

12 Maggio 1987
INFN PI/AE 87/1

Proposta di

**Antenna interferometrica a grande base per la
ricerca di Onde Gravitazionali**

Laboratori INFN Pisa e Università' di Pisa:

Carlo BRADASCHIA
Raffaele DEL FABBRO
Angela DI VIRGILIO
Adalberto GIAZOTTO
Hans KAUTZKY
Vinicio MONTELATICI
Diego PASSUELLO

Università' di Napoli

Fabrizio BARONE
Riccardo BRUZZESE
Antonello CUTOLO
Luciano DI FIORE (INFN)
Massimo LANDINI
Maurizio LONGO
Leopoldo MILANO
Salvatore SOLIMENO

CNR Frascati

Franco BORDONI
Franco FULIGNI
Valerio IAFOLLA

Università' di Salerno

Innocenzo PINTO

Gravitation et cosmologie Relativiste (Orsay-Paris)
CNRS-Univ. Pierre et Marie Curie

J.L. BOULANGER
Alain BRILLET
Oliver CREGUT
C. Nary MAN
Alain MARRAUD
David SHOEMAKER
Philippe TOURRENC
Jean-Yves VINET



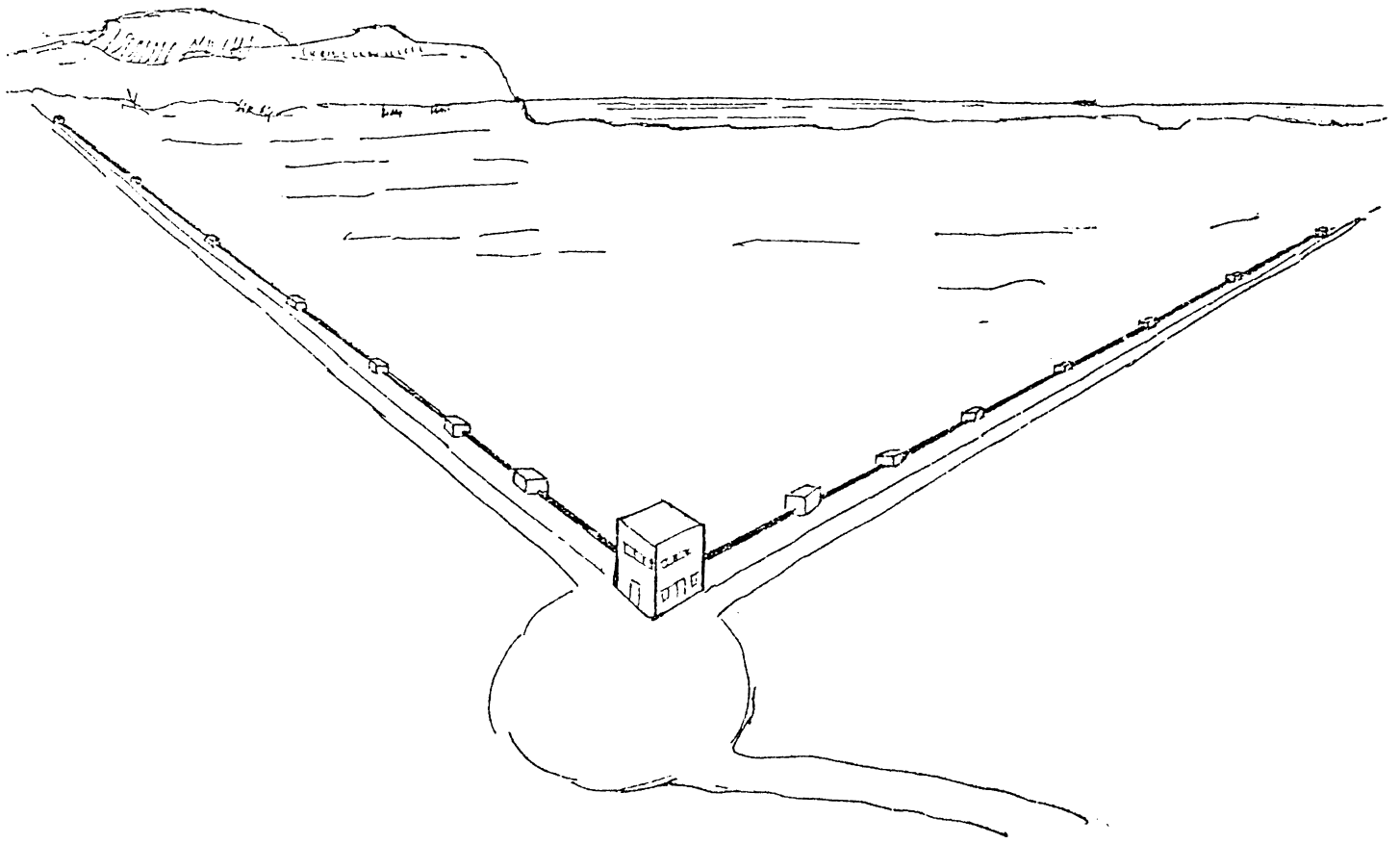
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA

DIPARTIMENTO DI FISICA



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Sezione di Pisa



Sommario

La fisica delle Onde Gravitazionali e' considerata essere oggi uno dei campi di ricerca piu' promettenti per lo studio dell'Universo. La Teoria Generale della Relativita' di Einstein prevede l'emissione di tali onde da parte di masse accelerate; fenomeni quali la formazione di Supernovae, i collassi gravitazionali di stelle, la coalescenza di stelle binarie, la struttura di stelle di neutroni ecc. possono essere studiati attraverso la rivelazione delle onde gravitazionali emesse.

La proprieta' che hanno queste onde di avere un'interazione molto debole con la materia, ne fanno lo strumento migliore per esplorare l'Universo, in quanto esse possono attraversare inalterate grandi spazi cosmici ed enormi densita' di materia. Questa peculiarita' implica, pero', che e' anche estremamente difficile rivelarle; nonostante cio' il progresso tecnologico degli ultimi anni, specie nel campo dell'ottica e dei Laser, ha permesso di realizzare prototipi di antenne interferometriche, di circa 30 m di base, funzionanti al limite della loro sensibilita'. Poiche' la sensibilita' cresce con la lunghezza, in questo studio proponiamo la realizzazione di un'antenna di grandi dimensioni, 3 Km di base, che dovrebbe permettere la rivelazione e lo studio dei fenomeni astrofisici sopra descritti.

Questa antenna si unisce alle quattro progettate rispettivamente in America (due antenne), Regno Unito e Germania, ed ha l'ulteriore peculiarita' di poter esplorare la regione delle basse frequenze, fino a circa 10 Hz.

Questa proposta, che scaturisce dalla collaborazione Italo-Francese, permetterebbe alla Francia ed al nostro Paese, che gia' primeggia per la tecnologia dei rivelatori criogenici a barra risonante, di rimenere al piu' alto livello tecnologico anche in questo campo di ricerca cosi' complesso.

la rivelazione delle onde gravitazionali generate dalle pulsar darebbe inoltre nuove informazioni sulla struttura di tali corpi ed osservazione del fondo stocastico di radiazione gravitazionale darebbe uniche informazioni sui primi istanti del Big Bang.

Per cercare di ottenere tutte queste informazioni è necessario realizzare un'antenna di elevata sensibilità e che sia a larga banda. Le antenne di tipo interferometrico sono molto promettenti da questo punto di vista in quanto possono essere costruite con masse di prova a grande distanza, al fine di aumentare la forza di Riemann F_R prodotta dall'onda gravitazionale:

$$F_R = M \frac{d^2 h_{ik}}{dt^2} \cdot n^i \cdot n^k \cdot L \quad (1.2)$$

ove M è la massa, \underline{n} è il versore della congiungente le masse, L è la distanza tra le masse. La equazione (1.2) mostra quindi la diretta proporzionalità tra L ed il segnale.

In particolare lo studio delle onde gravitazionali periodiche sarebbe particolarmente interessante in quanto esse sono, contrariamente a quelle impulsive, riproducibili nel tempo e quindi permettono lunghi tempi di acquisizione del segnale. Queste onde sono emesse da sistemi di stelle binarie, dalle pulsar e da binarie coalescenti. Le stelle binarie hanno frequenze troppo basse per essere rivelabili sulla terra, a causa sia del rumore sismico che di quello termico. Le pulsar, il cui numero nella galassia è $\sim 10^5$ (4), possono avere frequenze elevate; la fig. 1.1 mostra lo spettro sperimentale (4) del numero di pulsar in funzione della frequenza dell'onda gravitazionale. Questo spettro è ottenuto su un campione di 330 pulsar e mostra che per $n > 10$ Hz ci si attende un numero di pulsar pari a $\sim 7 \cdot 10^3$. Un numero, quindi, elevato che

-Nel I° capitolo si esaminano le sorgenti di onde gravitazionali.

-Nel II° si espone brevemente la teoria delle antenne interferometriche e si valutano i vari rumori di fondo.

-Nel III° si presentano i risultati delle sperimentazioni e degli studi teorici effettuata a Pisa, ad Orsay, a Napoli ed a Frascati.

-Nel IV° si presenta uno schema di interferometro a grande base.

-Nel V° se ne valutano i costi ed i tempi di realizzazione.

-Nel VI° si presenta uno scenario delle proposte presentate da altre nazioni.

Prima di presentare in grandi linee il nostro progetto, riteniamo opportuno dare un breve sommario della evoluzione storica delle antenne interferometriche, della situazione internazionale e le giustificazioni della presente collaborazione Italia-Francia.

1) Evoluzione storica

L'idea di un rivelatore interferometrico per le onde gravitazionali ha almeno venti anni. Le prime ricerche sperimentali iniziarono a Monaco 10 anni fa. Solo quattro gruppi lavorarono su questo soggetto fino al 1982:

un gruppo Tedesco all'istituto Max-Planck (Garching)

un gruppo Britannico all'Universita' di Glasgow

due gruppi Americani al M.I.T. e a Caltech

I primi esperimenti in Francia sono iniziati nel 1982 e nel 1986 si e' costituito un gruppo Giapponese.

Tutti questi esperimenti fanno uso di interferometri Michelson passivi: la loro geometria si adatta bene alla rivelazione di onde gravitazionali e sono quasi indipendenti dalle imperfezioni della sorgente di luce. Due tecnologie sono state studiate e sviluppate per ottimizzare il tempo di accumulazione della luce nei due rami dell'interferometro: Linee di Ritardo o Delay-lines (D-L) in Germania, M.I.T. e Giappone e Fabry-Perot (F-P) a Caltech, Glasgow e Orsay.

Nel 1984 i gruppi Americani arrivarono alla conclusione che era tempo di iniziare la costruzione di una grande antenna interferometrica. Si era allora lontani dall'aver dimostrato sperimentalmente la fattibilita' di una tale antenna, ma gli argomenti dei gruppi americani erano i seguenti:

i) la fattibilita' era dimostrata dai calcoli: la costruzione di un tale apparato consisteva principalmente nel mettere insieme alcune gia' esistenti componenti di alta tecnologia, piuttosto che nello sviluppo di nuove tecnologie.

ii) il disegno di una grande antenna non dipende in modo critico dalla tecnologia scelta per l'ottica (D-L oppure F-P, laser Argon oppure YAG). Per questo motivo e' possibile definire un progetto e successivamente cambiare la tecnologia ottica, senza subire un sensibile aumento dei costi.

iii) per il punto ii) e per i rapidi progressi negli esperimenti di laboratorio, considerando gli inevitabili ritardi nella costruzione di una grande antenna, sembro' ragionevole iniziare la costruzione al piu' presto possibile.

Ora, dopo tre anni, i primi due punti ci sembrano parzialmente

validi mentre l'ultimo e' addirittura rafforzato dai progressi spettacolari ottenuti.

Nel 1984 il gruppo Francese comincio' a considerare la necessita' di conservare e rinforzare la posizione leader dell'Europa in questo campo per mezzo di una collaborazione europea. Il programma di stimolazione CEE mise le basi di questa collaborazione. Il gruppo di Pisa si uni' agli altri gruppi europei alla fine del 1985 ed entro' in modo formale nel 1986 per un nuovo programma che doveva iniziare nel 1987.

2) La situazione attuale

Dall'inizio il gruppo francese ha assicurato la coordinazione della cooperazione CEE. Sono state decise in comune alcune linee generali di ricerca. I risultati vengono scambiati, anche se ogni laboratorio rimane libero e responsabile delle sue proprie scelte scientifiche. Si puo' riassumere come segue la organizzazione generale seguita fino ad ora:

1) SPERIMENTAZIONE:

Francia	sorgenti di luce
Germania	componenti elettro-ottici
Gran Bretagna	specchi a bassa perdita
Italia	strategia delle basse frequenze: isolamento sismico e riduzione del noise del laser alle basse frequenze

2) TEORIA:

Francia	fisica degli esperimenti
Gran Bretagna	sorgenti e analisi dei dati

Questa collaborazione ha gia' avuto una influenza positiva sulla

velocita' di avanzamento scientifico dei vari gruppi. Per ora il miglior risultato e' stato ottenuto con l'interferometro D-L di 30 m di Monaco, che, funzionando senza interruzione, ha una sensibilita' in h di $3 \cdot 10^{-18}$ per impulsi di 1 ms e con 100 mW di potenza nell'interferometro; questa sensibilita' dovrebbe scalare con la lunghezza del sistema e dare $3 \cdot 10^{-20}$ in h nelle stesse condizioni con un interferometro di 3 km. Nel marzo 1987 abbiamo avuto la rilevante notizia che a Glasgow l'interferometro F-P da 10m ha raggiunto la sensibilita' di $2 \cdot 10^{-18}$. Nello stesso periodo anche in Orsay abbiamo ottenuto risultati nuovi e significativi: la messa a punto di un laser YAG con 6 watt su di una riga, e nella messa a punto di un circuito di ricircolazione della luce che ha dato un guadagno di un fattore 30 nella potenza. A Pisa abbiamo testato con successo nell'estate 1986 uno stadio del futuro sistema di silenziamento tridimensionale a sette stadii, che ha mostrato di funzionare come ci si aspettava.

Diversi grandi progetti sono in corso e in studio in America, Gran Bretagna e Germania. Si vuole realizzarli in pochi anni, cosi' da avere un "array" di antenne interferometriche.

Il loro scopo non e' solo quello di rivelare le onde gravitazionali per provarne l'esistenza: probabilmente la coincidenza di segnali rivelati da antenne a barra e' sufficiente e raggiungere questo fine. Lo scopo piu' importante ed ambizioso, che giustifica il grande sforzo scientifico e finanziario, e' quello di mettere a punto un rivelatore che apra la strada ad un nuovo tipo di osservatorio astronomico.

Il nostro progetto ha anche una peculiarita' rispetto agli altri, in quanto cercheremo prima degli altri di esplorare le basse frequenze.

3) Giustificazioni di una collaborazione Italo-Francese

i) I nostri due gruppi hanno iniziato molto dopo gli altri. Per questa ragione non era ancora stato presentato in Italia e Francia un progetto nazionale simile a quello che presentiamo ora. Uno sforzo comune puo' riempire il divario che esiste in questo campo tra i gruppi tedeschi e britannici da un lato e italiano e francese dall'altro.

ii) I due gruppi sono abbastanza giovani, possono perciò adattarsi a lavorare in cooperazione, dove le decisioni sono prese in comune. In effetti già nel 1986 era nata una cooperazione informale tra di noi, con scambio di "know how" e tecnologie, in uno spirito molto costruttivo

iii) malgrado il gruppo francese sia entrato dopo i tedeschi e i britannici in questo campo, e' stato in grado di mettersi rapidamente al passo con essi, in virtu' del fatto che aveva già lavorato in fisica dei laser e misure di alta precisione. Non ci sono più differenze significative di livello tecnologico, se si fa eccezione per le sorgenti di luce, per le quali i francesi sono il gruppo leader in Europa.

Un altro vantaggio del gruppo francese e' la presenza di un forte gruppo di teorici.

iv) Il gruppo italiano ha delle competenze per la strategia delle basse frequenze, che non ha pari in nessun altro laboratorio. Queste competenze sono molto importanti anche per le alte frequenze. Nello stesso tempo i suoi teorici hanno diverse specializzazioni tali da coprire il campo dell'analisi dei dati, calcoli numerici e simulazioni.

I due gruppi sono quindi complementari; dal loro insieme viene fuori un gruppo forte, in grado di impossessarsi di tutte le tecnologie importanti, con un notevole supporto teorico e con una posizione leader in alcuni punti cruciali (sorgenti laser, isolamento sismico, teoria e pratica del ricircolo della luce...)

4) Giustificazione di questo progetto nel piu' ampio contesto internazionale.

Se per un certo tempo questo progetto dovesse essere l'unico, e' chiaro che si dovrebbe mettere l'accento sulla "strategia delle basse frequenze": infatti oggetti periodici come binarie coalescenti sono le sole sorgenti che possono essere rivelate senza ambiguita' da una sola antenna. Inoltre, se si verificasse questa condizione, questa antenna sarebbe di enorme importanza per la comunita' scientifica internazionale, in quanto potrebbe anche servire come laboratorio di test per componenti e tecnologie.

In un contesto piu' ottimistico, cinque e' il numero ottimizzato di antenne che occorrono. Quattro antenne in coincidenza sullo stesso evento darebbero informazioni complete con lo schema della Relativita' Generale, mentre cinque ne permetterebbero la verifica. Questa condizione sarebbe soddisfatta se le antenne progettate fossero tutte realizzate (due americane, una britannica, una tedesca e una italo-francese).

In ogni caso, qualunque siano le decisioni degli altri Stati, il nostro progetto e' ben giustificato, sia come parte del primo "array" di antenne interferometriche nella regione del KHz, sia come antenna unica in quanto funzionante alle basse frequenze.

Referenze dell'Introduzione

(1) A. Einstein, Sitzber, dent Akad Wiss Berlin, Kl. Math Physik u. Tech (1916), p 688; (1918), p 154

(2) Misner, Thorne and Wheeler, "Gravitation", W.H. Freeman and Company, S.Francisco (1972), Cap. 35

(3) J.H. Taylor, L.A. Fowler and P.M. McCulloch (1979), Nature 277, 437

(4) R. N. Manchester, J. H. Taylor (1981), Ap. J, B6, 1983

(5) D. R. Herriott and H J Schulte, Appl. Opt. 4, 883 (1965)

(6) A. Rudiger and al.; proc. Texas Conference, dec 1986; R. Weiss, MIT Quartely Progress Report, (reserch Laboratory of Electronics), 105, 54 (1972).

(7) J. Hough et al., Quantum Optics, Experimental Gravity and measurement theory (eds. P. Meystre, M.O. Scully), p. 515 (1983); R.W.P. Drever, Proc. NATO Advanced Study Institute on Gravitational Radiation (eds. Deruelle Naud T Piran), 321 (North Holland, 1983)

Capitolo I⁰

Stime della ampiezza dell'onda gravitazionale emessa da varie sorgenti di origine astrofisica e Sorgenti Astrofisiche nella banda da 10 a 10⁴Hz

Un gran numero di processi di interesse astrofisico costituiscono sorgenti potenziali di Radiazione Gravitazionale:

- Collassi Gravitazionali;
- Emissione indotta da Neutrini di Supernovae;
- Stellamoti in stelle di neutroni;
- Nascita, accrescimento, collisione e coalescenza di Black Holes in Ammassi Globulari, Nuclei Galattici e QUASAR;
- Stelle Binarie classiche e compatte;
- Stelle pulsanti, quali nane bianche e stelle di neutroni;
- Stelle ruotanti (PULSAR)
- Black Holes primordiali, etc.

Tali sorgenti riempiono uno spettro di frequenze compreso tra 10^{-4} e 10^4 Hz. Ai fini dell'esperimento che si vuol presentare interessano le sorgenti che producono O.G. a frequenze comprese tra decine di Hz e decine di KHz.

Per ciascuna classe di tali sorgenti ha interesse conoscere:

- i) l'ampiezza adimensionale (deviazione della metrica da

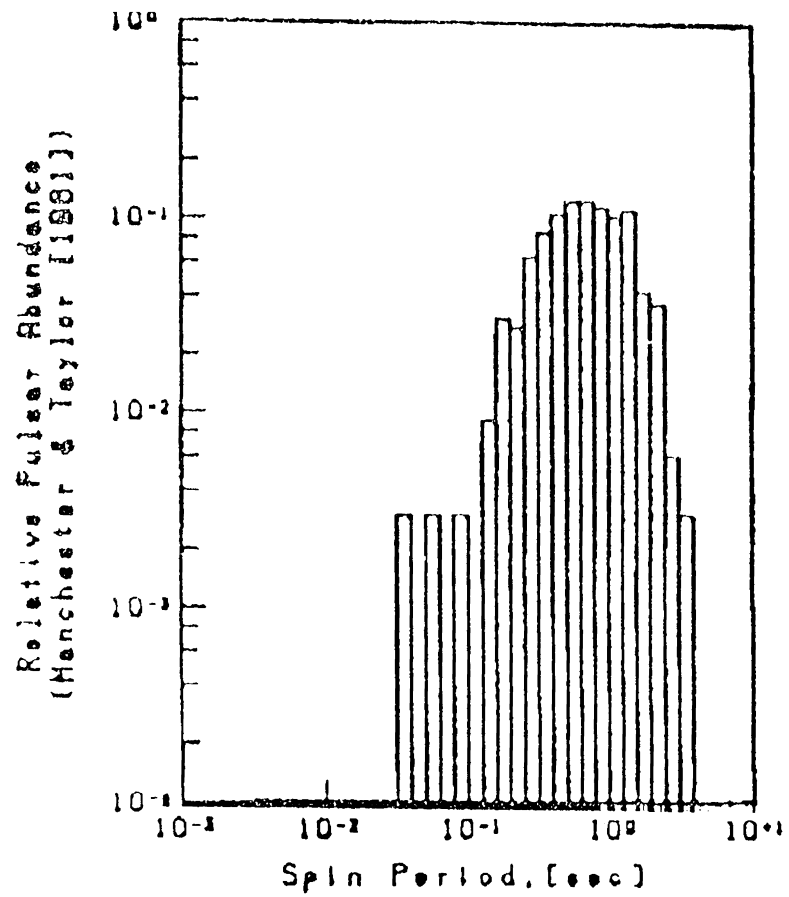


Figura 1.1 -Distribuzione delle pulsar note verso il periodo dell'onda gravitazionale emessa.

quella piatta di Minkowsky) dell'onda gravitazionale, a Terra;

ii) lo spettro della radiazione emessa;

iii) la probabilita' di occorrenza (numero di eventi l'anno, entro una distanza tale da garantire segnali di ampiezza osservabile).

1) Supernovae (SN)

Esse sono storicamente le prime ad essere considerate quali sorgenti di onde gravitazionali, ma la non conoscenza della dinamica e dei tempi iniziali del collasso ha sempre impedito l'esatta predizione del valore di h . L'ampiezza adimensionale h e' dell'ordine di (1):

$$h \sim 3 \cdot 10^{-21} (m_{[M_{\odot}]} / 1.4)^{1/2} (\nu_{[Hz]} / 1000)^{-1} (\Delta\nu_{[Hz]} / 1000)^{1/2} \cdot (R_{[Mpc]} / 10)^{-1} (\eta / 0.01)^{1/2} \quad (1.1)$$

L'efficienza di irradiazione, η , non supera 1% se il nucleo subisce un numero di rimbalzi (bounces) ~ 5 (2); inoltre η cresce se il collasso presenta grandi deviazioni dalla simmetria assiale (3). La frequenza centrale ν e' compresa tra 1 KHz, per nuclei con momento angolare vicino al limite di rottura (4), e 10 KHz, per nuclei non rotanti (5). La larghezza di banda $\Delta\nu$ e' dell'ordine del reciproco del tempo caratteristico del collasso.

Dalla considerazione che l'energia dell'onda è proporzionale ad h^2 si può avere una valutazione approssimata dell'ampiezza in funzione dell'energia gravitazionale ΔE rilasciata nel collasso.

Assumendo $\Delta E \sim 10^{-2} M_{\odot} c^2$ si ha la formula:

$$h \sim 1.5 \cdot 10^{-21} \left(\frac{15 \text{ Mpc}}{r} \right) \left(\frac{10^3 \text{ Hz}}{\nu} \right) \left(\frac{10^{-3} \text{ sec}}{t} \right)^{1/2} \quad (1.2)$$

Assumendo $\nu \sim 10^3 \text{ Hz} \sim 1/t$ ed $r = 15 \text{ Mpc}$ (distanza del Virgo cluster) si ha $h \sim 1,5 \cdot 10^{-21}$, mentre per $\nu = 10^2 \text{ Hz} \sim 1/t$ si ha $h \sim 5 \cdot 10^{-21}$.

La frequenza di occorrenza di supernovae e' illustrata nella fig. 1.1 (6); non è irragionevole supporre che una supernova nel Virgo cluster appaia con un rate 1/settimana. Supernove galattiche dovrebbero dare $h \sim 10^{-18}$ con rate $\sim 1/50$ anni.

2) Radiazione Gravitazionale Indotta da Neutrini di Supernovae (SNN)

E' un processo associato agli eventi SN, analogo all'emissione γ nel decadimento β - inverso dell'elettrone (6), (7), (8). L'ampiezza adimensionale e' dell'ordine di:

$$h \sim 10^{-21} e_{\nu}^2 (E_{\nu[\text{Mc}^2]}/0.1) (R_{[\text{Mpc}]} / 10)^{-1} \quad (1.3)$$

dove e_{ν} e' l'eccentricita' dell'envelope neutrino, ed E_{ν} e' l'energia totale irradiata sotto forma di neutrini. Quest'ultima si stima compresa tra 0.005 Mc^2 (8) e 0.1 Mc^2 (7). La frequenza tipica e' dell'ordine di 100 Hz (7).

3) Coalescenza e Collasso di Binarie Supraveloci (CBD)

Si ritiene che binarie compatte di stelle di neutroni (9), di Black-Holes (10), o miste (11), possano produrre "chirps" di radiazione gravitazionale con efficienza fino al 2% della massa-energia totale. Una simile binaria potrebbe nascere dalla frammentazione del nucleo di una supernova del tipo-II con elevato momento angolare (12), o rappresentare la fase terminale d'una binaria-X massiva (13).

Questo tipo di sorgente è di grande interesse poichè è possibile calcolare tutti i parametri dell'emissione; infatti vi è correlazione tra le masse, la loro distanza, la distanza dell'oggetto dalla terra e l'ampiezza e frequenza di h . La dinamica dell'episodio consiste nella spiralizzazione dei due oggetti, uno intorno all'altro, con emissione di onde gravitazionali, a cui fa seguito un ulteriore rapido aumento della frequenza di spiralizzazione fino alla coalescenza.

Una binaria di stelle di neutroni, con $m_1 \sim m_2 \sim M_{\odot}$ presenterebbe una vita media ~ 1 sec, durante il quale la frequenza orbitale e la luminosita' gravitazionale evolverebbero come indicato nelle fig. 1.2 e 1.3 (Clark, 1978), dove e' riportata pure la luminosita' neutrinica che accompagna il processo. La frequenza massima per stelle di neutroni è di circa 1 KHz; è però importante avere un'antenna che funzioni alle basse frequenze, perchè in questo modo si aumenta il tempo di osservazione.

L'ampiezza adimensionale e' dell'ordine di:

$$h \sim 10^{-23} (M/M_{\odot})^{2/3} (\mu/M_{\odot}) (v_{[Hz]}/100)^{2/3} (R_{[Mpc]}/100)^{-1} \quad (1.4)$$

in corrispondenza della frequenza ν , dove M e μ sono la massa totale e quella ridotta. Il tempo trascorso in prossimità di tale frequenza è dell'ordine di:

$$t \sim 10(\nu_{[\text{Hz}]} / 100)^{-8/3} (M/M_{\odot})^{2/3} (\mu/M_{\odot})^{-1} \text{ sec.} \quad (1.5)$$

Alcuni autori (Clark, Douglas) ritengono che la coalescenza di binarie costituisca il meccanismo astrofisico più importante per la generazione di onde gravitazionali al di sopra dei 100 Hz. Nella fig. 1.4 si riportano le stime dell'ampiezza adimensionale in funzione della frequenza di occorrenza ($\log h$ vs $\log R$) relative ad onde gravitazionali prodotte da supernovae (tratto pieno) e da binarie coalescenti (tratteggiato).

