



# La ricerca delle onde gravitazionali: stato e prospettive

Fabio Garufi

Università di Napoli Federico II

and INFN Sez. Di Napoli



# La natura delle onde gravitazionali

- Le equazioni del campo gravitazionale, linearizzate ammettono soluzioni ondulatorie:

$$\mathbf{G}_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} \mathbf{T}_{\mu\nu} \quad \mathbf{g}_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \mathbf{h}_{\mu\nu} \quad \text{with } |h_{\mu\nu}| \ll 1 \Rightarrow \left( \nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h_{\mu\nu} = 0$$

2 gradi di libertà

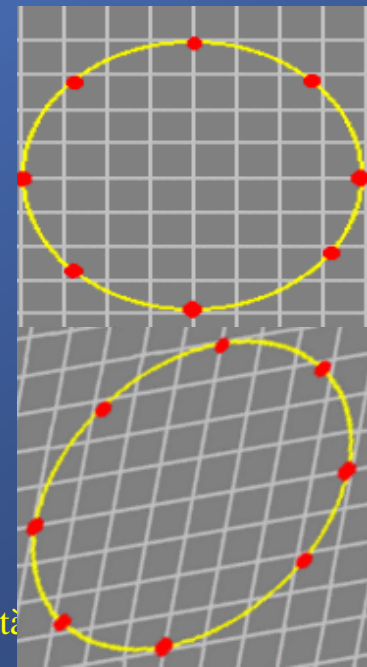
$$\bar{h}_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \eta_{\mu\nu} h^\alpha_\alpha$$

$$\bar{h}_{\mu\nu} = A_{\mu\nu} e^{ik_\alpha x^\alpha} \quad 10 \text{ Eq.}$$

$$A_{\mu\nu} k^\mu = 0 \quad 4 \text{ cond. (transverse)}$$

$$A_{\mu\nu} U^\mu = 0 \quad 3 \text{ cond. (gauge)}$$

$$A^\mu_\mu = 0 \quad 1 \text{ cond. (traceless)}$$





# Costanti di accoppiamento

<i>strong</i>	<i>e.m.</i>	<i>weak</i>	<i>gravity</i>
0.1	1/137	$10^{-5}$	$10^{-39}$

Emissione di GW : eventi molto energetici ma quasi nessuna interazione

- ❑ Collassi di supernova: i  $\nu$  subiscono  $10^3$  interazioni prima di lasciare la stella, le GW, invece, emergono dal nucleo *indisturbate*
- ❑ disaccoppiamento delle GW dopo il Big Bang
  - GW  $\sim 10^{-43}$  s ( $T \sim 10^{19}$  GeV)
  - $\nu \sim 1$  s ( $T \sim 1$  MeV)
  - $\gamma \sim 10^{12}$  s ( $T \sim 0.2$  eV)

*Trasporto ideale di informazione,  
Universo trasparente alle GW fino al Big Bang!!*

# Ampiezza delle GW

**Luminosità**

$$P = \frac{G}{5c^5} \langle \ddot{Q}^{ij} \ddot{Q}_{ij} \rangle \approx \varepsilon \cdot \frac{c^5}{G} \left( \frac{R_s}{R} \right)^2 \left( \frac{v}{c} \right)^6$$

asimmetria

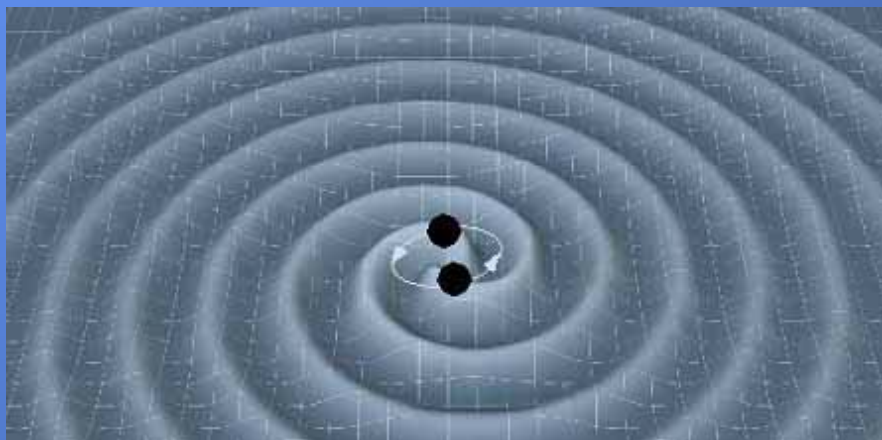
**Ampiezza**

$$h_{\mu\nu} = \frac{2G}{c^4} \cdot \frac{1}{r} \ddot{Q}_{\mu\nu}$$

Compactness  $C$

1 per BH  
0.3 per NS  
 $10^{-4}$  per WD

Sorgenti efficienti di GW devono essere asimmetriche, compatte e rapide  
Sensibilità dei rivelatori di GW espressa in ampiezza  $h$ : attenuazione  $1/r$



Esempio di ampiezza:  
Coalescenza NS/NS nell'ammasso della Vergine  
( $r \sim 10 \text{ Mpc}$ )

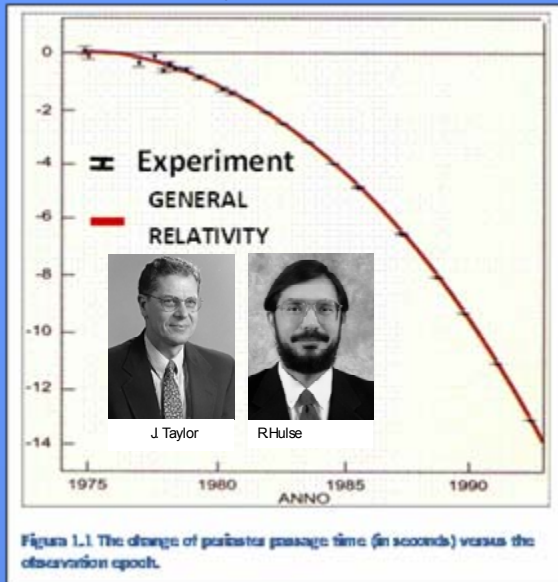


$$h \sim 10^{-21}$$



# Rivelazione

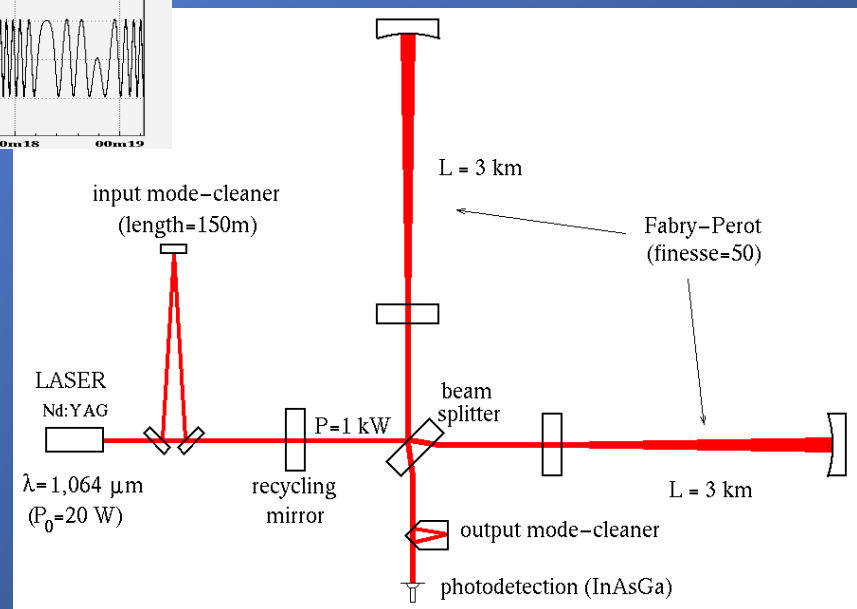
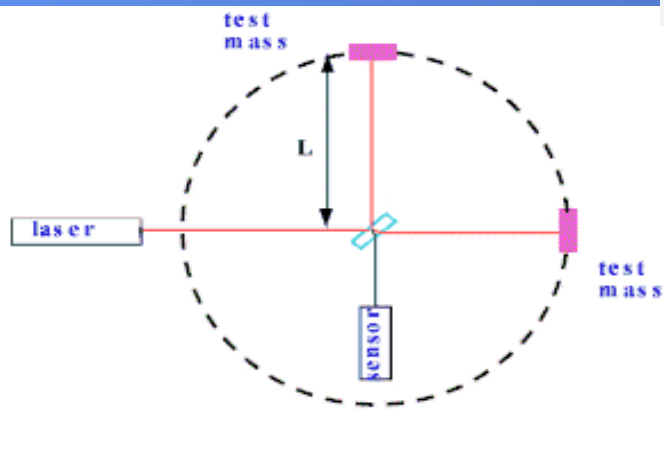
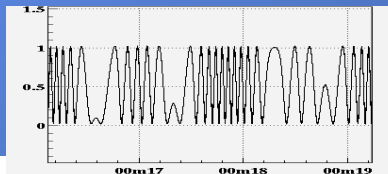
Hulse & Taylor Nobel 1993



Weber (1966)



Rivelatori interferometrici





## Principio di rivelazione

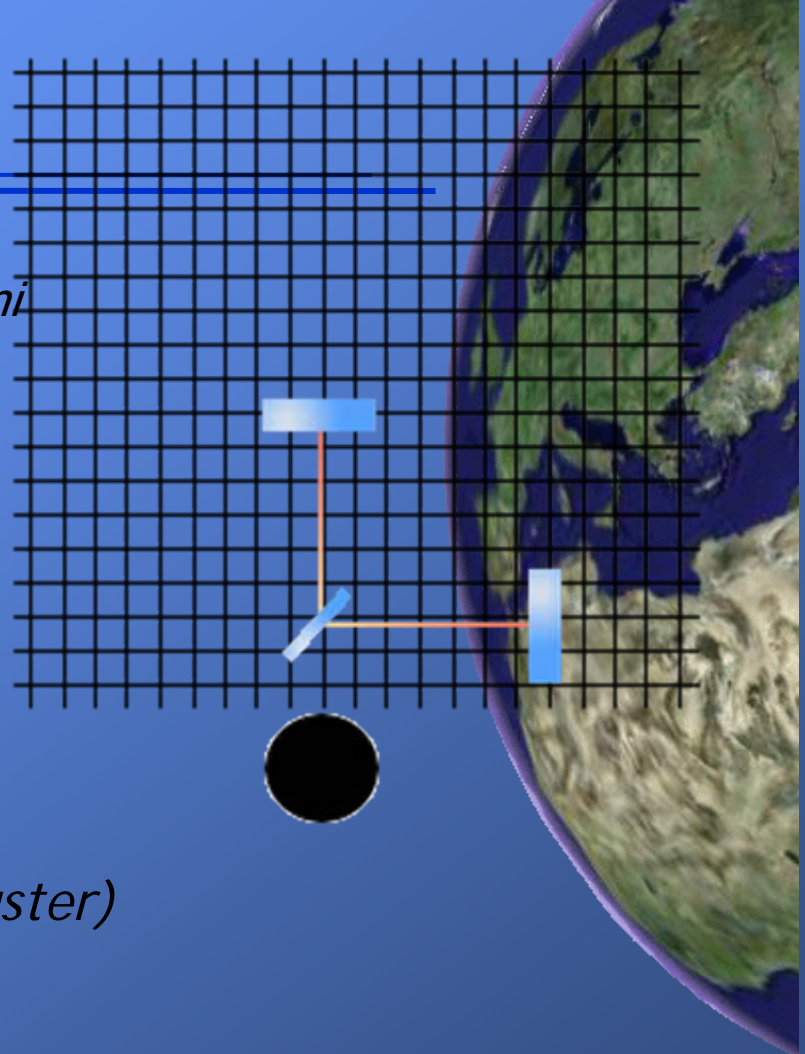


*GW inducono deformazioni  
Dello spazio-tempo*

*Misurare le deformazioni  
Dello spazio-tempo con  
la luce*

$$\Delta L \approx \frac{1}{2} h L$$

Target  $h \sim 10^{-21}$   
(NS/NS @Virgo Cluster)



Credit: M.Lorenzini

Bisogna misurare:  $\Delta L \sim 10^{-18} \text{ m}$

*Enorme sfida sperimentale!*



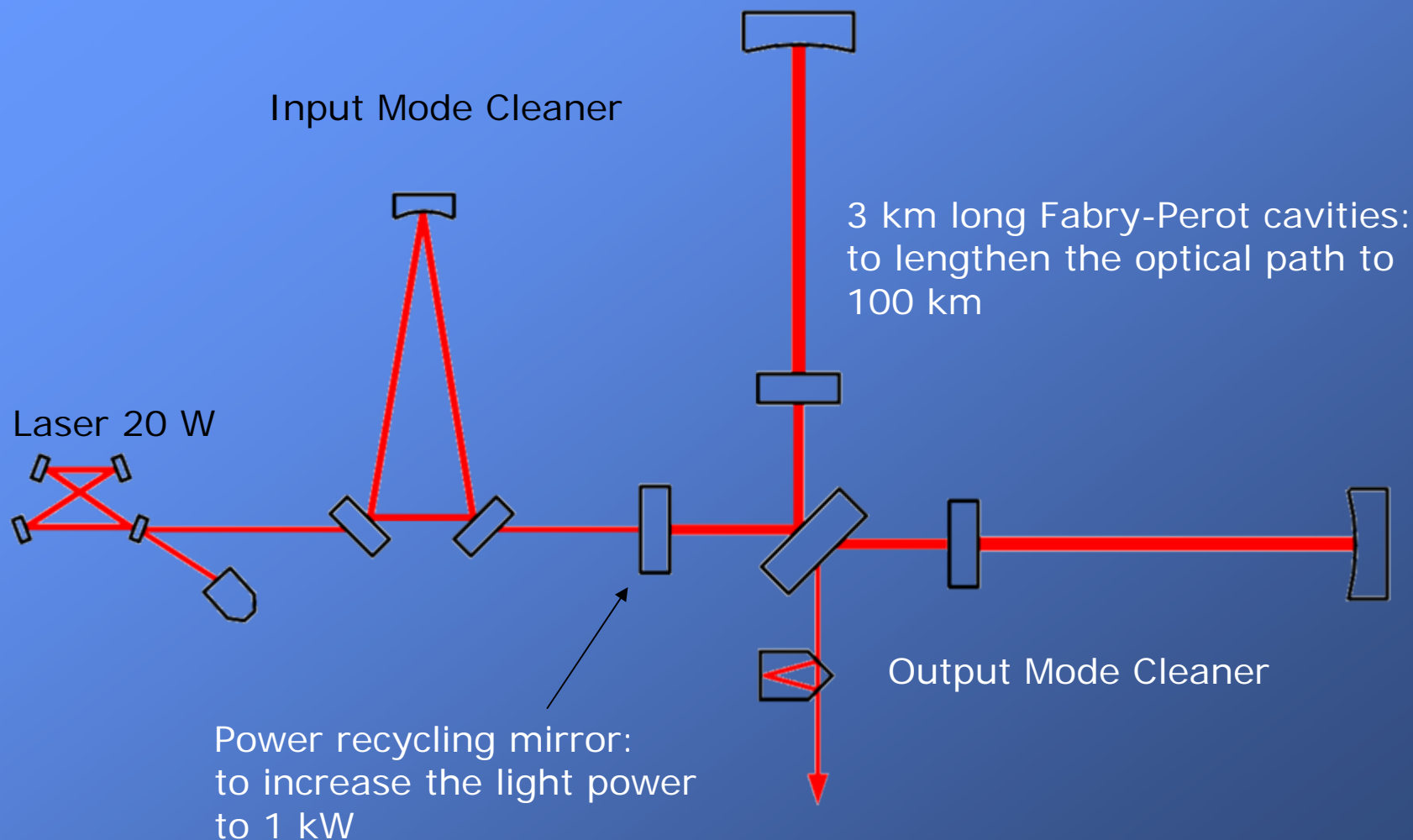
# VIRGO

- LAPP – Annecy
- *NIKHEF – Amsterdam*
- INFN – Firenze-Urbino
- INFN – LNF
- INFN – Genoa
- LMA – Lyon
- INFN – Napoli
- OCA – Nice
- LAL – Orsay
- *APC – Paris*
- *INFN – Padova-Trento*
- INFN – Perugia
- INFN – Pisa
- INFN – Roma 1
- *INFN – Roma 2*
- *POLGRAV – Warsaw*





