
Politecnico di Milano
Corso di MISURE OTTICHE

”INTERFEROMETRIA”

Enrico Randone

Dipartimento di Elettronica - Università di Pavia

Tel. 0382 985.224

e-mail: enrico.randone@unipv.it

Si riconosce l'origine di alcune figure, fotografie, e testi come materiale didattico originariamente prodotto dal Prof. Silvano Donati (Università di Pavia) e/o dall'Ing. Guido Giuliani (Università di Pavia)

Interferometri per rivelazione di onde gravitazionali: Premessa (I)

□ 4 tipi fondamentali di interazione in natura:

- interazione forte (gluoni: quarks → adroni): $\alpha_{\text{strong}} = 1$
- interazione elettromagnetica : $\alpha_{\text{EM}} = 10^{-2}$
- interazione elettrodebole : $\alpha_{\text{weak}} = 10^{-5}$
- interazione gravitazionale (? gravitoni ?) : $\alpha_{\text{grav}} = 10^{-39}$

□ Teoria della Gravitazione (I. Newton)

- interazione gravitazionale istantanea... lo stesso Newton dice a riguardo:

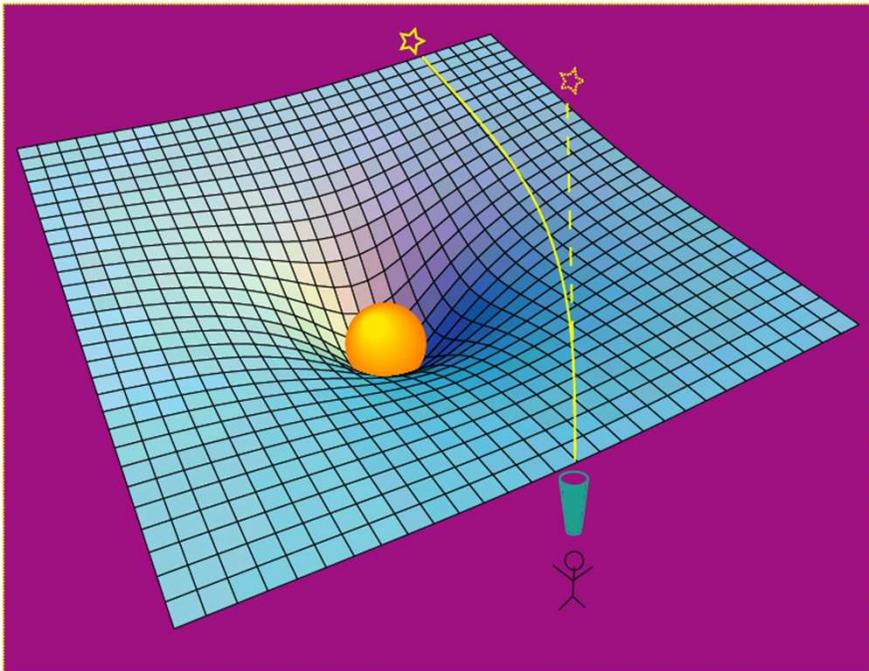
“ That one body should act upon another through the vacuum, without the mediation of anything else, by and through which their action and force may be conveyed from one to another, IS TO ME SO GREAT AN ABSURDITY THAT I BELIEVE NO MAN, WHO HAS IN PHILOSOPHICAL MATTERS A COMPETENT FACULTY OF THINKING, CAN EVER FALL INTO IT(!)” I. Newton, *Principia Mathematica* (1687) (*Newton's Principia*, ed. by Florian Cajori (university of California Press, Berkeley, 1964), pag. 634)

□ Teoria della Relatività Generale (A. Einstein)

- interazione gravitazionale non più veloce della luce
- Onde Gravitazionali (OG) = perturbazioni dello spazio-tempo con velocità c
- una massa accelerata emette OG, quantizzata in gravitoni in analogia con emissione di fotoni da parte di una carica accelerata

Interferometri per rivelazione di onde gravitazionali: Premessa (II)

Un oggetto massivo curva lo spazio-tempo: la luce può non propagarsi in “linea retta”

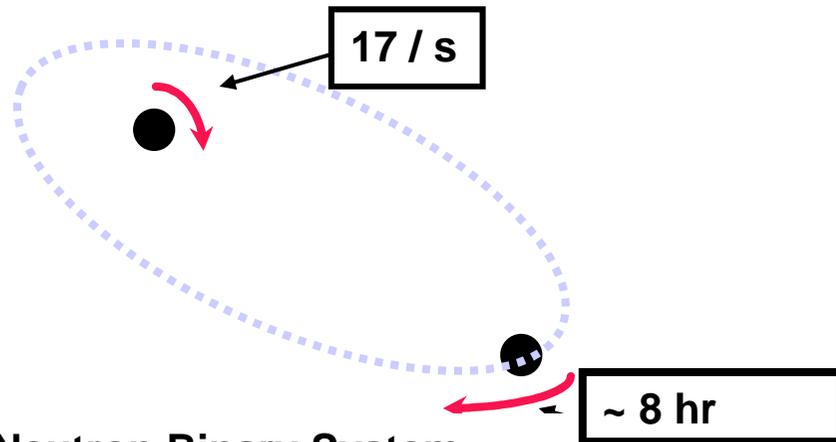


Rappresentazione dello spazio-tempo modificato da due buchi neri orbitanti



Interferometri per rivelazione di onde gravitazionali: Dimostrazione dell'esistenza delle OG