Si stima un evento CBD all'anno, in un raggio compreso tra 70 e 300 Mpc (limiti fiduciali al 99%) (14)

4) Processi con Black-Holes in Ammassi Globulari (BHGC)

Questi processi coinvolgono l'accrescimento e la coalescenza di black holes con masse $\sim 10^3 M_{\odot}$, la cui frequenza stimata è di ~ 1 all'anno, entro un raggio di 500 Mpc (5).

L'ampiezza adimensionale è dell'ordine di:

$$h \sim \left(\frac{2}{1} \right) 10^{-20} (\eta / 10^{-2})^{1/2} (M_{[M_{\odot}]} / 10^3) \quad (1.6)$$

a frequenza dell'ordine di:

$$\nu \sim \left(\frac{12}{32} \right) (m_{M_{\odot}} / 10^3)^{-1} \text{ Hz} \quad (1.7)$$

dove i coefficienti inferiore e superiore si riferiscono rispettivamente a black-holes non ruotanti (Schwarzschild), o con momento angolare specifico limite (Kerr).

5) Core-Quakes in Stelle di Neutroni (NSCQ)

Tali eventi avrebbero una frequenza di ~ 1 all'anno entro un raggio di $\sim 1 \text{ Kpc}$ (5). L'ampiezza adimensionale h e' dell'ordine di:

$$h \sim 3 \cdot 10^{-23} \zeta^{1/2} (\nu_{[\text{kHz}]} / 3)^{-1} \tau_{[\text{sec}]}^{-1/2} R_{[\text{Kpc}]}^{-1} (\Delta E_{[\text{erg}]} / 10^{45}) \quad (1.8)$$

con $\nu \sim 3 \text{ kHz}$ (5), e $\tau \sim 1 \text{ sec}$ (5), e $\Delta E \sim 10^{45} \text{ erg}$ l'energia liberata nel processo. La frazione irradiata, ζ , di tale energia e' tuttora incerta.

6) Pulsars (PSR)

Le pulsars non axisimmetriche emettono onde gravitazionali ad una frequenza fondamentale pari al doppio della frequenza di rotazione (15).

L'ampiezza adimensionale h e' dell'ordine di:

$$h \sim 8 \cdot 10^{-28} (J_{[\text{g.cm}^2]} / 3 \cdot 10^{44}) \cdot (\epsilon_0 \theta_w / 10^{-6}) \cdot (R_{[\text{pc}]} / 100)^{-1} (f_{[\text{Hz}]} / 10)^2 \quad (1.9)$$

Il momento d'inerzia J sarebbe compreso tra $3 \cdot 10^{44} \text{ g.cm}^2$ e $3 \cdot 10^{45} \text{ g.cm}^2$, per masse comprese tra $\sim 0.2 M_{\odot}$ e $3 M_{\odot}$, in

conseguenza dell'equazione di stato (Pines e Shaham, 1972). L'oblatezza ε_0 predetta dalla teoria degli "starquakes" potrebbe essere compresa tra 10^{-4} e 10^{-2} (Pines e Shaham, 1974). Il "wobble-angle" θ_w sarebbe invece compreso tra 10^{-3} e 10^{-1} rad.

Le frequenze orbitali sono distribuite, nell'insieme delle 330 pulsar conosciute al 1981 (16) come mostrato in fig. I.1 (nell'introduzione).

Una classifica delle sorgenti Pulsars in base al parametro f_{orb}^2/R e' stata suggerita ed in parte compiuta (Prentice e Ter Haar, 1969). Tale analisi porta a suggerire che oltre alla Vela ed al Granchio, anche CP9050 e PSR1451-68 sarebbero sorgenti rilevanti. E' interessante dare delle stime numeriche: assumendo che il rallentamento delle pulsar sia dovuto alla radiazione di onda gravitazionale, si ha il limite superiore $\varepsilon_0\theta_w \sim 10^{-3}$ che fornisce per Crab e Vela

$$h_{crab} \sim 10^{-24} \quad \nu \sim 60 \text{ Hz} \quad (1.10a)$$

$$h_{vela} \sim 5 \cdot 10^{-25} \quad \nu \sim 22 \text{ Hz} \quad (1.10b)$$

Poichè le pulsar sono addensate per frequenza < 60 Hz, l'antenna che noi proponiamo sarebbe lo strumento più idoneo a rivelarle.

7) Pulsazioni di Stelle Compatte (CSP)

Le vibrazioni di stelle di neutroni (17), e di black-holes (10), produrrebbero onde gravitazionali a frequenze dell'ordine del KHz, con tempi di coerenza dell'ordine del secondo.

Referenze del primo capitolo

- (1) L. Smarr (ed.) (1979), "Source of Gravitational Radiation", Cambridge, p. 492.
- (2) S.L. Shapiro (1978, in L. Smarr, ed. op. cit., p. 355.
- (3) R. Ipser, N.J. Labay e R. Canal (1984), Nature 309, 431.
- (4) R.A. Saenz ad S.L. Shapiro (1978), Ap. J., 221, 286.
- (5) K. Thorne (1978), In "Theoretical Principles in Astrophysics and Relativity", N. Lebovitz et al., ed.s, Chicago.
- (6) R. Epstein (1978), Ap. J., 223, 1037.
- (7) M.S. Turner (1978), Nature, 274, 565.
- (8) D.K. Nadyozhin (1978), Astrophys. Space Sci., 53, 131.
- (9) J.P.A. Clark e D.M. Eardley (1977), Ap. J., 215, 311.
- (10) S.L. Detweiler (1979) in L. Smarr (ed.), op. cit., p.211.
- (11) J. M. Lattimer e D.N. Schramm (1976), Ap. J., 210, 549.
- (12) P.J. Wiita e W.H. Press (1976), Ap. J., 208, 525.
- (13) B.P. Flannery ed E.P.J. van den Heuvel, W. Sutantyo (1979), Astron. Astroph., 39, 61.
- (14) J.P.A. Clark, E.P.J. van den Heuvel, W. Sutantyo (1979), Astron Astroph., 72, 120.
- (15) R. Ipser (1970), Ap. J., 175, 166
- (16) R.N. Manchester e J.H. Taylor (1981), Ap. J., 86, 1983.
- (17) W.H. Price and K. Thorne (1969), Ap. J., 144, 201.

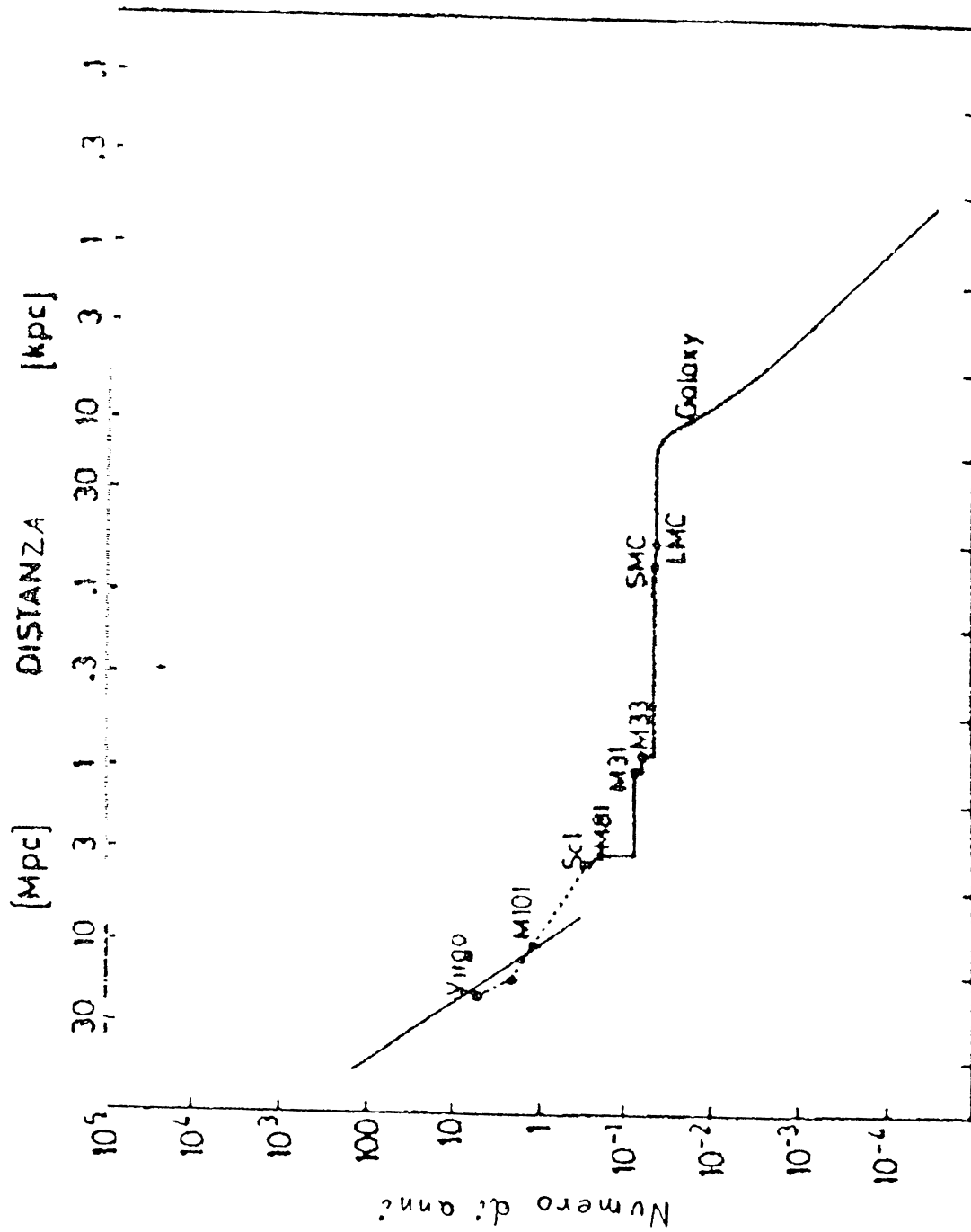


Figura 1.1 -Distribuzione della frequenza delle supernovae verso la loro distanza dalla terra.

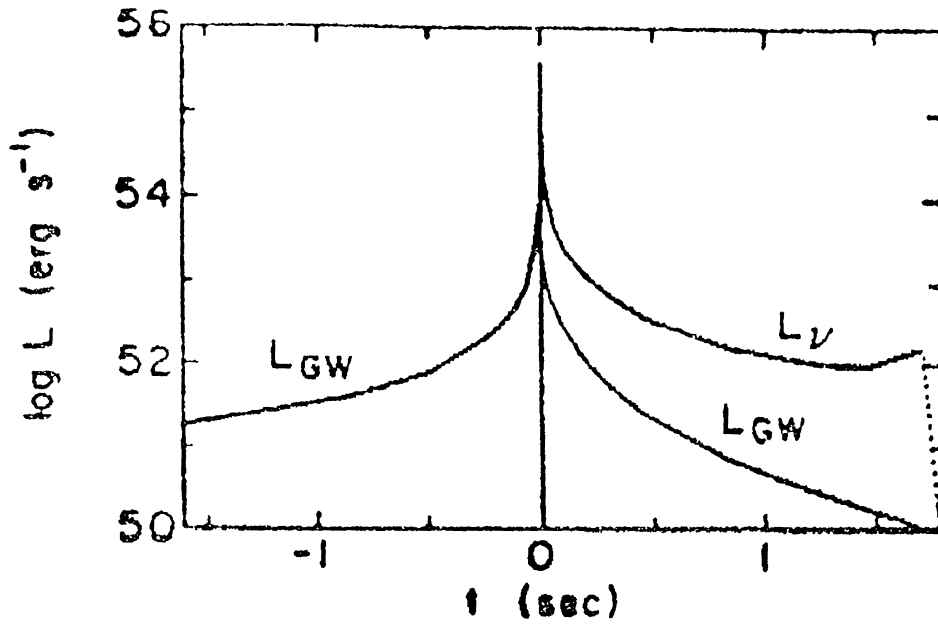


Figura 1.2 -Andamento temporale della luminosita' relativa alle O.G. e all'emissione di neutrini di una binaria di stelle di neutroni.

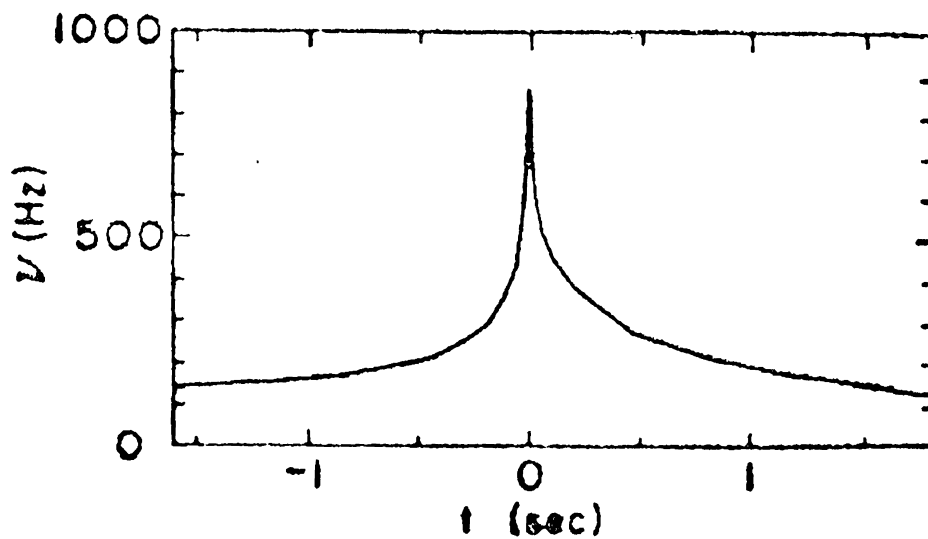


Figura 1.3 -Andamento temporale della frequenza di emissione delle O.G. di una binaria di stelle di neutroni.

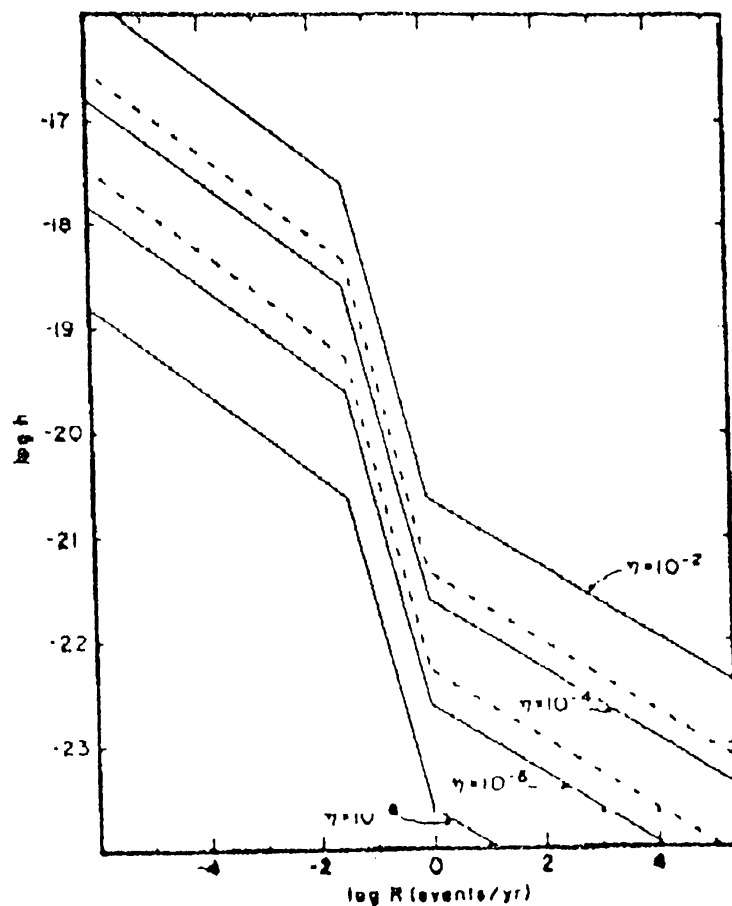


Figura 1.4 - Ampiezza adimensionale di O.G. verso la frequenza di occorrenza per supernovae (tratto pieno) e binarie coalescenti (tratteggiate).

Capitolo II°

L'antenna interferometrica

Il principio di funzionamento è il seguente: supponiamo che un'onda gravitazionale incida normalmente al piano in cui tre masse uguali e pari a M sono poste su tre vertici di un quadrato (vedi fig. 2.0).

Sia L_{12} la distanza tra M_1 ed M_2 ; a causa dell'onda gravitazionale si crea tra M_1 ed M_2 la forza di Riemann (1)

$$F_{12} = \frac{1}{2} M (\ddot{h}_{11} \cos 2\vartheta + \ddot{h}_{12} \sin 2\vartheta) L_{12} \quad (2.1)$$

ove ϑ è l'angolo tra il vettore di polarizzazione dell'onda gravitazionale e la direzione $M_1 M_2$.

La forza che agisce sulla coppia $M_1 M_3$ la si ottiene dalla equazione (2.1), ponendo $\vartheta \Rightarrow \vartheta + \pi/2$ e cioè

$$F_{13} = -F_{12} \quad (2.2)$$

Questa proprietà, che discende dal carattere quadrupolare dell'onda gravitazionale, è quella che ci permette di usare un interferometro per rivelare le onde gravitazionali.

Supponiamo infatti che le masse $M_1 = M_2 = M_3 = M$ siano le masse di un pendolo di lunghezza l , il cui punto di sospensione sia, rispetto

alle stelle fisse, variabile a causa delle vibrazioni del terreno, allora segue che le differenze delle variazioni di distanza tra M₁-M₂ ed M₁-M₃, dovute all'onda gravitazionale ed al sisma, è nello spazio delle frequenze

$$\Delta l = \frac{\omega_0^2 (\xi_{T1} - \xi_{T2} - \eta_{T1} + \eta_{T2}) - \Omega^2 (h_{11} \cos 2\theta + h_{12} \sin 2\theta) \cdot L}{-\Omega^2 + i \frac{\Omega}{\tau} + \omega_0^2} \quad (2.3)$$

ove ξ_{Ti} ed η_{Ti} sono gli spostamenti dei punti di sospensione dei pendoli dovuti al sisma, il cui valore spettrale è dato dalla equazione (1.3), ω_0 e τ sono rispettivamente la frequenza circolare propria ed il tempo di rilassamento dei pendoli.

L'uso di un interferometro permette quindi di misurare lo spostamento Δl .

Nella fig. 2.1 è tracciato lo schema a blocchi di un interferometro di Michelson, di tipo delay-line.

Nel blocco A vi è lo schema di stabilizzazione del Laser (2) il cui funzionamento è il seguente: tramite il beam splitter BS1 si preleva una piccola frazione del fascio del laser (frequenza ν_L) e lo si modula in fase a frequenza $\Delta\nu_L$ tramite la cella di Pockel PC1. Il fascio contiene ora tre ampiezze a frequenza ν_L , $\nu_L \pm \Delta\nu_L$ le quali, allorchè sono riflesse dal Fabry-Perot (FP), danno un segnale nel fotodiode PD1 il cui prodotto con la tensione di modulazione è proporzionale alla differenza tra ν_L e la frequenza ν_{FP} di uno dei modi del FP. Questo segnale viene amplificato ed usato per stabilizzare il laser tramite PC2 ed il trasduttore piezoelettrico PZT1.

Nel blocco B è mostrato lo schema delle delay lines (D.L.) con un numero di fasci $N=4$; la distanza tra gli specchi è L ed i fasci sono

modulati in fase tramite PC3 e PC4` al fine di eliminare il rumore di ampiezza del laser. La fase è regolata in modo di avere il diodo PD2, da cui si estrae il segnale da osservare, in regime di spegnimento, mentre il fascio F_2 , che ha intensità di poco inferiore a quella incidente W_0 , viene usato per essere riiniettato (3) tramite il circuito ottico mostrato nel blocco C. In questo circuito la fase di F_2 viene regolata da un servo loop che agisce su PZT2 in modo tale da avere il fotodiodo PD3 in spegnimento; in questo modo, se $W_0 \cdot (1-\varepsilon)$ è l'intensità del fascio F_2 in assenza di ricircolazione, la potenza efficace W , quando il servo loop è inserito, diventa W_0/ε .

Gli specchi dell'interferometro hanno un moto relativo dovuto allo spostamento dei loro punti di sospensione; poichè la fase dell'interferometro deve essere mantenuta stabile entro una frazione piccola di 2π , è necessario avere il servo loop CS che agisca sulla posizione degli specchi e che sia fornito di un opportuno filtro passa basso al fine di non introdurre rumore nella zona di frequenza in cui si vuole osservare le onde gravitazionali. Questo problema, che è risolto per gli interferometri che funzionano sopra i 150 Hz, richiede ulteriore sperimentazione allorchè si voglia scendere a 10 Hz.

1) Descrizione di un interferometro come sistema per la rivelazione di onde gravitazionali

1.a) Analisi e trattamento del segnale in uscita da un interferometro per OG

Il segnale in uscita e' rappresentato dalla corrente fornita da un fotodiode illuminato dalla sovrapposizione dei due fasci dell'interferometro. Tale segnale $i(t)$ puo' essere posto nella forma:

$$i(t) \propto I(t) \cdot \Delta\phi(t) \quad (2.4)$$

dove $\Delta\phi(t)$ e' la differenza di fase fra i due cammini ottici e dove $I(t)$ e' l'intensita' istantanea della luce raccolta dal fotodiode. $I(t)$ e $\Delta\phi(t)$ possono essere scritti come:

$$I(t) = I_0 + \delta I(t) \quad (2.5a)$$

$$\Delta\phi(t) = \phi_0 + \delta\phi(t) \quad (2.5b)$$

con

$$\phi_0 = 2\pi \cdot \nu_0 \cdot \Delta L/c \quad (2.6a)$$

$$\delta\phi(t) = \delta\nu(t) \cdot \Delta L/c + (\delta L_g(t) + \delta L_n(t)) \cdot \nu_0/c \quad (2.6b)$$

dove:

I_0 e' l'intensita' media della luce laser

$\delta I(t)$ e' la fluttuazione di intensita' del laser

ν_0 e' la frequenza media del laser

$\delta\nu(t)$ e' la deviazione istantanea della frequenza (Jitter di frequenza)

ΔL e' la differenza statica fra i due cammini ottici

$\Delta L_g(t)$ e' la differenza fra i due cammini ottici dovuta alla perturbazione metrica in presenza di onde gravitazionali

$\Delta L_n(t)$ e' la variazione della differenza fra i due cammini ottici dovuta alle perturbazioni di altra natura (rumore sismico, rumore browniano degli specchi, fluttuazioni della pressione di radiazione sugli elementi componenti l'interferometro).

Il segnale viene registrato e successivamente analizzato nella

banda di interesse (10 Hz - 10 KHz) mediante FFT (Fast Fourier Transform). La densita' spettrale di potenza vale:

$$|\tilde{i}(t)|^2 \approx \Delta\phi_0^2 |\tilde{\delta l}|^2 + (I_0 \cdot \Delta L/c)^2 |\tilde{\delta v}|^2 + (I_0 \cdot v_0/c)^2 (|\tilde{\delta L}_g|^2 + |\tilde{\delta L}_n|^2) \quad (2.7)$$

Inoltre si puo' scrivere:

$$|\tilde{\delta l}|^2 = |\tilde{\delta l}|_{\text{shot-noise}}^2 + |\tilde{\delta l}|_{\text{laser}}^2 \quad (2.8)$$

Si noti che la frequenza istantanea $v(t) = v_0 + \delta v(t)$ e' la derivata rispetto al tempo della fase istantanea della sorgente. Quindi l'interferometro risulta sensibile solo alle fluttuazioni delle grandezze sopra riportate.

La conoscenza della densita' spettrale di potenza del segnale e del rumore permette di applicare off-line il filtraggio ottimo di Wiener-Kolmogorov con funzione di trasferimento:

$$G(\omega) = |S(\omega)|^2 / (|S(\omega)|^2 + |N(\omega)|^2) \quad (2.9)$$

Si noti che nel caso di sorgenti periodiche lo spettro del segnale gravitazionale ricevuto contiene per ogni riga, corrispondente alla frequenza emessa dalla sorgente, alcune righe laterali separate da intervalli che sono collegati alle frequenze dei moti relativi dei due sistemi.

Ai problemi suaccennati si aggiunga la scarsa conoscenza dei segnali cercati. Per poter applicare le tecniche di filtraggio ottimo bisogna utilizzare opportune strategie (filtraggio adattivo).

1.b) Fonti di rumore in un interferometro per OG

Per maggiore chiarezza ci sembra utile fare un riassunto schematico dei tipi di rumori presenti in un interferometro ed elencare alcuni sistemi usati per ridurli. I rumori sono dei seguenti tipi:

a) Rumore dovuto a fluttuazioni dell'intensita' del laser.

Un possibile rimedio e' l'utilizzo di tecniche di rivelazione coerente. Ad esempio si puo' modulare in alta frequenza la fase del fascio laser nei due bracci dell'interferometro (oppure usare un fascio esterno, vedi cap. III°) ed inviare il segnale del fotodiodo ad un rivelatore coerente (lock-in) il cui riferimento coincida con quello del modulatore.

b) Rumore di granulosita' (shot-noise) (vedi par. 2.1 in questo capitolo)

Per ridurre lo shot-noise bisogna aumentare la potenza del laser. Esistono delle tecniche che migliorano le prestazioni di un laser di data potenza, come la tecnica di ricircolazione (recycling) del fascio in cui si riinvia nei due rami dell'interferometro parte della luce che viene fuori dai rami stessi. Un'altra tecnica in via di sperimentazione e' l'uso di stati "squeezed" della luce (4).

c) Rumore sismico.

Si spera di poterlo eliminare, con le nostre sospensioni, dai 10 Hz in su (5).

d) Rumore browniano degli specchi.

Comunemente lo si riduce con sospensioni ad alto Q meccanico, utilizzando solo materiali ad alto Q (es: quarzo fuso per gli specchi ed acciaio per le sospensioni), evitando l'utilizzazione di ceramiche, colle etc.. Occorre aumentare le masse ed porre l'interferometro in vuoto sufficientemente alto in modo da migliorare il Q delle sospensioni degli specchi, che e' limitato dagli urti con le molecole del gas residuo.

e) Fluttuazioni dell'indice di rifrazione del mezzo

Si riducono ponendo l'interferometro in vuoto sufficientemente alto.

f) Scattering dai componenti dell'interferometro.

Questo rumore puo' essere ridotto sfruttando il ritardo temporale dei segnali diffusi. A tal fine si possono utilizzare sorgenti laser pulsate o fare uso di un 'gate' sincronizzato che rigetta i segnali dovuti a diffusione multipla. Naturalmente si possono usare anche particolari accorgimenti nella costruzione dell'interferometro per ridurre questo rumore.

g) Fluttuazioni di frequenza.

Le fluttuazioni di frequenza si possono controllare solo agendo sulla sorgente laser. Pertanto particolare cura deve essere messa nello stabilizzare la sorgente. Questo si fa:

i) stabilizzando la lunghezza della cavita' ottica utilizzando barre di INVAR stabilizzate in temperatura;

ii) inserendo nella cavita' un etalon contenuto in una cella stabilizzata in temperatura con una precisione di un decimo o di un

centesimo di grado;

iii) asservendo il laser ad una cavita' Fabry-Perot esterna stabilizzata in temperatura e protetta dal rumore sismico;

iv) realizzando il laser mediante piu' sorgenti laser agganciate tra loro.