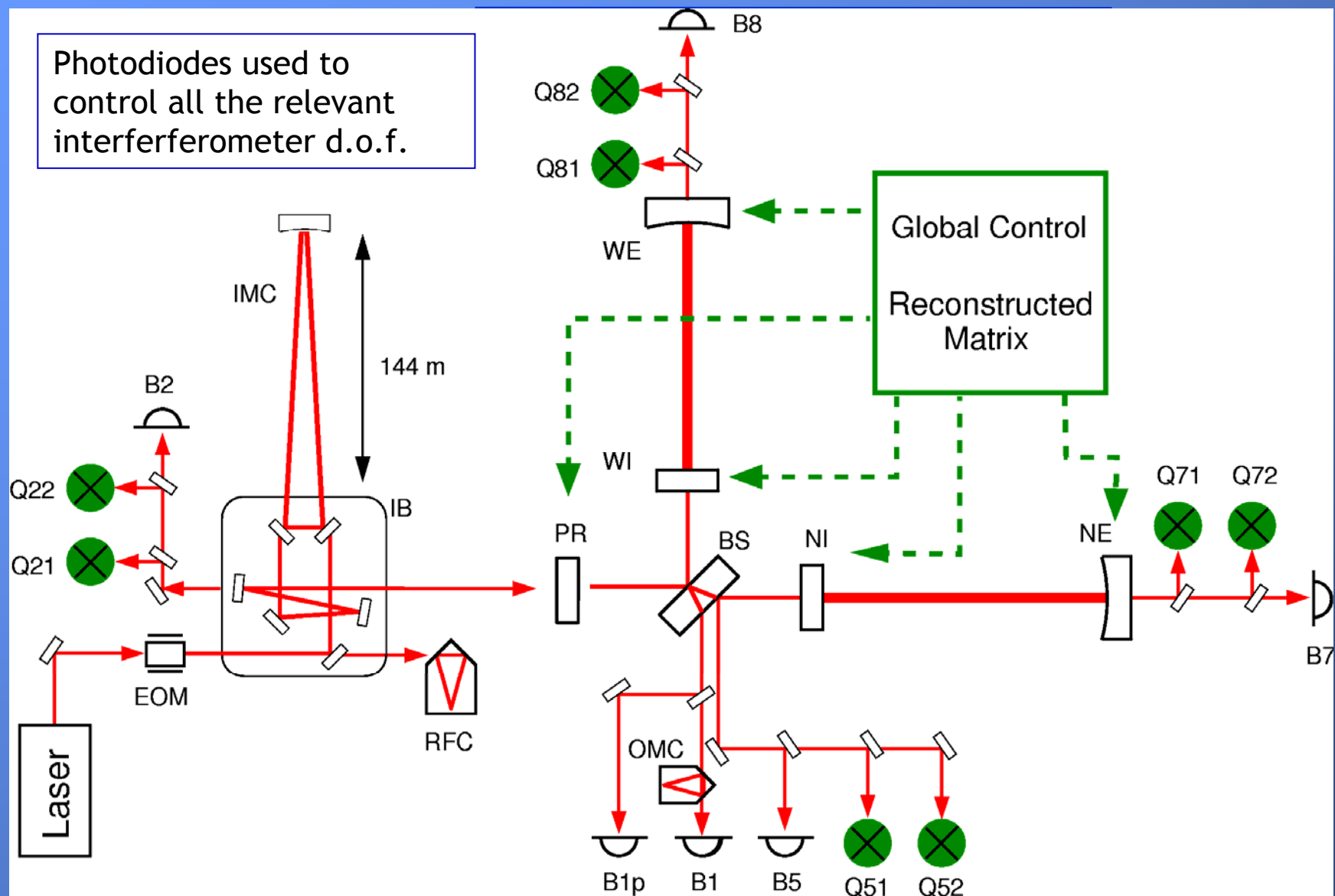
## Schema ottico di VIRGO





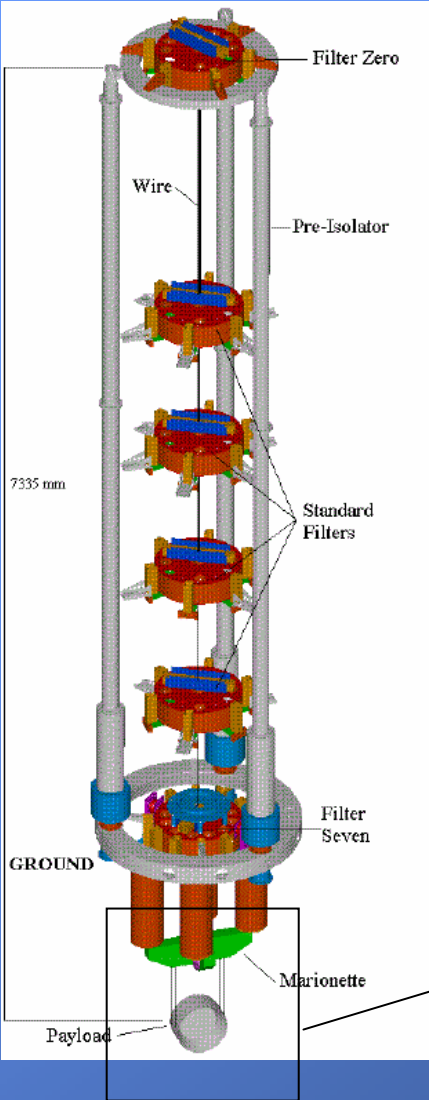


Photodiodes used to control all the relevant interferometer d.o.f.

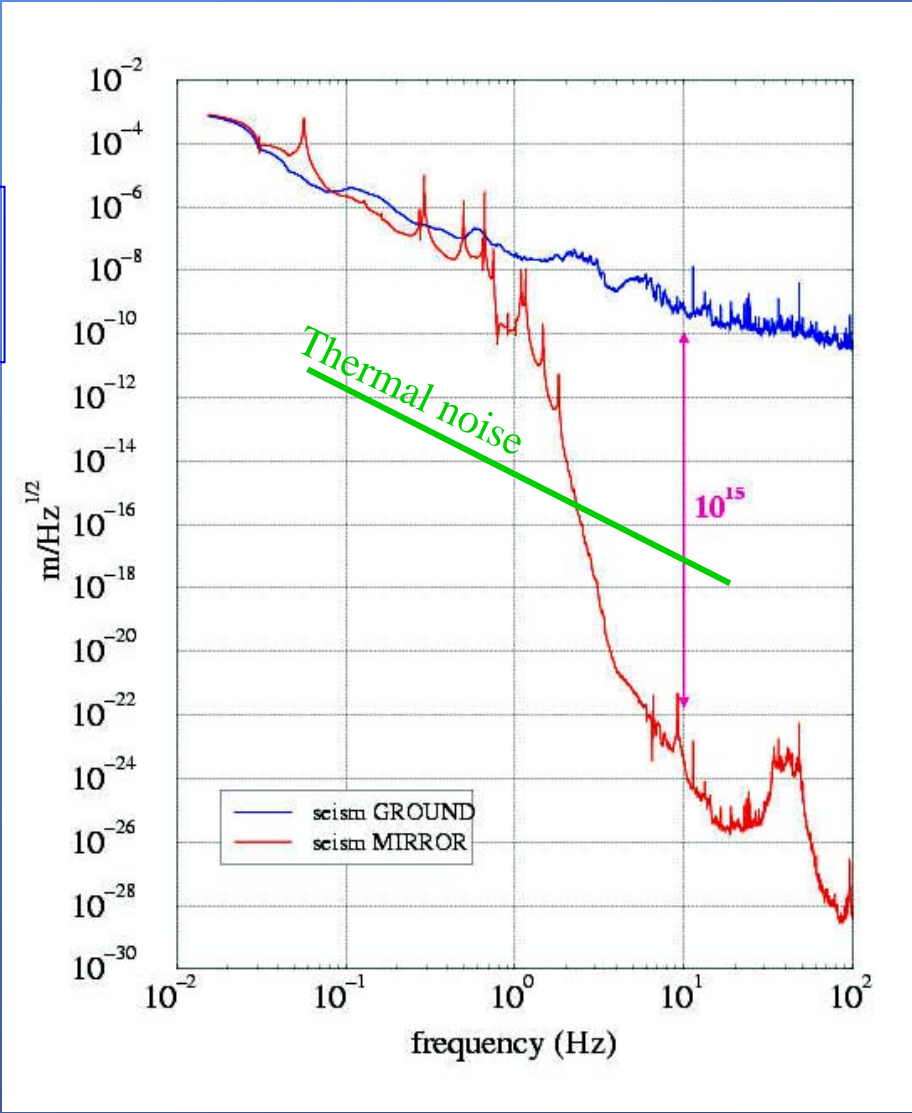
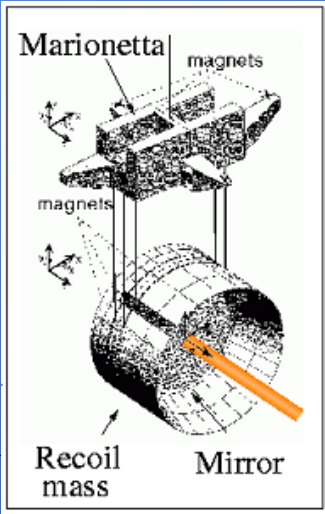




# Isolamento sismico



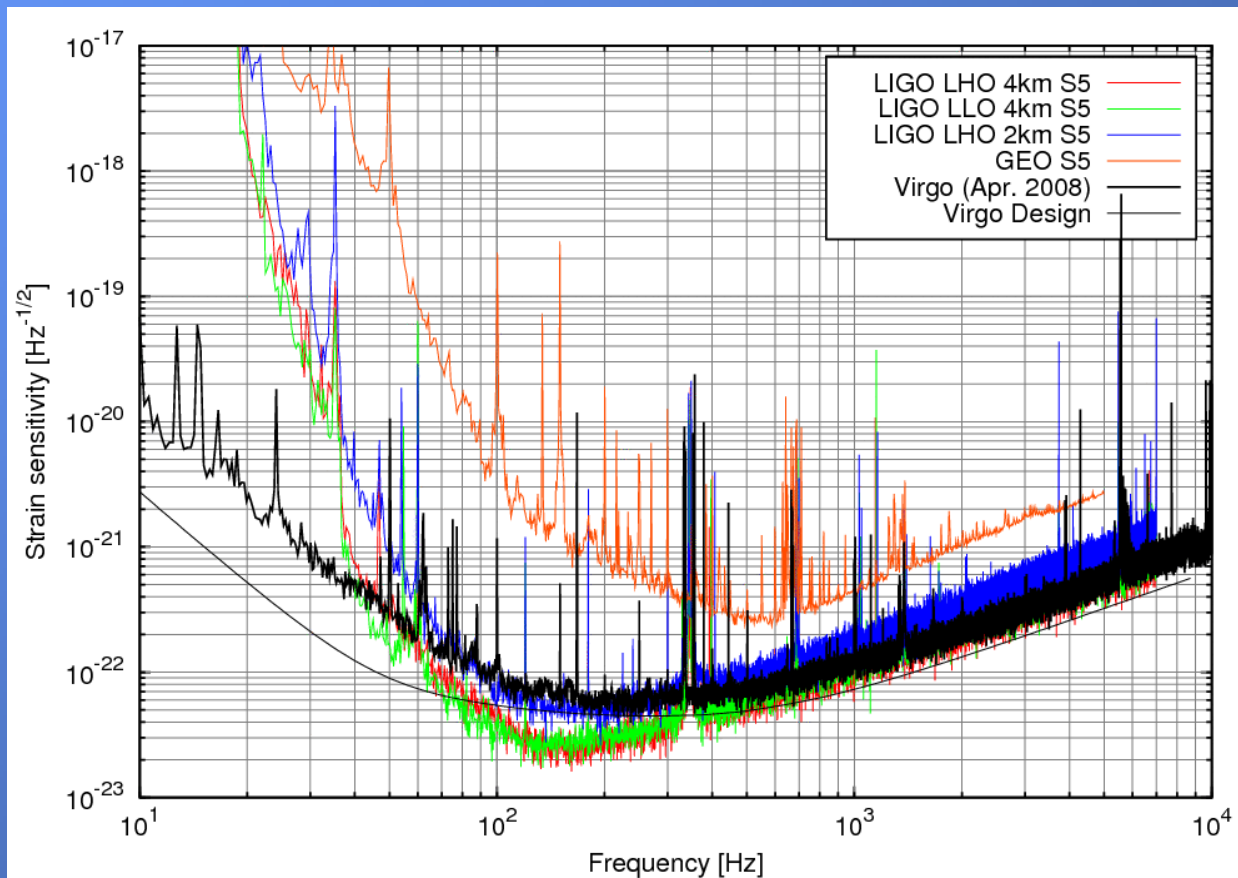
Superattenuator:  
filters off the  
seismic vibrations.





