

La ricerca delle onde gravitazionali

Sergio Frasca



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

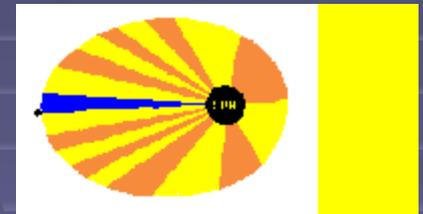
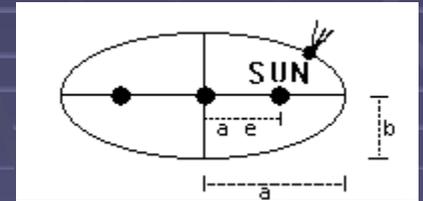
Terracina, 24 Febbraio 2009

Sommario

- La gravitazione “classica”
- Limiti della teoria classica
- La gravitazione nella Relatività Generale
- Le Onde Gravitazionali
- La rivelazione dei segnali delle antenne gravitazionali

Le leggi di Keplero

- I pianeti compiono orbite ellittiche di cui il Sole occupa uno dei fuochi
- La congiungente il Sole e un pianeta spazza aree uguali in tempi uguali
- Il rapporto tra il cubo del semiasse maggiore dell'orbita di ciascun pianeta e il quadrato del periodo orbitale, per un dato sistema, è una costante



Pianeta	P (anni)	a (AU)	T ²	R ³
Mercurio	0.24	0.39	0.06	0.06
Venere	0.62	0.72	0.39	0.37
Terra	1	1	1	1
Marte	1.88	1.52	3.53	3.51
Giove	11.9	5.2	142	141
Saturno	29.5	9.54	870	868

L'equazione di Newton

- Dalle leggi di Keplero, Isaac Newton dedusse, alla fine del 600, la formula della forza di gravità che si esercita tra due corpi di massa M e m , a distanza r tra di loro

$$F = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2}$$

- Il valore di G fu misurato in laboratorio circa un secolo dopo da Henry Cavendish con la bilancia di torsione, inventata da John Michell, e vale $6.67259 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$

La precessione del perielio di Mercurio

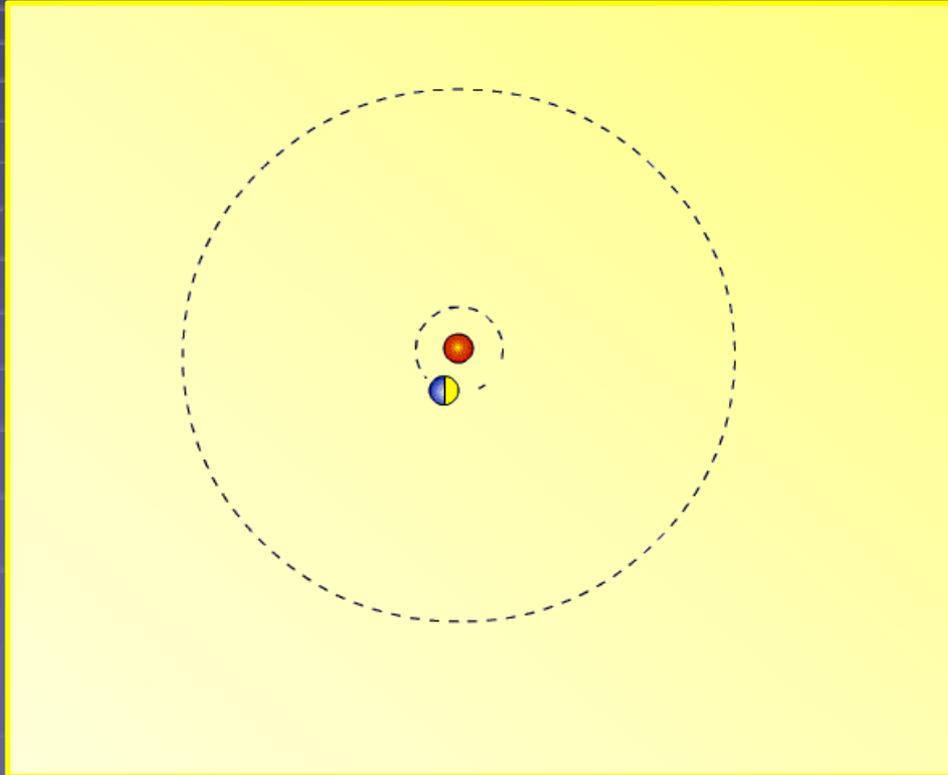
La teoria di Newton, unita alla potenza dell'analisi matematica, dette previsioni di grandissima precisione sul moto dei pianeti. Per esempio nel 1846 Le Verrier, analizzando anomalie del moto del pianeta Urano, dedusse la presenza di un altro pianeta allora sconosciuto, di cui calcolò l'orbita e la posizione in quel momento: fu così scoperto Nettuno.

Lo stesso Le Verrier 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).

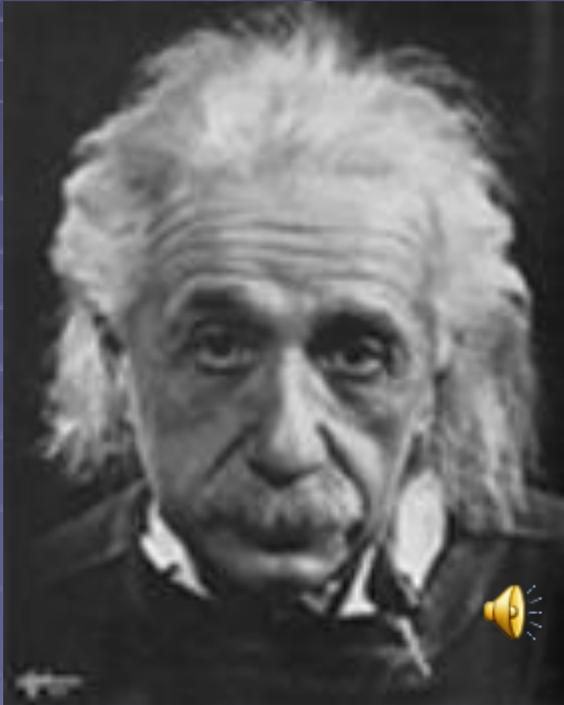
Questa differenza di 0.01 gradi al secolo era l'unico "errore" della teoria di Newton trovato fino a cento anni fa.

Per "correggere" questo errore scese in campo Albert Einstein.

La precessione del perielio di Mercurio



Einstein, la Relatività Speciale e la Relatività Generale



Albert Einstein nacque a Ulm in Germania nel 1879 e morì a Princeton nel 1955.

Nel 1905 fece tre lavori teorici che rivoluzionarono la Fisica: a) trovò le leggi che legavano il moto browniano e la diffusione alle dimensioni delle molecole, b) dette la spiegazione teorica dell'effetto fotoelettrico, prima conferma dell'ipotesi di Planck sui quanti (che gli valse il premio Nobel nel 1921), c) propose la teoria della relatività speciale, in cui introdusse nuove nozioni di spazio e tempo, non più assoluti. In questo ambito, tra l'altro, formulò la famosa equazione $E = m c^2$.

Nel 1916 formulò la Teoria della Relatività Generale, in cui si generalizza la relatività al caso dei moti accelerati e dette una nuova visione del campo gravitazionale.

La gravitazione per Einstein

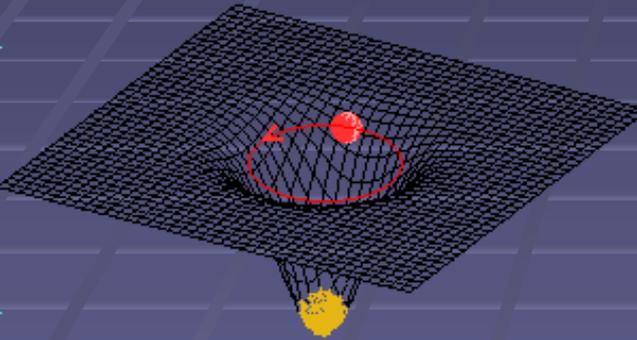
La Relatività Generale è la teoria einsteiniana della gravitazione. La base è il principio di equivalenza.