1.c) Il laser

Allo stato attuale della tecnologia, la sorgente che meglio si presta a questi scopi e' la sorgente ad Argon. In prospettiva potrebbe essere sostituita con un laser a Neodimio-YAG, qualora le sorgenti attualmente disponibili (100mW, 20kHz integrati su 1' di stabilita' a breve termine, pompate con laser a diodi) possano raggiungere le potenze di circa 50W al fascio. Per maggiori dettagli vedi il capitolo III°.

Il laser a vapori metallici (in particolare vapori di Rame) capaci di funzionare fino a 20kHz e che forniscono impulsi con potenza media di alcune decine di Watt, possono essere dei candidati interessanti per sostituire la sorgente ad Argon, nell'eventualita' che se ne possano migliorare le prestazioni.

2) Maggiori dettagli su alcuni rumori

In un sistema interferometrico vi sono due classi di rumori dominanti: alla prima appartengono i rumori che modificano la fase dell'interferometro, alla seconda i rumori creati da forze stocastiche che agiscono direttamente sulle masse di prova.

Discuteremo nel seguito in dettaglio solo i rumori più importanti.

2.a) Shot noise:

Il fascio del laser è uno stato "coerente" quindi, il beam splitter genera due fasci che sono stati "coerenti" anch'essi e per i quali vale la relazione $\Delta n \sim \sqrt{n}$, ove Δn è la fluttuazione del numero n di fotoni nei fasci. Dal principio di indeterminazione segue che la fluttuazione della fase relativa dei due fasci è:

$$\Delta\phi \sim \frac{1}{\Delta n} = \frac{1}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{h\nu_L \Delta\nu}{W\eta}} \quad (2.10)$$

ove $h \cdot \nu_L$ è l'energia dei fotoni, W è la potenza efficace all'interno dell'interferometro, η l'efficienza di rivelazione e $\Delta\nu$ è la larghezza di banda.

Dalla eq.(2.3) segue che la variazione di fase prodotta dal segnale, allorché $\Omega > \omega_0$, è:

$$\Phi_S = 2\pi N h L / \lambda \quad (2.11a)$$

$$h = h_{11} \cos 2\vartheta + h_{12} \sin 2\vartheta \quad (2.11b)$$

dove λ è la lunghezza d'onda della luce ed N il numero di fasci nei rami dell'interferometro.

Confrontando la (2.11b) con la (2.10) si ottiene la condizione di misurabilità dovuta allo shot noise:

$$h > \frac{1}{2\pi N L} \sqrt{\left[\frac{hc \Delta\nu (2-\eta)}{\lambda W \eta} \right]} \quad (2.12)$$

Il termine $(2-\eta)$ tiene conto delle fluttuazioni prodotte dal fotodiode.

Il gruppo di Monaco (6) ha ottenuto, per frequenze maggiori di 10^3 Hz, una sensibilità $h = 1.8 \cdot 10^{-19} (\text{Hz})^{-1/2}$ che è di poco superiore al limite dato dalla equazione (13), valutata con $W = 100 \text{ mW}$, $N = 110$, $L = 30 \text{ m}$; questi dati sono mostrati in fig. 2.2a, fig. 2.2b mostra la sensibilità dell'interferometro nella regione delle basse frequenze da 1 Hz a 1000 Hz.

2.b) Larghezza di riga del laser

Il laser ha un tempo di coerenza τ_0 che è connesso alla larghezza spettrale di riga $g_\omega(\Omega)$ tramite la relazione :

$$\frac{1}{\tau_0} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi} \left(\int g_\omega^2(\Omega) d\Omega \right)^{1/2} \quad (2.13)$$

Se la lunghezza dei rami dell'interferometro differisce di ΔL , ne segue che la condizione di misurabilità per h risulta :

$$h > \frac{\lambda}{\sqrt{4\pi}} \frac{\Delta L}{L c} g_\omega(\Omega) \sqrt{\Delta\nu} \quad (2.14)$$

Nella fig. 2.3 sono mostrati i dati del gruppo di Monaco (6) : nella curva superiore è mostrata la $g_{\omega}(\Omega)$ del laser COHERENT INNOVA 90/5, in quella intermedia la $g_{\omega}(\Omega)$ ottenuta usando un F.P. di 25 cm, e in quella inferiore la $g_{\omega}(\Omega)$ ottenuta usando l'intero cammino dell'interferometro come cavità di riferimento.

2.c) Rumori creati da forze stocastiche

Rumore termico : su ogni massa dell'interferometro agisce una forza stocastica dovuta al rumore termico, il cui valore RMS è:

$$F_T = \sqrt{\left(\frac{4 MKT \omega_0}{Q}\right) \Delta\nu} \quad (2.15)$$

ove T è la temperatura, K la costante di Boltzman, Q è il fattore di merito del pendolo e $\Delta\nu$ la larghezza di banda.

Lo sfasamento RMS prodotto dall'azione di F_T sulle masse dell'interferometro è

$$\Phi_T = \frac{\sqrt{\left(\frac{16 KT \omega_0}{MQ}\right) \Delta\nu}}{-\Omega^2 + i \frac{\Omega}{\tau} + \omega_0^2} \frac{2\pi N}{\lambda} \quad (2.16)$$

Dal confronto della equazione (2.11b) con la (2.16) si ricava la condizione di misurabilità di h dovuta al rumore termico nelle masse del pendolo allorchè $\Omega > \omega_0$:

$$h > \frac{1}{\Omega^2 L} \sqrt{\left(\frac{16 KT \omega_0}{MQ}\right) \Delta\nu} \quad (2.17)$$

Le vibrazioni termiche degli specchi alla frequenza circolare ω_s danno la seguente condizione di misurabilità per $\Omega < \omega_s$:

$$h > \frac{1}{L \omega_s} {}^{3/2} \sqrt{\left(\frac{16 \cdot K \cdot T \cdot \Delta v}{M_s \cdot Q_s} \right)} \quad (2.18)$$

ove M_s e Q_s sono rispettivamente la massa ed il fattore di merito degli specchi.

Dalla equazione (2.17) segue che il rumore termico cresce alle basse frequenze.

2.d) Rumore sismico

Dalla equazione (1.3) e (2.3), segue che il rumore sismico cresce alle basse frequenze con $1/\Omega^4$ (per $\Omega > \omega_0$); in fig. 2.3 si vede che tale rumore produce, nell'interferometro di Monaco, un peggioramento della sensibilità a 10 Hz di un fattore 10^7 , rispetto a quella misurata a 10^3 Hz. A contribuire a tale peggioramento vi è anche l'effetto del rumore del laser alle basse frequenze; una misura indipendente di quest'ultimo rumore non è però ancora stata effettuata e sarà uno degli argomenti della nostra sperimentazione.

Referenze del secondo capitolo

(1) Misner, Thorne, Wheeler, "Gravitation"; Landau, "Teoria dei

Campi"

(2) R.W.P. Drever et al., Applied Physics, B 31, 97-105 (1983)

(3) A. Rudiger et al., proc. Texas Conference, Dec. 11986

(4) C.M. Caves: Phys. Rev. D 23 (1981) 1693. Walls: Nature, vol. 306, Nov. 1983, pag. 141. Y. Yamamoto et al., Physical Review A, vol. 32, ott. 1985, pag. 2287. Y. Yamamoto et al., Physical Review A, vol. 33, maggio 1986, pag. 3243.

(5) R. Del Fabbro, A. Di Virgilio, A. Giazotto, H. Kautzky, V. Montelatici, D. Passuello, A. Stefanini; " Sismic noise reduction, using a 3-dimentional N-fold harmonic oscillator", da pubblicare.

(6) D. Shoemaker et al., proc. Fourth Marcel Grossmann Meeting, Rome, June 1985

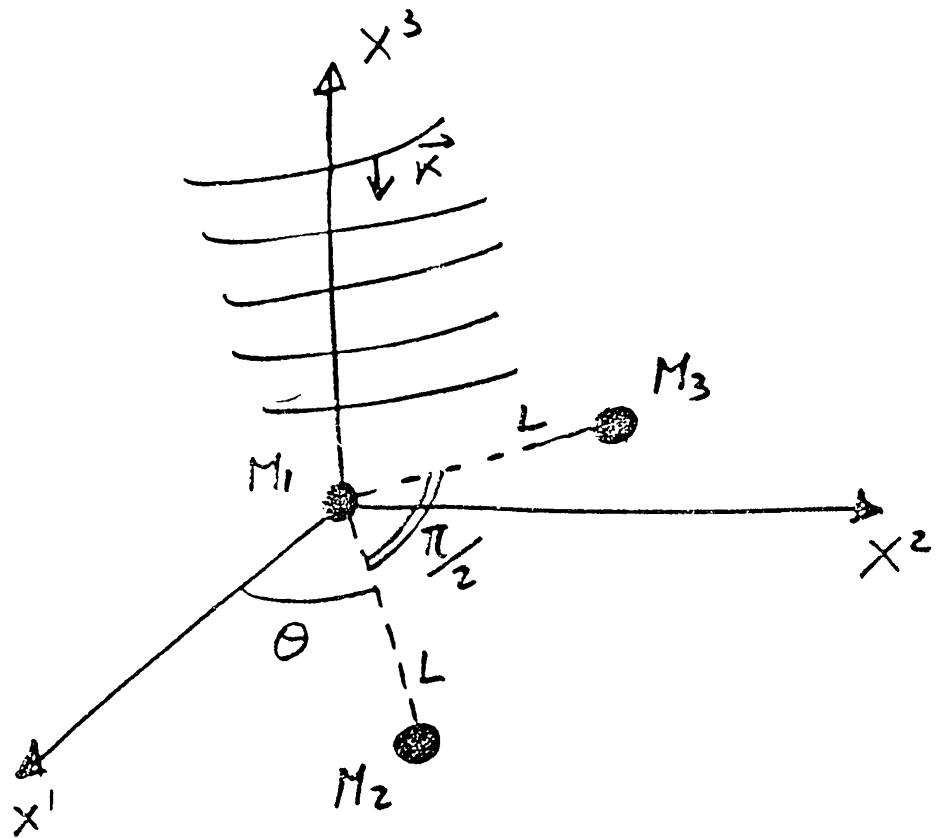


Figura 2.0 -Diagramma che illustra la disposizione di una antenna interferometrica a due rami normali fra loro e la direzione della polarizzazione di un'onda gravitazionale incidente.

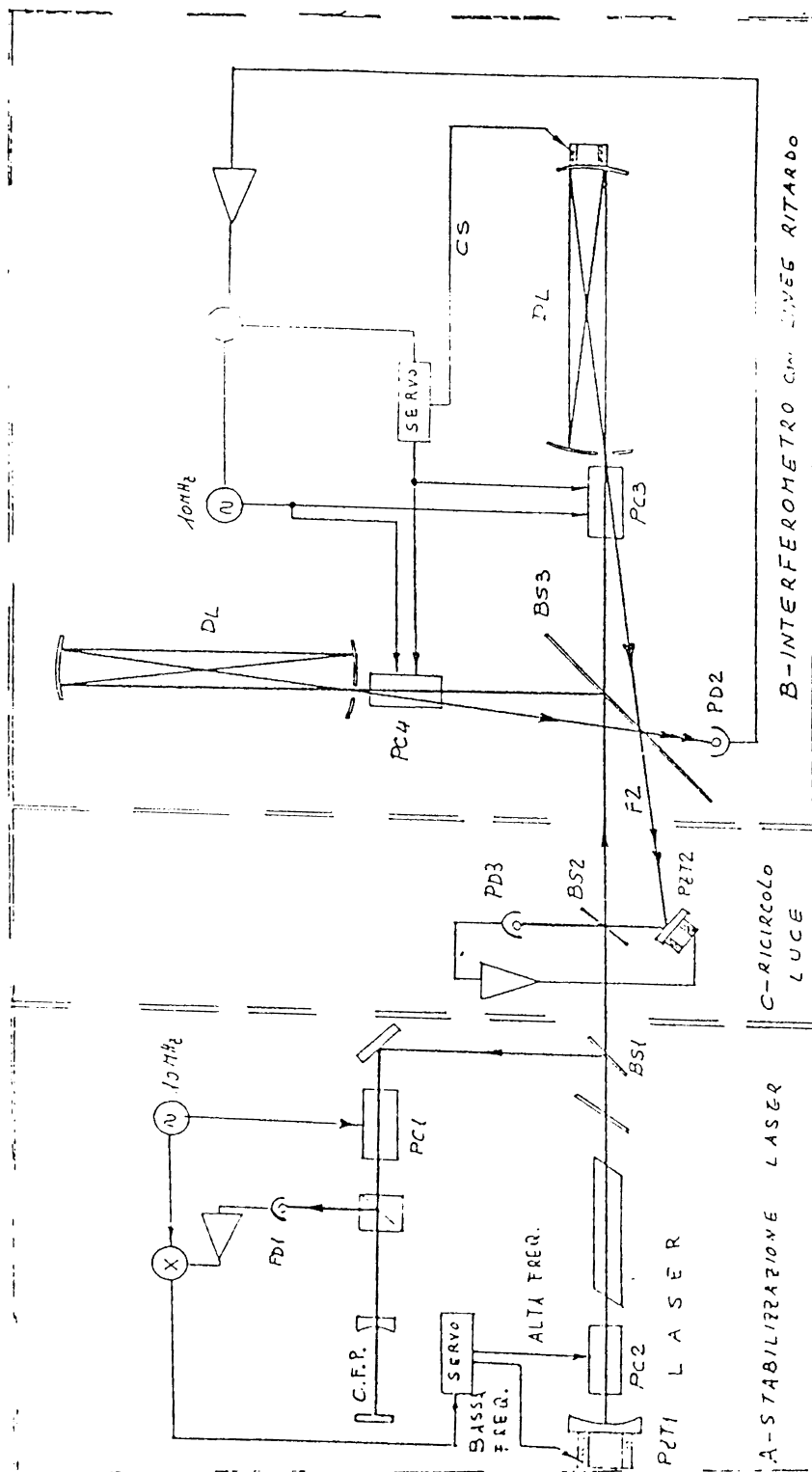


Figura 2.1 -Schema a blocchi di un interferometro Michelson di tipo a delay-line (multipass) con ricircolazione della luce. Nello schema e' mostrato anche il circuito di stabilizzazione del laser.

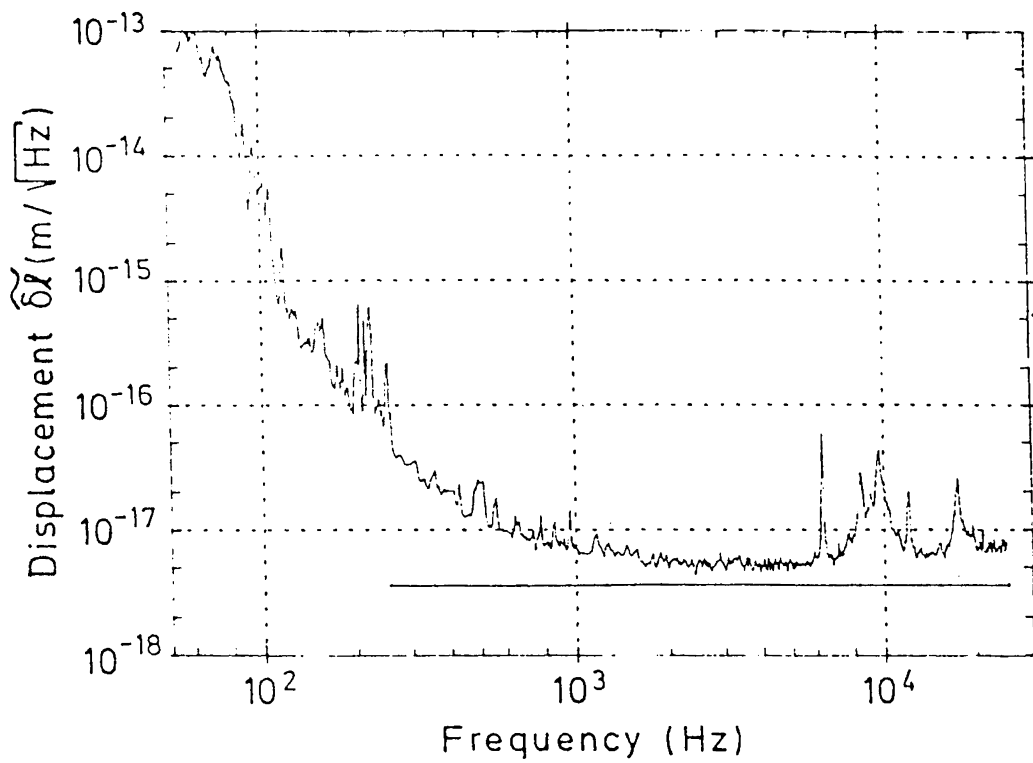


Figura 2.2a-Sensibilita' dell'interferometro di 30 m di Garching con 55 riflessioni, per un lunghezza totale di cammino ottico di 3.3Km (Agosto 1985). La linea piena orizzontale indica lo shot-noise calcolato.

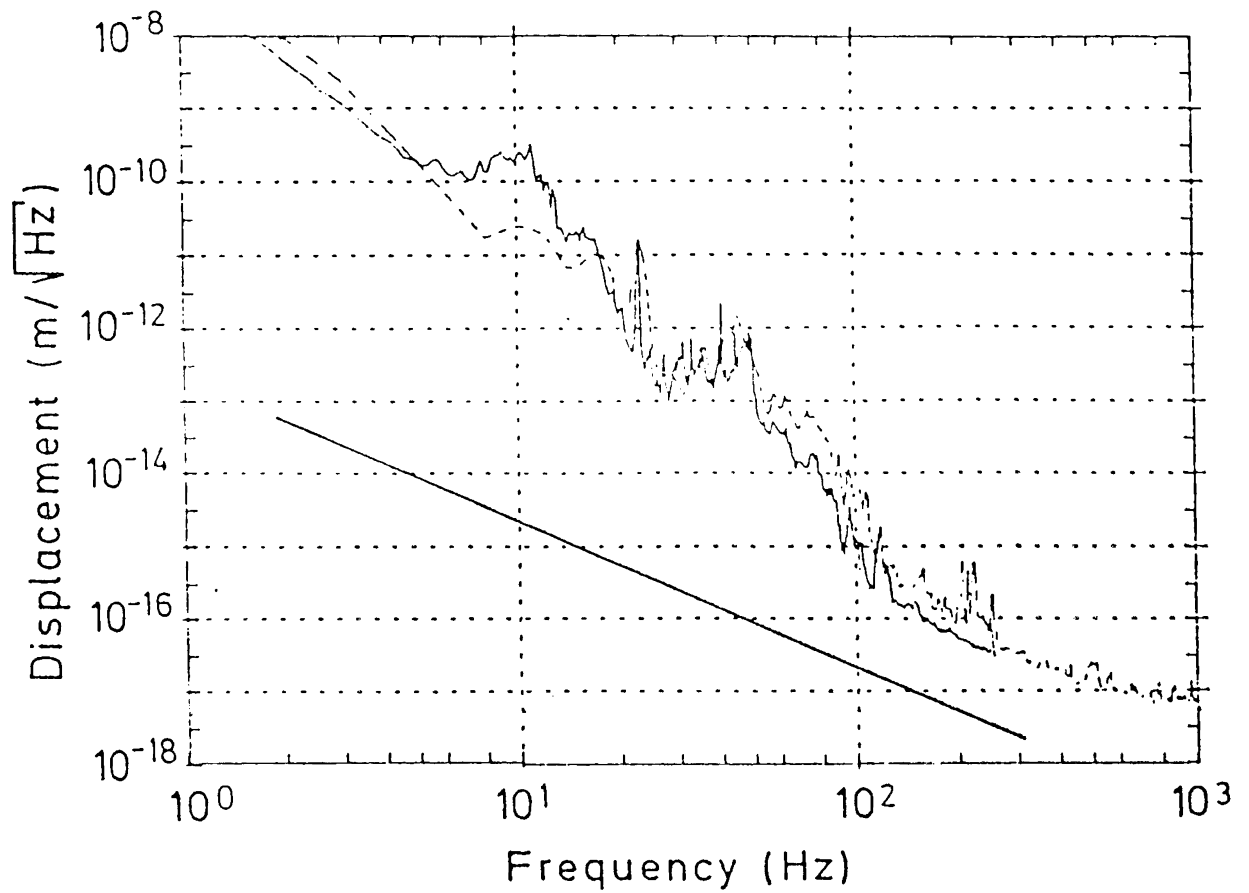


Figura 2.2b-Uscita dell'interferometro a bassa frequenza. La curva piena e' l'andamento predetto, quella tratteggiata e' quella sperimentale. La linea retta con con pendenza $1/f^2$ e' il rumore termico calcolato degli specchi.

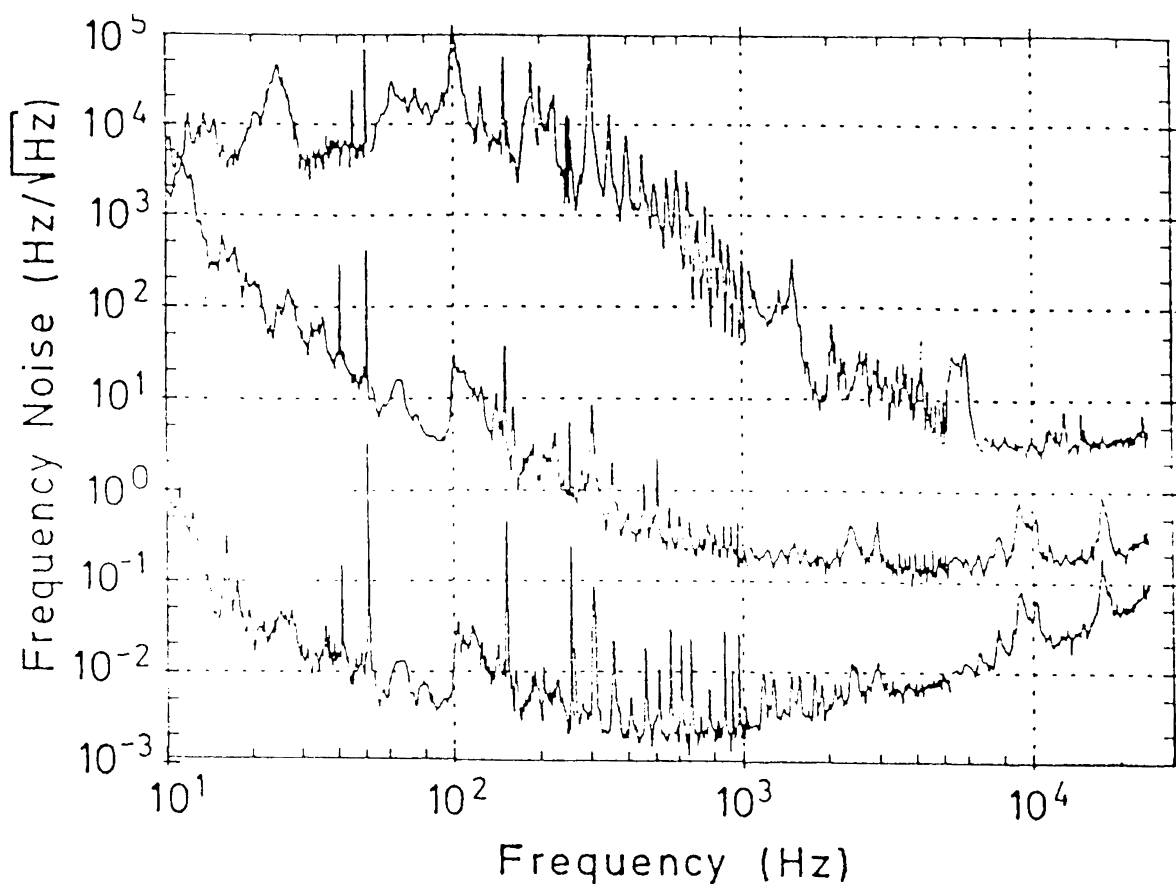


Figura 2.3 -Rumore di frequenza di un fascio laser in $\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$. Il rumore e' in una larghezza di banda di 1 Hz. La curva piu' alta corrisponde ad un fascio laser non controllato. La curva intermedia mostra il livello di rumore quando venga usata una cavita' Fabry-Perot come riferimento in frequenza, mentre la curva in basso e' il rumore quando si aggiunge l'interferometro come ulteriore cavita' di riferimento.

Capitolo III°

Le attività dei gruppi proponenti nella ricerca delle Onde Gravitazionali ed in aree affini

A) Gli esperimenti di Pisa.

A.1) Isolamento attivo: l'esperimento IRAS*

Dalla equazione (2.3) segue che i termini di rumore sismico ξ_{Ti} , η_{Ti} sono moltiplicati per $\omega_0^2 = g/l$, ove g è l'accelerazione di gravità; facendo l molto grandi si ottiene contemporaneamente isolamento sismico e bassa frequenza di risonanza.

Un modo per far crescere l è quello di spostare il punto di sospensione del pendolo per mezzo di un trasduttore elettromeccanico (PZT + Motore DC); il segnale dato al trasduttore deve essere proporzionale alla differenza delle coordinate X_M della massa e del punto di sospensione X_P . Le equazioni di moto di X_P e X_M sono quindi

* Interferometro per la Riduzione Attiva del Sisma

$$X_P = X_S + A (X_M - X_P) \quad (3.1)$$

$$X_M = \frac{\omega_0^2 X_P}{-\Omega^2 + i \Omega/\tau + \omega_0^2} \quad (3.2)$$

da cui segue:

$$X_M = \frac{\omega_0^2}{1 + A} \frac{X_S}{-\Omega^2 + i \Omega/\tau + \omega_0^2/(1+A)} \quad (3.3)$$

ove A è l'amplificazione. Dalla equazione (3.3) si vede che la lunghezza virtuale del pendolo diventa $l \cdot (1+A)$.

Nel 1984 è iniziata presso la sede INFN di Pisa la realizzazione dell'esperimento IRAS (Interferometro per la Riduzione Attiva del Sisma); lo scopo era di investigare fino a quale lunghezza virtuale potesse essere portato un pendolo con $l = 1$ m ed $M = 100$ Kg. In un esperimento precedente (1), un pendolo di 8 cm, dotato di sensore capacitivo, era stato allungato fino a 5 m ($A \sim 60$). Il sensore capacitivo ha due notevoli inconvenienti : il primo è che si creano forze elettrostatiche che perturbano la massa, il secondo è che tale sensore permette spostamenti non più grandi di 10^{-4} m, mentre gli spostamenti del terreno per $\nu > 10^{-2}$ Hz sono maggiori.

Un sensore interferometrico non ha questi due inconvenienti, ma la sua risposta sinusoidale agli spostamenti ne aveva impedito fino ad allora l'uso qualora questi ultimi fossero grandi.

Per risolvere questo problema abbiamo ideato un Inseguitore Analogico della Fase (APF) (2), per mezzo del quale si riesce ad estrarre la fase \emptyset dalla funzione $\text{sen}\emptyset$ in real time e con una

dinamica di ~ 500 rad a 0.5 Hz.

Lo schema dell'apparato è mostrato nella fig. 3.1. Il pendolo è composto da una massa di 100 Kg sorretta da due sottili strisce di acciaio lunghe 1.3 m attaccate ai punti S_1 e S_2 . A 0.3 m da S_1S_2 il trasduttore composto da PZT1 e da un motore DC si congiunge alle strisce.

L'interferometro viene illuminato da un laser HeNe da 5 mW il cui fascio viene diviso dal beam splitter BS; il fascio superiore raggiunge lo specchio M_1 , mentre quello inferiore raggiunge lo specchio M_2 sulla massa passando attraverso l'APF. I due fasci ritornano a BS, interferiscono, e le intensità sono raccolte dai fotodiodi PD montati in controfase.