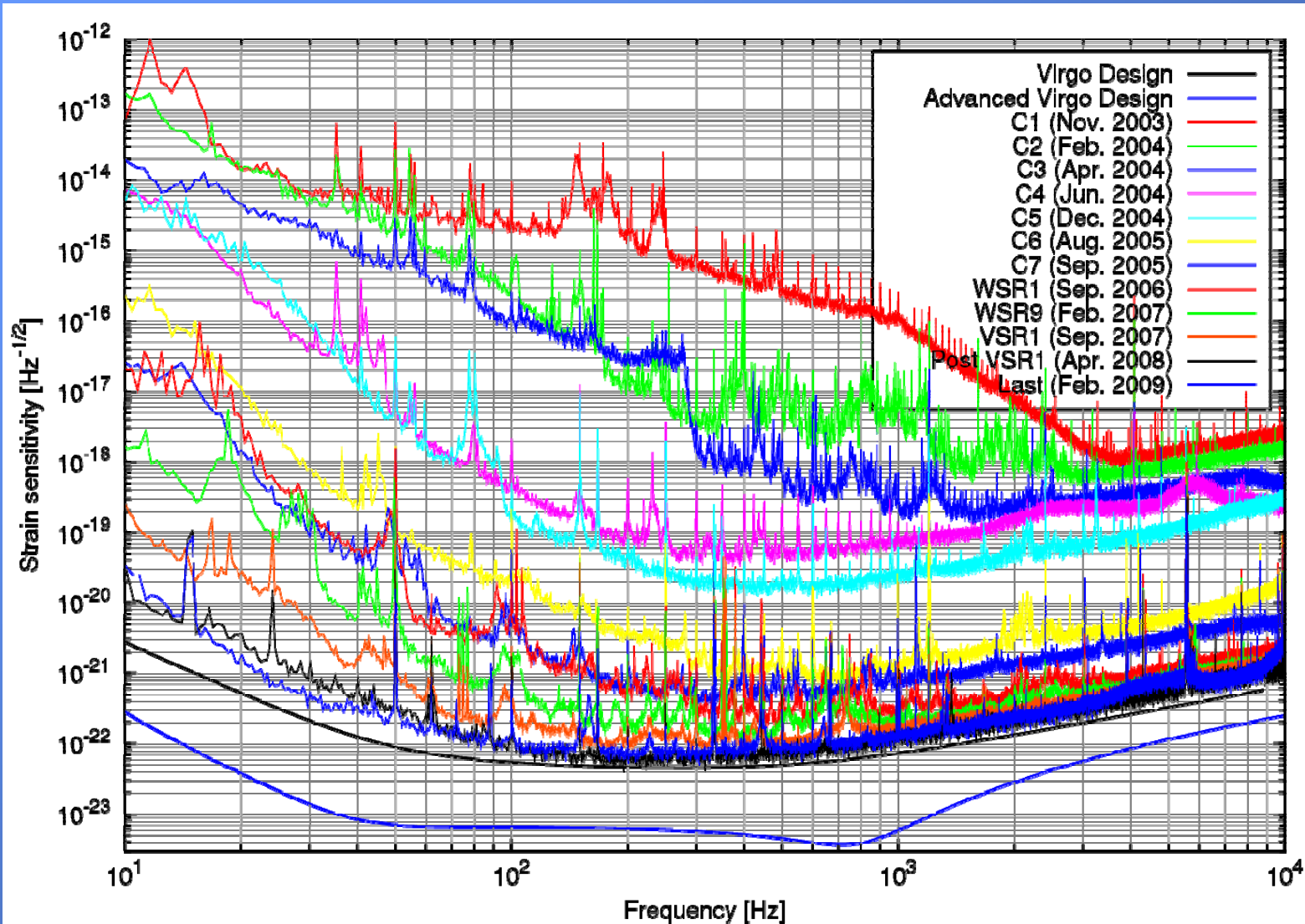
# Antenne gravitazionali oggi

- ❑ LIGO è alla sensibilità di progetto: Tecnologia dimostrata
- ❑ Virgo non è lontana. A bassa frequenza si avvicina al target ed è meglio di LIGO a frequenze <40Hz.





# Virgo: il cammino verso l'obiettivo





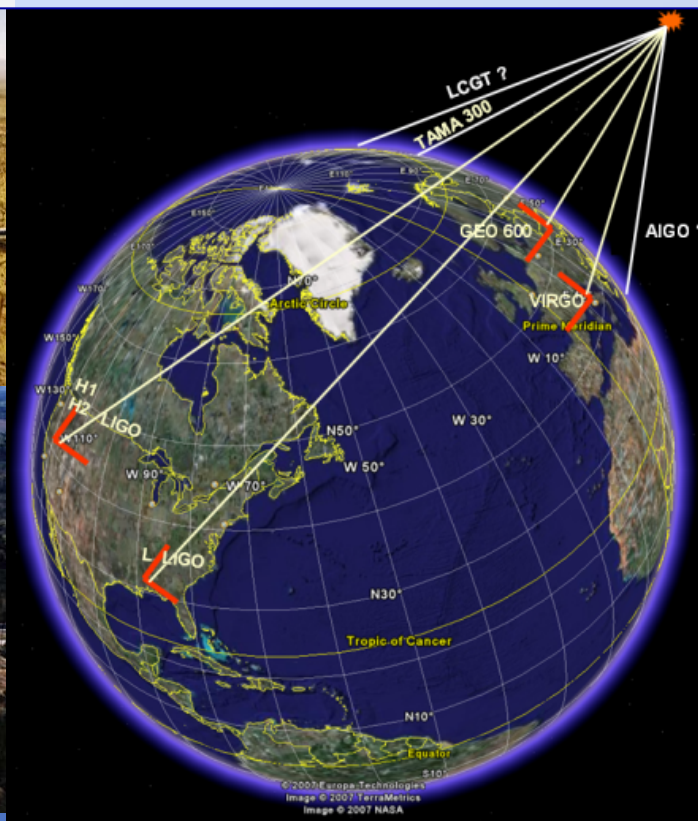
# GW NETWORK

Un network di 4 (5) rivelatori di GW

LIGO - Hanford, WA



LIGO - Livingston, LA



GEO600, Hannover, D



VIRGO, Pisa, Italy



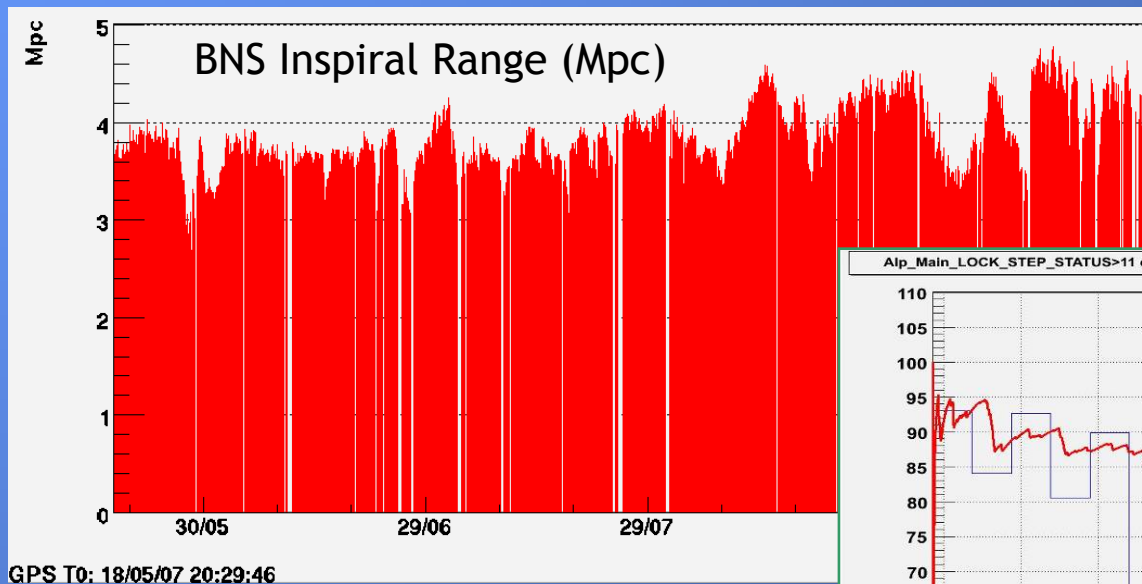
Virgo e la LIGO Scientific Collaboration (LSC) hanno firmato un MoA per lo scambio di dati, l'analisi dati congiunta e la policy di pubblicazioni. Prime pubblicazioni congiunte - 2008-09





# FIRST SCIENCE RUN (VSR1)

- ❑ From May 18 to Oct 1 2007
- ❑ Joined LIGO S5
- ❑ The detector demonstrated excellent stability
- ❑ Sensitivity improved during the run, exploiting short interruptions

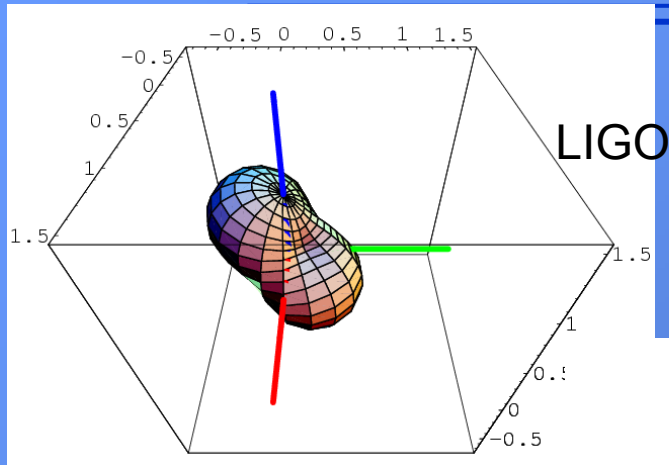


Duty cycle: 84%  
Longest lock: 94 hours  
Avg. Lock Duration: 11.2 hrs  
Lock Recovering Time: ~30 min



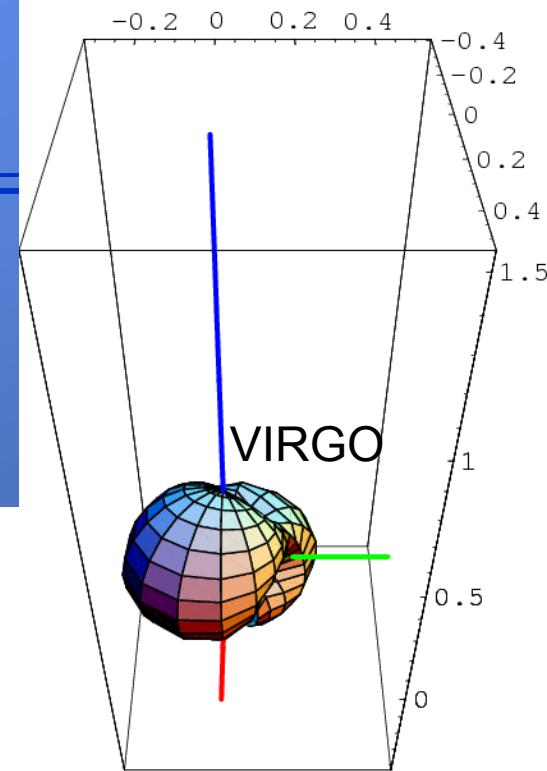
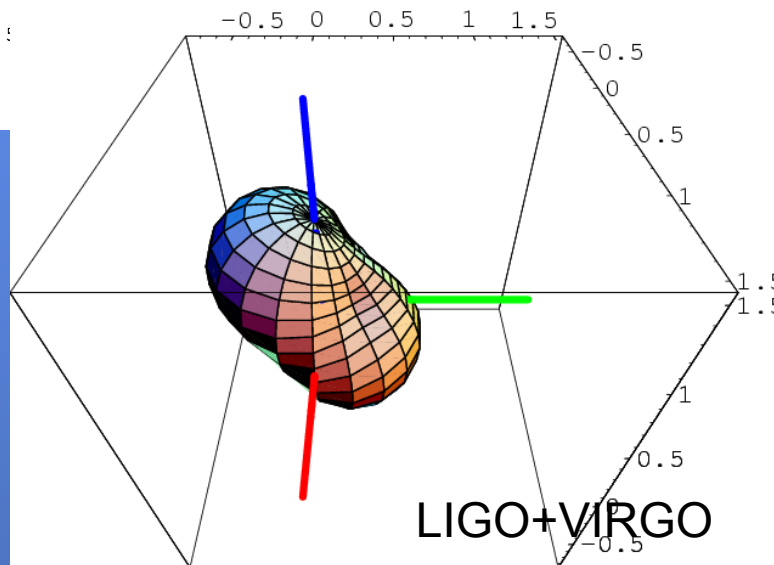


# I diagrammi d'antenna e la Rete



il caso del VSR1:  
reiezione degli eventi  
spuri:  
LIGO H1+L1

LIGO+VIRGO

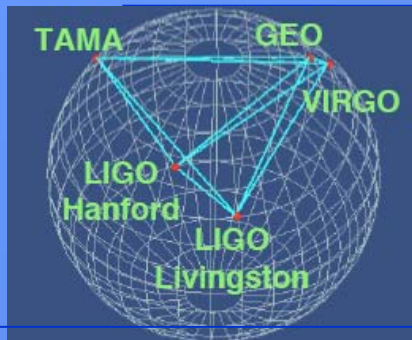


***In linea di principio, combinando in modo coerente i dati della rete  
LIGO+VIRGO, la distanza d'esplorazione per eventi del tipo BNS  
cresce sino a 300Mpc***

- ❑ Astrophysically Triggered Searches for Gravitational Waves: Status and Prospects.  
By LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration ([B. Abbott \*et al.\*](#)). Feb 2008. 14pp.  
Published in Class.Quant.Grav.25:114051,2008.  
e-Print: arXiv:0802.4320 [gr-qc]
- ❑ Interferometric detectors of gravitational waves on Earth: The next generations.  
By LIGO Scientific and VIRGO Collaborations ([Giovanni Losurdo \*for the collaboration\*](#)). 2008. 4pp.  
Published in J.Phys.Conf.Ser.110:062016,2008.
- ❑ A Comparison of methods for gravitational wave burst searches from LIGO and Virgo.  
By LIGO-Virgo working group ([F. Beauville \*et al.\*](#)). Jan 2007. 26pp.  
Published in Class.Quant.Grav.25:045002,2008.  
e-Print: gr-qc/0701026
- ❑ Detailed comparison of LIGO and Virgo inspiral pipelines in preparation for a joint search.  
By LIGO / Virgo working group ([F. Beauville \*et al.\*](#)). Jan 2007. 30pp.  
Published in Class.Quant.Grav.25:045001,2008.  
e-Print: gr-qc/0701027