- ❑ Neutron Binary System – Hulse & Taylor
- ❑ PSR 1913 + 16 -- Timing di una Pulsar



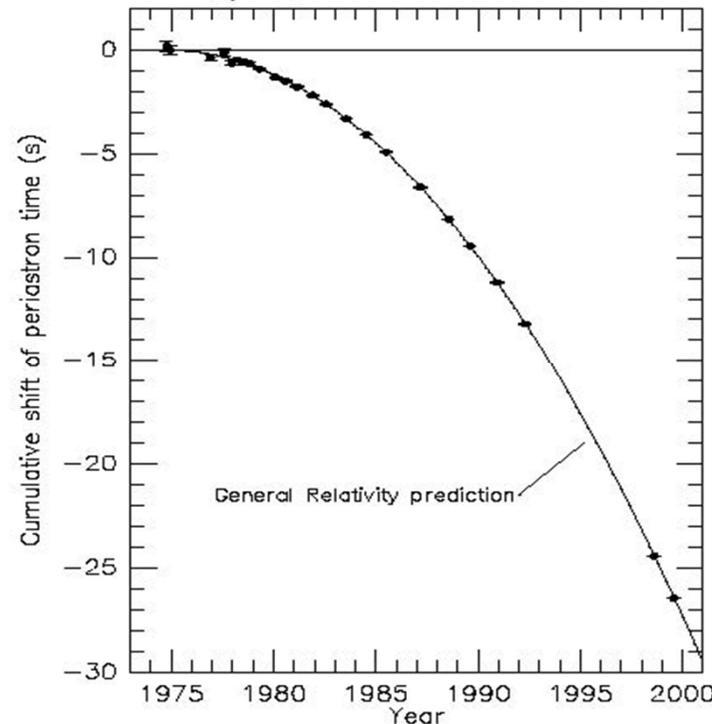
Neutron Binary System

- stelle di neutroni separate di 10^6 miglia
- Previsioni della teoria della relatività generale
- il diametro della spirale si riduce di 3mm/orbita

Morale:

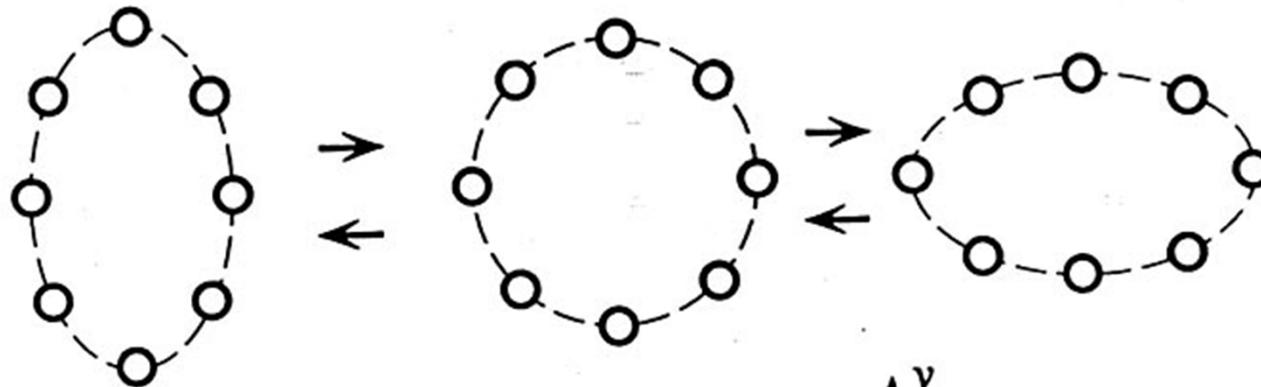
Le OG esistono, ma sono MOLTO difficili da osservare...

Comparison between observations of the binary pulsar PSR1913+16, and the prediction of general relativity based on loss of orbital energy via gravitational waves

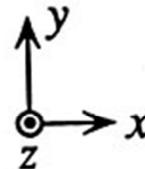


From J. H. Taylor and J. M. Weisberg, unpublished (2000)

Interferometri per rivelazione di onde gravitazionali: Interazione teorica OG - sistema massivo