J.A.Wheeler dette la seguente definizione della Teoria della Relatività Generale:

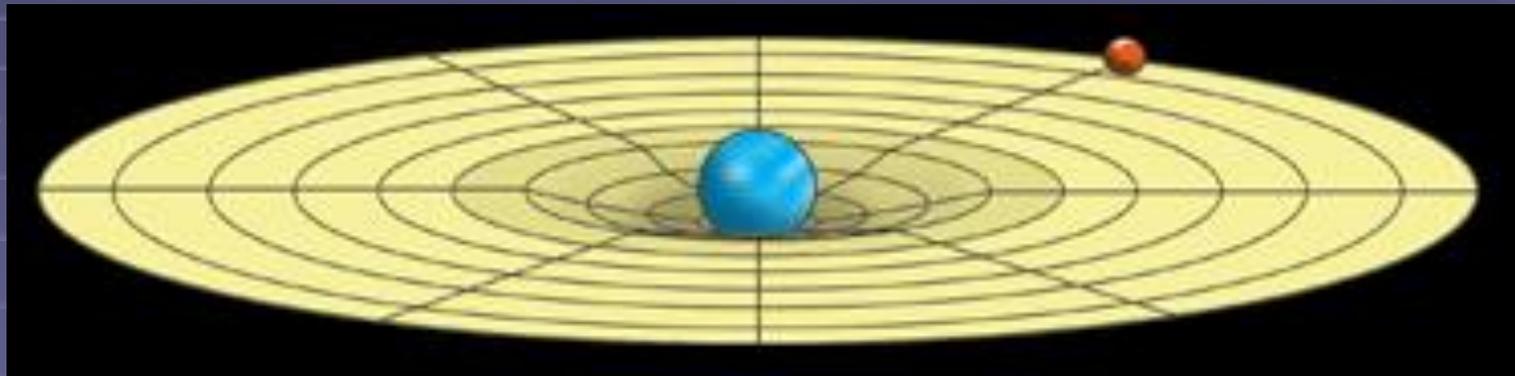
- La materia dice allo spazio-tempo come curvarsi, lo spazio-tempo dice alla materia come muoversi.

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 e del tempo e nello spazio-tempo curvo il principio d’inerzia diventa il moto in un campo gravitazionale.

La teoria della R.G. ingloba la teoria di Newton, valida in buona approssimazione quasi sempre.



La gravitazione per Einstein



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.

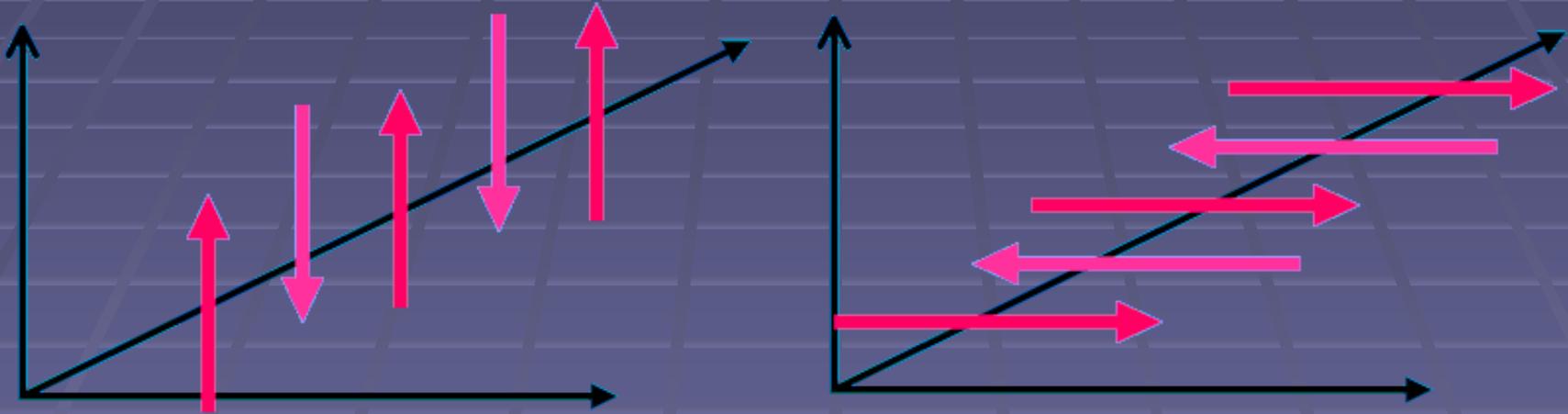
La situazione è analoga a quella del campo elettro-magnetico, le cui variazioni sono "portate" dalle onde elettromagnetiche.

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.

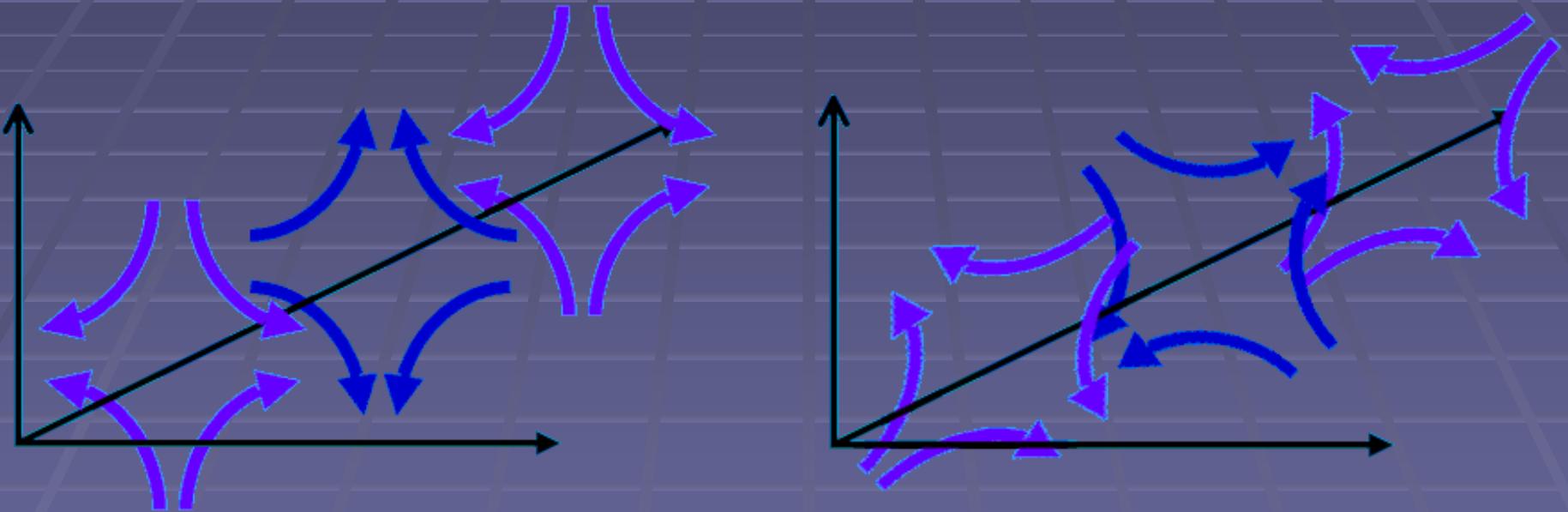
Polarizzazione delle onde elettromagnetiche



Effetto delle onde elettro-magnetiche su di una carica elettrica.

Su questo effetto si basano le antenne per le onde radio (radio, TV, telefonini...)