# SCIENCE WITH A NETWORK

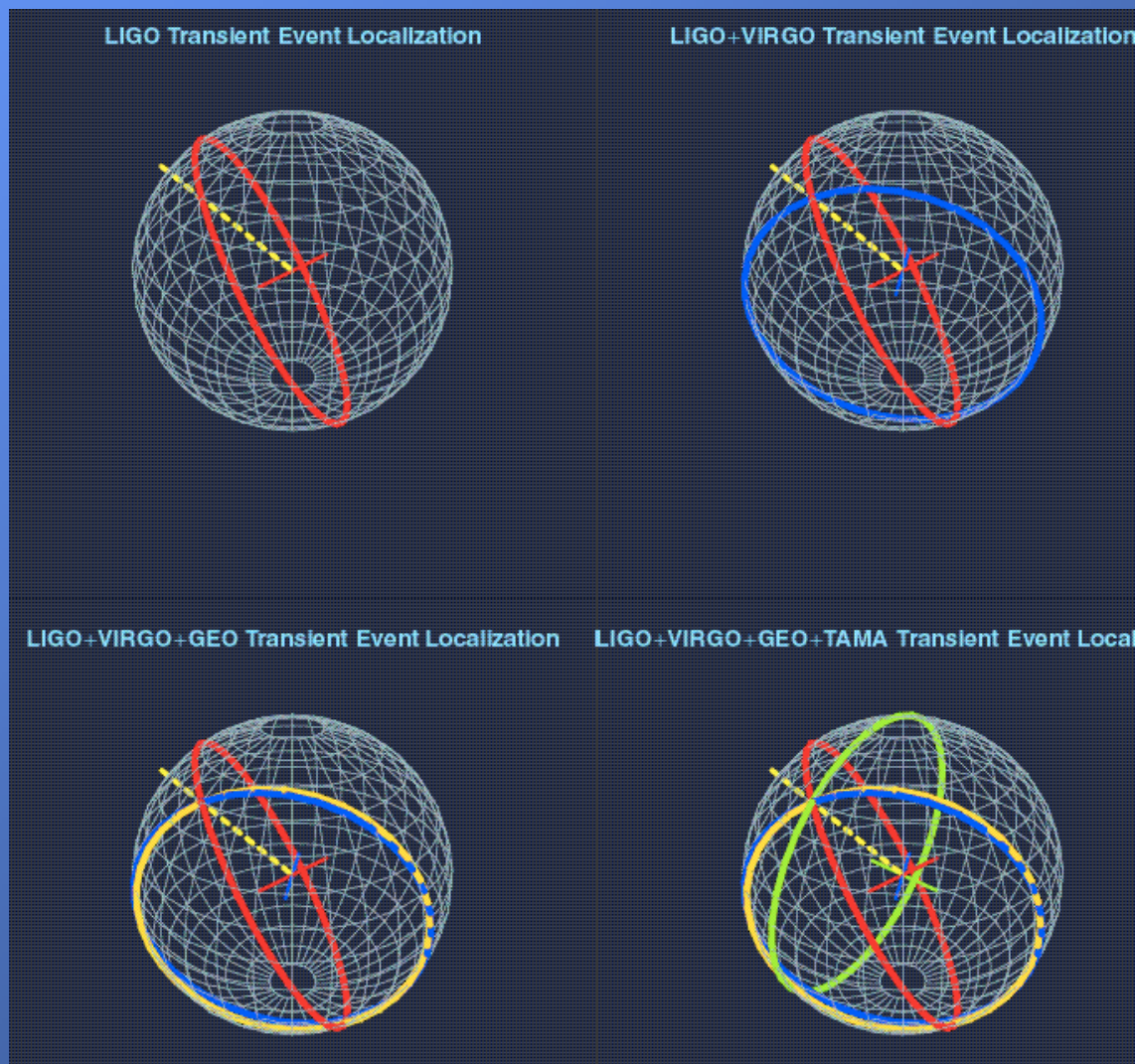


**Reiezione di falsi allarmi:** richiede coincidenza

**Triangolazione:** permette di localizzare la sorgente

La rete consente di deconvolvere la risposta dei rivelatori e la forma dei segnali → **misurare i parametri del segnale**

**Maggior tempo di osservazione,** migliore **copertura del cielo**





# VIRGO Evolution: VIRGO+

- Importanti progressi tecnologici negli scorsi anni. E' possibile un upgrade di Virgo oggi, aumentando la sensibilità di 2-3 volte (e la rate di un ordine di grandezza)

- Il package Virgo+:

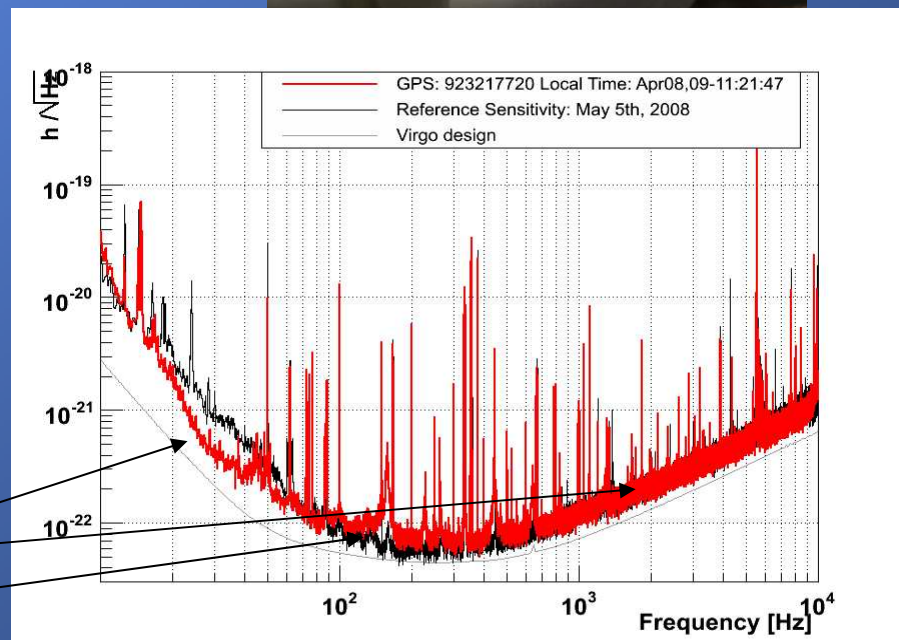
- Maggiore potenza del laser (50 W invece di 20)
- Compensazione del lensing termico degli specchi
- Upgrade dell'elettronica
- Cambio dello specchio dell'input mode cleaner

- Azioni più efficienti: **monolithic suspensions**

- Accensione della TCS
- Compensazione delle aberrazioni a 8 W (in fase di test)

- Azioni previste

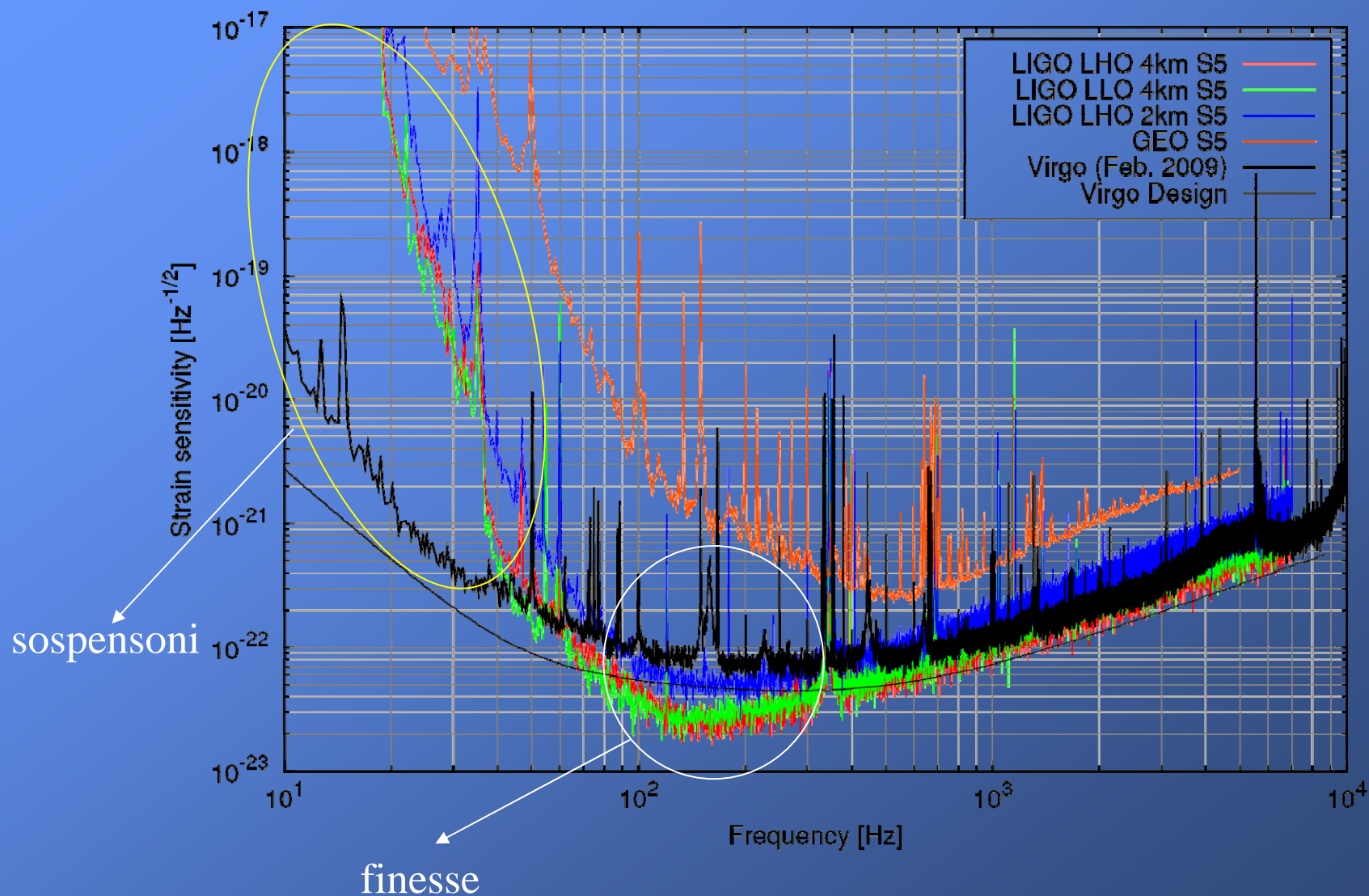
- Alta potenza ~20 W
- Noise hunting





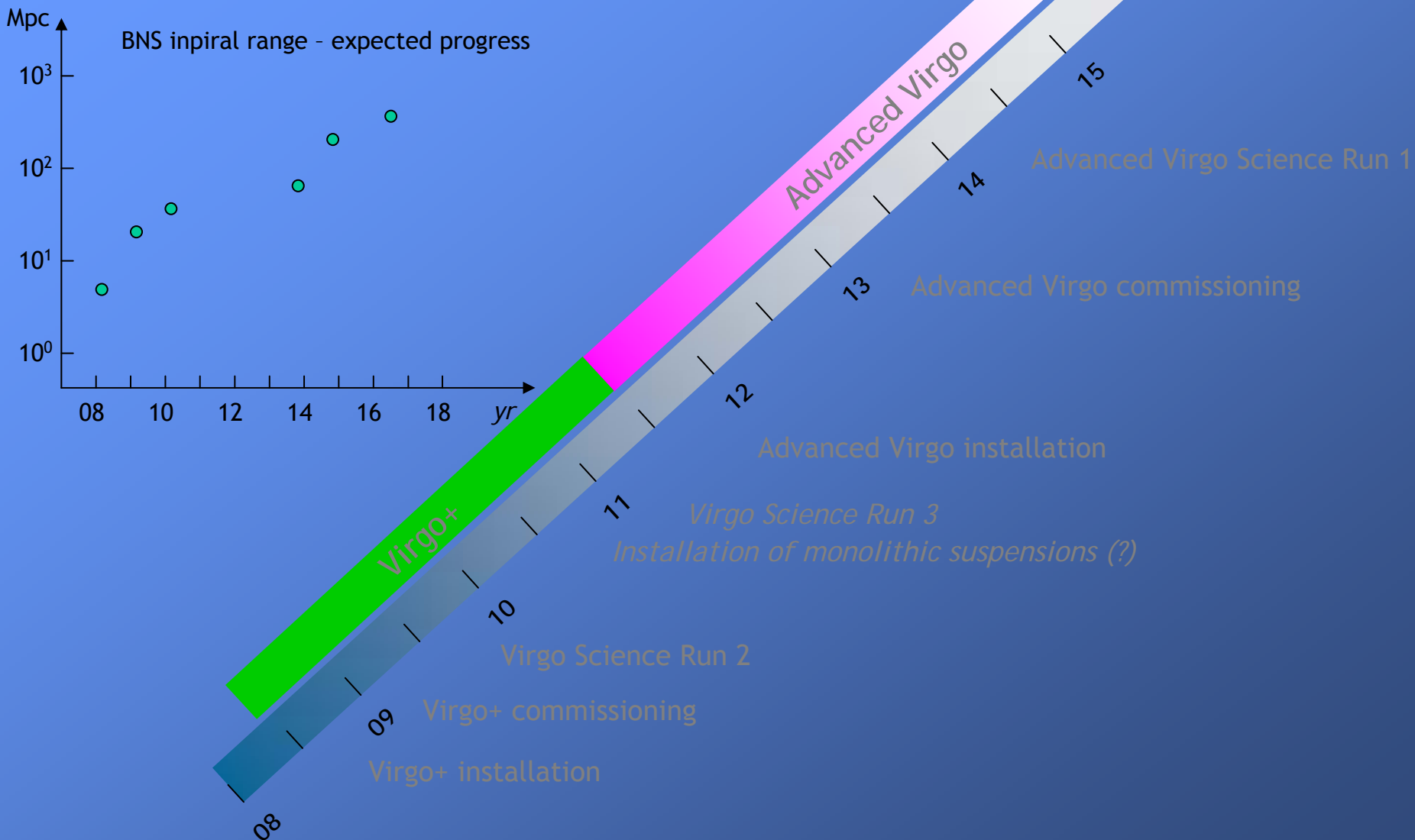


# Sensibilità VIRGO+ vs LIGO



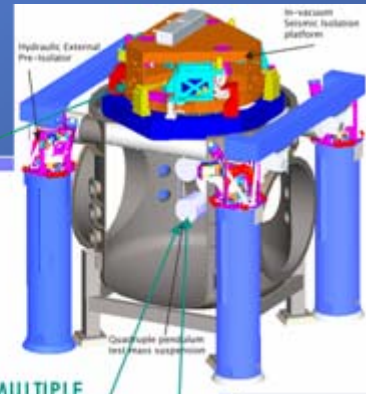
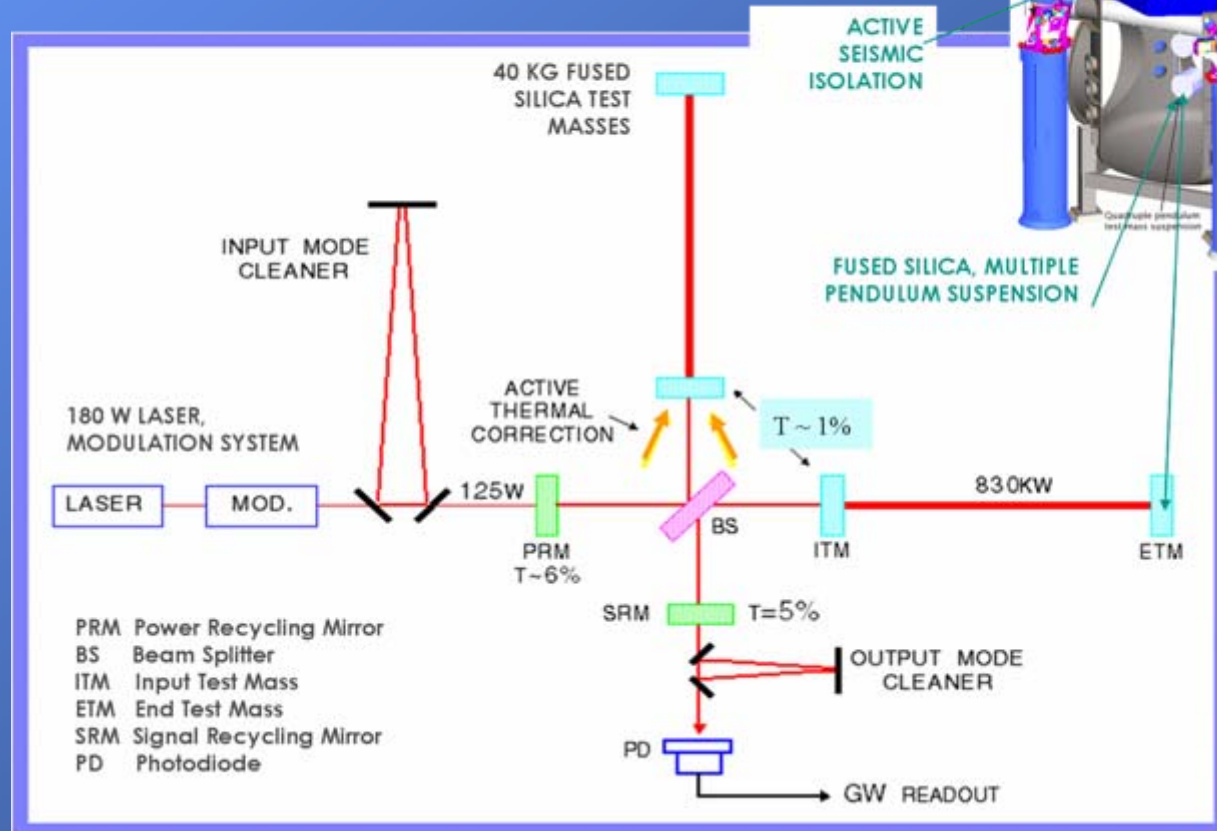