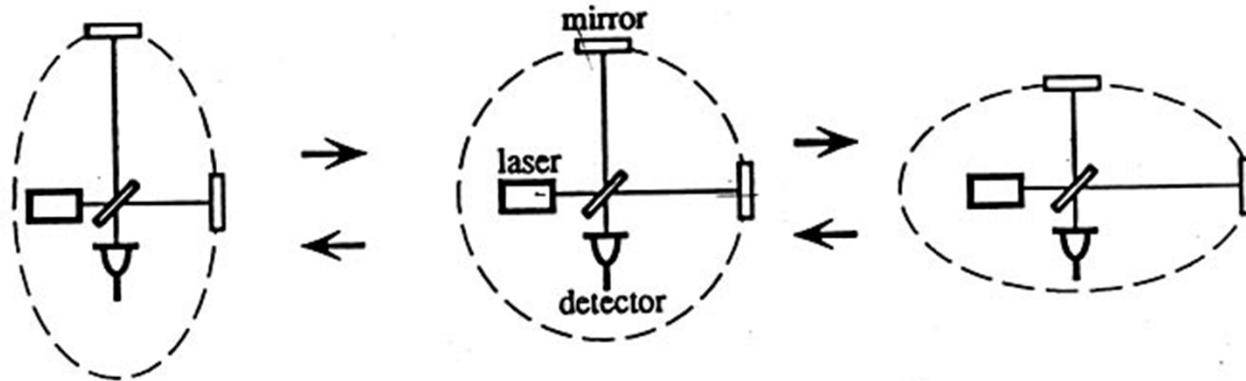


© ONDE GRAVITAZIONALI



Ampiezza OG

$$h = (R_x - R_y) / R$$

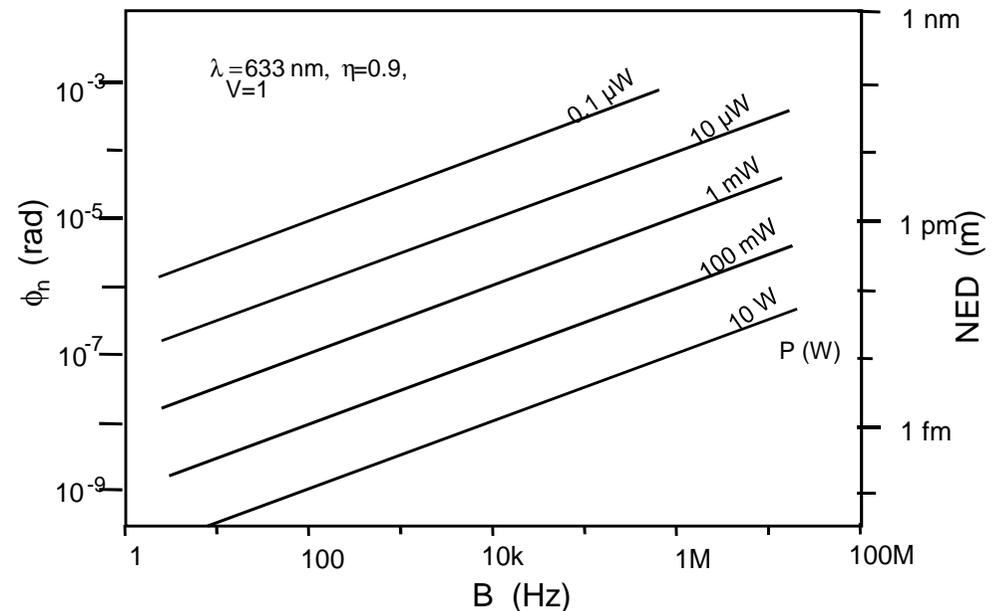


Interferometri per rivelazione di onde gravitazionali: Entità dello spostamento R_x - R_y da misurare

- ❑ OG emessa da una supernova nel cluster Virgo:
impulso di durata 1-3 ms, con ampiezza $h = 10^{-23} - 10^{-21}$ (adimensionale: $\Delta L/L$)
- ❑ Deformazione: $\Delta L(t) = h(t) \cdot L$ (L = lunghezza braccio interferometro)
- ❑ Sfasamento: $\Delta \phi(t) = 2k \cdot \Delta L = 4\pi \cdot h(t) \cdot L/\lambda$
- ❑ OCCORRONO LUNGHEZZE L DELL'INTERFEROMETRO MOLTO GRANDI!
- ❑ Esempio: $L = 3 \text{ km} \rightarrow \Delta L(t) = 10^{-20} - 10^{-18} \text{ m} \rightarrow \Delta \phi(t) = 10^{-13} - 10^{-11} \text{ rad}$

Requisiti minimi di misura:

- ❑ Elevata sensibilità
 - ❑ P elevata
- ❑ Elevata stabilità
 - ❑ Insensibilità a fluttuazioni ambientali



Interferometri per rivelazione di onde gravitazionali: Principali rivelatori in giro per il mondo (I)

