

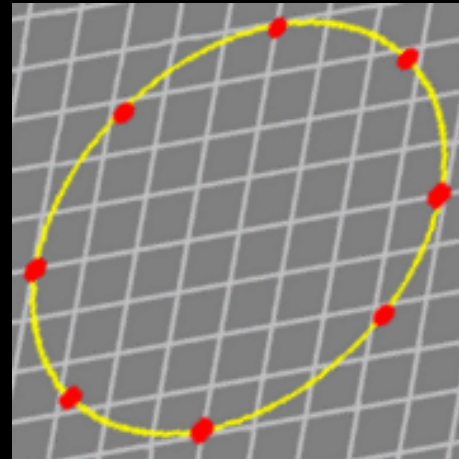
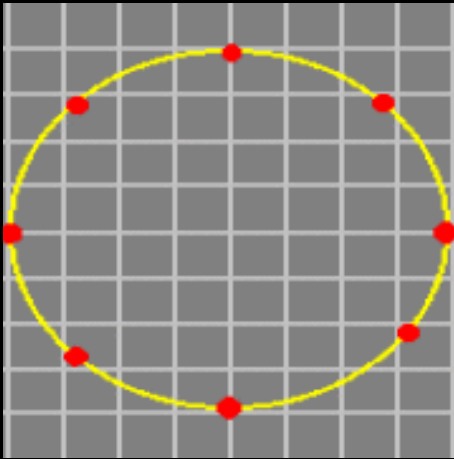
# Il funzionamento di Virgo

Una sfida tecnologica al limite del possibile





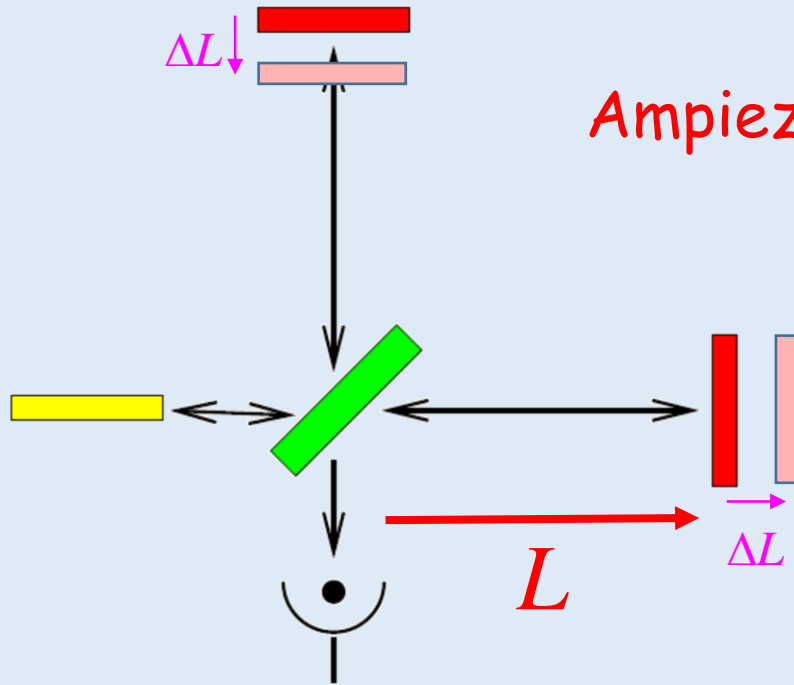
Le onde gravitazionali cambiano  
la distanza tra i punti dello spazio



Masse in caduta libera



# Dimensioni

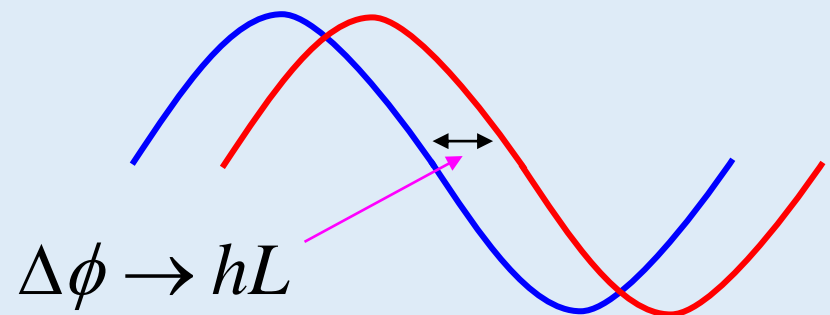


Ampiezza

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

$$h \approx 10^{-22} = \frac{4 \times 10^{-6}}{4 \times 10^{16}} = \frac{4 \mu\text{m}}{4 \text{ ly}}$$

Se  $h$  fosse costante



Per aumentare la sensibilità bisogna aumentare  $L$

$$L = 100 \text{ km} \quad \Delta L = hL = 10^{-23} 10^5 = 10^{-18} \text{ m}$$

La luce resta nell'interferometro per  $T = \frac{2L}{c} = \frac{2 \times 10^5}{3 \times 10^8} = 0.67 \text{ ms}$

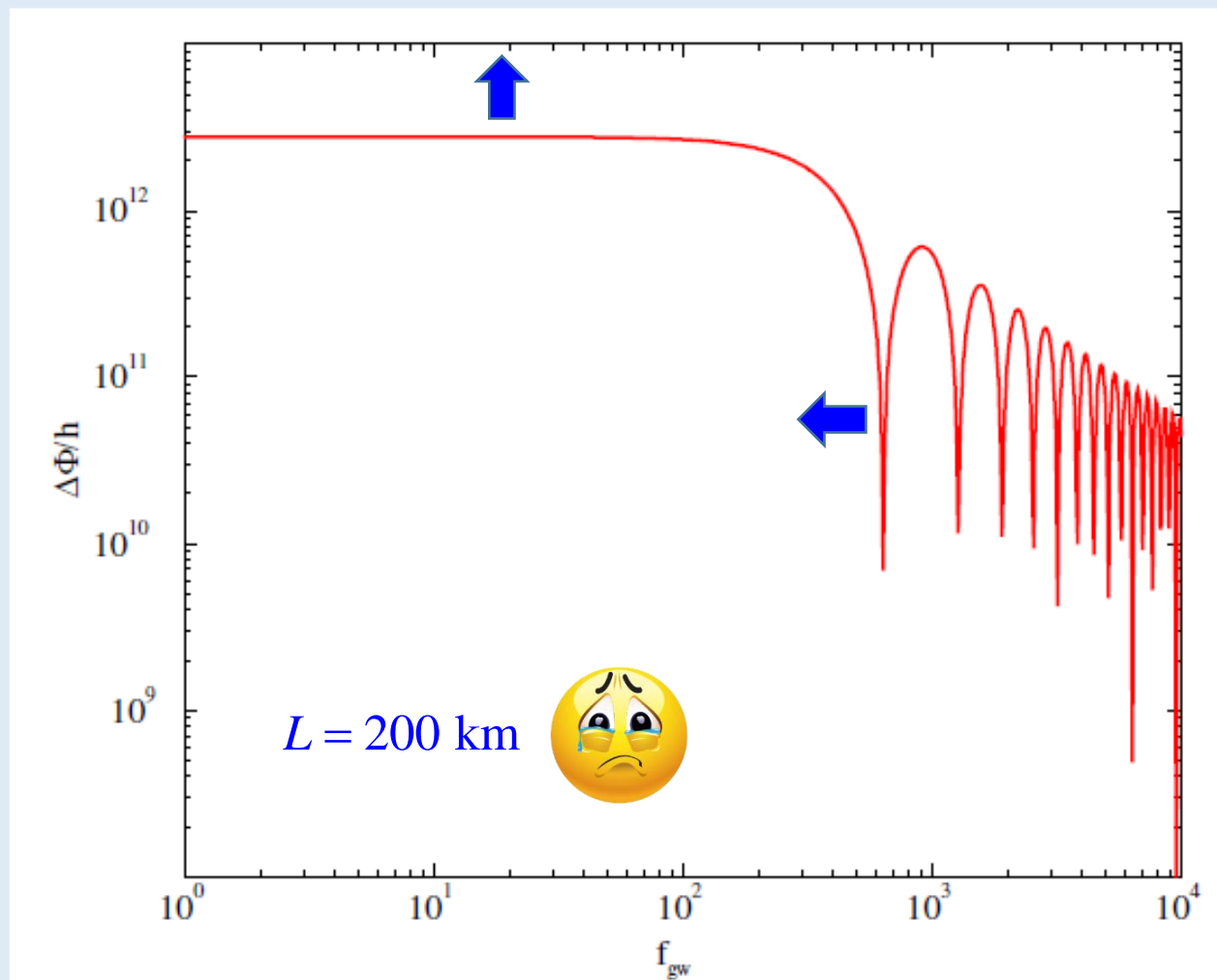
h non è costante: oscilla perché è l'ampiezza di un'onda gravitazionale

Se l'onda impiegasse 0.67 ms per un'oscillazione non vedremmo nulla

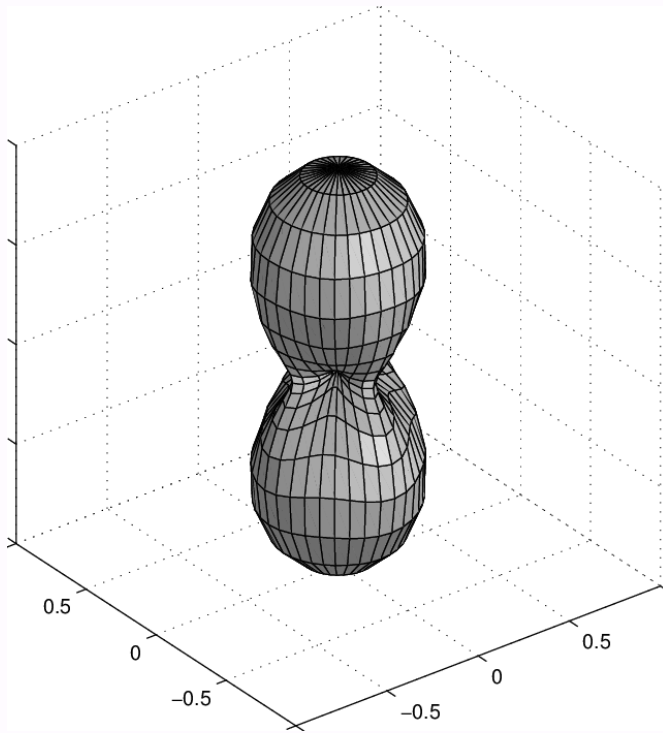
$$f_{GW} = \frac{1}{T_L} = 1.5 \text{ kHz}$$

Maggiore è L,  
più grande  
è il fattore di  
amplificazione

Aumentare L però  
significa restringere  
la banda



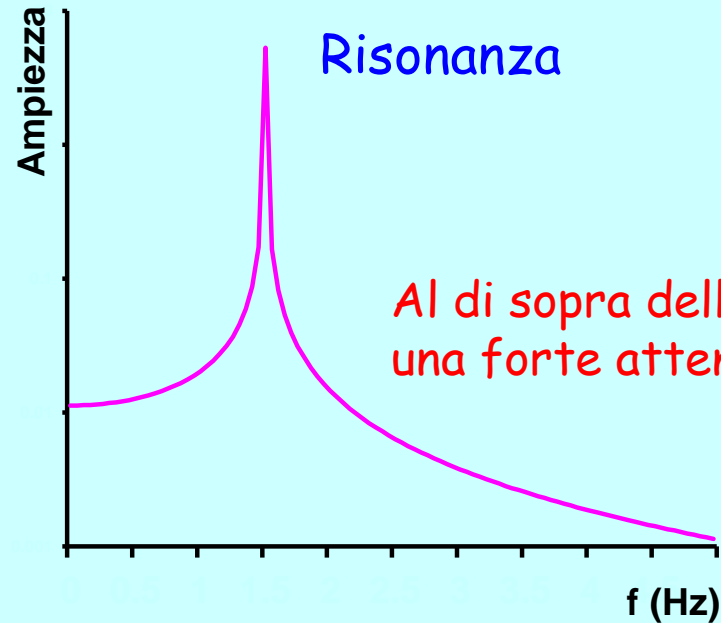
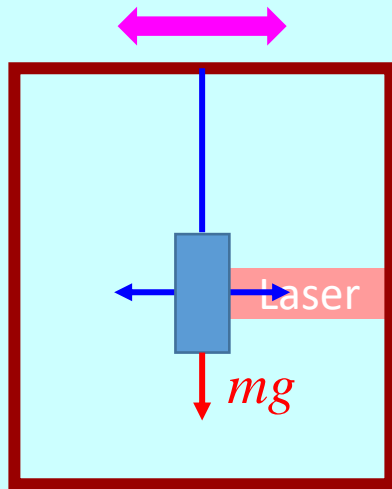
# Sensibilità direzionale



Per avere una buona copertura di tutto il cielo non basta un solo interferometro.  
Per una buona direzionalità ce ne vogliono almeno 3.