# PLANS



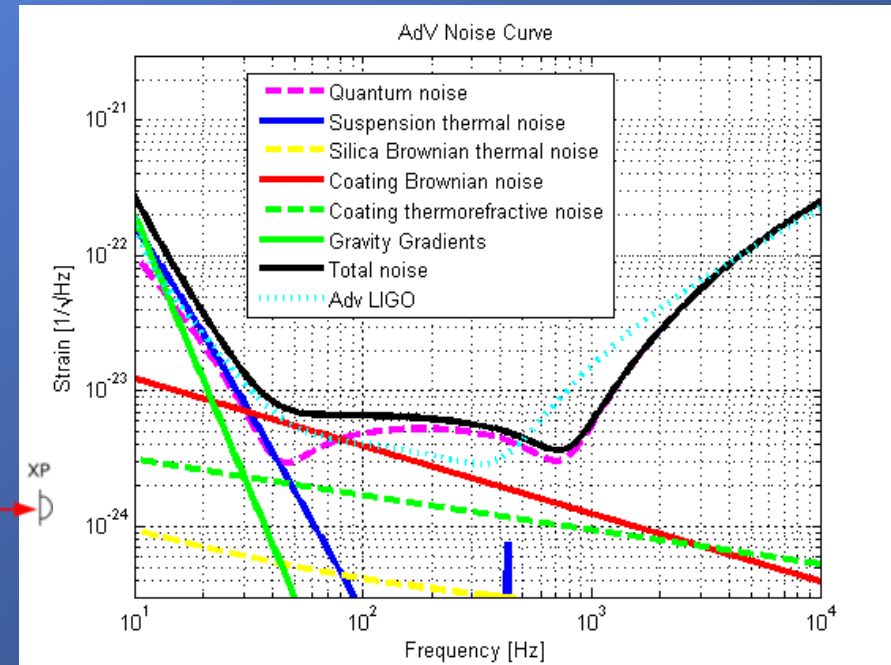
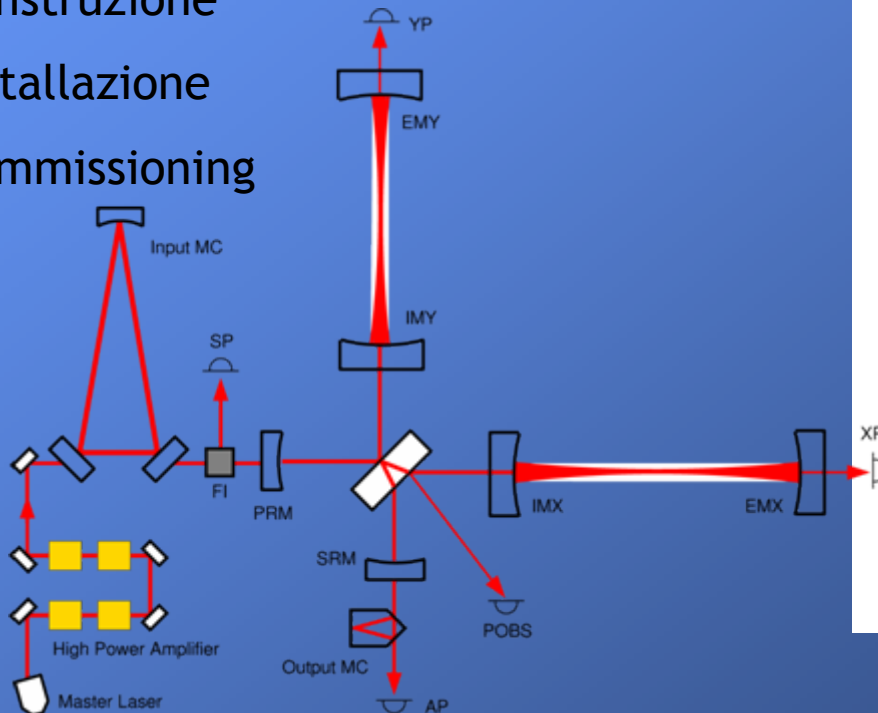
# ADVANCED LIGO

- FUNDED BY NSF! Official project start date: April 1st, 2008
- Installation to start in **2011**
- All three detectors up in **2014**



# AdV BASELINE

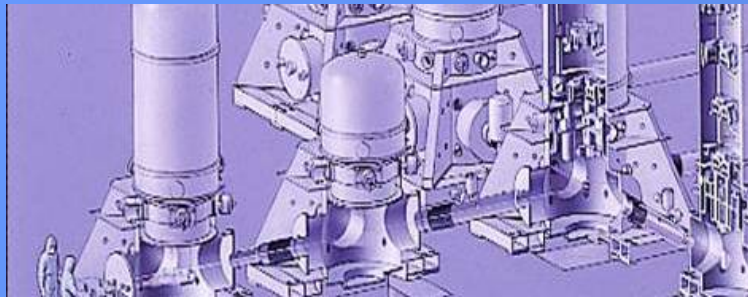
- ❑ *AdV preliminary design released*
- ❑ CSN2 ha dato l'approvazione scientifica
- ❑ Ora sotto project review da un comitato di revisione presieduto da B.Barish
- ❑ *sottomesso alla CCS*
- ❑ Construzione
- ❑ Installazione
- ❑ Commissioning







# Da VIRGO+ ad Ad VIRGO: cosa è necessario fare



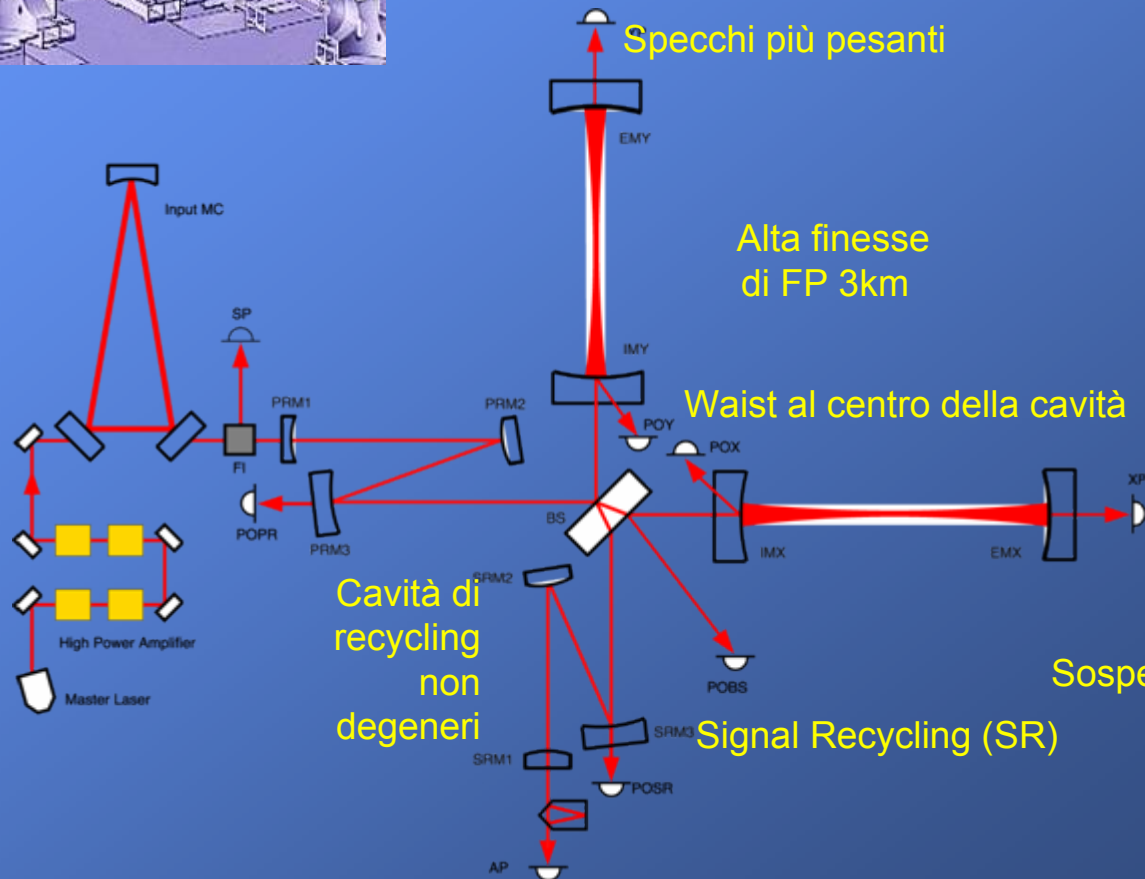
Link centrali più grandi

Specchi più pesanti

Alta finesse  
di FP 3km

Waist al centro della cavità

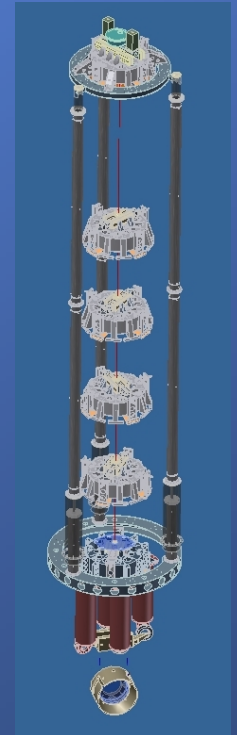
Laser 200 W



Cavità di  
recycling  
non  
degeneri

Signal Recycling (SR)