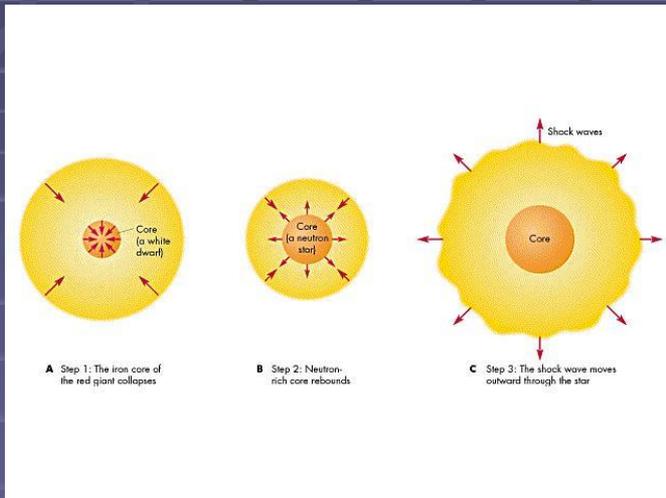
Polarizzazione delle onde gravitazionali



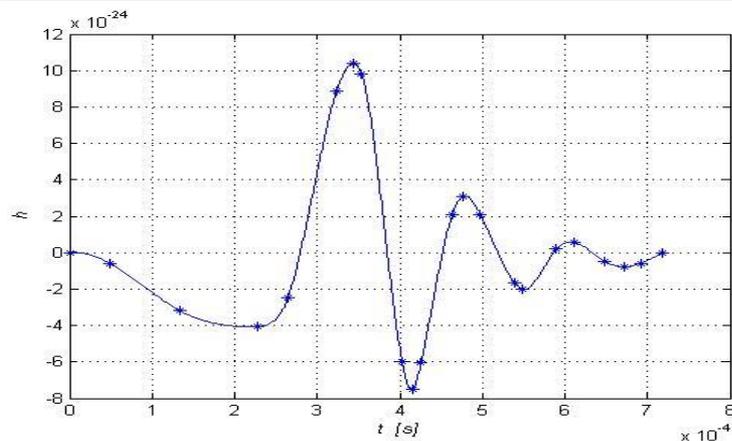
Effetto delle onde gravitazionali sullo spazio in cui si propagano.

Su questo effetto si basano le antenne gravitazionali.

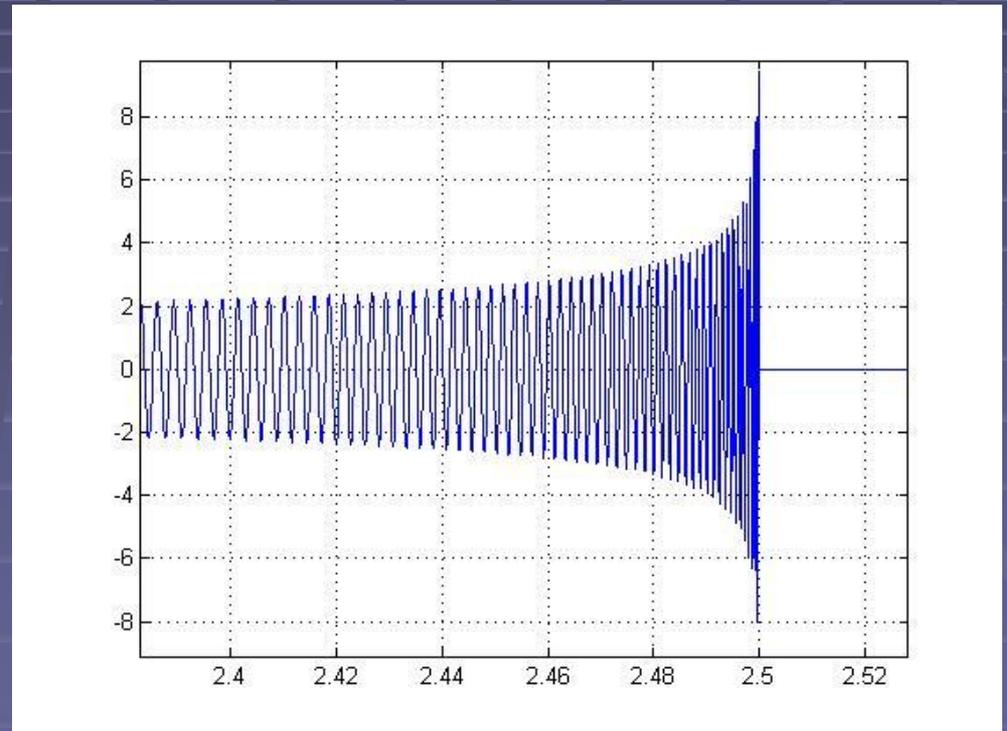
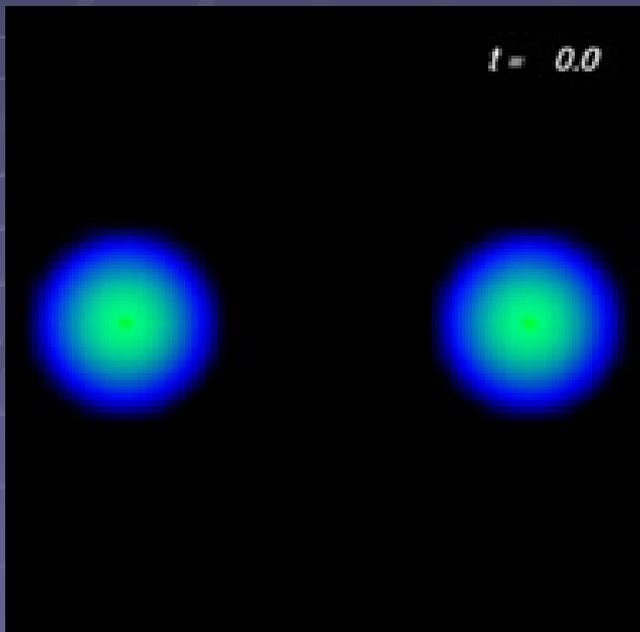
Sorgenti di onde gravitazionali: impulsi da esplosioni di supernova