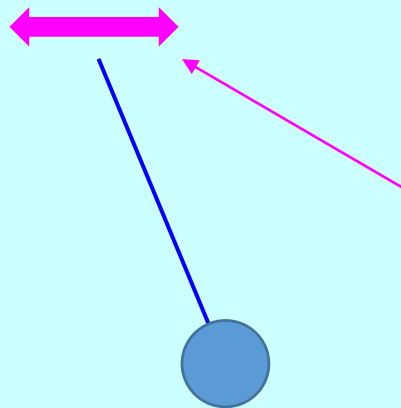
# Isolamento degli specchi

Gli specchi devono essere liberi di muoversi e isolati da tutto !



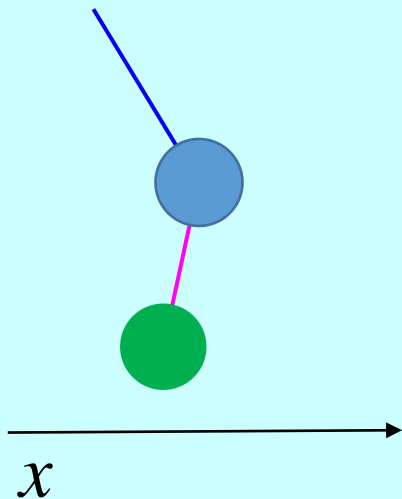
Se  $f_0 = 1$  Hz @10 Hz l'attenuazione è 100

Lungo x la massa si comporta come se fosse libera !



$x$

# Isolamento degli specchi




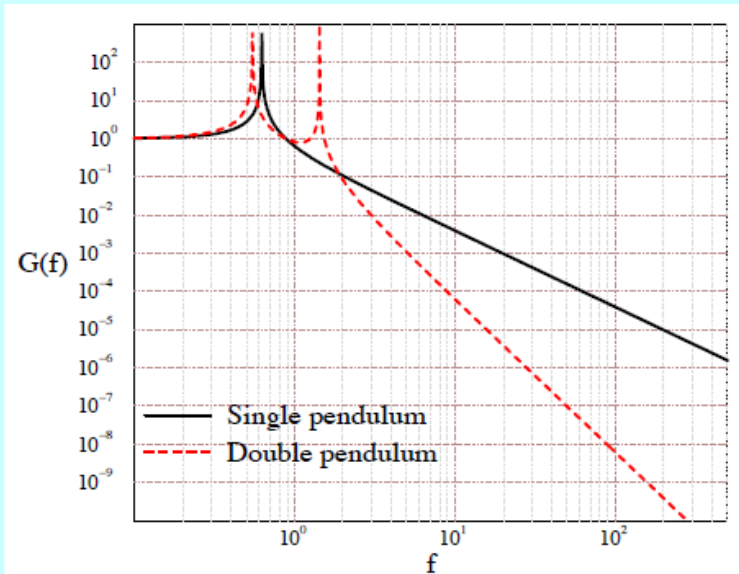
Sospendendo la massa a una serie di pendoli in cascata le vibrazioni si possono attenuare moltissimo !

Attenuazione

$$\left( \frac{f_0}{f} \right)^{2N}$$

Se  $f_0 = 1 \text{ Hz}$  @  $10 \text{ Hz}$  con 6 stadi l'attenuazione è  $10^{12}$





ATTENZIONE: anche i fili hanno delle risonanze, i modi di violino!

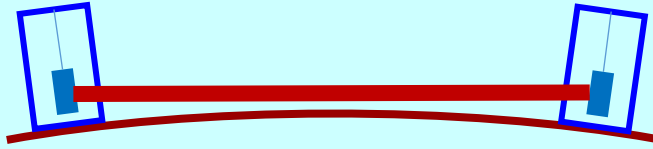
Corda di lunghezza  $L$ , vincolata alle estremità e sottoposta a tensione  $T$

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho S}} \quad n = 1, 2, \dots$$

densità  $\rho$       sezione  $S$

Ci vogliono fili sottili per spostare le risonanze ad alta frequenza

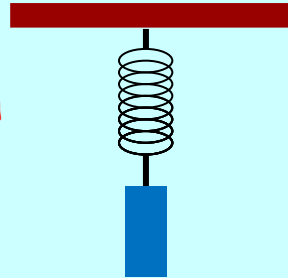
# E in verticale ?



Per effetto della curvatura terrestre gli spostamenti verticali sono accoppiati a quelli orizzontali.



E' necessario introdurre anche un isolamento verticale !

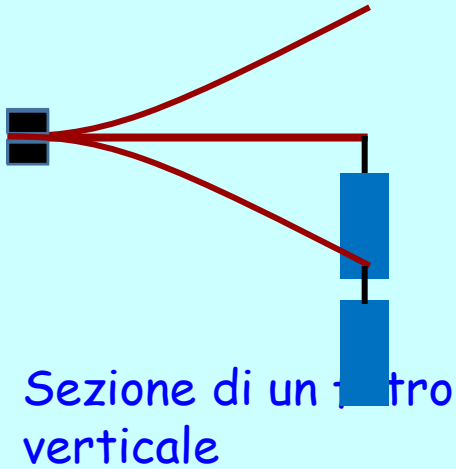


f di risonanza

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}}$$

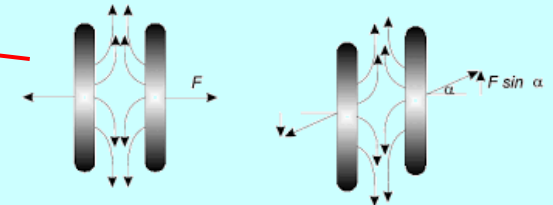
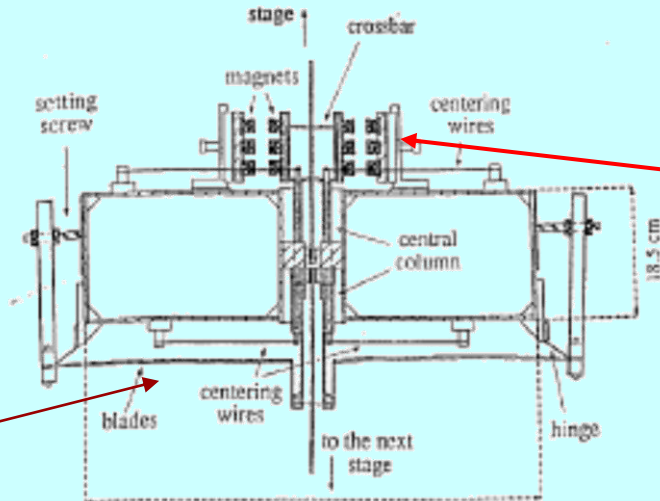
molla

Bisogna abbassare k il più possibile !



Sezione di un filtro verticale

Cantilever blade



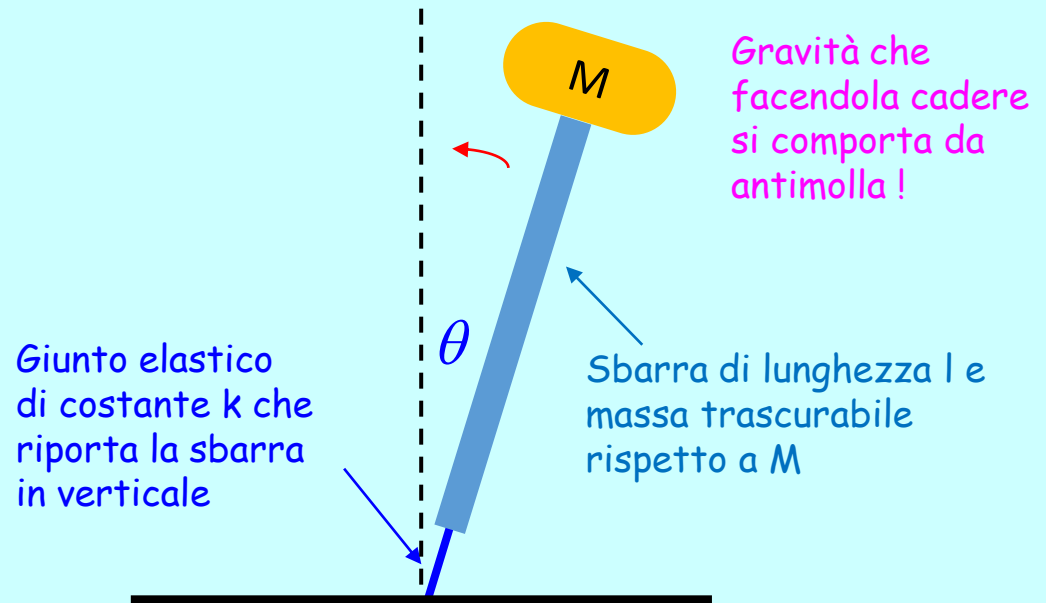
Antimolle magnetiche



# Dove sospendiamo la catena?



Un pendolo invertito per creare uno stadio di pre-attenuazione



Frequenza di risonanza del sistema

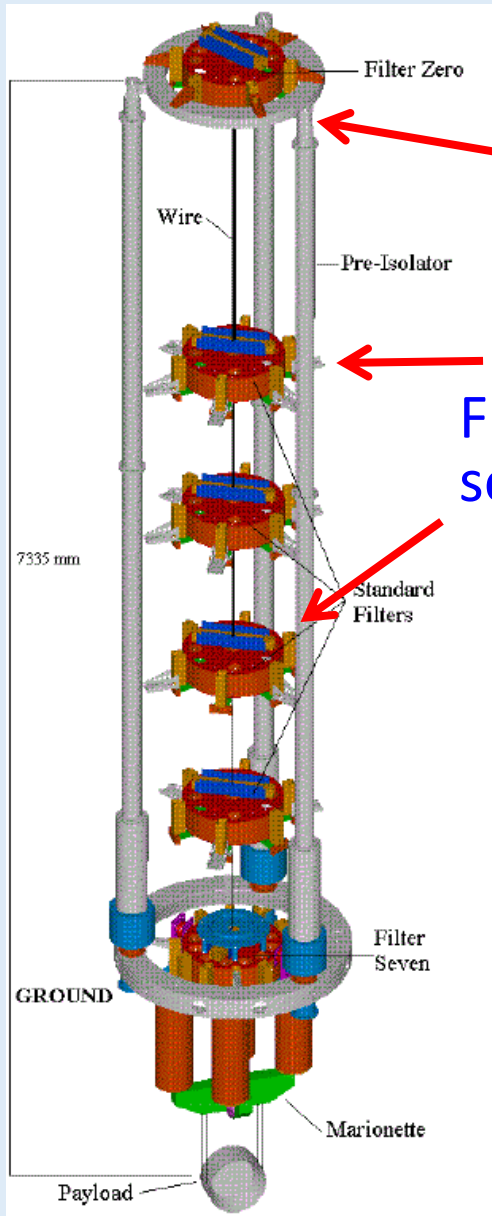
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M} \frac{g}{l}}$$