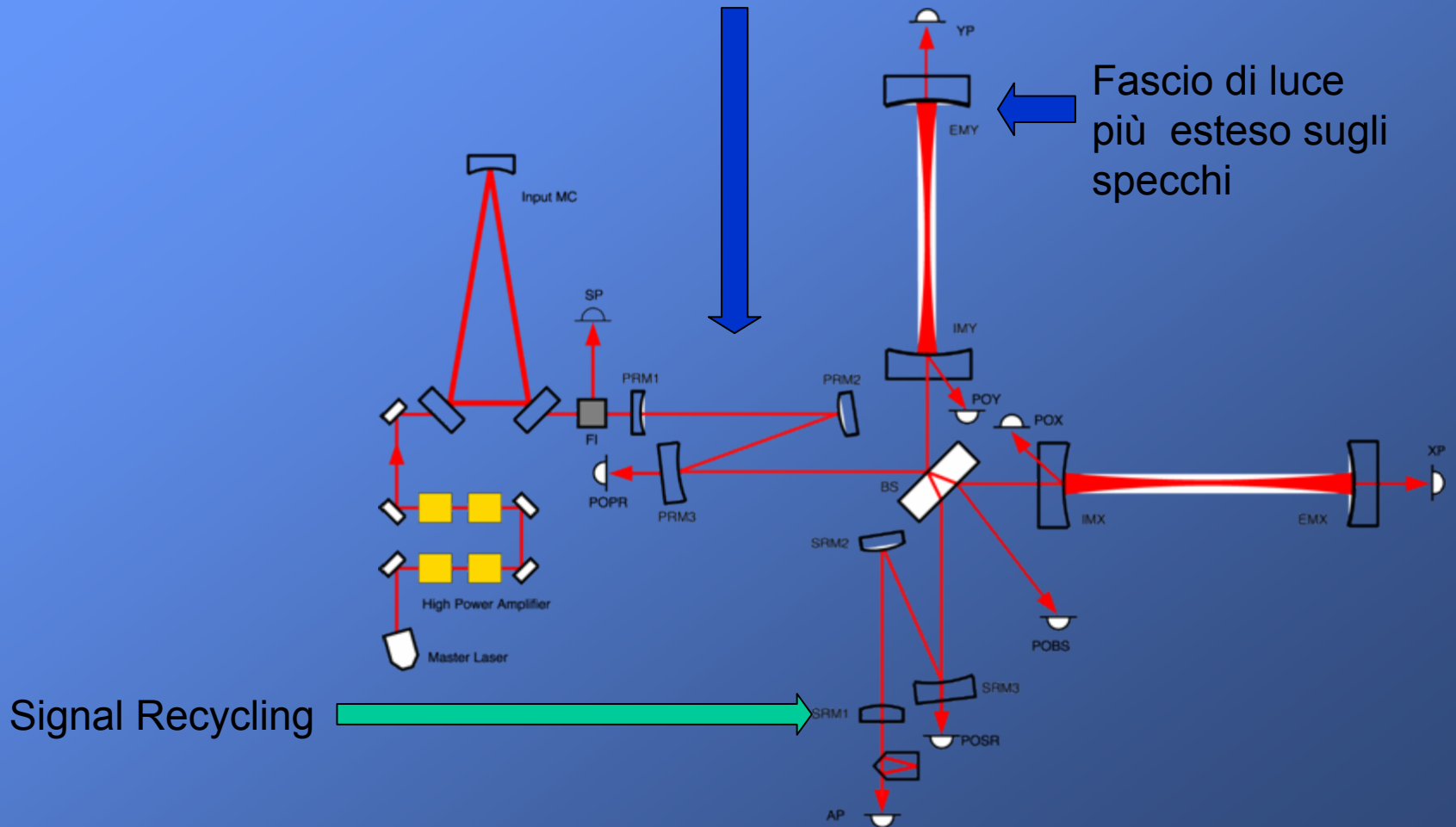
Sospensioni Monolitiche





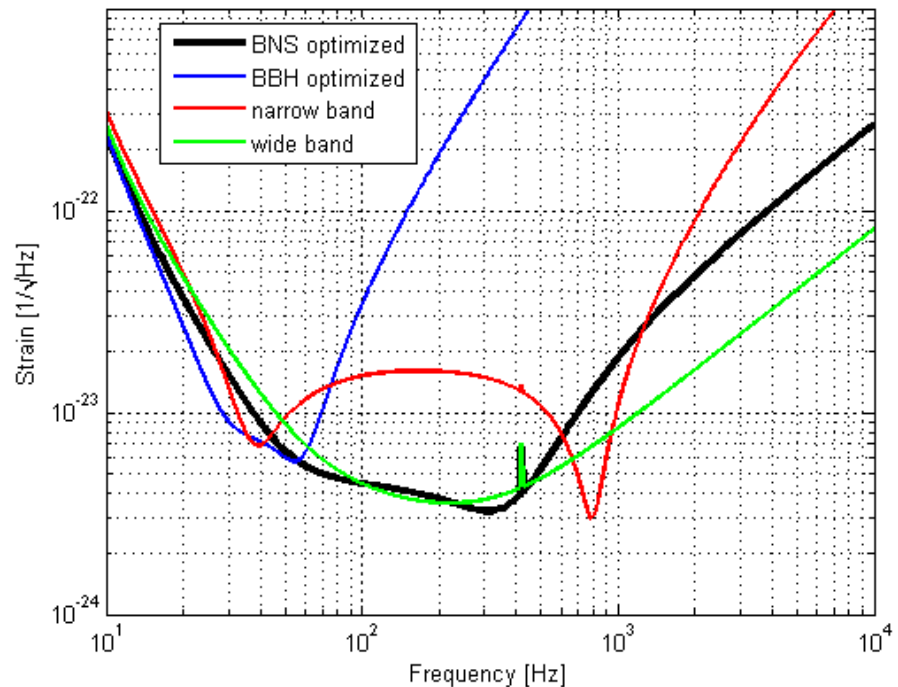
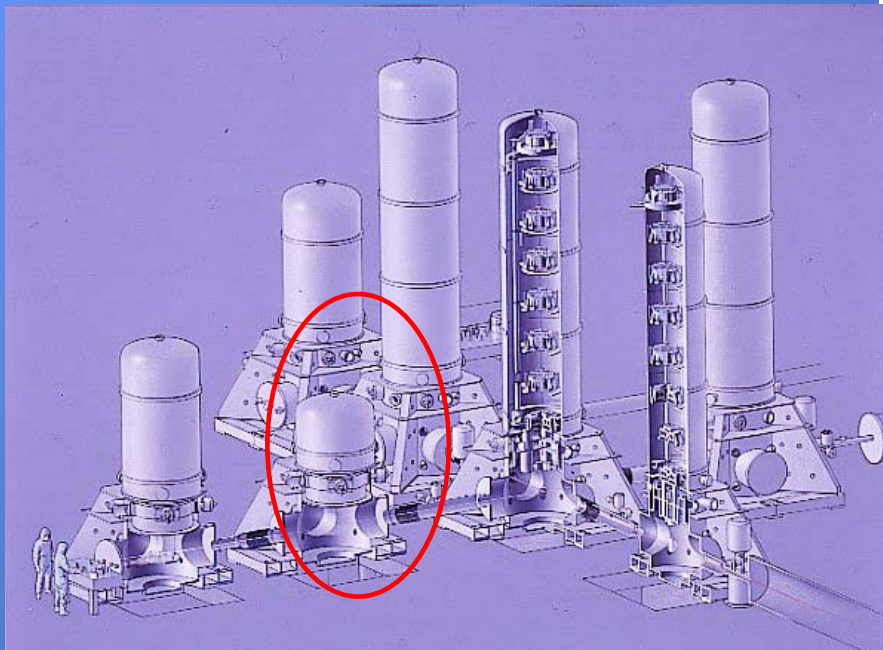
# CONFIGURAZIONE OTTICA

Cavità non degeneri di ricircolo di potenza



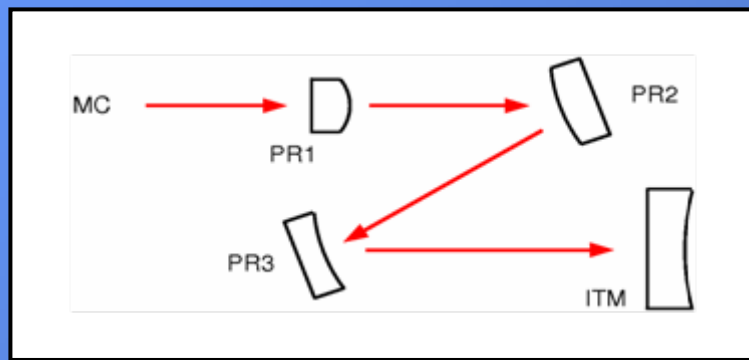
# Il ricircolo del segnale

- Un nuovo sistema di sospensione completo da implementare
- Commissioning più difficoltoso; un'altra cavità da tenere in Lock



# Cavità ottiche di recycling di potenza non degeneri

In questo modo si evita che altri modi ottici vicini possano risuonare nelle cavità

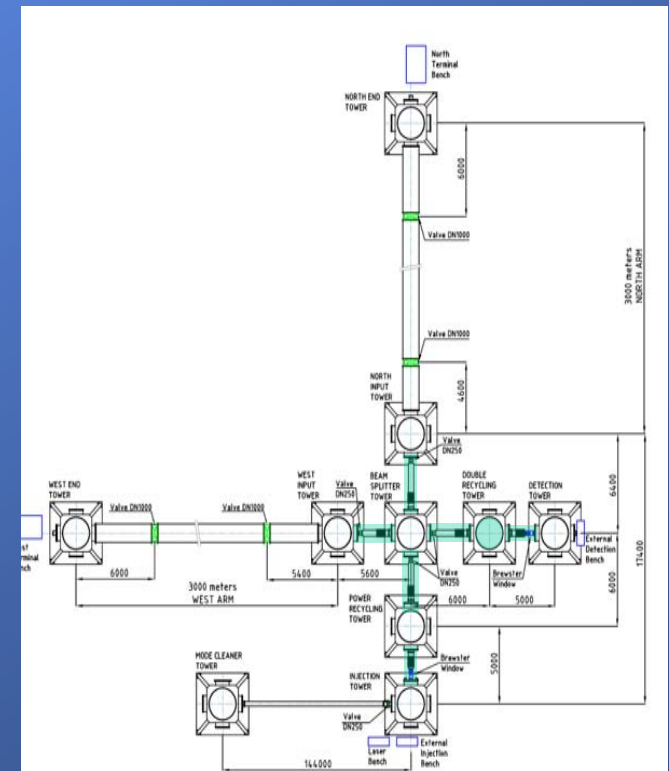


- **Vantaggi:**

- Incremento della dinamica dell'Interferometro
- Minore sensibilità al disallineamento, agli effetti termici
- Maggiore ridondanza nei segnali di controllo
- Commissioning più semplice

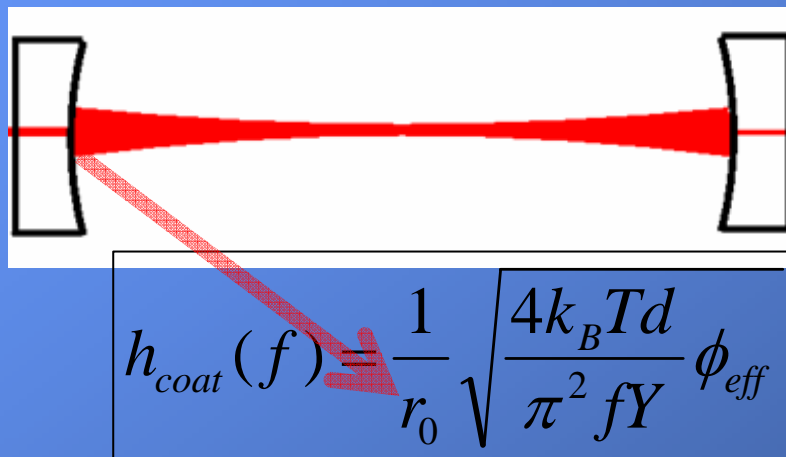
- **Implicazioni:**

- Costruire connessioni a vuoto tra le torri più grandi
- Incrementare la complessità dei sistemi d'attenuazione sismica per i banchi ottici di iniezione e rivelazione





# Sezione dei fasci ottici sugli specchi



## Aumento delle dimensioni del fascio sugli specchi

### Vantaggio:

- Riduzione del rumore termico degli specchi e degli effetti termici sullo specchio d'ingresso

### Implicazioni:

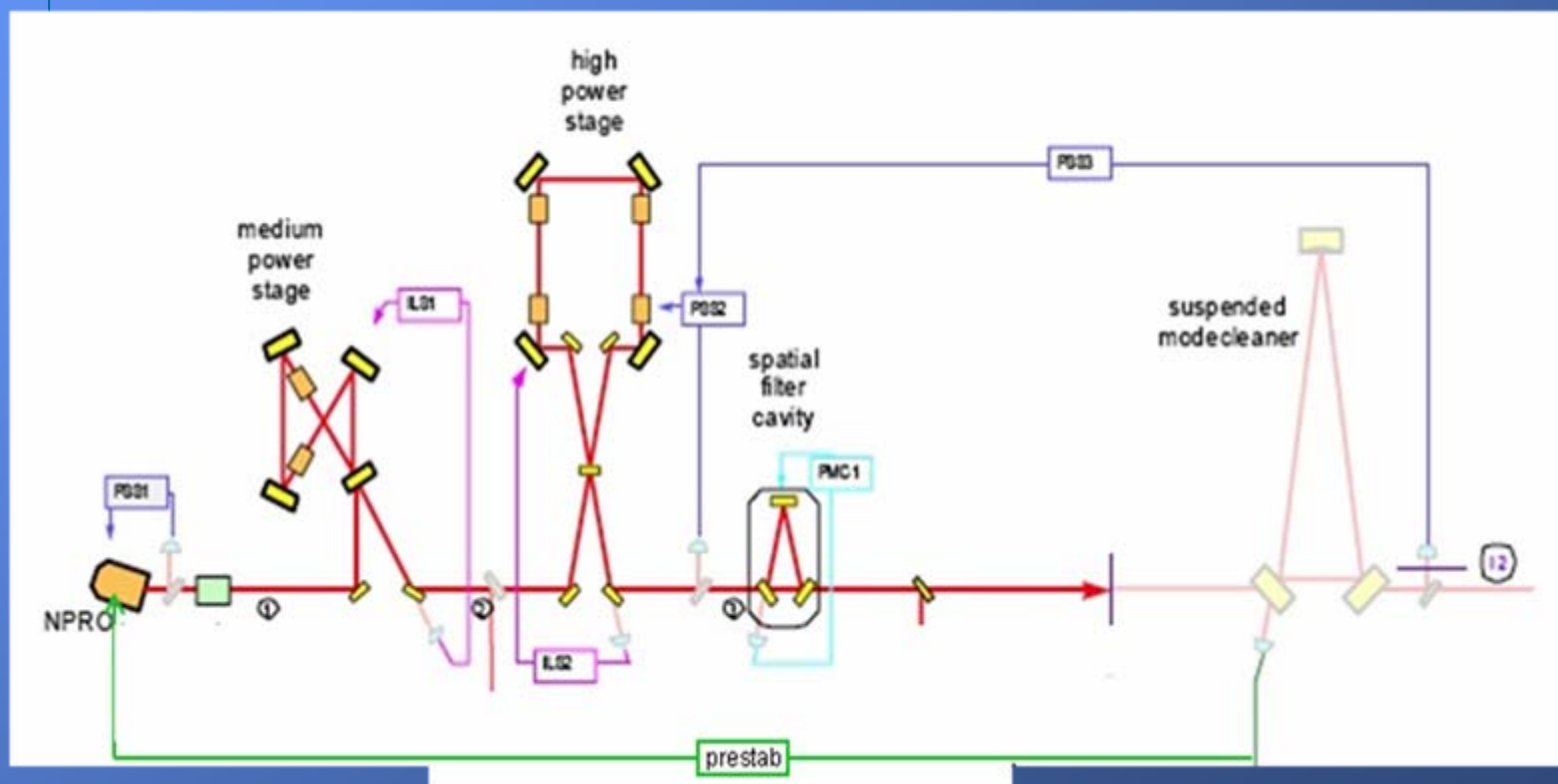
- Beam splitter più grande
- Più grandi connessioni a vuoto nella zona centrale





# LASER Pre-Stabilizzato

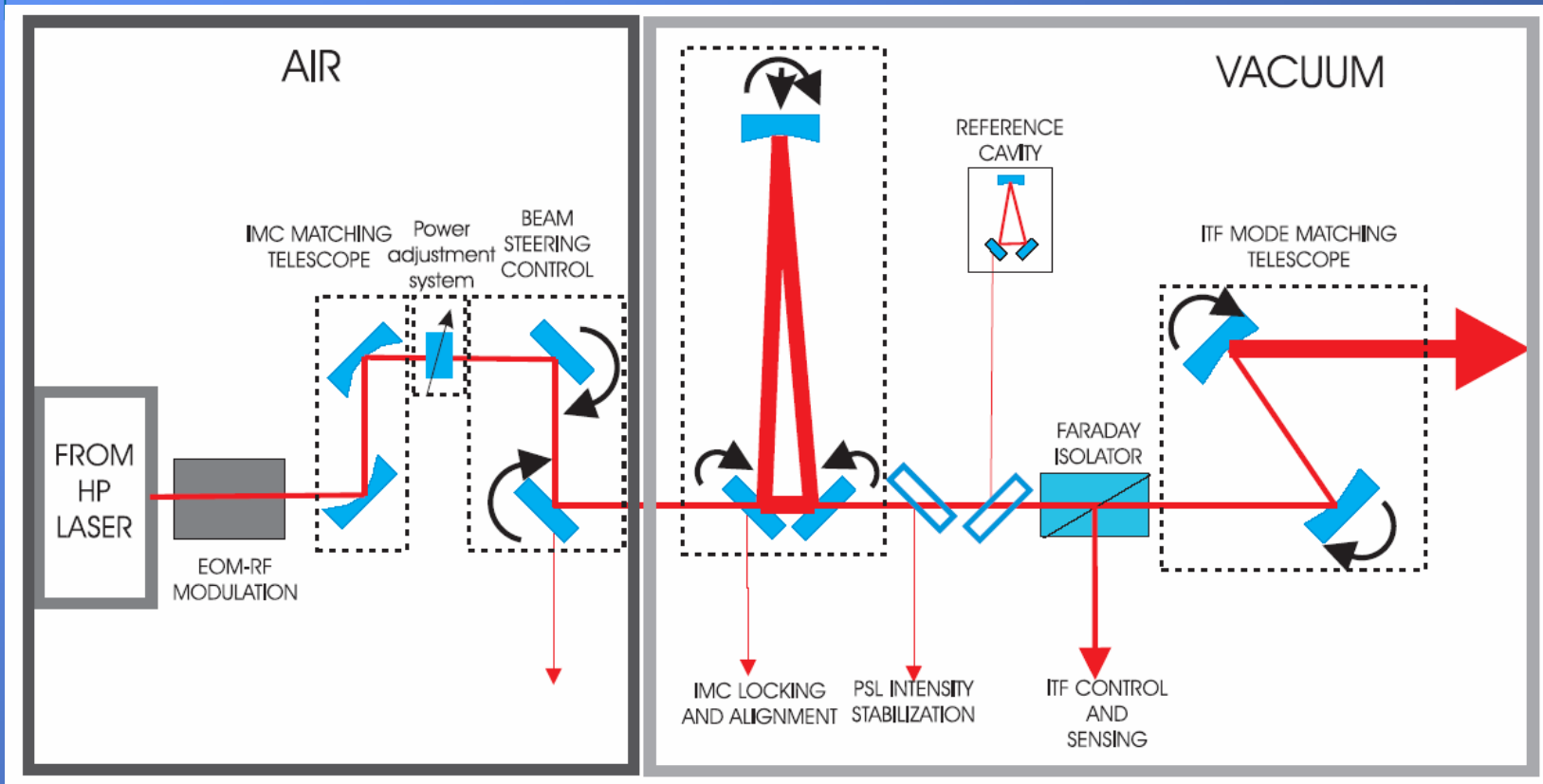
- ❑ Laser di Ad VIRGO ~ 200 W
- ❑ Sistema d'iniezione ad alta potenza della Laser Zentrum Hannover (LZH) analogo a quello di Adv LIGO
- ❑ Pre-stabilizzazione in ampiezza e in frequenza





