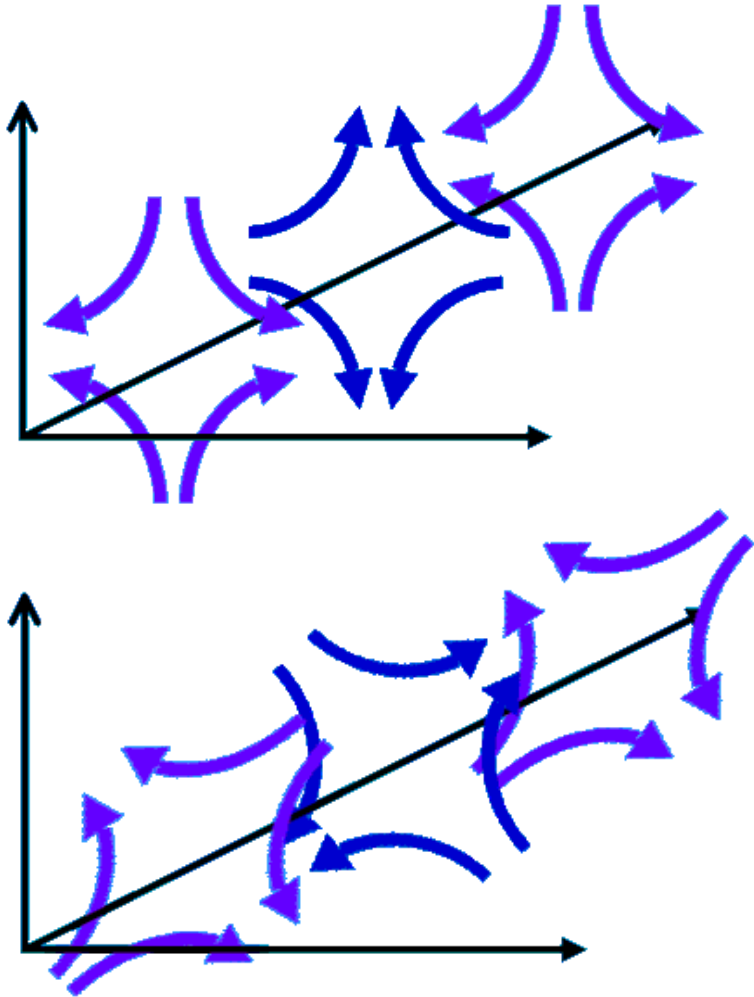


Nella teoria di Einstein **non c'è più la forza di gravità**, che eserciterebbe una «strana» azione a distanza, ma i corpi interagiscono localmente con la curvatura dello spazio-tempo. L'effetto è analogo a quello di una accelerazione (principio di equivalenza).

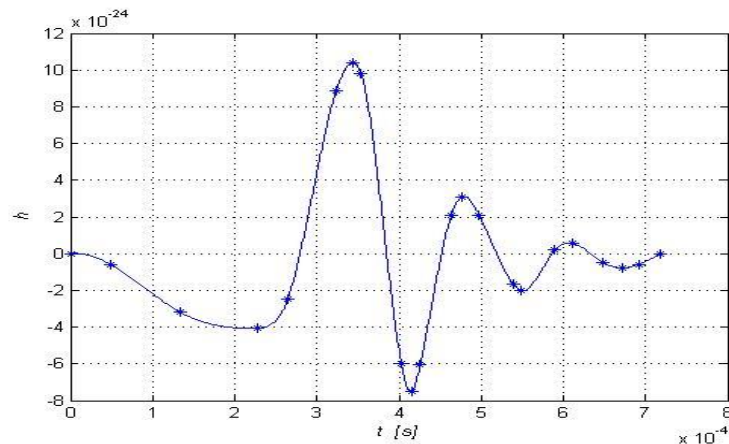
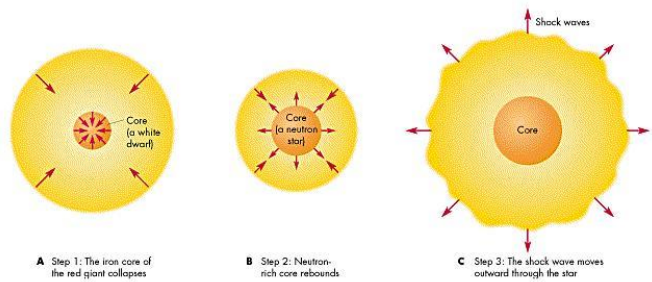
Le onde gravitazionali

- Come nella relatività speciale, anche nella relatività generale nulla può avere una velocità superiore della velocità della luce e quindi qualsiasi variazione del campo gravitazionale si propaga alla velocità della luce. Il mezzo che porta l'informazione di variazione sono le **onde gravitazionali**.
- Le onde gravitazionali sono variazioni della curvatura dello spazio che si propagano alla velocità della luce.
- La situazione è analoga a quella del campo elettro-magnetico, le cui variazioni sono “portate” dalle onde elettromagnetiche.
- Così, come ogni carica elettrica accelerata genera onde elettromagnetiche (come avviene in un'antenna, dove le cariche elettriche fanno un moto armonico e quindi accelerato), così ogni massa accelerata genera onde gravitazionali.
- Ovviamente ci sono varie differenze, una di queste è che le onde generate da qualsiasi oggetto con massa e velocità “terrestri” sono estremamente deboli.
- La situazione migliora nel caso di onde generate da oggetti astronomici, con masse dell'ordine della massa del Sole, velocità vicine a quella della luce e densità elevatissime, come le stelle di neutroni o i buchi neri.

Polarizzazione delle onde gravitazionali (e delle onde elettromagnetiche)



Sorgenti di onde gravitazionali: impulsi da esplosioni di supernova (e altro)



La Crab Nebula, ciò che resta da un'esplosione di supernova

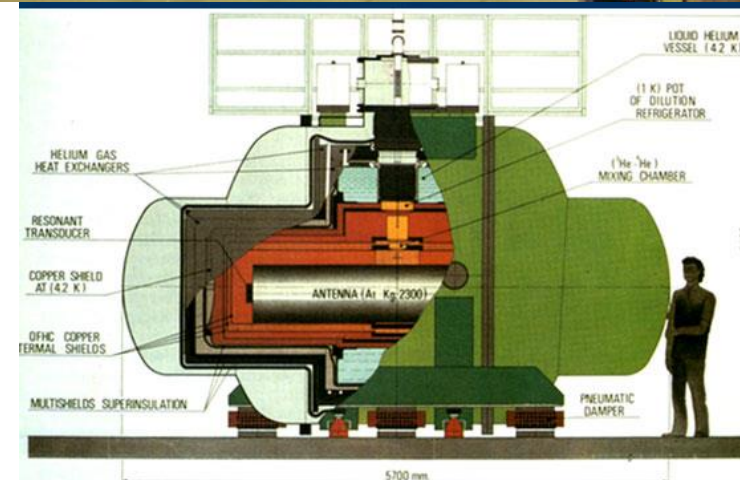
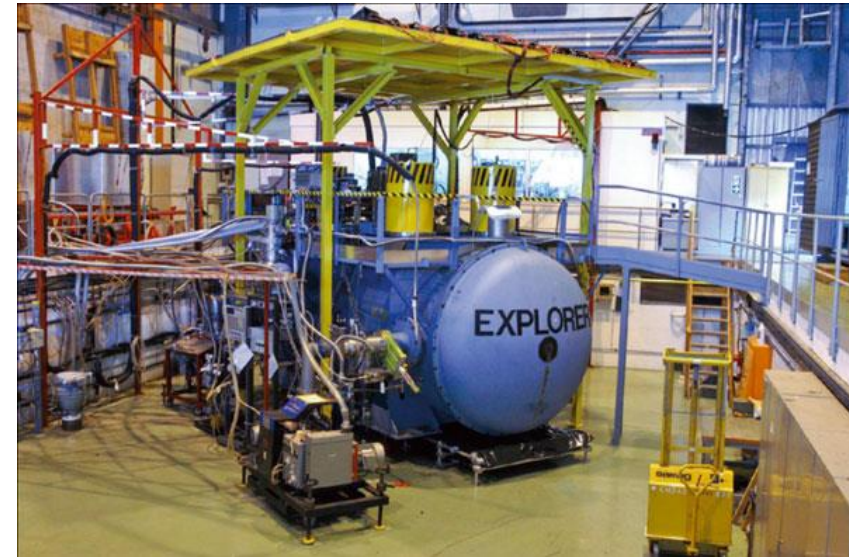
Le antenne gravitazionali