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

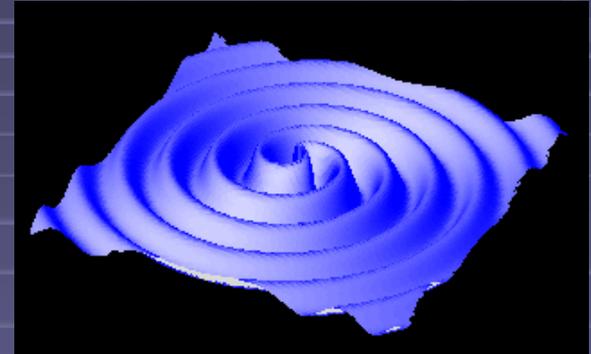


Sorgenti di onde gravitazionali: “chirp” da binarie coalescenti

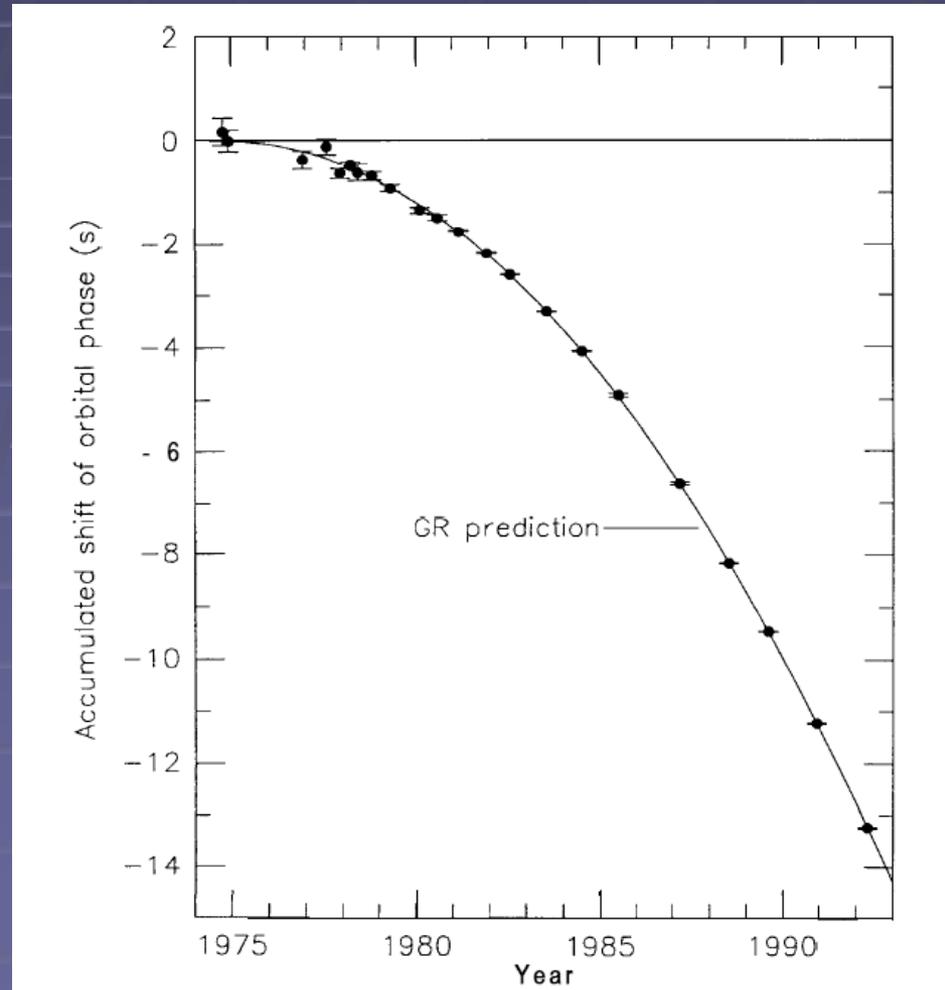


Sorgenti di onde gravitazionali: altre sorgenti

- Sorgenti periodiche
- Fondo stocastico
- “Pop corn” noise



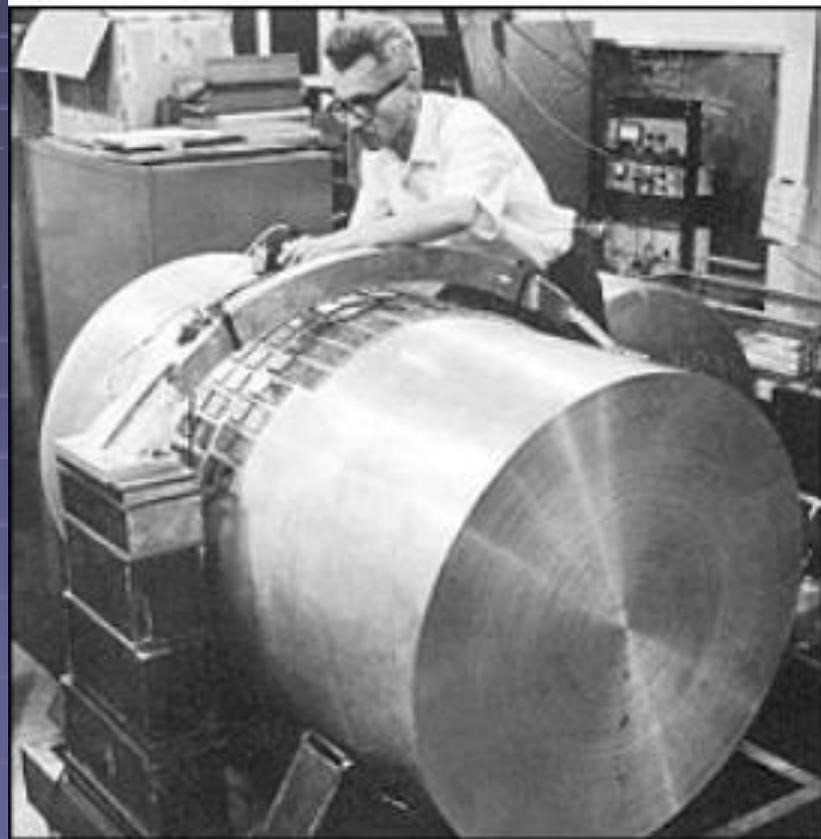
La pulsar “di Taylor” (PSR 1913+16) premio Nobel 1993



Rivelatori di onde gravitazionali: le antenne gravitazionali

- Antenne risonanti
- Antenne interferometriche
- Interferometri spaziali

Joe Weber (1919-2000)

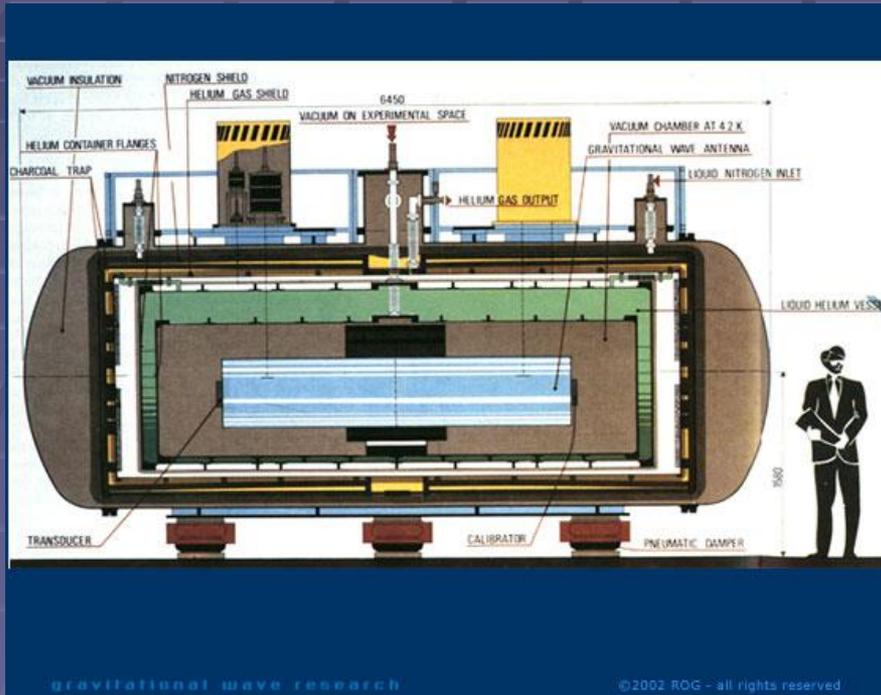


**JOSEPH WEBER WITH
GRAVITATIONAL WAVE DETECTOR**

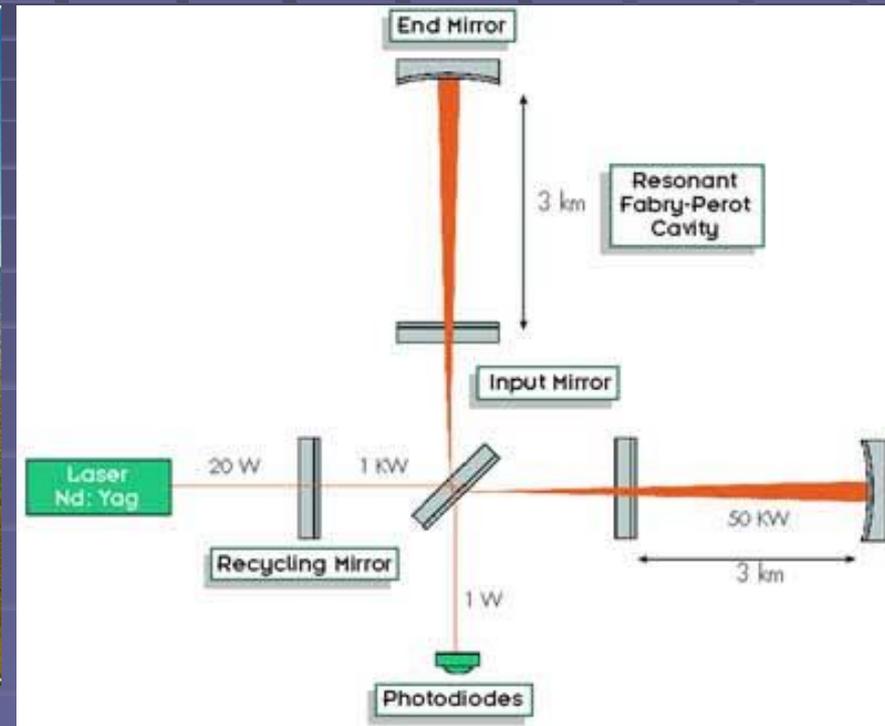
Edoardo Amaldi (1908-1989)



Antenne gravitazionali risonanti criogeniche



Antenne gravitazionali interferometriche: Virgo



Virgo da Google Earth



© 2009 Europa Technologies
Image © 2009 DigitalGlobe
© 2009 Cnes/Spot Image
© 2009 Tele Atlas