# SISTEMA D'INIEZIONE

- Nuova e più grande cella di Faraday con compensazione termica (cristallo DKDP)
- Il “matching telescope” è spostato rispetto all’attuale configurazione di VIRGO+. Lo specchio PRM e lo specchio di rinvio devono essere sospesi sul banco di iniezione





# GLI SPECCHI PRINCIPALI: le masse di test

## Richieste:

- Massa più elevata per compensare l'incremento della pressione di radiazione associata all'aumento di potenza
- Coating correttivo per migliorare la qualità dell'ottica

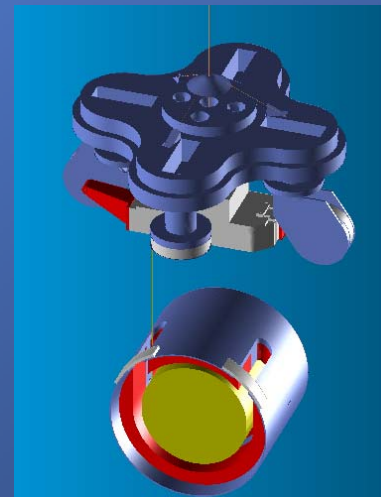
## Soluzione di riferimento:

Specchi FP: 35 cm Ø, 20 cm spessore, 42 Kg  
Beam Splitter : 55 cm Ø, 6.5 cm spessore, 34 Kg



## Implicazioni:

- Modifica significativa dei *payload* monolitici e delle fibre di sospensione





# NUOVA COMPENSAZIONE TERMICA

## Richiesta:

Compensare le distorsioni del fronte d'onda e le deformazioni superficiali degli specchi

## Soluzione di riferimento:

- Anello riscaldante attorno alle masse di test
- Laser a CO<sub>2</sub> laser per correggere la distorsione del fronte d'onda sullo specchio del recycling di potenza
- Elemento ottico extra (*compensation plate*) di fronte alle masse di test d'ingresso e poste lungo il cammino ottico principale
- Implicazioni:

## Implicazione:

- *Compensation plate* sospeso al Super Attenuatore

## R&D proposto:

Raffreddamento radiativo degli specchi





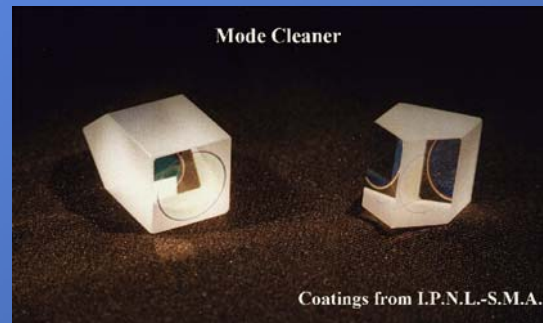
# SISTEMA DI RIVELAZIONE - DC readout

## **Richiesta:**

- Ridurre lo shot noise ( ~20%) ed il contributo di altri rumori “tecnici”

## **Implicazione:**

- Nuovo output mode cleaner ad alta finesse



## **Banco Ottico sospeso di rivelazione**

- ❑ Sistema di specchi di Ricircolo del Segnale sospesi sul banco
- ❑ Fotodiodi sotto vuoto



# SENSING AND CONTROL

## **Soluzione di riferimento :**

- Uso di un laser ausiliario per il lock delle cavità ad alta finesse
- Generalizzazione del metodo a finesse variabile come strategia di lock

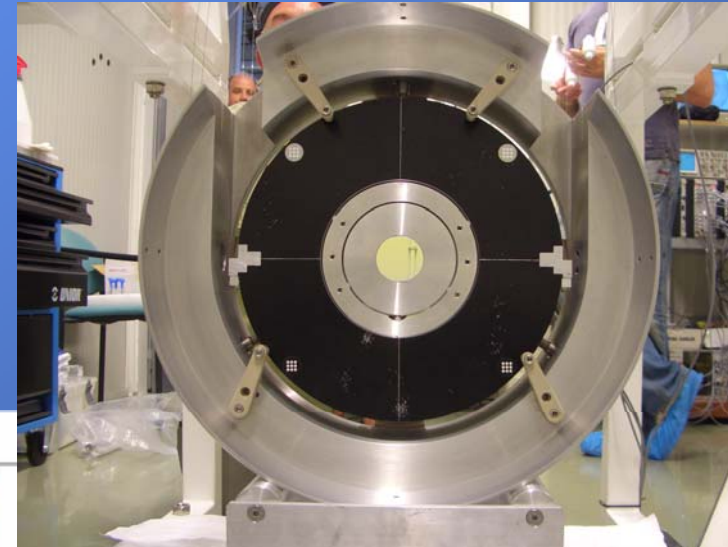
## **Implicazioni:**

- La strategia di controllo definita implica lo *spostamento di tutte le torri nell'edificio principale.*

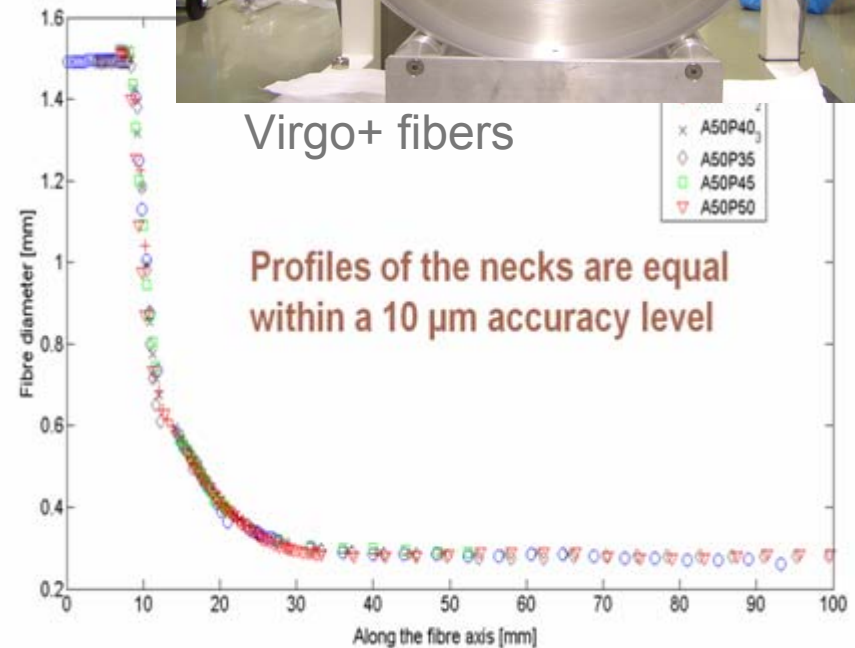


# MONOLITHIC SUSPENSIONS

- Engineering of Virgo+ fibers well advanced:
  - standardized production and reproducible geometry
  - welding and clamping optimized
  - flexure points controlled
- AdV monolithic suspensions
  - fiber geometry optimization: use of tapered fibers?



Virgo+ fibers



# II VUOTO

La pressione residua in VIRGO è  $10^{-7}$  mbar ( $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2 + \text{HC}$ ) senza bake-out,

La pressione residua in Advanced VIRGO deve essere  $10^{-9}$  mbar (bake-out necessario)

Il rumore dovuto alla pressione residua può limitare la sensibilità di Ad VIRGO

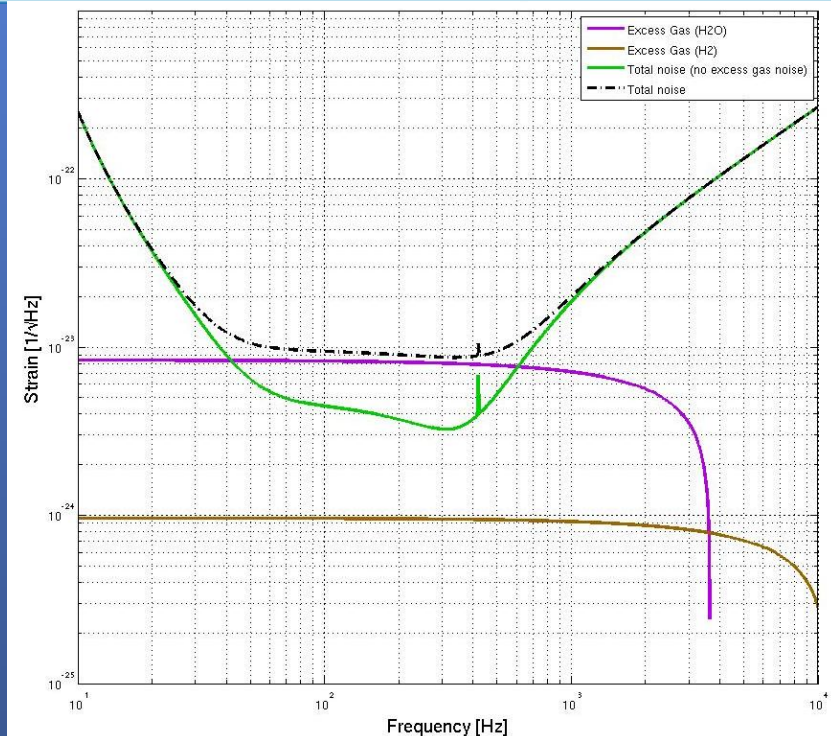
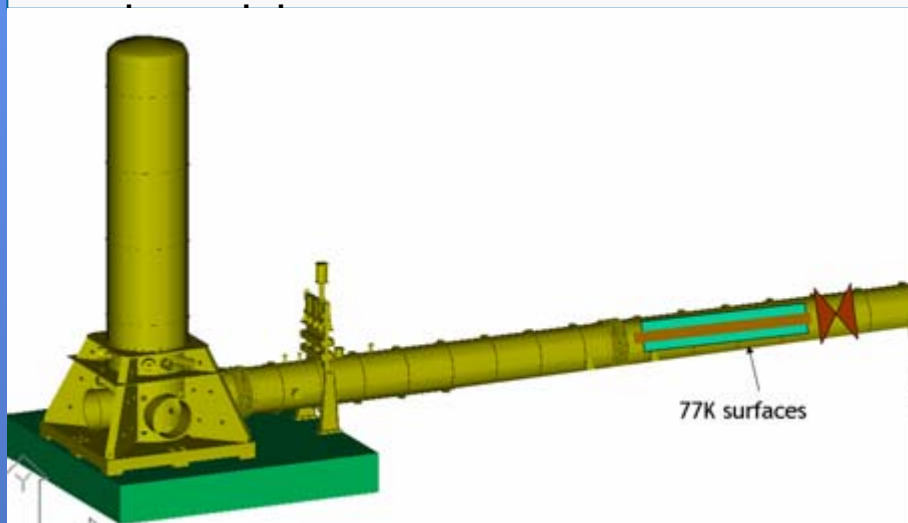
## Conseguenza :

*Ogni volta che si cicla da pressione atmosferica da vuoto il bake-out è necessario*

*Il bake-out di 6 km di tubo costa !!*

## Soluzione

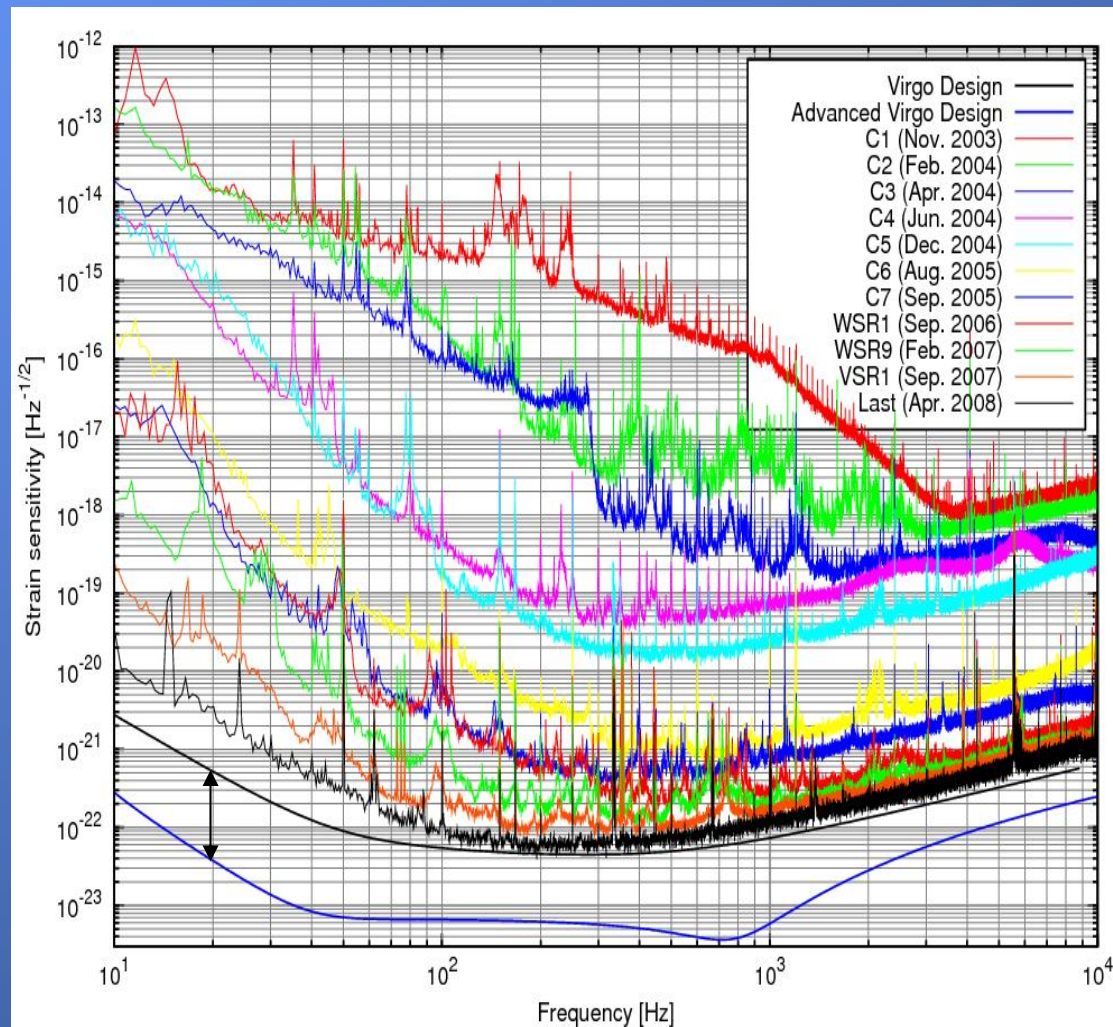
Separare il vuoto delle Torri da quello dei Tubi , introducendo delle trappole