- Einstein si rese conto che l'ampiezza delle onde gravitazionali generate con qualsiasi possibile esperimento realizzabile sulla Terra erano di ampiezza così piccola da non poter essere rivelabile
- Solo a partire dagli anni 60, con lo sviluppo dell'astrofisica relativistica, ci si rese conto che potevano esserci fenomeni astrofisici che coinvolgevano grandi masse a elevatissime densità che avrebbero potuto generare onde gravitazionali con ampiezze molti ordini di grandezza più alte di quelle generabili a Terra.
- Si cominciò quindi a pensare a strumenti, le antenne gravitazionali, in grado di rivelare queste onde.

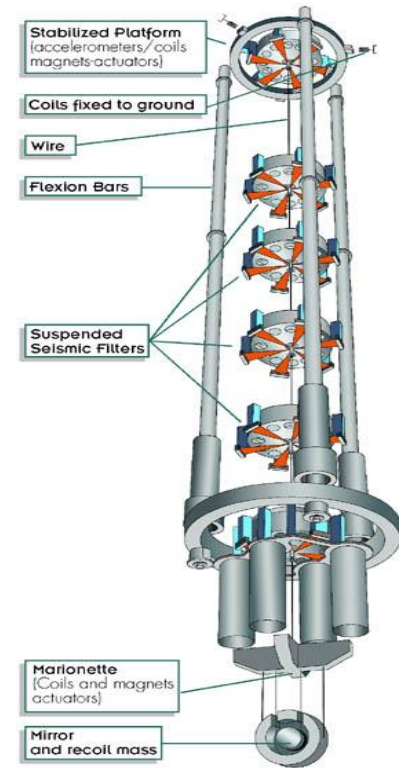
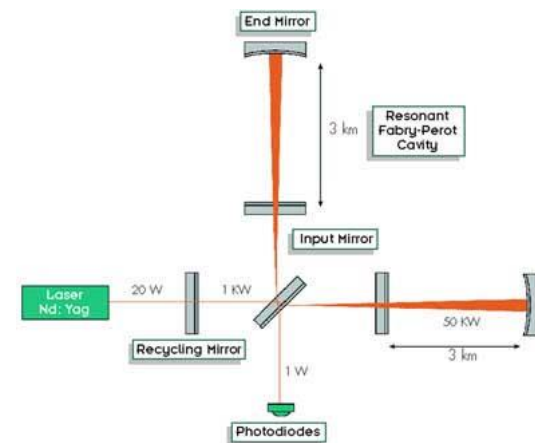
Joe Weber (1919-2000) e le «vecchie» antenne risonanti



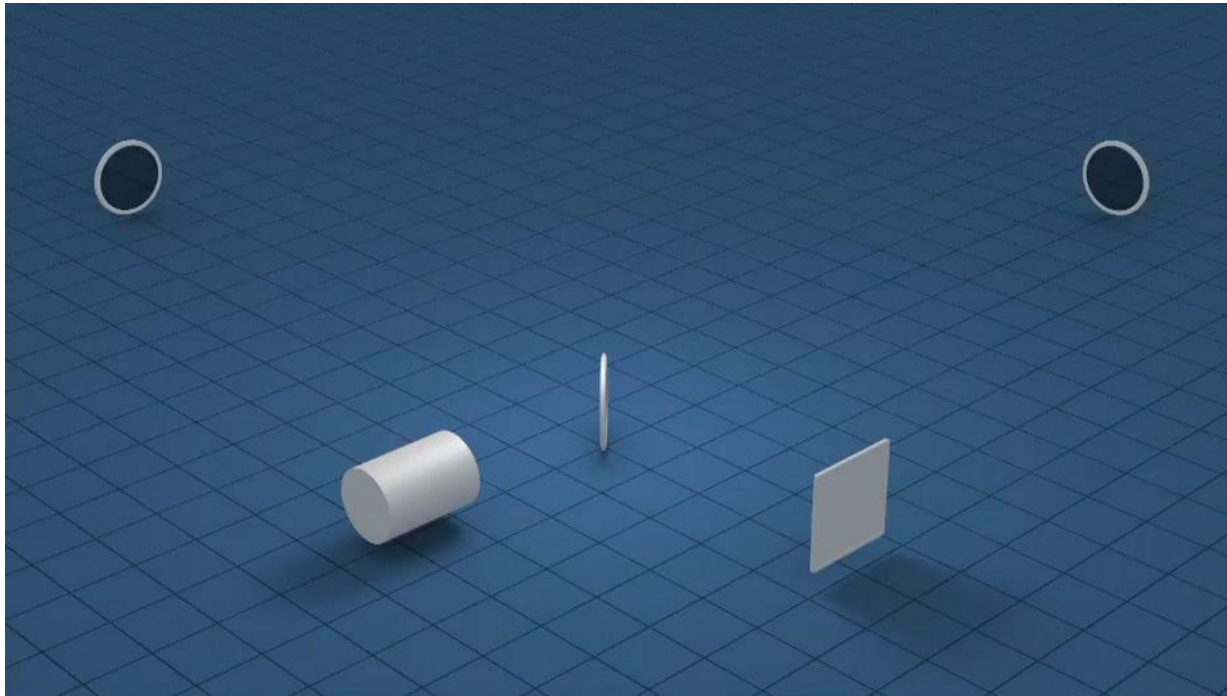
ts423255 [RM] © www.visualphoto.com



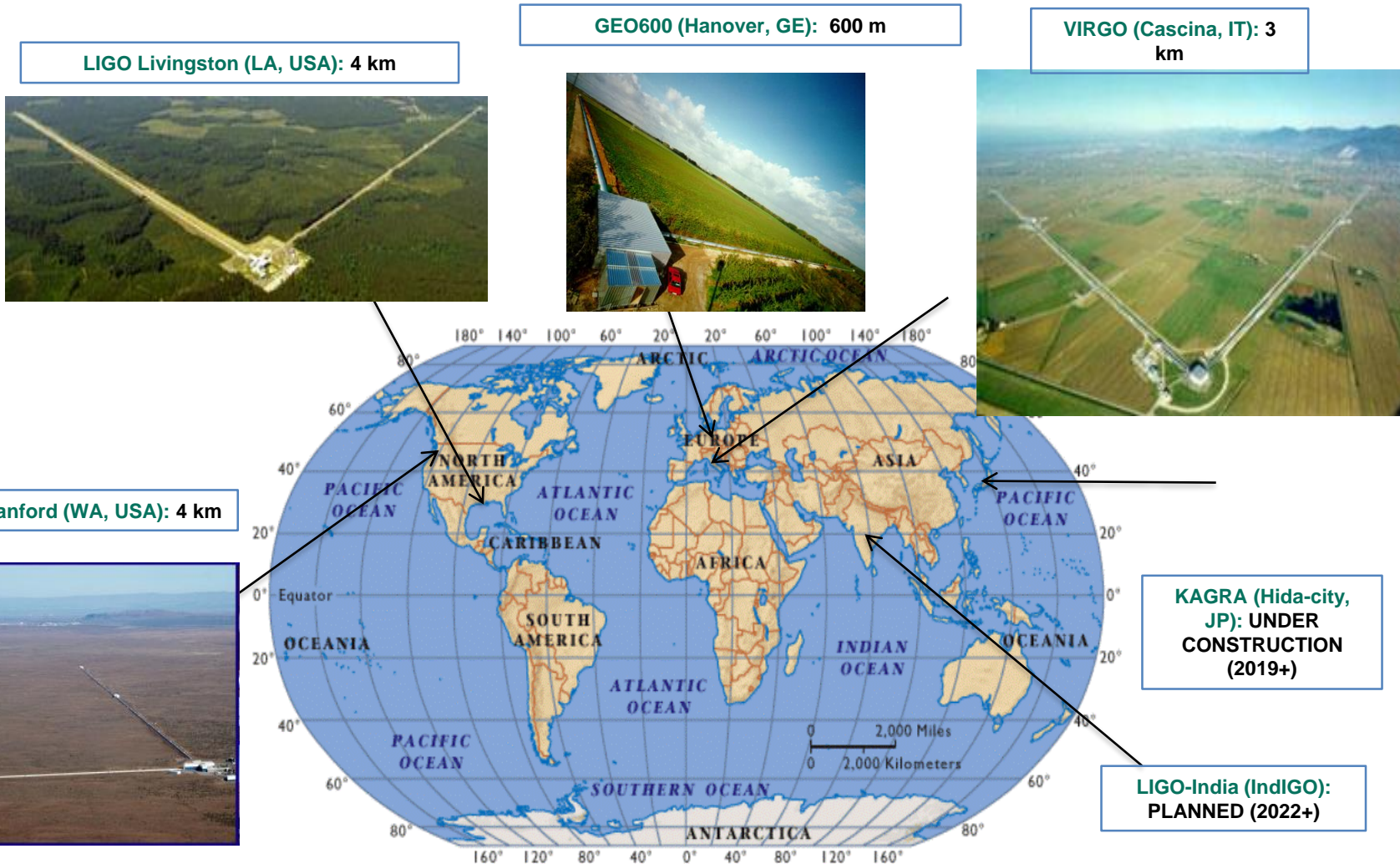
Gli interferometri gravitazionali – l'antenna Virgo



