

# Rapporti tecnici INGV

Stazione interferometrica INGV

# 308



## **Direttore Responsabile**

Stefano Gresta

## **Editorial Board**

Luigi Cucci - Editor in Chief (INGV - RM1)

Andrea Tertulliani (INGV - RM1)

Nicola Pagliuca (INGV - RM1)

Umberto Sciacca (INGV - RM2)

Alessandro Settimi (INGV - RM2)

Aldo Winkler (INGV - RM2)

Salvatore Stramondo (INGV - CNT)

Milena Moretti (INGV - CNT)

Gaetano Zonno (INGV - MI)

Viviana Castelli (INGV - BO)

Antonio Guarnieri (INGV - BO)

Mario Castellano (INGV - NA)

Mauro Di Vito (INGV - NA)

Raffaele Azzaro (INGV - CT)

Rosa Anna Corsaro (INGV - CT)

Mario Mattia (INGV - CT)

Marcello Liotta (INGV - PA)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Barbara Angioni

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

[redazionecen@ingv.it](mailto:redazionecen@ingv.it)

# Rapporti tecnici INGV

## STAZIONE INTERFEROMETRICA INGV

Giuseppe Urbini<sup>1</sup>, Achille Zirizzotti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Sismologia e Tettonofisica)

<sup>2</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Geomagnetismo, Aeronomia e Geofisica Ambientale)

# 308



## **Indice**

Introduzione	7
1. L'interferometro di Michelson e Morley	7
2. Le frange dell'interferometro	10
3. Risultati dell'esperimento	11
4. Esperienze d'interferometria recenti	11
5. La rivelazione delle onde gravitazionali	12
6. L'interferometro in fibra ottica	13
7. Interferometro INGV	15
8. Misure e Analisi	17
9. Conclusioni	18
Bibliografia	19
Sitografia	19
Appendice A	21
Appendice B	24



## Introduzione

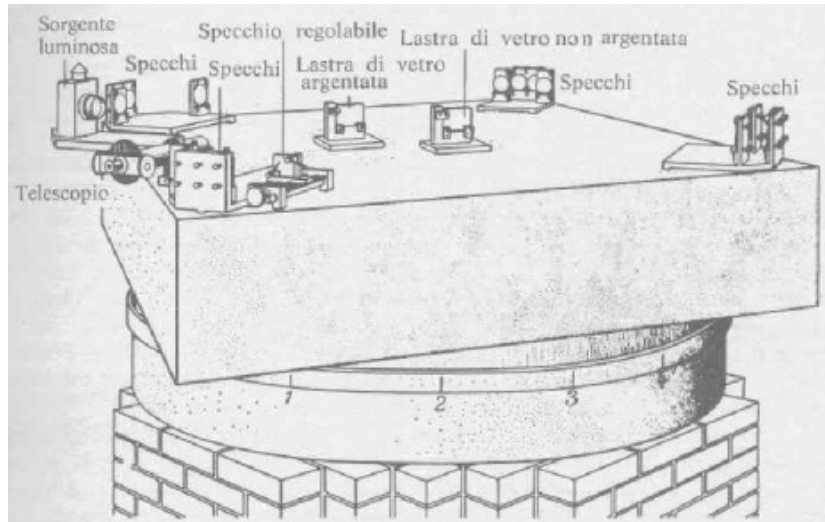
Gli interferometri sono strumenti ottici di elevata sensibilità, permettono di eseguire misure di lunghezze dell'ordine del centesimo della lunghezza d'onda della luce utilizzata. Gli interferometri in fibra, che utilizzano le fibre ottiche come mezzo di propagazione della luce, se paragonati con gli interferometri ottici in aria, sono ugualmente sensibili, ma più semplici da realizzare, e questo grazie anche al notevole sviluppo che negli ultimi decenni le fibre ottiche hanno avuto nel campo delle telecomunicazioni. In questa nota si cercherà di descrivere il loro principio di funzionamento attraverso l'analisi di due importantissimi utilizzi di questi strumenti: l'esperimento di Michelson e Morley e il rilevamento delle onde gravitazionali. Verranno anche descritti i due interferometri in fibra ottica realizzati presso i laboratori di elettronica dell'INGV e i risultati ottenuti.