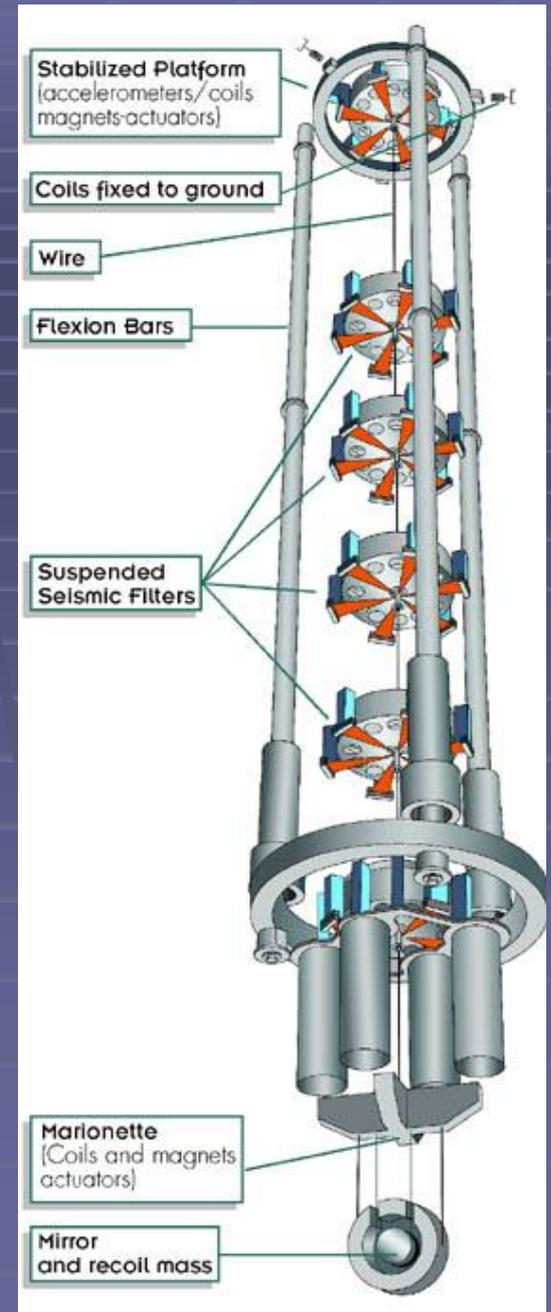
© 2009 Google

Date di acquisizione delle immagini: 31 Gen 2004 25 Lug 2007

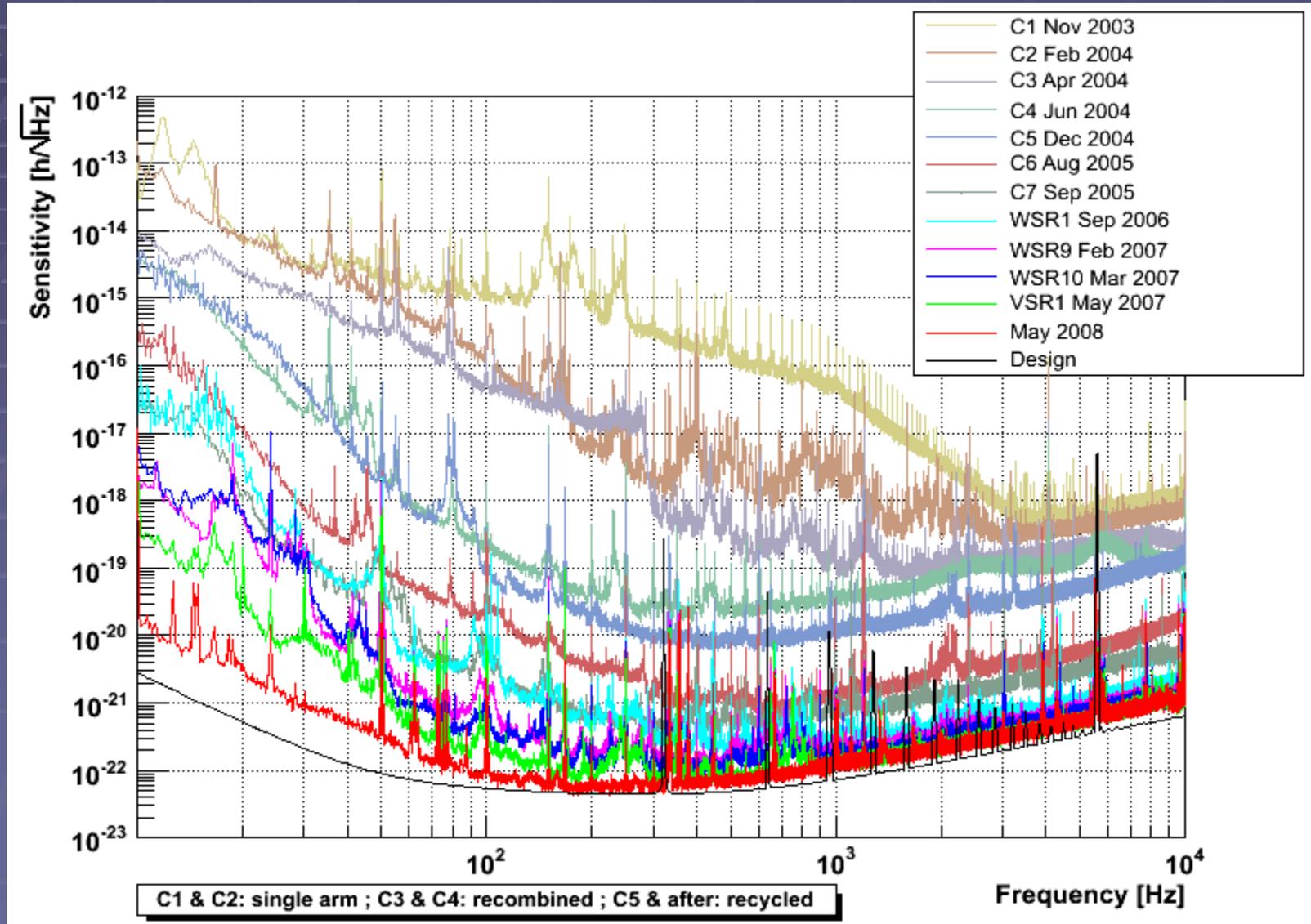
43°38'30.04" N 10°29'55.98" E 7 ft elev