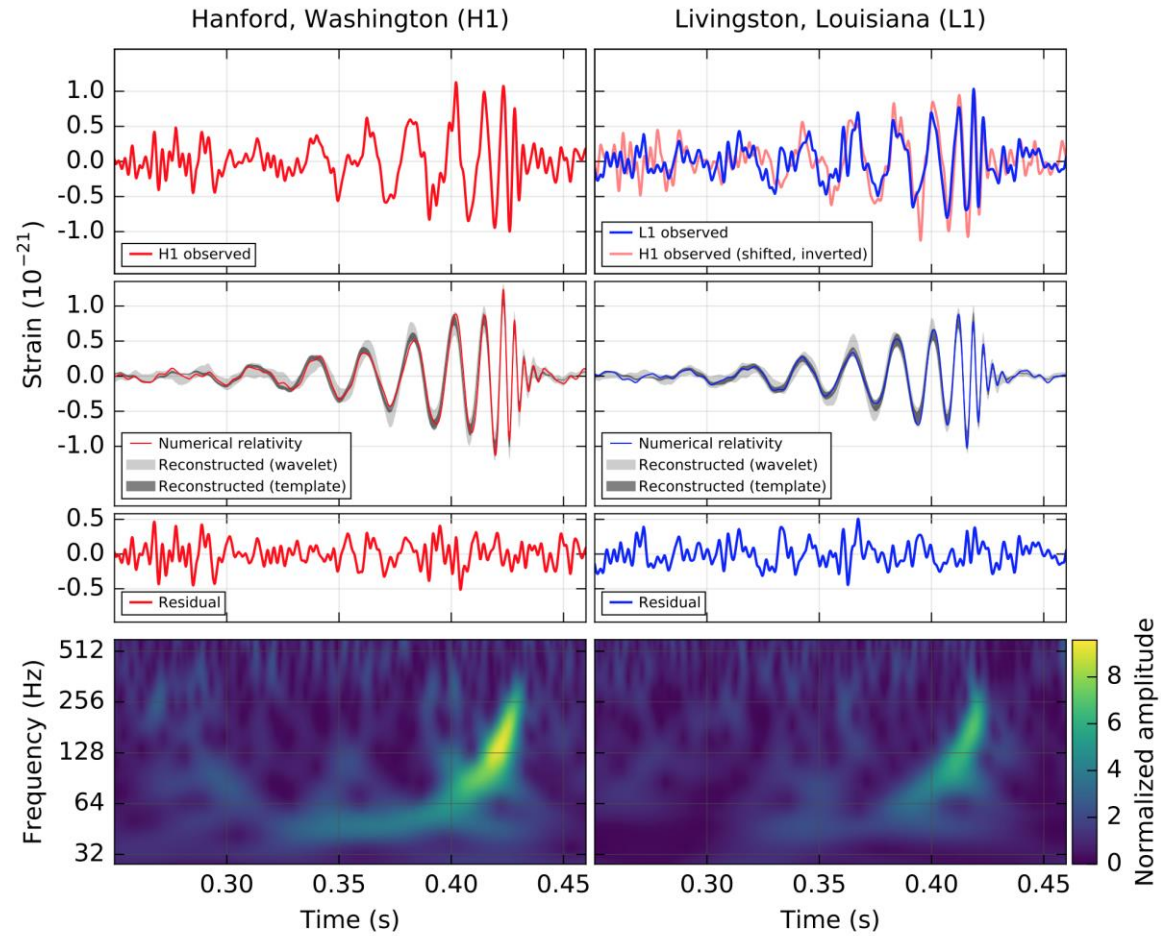
Come funzionano Virgo e LIGO

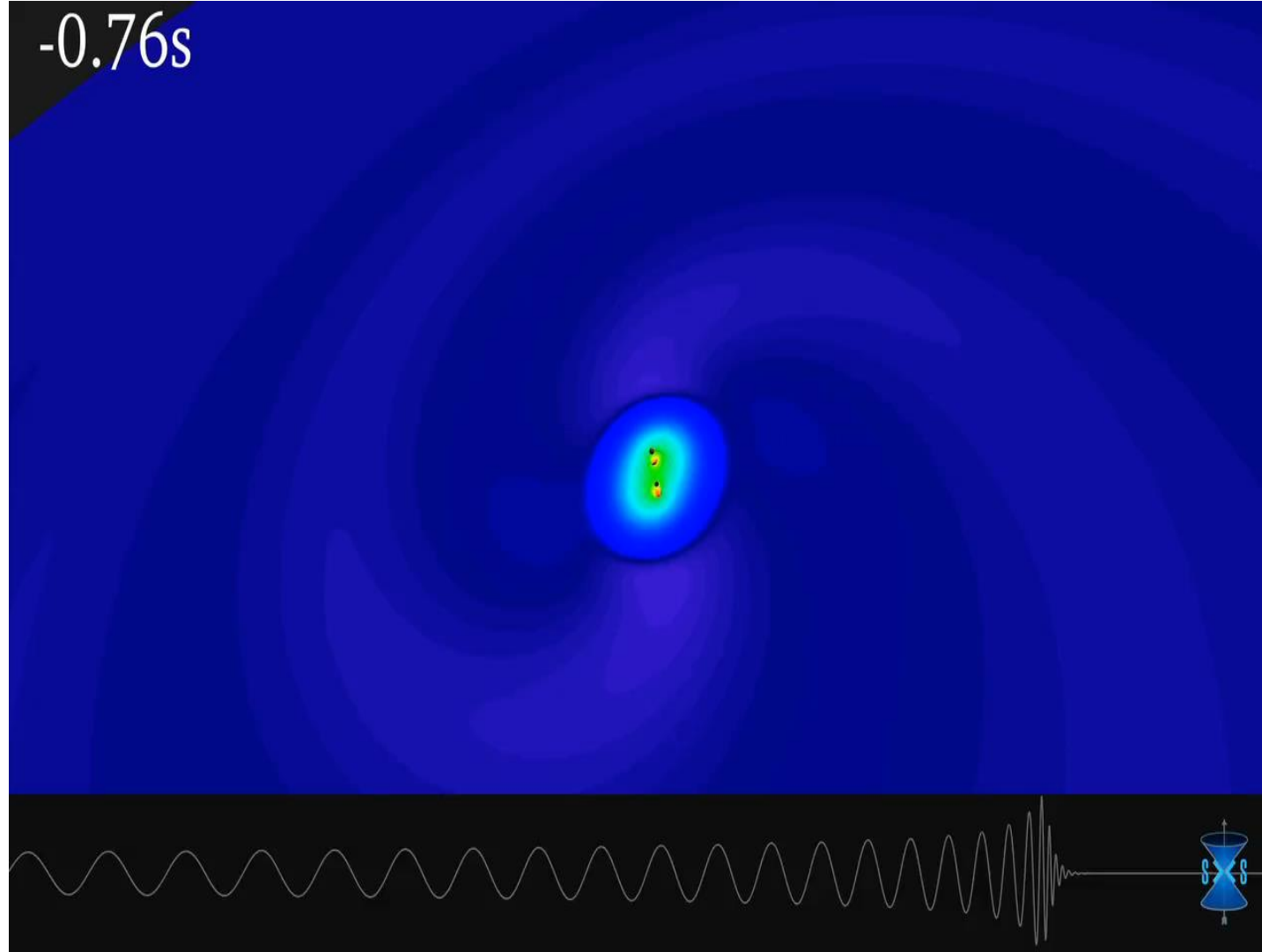


Global GW detector network



L'evento del 14 Settembre 2015



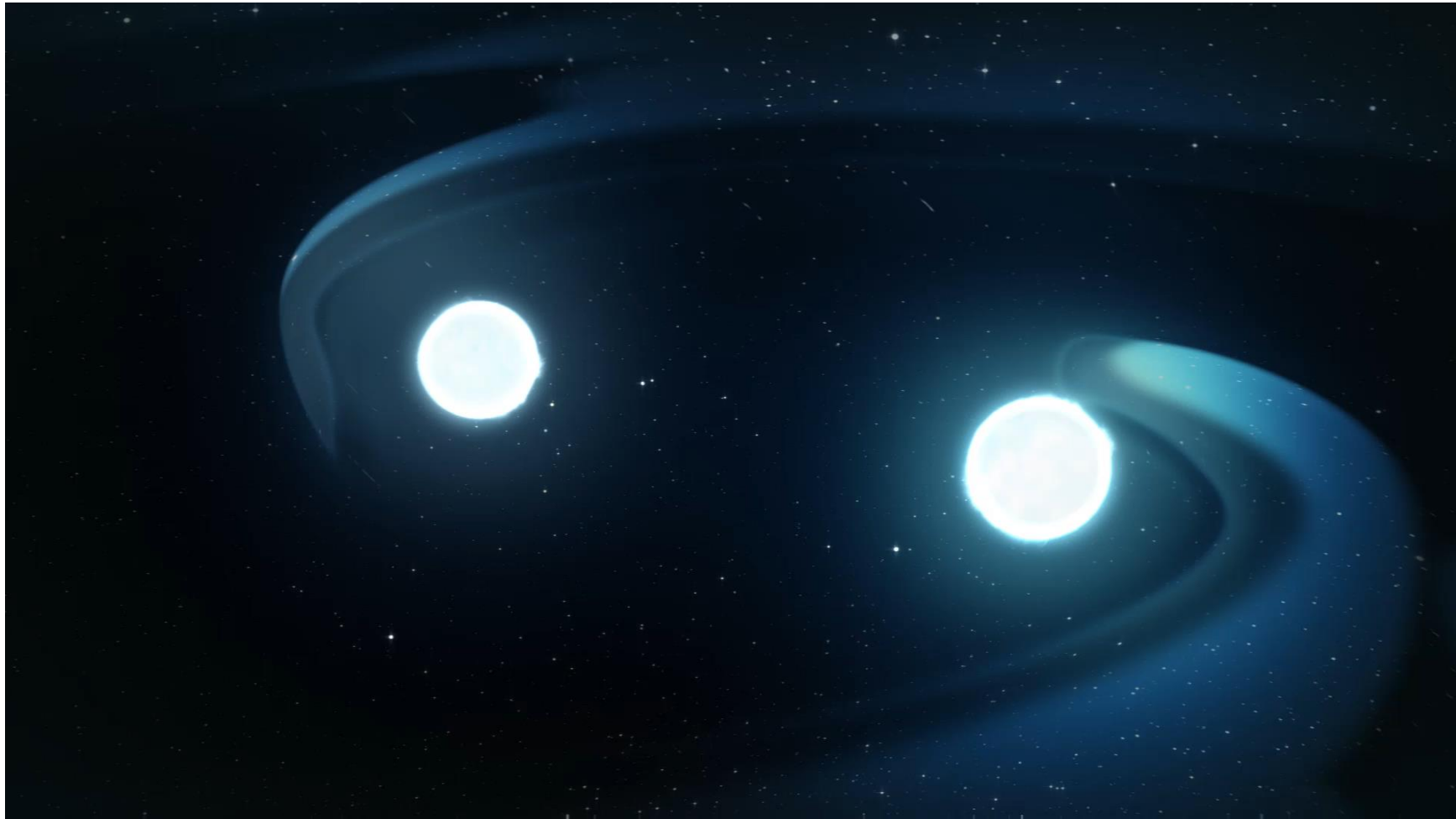


Quantity	Value	Upper/Lower error estimate	Unit
Primary black hole mass	36	+5 -4	M sun
Secondary black hole mass	29	+4 -4	M sun
Final black hole mass	62	+4 -4	M sun
Final black hole spin	0.67	+0.05 -0.07	
Luminosity distance	410	+160 -180	Mpc
Source redshift, z	0.09	+0.03 -0.04	
Energy radiated	3	+0.5 -0.5	M sun

Commenti

- Ampiezza dell'onda (di deformazione) 10^{-21} : come misurare un milionesimo di un capello (10^{-7} mm) sulla distanza tra la Terra e il Sole (150 milioni di chilometri)
- Energia irradiata: 3 masse solari in circa 0.1 s , equivalenti all'energia elettromagnetica irradiata da tutta la nostra Galassia in 2300 anni.