Il braccio di riferimento (RA) svolge la seguente funzione: se il sisma genera una rotazione della struttura attorno ad X_p ed il RA non può liberamente ruotare attorno a P, nonostante non vi sia stata traslazione, PZT1 riceve un segnale in modo tale da rendere i due cammini ottici identici, il che non può avvenire mai nel corso di una rotazione. Se invece RA è libero, nelle rotazioni rimane parallelo al filo di sospensione e quindi non si genera alcun segnale di FB.

Nella fig. 3.2a e 3.2b è mostrato il segnale dell'interferometro con $A = 0$ ed $A \neq 0$ rispettivamente allorchè si crea un sisma artificiale con frequenze multiple di 10 Hz. Il rapporto dei picchi a 10 Hz fornisce $A = 1700$, il che equivale ad una larghezza $A \cdot l = 1,7$ Km, ed una riduzione di noise in un grado di libertà pari a $1,4 \cdot 10^{-6}$ (3).

A.2) Isolamento passivo

L'esperimento IRAS ha dimostrato che è possibile raggiungere elevatissimi livelli di attenuazione in un grado di libertà con un singolo stadio; ma ha anche mostrato che è molto complicato sia inibire l'instabilità con un'amplificazione $A \sim 1700$, che allinere un sistema ottico che deve effettuare larghi spostamenti. Ha soprattutto mostrato quale complessità dovrebbe avere un sistema attivo con attenuazione tridimensionale (3D).

A causa di queste considerazioni abbiamo intrapreso nel 1986, presso l'INFN di Pisa, un esperimento di isolamento passivo 3D, che dovrebbe raggiungere a 10 Hz un'attenuazione nel piano orizzontale di 10^{-11} e nella direzione verticale 10^{-9} con una massa di prova di 400 Kg.

L'idea consiste nel creare in un pendolo multiplo a 7 masse, sette molle per l'isolamento verticale. Per ragioni di isteresi, rigidità, impossibilità di regolazione al variare del carico, abbiamo scartato le molle meccaniche adottando invece molle a gas.

Nella fig. 3.3 e' mostrato lo schema di principio della molla a gas. Ogni pistone puo' muoversi per mezzo di un bellows che effettua anche la tenuta del gas. La costante elastica totale (gas + bellows) e':

$$K = \gamma S_0 / V (Mg + P_0 S_0) + K_{\text{bellows}} \quad (3.4)$$

dove γ e' la costante adiabatica del gas, S_0 l'area efficace totale dei bellows, V il volume del contenitore, P_0 la pressione esterna al

contenitore e K_{bellows} la somma delle costanti elastiche dei bellows.

Nel 1986 abbiamo costruito un prototipo di molla a gas, avente $V=94$ litri, $S_0=5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$ e massa di 60 Kg; esso puo' funzionare con due bellows e $M < 500 \text{ Kg}$ oppure con 4 bellows ed $M < 10^3 \text{ Kg}$, (4). Nella fig. 3.4 e' mostrato il grafico di K in funzione di M per $M < 400 \text{ Kg}$ e con 4 bellows. Nella curva di fig. 3.5a e' mostrata l'attenuazione verticale in funzione della frequenza per $0 < \nu < 100 \text{ Hz}$, nel caso in cui ci siano 2 bellows; essa e' stata ottenuta eccitando in verticale con un PZT il filo di sospensione e misurando con due accelerometri lo spostamento del punto di sospensione e il segnale residuo sulla massa M . La frequenza propria del sistema con $M=400 \text{ Kg}$ e' $\nu_0=1.2 \text{ Hz}$; ed infatti si vede dalla fig. 3.5b che a $\nu=10 \text{ Hz}$ si ha l'attenuazione canonica del tipo $(\nu_0/\nu)^2=10^{-2}$. I picchi a $\nu > 60 \text{ Hz}$ sono dovuti a risonanze della massa M ed all'accoppiamento sonico diretto dell'eccitazione e l'accelerometro posto sulla massa.

Questo prototipo ha mostrato la notevole versatilita' della molla a gas, la sua adattabilita' ai carichi piu' disparati e soprattutto la sua bassa compliance.

Per quanto riguarda i due gradi di liberta' orizzontali il nostro set-up sperimentale e' un doppio pendolo; abbiamo misurato la funzione di trasferimento orizzontale e il risultato e' mostrato in fig. 3.5c. Questa misura e' stata effettuata per punti per permettere all'accelerometro (Bruel-Kjael, tipo 3860) di rivelare un segnale maggiore del suo noise. La fig. 3.5c mostra l'attenuazione teorica in funzione della frequenza; al di sopra dei 20 Hz le misure si discostano dalle previsioni teoriche perche' il segnale dovuto all'accoppiamento sonico diretto dell'accelerometro diventa piu' grande del segnale residuo sulla massa.

Per mezzo dei dati sperimentali ricavati dallo studio del

prototipo sopradescritto e' possibile fare delle previsioni teoriche per un sistema di attenuazione cosi' concepito: un sistema di 6 masse da 100 Kg ciascuna disposte in cascata e con una massa terminale di prova di 400 Kg e con i baricentri separati di circa 0.7 m. Questo sistema forma un pendolo composto, che ha nel piano orizzontale un'attenuazione di $\sim 10^{-11}$ a 10 Hz; poiche' ciascuna delle 6 masse e' una molla a gas, ed il sistema e' a sua volta sospeso ad una ulteriore molla a gas, il sistema complessivo produce un'attenuazione di 10^{-9} a 10 Hz. Assumendo un fattore di conversione di rumore verticale in orizzontale di 10^{-2} si ottiene un'attenuazione nella direzione orizzontale di $\sim 10^{-11}$.

In fig. 3.6 e 3.7 sono mostrate rispettivamente le attenuazioni teoriche verticale e orizzontale in funzione della frequenza; i sette picchi di risonanza sono dovuti alla presenza di sette masse e sette molle. La curva di attenuazione verticale è ottenuta facendo uso della rigidità K di fig. 3.4.

In fig. 3.8 è mostrato lo schema costruttivo dell'attenuatore; esso consiste in due camere a vuoto verticali alte 4.9 m e aventi 1 m di diametro connesse ad una camera orizzontale nella quale sono sospese le masse di prova. Ogni catena ha il primo attenuatore sorretto da 4 PZT al fine di impartire un moto verticale artificiale; tale moto sarà misurato per mezzo di un accelerometro collegato con una delle basi del primo cilindro a pressione. Questo primo cilindro agisce solo da molla verticale; un ulteriore PZT genera spostamenti del punto di sospensione della catena nel piano orizzontale.

Il noise artificiale residuo sulla massa terminale di 400 Kg sarà misurato, in un primo tempo, per mezzo di uno stack di 256 anelli piezoelettrici di \varnothing 10 mm e spessore 2 mm collegati elettricamente

in parallelo, ma connessi meccanicamente in serie al fine di unire le due masse di prova. La frequenza circolare di risonanza ω_0 del sistema composto dalle due masse da 400 Kg e dallo stack di PZT è dell'ordine di 15 Hz.

Se X_7 è la coordinata di una delle masse di prova, allorchè si sposta il punto di sospensione con un sisma artificiale di ampiezza X_0 , allora segue che la contrazione dello stack di PZT è

$$X_7 - X'_7 \cong \frac{H \cdot (-\Omega^2)}{-\Omega^2 + i \Omega/\tau + \omega_0^2} X_0 \quad (3.5)$$

ove H è l'attenuazione, τ è il tempo di rilassamento totale e X'_7 la coordinata della seconda massa di prova; dalla equazione (3.5) segue che per $\Omega > \omega_0$ la presenza del rivelatore non altera la misura.

Da questo metodo ci aspettiamo una sensibilità sufficiente a determinare $H > 10^{-10}$ per $\Omega > \omega_0$.

Per aumentare la sensibilità è necessario fare uso di un sensore interferometrico. L'attenuatore ora descritto è attualmente in costruzione presso la sezione INFN di Pisa.

A.3) Stabilizzazione del Laser ed Interferometro

Il gruppo di Pisa in collaborazione con il gruppo di Orsay (Francia) sta effettuando la costruzione di un sistema di stabilizzazione del laser COHERENT INNOVA 90/6. Lo schema di principio è mostrato nel blocco A della fig. 2.1.

In questo esperimento si fa uso dei seguenti accorgimenti per

limitare il rumore alle basse frequenze:

a) l'elettronica di controllo ha il sistema di feed-back con un guadagno particolarmente elevato alle basse frequenze.

b) La cavità F.P. è sospesa con una sospensione a pendolo e quindi dovrebbe deformarsi relativamente poco per effetto del sisma.

In fig. 3.9 è mostrato lo schema dell'interferometro compatto, avente frequenze meccaniche proprie molto elevate, che stiamo costruendo al fine di misurare il rumore del sistema laser precedentemente descritto. Questo interferometro dovrà, in un secondo tempo, essere montato sulle masse di prova del sistema di silenziamento per misurarne l'attenuazione a livello di $H \sim 10^{-11}$ a 10 Hz.

B) Gli esperimenti di Paris-Orsay

La ricerca del gruppo francese si svolge presso il "Laboratoire de gravitation et cosmologie relativiste", che è un laboratorio dell'Università Pierre e Marie Curie, associato al C.N.R.S..

A) I teorici lavorano principalmente a Parigi occupandosi della fisica degli esperimenti. In particolare essi hanno spiegato che la dinamica di un interferometro Fabry-Perrot a pendolo è interpretata da equazioni "ereditarie", non lineari e del secondo ordine. Tali equazioni danno luogo a generiche instabilità, che sono attualmente in esame in collaborazione con l'Università spagnola di Bilbao. I fisici che lavorano a questo studio teorico sono:

I. Bel ("Directeur de recherches" del CNRS)

J.L. Boulanger (studente)

N. Deruelle ("Attache'e de recherches" del CNRS)

Ph. Tourrenc (Direttore del laboratorio)

J.M. Aguirre Gabirra (Professore all'Universita' di Bilbao)

B) il gruppo sperimentale e' ad Orsay. Ha forti legami con il "Laboratoire de l'horloge Atomique" (CNRS) e l'Universita' di Paris-Sud. Negli ultimi due anni ha lavorato alla costruzione del prototipo di un interferometro, volto a dimostrare la fattibilita' di un interferometro di alta potenza, limitato dallo shot-noise. Le sue attivita' principali possono essere riassunte in quattro punti:

B.1) Teoria di interferometri Delay-Line e Fabry-Perot

Alcune parti di questo studio sono state completate:

-studio comparato delle funzioni di trasferimento degli interferometri Delay-Line (D-L) e Fabry-Perrot (F-P), per un'onda gravitazionale di direzione e polarizzazione arbitrarie. Il risultato principale e' che entrambe le due tecniche possono raggiungere sensibilita' paragonabili, ma la risposta del sistema F-P e' piu' semplice, percio' l'analisi del segnali e' piu' facile.

-studi comparati dell'influenza di piccoli disallineamenti sulle sensibilita' dei due sistemi. Esso ci ha mostrato che tutti gli spostamenti spuri di fase, risultanti da movimenti non voluti trasversi e rotazionali degli specchi dell'interferometri, sono effetti del second'ordine per il F-P (questo non e' vero se lo interferometro e' degenere, ma dovrebbe essere facile evitare questo problema), mentre sono effetti del prim'ordine per la D-L, a meno che gli specchi non possano essere aggiustabili in modo da soddisfare completamente la condizione di rientro (5).

-studi su interferometri che ricircolano la luce, cioè di vari sistemi ottici che permettono di moltiplicare per un fattore la potenza effettiva del laser, inserendo l'interferometro dentro una cavità ottica risonante, questo permette un guadagno netto sulla sensibilità se questa è dominata dallo shot-noise. Noi abbiamo studiato il "resonant recycling", in cui il tempo di accumulazione della luce nei due rami dell'interferometro è ottimizzato ponendolo uguale a mezzo periodo del segnale monocromatico che si vuol rivelare (6) (7). Entrambe le tecniche danno gli stessi risultati con questo tipo di ricircolo, ma il F-P ha il gran vantaggio che può essere più facilmente accordato su di una ottava, mentre una D-L di una data geometria non può essere accordata. Abbiamo anche studiato altri tipi di ricircolazioni in cui sempre ci è sembrata vantaggiosa l'alta versatilità dei sistemi F-P

-studi di tecniche di modulazione di fase; tecniche di modulazione con alte frequenze sono usate per eliminare sia il rumore $1/f$ dell'elettronica che il rumore di ampiezza che il laser ha alle basse frequenze. Abbiamo calcolato le sensibilità teoriche di queste tecniche, tenendo anche conto delle imperfezioni dell'interferometro per mezzo di un modello realistico. Abbiamo anche studiato una tecnica nuova, chiamata "modulazione esterna". In questo caso non si modula direttamente la fase dell'interferometro, ma un fascio esterno del laser, che viene usato come un oscillatore locale per la rivelazione del segnale dell'interferometro.

Queste tecniche sono utili per le tecniche di ricircolazione negli interferometri, infatti la modulazione esterna in fase diminuisce le perdite e aumenta l'efficienza della ricircolazione (8). Contiamo di dare presto una verifica sperimentale.

B.2) Studi sperimentali su di un interferometro rigido:

Abbiamo costruito un interferometro rigido (1m) per testare tecniche di modulazione, elettronica del rivelatore, ricircolazione etc... Questo interferometro pero' non puo' essere usato a basse frequenze, a causa di molte risonanze meccaniche, ma e' uno strumento molto pratico e versatile, che ci permette di fare molti test da 10 KHz in su. Potremmo usarlo per dimostrare per la prima volta il funzionamento di un sistema F-P limitato dallo shot-noise e raggiungere una sensibilita' di $8 \cdot 10^{-18}$ m/ HZ . Di recente siamo stati in grado di eseguire il nostro primo esperimento di ricircolazione della luce; l'incremento effettivo in potenza e' ancora modesto, solo un fattore 7, a causa di perdite nelle modulazioni in fase, ma l'incremento in sensibilita' e' esattamente quello che ci si aspetta in queste condizioni. Abbiamo anche eseguito degli esperimenti preliminari con modulazione esterna.

Questo interferometro e' anche usato per testare vari trasduttori che permettono il controllo remoto dell'allineamento delle ottiche.

B.3) Realizzazione di sistemi laser appropriati

La prima generazione di grandi interferometri richiede 20-25 Watts su di una singola riga, per mezzo di un laser potente ultrastabilizzato nel visibile o nell'infrarosso. Abbiamo iniziato con un laser a ioni di Argon, il piu' potente laser nel visibile su di una singola riga. In commercio si trovano laser di questo tipo che possono dare piu' di 5 Watt, e abbiamo anche dimostrato che si possono sommare in modo coerente i fasci provenienti da laser diversi, avendo cura di agganciarli in fase per mezzo di una tecnica di "injection locking" (9). In questo modo si possono sommare in

modo realistico 5 laser, ottenendo così 20 W, ma ci sembra chiaro che i laser Neodimio-YAG saranno presto adatti ad essere usati per i nostri scopi. Non solo essi hanno una maggiore efficienza e più alta potenza, ma si stanno evolvendo rapidamente a causa di due recenti scoperte tecnologiche: diodi laser di alta potenza, che possono essere usati in modo efficiente per il pompaggio dello YAG e la così detta geometria "slab" del cristallo, che migliora la geometria del fascio laser.

Abbiamo iniziato nel 1986 lo studio di un laser YAG di bassa potenza, ultrastabile, pompato con un diodo, esso verrà usato per l'"injection lock" di un oscillatore di alta potenza. È stato realizzato il laser pompato dal diodo ed è stato stabilizzato in frequenza (10). L'oscillatore di alta potenza è già in grado di fornire 5 W in una cavità ad anello, ma dovrebbe essere in grado di darci 20 W dopo alcuni semplici miglioramenti.

Abbiamo anche sviluppato l'elettronica e i trasduttori piezoelettrici veloci che ci permettono di stabilizzare in modo eccellente in frequenza tutti i nostri laser.

B.4) Isolamento sismico e frenamento delle masse di test

Abbiamo fatto dei miglioramenti su di un misuratore di posizione, del tipo "shadow-meter", a quattro gradi di libertà connesso ad una massa in alluminio di 15 Kg, sospeso come un pendolo semplice per simulare lo specchio di un interferometro; il frenamento e l'isolamento è ottenuto con un circuito di controreazione su 4 magnetini incollati sulla massa. Un sistema del genere permette il frenamento su quattro gradi di libertà, senza introdurre rumore su frequenze maggiori di 100 Hz. Esso permette

anche l'allineamento degli specchi sospesi. Potrebbe essere usato come prima generazione del sistema di controllo del pendolo multiplo pisano.

C) Attivita' del Gruppo di Napoli e Salerno

I proponenti provenienti dalle altre istituzioni (Un. di Napoli e Un. di Salerno) sono da tempo impegnati in aree di ricerca affini a quello in oggetto, quali:

i) **Cavita' Ottiche ed Interferometria**: nell'ambito del progetto FEL-LELA abbiamo studiato e messo a punto cavita' con specchi ad alta riflettivita' e sistemi di ottimizzazione ed allineamento del sistema (11) (12).

ii) **Studi di Sorgenti Astrofisiche di O.G.**: sulla base di risultati classici di Peters e Mathews, sulla radiazione gravitazionale emessa da sistemi binari compatti (13), abbiamo calcolato lo spettro della radiazione gravitazionale emessa da un campione di 1048 binarie. In particolare, abbiamo fatto riferimento ad un sottinsieme di binarie con elevata eccentricita' orbitale ($e > 0.3$), caratterizzate quindi da uno specchio di radiazione particolarmente popolato e potenzialmente piu' facilmente rivelabile (14).

iii) **Studio di Captatori di O.G. basati sull'Accoppiamento Gravitoelettrico**: abbiamo svolto un'analisi esaustiva di rivelatori di onde gravitazionali sia a bassa sia ad altissima frequenza, basati

sull'accoppiamento gravitoelettrico in risuonatori elettro-magnetici superconduttori (15), del tipo proposto da Braginsky (16) e sperimentato da Reece et al. (17), nel quadro d'un approccio originale all'elettrodinamica post maxwelliana.

iv) Generazione di O.G. da Campi Elettromagnetici: abbiamo discusso i criteri di disegno ottimale e valutata l'efficienza di sorgenti di laboratorio di onde gravitazionali basata sulla conversione elettrogravitazionale, sia di tipo coerente ad onda continua, sia di tipo impulsato (18).

D) Attivita' del Gruppo CNR-Frascati

i) Antenne Risonanti: sviluppo di tecniche di rivelazione di onde gravitazionali basate su antenne risonanti. Abbiamo risolto in generale, per via teorica, il problema dell'isolamento dell'antenna dai disturbi; inoltre abbiamo costruito con successo il sistema di smorzamento. Inoltre abbiamo in fase avanzata di sviluppo un sistema di rivelazione di piccoli spostamenti, basato su uno schema Quantum non Demolition.

ii) Gradiometria Gravitazionale: sviluppo di un gradiometro gravitazionale per le misure da satellite del gradiente di gravita' terrestre, utilizzabile anche per tentare di rivelare la quinta forza. Abbiamo costruito un prototipo di accelerometro e la parte meccanica di un gradiometro a un asse per le misure delle

componenti non diagonali. La sensibilita' prevista e' di circa 10^{-2} E.U. (1 E.U. = 10^{-9} sec⁻²)

Referenze del terzo capitolo

(1) N.A. Robertson et al., J. Phys. E; Sci. Instrum., Vol 15, (1982), 1101.

(2) E. Campani, A. Giazotto, D. Passuello, Rev. Sci. Instrum., 57, 79 (1986).

(3) A. Giazotto, E. Campani, D. Passuello, A. Stefanini, "Performance of an active pendulum with interferometric sensing", proc. IV Marcel Grossman Meeting on General Relativity, Rome june 1985;

A. Giazotto, D. Passuello, A. Stefanini, Rev. Sci. Instrum. 57, 1145 (1986);

A. Giazotto, "La riduzione attiva del rumore sismico nelle antenne per onde gravitazionali di bassa frequenza, l'Esperimento IRAS", Il Nuovo Saggiatore (1986);

A. Giazotto, invited talk to the VII Congresso di Relativita' Generale e Fisisca della Gravitazione, Rapallo, Italia, Settembre 1987. Proceedings in preparazione.

(4) R. Del Fabbro, A. Di Virgilio, A. Giazotto, H. Kautzky, V. Montelatici, D. Passuello, A. Stefanini, "Performance of a gas spring harmonic oscillator", da pubblicare;

R. Del Fabbro, A. Di Virgilio, A. Giazotto, H. Kautzky, V. Montelatici, D. Passuello, A. Stefanini; " Sismic noise reduction, using a 3-dimentional N-fold harmonic oscillator", da pubblicare.

(5) D. Fattaccioli et al., J. Optics (Paris), 1986, vol. 17, n° 3, pp.

- (6) J.Y. Vinet, *J. de Physique*, 1986, vol. 47, pp. 639-643
- (7) J.Y. Vinet, *Proc. Marcel Grossman conference*, Roma 1986
- (8) C.N. Man et al., da pubblicare
- (9) C.N. Man et A. Brilliet, *Optics Letters*, vol. 9, n° 8, pp. 333-334
- (10) D. Shoemaker et al., *Comunicazione alla CLEO conferenza*, Baltimora
- (11) S. Solimeno et al., " *Guiding Diffraction and Confinement of Optical Radiation*", Academic Press, New York, 1986
- (12) S. Solimeno e A. Torre, *Nucl. Instr. Meth.*, A237, 404, 1985
- (13) P.C. Peters e J. Mathews, *Phys. Rev.* 131, 435, 1963; P.C. Peters, *Phys. Rev.* 136, B1224, 1969
- (14) F. Barone et al., " *Atti VII Congresso Nazionale Relativita' Generale*", Rapallo (Italia), 1986
- (15) C. Biscari et al., " *Proc. IV Marcel Grossmann Meeting*", R. Ruffini (ed.), North Holland, 1985, 1357
- (16) V.B. Braginsky et al., *Sov. Phys. JEPT* 38, 865, 1973
- (17) C.E. Reece et al., *Phys. Lett*, 104A, 341, 1984
- (18) R. Capozzi et al., " *Atti VII Congresso Nazionale Relativita' Generale*", Rapallo (Italia), 1986

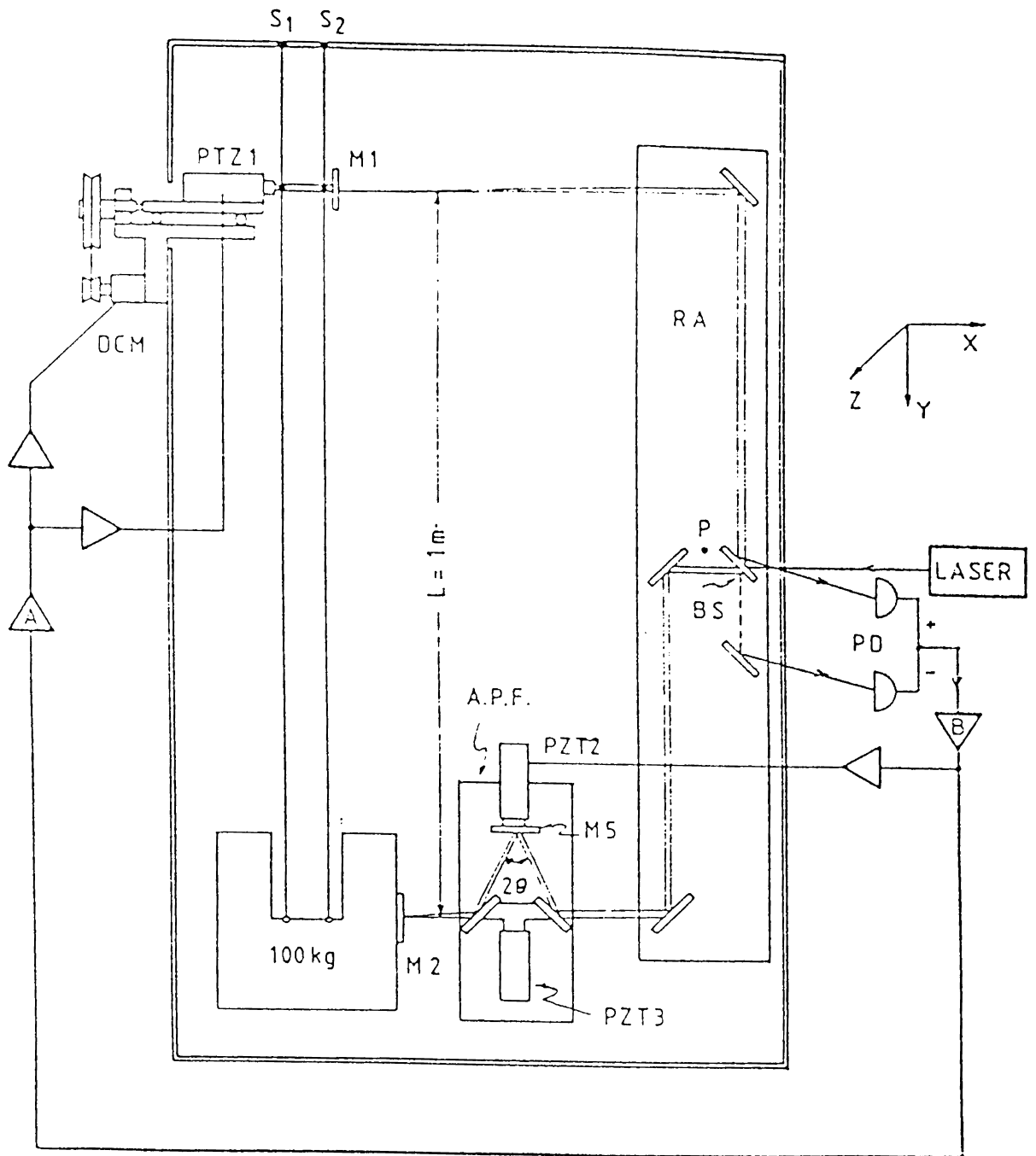
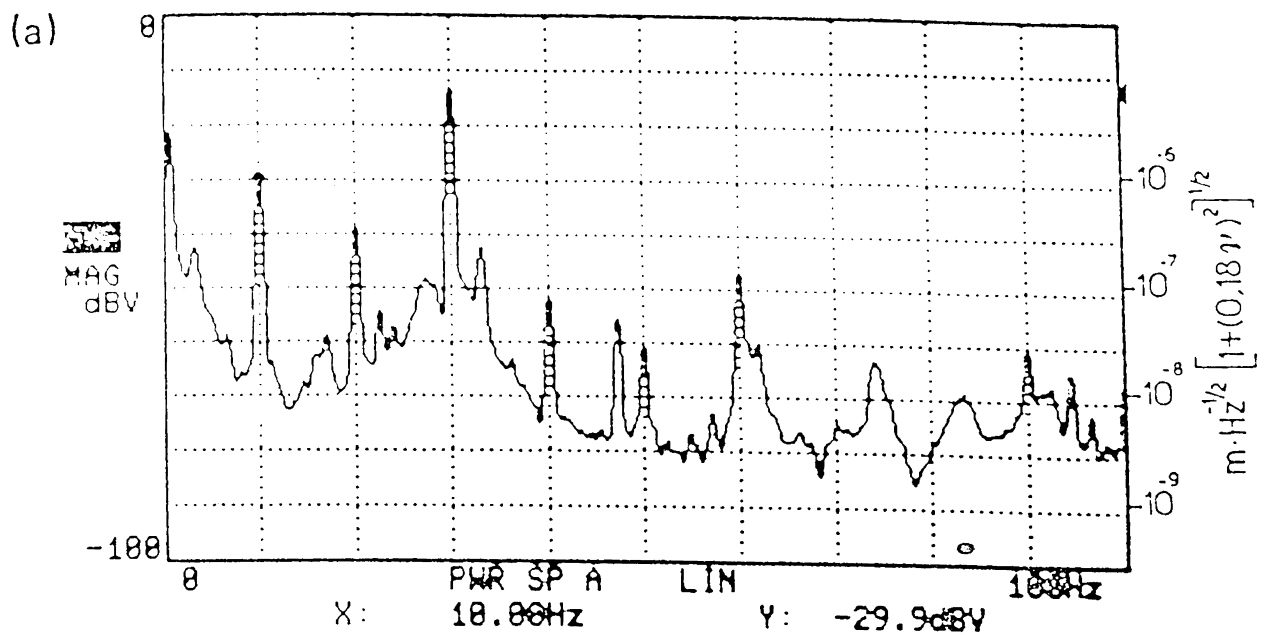
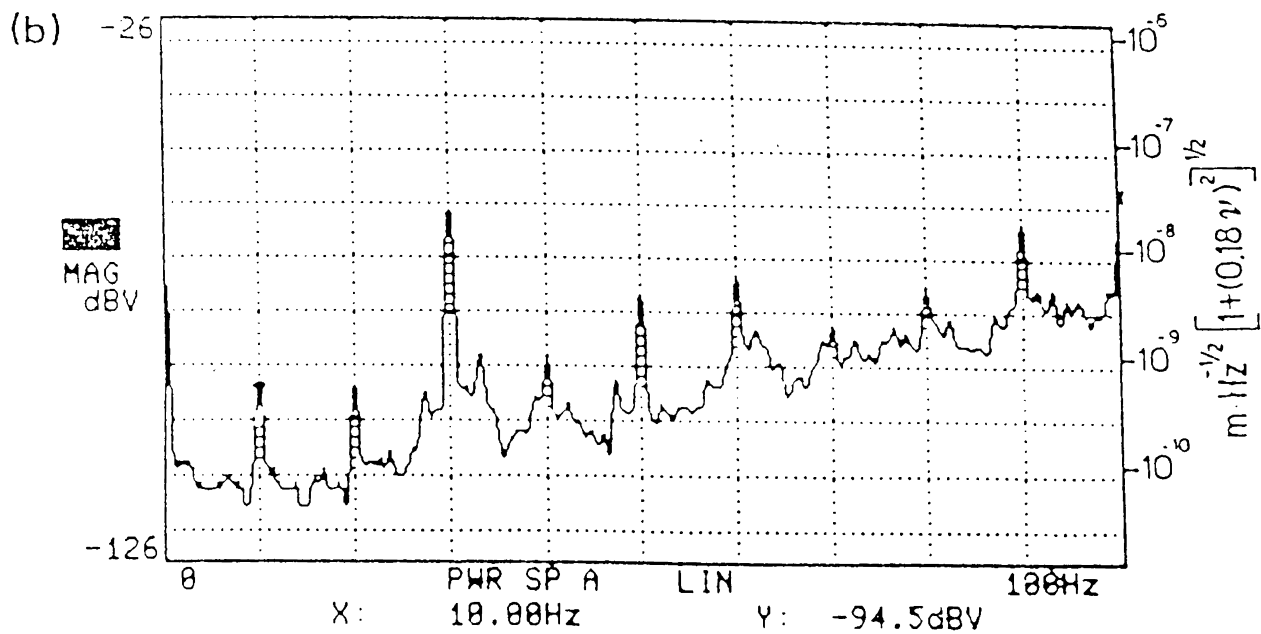


Figura 3.1 -Dispositivo sperimentale "IRAS", il sistema interferometrico e' incluso.



a



b

Figura 3.2 -Andamento spettrale fra 0 e 100 Hz del pendolo IRAS con braccio di riferimento disinserito, con $A = 0$ (a) e con $A \neq 0$ (b).