Molla

Gravità

Abbassando  $k$  si può portare la risonanza a decine di mHz

# Superattenuatore di Virgo

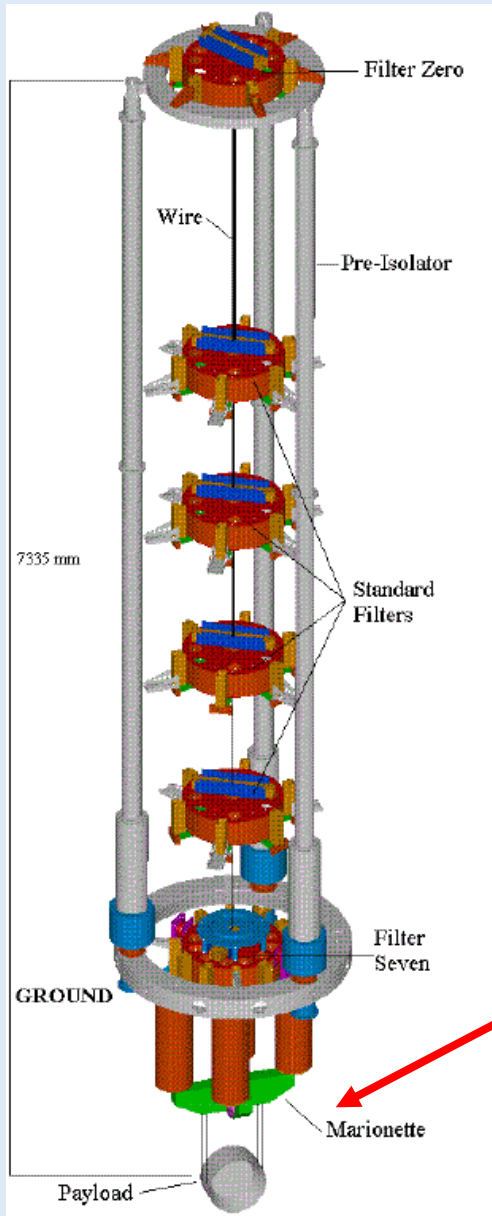


Pendolo  
invertito

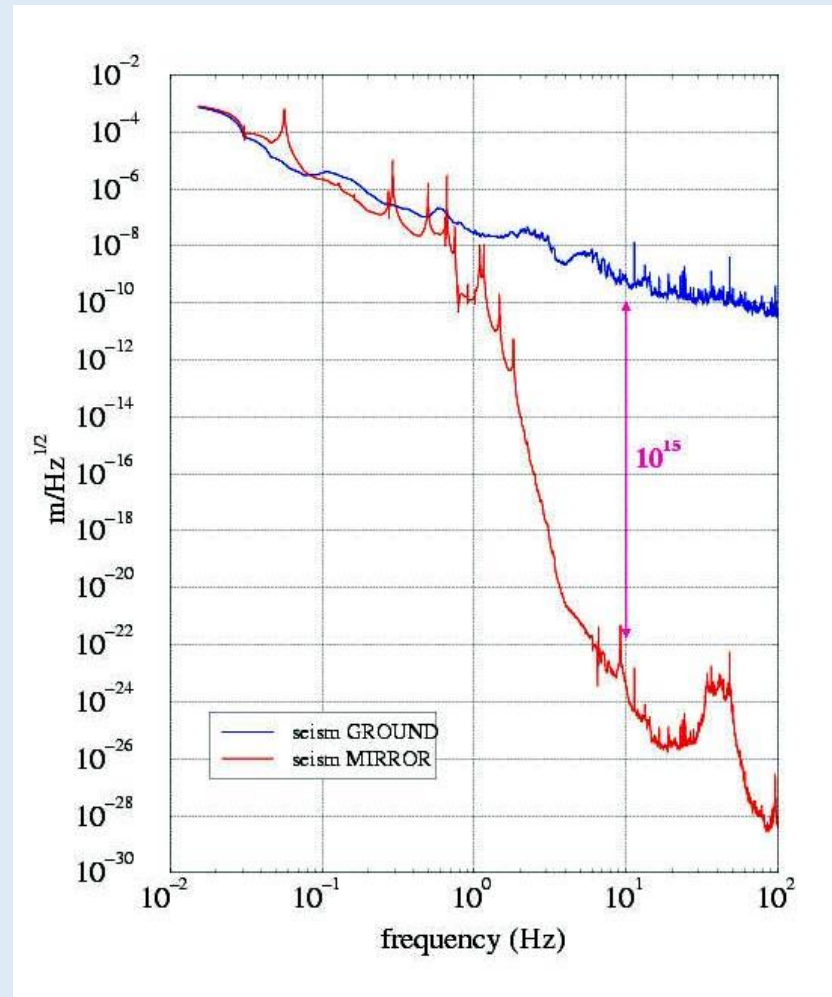
Filtri  
sospesi



# Superattenuatore di Virgo

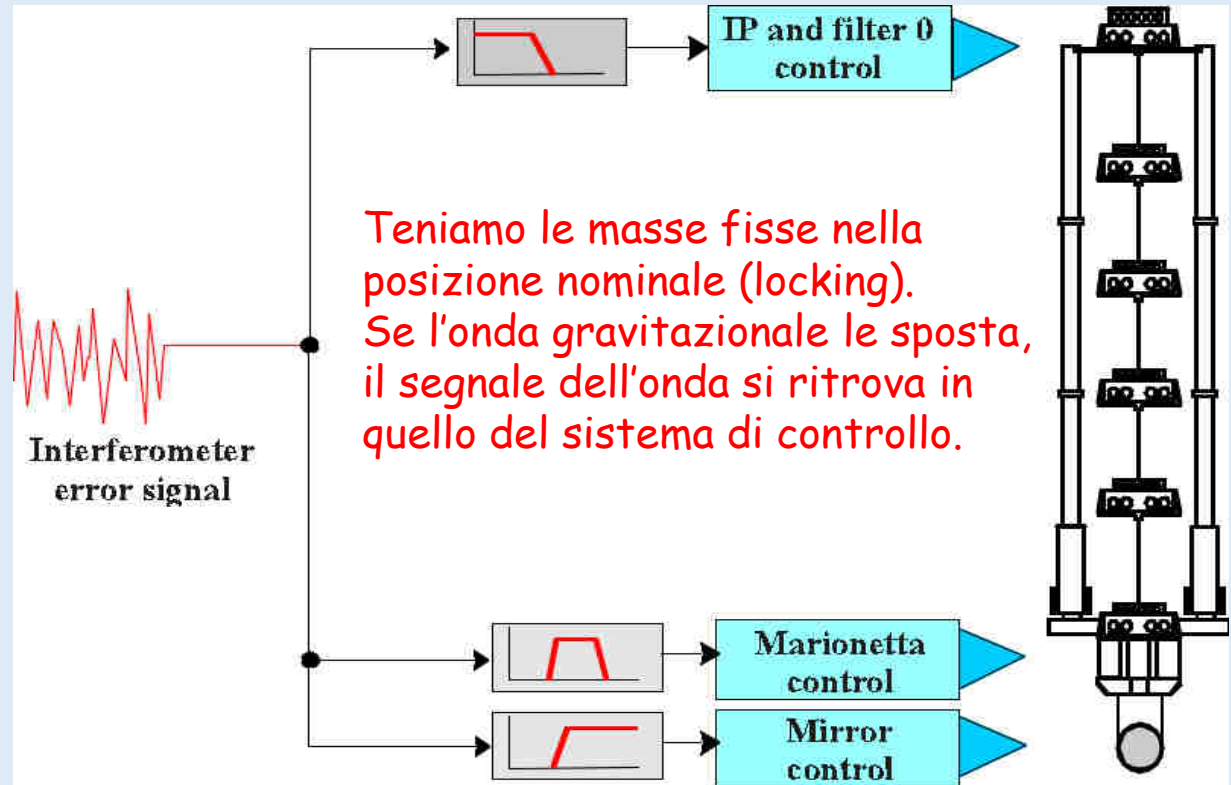
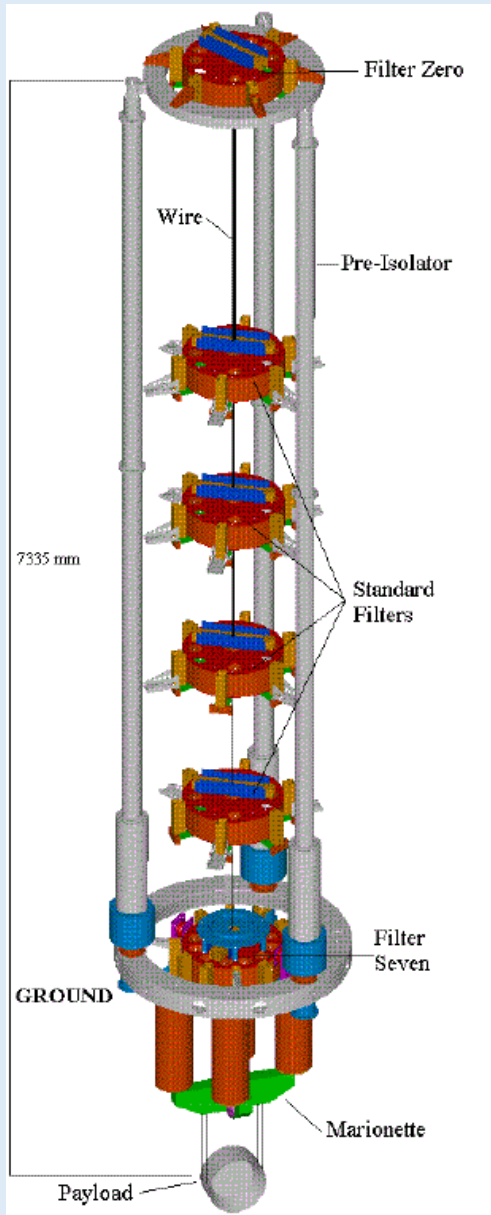


Marionetta  
e specchio



# Superattenuatore di Virgo

Utilizzando degli accelerometri è possibile misurare il rumore residuo e utilizzarlo per un controllo attivo della posizione delle masse.

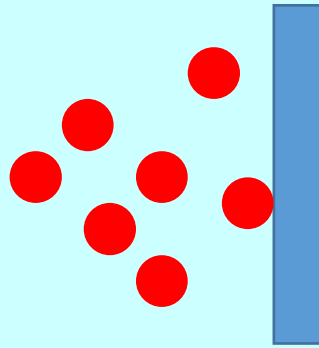






# Laser

Sullo specchio arrivano tanti più fotoni quanto maggiore è la potenza del laser



OK, ma il n. di fotoni non è sempre lo stesso e fluttua statisticamente

Il rischio è quello di interpretare le fluttuazioni di luminosità come spostamenti dello specchio (shot noise)!

Però più fotoni arrivano, più piccole sono le fluttuazioni

**Dobbiamo usare un laser molto potente !**

Già, ma un'onda e.m. di potenza  $P$  esercita sullo specchio una forza  $F$

$$F_{rad} = \frac{P}{c}$$

Se  $P$  fluttua, fluttua anche la forza e lo specchio si muove... quindi devo **DIMINUIRE**  $P$

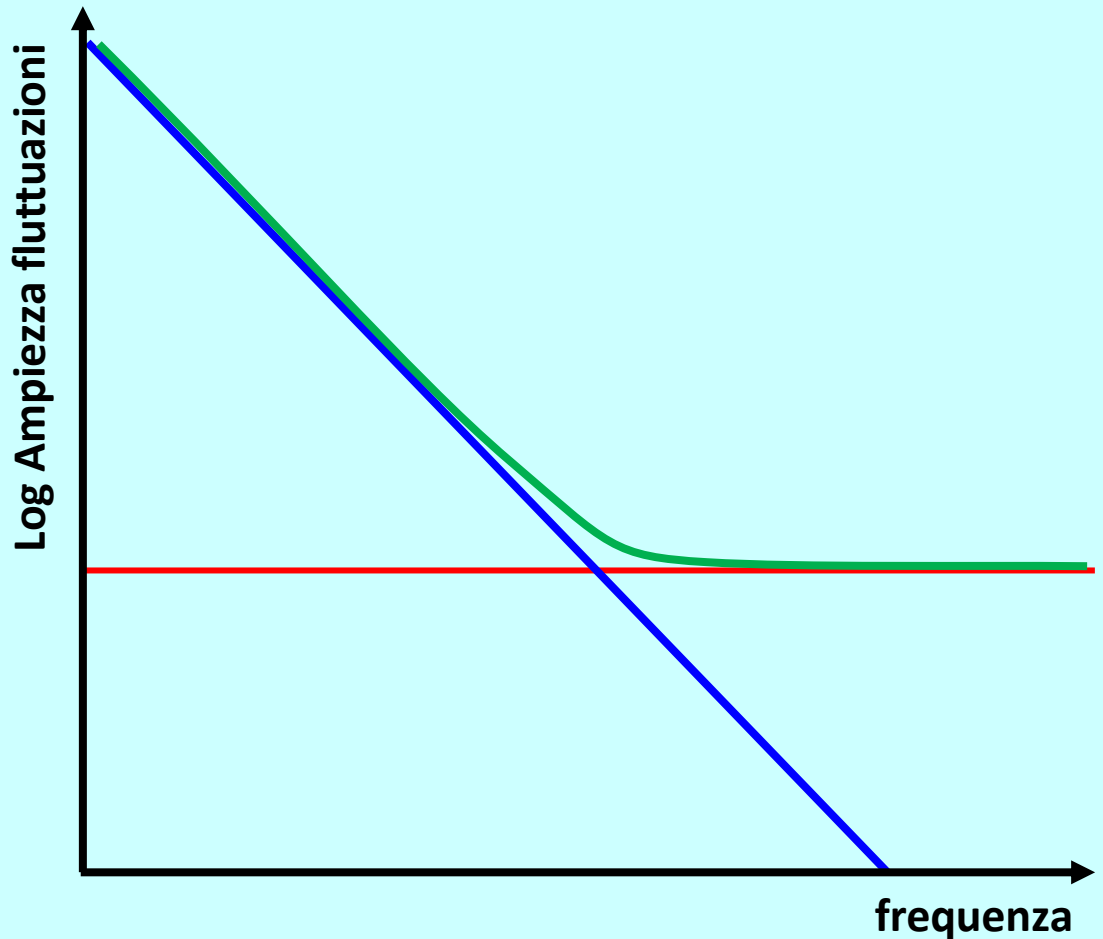


**In conclusione dovremo fare un compromesso !**

# Laser

Le fluttuazioni di luminosità (shot noise) non dipendono dalla frequenza

Le oscillazioni dello specchio dovute alla pressione di radiazione diminuiscono col quadrato della frequenza

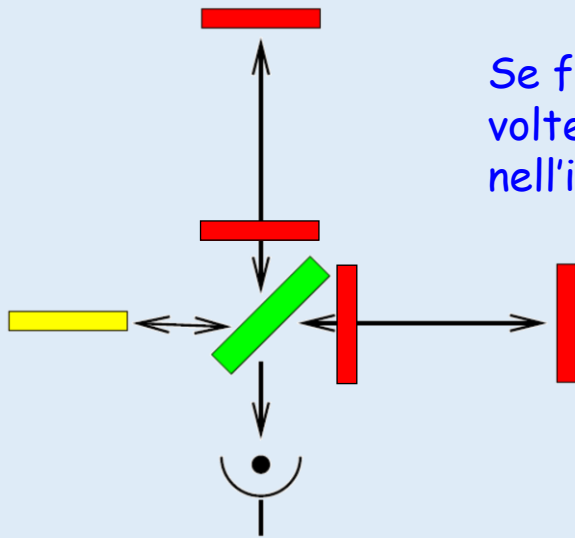


La potenza del laser va scelta in modo da non compromettere la sensibilità a bassa frequenza

Quindi avremmo risolto la maggior parte dei problemi ?