- Durante gli 0.1 s, la Terra è stata inondata dall'energia di questo evento più di tutte le stelle del cielo e della Luna.
- L'evento è avvenuto 1.3 miliardi di anni fa: sulla Terra si cominciavano a sviluppare le prime forme di vita.
- Dal settembre 2015 all'Agosto 2017 sono stati rivelati una mezza dozzina di eventi simili. L'ultimo dei quali è stato particolarmente interessante, perché è stato rivelato, oltre che dalle tre antenne gravitazionali, anche dagli osservatori elettro-magnetici ed è stata identificata con precisione la galassia di appartenenza.

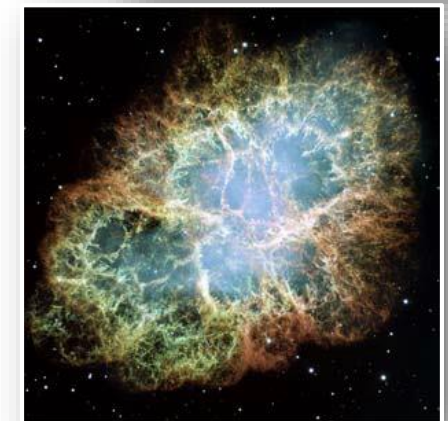
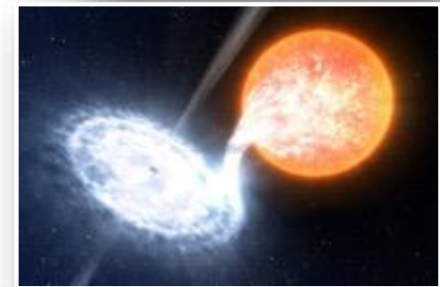
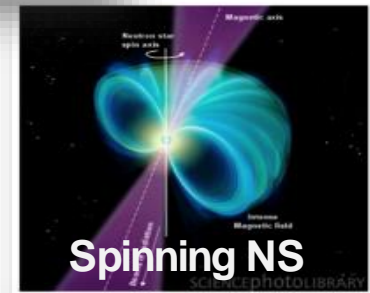
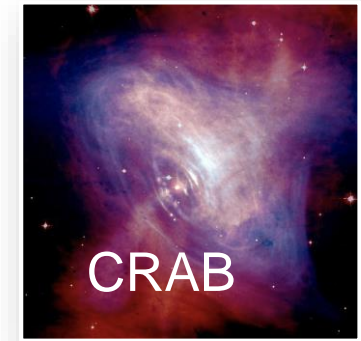
L'evento del 17 Agosto 2017