2952 ft Alt

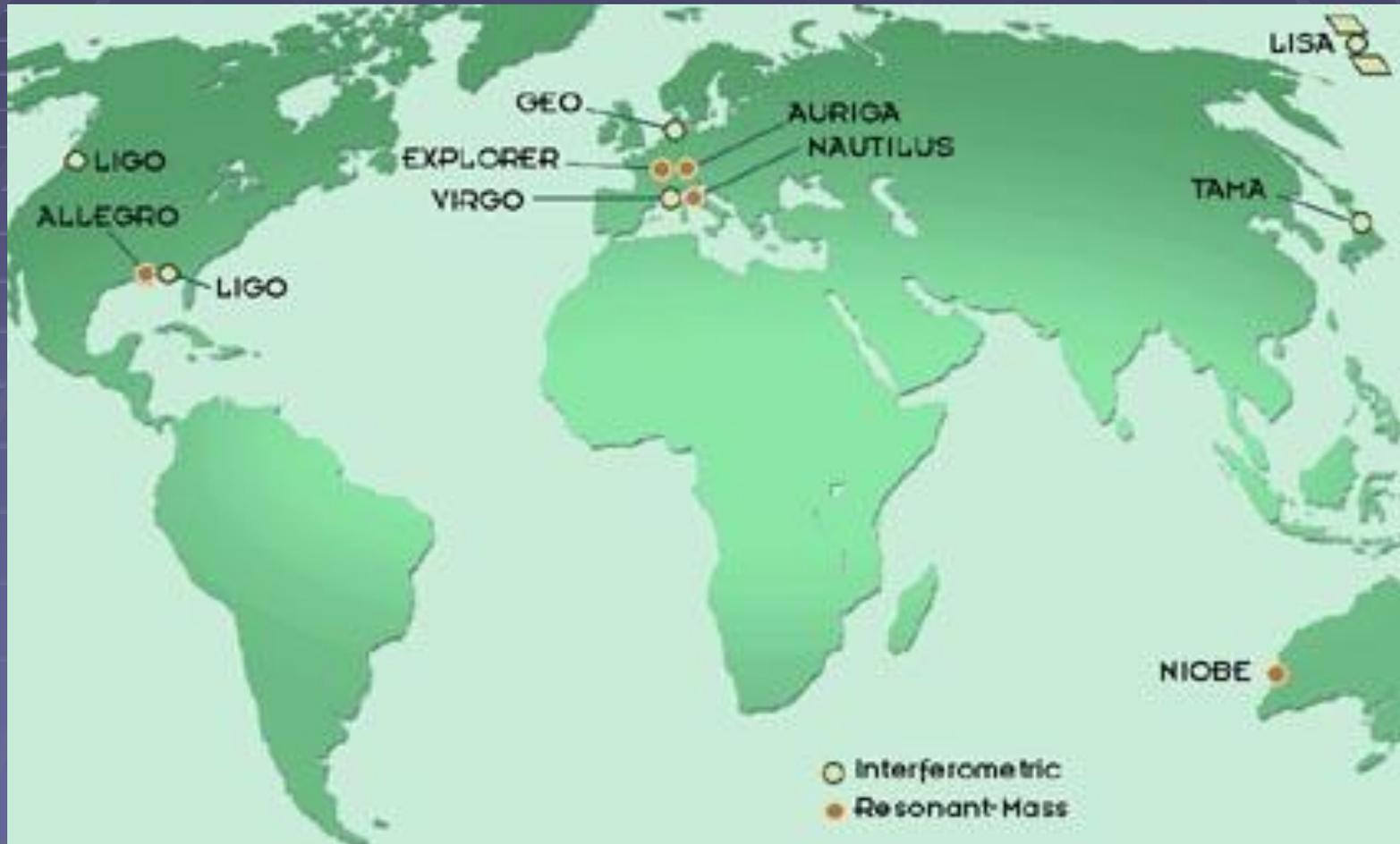
L'antenna Virgo



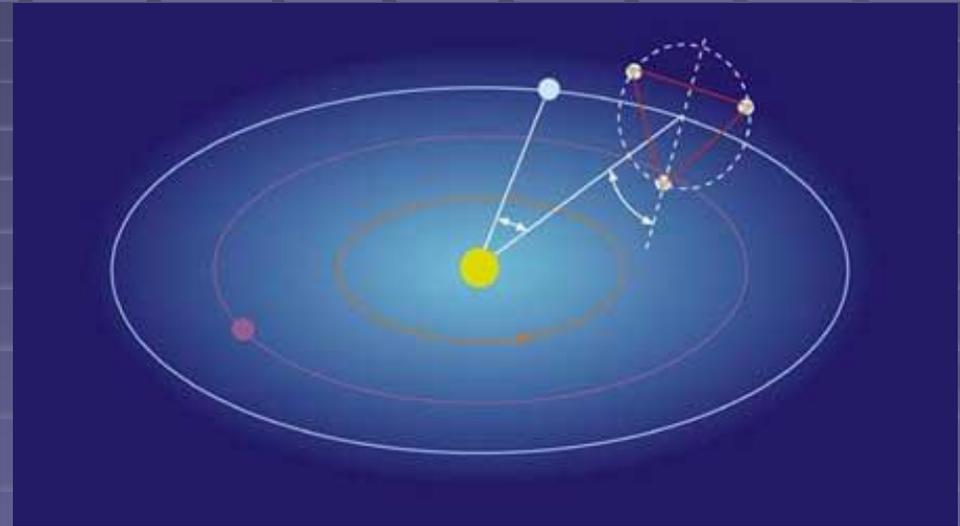
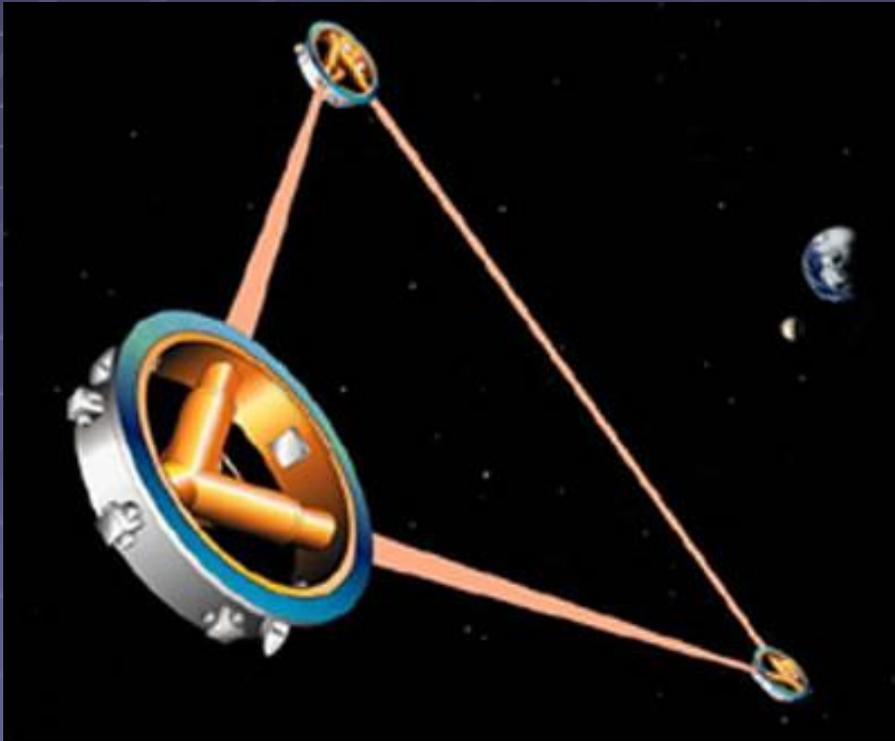
Il miglioramento della sensibilità di Virgo