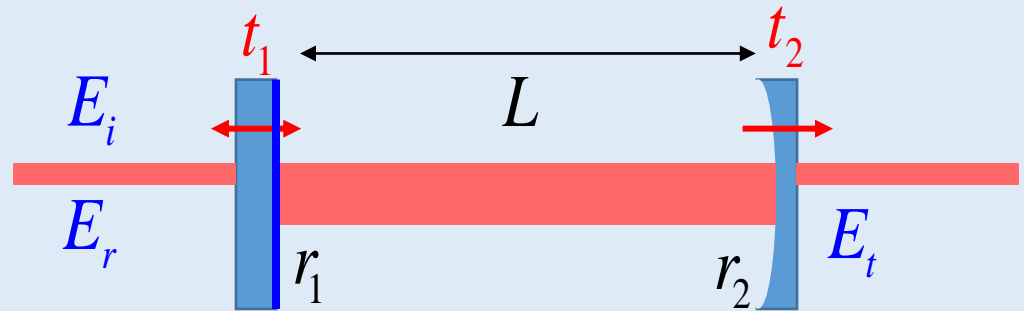


**NO: rimane il fatto che stiamo pensando a  $L > 100$  km !!!  
Sotto alto vuoto !!!!!**



Se facciamo rimbalzare la luce  $N$  volte tra gli specchi possiamo tenerla nell'interferometro per un tempo

$$\tau_0 = N \frac{2L}{c}$$



$r_2 = 1 \quad t_2 = 0$     Specchi quasi ideali !!!

Cavità di Fabry-Perot

$$N \approx \frac{2F}{\pi} \quad F = \frac{\pi \sqrt{r_1}}{1 - r_1}$$

**Finesse: grande se lo specchio riflette perfettamente**

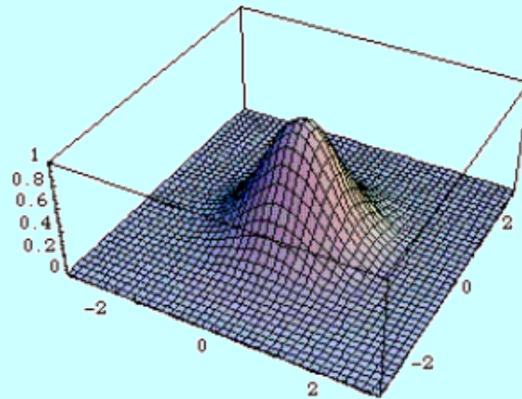




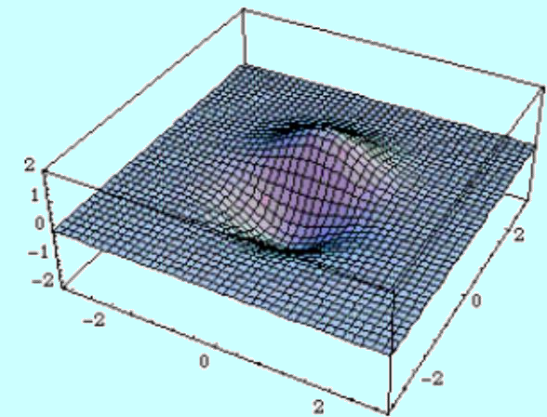
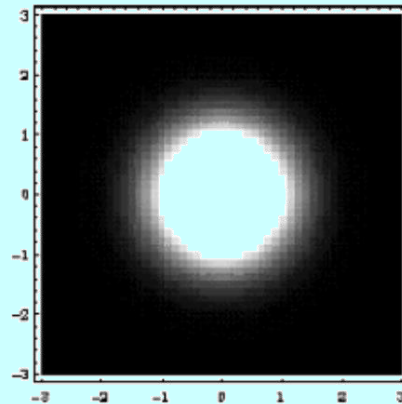
# Manca ancora qualcosa...

Un fascio laser può essere visto come sovrapposizione di diversi modi di oscillazione del campo elettromagnetico

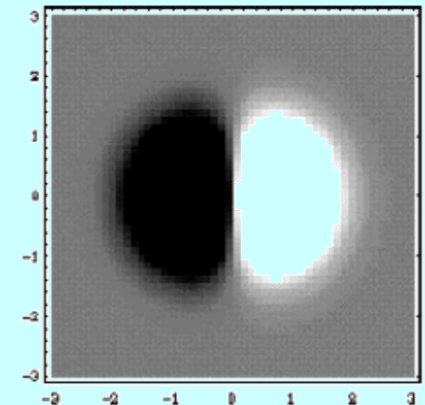
## Modi trasversi $TEM_{00}$ - $TEM_{01}$



$TEM_{00}$



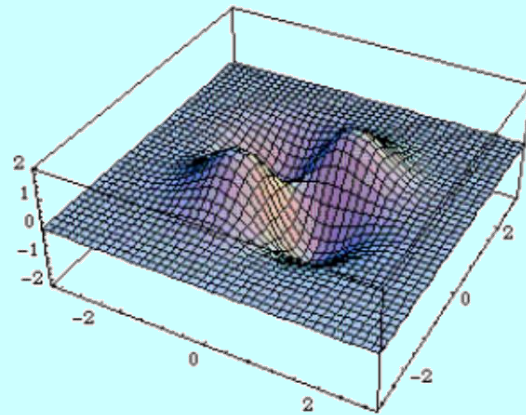
$TEM_{01}$



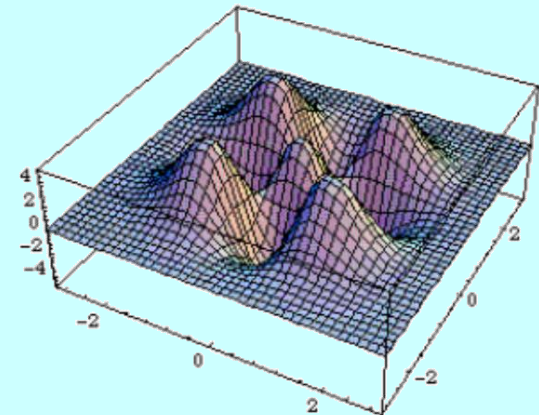
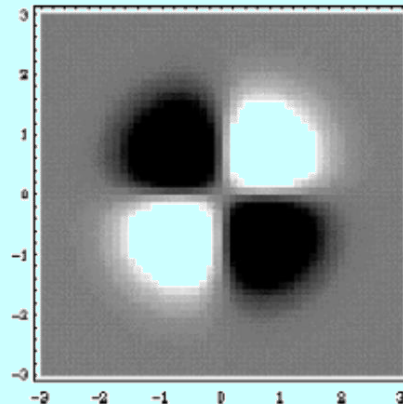
# Manca ancora qualcosa...

Un fascio laser può essere visto come sovrapposizione di diversi modi di oscillazione del campo elettromagnetico

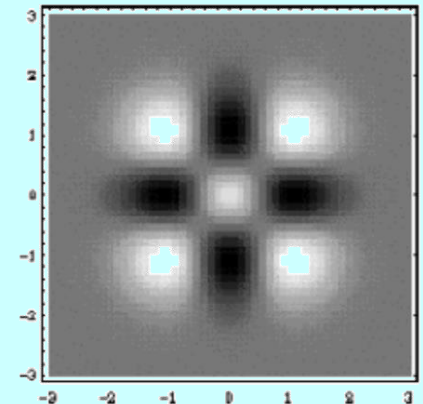
## Modi trasversi $TEM_{11}$ - $TEM_{22}$



$TEM_{11}$



$TEM_{22}$



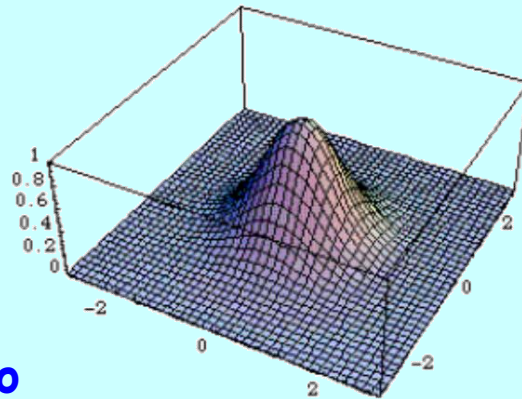
# Manca ancora qualcosa...

Un fascio laser può essere visto come sovrapposizione di diversi modi di oscillazione del campo elettromagnetico

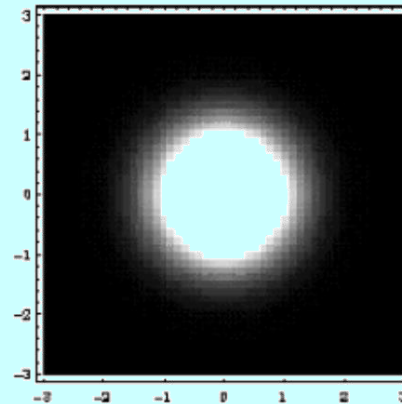
Noi vogliamo che la superficie dello specchio abbia esattamente la stessa forma dell'onda che la colpisce