### 1. L'interferometro di Michelson e Morley

L'esperimento di Michelson e Morley è stato realizzato nel 1887 [Michelson, 1887], ed è il più famoso esperimento ottico mediante un interferometro. Esso è stato originariamente concepito per evidenziare l'esistenza dell'etere, il mezzo che si credeva permeasse tutto lo spazio e permettesse il moto delle onde elettromagnetiche. Durante il XIX secolo si formulò l'ipotesi che lo spazio fosse permeato di una sostanza invisibile denominata "etere" che aveva certe caratteristiche come "densità quasi nulla" (considerando per analogia che la velocità di un'onda sonora è inversamente proporzionale alla radice della densità del mezzo che attraversa) e "completa trasparenza". Si pensava inoltre che ogni corpo in movimento nell'universo fosse esposto ad un "vento d'etere" con una velocità uguale alla velocità del moto, ma con direzione opposta (così come l'aria crea un vento quando ci muoviamo in velocità attraverso essa). La Terra e il sistema solare orbitano attorno al centro della nostra galassia a una velocità di 217 km/s. Un vento d'etere con quella velocità avrebbe dunque dovuto investire la Terra in direzione opposta al moto di rivoluzione galattica. Il moto del sistema solare nella galassia non era ben noto nel XIX secolo, ma era chiaramente noto il moto di rotazione della terra intorno al proprio asse. A causa di questo moto, l'effetto aspettato sarebbe un vento d'etere variabile con la latitudine, con un picco di 460 m/s all'equatore. Di maggiore portata è il moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole, con una velocità di circa 29.8 Km/sec. L'effetto combinato di questi due moti, concordi durante la notte e opposti durante la giornata, dovrebbe generare un vento d'etere con una velocità variabile sinusoidalmente nell'arco dell'intera giornata, oppure invertirsi con una rotazione di 180° del dispositivo di misura.

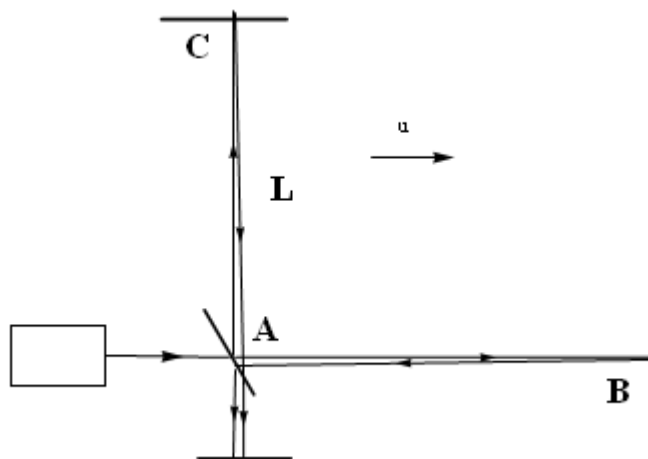
Dall'effetto Doppler nella propagazione del suono, è noto che, nel caso del movimento della sorgente la velocità dell'onda sonora non cambia (perché come detto dipende dal mezzo attraversato) mentre a cambiare, è la lunghezza d'onda. Nel caso del moto dell'ascoltatore invece la velocità dell'onda sonora è aumentata o diminuita della velocità dell'ascoltatore nel mezzo. Poincaré ipotizzò, essendo la velocità della luce la stessa per sorgenti in moto, la presenza di un mezzo, l'etere, che tutto pervade e dalle cui caratteristiche dipende il valore della velocità della luce. Mentre guardando una sorgente ferma sulla terra, a causa del suo moto, poteva essere resa evidente la variazione di velocità della luce causata dal vento dell'etere.

Questo è il risultato che l'esperimento di Michelson e Morley doveva verificare. Se il vento d'etere fosse esistito, la velocità della luce sarebbe stata diversa nelle varie ore della giornata, quindi guardando all'interno dell'interferometro, si sarebbero viste delle frange d'interferenza cambiare durante il giorno e a seconda del posizionamento dello strumento [Michelson, 1887]. L'esperimento utilizzava raggi luminosi che si propagavano nell'aria prima di interferire fra loro. Gli sperimentatori in pratica si aspettavano che la rotazione dell'interferometro avrebbe prodotto un visibile spostamento delle frange d'interferenza osservate dovuto alla rotazione della terra sul proprio asse. Questo non accadde, Michelson e Morley non osservarono alcun cambiamento nella figura di interferenza, dimostrando così che l'etere e la Terra erano rispettivamente fermi l'uno rispetto all'altro o meglio, visto il moto della terra, che l'etere non esisteva. Inoltre avevano dimostrato che la velocità della luce è invariante rispetto al moto del sistema di riferimento. In realtà essi misurarono una velocità della Terra rispetto all'etere molto piccola (trascurabile negli errori di misura), e questo portò a considerare l'esperimento fallito. Questa esperienza mostrò che, contrariamente a quanto ci si poteva attendere dall'applicazione delle trasformazioni Galileiane, la velocità della luce non dipende dal moto dell'osservatore o della sorgente nello spazio ed è la stessa qualunque sia il sistema inerziale in cui è misurata.



**Figura 1.** Disegno dell'esperimento di Michelson e Morley.

L'esperimento, raffigurato nella figura 1 è schematizzato nella figura 2. Fondamentalmente era costituito da una sorgente luminosa, uno specchio semiriflettente A e due specchi riflettenti in B e C. In realtà per aumentare la lunghezza dei bracci e quindi la sensibilità dello strumento, i lati AC e AB erano percorsi più volte con l'utilizzo di diversi specchi come mostrato nella figura 1. Il tutto era poggiato su di un blocco di pietra appoggiato in una vasca, contenete mercurio (per ridurre le oscillazioni) e libero di ruotare nel piano orizzontale.