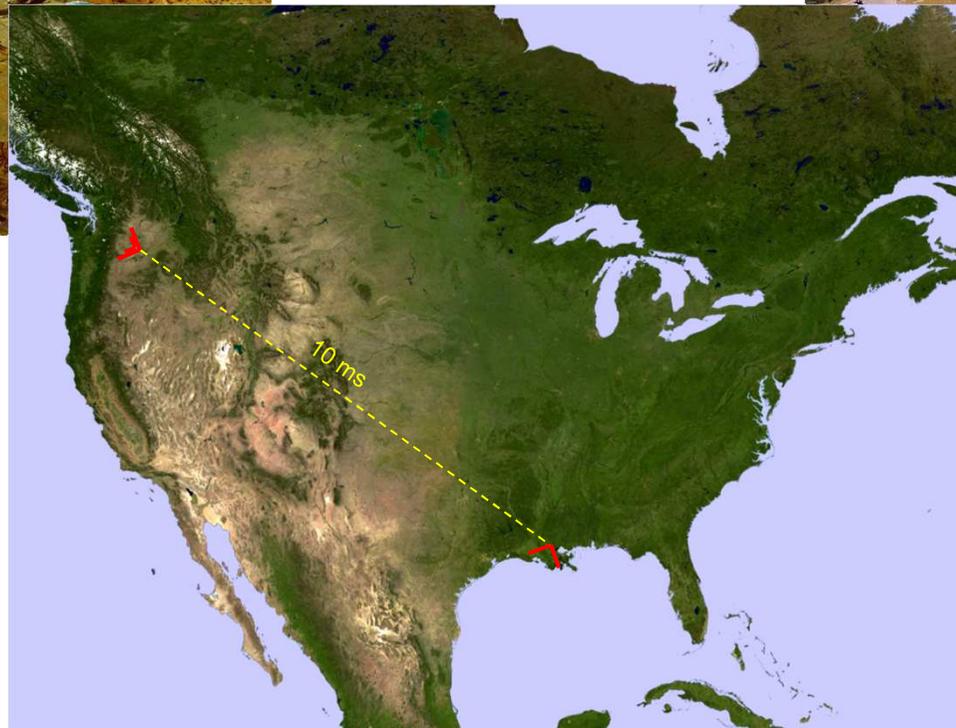


Interferometri per rivelazione di onde gravitazionali: Principali rivelatori in giro per il mondo (II)

LIGO (Hanford)



LIGO (Livingstone)



Interferometri per rivelazione di onde gravitazionali: Principali rivelatori in giro per il mondo (III)

TAMA 300 (Japan)



AIGO (Australia)



VIRGO: Specifiche (I)

Il limite di rumore (NED) è troppo elevato

- ❑ Laser Nd:YAG 20 W a riga stretta (10^{-4} Hz/ Hz^{1/2} @ 1 kHz) + interferometro bilanciato (cammini UGUALI) → NED riga = 0 !!!
- ❑ Aumento della potenza con cavità di ricircolo (20 W → 1 kW)
- ❑ Per aumentare lo sfasamento $\Delta\phi$ a parità di allungamento ΔL , obblighiamo i fotoni a percorrere molte volte, avanti e indietro, i bracci dell'interferometro → bracci a cavità Fabry-Perot

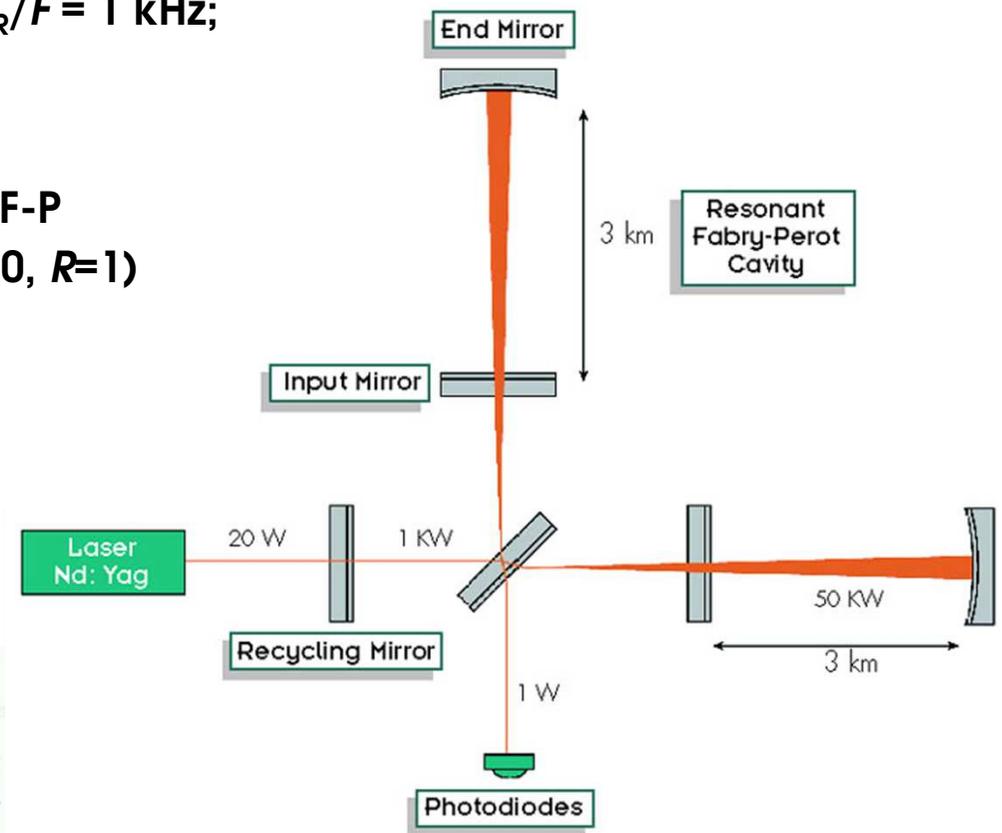
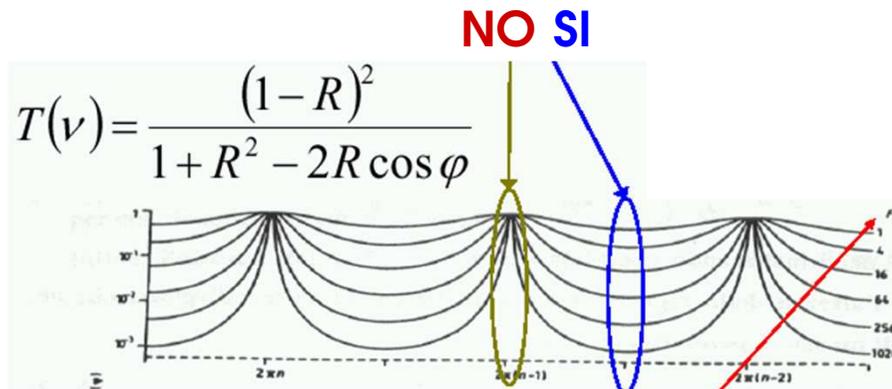
Disturbi da vibrazioni/fluttuazioni indesiderate