DEVE RESTARE SOLO IL TEM-00

Modi trasversi TEM<sub>00</sub>-TEM<sub>01</sub>

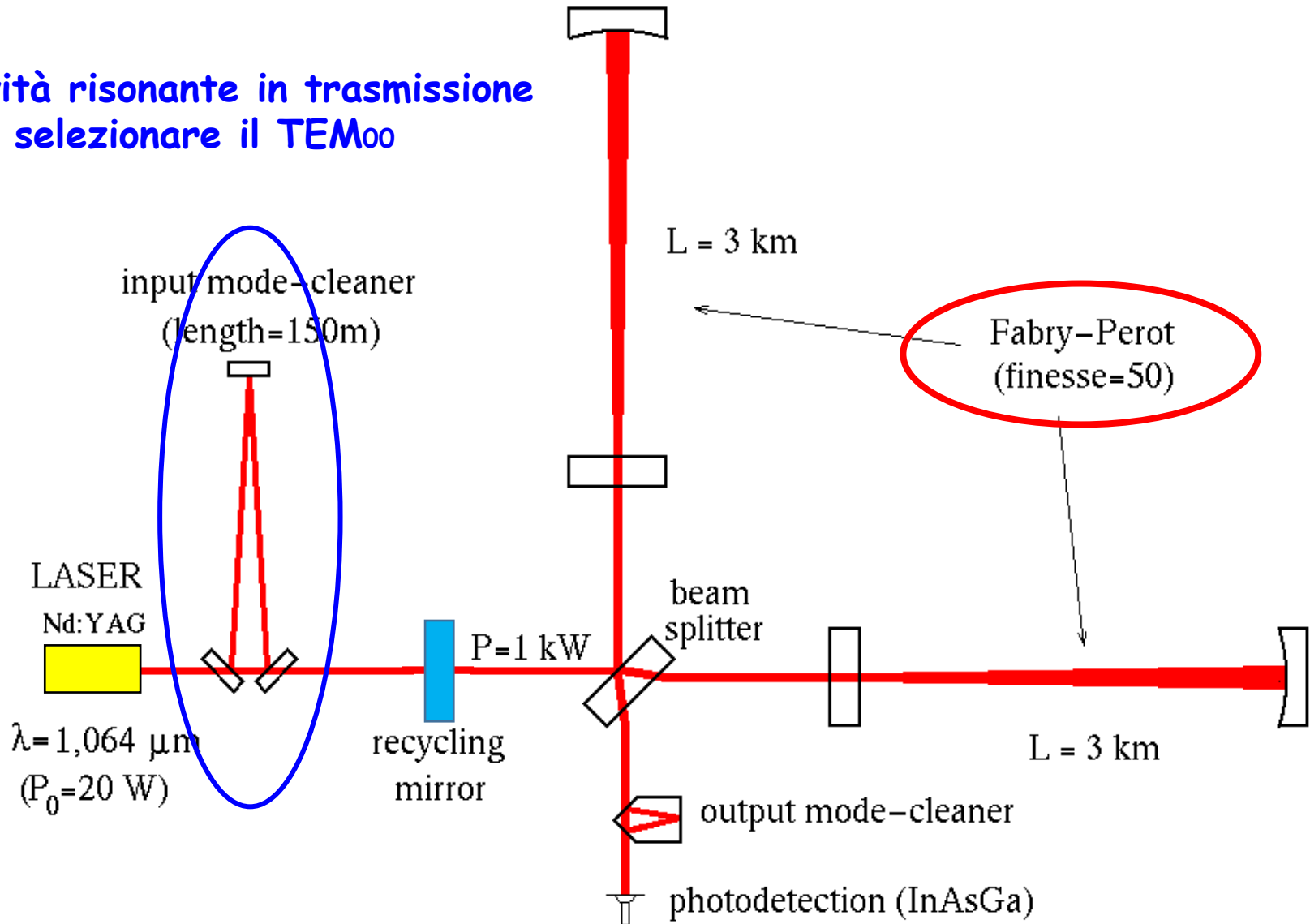


TEM<sub>00</sub>



# Ed ecco a voi Virgo !

Cavità risonante in trasmissione  
per selezionare il TEM<sub>00</sub>









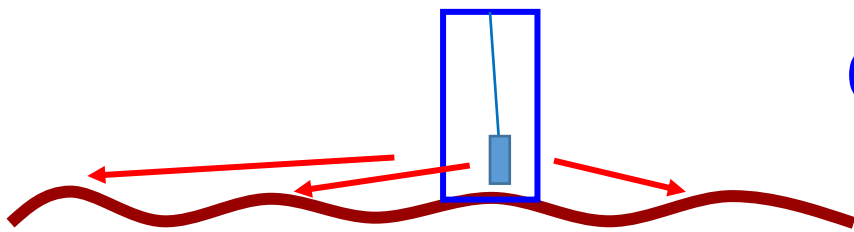




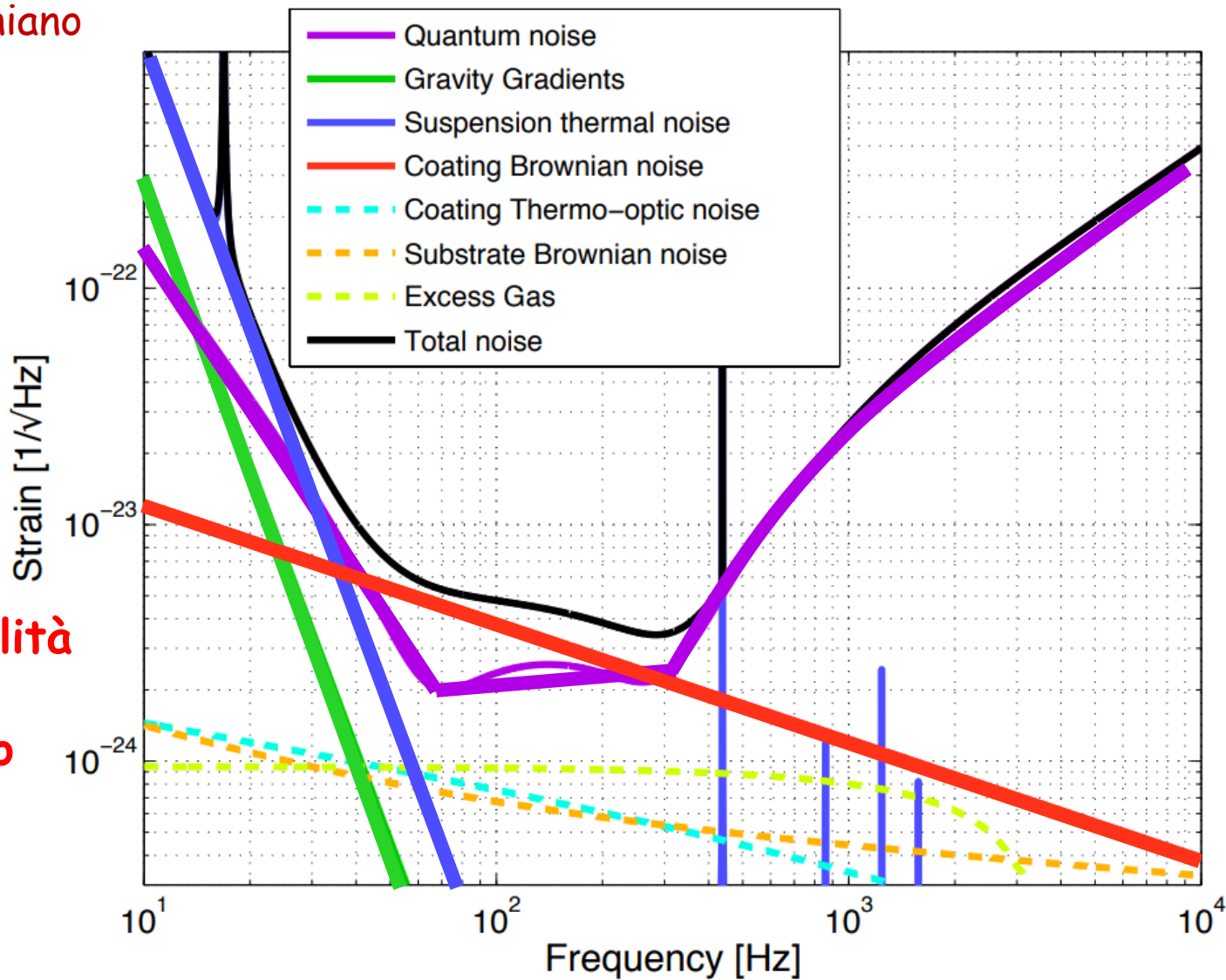




# Quanto è sensibile?

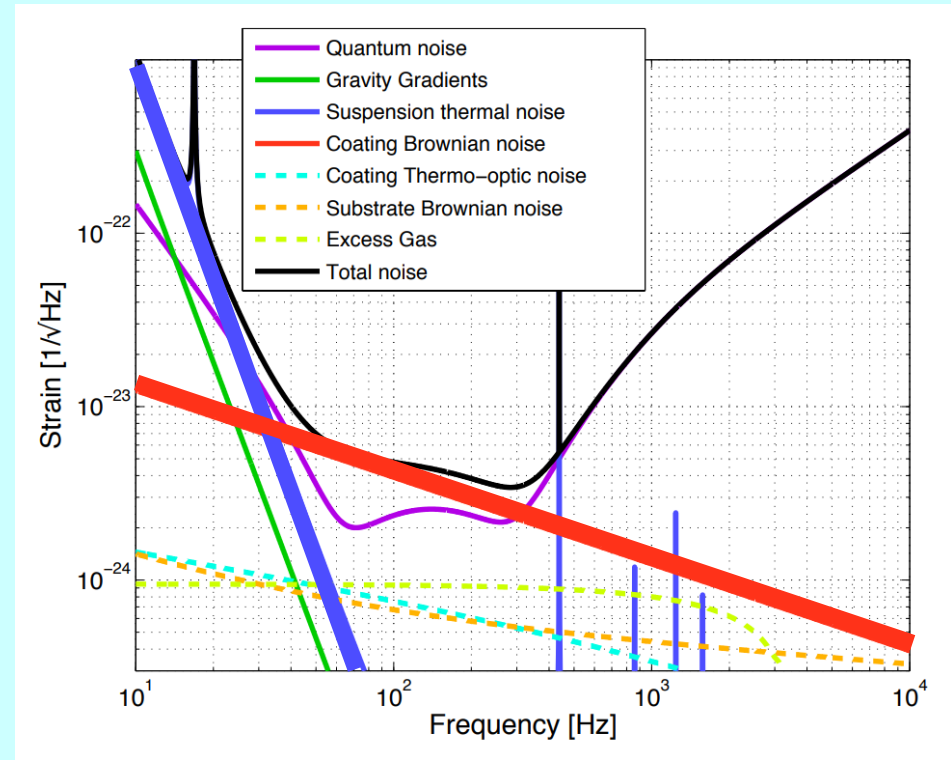
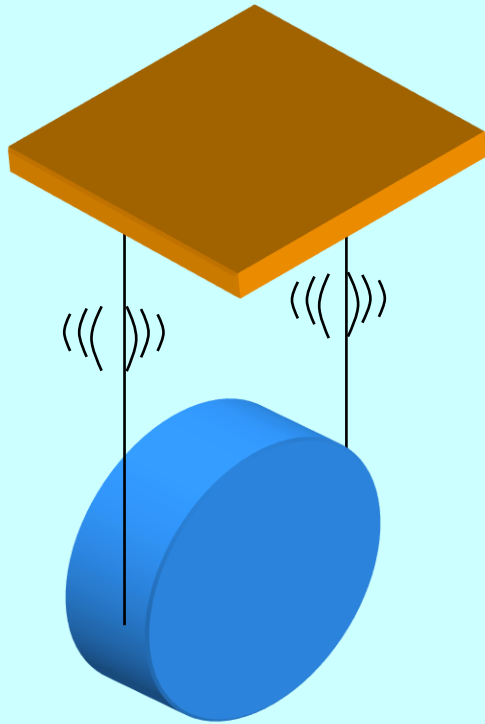


Rumore Newtoniano

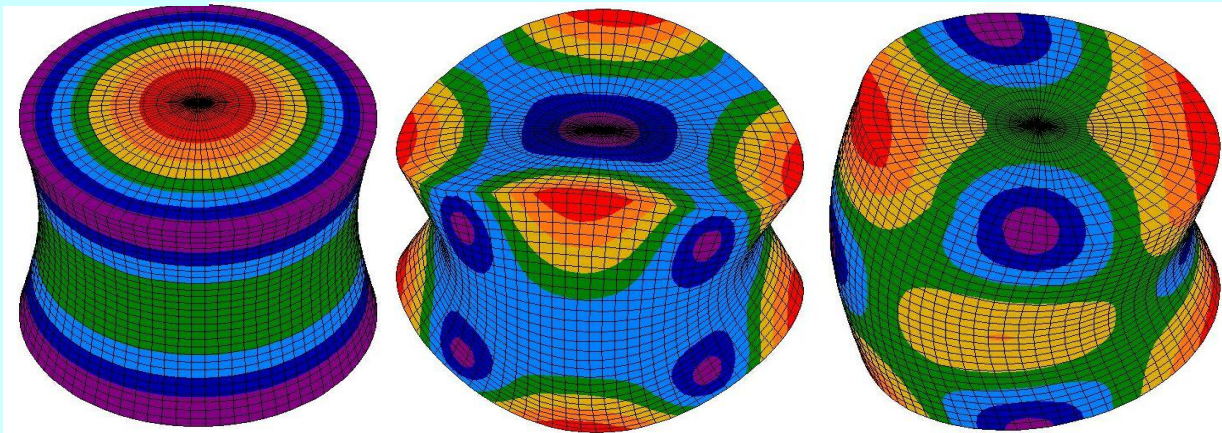


Oggi la sensibilità è limitata dal rumore termico

# La lotta contro il rumore termico



by D.Crooks





# Combattere il rumore termico

Abbassare la temperatura:  
interferometri criogenici



Ma la potenza del laser  
scalda gli specchi



Ci vogliono sospensioni ad alta  
conducibilità termica → Silicio ?