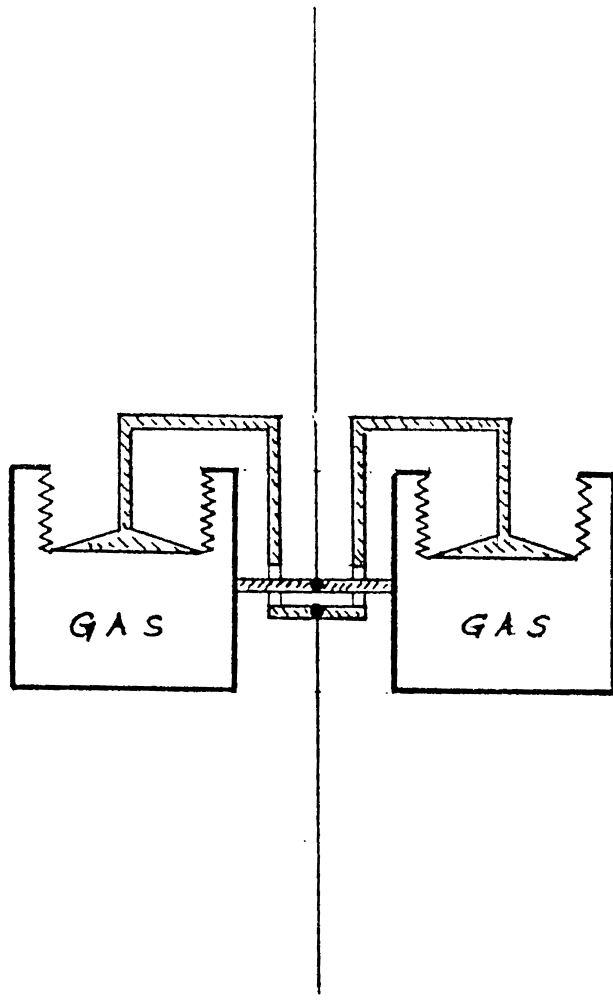


Figura 3.3 -Schizzo illustrante il funzionamento della molla a gas.

4 BELLOWS - $90 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$

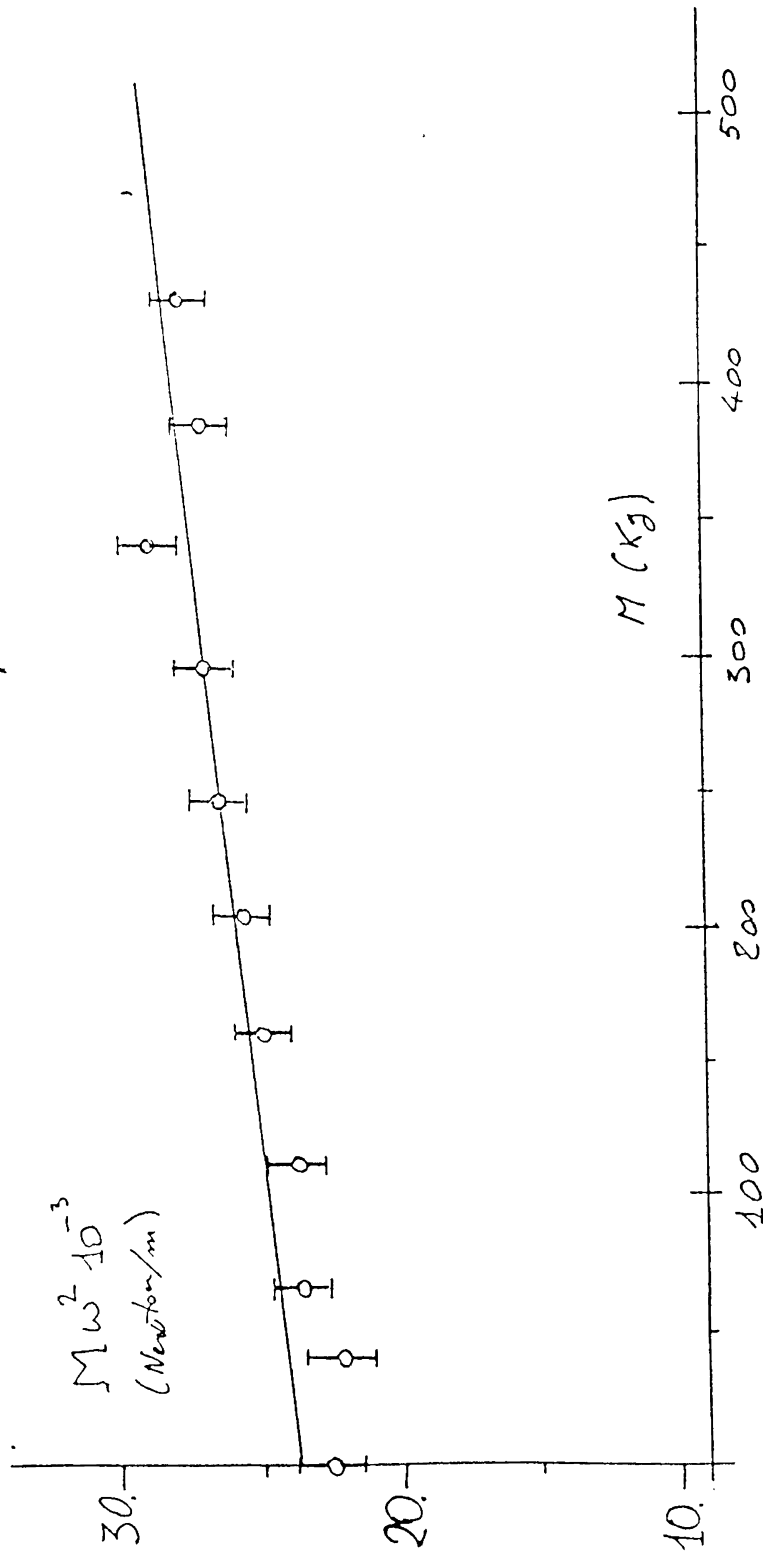


Figura 3.4 - Misura sperimentale e linea di fit della rigidità della molla a gas verso il peso della massa sospesa.

GAS SPRING

2 BELLOWS - 430 kg - $90 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$

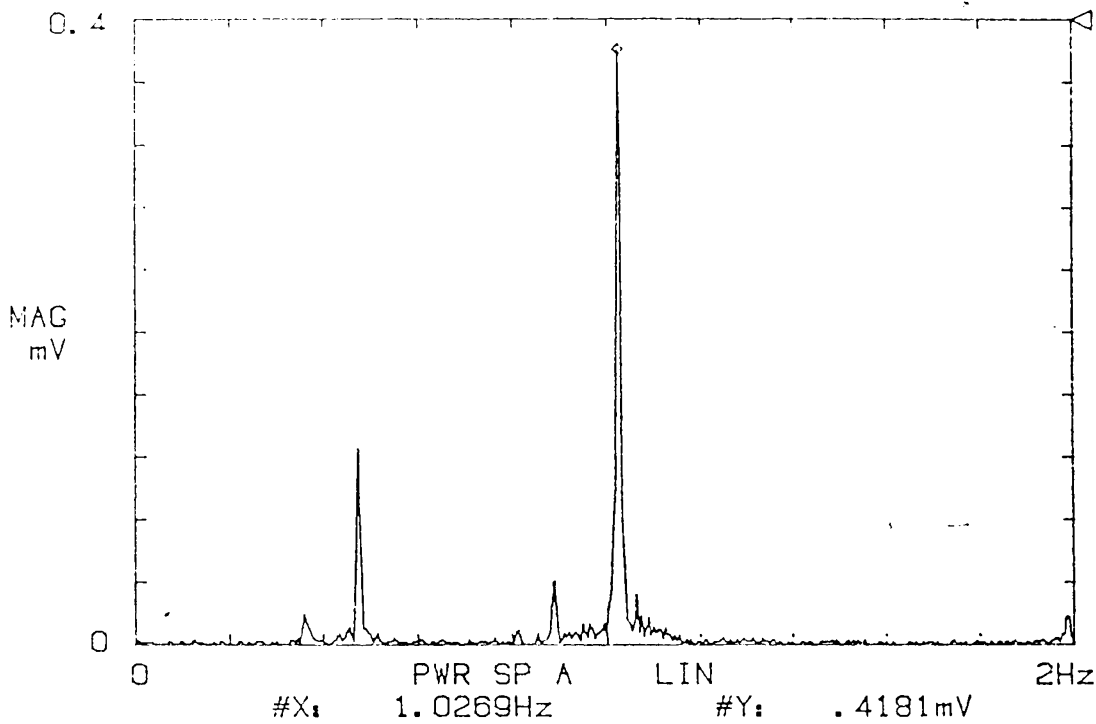


Figura 3.5a-Picco di risonanza della molla a gas.

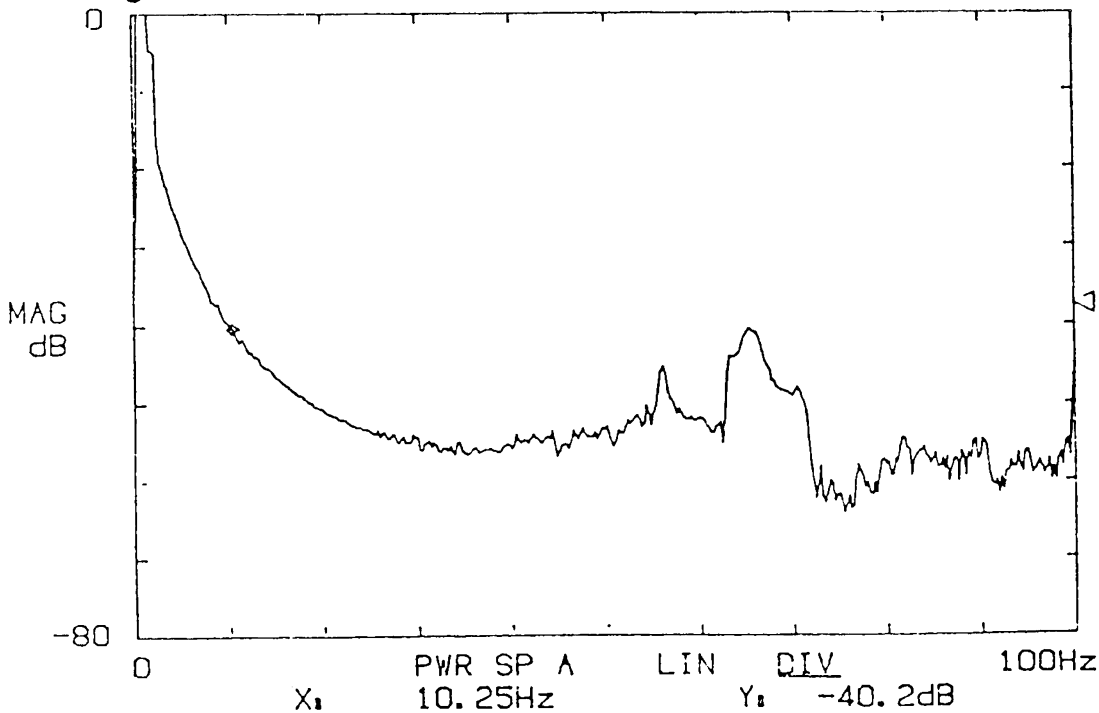


Figura 3.5b-Misura sperimentale di soppressione della componente verticale del sisma con la molla a gas nell'intervallo di frequenza da 0 a 100 Hz.

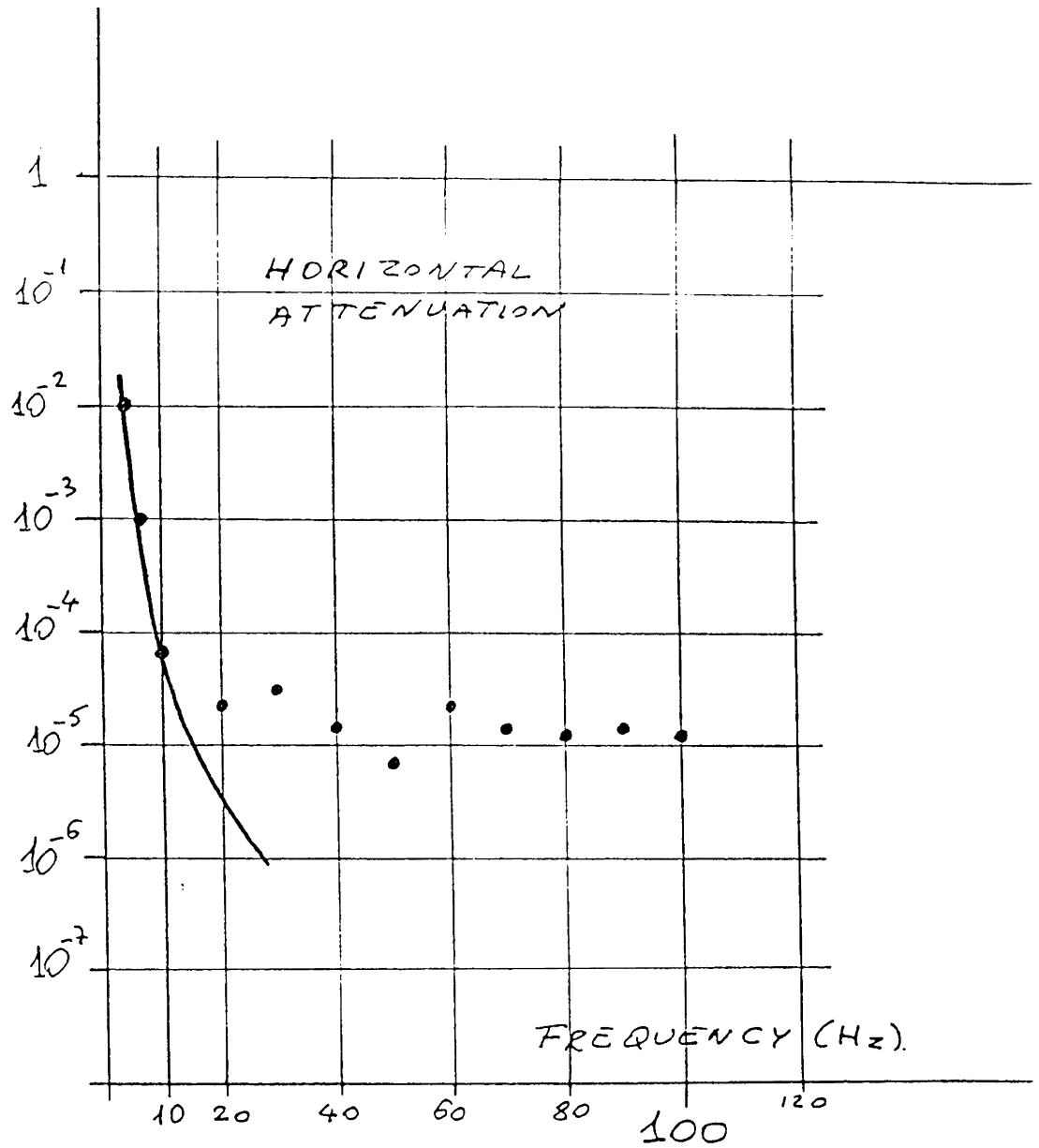


Figura 3.5c-Funzione di trasferimento orizzontale del doppio pendolo, misura effettuata nell'estate 1986.

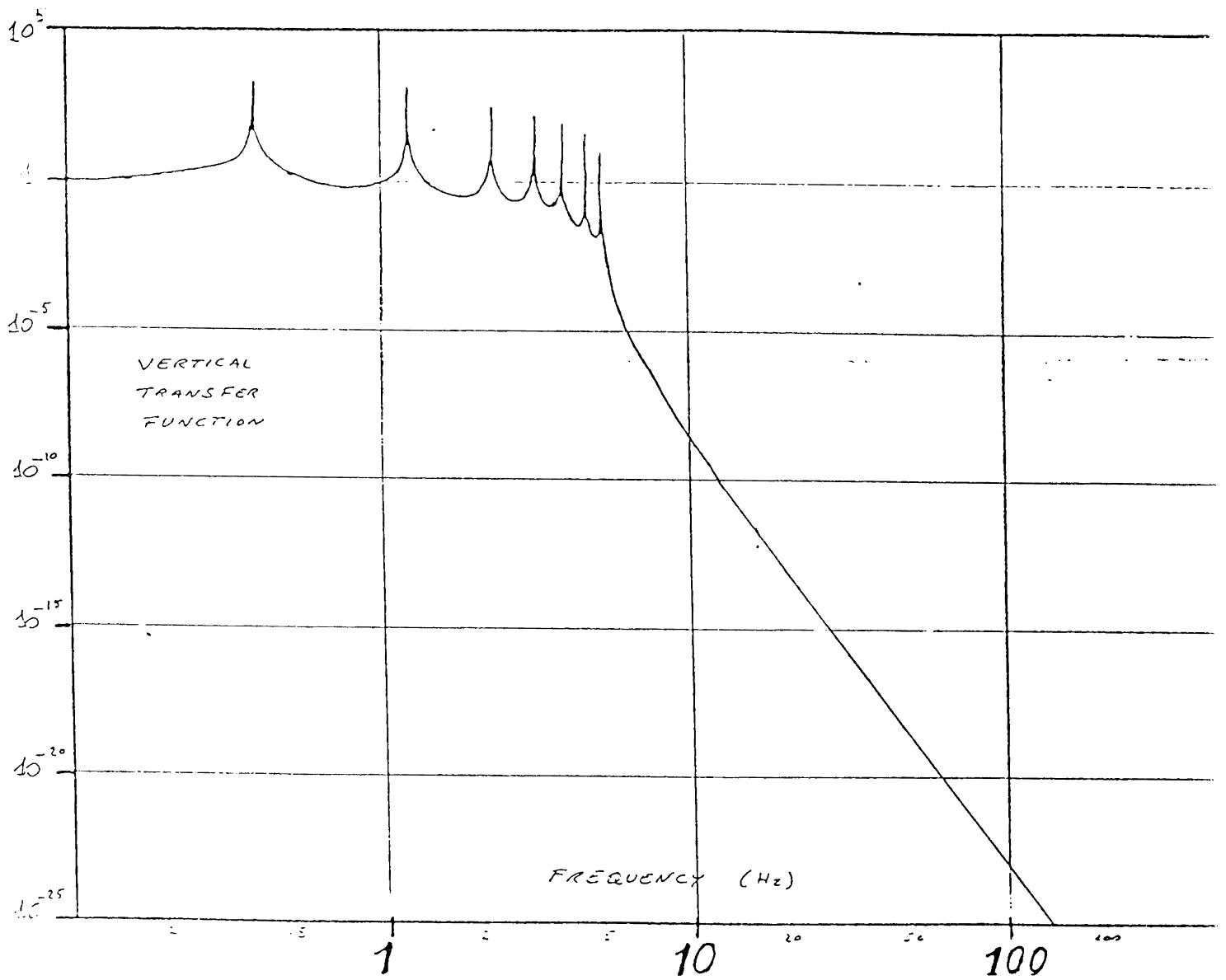


Figura 3.6 -Curva teorica di soppressione del sisma in direzione verticale da parte di una catena di sette molle a gas, poste in cascata, nell'intervallo di frequenza da 0.1 a 100 Hz.

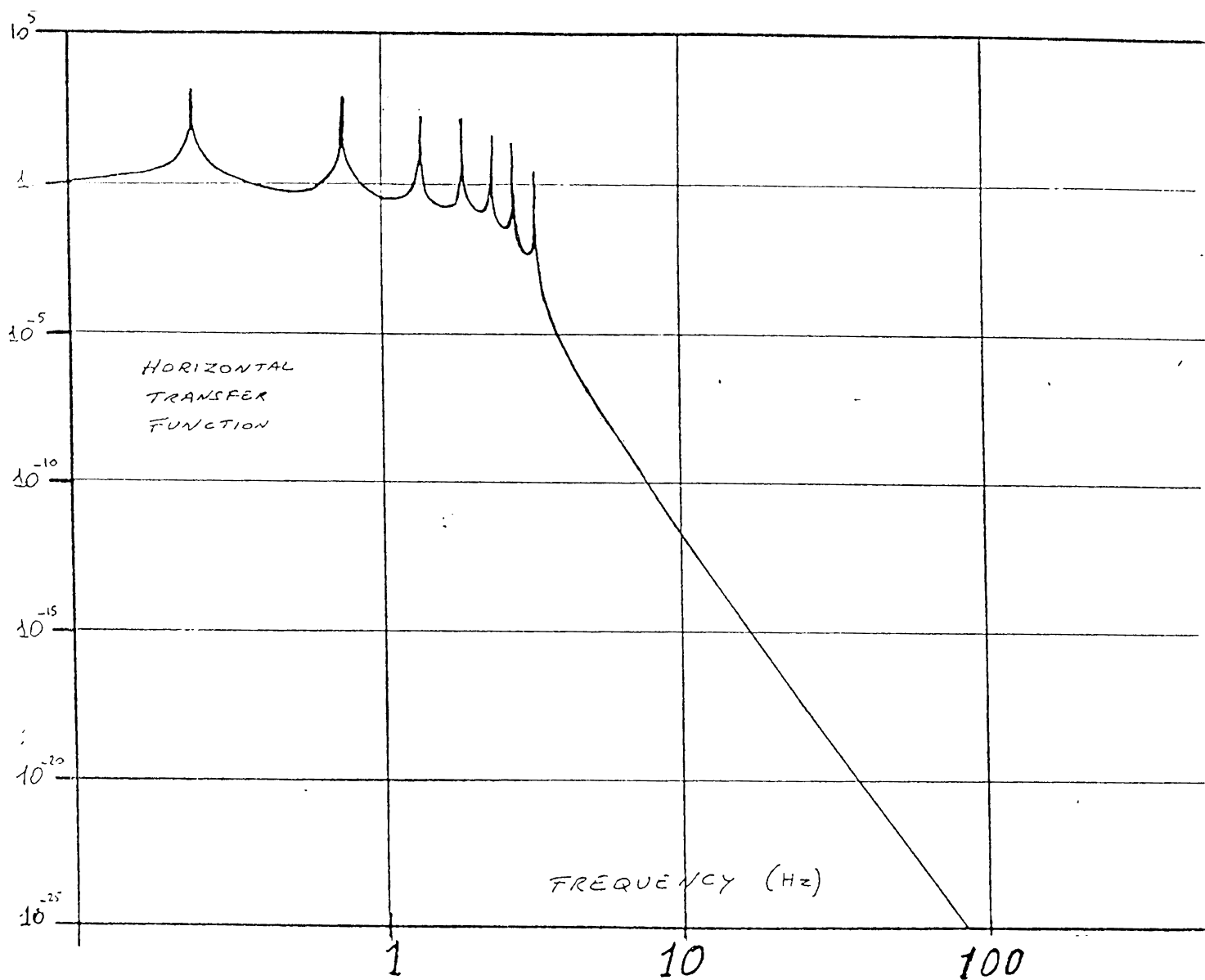


Figura 3.7 -Curva teorica di soppressione del sisma in direzione orizzontale da parte di una catena di sette pendoli, posti in cascata nell'intervallo di frequenza fra 0.1 e 100 Hz.