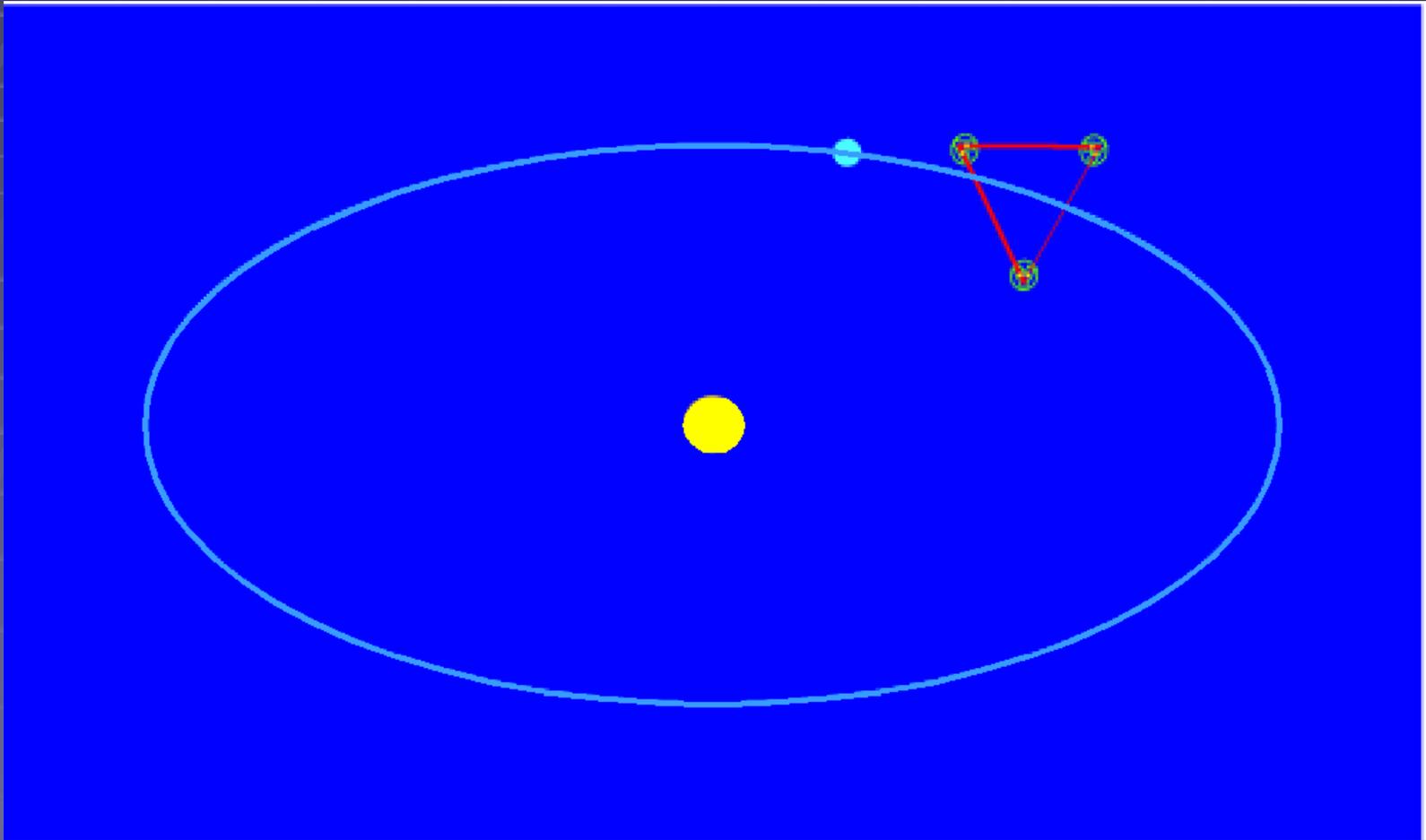
Le antenne gravitazionali nel mondo



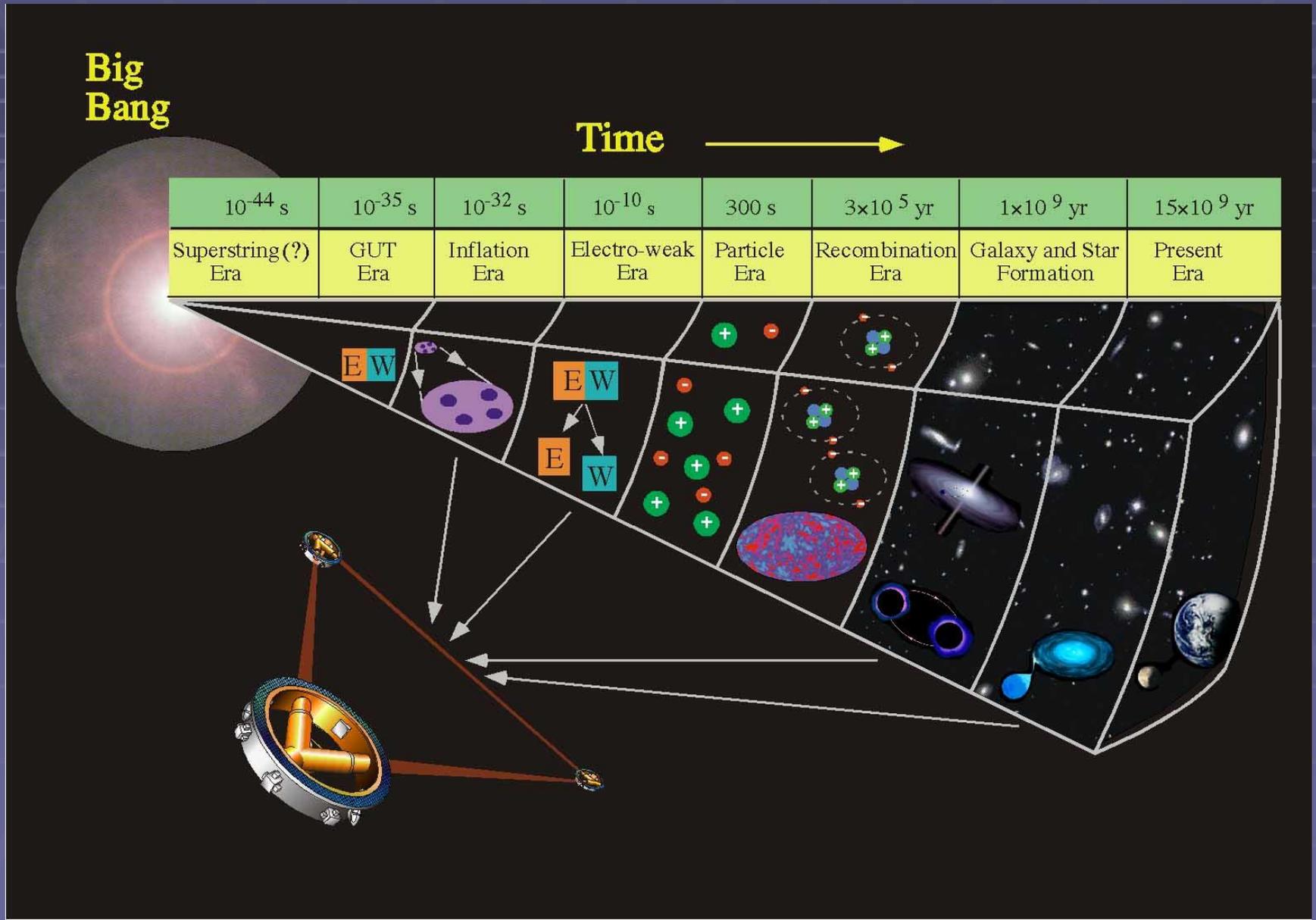
Antenne gravitazionali spaziali: LISA



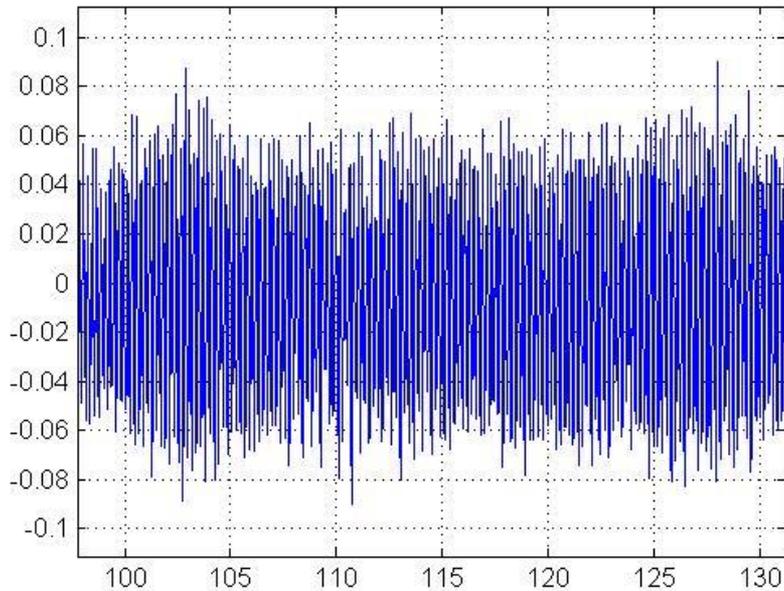
LISA - animazione



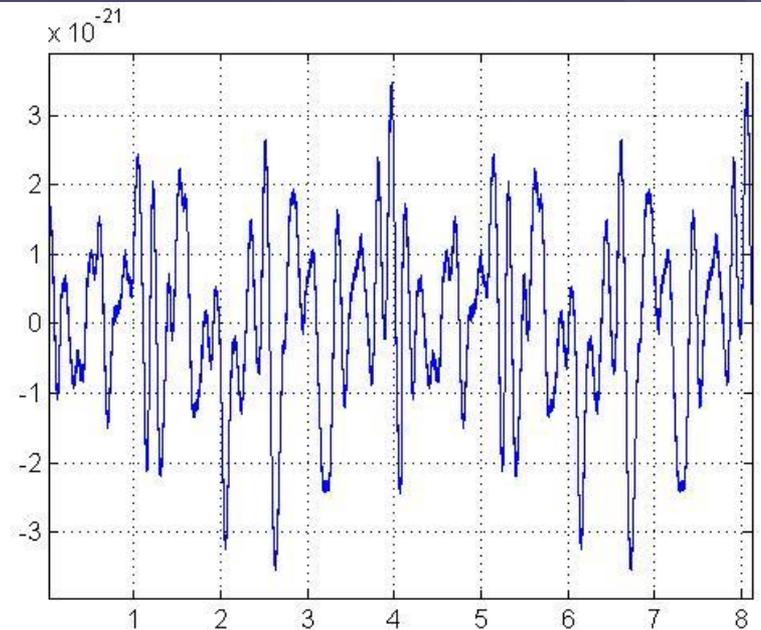
Sorgenti rivelabili da LISA



Il “rumore” nelle antenne gravitazionali: andamenti temporali

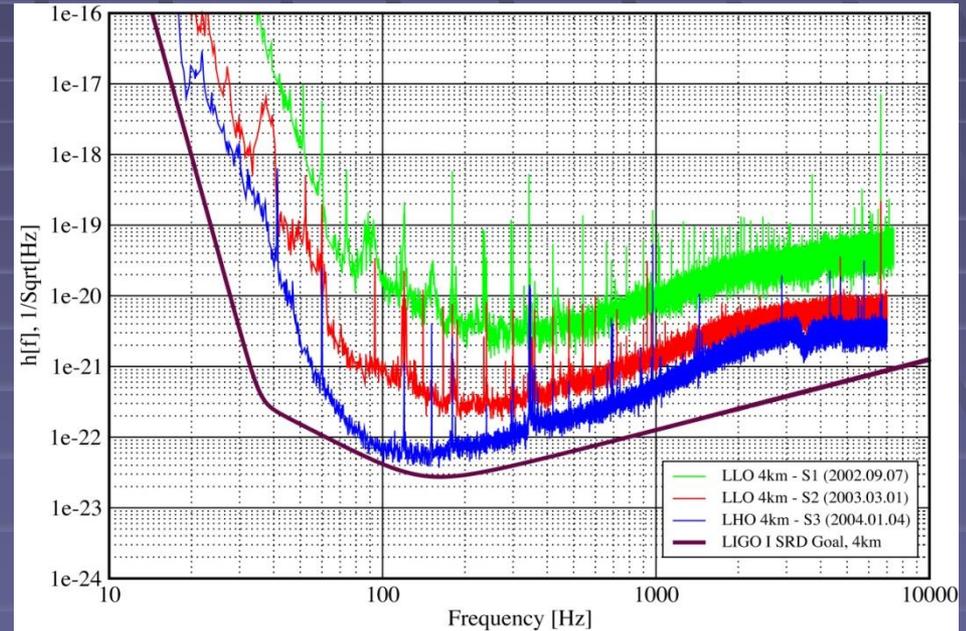
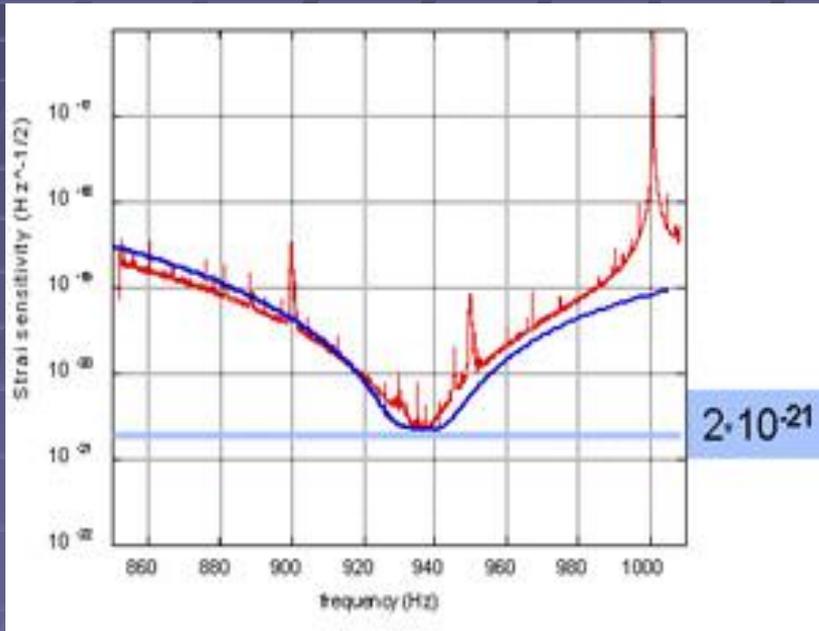


Antenna risonante



Antenna interferometrica

Il “rumore” nelle antenne gravitazionali: spettri in frequenza



Rumore in un'antenna risonante
(Nautilus)



Rumore in un'antenna interferometrica



La rivelazione di deboli segnali immersi nel rumore

Particolari tecniche sono state sviluppate per “estrarre” i segnali dal rumore in cui sono immersi.

Esse si basano sull’identificazione statistica del rumore di fondo dell’antenna e sullo studio delle possibili forme del segnale.