- ❑ Vibrazioni sismiche → specchi sospesi a “superattenuatori” (attenuaz. 10^{-12})
- ❑ Fluttuazioni di pressione/indice di rifrazione → ultra alto vuoto $p = 10^{-12}$ bar

VIRGO: Specifiche (II)

- I bracci dell'interferometro sono costituiti da due cavità Fabry-Perot ortogonali
 - Finesse $F = 50 \rightarrow$ i fotoni fanno mediamente 50 giri nella cavità \rightarrow la variazione di cammino ottico indotta dall'OG viene moltiplicata x 50
 - Le due cavità F-P vengono deformate in controfase dall'OG
 - $\Delta\nu_{\text{FSR}} = c/2L = 50 \text{ kHz}$; $\Delta\nu_c = \Delta\nu_{\text{FSR}}/F = 1 \text{ kHz}$;

- Lavoro sui minimi di trasmissione dei F-P
 - F-P si comporta da specchio ($T=0, R=1$)
 - La fase del campo riflesso è:
 $\phi = \phi_0 + F \cdot \Delta\phi(f) = \phi_0 + F \cdot 2k \cdot \Delta L$

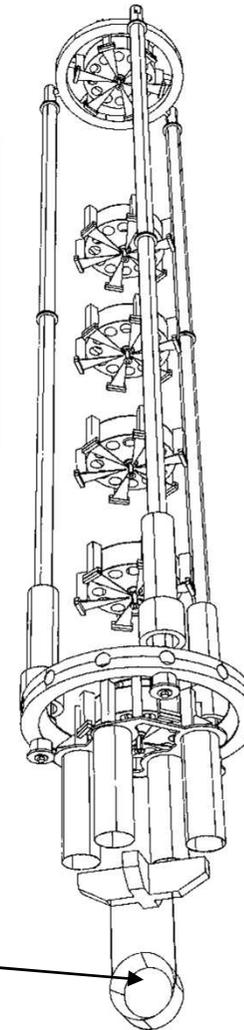
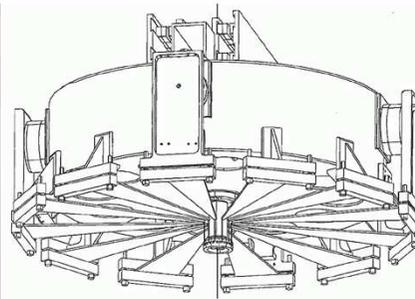


VIRGO: Specifiche (III) (!!!)

- ❑ **Typical Strains $< 10^{-21}$ at Earth \sim 1 hair's width at 4 light years**
- ❑ **Understand displacement fluctuations of 3/4-km arms at the millifermi level (1/1000th of a proton diameter)**
- ❑ **Control km-scale arm lengths to 10^{-13} meters RMS**
- ❑ **Detect optical phase changes of $\sim 10^{-13}$ radians**
- ❑ **Hold mirror alignments to 10^{-8} radians**
- ❑ **Engineer structures to mitigate recoil from atomic vibrations in suspended mirrors**

VIRGO: Specifiche (IV)