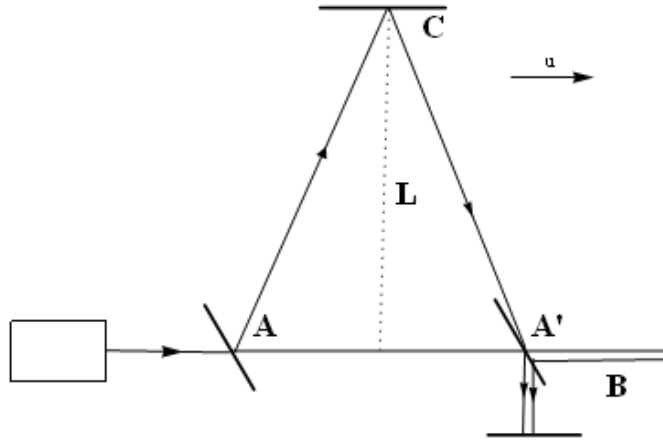
**Figura 2.** Schema dell'interferometro.

La differenza temporale fra i due tragitti ABA e ACA, indicando con  $t_{ABA}$  e  $t_{ACA}$  i due tempi e con  $L$  la lunghezza dei bracci,  $c$  la velocità della luce e  $u$  la velocità della terra, si ottiene nel seguente modo:

$$t_{ABA} = \frac{L}{c - u} + \frac{L}{c + u} = \frac{2Lc}{c^2 - u^2} = \frac{2L}{c} \frac{1}{1 - \frac{u^2}{c^2}} \quad (1)$$

Considerando che a causa del moto della terra il punto A si è spostato in A' e che quindi la luce ha seguito il percorso ACA' (figura 3).





**Figura 3.** Dettaglio del percorso della luce durante il moto della terra.

Applicando il teorema di Pitagora al triangolo ACA' si ha:

$$\left(\frac{c t_{ACA}}{2}\right)^2 = L^2 + \left(\frac{u t_{ACA}}{2}\right)^2 \quad (2)$$

Ricavando  $t_{ACA}$  da questa espressione, si ottiene:

$$t_{ACA} = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (3)$$

Questa formula può essere vista anche come la dilatazione del tempo  $2L/c$  impiegato dalla luce nel percorrere il tratto di lunghezza  $2L$ , a causa del moto del sistema. I due raggi di luce arriveranno sul rivelatore con una differenza di tempo pari a:

$$t_{ABA} - t_{ACA} = \frac{2L}{c} \left( \frac{1}{1 - \frac{u^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \right) \quad (4)$$

In prima approssimazione questa differenza può essere sviluppata in serie di termini  $u/c$ , e prendendo i primi due termini della serie, si ottiene:

$$\delta t = t_{ABA} - t_{ACA} = L \frac{u^2}{c^3} + o\left(\frac{u}{c}\right)^4. \quad (5)$$

Tenendo conto che per il moto di rotazione della terra ha una velocità  $u \cong 460$  m/s e  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s si ottiene:

$$\delta t \sim L * 10^{-20} \quad (6)$$

Considerando invece il moto di rivoluzione della terra intorno al sole  $u \cong 30$  Km/s  $\delta t \cong 10^{-17}$  s per ogni metro di braccio dell'interferometro, mentre nel caso del moto nella nostra galassia  $u \cong 300$  Km/s e si ottiene un valore cento volte più grande, con effetti quindi misurabili. Da notare che, la lunghezza del braccio  $L$ , è importante per la sensibilità dello strumento e che il tempo  $t_{ABA}$  è maggiore del tempo  $t_{ACA}$ .

## 2. Le frange dell'interferometro

In generale l'interferometria si basa sulla sovrapposizione di due raggi luminosi per misurare le differenze di fase tra di essi. Gli interferometri utilizzano due (o più) raggi luminosi alla stessa frequenza. Facilmente questo può essere ottenuto dividendo in due il raggio incidente proveniente da una sorgente, guidando questi raggi su percorsi differenti e ricombinandoli insieme per creare figure d'interferenza.

Il campo elettrico  $E_{tot}$  risultante dalla sovrapposizione delle due onde luminose [Born, 1970] può essere schematizzato come la somma di due onde piane propaganti lungo l'asse  $z$  alla stessa frequenza e sarà dato da:

$$E_{tot} = E_1 + E_2 = A_1 \exp[i(kz - \omega t + \varphi_1)] + A_2 \exp[i(kz - \omega t + \varphi_2)] \quad (7)$$

dove  $\omega = 2\pi f$  è la frequenza angolare e  $f$  la frequenza dell'onda,  $k = 2\pi/\lambda$  è la pulsazione spaziale e  $\lambda$  la sua lunghezza d'onda, mentre  $\varphi$  è la fase dell'onda. La frequenza di un'onda luminosa è veramente alta ( $\sim 10^{14}$  Hz) e di essa possiamo rivelare solo l'intensità luminosa  $I$ :

$$I \propto \langle |E_1 + E_2|^2 \rangle = |E_1|^2 + |E_2|^2 + 2\text{Re}(E_1 E_2^*) \quad (8)$$

dove con i simboli  $\langle \rangle$  indicano il valor medio dell' modulo e con  $*$  il complesso coniugato.