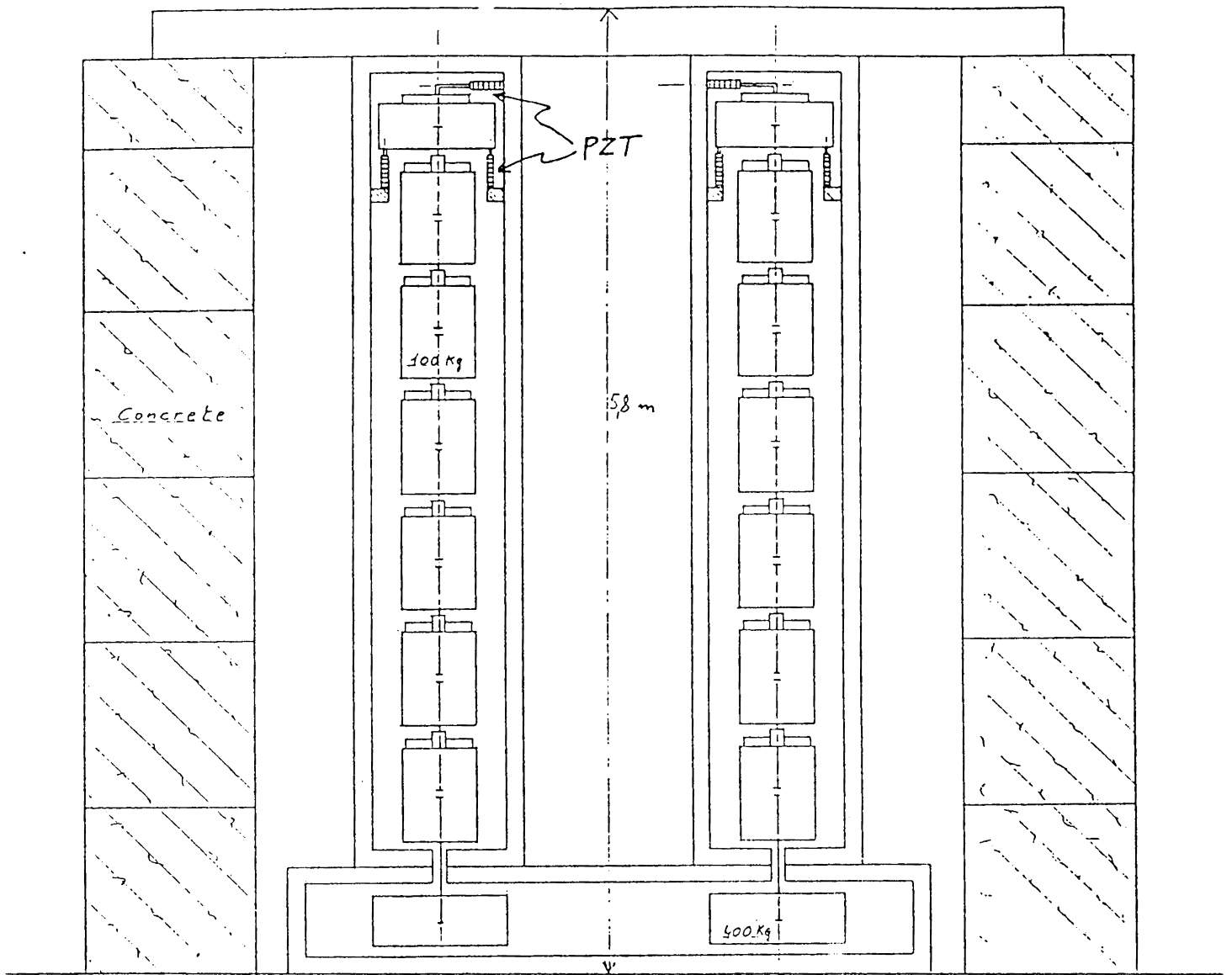
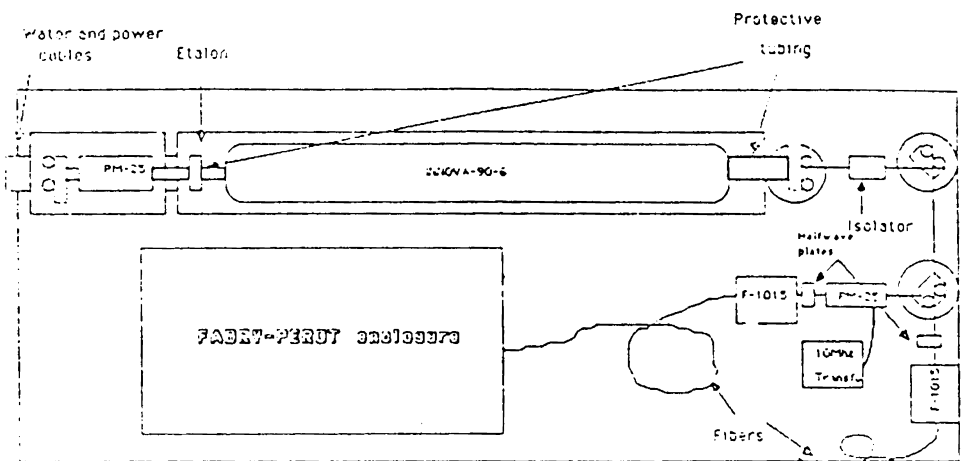
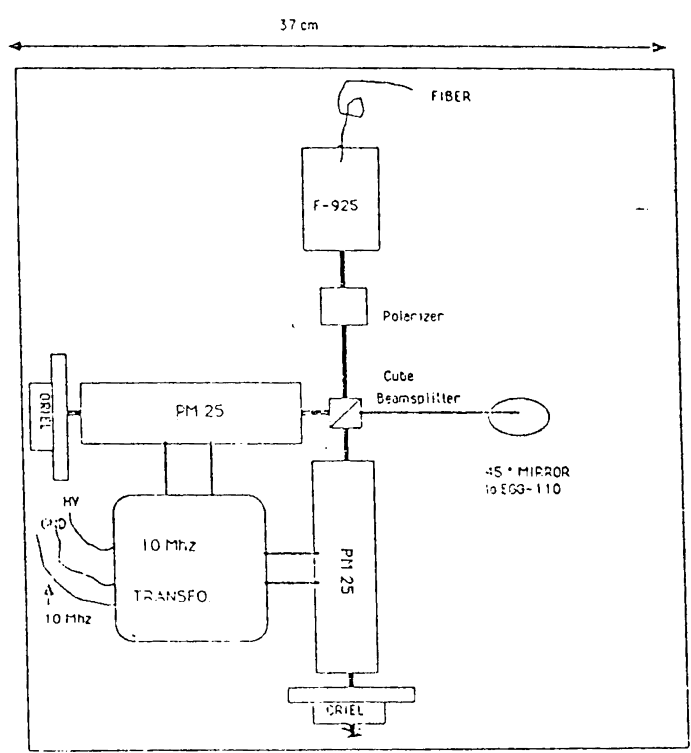


Figura 3.8 -Schema del dispositivo sperimentale per la misura dell'isolamento sismico in tre dimensioni: due catene di sette pendoli in cascata, con masse finali di prova di 400 Kg. Il tutto alloggiato in una unica camera a vuoto.



LASER TABLE SETUP



MICHELSON INTERFEROMETER SETUP

Figura 3.9 -Dispositivo sperimentale per la stabilizzazione in frequenza di un fascio laser tramite una cavitá Fabry-Perot e dispositivo sperimentale per un Interferometro di Michelson di 30 cm di base.

Capitolo IV⁰

Schema di realizzazione di una antenna a grande base

Come e' gia' stato chiarito dai capitoli precedenti, lo strumento di cui presentiamo le linee generali avrebbe la caratteristica di avere una elevata sensibilita' sia alle alte ($200 < \nu < 1000$ Hz) che alle basse frequenze ($\nu < 200$ Hz).

Come mostrato nel III⁰ capitolo, sono in corso a Pisa esperimenti per ridurre il noise sismico ed il noise del laser a bassa frequenza. Con le sospensioni che stiamo costruendo, progettate per avere una attenuazione $H \sim 10^{-11}$ a 10 Hz, ci si aspetta un limite di sensibilita', dovuto al rumore sismico, di $h \sim 10^{-25}$, per un anno di tempo di integrazione , con $L = 3$ Km a 10 Hz.

Lo stesso limite lo si ottiene nelle stesse condizioni dalla eq. (2.17) per il rumore termico, ponendo $Q \sim 10^6$ alla frequenza $\nu \sim 20$ Hz e con una massa do 400 Kg.

Bisogna a questo punto sottolineare che alle basse frequenze un'interferometro non e' limitato dallo shot-noise, ma dal rumore termico e da quello sismico, percio' e' molto importante aumentare la distanza tra le masse di prova per aumentare la forza di Riemann.

Inoltre sono chiari a tutti i vantaggi del sistema Fabry-Perot sulla D-L:

- possibilita' di ottimizzazione alle basse frequenze
- maggiore versatilita'

- possibilita' di mettere piu' interferometri nello stesso tunnel
- minor costo degli specchi.

Rimane comunque il fatto che a tutt'oggi le Delay-Line hanno dato i risultati sperimentali migliori e sono in grado di funzionare con continuita', permettendo quindi lunghi tempi di integrazione del segnale. Percio' prima che la sperimentazione ci abbia dato la verifica diretta della superiorita' del sistema F-P sulla D-L, noi riteniamo che una D-L con poche riflessioni sia attualmente il piu' ragionevole sistema per la nostra antenna. Una D-L con 20 riflessioni, per quanto non ottimizzata, e' in grado di fornire una notevole sensibilita'. Questo e' un progetto di prima generazione e ci riserviamo di cambiare questo punto se la sperimentazione futura lo giustifichera'.

Lo shot noise rimane sotto il limite di $h \sim 10^{-26}$ se si effettuano due delay lines con 20 fasci ciascuna ($N = 20$), con una potenza laser di $\sim 25 - 30$ W e con un fattore 20 di ricircolazione della luce.

La larghezza di riga del laser crea noise a causa dello scattering della luce sugli specchi; e' pero' nostra opinione che, nel caso questo noise sia eccessivo, sia possibile ridurlo sperimentando un sistema di laser pulsato, per fare coincidenza temporale sul fotodiode, eliminando quindi la luce scatterata che arriva a tempi diversi.

Un altro metodo per eliminare l'effetto della luce scatterata consiste nel randomizzare la fase della luce nei rami dell'interferometro e di fare una rivelazione coerente con questa randomizzazione (1).

Il noise dovuto al gas residuo nel tubo a vuoto, puo' essere trascurato allorché la pressione diventa dell'ordine di 10^{-5} Pa.

Elenchiamo di seguito i parametri dell'interferometro, che alla

luce della sperimentazione odierna dovrebbero fornire oltre che una elevata sensibilita', anche una ragionevole probabilita' di successo in tempi realistici:

a) distanza degli specchi delle Delay-Lines: dalle equazioni (2.12), (2.14), (2.17), (2.18) segue che la sensibilita' cresce all'aumentare di L ; in particolare per ottenere le sensibilita' menzionate all'inizio di questo capitolo e' necessario avere $L > 3$ Km. E' chiaro che sono pochi i dati acquisiti per mezzo della sperimentazione su di un interferometro di 30 m che possono essere estrapolati con sicurezza ad uno di 3 Km; noi riteniamo probabile che un interferometro di tale lunghezza presentera' dei problemi che saranno risolvibili solo studiandoli sul prototipo in scala reale.

b) potenza del laser: 30 W ottenibile per esempio con 5 laser ad Argon ($\lambda = 514$ nm) in funzionamento coerente secondo lo schema mostrato in fig. 4.1. I laser Neodimio-YAG hanno potenze e rendimento maggiore di quelli ad Ar, anche se la loro lunghezza d'onda di $1 \mu\text{m}$ impone specchi $\sqrt{2}$ volte piu' grandi nelle D-L. E' pero' vero che gli specchi sono migliori nell'infrarosso, il Nd-YAG permette percio' perdite minori e quindi piu' alti guadagni con i sistemi di ricircolazione. Come per il sistema F-P, se la sperimentazione sara' positiva, ci riserviamo di cambiare questa scelta.

c) ricircolazione della luce: uno schema simile a quello del blocco C di fig. 2.1 e' stato sperimentato dal gruppo di Monaco; essi ottengono valori di $R = 1/\epsilon \sim 16$. E' ragionevole che si possa raggiungere $R \sim 20$ in modo da ottenere una potenza efficace di circa

500 W, considerando che l'efficienza di rivelazione e' del 90%.

d) **Delay-Lines**: nonostante la sperimentazione sulle delay-lines sia ormai molto avanzata ed un gran numero di esse sia in funzione nei piu' svariati esperimenti, nessuno ha mai costruito delay-lines con distanze maggiori di 30 m.

Poiche' il diametro minimo di una spot e' $D = (4 \cdot L \cdot \lambda / \pi)^{1/2}$, segue che per $L=3$ Km $D = 4.5 \cdot 10^{-2}$ m; per ridurre gli effetti dovuti alla diffusione della luce sugli specchi e' necessario avere una separazione tra le spot pari a D , ne segue che per alloggiare 10 spot, e quindi $N=20$, il diametro dello specchio deve essere circa 40 cm.

Uno dei problemi da risolvere e' la non eguaglianza delle lunghezze dei cammini ottici tra le due delay-lines, dovuta a differenze nei raggi di curvatura degli specchi; infatti se nonostante questa differenza, si impone uguale lunghezza delle delay-lines, si ottiene che i fasci di ritorno non si sovrappongono completamente.

Un modo per correggere il raggio di curvatura potrebbe essere l'applicazione di forze sul bordo degli specchi. Questa operazione deve essere pero' fatta senza alterare il fattore di merito Q_s dello specchio, al fine di non aumentare il rumore termico (vedi eq. (2.18)). Inoltre come si e' mostrato all'inizio di questo capitolo, per avere alta sensibilita' alle basse frequenze bisogna che lo specchio abbia massa $M > 400$ Kg.

Tale specchio potrebbe per esempio essere formato in un unico pezzo di quarzo fuso nel modo mostrato in fig. 4.2, la cui corona C, della lunghezza di circa 10 cm, puo' essere scaldata o raffreddata rispetto al cilindro N per mezzo di celle Peltier. Una differenza di 10 C° tra N e C provoca una variazione della lunghezza di C di ~ 1 μ , che crea in uno specchio avente $S = 2$ cm uno spostamento della spot

di 4 cm a 3 Km di distanza.

Riteniamo sia molto importante investigare la possibilita' di variare i parametri (curvatura) dello specchio senza che questa operazione comporti il contatto fisico con lo specchio stesso.

e) Stime della sensibilita' prevista: Il noise totale, mostrato in fig. 4.3 e 4.4, e' la somma dello shot-noise del laser, del rumore termico di un pendolo di 400 Kg (si assume che il Q della sospensione sia 10^6) e del rumore sismico residuo della catena di sette pendoli. La fig. 4.3 mostra l'andamento della sensibilita' per segnali periodici integrati in un anno. La fig. 4.4 invece mostra la sensibilita' per eventi impulsivi assumendo che il tempo di integrazione sia dato dalla durata dell'impulso stesso.

Referenze del quarto capitolo

(1) R. Weiss, PHY-8109581 MIT, for National Science Foundation, Ottobre 1983.

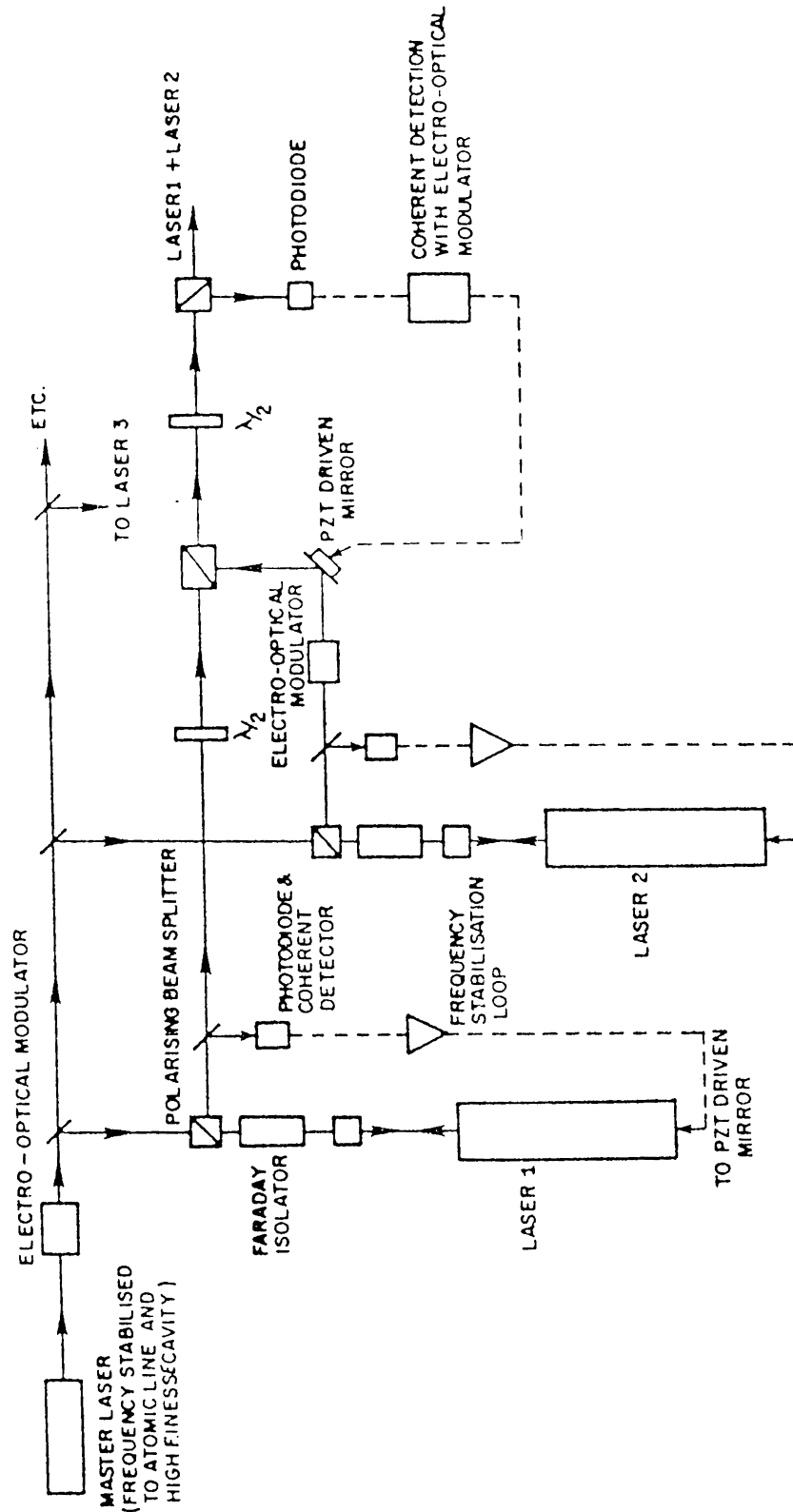
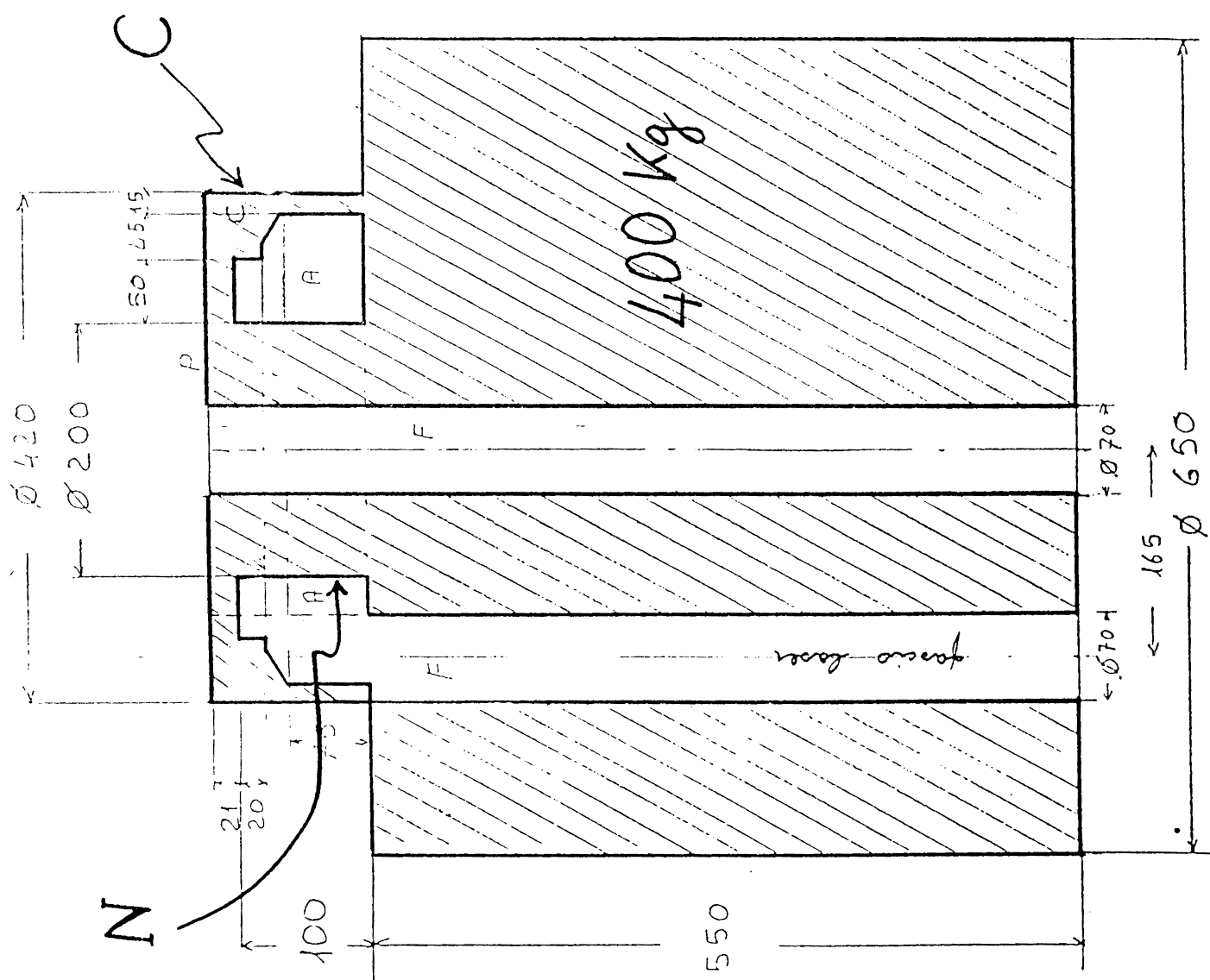


Figura 4.1 -Possibile schema per l'accordo coerente di N laser. La figura e' dettagliata per N=2.



A: zona circolare vuota
 F: fori passanti
 P: superficie lucida

Materiale: HOMOSIL

Figura 4.2 -Progetto di uno specchio deformabile termicamente del peso di 400 Kg.

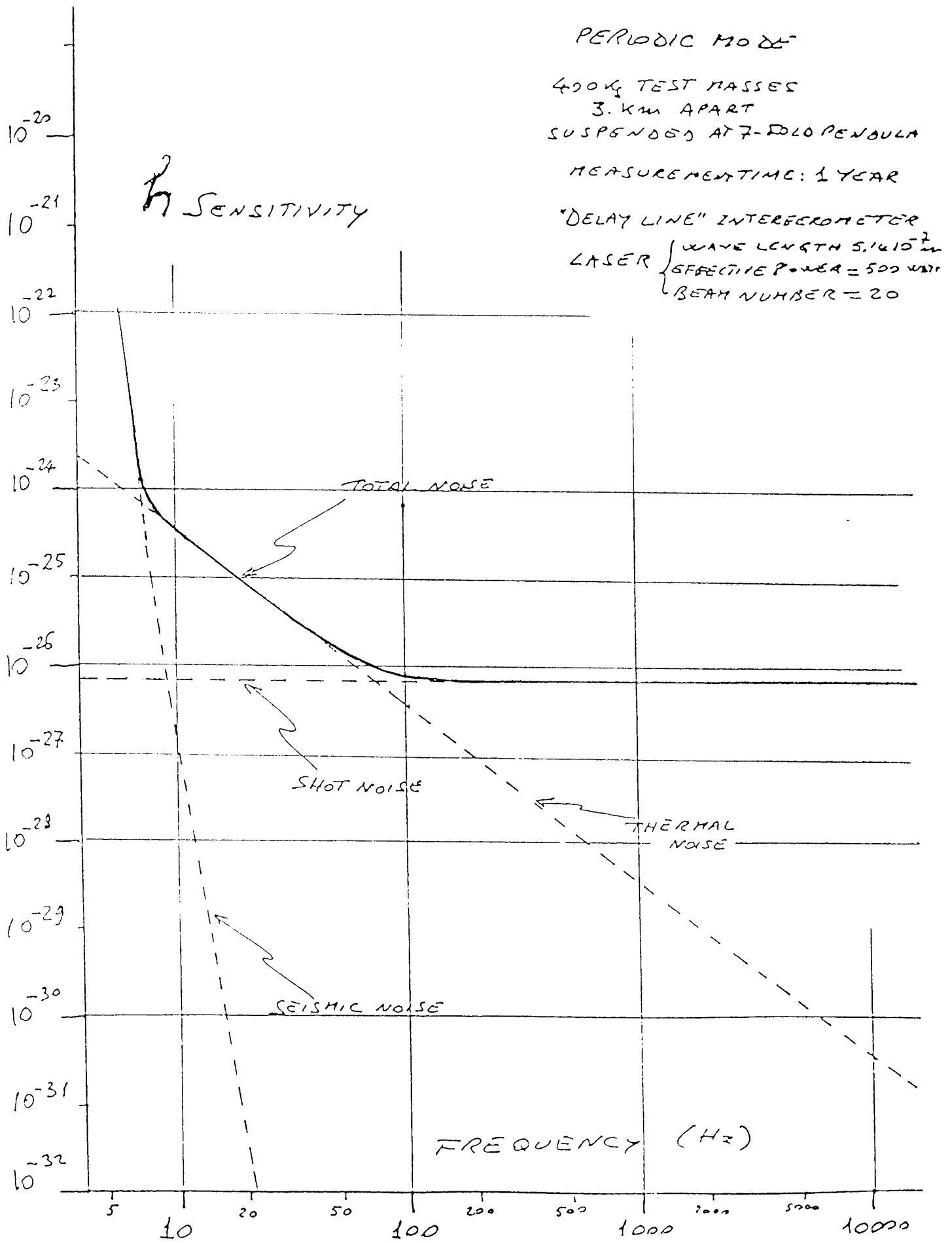


Figura 4.3 -Sensibilita' in h dell'antenna proposta, determinata come limite di differenti rumori nell'intervallo di frequenza tra 5 e 10000 Hz. Le curve si riferiscono ad un anno di integrazione.

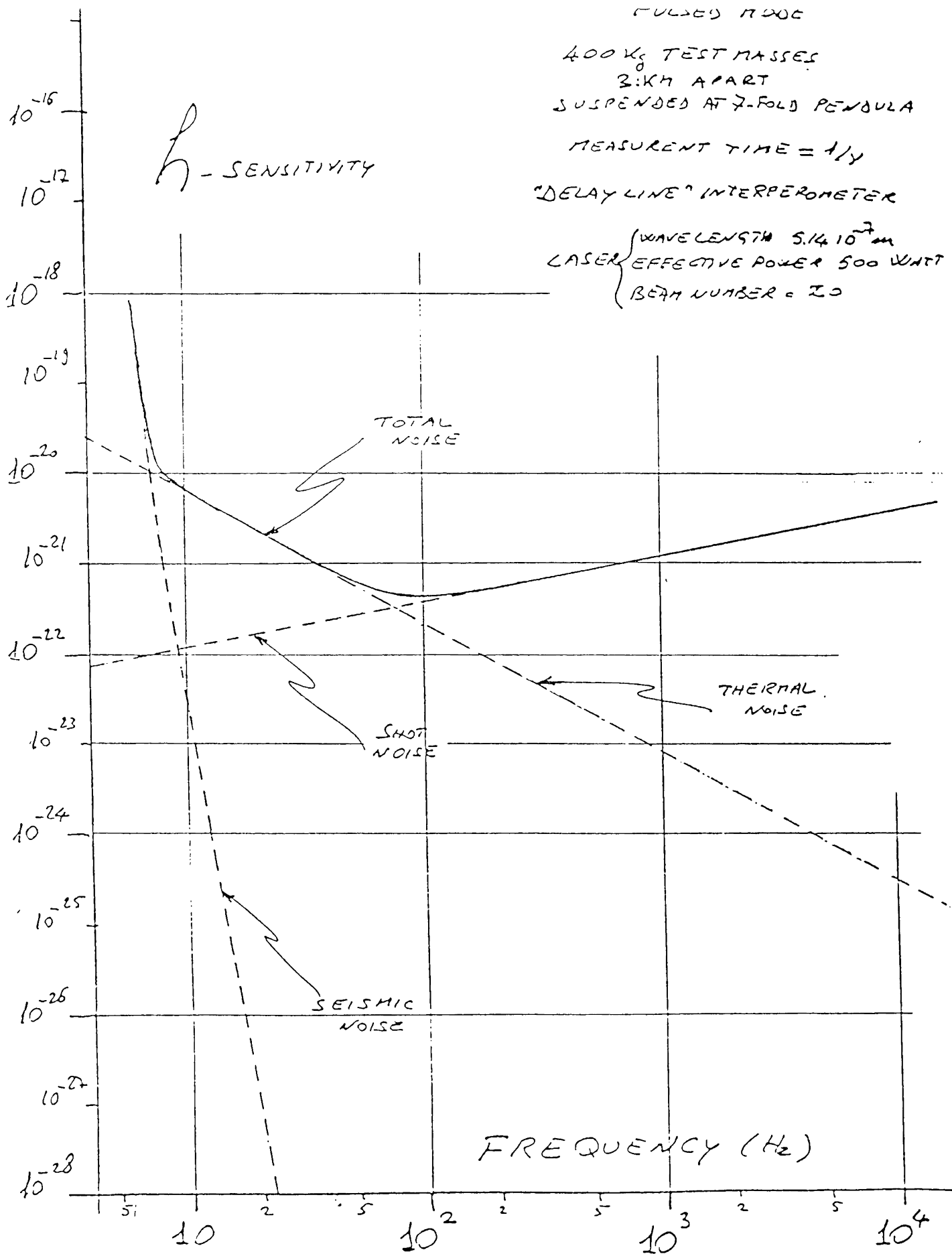


Figura 4.4 -Sensibilita' in h dell'antenna proposta, determinata come limite di differenti rumori, nell'intervallo di frequenza fra 5. e 10000. Hz. Le curve si riferiscono a segnali impulsivi.