Sorgenti periodiche (o continue)

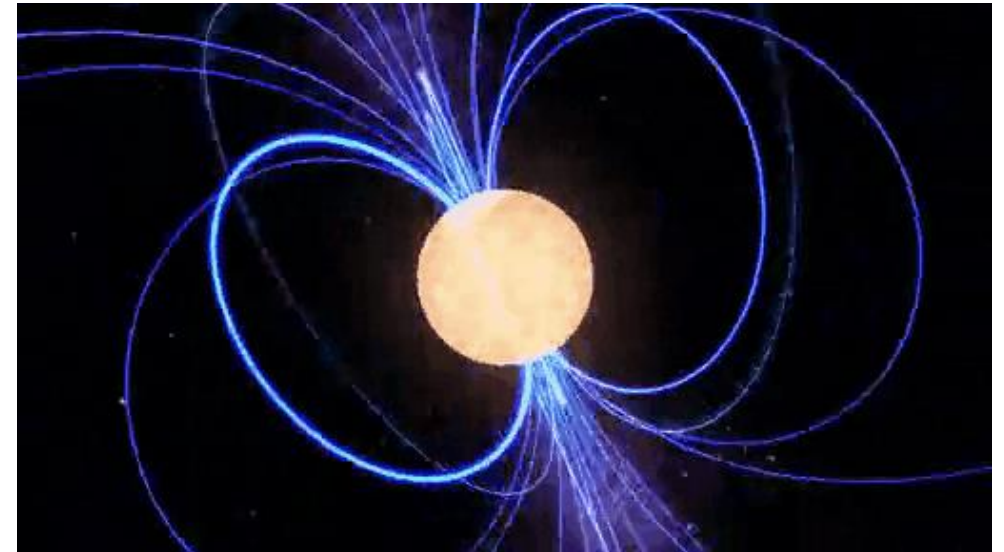
Classifichiamo come "continui" quei segnali che hanno durate maggiori o comparabili alle prese dati dei rivelatori

- Sono emesse da sistemi il cui momento di quadrupolo di massa varia nel tempo in modo quasi-periodico.
- Per rivelatori quali LIGO e Virgo le sorgenti di onde gravitazionali continue interessanti sono **stelle di neutroni** che ruotano in modo asimmetrico, in sistemi isolati o binari.
- Sappiamo che sorgenti di questo tipo esistono ma sono difficili da trovare: nella nostra Galassia circa 2400 NSs sono state osservate tramite emissione elettromagnetica, mentre si sa che ne esistono circa 10^9 !



Caratteristiche principali delle sorgenti periodiche

- Rispetto alla coalescenza di sistemi binari le durate sono molto maggiori, ma l'ampiezza aspettata è almeno 1000 volte piu' piccola.
- La ricerca va fatta integrando su tempi lunghi.
- Il segnale non è monocromatico al rivelatore:
 - effetto Doppler
 - spindown
 - antenna pattern



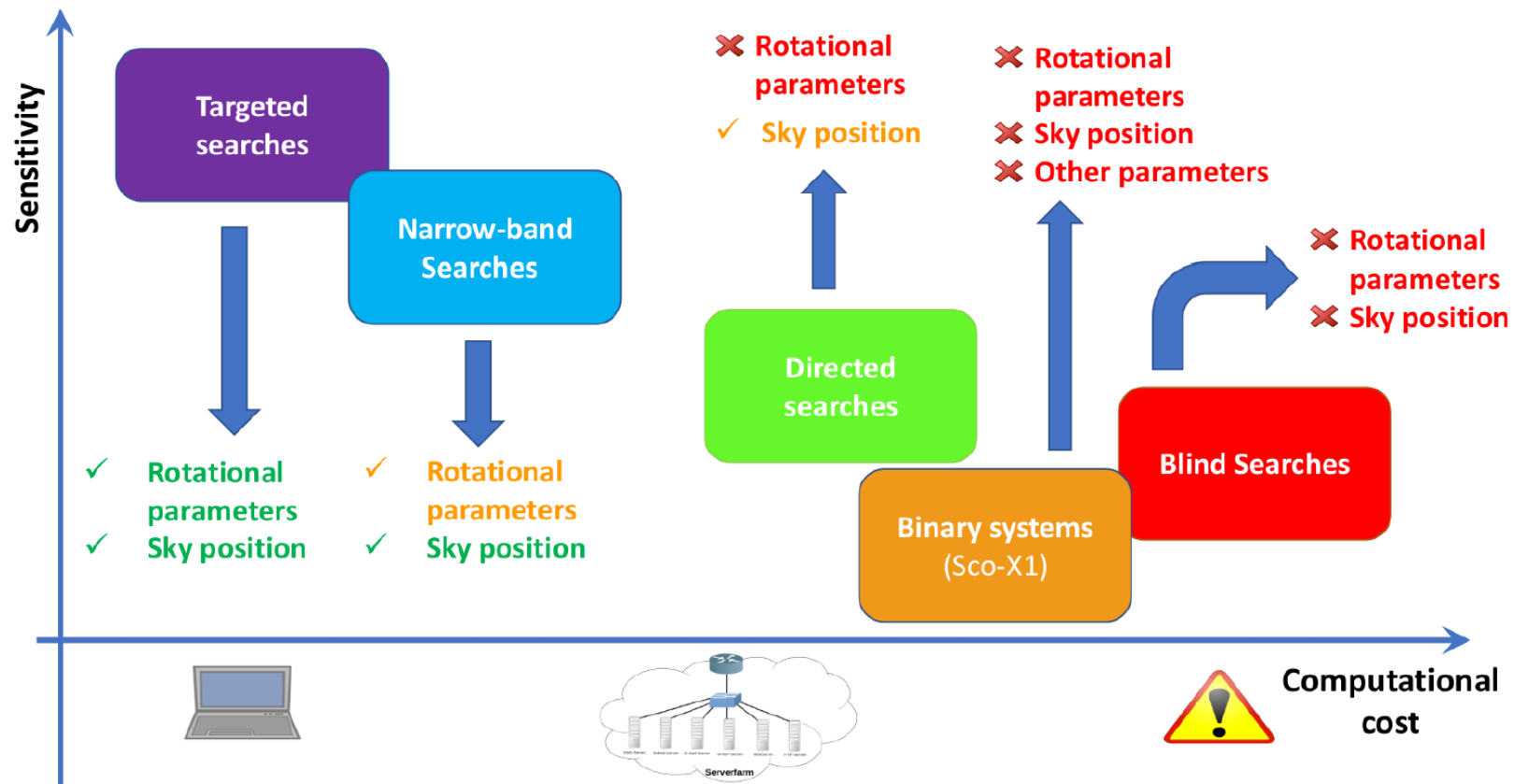
$$h_0 \cong 10^{-27} \left(\frac{I_{zz}}{10^{38} \text{ kg} \cdot \text{m}^2} \right) \left(\frac{10 \text{ kpc}}{d} \right) \left(\frac{f}{100 \text{ Hz}} \right)^2 \left(\frac{\varepsilon}{10^{-6}} \right)$$

$\varepsilon_{\text{max}} \sim 10^{-5}$ per 'standard' NSs (core fluido, materia nucleare normale)