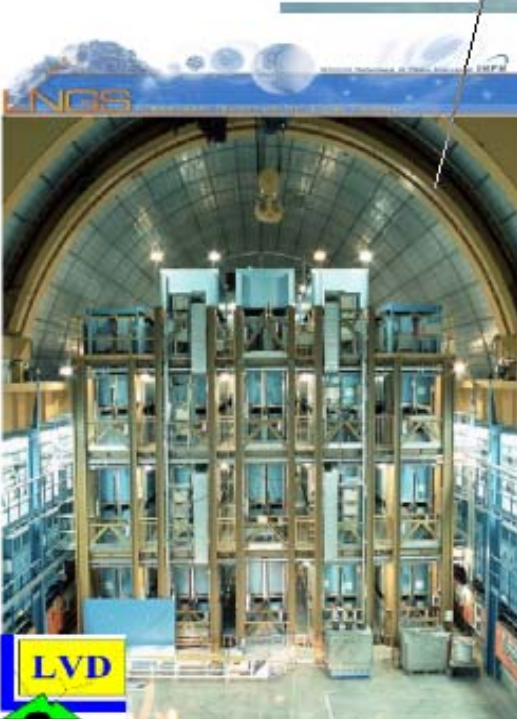
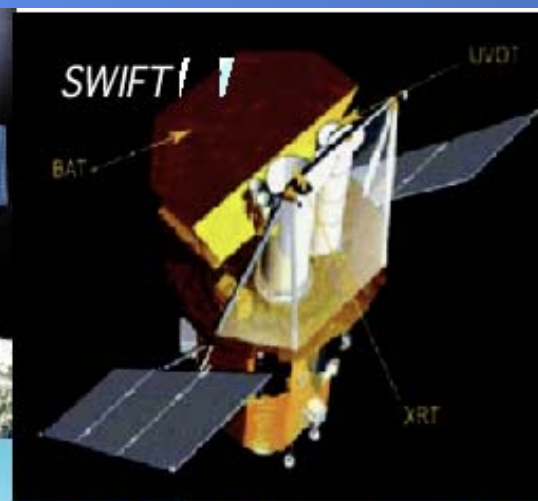
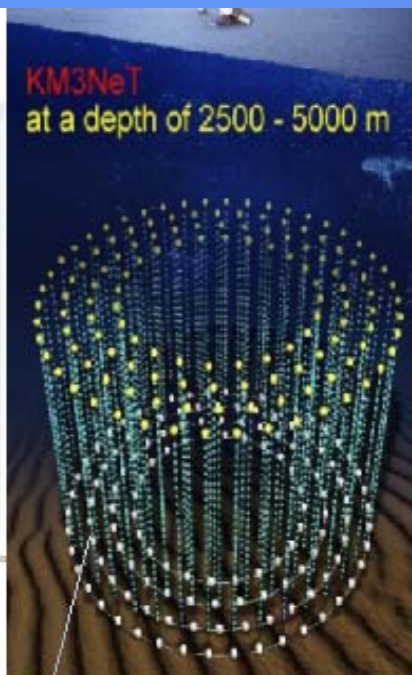
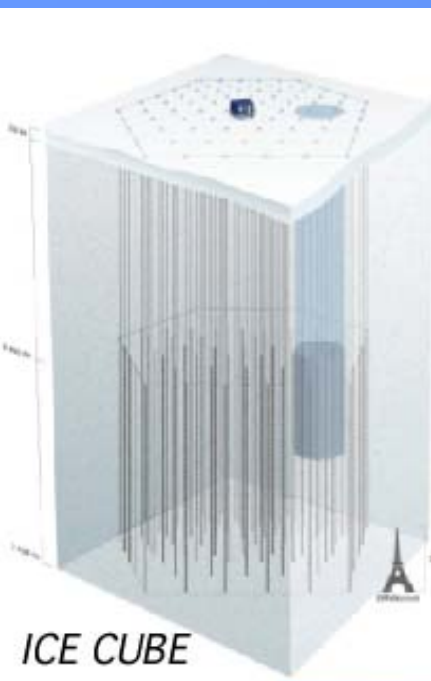


# La sensibilità di ADV: one step forward

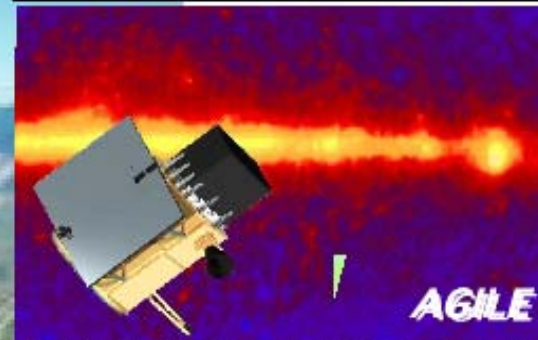
- The technology of interferometric detectors has been demonstrated
- Time to accept a fascinating scientific challenge: a further step in sensitivity to open the way to physics and astronomy
- Advanced Virgo has been thought to make such a jump ahead







*Ad VIRGO:  
un progetto  
coordinato col  
mondo delle  
Astroparticelle*



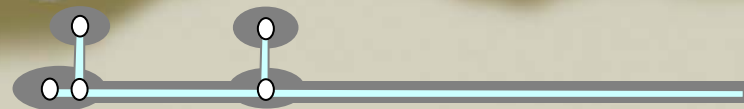
# ET, THE ULTIMATE GROUND DETECTOR

- ❑ Underground detector
- ❑ Mirrors at cryogenic temperature
- ❑ Longer arms, new geometry

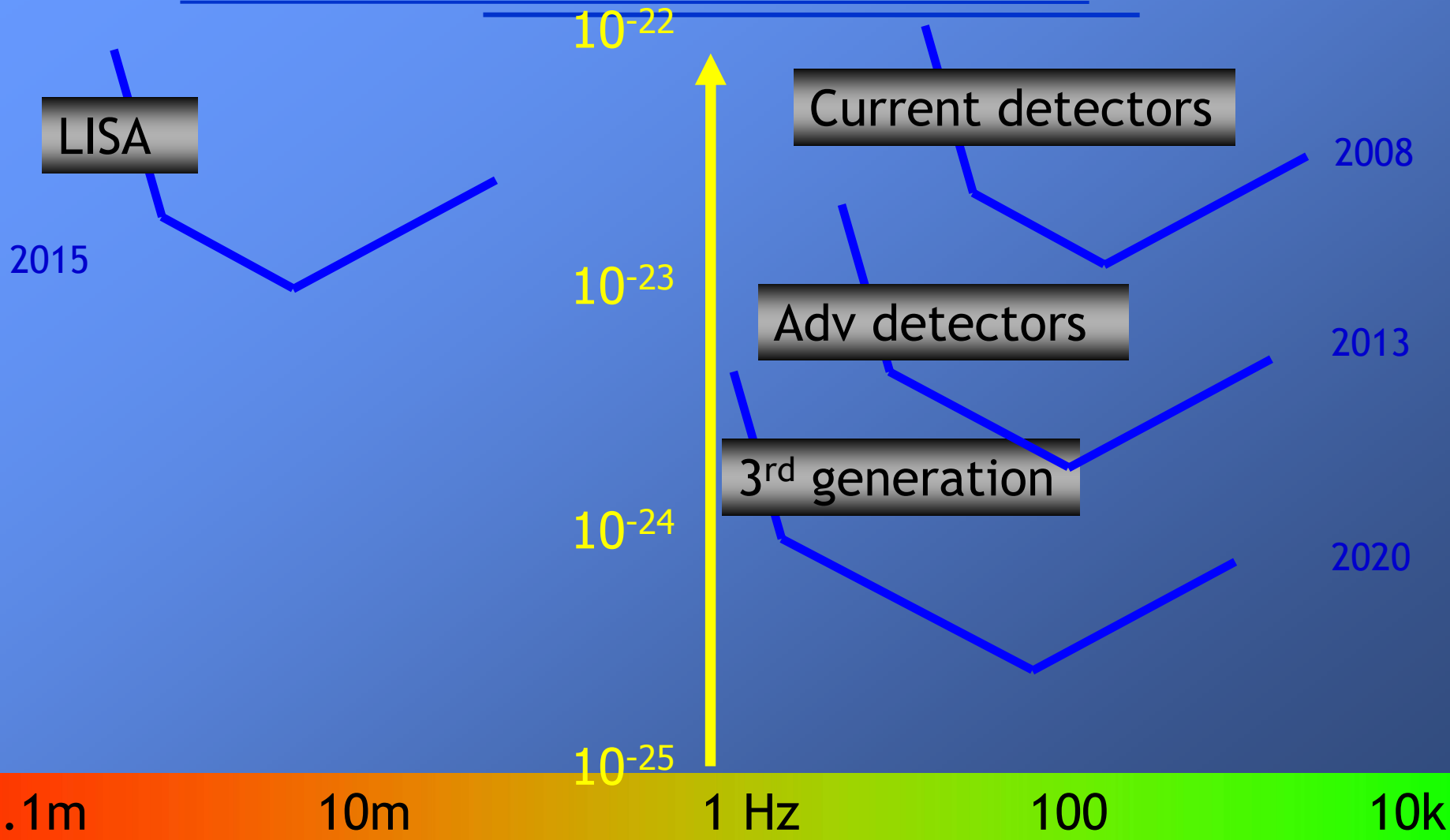
## E.T. - Einstein gravitational-wave Telescope

- ❑ Design Study Proposal funded by EU within FP7
- ❑ Large part of the European GW community involved  
(EGO, INFN, MPI, CNRS, NIKHEF, Univ. Birmingham, Cardiff, Glasgow)

Credit: H.Lück



$h (1/\sqrt{\text{Hz}})$



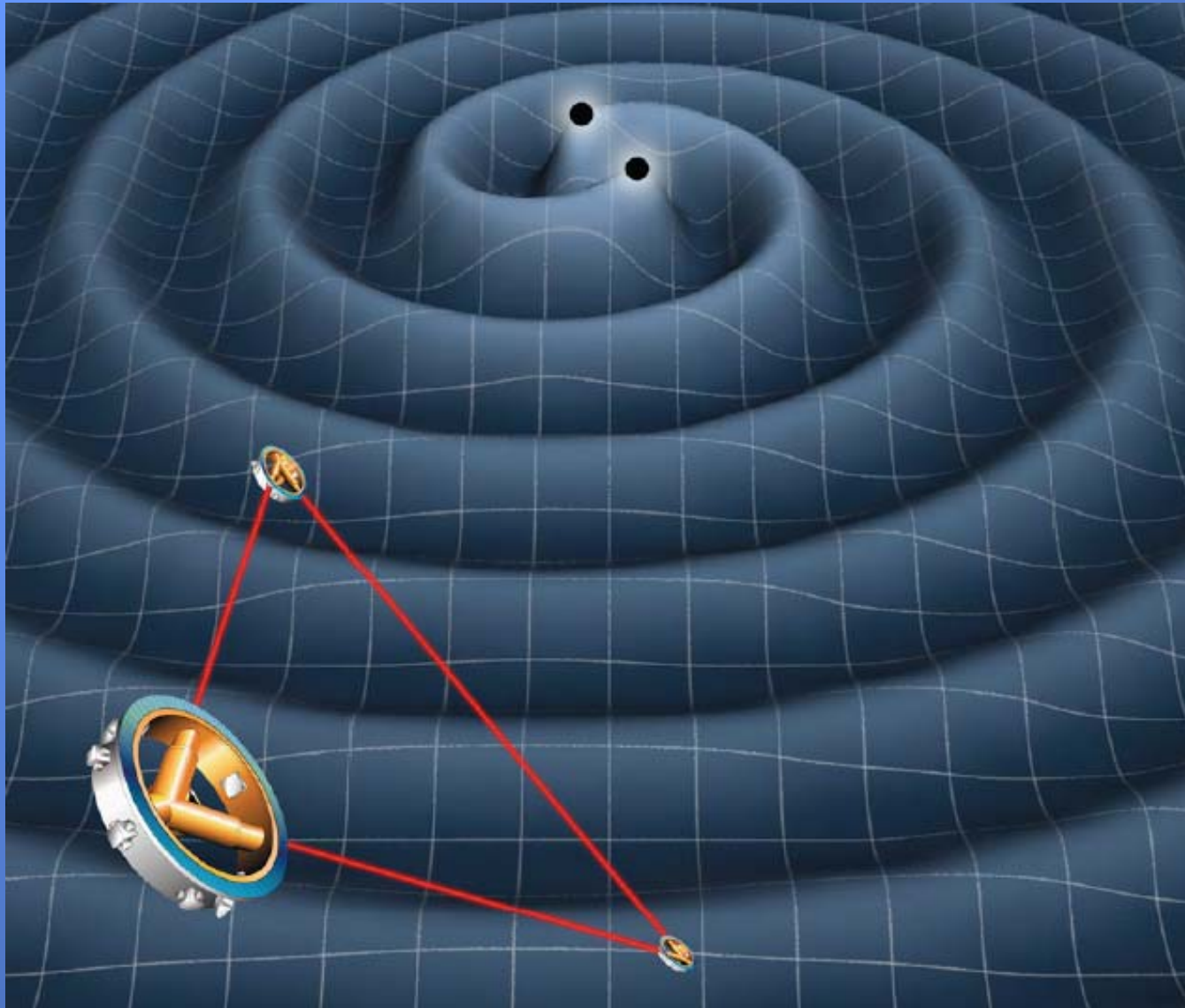
frequency  $f$  / binary black hole mass whose freq at merger= $f$

$4 \times 10^7$        $4 \times 10^5$        $4 \times 10^3 M_{\odot}$       40      0.4



# LISA: Laser Interferometer Space Antenna

---



- ❑ E' una costellazione di 3 satelliti in orbita eliocentrica che precede la terra di  $20^\circ$
- ❑ La distanza media tra i satelliti è 5Mkm
- ❑ Ogni satellite contiene 2 laser e riceve il segnale dagli altri due
- ❑ Ogni satellite contiene due masse in caduta libera. Il satellite segue le masse correggendo la propria orbita
- ❑ Time Delay Interferometry (TDI)
- ❑ Pathfinder parte nel 2011
- ❑ LISA parte nel 2018?