Capitolo V°

Stima Preliminare dei Costi

Questa stima dei costi si basa su offerte effettuate da varie ditte e sulla nostra esperienza recente, specialmente per quanto riguarda il costo degli edifici. E' pero' chiaro che per avere una stima piu' precisa sia necessario un ulteriore approfondimento di tutti i dettagli, approfondimento che puo' scaturire solamente da un Gruppo di Studio.

L'antenna e' costituita da due tubi a vuoto in INOX lucido di 3 mm di spessore, di 1 m di diametro e lunghezza 3 Km posti a 90°, come mostrato in fig. 5.1. Tre edifici principali sono posti uno nella zona laser e due alle estremita' dei tubi, dodici piccoli edifici sono posti a distanze di circa 430 m l'uno dall'altro lungo il tubo e contengono i gruppi di pompaggio, composti da due pompe turbo ($2 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$) e da una rotativa; gli schemi dei gruppi di pompaggio, posti nei tre edifici principali, e lungo il tubo sono mostrati nelle fig. 5.2, 5.3 e 5.4. Il tubo (vedi fig. 5.1) e' protetto da un mantello, fatto di elementi mobili prefabbricati, in cemento armato ed ha, a lato, una strada prefabbricata in cemento.

All'interno dell'edificio centrale sono alloggiati tre silenzianti sismici, il sistema laser ed il sistema di acquisizione dati; nei due edifici terminali sono alloggiate altre due catene di silenziamento.

In questa stima preliminare non vi sono valutazioni ne' del terreno, che speriamo essere demaniale, ne' di elettrificazione e di opere che dipendono dalla natura del terreno.

Stime (espresse in Milioni di Lire)

Progettazione:

Edilizia, Meccanica,
Elettronica e Vuoto..... 600

Edilizia:

Edificio Centrale..... 300
Camera pulita per laser..... 70
2 edifici terminali..... 300
12 prefabbricati pompe..... 150
820

Tubo a Vuoto:

6 Km INOX lucido,
Φ 1 m, spessore 3 mm
+ bellows per espansione
termica..... 3300
Trasporto..... 100
Fondazione..... 500
Montaggio..... 250
Protezione mobile
cemento armato 2*2*6 m..... 1100
strada laterale in cemento
a due carreggiate 1 m per 6 Km 180
Baking..... 200
5630

Silenziatori:

cinque filtri a sette stadi 800
sistemi Monitor Posizione
Stabilizzazione masse..... 700
1500

Data Acquisition:..... 500

Pompe:

Tre gruppi (1 rotativa e 1 turbo,
negli edifici principali),

tempo di vuoto:

10^{-6} mbar ~ 2 h

Dodici gruppi (1 rotativa e 2 turbo),

tempo di vuoto:

10^{-6} mbar ~ 4 h

Monitor e quattro valvole gate

di Φ 1m..... 2340

Laser:

5 laser Argon Coherent I 100/20..... 400

cooling + meccanica..... 100

Stabilizzazione e somma coerente

Sistemi monitor posizione fascio..... 1000

1500

Specchi:

4 specchi Φ 450 mm,

lavorazione $\lambda/20$,

in quarzo da 400 Kg..... 2000

1 Beam-Splitter,

lavorazione $\lambda/20$,

in quarzo da 400 Kg..... 500

lavorazione sistema D. L. 800
sistema F-P

Celle di Pockel

specchi e prismi..... 500
3800

TOTALE 16690

In fig. 5.5 e' mostrato un possibile rate annuale di spesa nel
settennio 1989-1995.

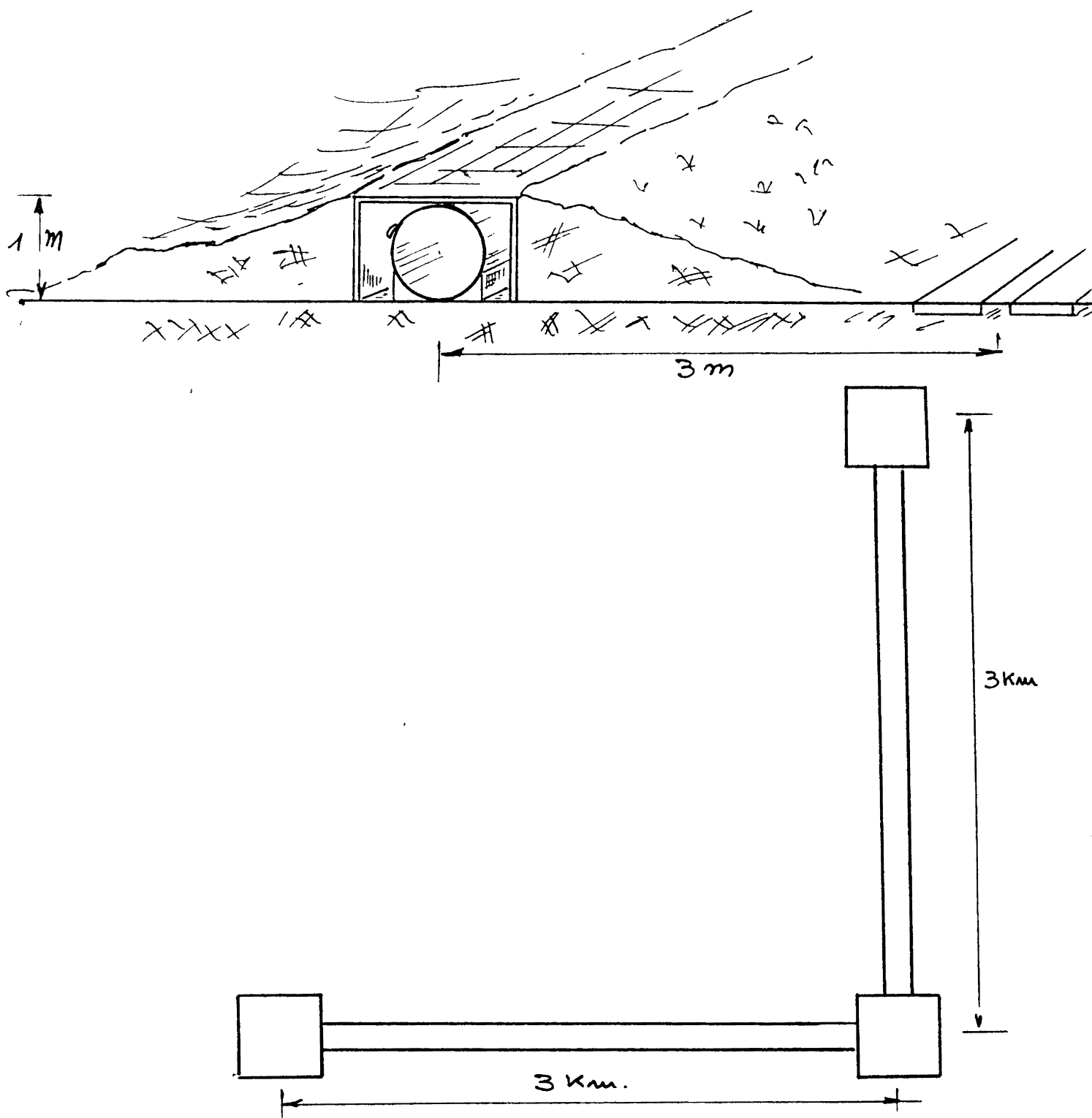


Figura 5.1 -Schizzo dell'interferometro da 3 Km, illustrante le tre aree sperimentali

Nei centro e' mostrato il tubo a vuoto coperto dagli elementi prefabbricati in cemento ed al lato e' mostrata la stradina prefabbricata.

BALZERS S.p.A.
Via Favretto n. 13
20146 MILANO
C.F. 00844530154

SCHEMA GRUPPI POMPAGGIO X STAZIONE ANALISI

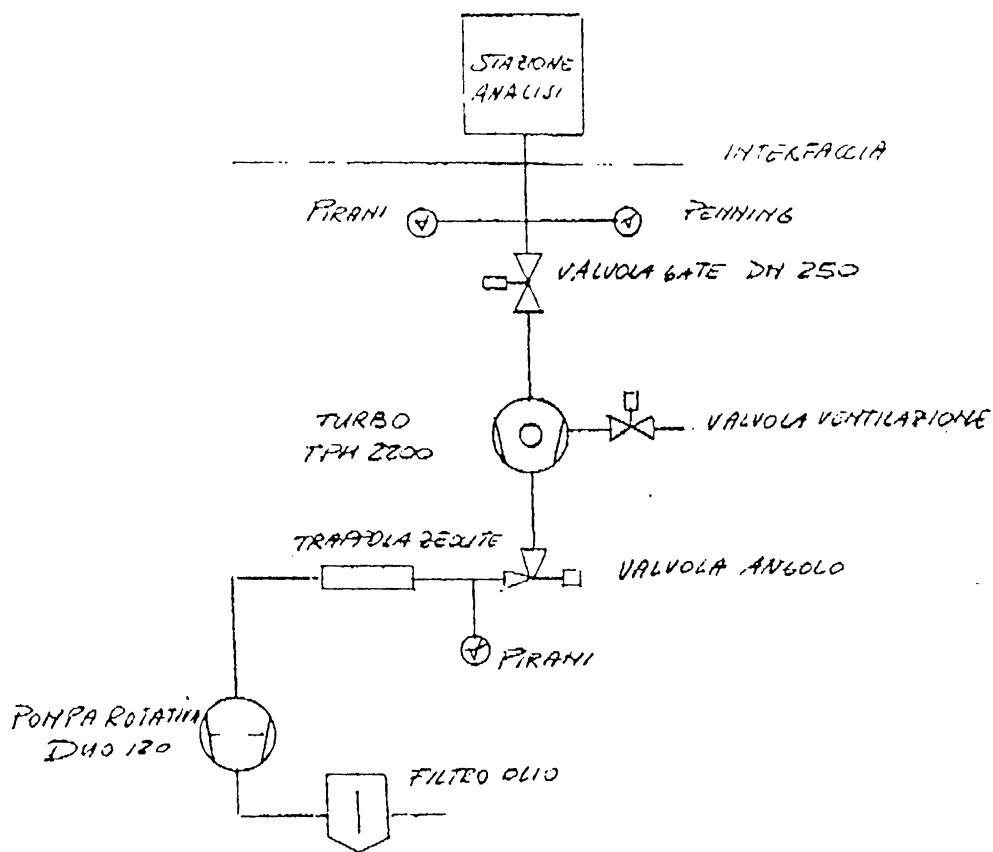


Figura 5.2 -Gruppo di pompaggio delle stazioni centrali.

BALZERS S.p.A.

Via Favretto n. 13
20146 MILANO
C.F. 00844530154

SCHEMA GRUPPA POMPABGIO A LINEA DA VUOTO

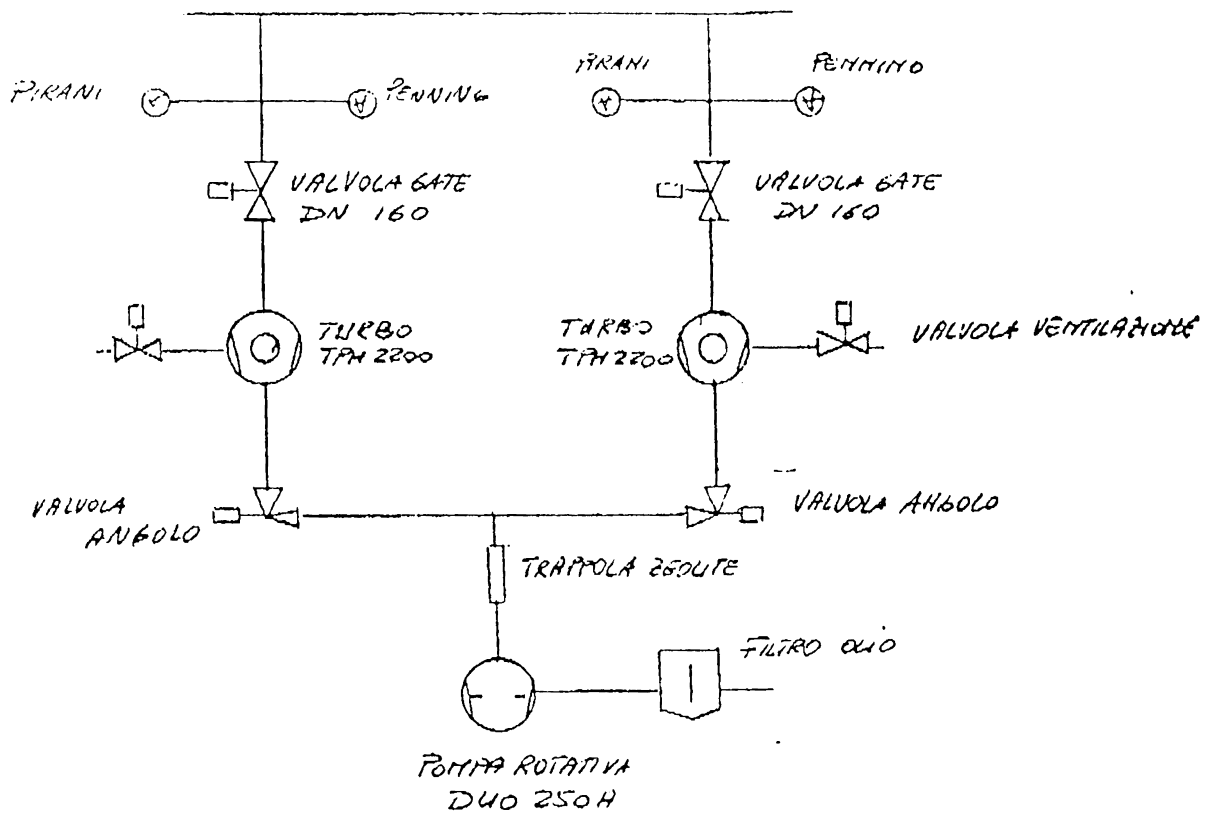


Figura 5.3 -Gruppo di pompaggio del tipo posto lungo il tunnel.

BALZERS S.p.A.
 Via Favretto n. 13
 20148 MILANO
 C.F. 00844530154

- FBS 1 N° 4 VALVOLE GATE IN 1000
- FBS 2 N 3 GRUPPI POMPA 6610 x STAZIONE ANALISI
- FBS 3 N 12 GRUPPI POMPA 6610 x LINEA A VUOTO
 20MI 430 mt.

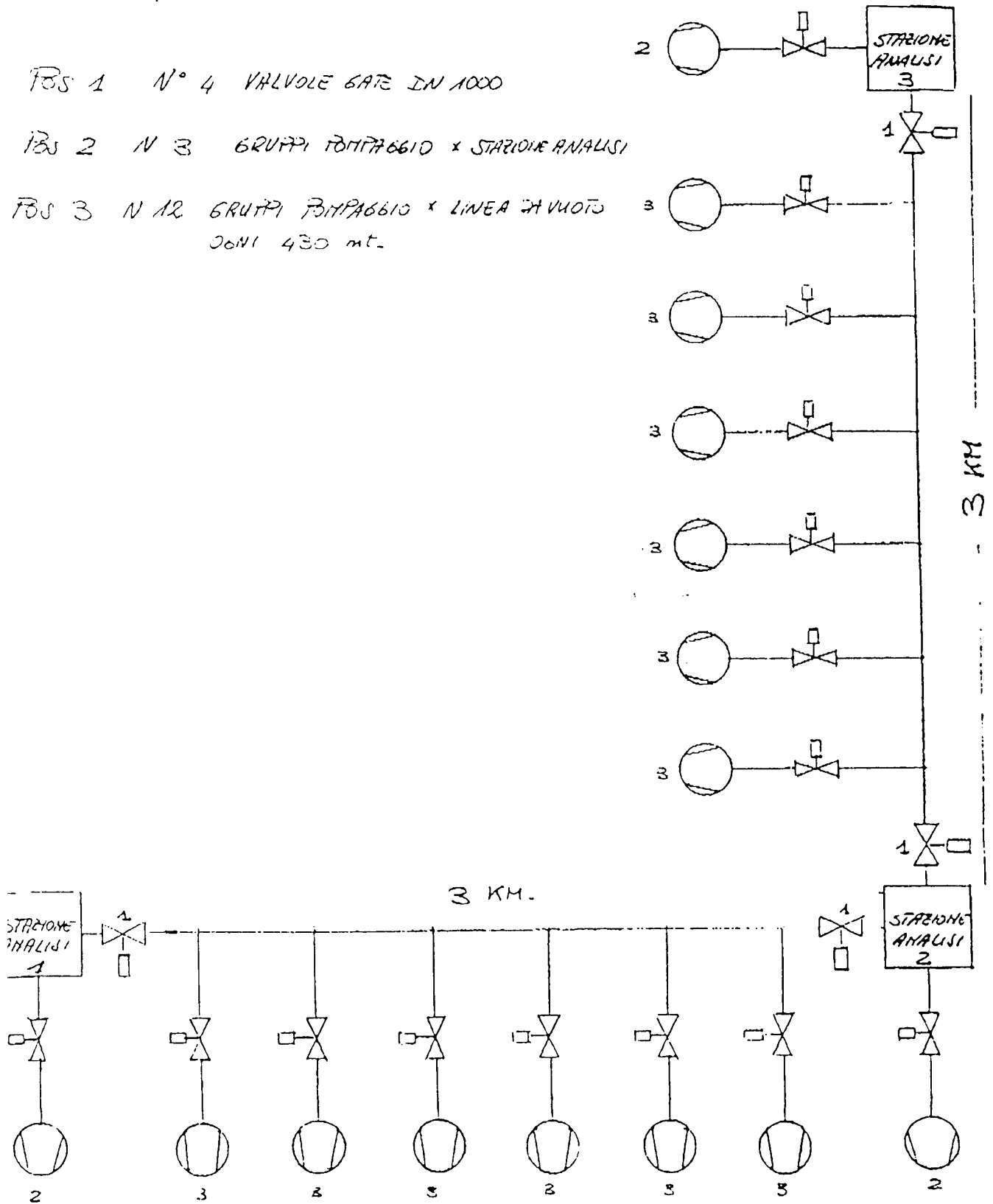


Figura 5.4 -Schema generale del sistema di pompaggio.

SCALA 1:20

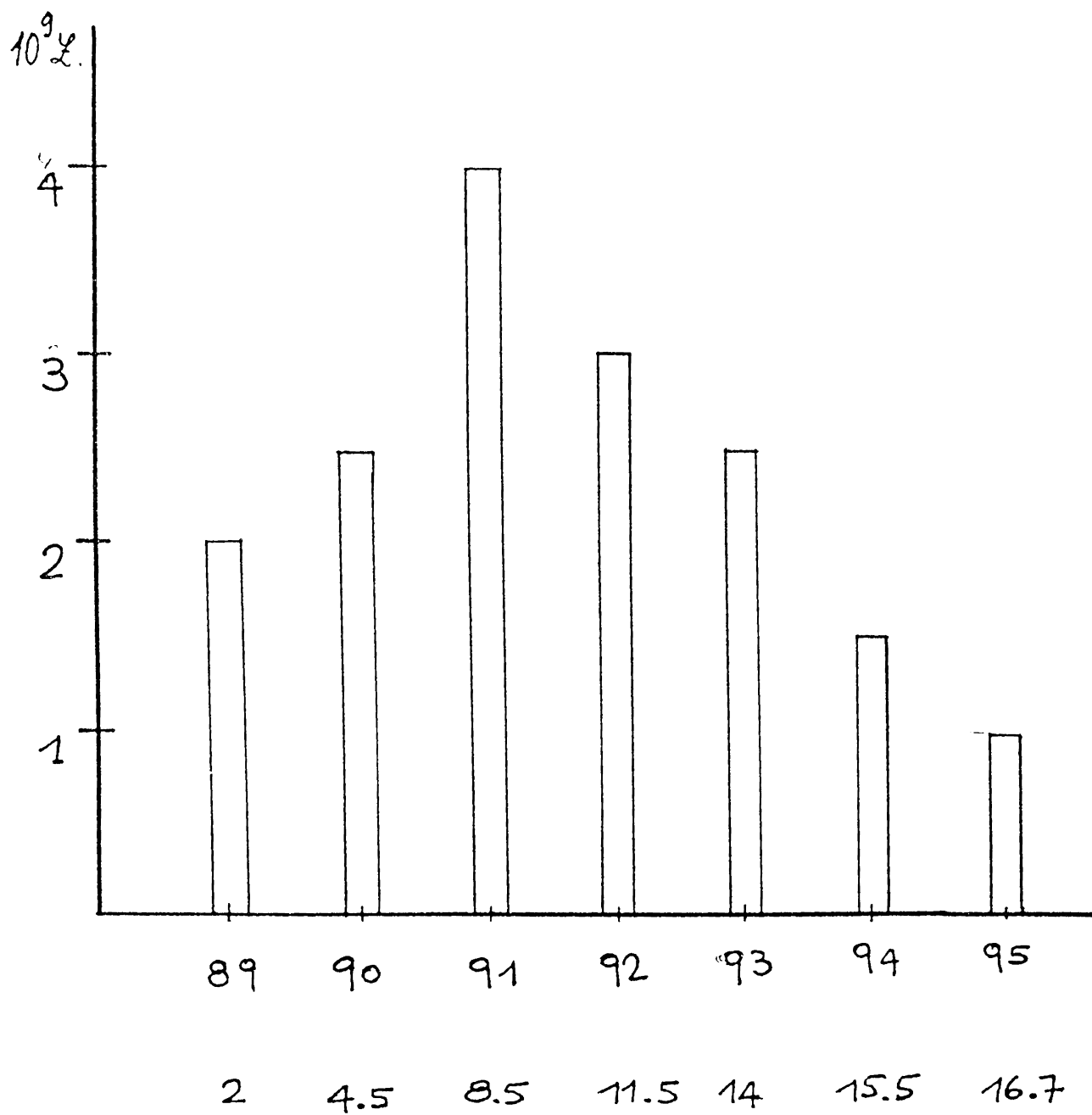


Figura 5.5 -Previsione della suddivisione dei costi in funzione degli anni.

Capitolo VI°

Gli altri quattro progetti di grandi antenne interferometriche per la ricerca di onde gravitazionali

In questo capitolo esporremo molto brevemente le caratteristiche dei progetti delle altre quattro antenne: due europee e due americane

1) Germania: l'antenna dell'Istituto Max Planck di Ottica Quantistica

Il gruppo del Max Planck ha iniziato a lavorare in questo tipo di interferometria da circa dieci anni e dal 1982 lavora sul prototipo di un interferometro di tipo delay-line, di 30 m di base, sul quale hanno messo in pratica gli accorgimenti messi a punto nella sperimentazione precedente. Tra le innovazioni da loro progettate ricordiamo l'uso di sospensioni separate per ogni specchio; in questo modo si riduce il rumore termico ed acustico causato dall'avere una massa centrale unica complicata, fatta per sostenere il "beam-splitter" e due dei quattro specchi. Un'altra loro innovazione e' l'uso di una fibra ottica per ridurre il movimento spaziale del fascio laser, inoltre questa fibra viene direttamente accoppiata al blocco del beam-splitter in modo tale da minimizzare il moto relativo del fascio e dell'interferometro. In fig. 6.1 e' mostrato il loro prototipo ed alcuni dei piu' recenti risultati.

I Tedeschi hanno presentato nel 1985 la proposta per una antenna a grande base, tale da raggiungere la sensibilità in h di 10^{-21} rms a 1KHz.

Una peculiarità del loro progetto è fare insieme 3 interferometri con bracci a 60° , accostati tra di loro in modo da delimitare un triangolo equilatero di 3 Km di lato; il vantaggio di un simile disegno è nel fatto che si è sensibili ad onde con qualsiasi polarizzazione, anche se si perde il 30% del segnale; questo progetto è anche piuttosto costoso perché per alloggiare i fasci richiede due tubi a vuoto di diametro circa 1 m. Nella delay-line si conta di avere 30 riflessioni e il vuoto richiesto è 10^{-6} torr. Dato l'alto costo di tale progetto il gruppo tedesco inizierebbe con un interferometro portandoli successivamente a tre. È attualmente loro intenzione di porre i tubi per il vuoto in un tunnel alto 2 m, posto un metro sotto terra; questo non solo per non disturbare il paesaggio, problema molto sentito dai Tedeschi, ma anche per ridurre i problemi di scattering provocate dalle vibrazioni acustiche dei tubi a vuoto. Nel dicembre 1986 avevano selezionato in Baviera due siti possibili.

Questo gruppo sta preparando una seconda versione del loro progetto che sarà terminata tra breve alla fine del maggio 1987. I costi minimi stimati sono di circa 29 milioni di marchi per un interferometro solo, senza includere i costi degli specchi e del laser.

2) Gran Bretagna: l'antenna del gruppo di Glasgow

Questo gruppo lavora dal 1972 allo sviluppo di rivelatori per lo studio di onde gravitazionali; inizialmente ha studiato anche rivelatori a barra risonanti tipo Weber. E' loro l'idea del sistema Fabry-Perot, a cui sono arrivati dopo alcuni test preliminari su sistemi con masse formanti interferometri Michelson a multiriflessioni. Per sviluppare le tecniche necessarie, da qualche anno hanno concentrato la loro attenzione sul prototipo di interferometro F-P di 10m (sensibilita' attesa in $h \sim 10^{-18}$).

Come abbiamo detto nel capitolo IV^o, proprio in questi mesi si stanno avvicinando alle sensibilita' limiti del loro prototipo, in fig. 6.2 e' mostrato il loro prototipo ed uno dei loro piu' recenti risultati.

Nel 1986 hanno presentato il progetto per una antenna a grande base da costruire in Gran Bretagna: i rami sono lunghi 1 Km, con l'idea di andare a 3 Km nel futuro; il diametro del tubo e 0.90 m ed il vuoto richiesto 10^{-8} torr.

Contano di alloggiare nel tubo 4 interferometri indipendenti, di lunghezza diversa: alcuni lunghi 1 Km e altri 0.5 Km; in ogni caso tutti e quattro gli interferometri sono a Fabry-Perot. La sensibilita' che dovrebbero raggiungere e' 10^{-22} in h per impulsi della durata di qualche millisecondo, per le frequenze dai 200 Hz in su.