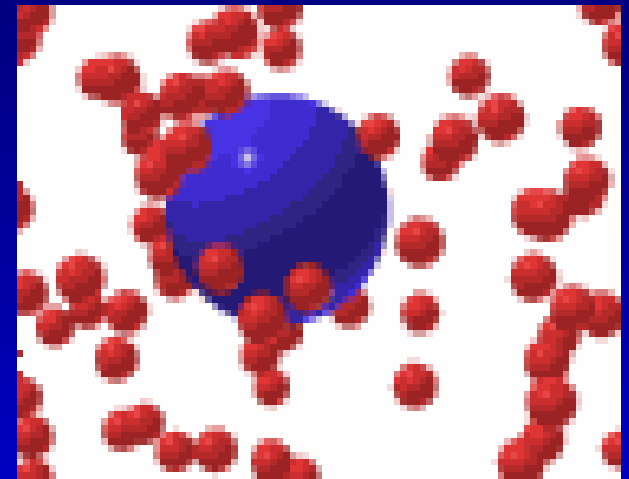
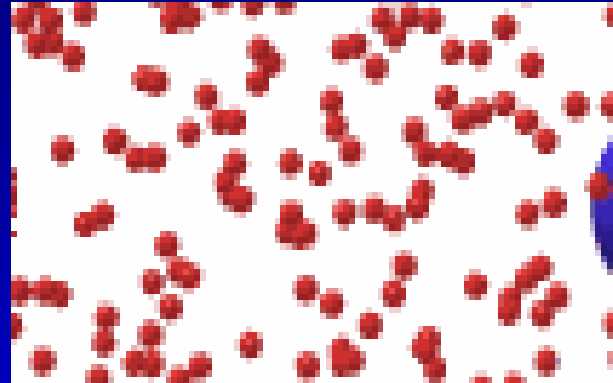
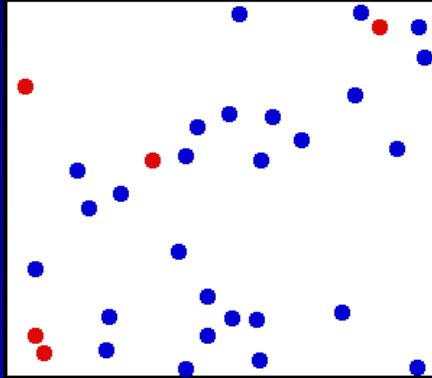
Ma fortunatamente c'è una soluzione

Usare materiali a  
bassa dissipazione



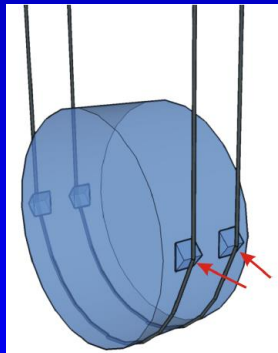
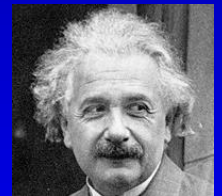
Ridurre il rumore  
termico

# Fluttuazione e dissipazione



dissipazione

Moto browniano



Acciaio C85

$$\phi_{C85} \sim 2 \times 10^{-4}$$

Un filo di diametro  
0.5 mm regge circa 60 kg



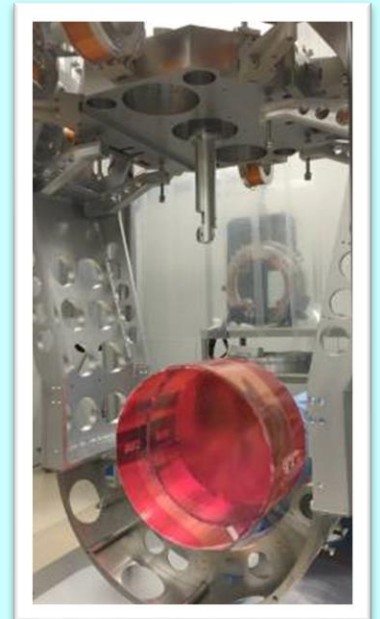
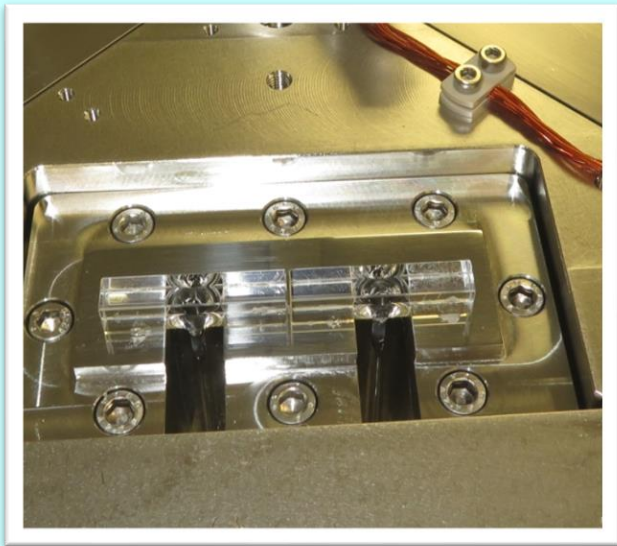
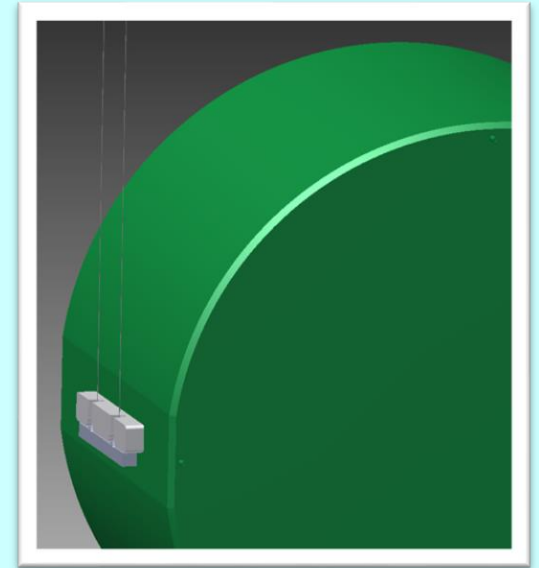
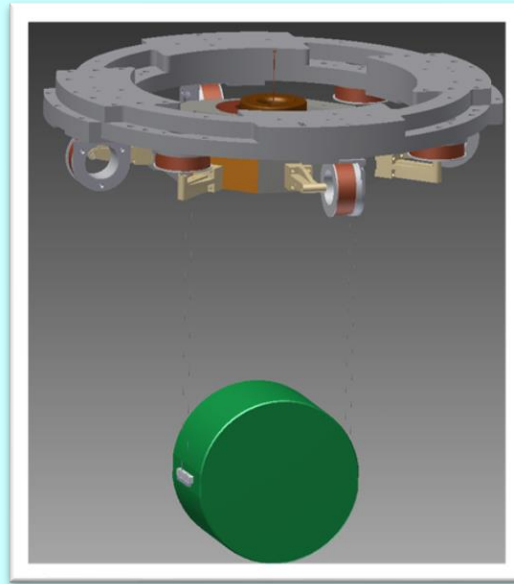
$\text{SiO}_2$  amorfo

$$\phi_{\text{SiO}_2} \sim 10^{-7}$$

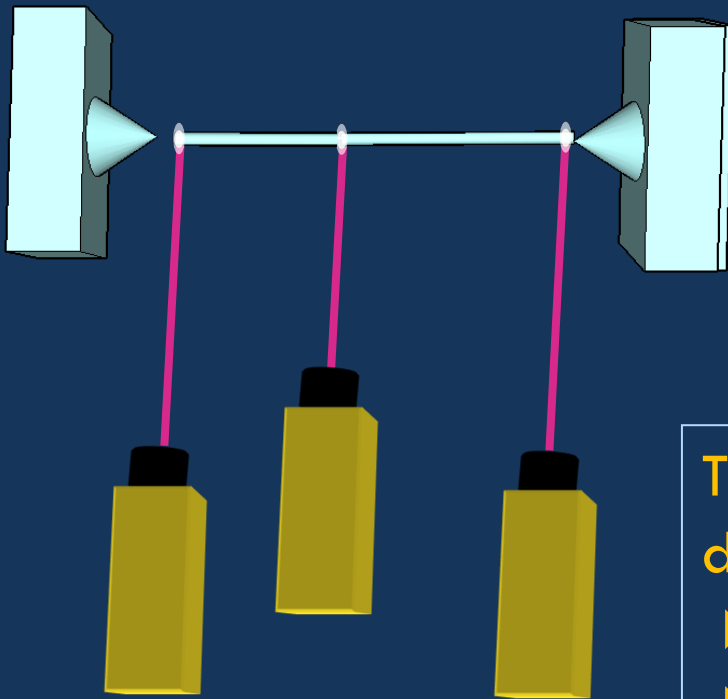
Un filo di diametro  
0.5 mm regge circa **80 kg**

G. Cagnoli  
& Glasgow team

# Assemblaggio monolitico



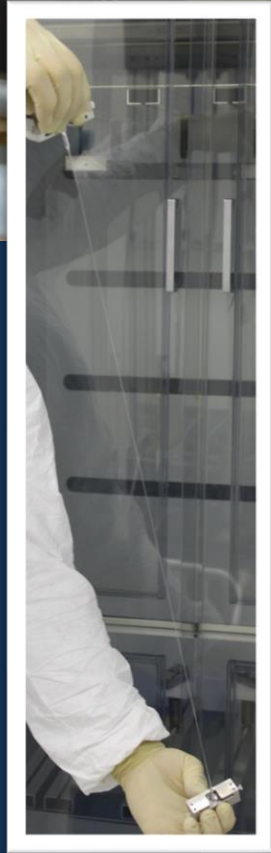
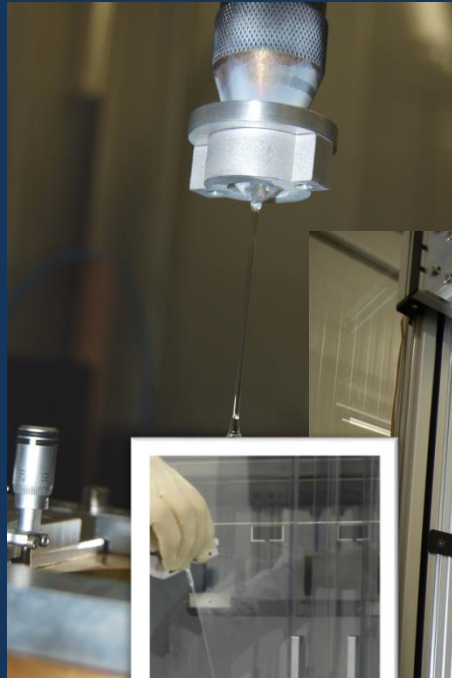
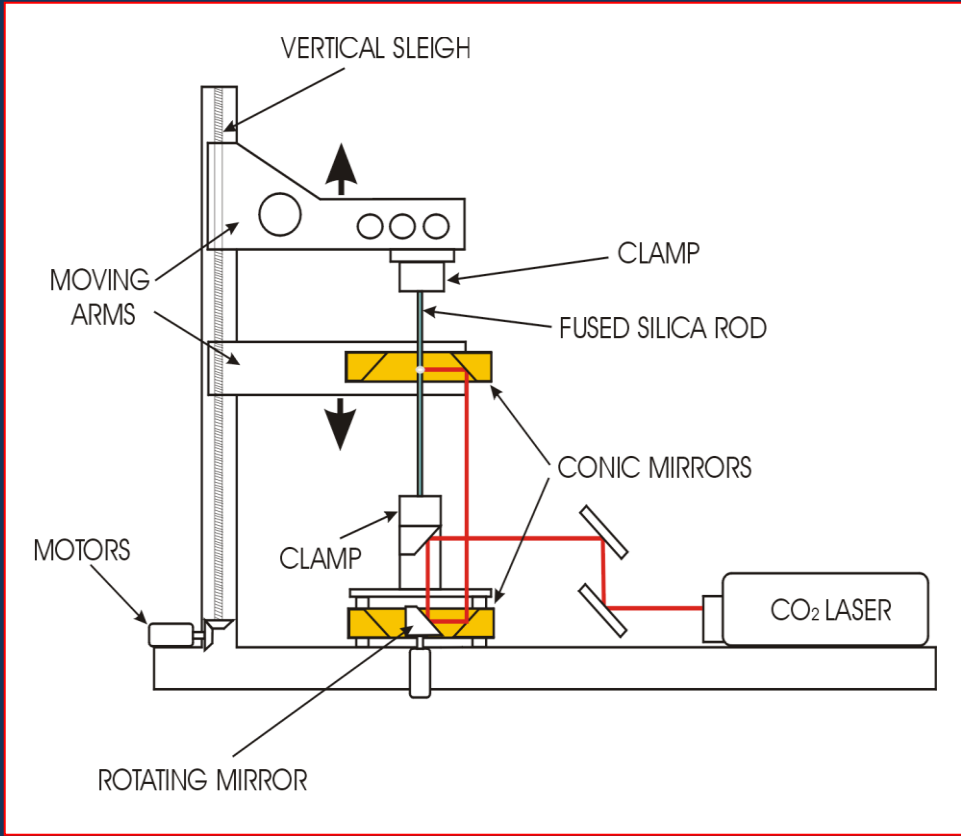
# Come produrre le fibre



100 W CO<sub>2</sub> laser

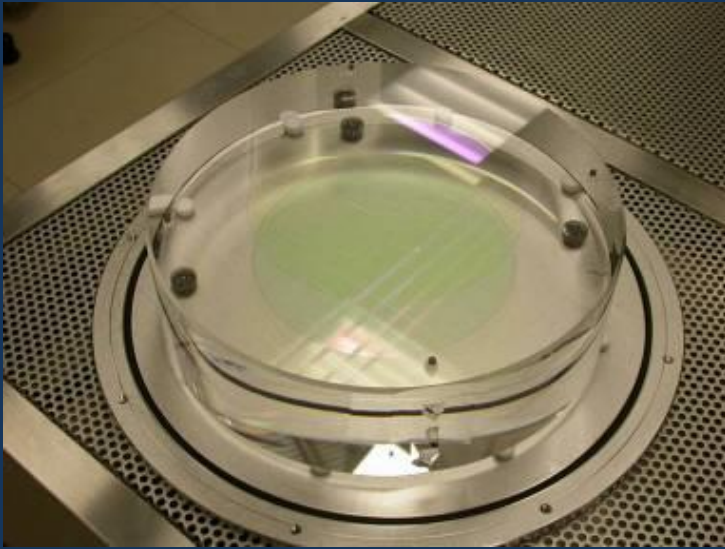
Tiraggio laser da barrette di silice  
di spessore 1.5 mm:

- ▶ Saldatura
- ▶ Annealing
- ▶ Tiraggio controllato



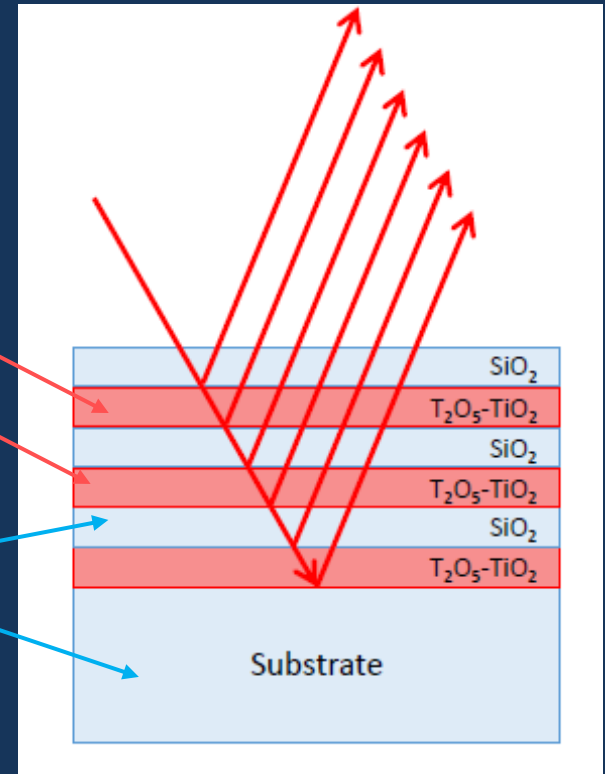


# Rumore termico degli specchi



Materiale  
ad alto indice  
di rifrazione

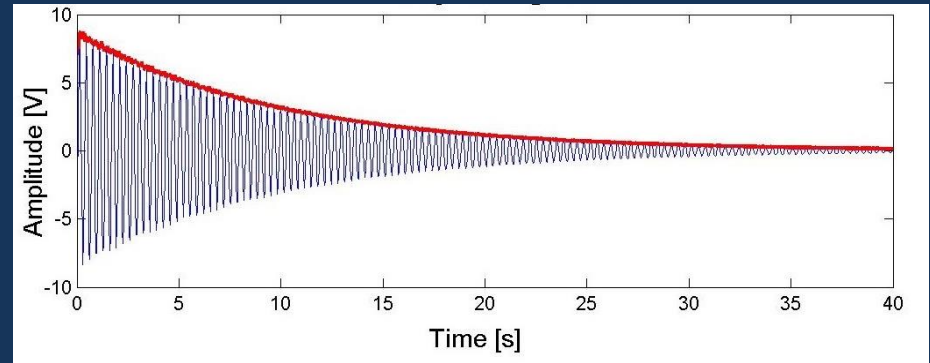
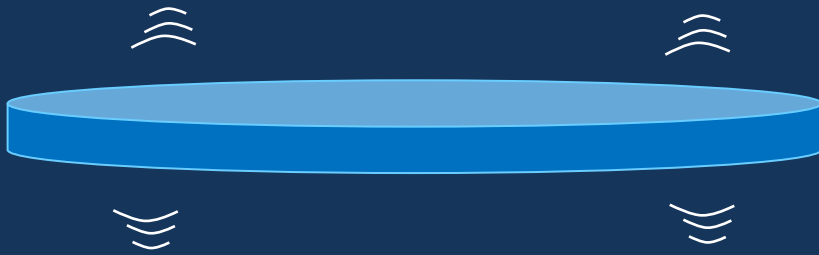
Materiale a basso  
indice di rifrazione



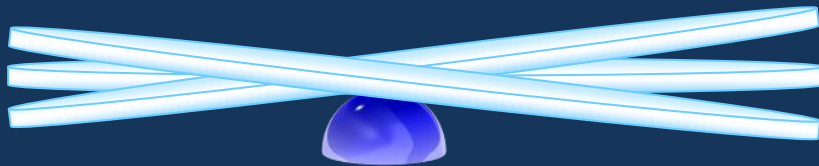
10  $\mu\text{m}$  di rivestimento producono  
più rumore termico di 10 cm di substrato



# Misura delle perdite nei rivestimenti



Come sostenere il campione senza alterare la misura e rovinare il rivestimento ?



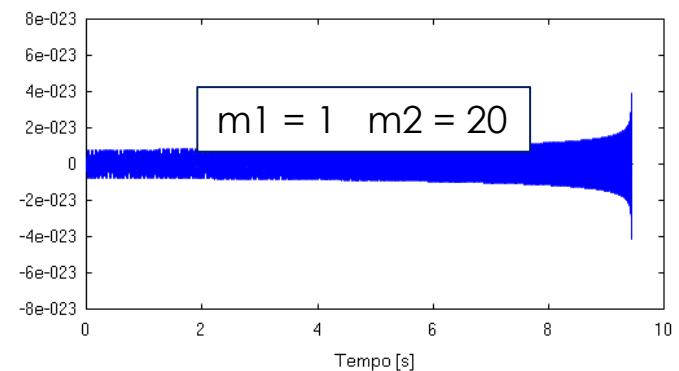
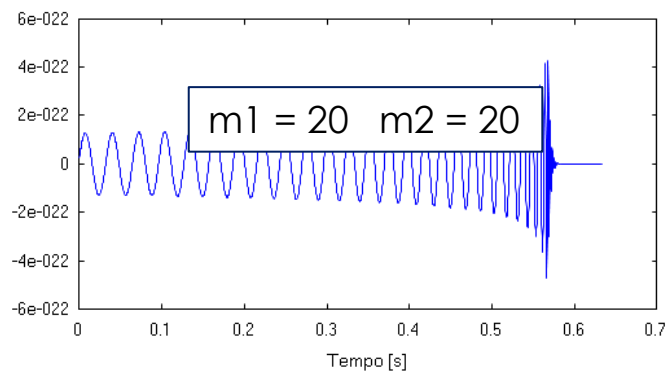
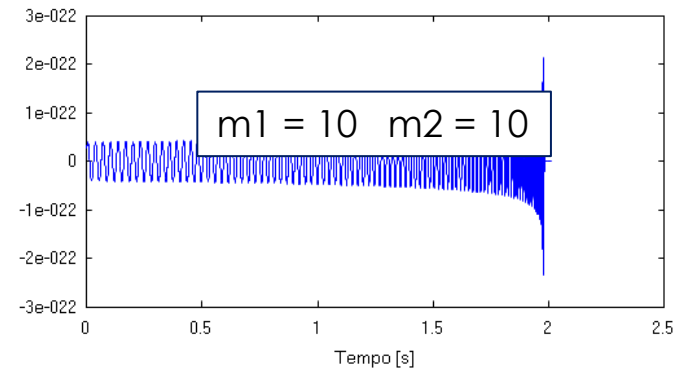
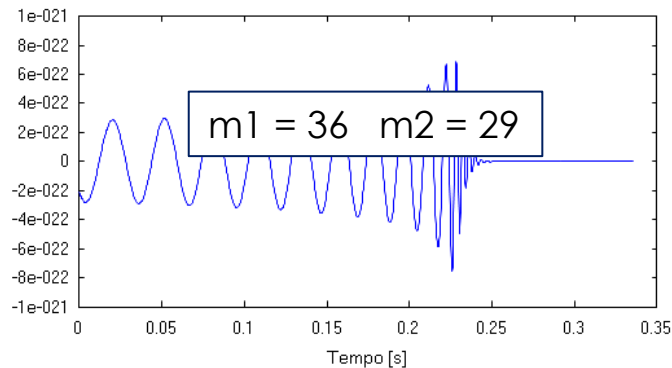
**GeNS: Gentle Nodal Suspension**  
oggi usata in tutto il mondo



Oggi è il miglior materiale per realizzare gli strati ad alto indice di rifrazione

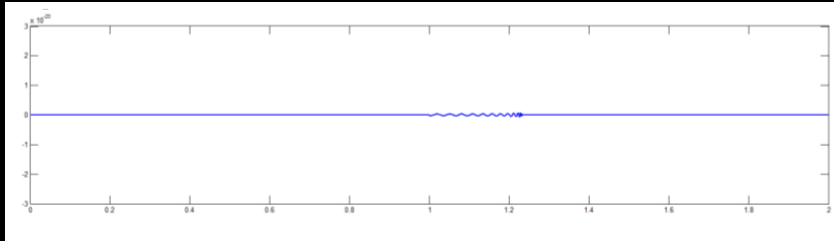
# Se funziona bisogna cercare il segnale

Date le masse, i momenti angolari, l'inclinazione dell'orbita....la teoria della ci dice quale forma dell'onda gravitazionale attenderci

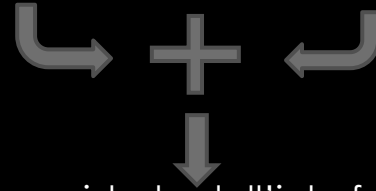
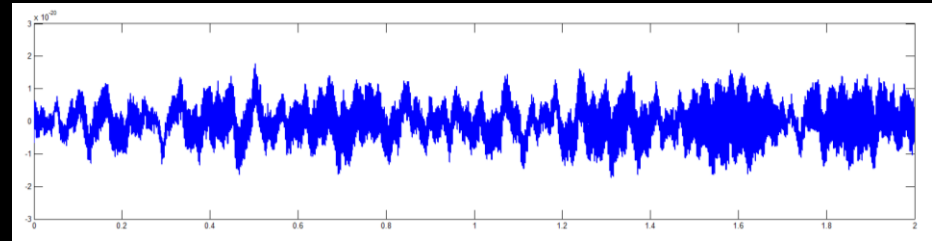