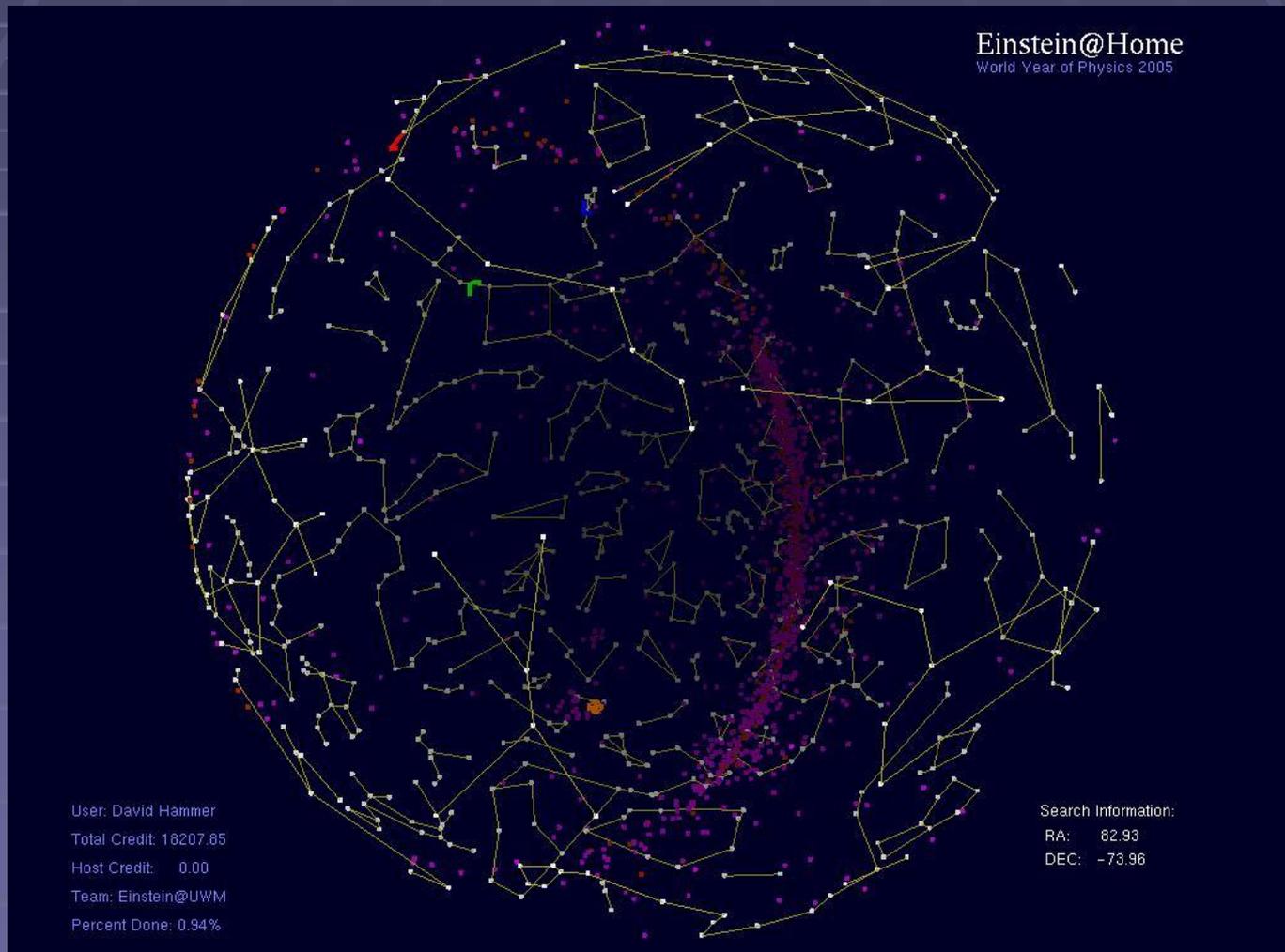
Si costruisce così un algoritmo, detto “filtro”, che riduce il rumore ed esalta il segnale.

In molti casi la complessità dell’algoritmo è tale che occorrono reti di calcolatori per realizzarlo.

In particolare è stato anche realizzato il progetto “Einstein@home” (<http://www.einsteinathome.org>) per la ricerca dei segnali gravitazionali prodotti da stelle di neutroni rotanti. Chi aderisce mette a disposizione del progetto una parte del tempo del proprio calcolatore non utilizzato. Il progetto è derivato da SETI@home, per la ricerca di segnali da intelligenze extraterrestri (<http://setiathome.ssl.berkeley.edu>).

Einstein@Home

<http://www.einsteinathome.org>



Questa presentazione è nel sito

<http://grwavsrf.roma1.infn.it/Terracina2009/Terracina2009.ppt>

Per chiarimenti e suggerimenti:

sergio.frasca@roma1.infn.it