- ❑ Superattenuatore: riduce le vibrazioni sismiche degli specchi di un fattore 10^{12}
- ❑ Specchi con rugosità inferiore a 10 nm
 $R_{\text{laser}} = 99.9999 \%$



specchio sospeso



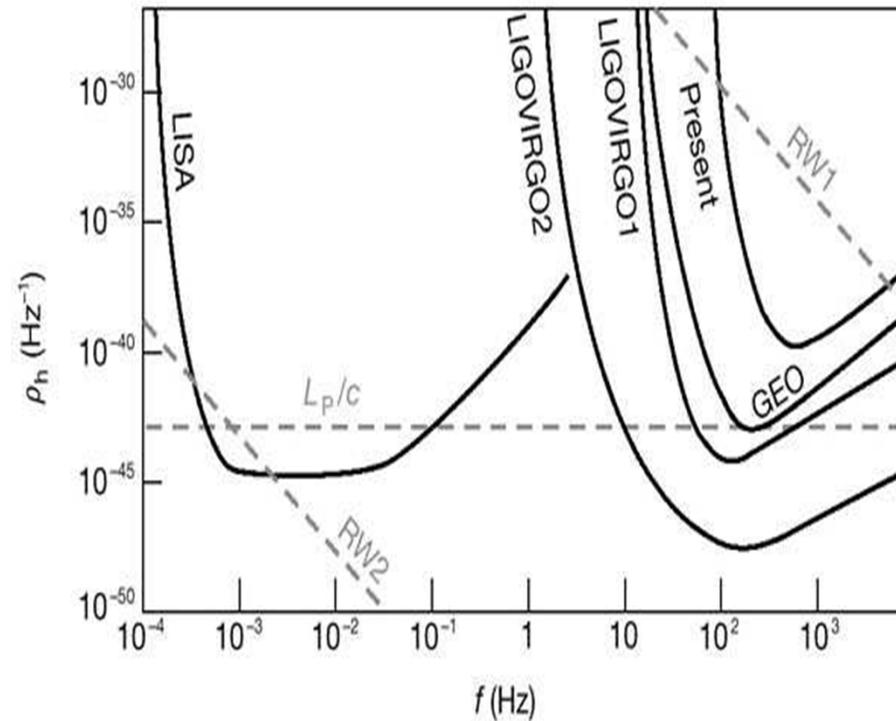
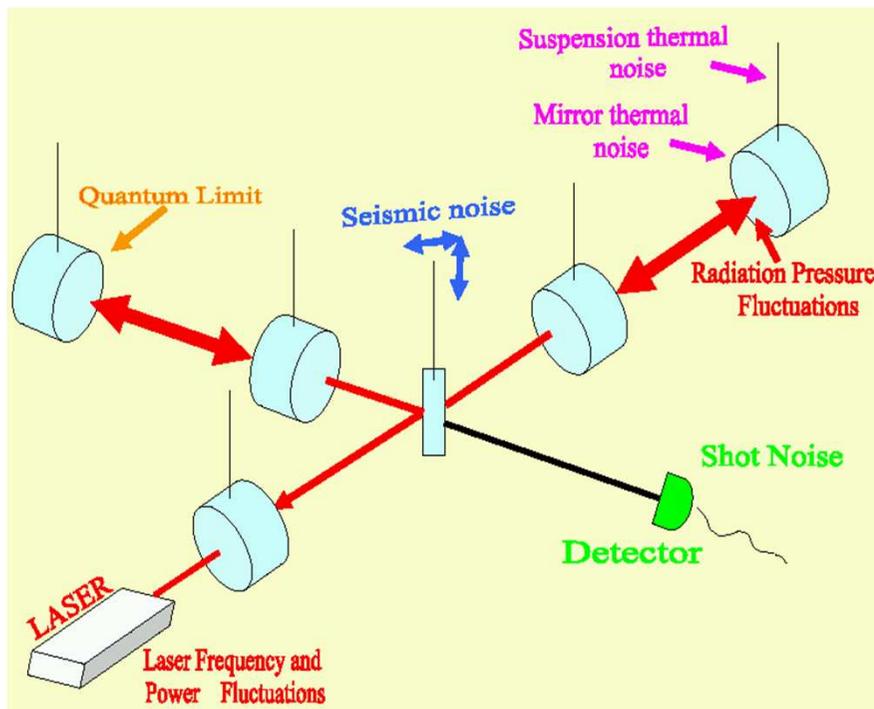
VIRGO: Specifiche (V)

- ❑ Tubi ad ultra alto vuoto ($p = 10^{-12}$ bar) lunghi 3 km per evitare la generazione di rumore di fase a causa delle fluttuazioni di pressione dell'aria



VIRGO: Prestazioni (I)