$\varepsilon_{\text{max}} \sim 10^{-1}$ per exotic quark NSs

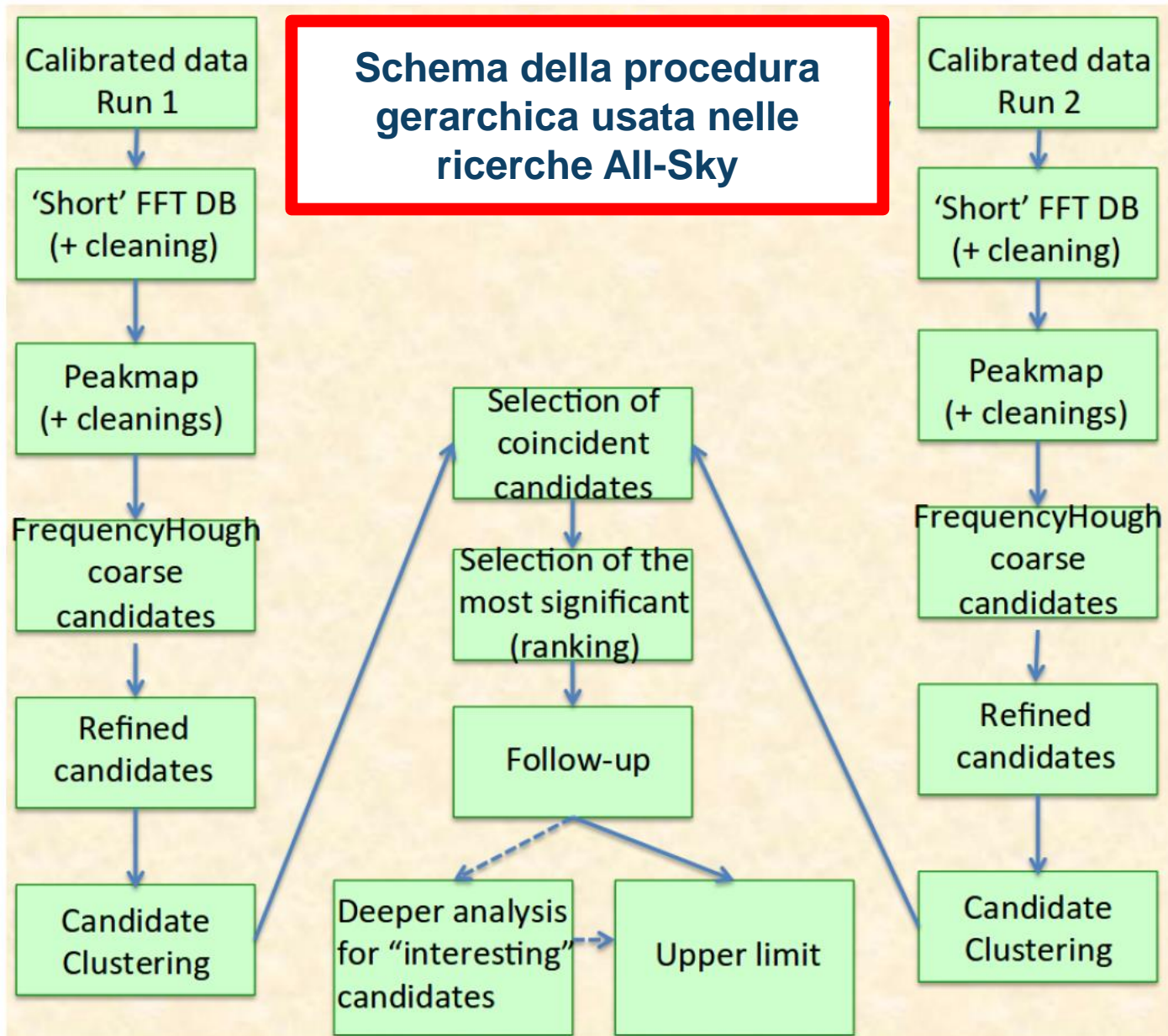
(N. Jonhson-McDaniel, B. Owen PRD 86 063600 , PRD 87 129903)

I diversi tipi di ricerche e l'impatto computazionale



Il metodo ottimale di ricerca, che massimizza la sensibilità, è basato sul filtro adattato

Nel caso di parametri della sorgente non noti, lo spazio dei parametri diventa computazionalmente ingestibile



PSS: Periodic Source Searches

- È il nostro software di analisi interamente basato su **MATLAB** (a parte la creazione del data base di FFT, attualmente scritto in C)
- Il toolbox sul quale **PSS** si basa si chiama **Snag**



<http://www.roma1.infn.it/~frasca/snag/>

Signal and noise for gravitational antennas

Snag is a Matlab data analysis toolbox oriented to gravitational-wave antenna data.

∅ [Download Snag \(vers. 2, rel. 8 February 2018\)](#)

∅ [Snag User Guide](#)

∅ [Snag Programming Guide](#)

∅ [General Rules](#)

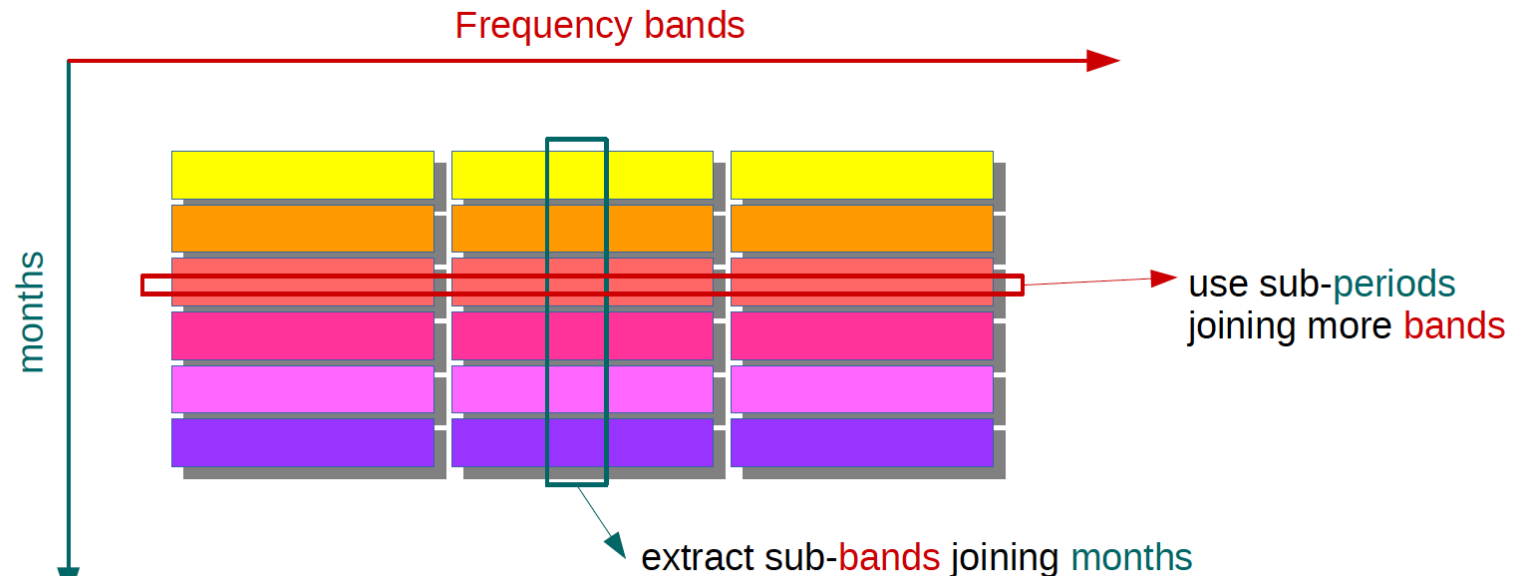
Object oriented

> 2000 functions

La recente infrastruttura di PSS "Band-Sampled-Data" (BSD)