La somma delle intensità, quindi non è semplicemente la somma delle singole intensità, ma si aggiungerà (o sottrarrà) un termine proporzionale al coseno della differenza di fase tra le due onde:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (9)$$

Questo termine contribuirà costruttivamente se la differenza di fase è  $2n\pi$ , con  $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$  mentre contribuirà in maniera distruttiva se la differenza di fase è  $(2n+1)\pi$  con  $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Da notare che nel primo caso si avrà una intensità  $I_{Max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$  mentre nel secondo caso  $I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$ . Un importante parametro è il contrasto di visibilità o la profondità di modulazione delle frange data da  $\frac{I_{Max} - I_{min}}{I_{Max} + I_{min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}$ .

Possiamo scrivere l'intensità luminosa anche come:

$$I = \frac{I_{Max} - I_{min}}{2} [1 + \cos \Delta\varphi] + I_{min} \quad (10)$$

Queste relazioni sono sfruttate in un interferometro quando le due onde con la stessa frequenza, lunghezza d'onda e fase iniziale, ma percorrendo differenti percorsi raggiungeranno il punto d'interferenza con fasi differenti dovute alla differenza di cammino  $\Delta x$  oppure a differenze nei tempi di arrivo  $\Delta t$ :

$$\Delta\varphi = k \Delta x = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda} = 2\pi f \Delta t \quad (11)$$

Ossia una variazione del percorso  $\Delta x$  pari alla lunghezza d'onda luminosa ( $\sim 100$  nm), oppure differenze nei tempi di arrivo pari al periodo dell'onda ( $\sim 0.01$  ps), produrranno cambi nella figura d'interferenza, con cambi nell'intensità luminosa da un valore massimo d'intensità a un valore minimo.

Proiettando la figura d'interferenza su di uno schermo (o guardando il raggio con un oculare) si potranno vedere delle frange alternate di chiari scuri dovuti ai cammini ottici più lunghi. La posizione dei massimi e minimi sullo schermo dipenderà dal coseno dell'angolo di vista. Da notare che nella pratica la figura d'interferenza dipende anche dall'allineamento e dalla posizione degli specchi. Se gli specchi non sono perfettamente allineati, la figura d'interferenza sarà composta da una serie di bande alternativamente luminose e scure abbastanza dritte e parallele, molto simili alle frange prodotte da un cuneo d'aria ideale. Queste bande sono dette frange di eguale spessore o dritte. Come la differenza di percorso tende a zero lo

spessore delle frange diminuisce rendendole indistinguibili a occhio nudo. Se i due specchi sono correttamente allineati e i loro piatti paralleli in modo che le differenze di percorso siano le stesse in tutte le regioni degli specchi, le frange d'interferenza saranno composte da una serie di cerchi concentrici. Ciascun cerchio corrisponde a un differente angolo di vista. Queste frange sono dette frange di uguale inclinazione e quando la differenza di percorso tende a zero, la figura d'interferenza collassa e tutte le frange si muovono verso il centro, scomparendo. Spostando la posizione dello specchio riflettente (collegandolo ad esempio a una vite micrometrica con tacche) varia la lunghezza di uno dei bracci dell'interferometro e si sposterà anche la posizione della frangia. La variazione di lunghezza di uno dei bracci sarà misurabile quindi in termini di multipli della lunghezza d'onda della luce utilizzata.

### 3. Risultati dell'esperimento

Nell'esperimento di Michelson e Morley furono compiute sei rotazioni complete dell'interferometro ogni rotazione era stata divisa in 16 parti su ogni parte veniva effettuata una misurazione in questo modo: fissata sullo schermo la posizione di una frangia ben visibile, si misurano il numero di tacche sulla vite micrometrica, necessarie a far tornare la frangia nella posizione segnata. Purtroppo (o per fortuna) non furono evidenziate variazioni nei tempi di arrivo dei due raggi luminosi e quindi nessuna variazione della loro velocità dovuta al vento dell'etere. L'esperimento di Michelson e Morley non dette risultati apprezzabili e questo portò a ipotizzare l'invarianza della velocità della luce in qualunque sistema di riferimento in moto. In seguito a questi risultati e utilizzando le trasformazioni di Lorentz, Einstein introdusse una correzione ai calcoli considerando la contrazione delle lunghezze nella direzione del moto. Infatti, considerando che nel ramo AB la lunghezza sarà:

$$L_{AB} = L \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \quad (12)$$

Si ottiene:

$$t_{ABA} - t_{ACA} = \frac{2L_{AB}}{c} \frac{1}{1 - \frac{u^2}{c^2}} - \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = 0 \quad (13)$$

che spiega il risultato nullo dell'esperimento.