- Parametro fondamentale: NED (Noise Equivalent Displacement) vs. frequenza

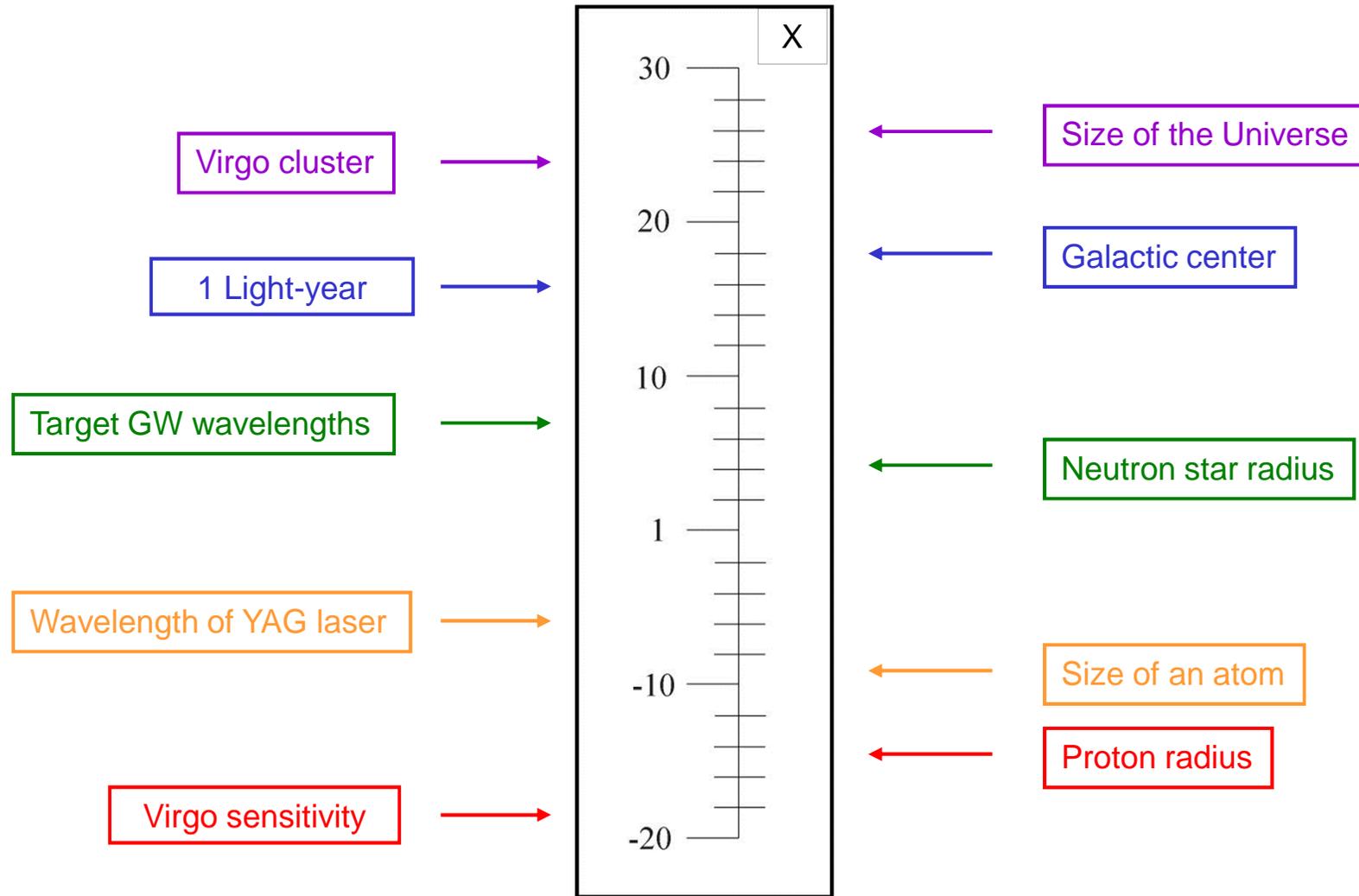


Ricadute tecnologico-scientifiche:

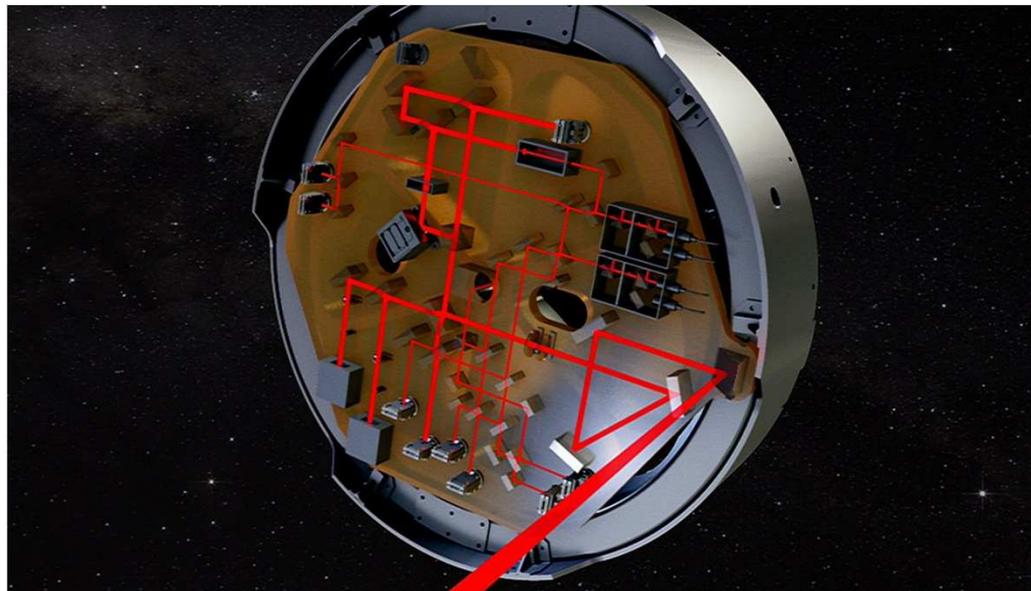
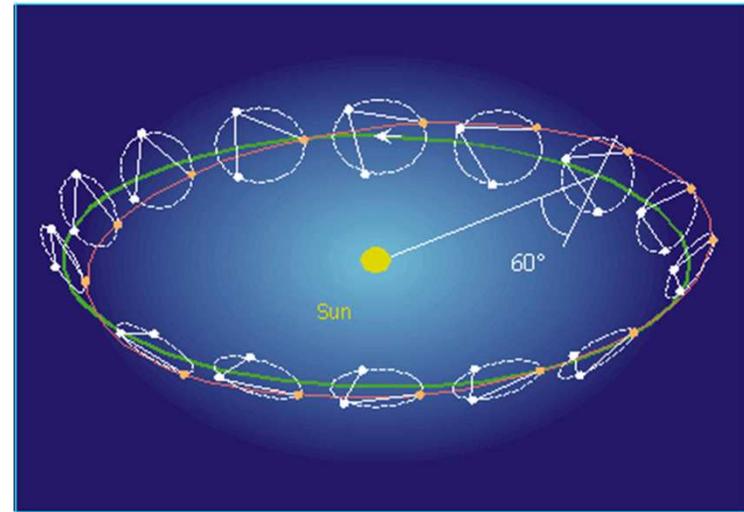
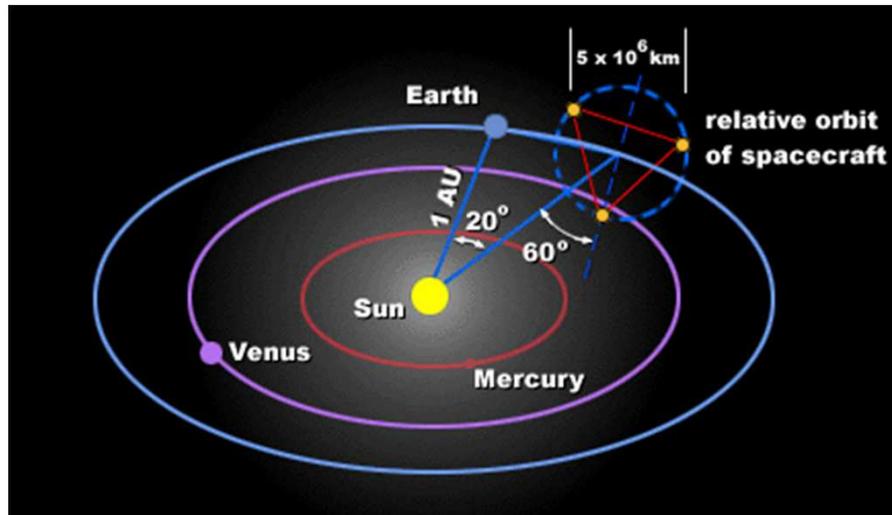
Specchi - Laser - Cavità risonanti - ...

Isolamento sismico - monitoraggio terremoti - ...

VIRGO: Prestazioni (II)



“Fantascienza”: Laser Interferometer Space antenna – LISA (I)



“Fantascienza”: Laser Interferometer Space antenna – LISA (II)

□ **Two polarizations of GWs**

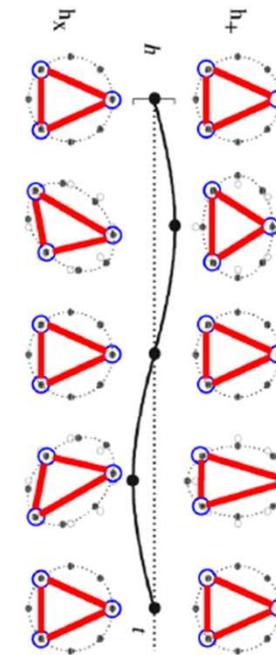
T_{GW}	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$
+ pol.				
x pol.				

□ **Laser interferometer**

$h = \frac{\Delta L}{L}$

$P_{OUT} = P_{IN} \cos(2k\Delta L)$

Prani, '56
Gertsenshtein and Pustovoi, '62
Weiss, '72
Forward, '72



Response (exaggerated) of LISA Constellation

Goal: sense gravitational induced tidal strains in the LISA constellation to 10^{-21} , in other words tenth of pm over 5 million km!!!

Measurement is divided into two main tasks:

- Provide good inertial reference frame for proof masses – *Disturbance Reduction System (DRS)*
- Measure changes between proof masses – *Interferometric Measurement System (IMS)*