# Ma non è così semplice...

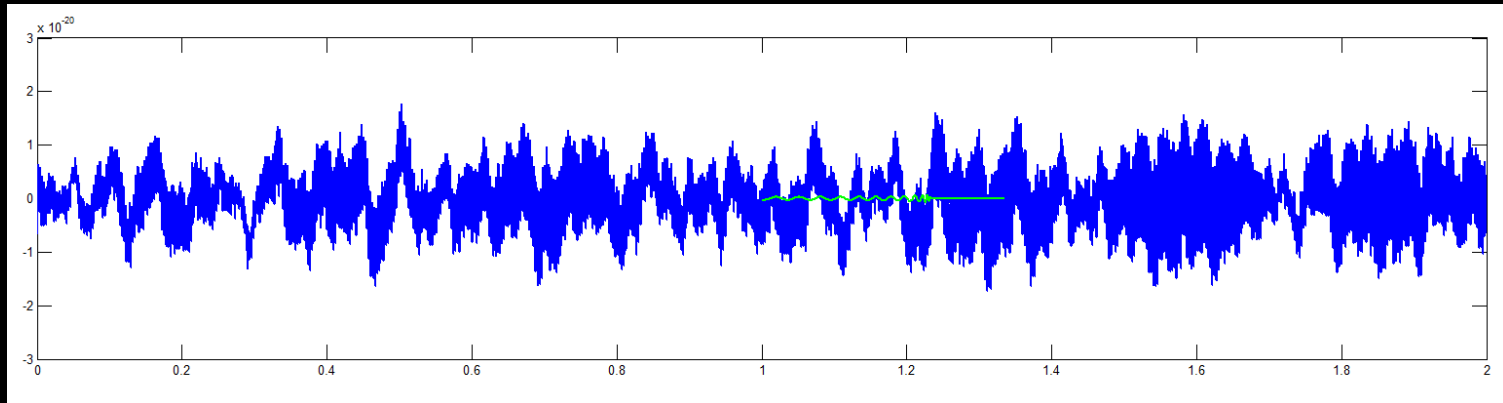
Segnale Gravitazionale



Rumore



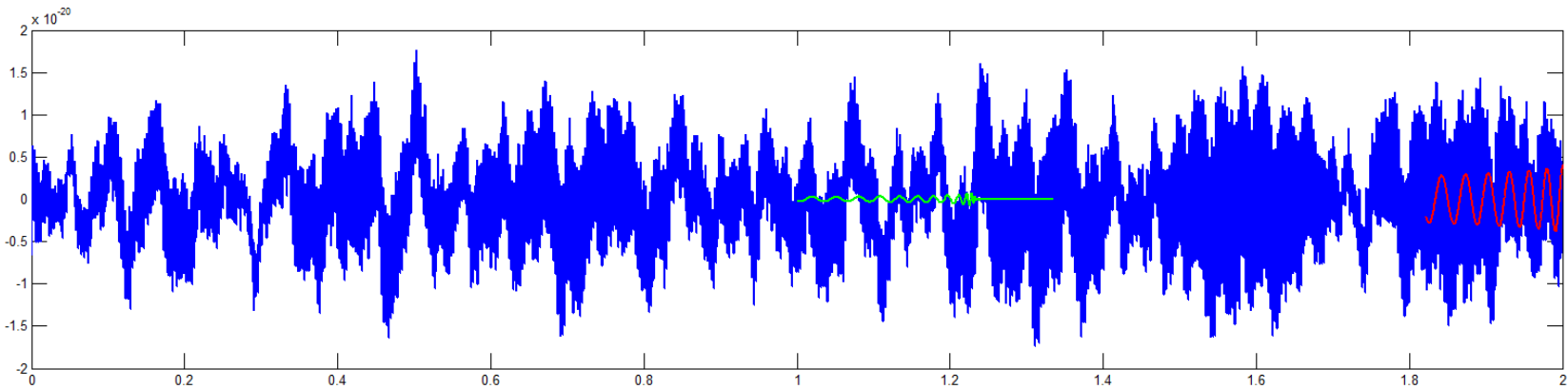
Segnale registrato dall'interferometro



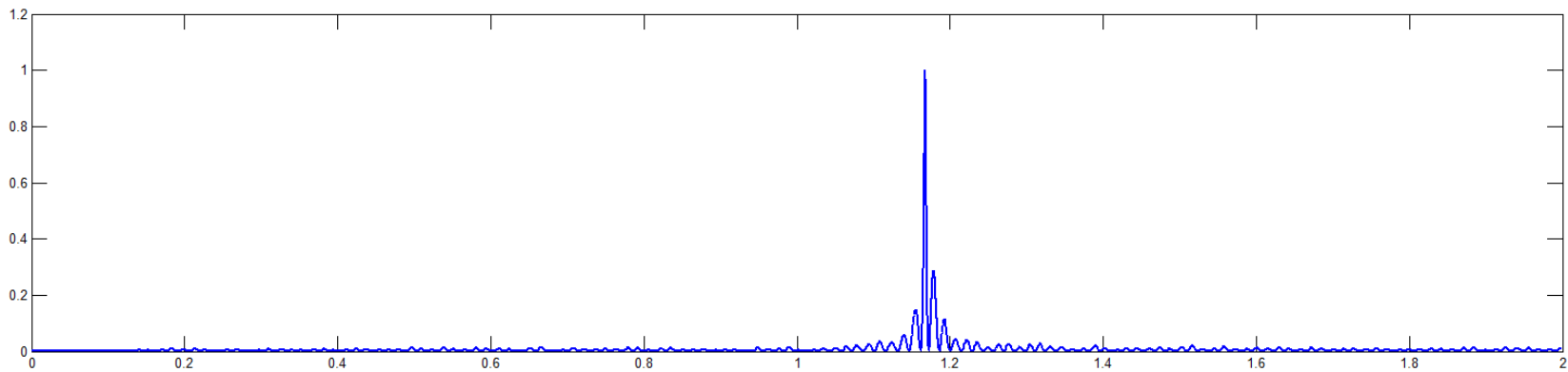
# Però esistono straordinarie tecniche matematiche !

Segnale

Template  
di  
Confronto



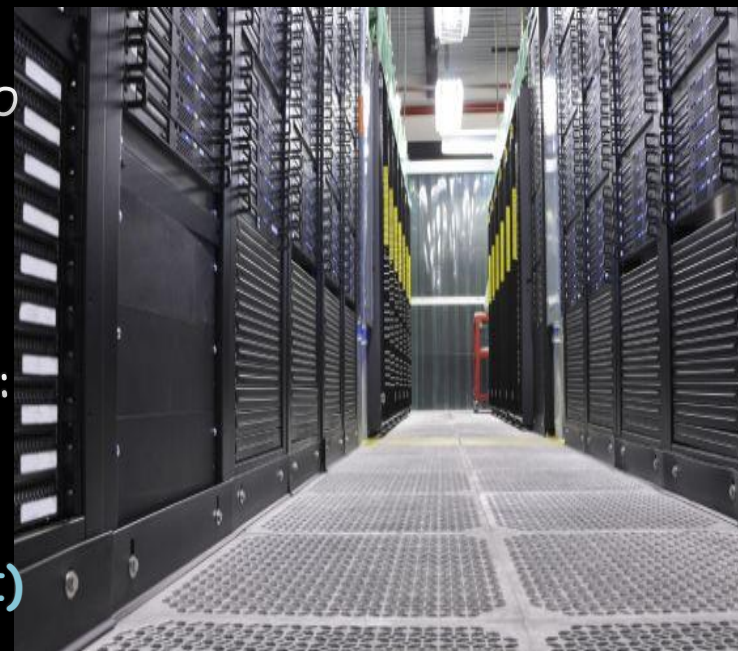
Uscita del  
filtraggio



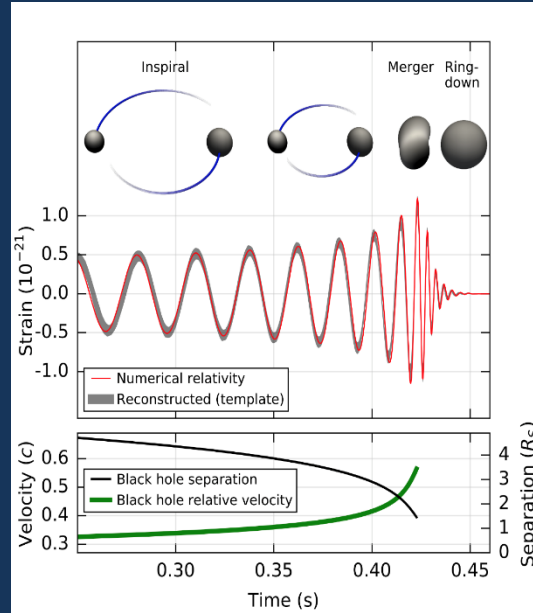
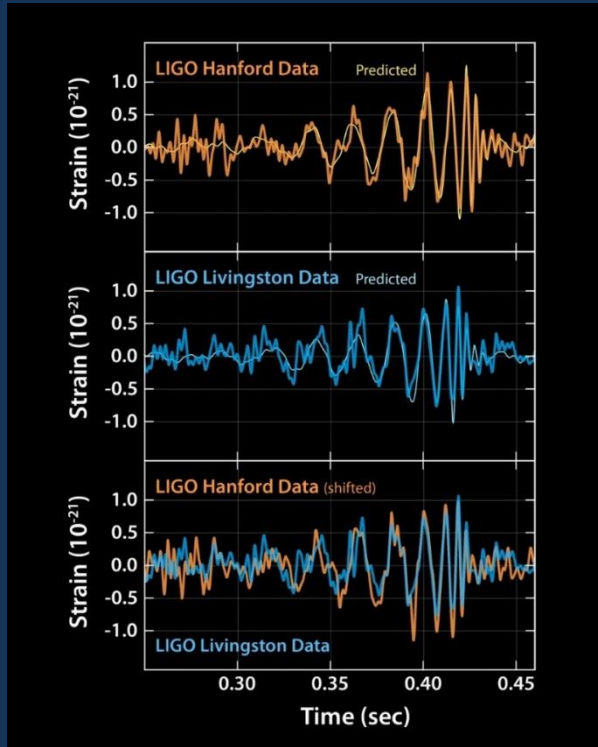


# L'analisi dei dati è un'altra avventura al limite !

- ANCHE SE NON SI UTILIZZA LA FORMA D'ONDA IDENTICA A QUELLA DA RICERCARE È SUFFICIENTE CHE SIA "VICINA"
- PER L'ANALISI VENGONO UTILIZZATE **250 000** FORME D'ONDA DI RIFERIMENTO
- LATENZA DEI SOFTWARE DI ANALISI IN TEMPO REALE: **~2 MIN**
- NUMERO DI PROGRAMMI DI ANALISI ON-LINE: **4**
- NUMERO DI PROGRAMMI DI ANALISI OFF-LINE: **5**
- ORE DI CALCOLO PER 16GG DI DATI: **~50 MILIONI (COME 20 000 PC PER 100 GIORNI)**

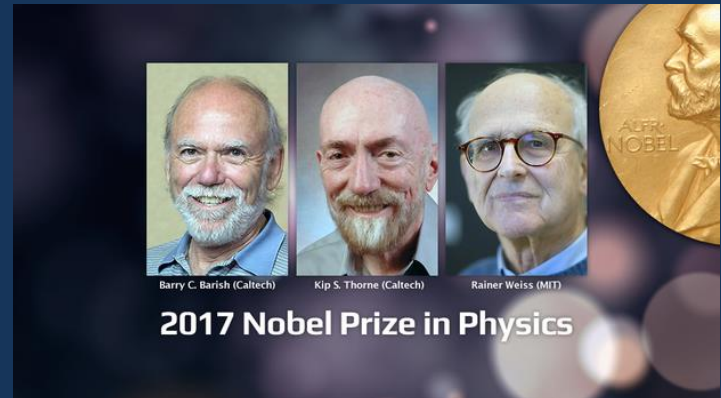


# E finalmente, dopo 100 anni dalla previsione



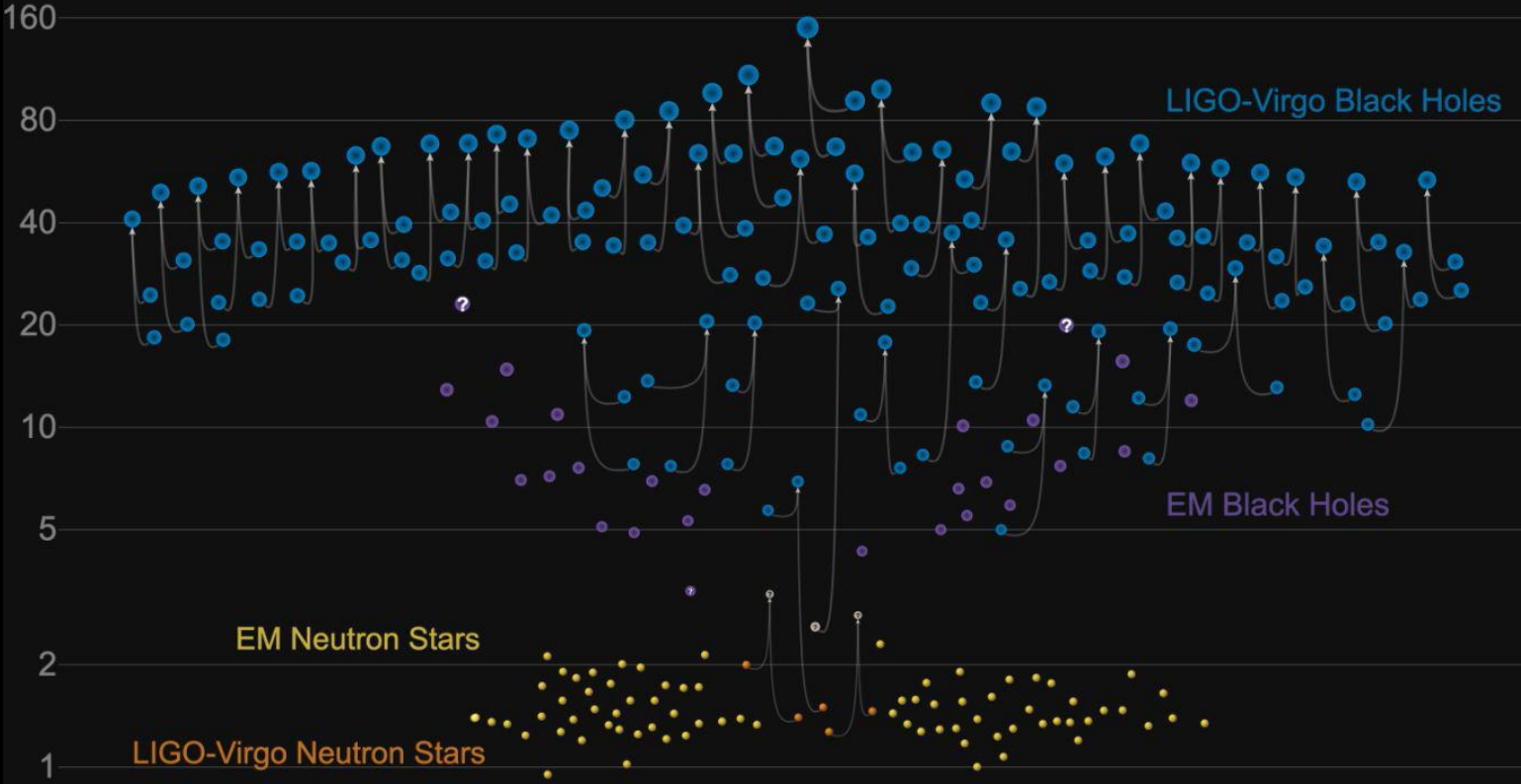
arrivano i  
primi segnali

e i riconoscimenti  
a tanti sforzi!



# Masses in the Stellar Graveyard

*in Solar Masses*



## O3a

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

Non ci sono imprese irrealizzabili

Basta crederci e perseverare !!!!

Grazie