### 4. Esperienze d'interferometria recenti

Dopo quello di Michelson e Morley nel 1887, sono stati effettuati molti altri esperimenti per verificarne i risultati, specialmente nel secolo scorso, anche utilizzando differenti mezzi di propagazione rispetto all'aria. Infatti, considerando che la presenza di un mezzo cambia il risultato dell'equazione (4) attraverso l'introduzione della velocità di propagazione dell'onda luminosa  $v = c/n$  e che la contrazione della lunghezza (12) non dipende dall'indice di rifrazione del mezzo, possiamo riscrivere l'equazione (13) ottenendo:

$$t_{ABA} - t_{ACA} = \frac{2L_{AB}n}{c} \frac{1}{1 - \frac{n^2u^2}{c^2}} - \frac{2Ln}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{n^2u^2}{c^2}}} = \frac{2Ln}{c} \left( \frac{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}{1 - \frac{n^2u^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{n^2u^2}{c^2}}} \right) \quad (14)$$

Questa espressione può essere sviluppata in serie di termini in  $u/c$ :

$$\delta t = t_{ABA} - t_{ACA} = L \frac{n(n^2 - 1)u^2}{c^3} + o\left(\frac{u^4}{c^5}\right) \quad (15)$$

In questa espressione si ha  $\delta t=0$  se  $u=0$ , cioè se l'interferometro è fermo, ma si ha  $\delta t = 0$  anche per  $u \neq 0$  e  $n = 1$ , cioè se la luce viaggia nel vuoto. In presenza di aria o di un mezzo con indice di rifrazione  $n \neq 1$  si ha comunque un risultato piccolo e diverso da zero.

Per confrontare questo con i risultati dell'esperimento di Michelson e Morley [Cahill, 2003; Cahill, 2005] dobbiamo limitarci alla meccanica Newtoniana e ripartendo quindi dall'equazione 5, considerare la presenza di un mezzo con indice  $n$ . Si ottiene quindi per  $u \ll c$  :

$$\delta t = Ln^3 \frac{u^2}{c^3} + O\left(\frac{u^4}{c^5}\right) \quad (16)$$

Facendo il confronto fra la (16) e la (15) a parità di  $\delta t$ , otteniamo la velocità corretta (dove  $u_M$  rappresenta la velocità misurata da Michelson e Morley) infatti per  $n \approx 1$   $n(n^2-1) \approx (n^2-1)$ :

$$u = \frac{\sqrt{n^3}}{\sqrt{n^2-1}} u_M \approx \frac{u_M}{\sqrt{n^2-1}} \quad (17)$$

Notare che per l'aria, in condizioni di temperatura e pressione standard ( $T = 0^\circ \text{C}$  e  $P = 1 \text{ atm}$ )  $n = 1.00029$ , mentre per l'elio  $n = 1.000036$ , e quindi il fattore di conversione è grande.

Quindi, sulla base di questi calcoli, le velocità piccole rilevate nell'esperimento di Michelson e Morley, corrispondono (con le correzioni sull'indice di rifrazione) a velocità più grandi. Si è così fatto notare che l'esperimento di Michelson e Morley non dette risultati nulli ma molto piccoli e estremamente significativi. Partendo da un'espressione più generale della differenza  $\delta t = (t_{ABA} - t_{ACA})$  [Cahill, 2007]:

$$\delta t = k^2 \frac{Lu^2}{c^3} \quad (18)$$

dove  $u$  è la proiezione della velocità lungo il braccio dell'interferometro. Un ruolo fondamentale lo gioca la costante  $k$ , detta anche costante di calibrazione, e risulta dall'equazione (15)  $k^2 = n(n^2 - 1)$ , dipendente quindi dall'indice di rifrazione  $n$  del mezzo di propagazione. Nel caso delle fibre ottiche  $n$  può essere assunto genericamente uguale a 1.5.

## 5. La rivelazione delle onde gravitazionali

Così come previsto dalla teoria della relatività generale, le onde gravitazionali vengono generate quando la curvatura dello spazio tempo viene disturbata da masse in forte accelerazione. Queste onde sono vibrazioni sulla curvatura dello spazio tempo e si propagano alla velocità della luce. Un'onda piana gravitazionale di ampiezza  $h$  causa una deformazione  $\delta l / l$  nel piano ortogonale alla direzione di propagazione di una quantità pari alla propria ampiezza. Lo spazio viene allungato in una direzione di questo piano e contratto nella direzione ortogonale (in realtà la teoria prevede una radiazione quadrupolare con due polarizzazioni a  $45^\circ$  l'una dall'altra generando in un corpo sia allungamenti che contrazioni in queste direzioni). Questo fatto permette la possibilità di rivelare le onde gravitazionali con una barra di alluminio sospesa per il suo baricentro come se fosse un'antenna gravitazionale risonante. Infatti, in presenza dell'onda la barra comincerà a comprimersi ed estendersi periodicamente risuonando alla frequenza dell'onda gravitazionale incidente. Vari sono stati gli esperimenti condotti nel passato dalle prime antenne risonanti di Joseph Weber sin dal 1960 [J. Weber, 1968] sino alle antenne recenti MiniGRAIL [<http://www.minigrail.nl/>] e l'italiana Auriga [<http://www.auriga.lnl.infn.it/>] con barre di massa di migliaia di chilogrammi raffreddate intorno ai 0.1 K. Non sono stati prodotti purtroppo risultati importanti e attualmente le speranze per la rivelazione delle onde gravitazionali sono rivolte verso i grandi interferometri.