PSS

Software for the Periodic Source Search



Credit: O.J. Piccinni

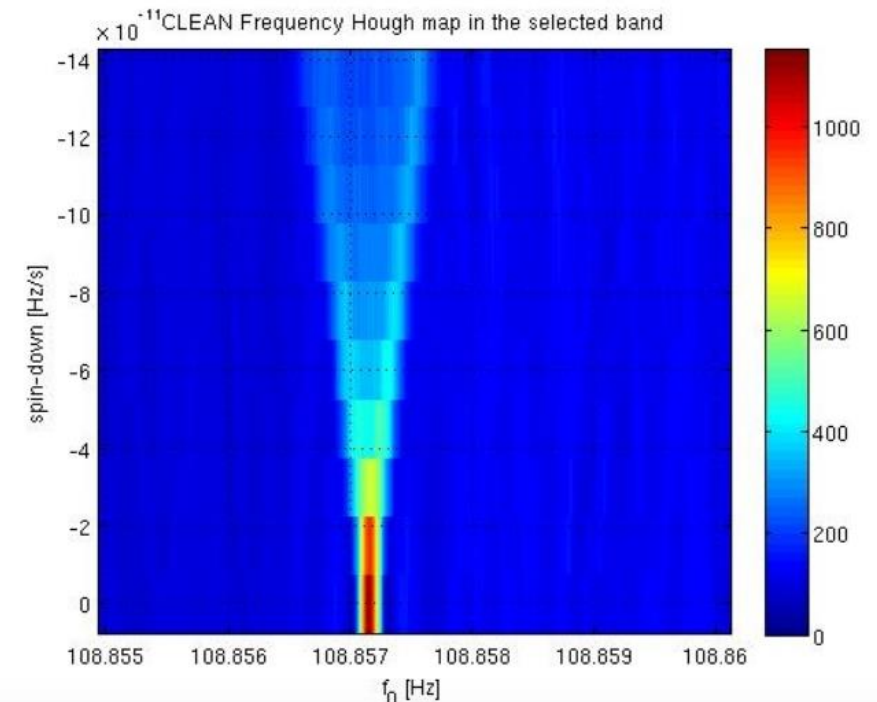
Consente di organizzare i dati dei rivelatori in modo flessibile verso estrazioni e combinazioni di bande di frequenza e/o periodi temporali.

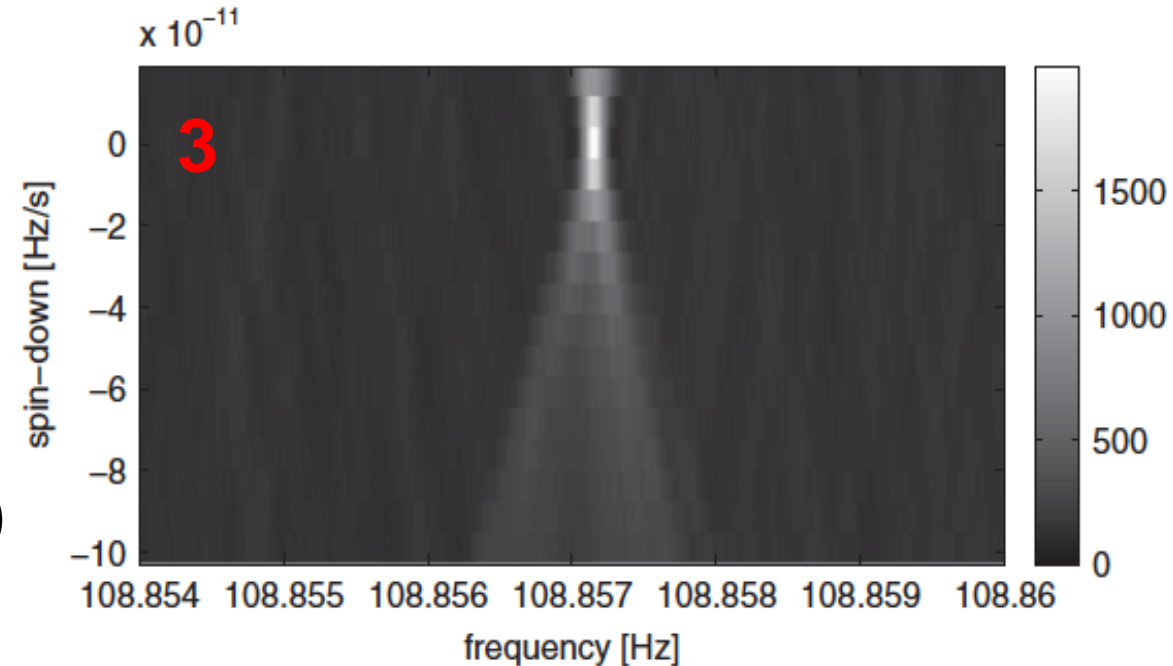
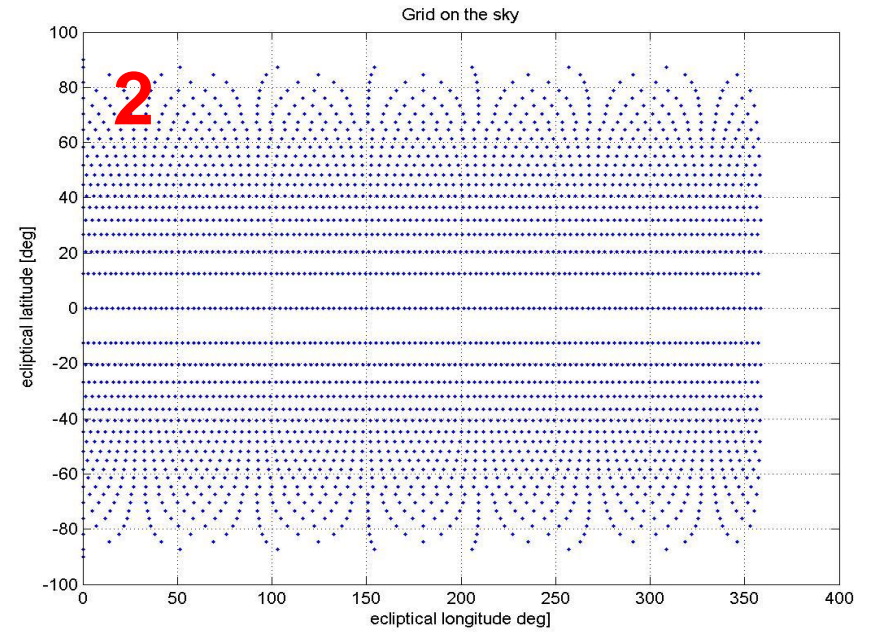
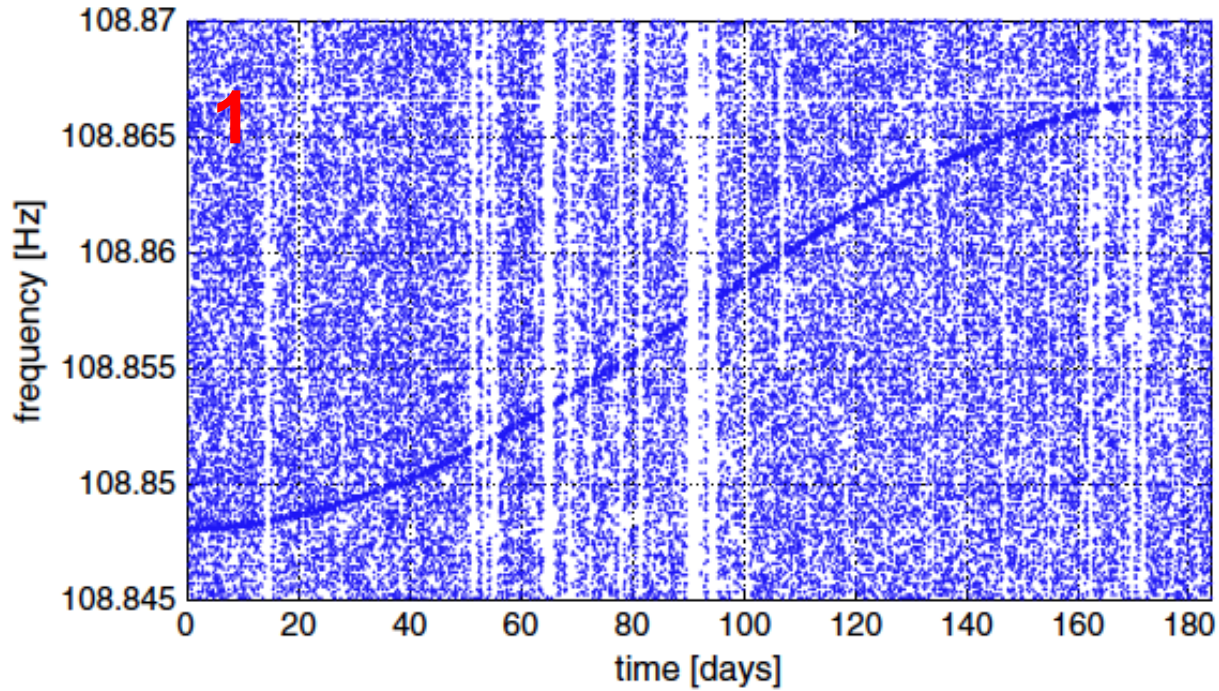
La trasformata di Hough