Il gruppo di Glasgow ha gia ristretto la scelta del sito a due possibili in Scozia. Il costo stimato nel 1986 per questo progetto e' di 8045 mila sterline.

3) U.S.A.: progetto congiunto Caltech/MIT di due antenne

Proprio negli USA e' avvenuto il primo tentativo di usare un interferometro Michelson per la ricerca di onde gravitazionali; ci provo' R.L. Forward nel 1972 al Hughes Researches Lab.. Contemporaneamente iniziarono lavori del genere a MIT, anzi essi furono i primi a suggerire lo studio di sistemi con delay-line. Studiano attualmente un prototipo a delay-line lungo 5 m; fig. 6.3 mostra questo prototipo e la curva di sensibilita'.

Il gruppo del "California Institute of Technology" invece e' stato interamente teorico fino al 1979, quando si rese conto che la ricerca in questo campo iniziava a diventare promettente. Da allora il gruppo e' entrato nel campo della interferometria attraverso una stretta collaborazione col gruppo di Glasgow, anch'essi studiano un prototipo, del tipo Fabry-Perot, lungo 40 m, fig. 6.3 mostra questo prototipo e la curva di sensibilita'.

Questi due gruppi americani, che sono finanziati dallo stesso ente (U.S. National Science Foundation), considerando ormai maturi i tempi per costruire una grande antenna, furono invitati a presentare un progetto unico per la costruzione di due antenne diverse. Da quanto abbiamo detto i due gruppi hanno due specializzazioni diverse, uno conta di usare il sistema D-L e l'altro il F-P, ma come abbiamo gia' detto, il disegno generale dell'antenna non dipende dal sistema ottico scelto.

Il progetto e' stato fatto in grandi linee, anche se non si conta di finire prima della fine del 1987 il disegno finale.

L'antenna dovrebbe avera una forma ad L, con tubo a vuoto di 48

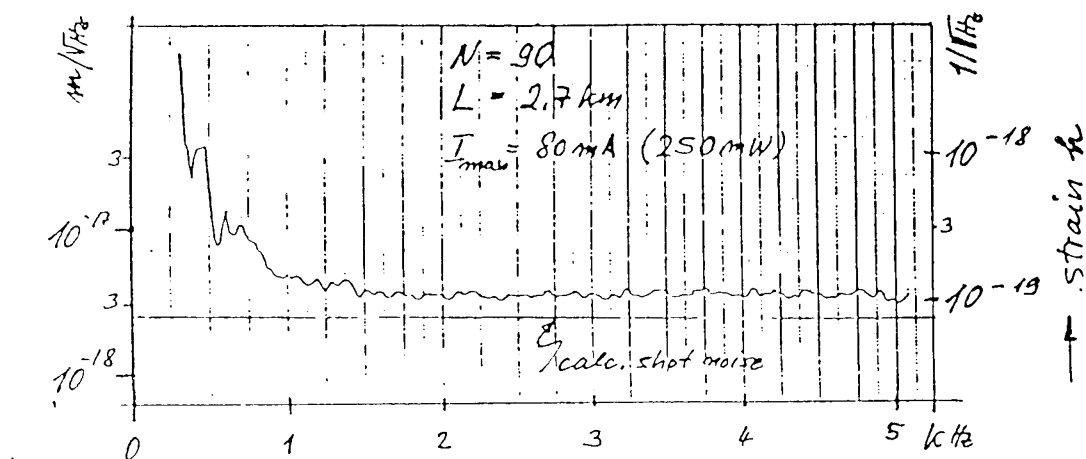
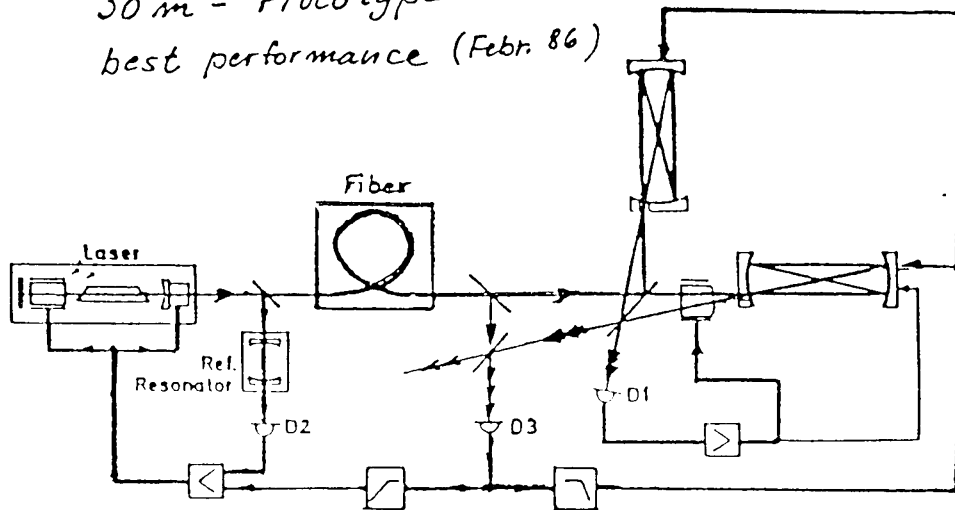
pollici, con vuoto di 10^{-8} torr e i rami sono lunghi 4 Km. Si pensa di alloggiare nello stesso tubo piu' interferometri, due di 4 Km e due di 2Km, almeno per il tipo a F-P.

Sono stati fatti diversi nomi sui due possibili siti, tra cui anche laboratori famosi come Fermilab, ma la scelta non e' ancora stabilita. Il costo stimato nel 1984 in dollari era di 50-60 milioni di dollari.

Principal experimental set-up

30 m - Prototype

best performance (Febr. 86)



best $\tilde{\sigma}_L = 3 \cdot 10^{-18} \text{ [m}/\sqrt{\text{Hz}}]$

$\tilde{L} = 1.1 \cdot 10^{-19} \text{ [1}/\sqrt{\text{Hz}}]$

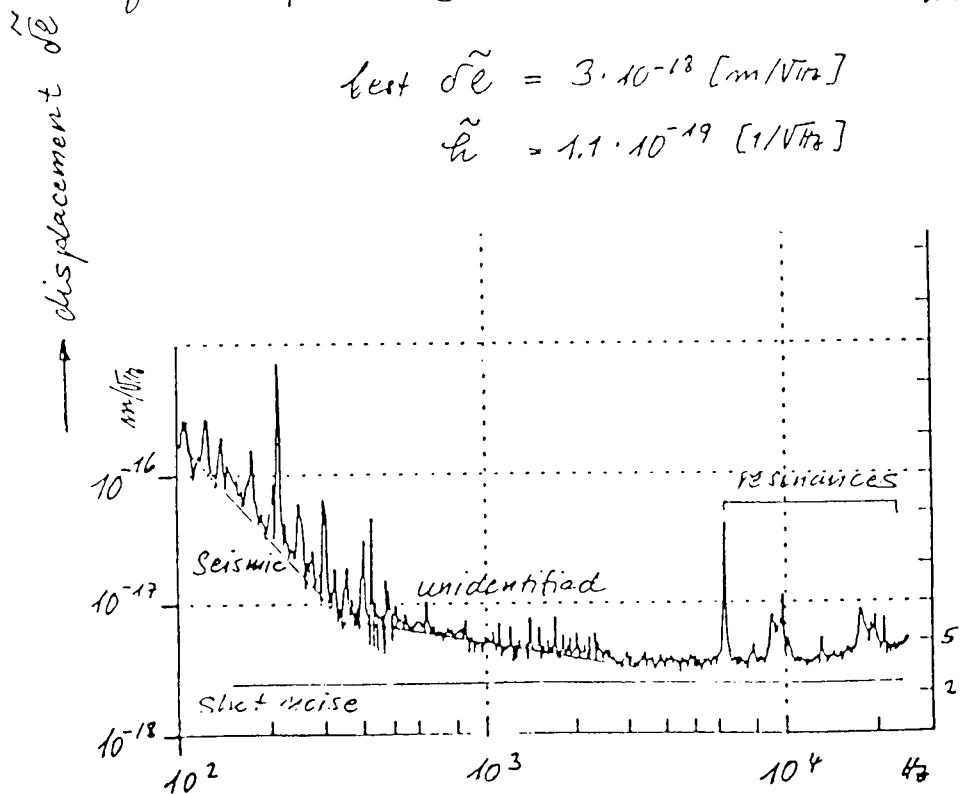
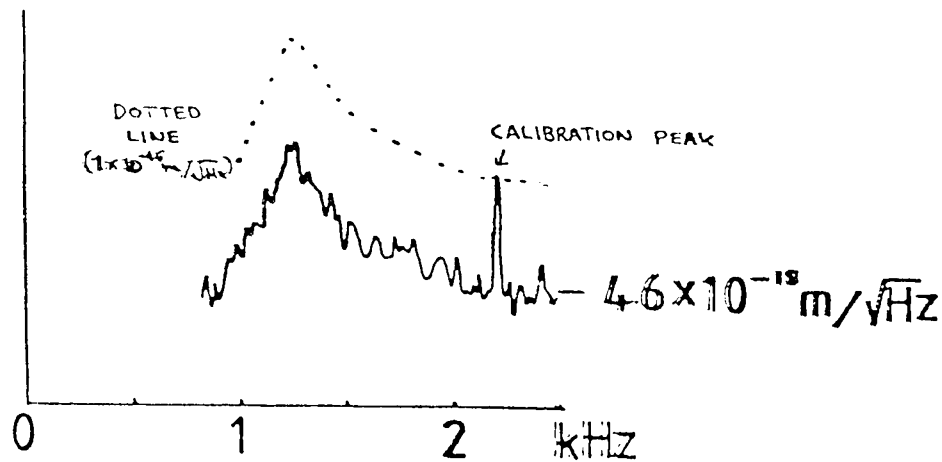
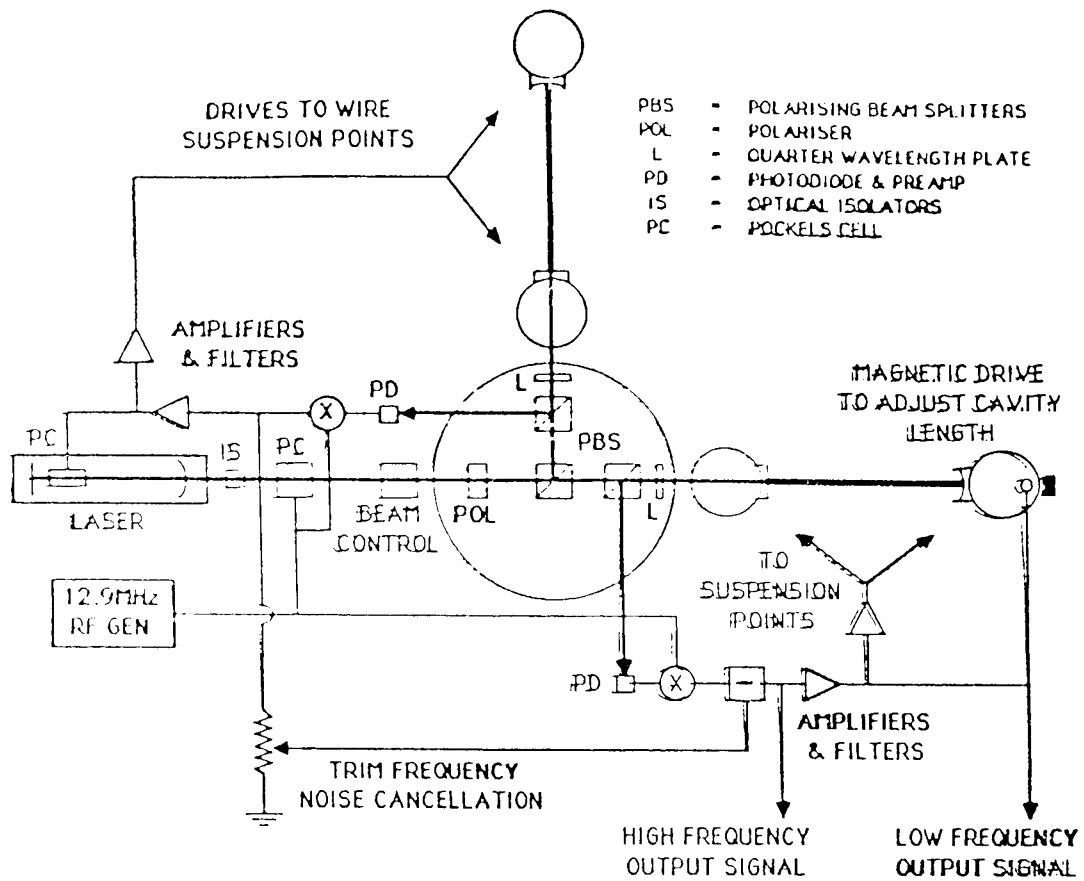


Figura 6.1 -Set-up sperimentale e sensibilita' dello interferometro di Garching (Febbraio 1986).



(Preliminary results - September 1986)

Sensitivity of 10m detector. Dotted curve shows contour of constant sensitivity. Sensitivity at 1kHz is $1 \times 10^{-17} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$. (Raised section of curves in kilohertz region is a feature of the present servo system.)

Figura 6.2 -Set-up sperimentale e sensibilita' interferometro di Glasgow (Settembre 1986).

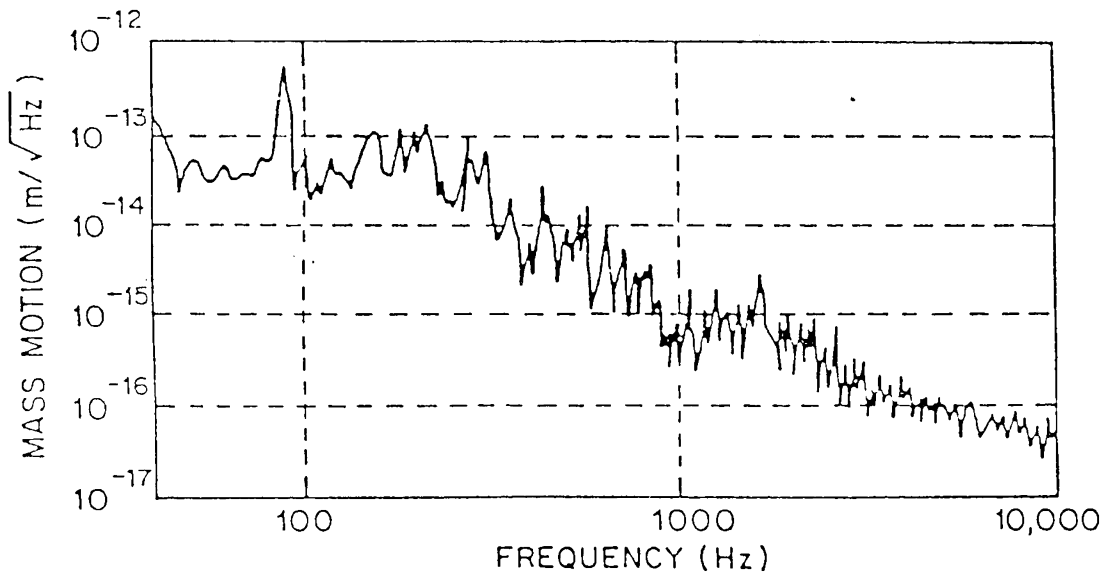
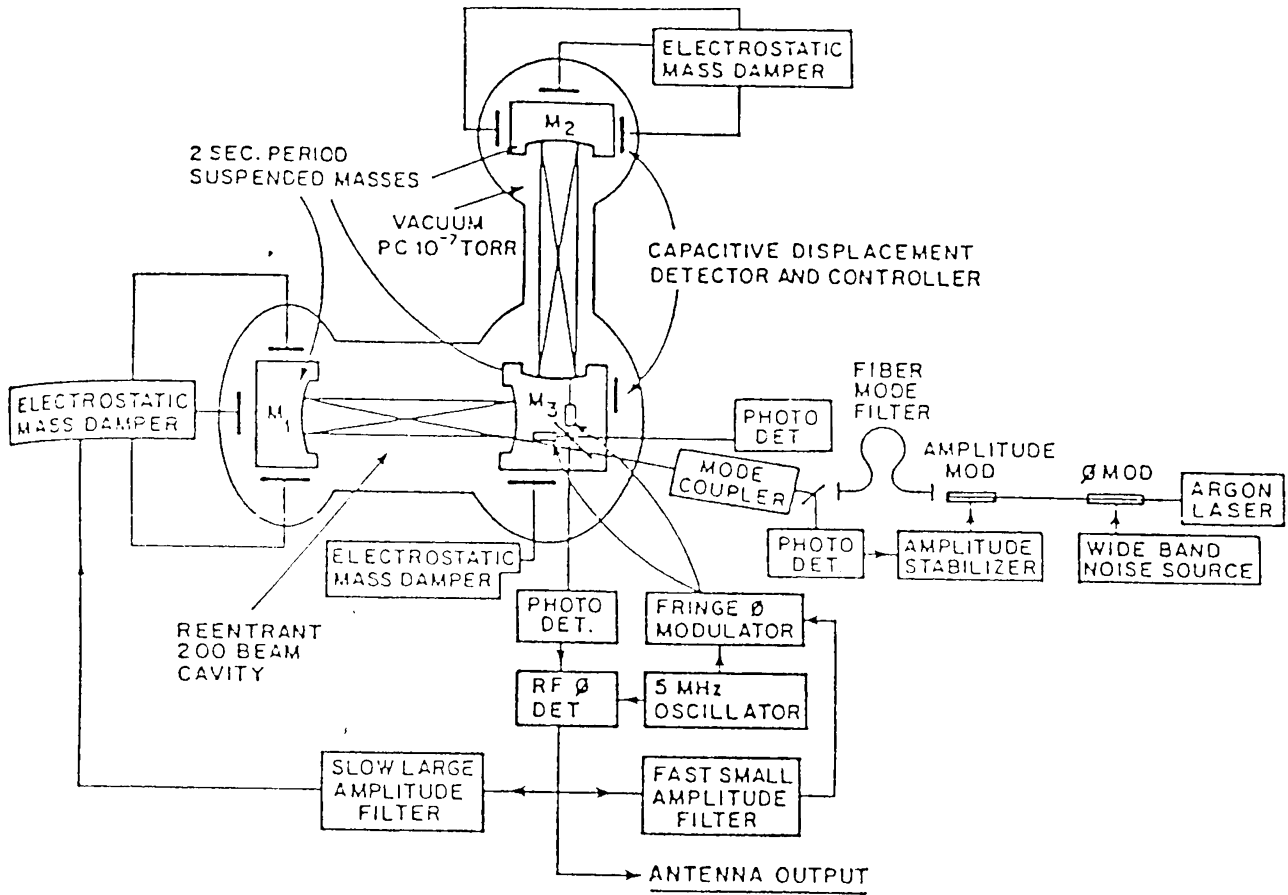


Figura 6.3 -Set-up sperimentale e sensibilita' dello interferometro di MIT (1985).

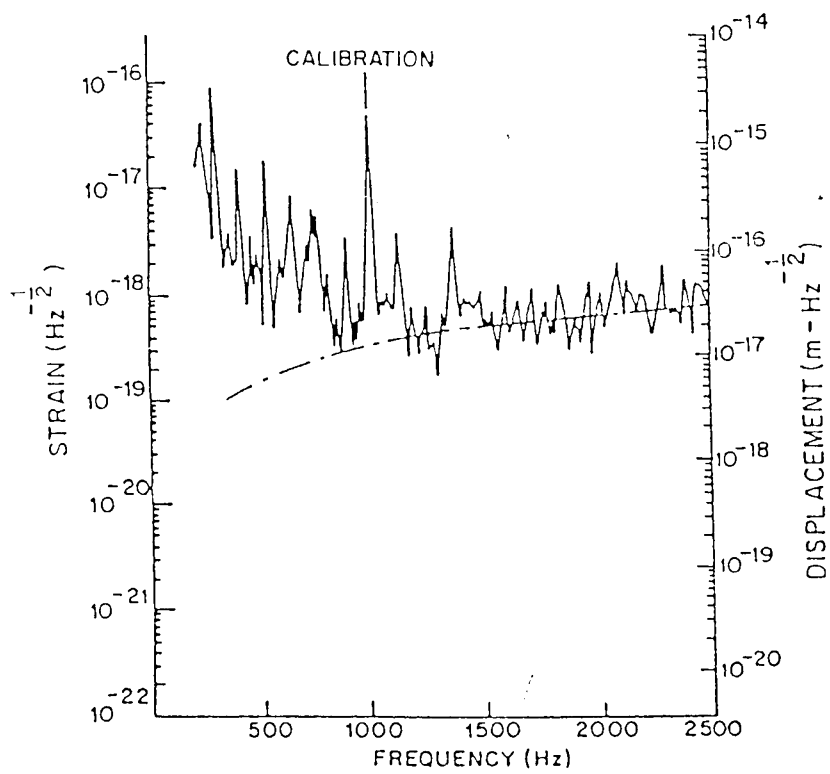
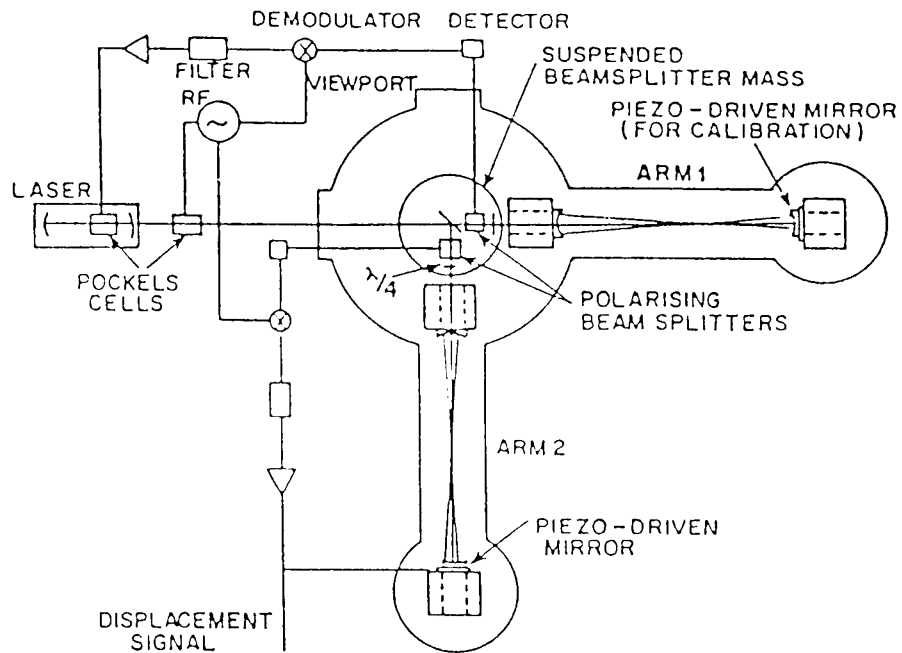


Figura 6.4 -Set-up sperimentale e sensibilita' dello interferometro di Caltech(1985).

INDICE

Introduzione	pg. 2
1)Evoluzione storica.....	pg. 5
2)La situazione attuale.....	pg. 7
3)Giustificazione di una collaborazione Italo-Francese.....	pg. 9
4)Giustificazione di questo progetto nel piu' ampio contesto internazionale.....	pg. 10
Referenze dell'introduzione.....	pg. 11
Figure	
Capitolo I°	
"Stime della ampiezza dell'onda gravitazionale emessa da varie sorgenti astrofisiche e sorgenti astrofisiche nella banda da 10 a 10 ⁴ Hz".....	pg. 12
1)Supernovae (SN).....	pg. 13
2)Radiazione gravitazionale indotta da neutrini di supernovae (SNN).....	pg. 14
3)Coalescenza e collasso di binarie superveloci (CBD).....	pg. 15
4)Processi con black-holes in ammassi globulari (BHGC)	pg. 16
5)Core quakes in stelle di neutroni (NSCQ).....	pg. 17
6)Pulsars (PSR).....	pg. 17
7)Pulsazioni di stelle compatte (CSP).....	pg. 18
Referenze del primo capitolo.....	pg. 19
Figure	
Capitolo II°	
"L'Antenna interferometrica".....	pg. 20
1)Descrizione di un interferometro come sistema per la rivelazione di onde gravitazionali.....	pg. 22

1.a)Analisi e trattamento del segnale in uscita da un interferometro.....	pg. 22
1.b)Fonti di rumore in un interferometro di O.G.....	pg. 25
2)Maggiori dettagli su alcuni rumori.....	pg. 27
2.a) Shot-noise.....	pg. 28
2.b)Larghezza di riga del laser.....	pg. 29
2.c)Rumori creati da forze stocastiche.....	pg. 30
2.d)Rumore sismico.....	pg. 31
Referenze del secondo capitolo.....	pg. 31
Figure	

Capitolo III°

"Le attivita' dei gruppi proponenti nella ricerca delle onde gravitazionali ed in aree affini".....	pg. 33
A)Gli esperimenti di Pisa.....	pg. 33
A.1)Isolamento attivo: l'esperimento IRAS.....	pg. 33
A.2)Isolamento passivo.....	pg. 36
A.3)Stabilizzazione del laser ed interferometro.....	pg. 39
B)Gli esperimenti di Paris-Orsay.....	pg. 40
B.1)Teoria di interferometri	
Delay-Line e Fabry-Perot.....	pg. 41
B.2)Studi sperimentali su di un interferometro rigido.....	pg. 43
B.3)Realizzazioni di sistemi laser appropriati.....	pg. 43
B.4)Isolamento sismico e frenamento delle masse di test..	pg. 44
C)Attivita' del Gruppo di Napoli e Salerno.....	pg. 45
D)Attivita' del Gruppo CNR-Frascati.....	pg. 46
Referenze del terzo capitolo.....	pg. 47
Figure	

Capitolo IV°

"Schema di realizzazione di un' antenna a grande base".....	pg. 49
a)Distanza degli specchi della Delay-Line.....	pg. 51
b)Potenza del laser.....	pg. 51
c)Ricircolazione della luce.....	pg. 51
d)Delay-line.....	pg. 52
e)Stime della sensibilita' prevista.....	pg. 53
Figure	

Capitolo V°

"Stima preliminare dei costi".....	pg. 54
STIME.....	pg. 55
Figure	

Capitolo VI°

" Gli altri quattro progetti di grandi antenne interferometriche per la ricerca di onde gravitazionali"..	pg. 57
1)Germania: l'antenna dell'Istituto Max Planck di Ottica Quantistica.....	pg. 57
2)Gran Bretagna: l'antenna del Gruppo di Glasgow.....	pg. 59
3)USA: progetto congiunto Caltech/MIT di due antenne.....	pg. 60
Figure	

Ringraziamenti

Sentitamente ringraziamo i gruppi che hanno scritto prima di noi documenti analoghi. La loro lettura ci e' stata di grande aiuto per questa nostra prima stesura; ci scusiamo se, a causa di stringenti limiti di tempo, non abbiamo potuto collaborare piu' strettamente e direttamente con loro e, in particolare, ci siamo dovuti accontentare di documentare il loro lavoro senza i risultati piu' recenti; contiamo, col loro aiuto, di supplire in futuro a questa mancanza.

In particolare ringraziamo Karl Maischberger, che ci ha aiutato e consigliato senza mai lesinare la sua preziosa esperienza.

-J. Hough et al., "A British Long Baseline Gravitational Wave Observatory", Design Study Report, May 1985, GWD/RAL/86-001

-Karl Maischberger et al., "Vorschlag zum Bau eines großen Laser-Interferometers zur Messung von Gravitationswellen"; MPQ 96, Juni 1985.

-R. Drever, R. Weiss et al., "Scientific Case and Overview of the: LASER INTERFEROMETER GRAVITATIONAL WAVE OBSERVATORY (LIGO) PROJECT", 1986.