In un interferometro di Michelson con grandi specchi appesi e liberi di muoversi, la radiazione gravitazionale muovendoli farà variare in modo differenziale la lunghezza dei bracci generando variazioni nella figura d'interferenza e quindi nell'intensità della luce rivelata [Hough, 2005], [[www.virgo.infn.it/](http://www.virgo.infn.it/)], [[www.ligo.caltech.edu/advLIGO/](http://www.ligo.caltech.edu/advLIGO/)]). Le frequenze aspettate vanno da  $10^{-17}$  Hz fino a  $10^3$  Hz a seconda degli eventi astronomici che le hanno prodotte con deformazioni  $\delta l/l$  dell'ordine di  $10^{-21}$ . Per essere chiari per una

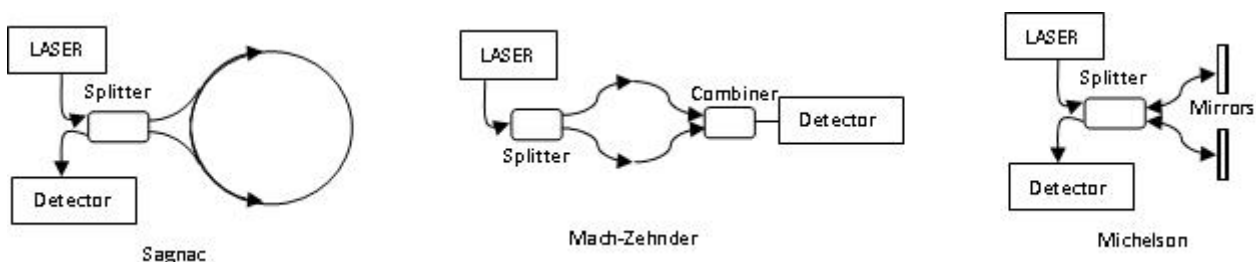
lunghezza di un metro si avrà un allungamento di  $10^{-21}$  m, per confronto i raggi atomici sono dell'ordine di  $10^{-10}$  m.

Gli interferometri, per la loro grande sensibilità e per come sono costruiti, sono gli strumenti ideali all'individuazione delle onde gravitazionali [Rowan, 2000], [http://www.ligo.caltech.edu/], [www.cascina.virgo.infn.it/advirgo], [www.et-gw.eu]. Essendo la sensibilità degli interferometri legata alla lunghezza dei bracci, sono stati realizzati interferometri a lunga base con lunghezze di 3-4 km alimentati da laser di grande potenza come l'americano LIGO di 4 km di lunghezza o la collaborazione Italo francese VIRGO presso Pisa di 2 km di lunghezza o la collaborazione tedesco inglese GEO 600 e il giapponese TAMA di 300 m di lunghezza [www.auriga.lnl.infn.it], [tamago.mtk.nao.ac.jp], [www.geo600.de], [www.ligo.caltech.edu], [www.virgo.infn.it], [www.ligo.caltech.edu/advLIGO], [www.cascina.virgo.infn.it].

## 6. L'interferometro in fibra ottica

Come detto gli interferometri sfruttano il fenomeno ottico dell'interferenza della luce e viene utilizzato in molti sistemi di misura ad alta precisione con opportuni sistemi d'accoppiamento con la grandezza da misurare. Il cammino ottico in aria può essere controllato da guide d'onda o fibre ottiche. L'uso delle fibre ottiche permette di realizzare questi strumenti in modo compatto ed economico. Inoltre l'utilizzo delle fibre ottiche riduce l'effetto della distorsione del fronte d'onda dovuto alle turbolenze dell'aria. Inoltre permette l'utilizzo di "splitter" e "combiner" del raggio luminoso al posto degli specchi che sono poco compatti e necessitano di una meccanica di precisione per il posizionamento e banchi ottici per la realizzazione dello strumento. Si possono in questo modo realizzare interferometri con bracci molto lunghi necessari ad esempio nella realizzazione di rilevatori di onde gravitazionali [Cahill, 2007], rilevatori di movimento contro intrusioni, [Jia et al., 2008]. Altri vantaggi nell'utilizzo delle fibre ottiche nell'interferometria sono, oltre l'alta sensibilità agli allungamenti dei bracci, l'immunità al rumore elettromagnetico e bassi consumi di potenza.

Almeno due percorsi ottici sono necessari per un esperimento d'interferometria. Questi percorsi ottici possono essere con due o più differenti modi. Ciascuno dei modi definisce un percorso ottico per l'interferometro come nell'interferometro di Sagnac (figura 4) in cui i cammini ottici sono definiti da due modi che viaggiano in senso orario e in senso antiorario all'interno di una fibra. Oppure i percorsi ottici possono essere definiti da fibre ottiche distinte come negli interferometri a fibra tipo Mach-Zehnder e Michelson. Esistono molte configurazioni di interferometri realizzati in fibra ottica anche con bracci multipli, in figura 4 sono illustrati gli interferometri tipo Sagnac, Mach-Zehnder e Michelson.