- La trasformata di Hough è un metodo di pattern recognition, originariamente sviluppato negli anni '60 per analizzare tracce nelle camere a bolle
- “Frequency Hough”: Trasformazione fra il piano tempo-frequenza, corretta per la posizione del cielo, e il piano frequenza della sorgente-spindown, (f_0, d)

$$f = f_0 + d * (t - t_0)$$

- È la parte più pesante delle ricerche All-Sky





Hardware injection, di ampiezza molto grande, in dati di Virgo:

- 1-Mappa tempo-frequenza
- 2-Griglia nel cielo (long-lat)
- 3-Mappa di Hough finale (freq-spindown)

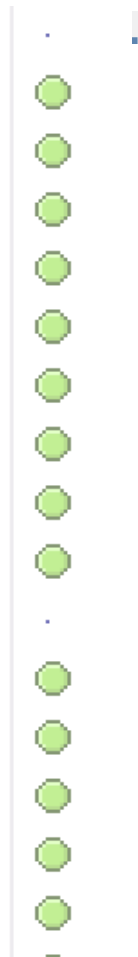
Come usiamo GRID con MATLAB

- La ricerca All-Sky sull'ultimo run scientifico LIGO/Virgo, O2 (6 mesi due rivelatori e 1 mese tre rivelatori) richiede **20 M(core-hour)** col pacchetto Frequency Hough **HFDF**

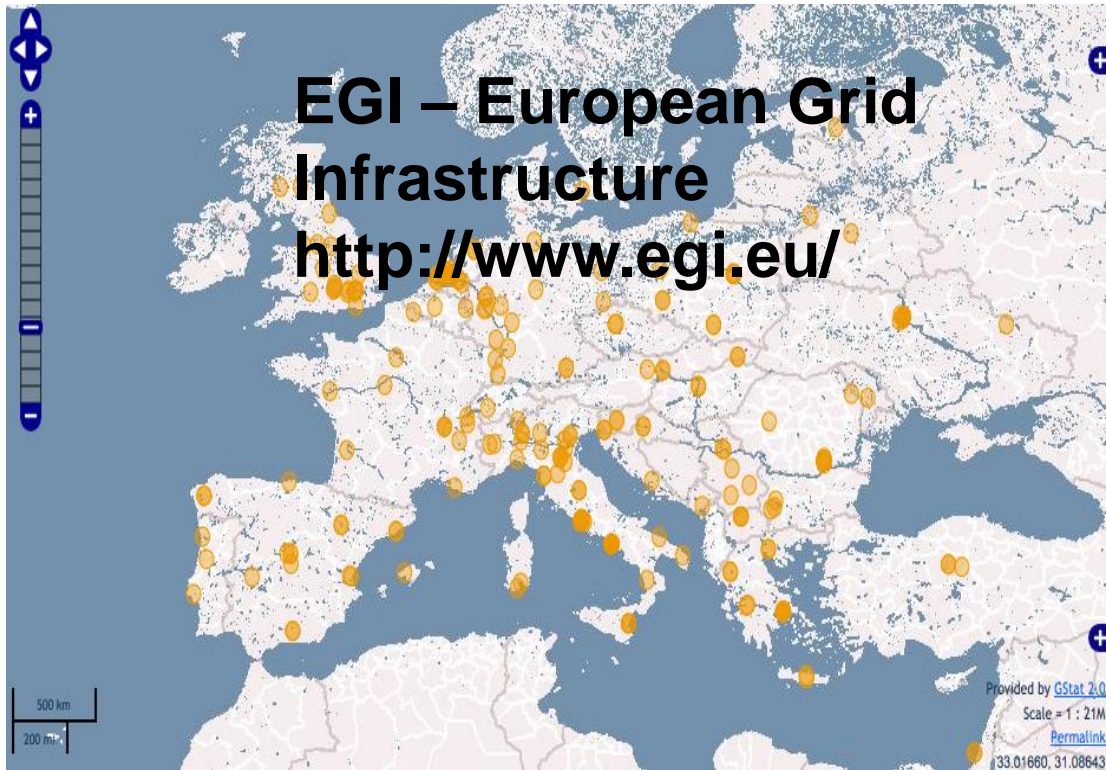


VETOSCIENCE_WEIGHT.m~
VETOSCIENCE_WEIGHT.m
VETOSCIENCE.m
REDUCE_PEAKS.m
HFDF_SUPER_template.m
hfdf_refine.m
hfdf_peak.m
hfdf_patchORIG.m
hfdf_patch.m
HFDF_JOB_orig.m
HFDF_JOB.m~
HFDF_JOB.m
hfdf_houghMEX.m
hfdf_hough.m
coreHoughDynLoop_mex.mexa64
coreHoughDyn_mex.mexa64

PSS

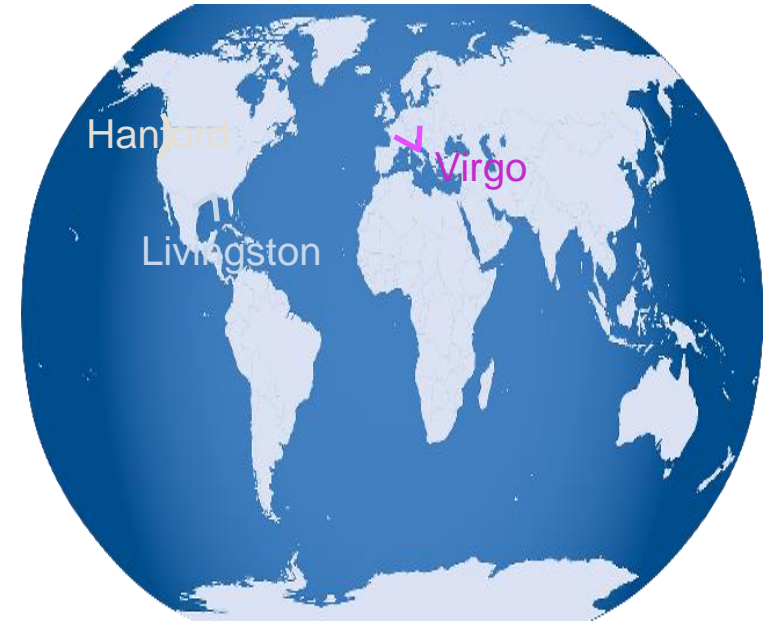


Il calcolo viene distribuito



- Sottomettiamo jobs via **Grid**. Nei periodi di analisi lavoriamo con ~ 2000 cores impegnati 24 ore al giorno/7 giorni a settimana.
- Il porting di alcune parti del nostro software di analisi su **GPU** è una possibilità su cui abbiamo iniziato a lavorare.

Il gruppo Virgo di Roma-INFN/Sapienza



GW170814

+ x