**Figura 4.** Differenti configurazioni di interferometri realizzati in fibra ottica.

Un altro punto importante è che sia la coerenza temporale che spaziale sono necessarie per manifestare gli effetti dell'interferenza tra due onde. Infatti, quando due onde interferiscono, possono sommarsi tra di loro e quindi interferire costruttivamente o sottrarsi con un'interferenza distruttiva, in ragione delle loro differenze di fase. Due onde sono dette coerenti se hanno una differenza di fase costante. Il grado di coerenza si misura attraverso la visibilità dell'interferenza che ci dice quanto perfettamente le onde interferiscono prima di cancellare (con un'interferenza distruttiva) la loro figura.

La coerenza spaziale in generale per un'onda (o particella) è una misura di correlazione tra campo elettrico (o funzioni d'onda) in due diverse posizioni nello spazio. La coerenza temporale è invece una misura di correlazione (o una nota relazione di fase) tra campi (o funzioni d'onda) osservata in diversi istanti. Tutte e due le coerenze sono misurabili attraverso un interferometro di Michelson o l'interferometro a doppia fenditura di Young. Con il primo una volta formata la figura d'interferenza si sposta la posizione dello specchio fino a farla scomparire. Il tempo impiegato dall'onda per percorrere questo spazio (detta lunghezza di coerenza) è il tempo di coerenza. C'è una relazione tra il tempo di coerenza  $\tau$  e la larghezza di banda  $\Delta f$  di un segnale  $\tau \Delta f \sim 1$ . Similmente nell'interferometro di Young si allontanano le doppie fenditure fino alla distanza in cui le frange spariscono, mostrandoci la coerenza spaziale della sorgente utilizzata. Per la definizione matematica delle onde piane monocromatiche che abbiamo usato finora nella nostra analisi, sono infiniti il tempo di coerenza e la coerenza spaziale.

Nella pratica, un interferometro con bracci molto lunghi deve verificare la condizione di coerenza, semplificando, i percorsi di tutte le onde devono differire di meno della lunghezza di coerenza, altrimenti l'interferenza non può essere osservata. La lunghezza di coerenza cambia tra le diverse sorgenti a LED, luce bianca o a laser. La migliore lunghezza di coerenza è quella dei laser (in quanto fortemente monocromatici). Per un laser He-Ne modo singolo può essere maggiore di 300 m, mentre alcune sorgenti a LED hanno lunghezza di coerenza di pochi centimetri, mentre per le lampade a tungsteno si ha  $\sim 600$  nm. Dato che si ha  $\Delta f = c \Delta \lambda / \lambda^2$ , allora la lunghezza di coerenza  $\lambda^2 / \Delta \lambda \sim 2$  mm, dove  $\Delta f$  e  $\Delta \lambda$  rappresentano la larghezza spettrale della sorgente.

Il contrasto di visibilità delle frange d'interferenza dipende dalla larghezza dello spettro (e conseguentemente dalla lunghezza di coerenza) della luce utilizzata. Allungamenti della lunghezza del percorso dei raggi che devono interferire diminuiscono la visibilità della figura d'interferenza. Quando la lunghezza del percorso è uguale alla lunghezza di coerenza la visibilità è zero e la figura d'interferenza non è più visibile.

Importante notare che possono interferire (sovrapposizione lineare del campo elettrico scalare eq. 7) solo segnali luminosi che hanno la stessa polarizzazione. Altrimenti la somma di due onde polarizzate diversamente, genererebbe un'onda con una diversa polarizzazione senza mostrare interferenza. Questo implica che il mezzo attraversato dall'onda deve mantenere la polarizzazione del segnale luminoso. Per questo esistono specifiche fibre ottiche dette a mantenimento della polarizzazione. Le fibre ottiche a mantenimento della polarizzazione sono fibre ottiche "single mode" in cui la luce mantiene la propria polarizzazione lineare durante la propagazione.

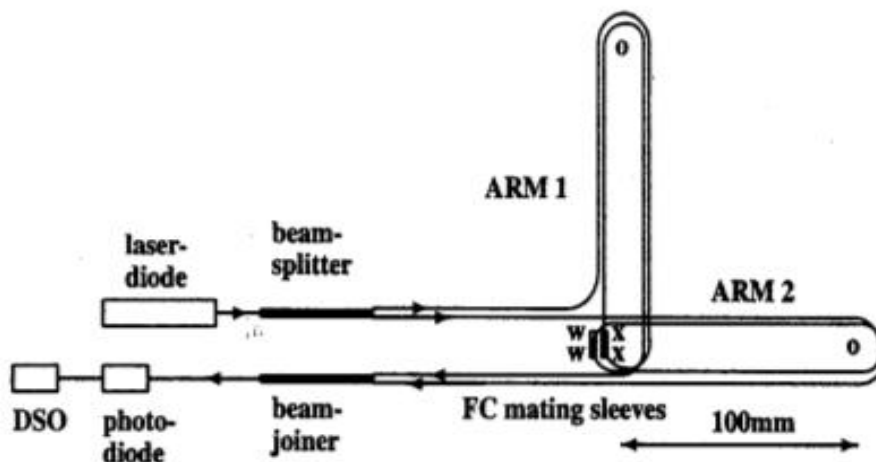


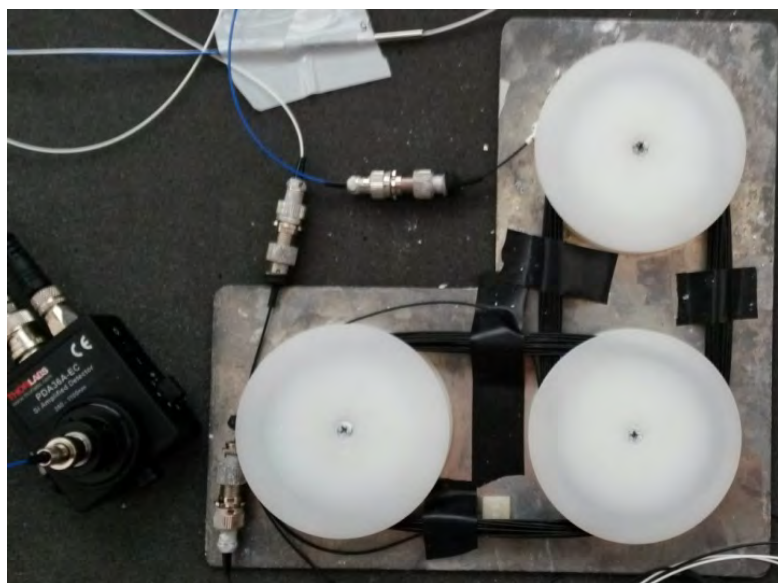
Figura 5. Schema interferometro in fibra ottica [da Cahill, 2007].

In una normale fibra, i due modi di polarizzazione (verticale ed orizzontale) hanno la stessa velocità di fase a causa della simmetria circolare della fibra. Tuttavia piccole quantità di birifrangenza (variazione dell'indice di rifrazione con la polarizzazione dell'onda) casuali, o piegature nella fibra, possono causare una piccola quantità di interferenza tra la polarizzazione verticale e la polarizzazione orizzontale. E poiché anche

un brevissimo tratto di fibra (con un coefficiente di accoppiamento piccolo), è molte migliaia di lunghezze d'onda lungo, può far cambiare lo stato di polarizzazione. Poiché tale coefficiente di accoppiamento è casuale (o il risultato di uno stress arbitrario o di una flessione applicata alla fibra), lo stato di polarizzazione in uscita potrà essere casuale e variare come le sollecitazioni applicate. Da notare che questo rende gli interferometri a fibra sensibili alle sollecitazioni e vibrazioni esterne. Le fibre a mantenimento della polarizzazione lavorano introducendo intenzionalmente una birifrangenza lineare sistematica nella fibra, così che vi sono due modi di polarizzazione ben definiti che si propagano lungo la fibra con velocità di fase ben distinte. Comunque esistono dei dispositivi ottici detti polarizzatori in linea che permettono di utilizzare delle normali fibre "single mode" e mantenere comunque la polarizzazione del segnale lungo il percorso dell'interferometro.

## 7. Interferometro INGV

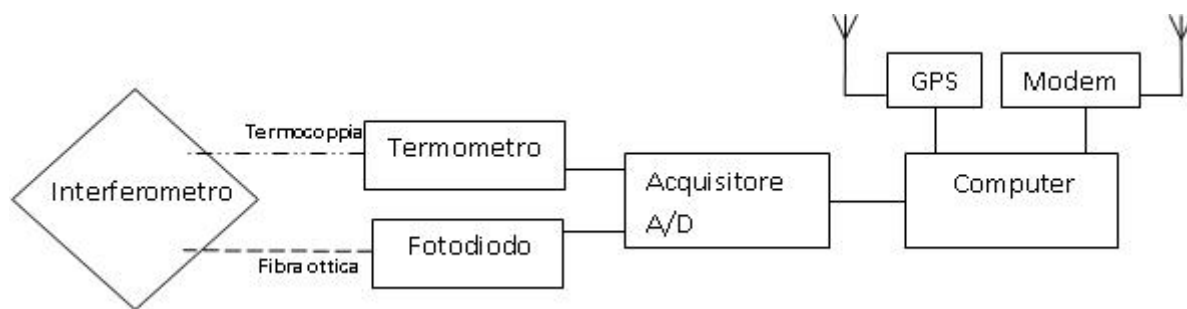
L'interferometro costruito nei laboratori dell'INGV (schematizzato in figura 5) è un interferometro tipo Mach-Zehnder realizzato in fibra ottica. Le fibre ottiche possono essere arrotolate e piegate abbastanza facilmente permettendo di convogliare facilmente il raggio luminoso ma soprattutto permettono una discreta libertà di assemblaggio dell'interferometro. In figura 6 si possono vedere le fibre nere arrotolate intorno ai rocchetti in plastica bianca a formare i due bracci dell'interferometro. Inoltre l'interferometro è composto da pochi componenti opto-elettronici a basso costo e facilmente reperibili (in appendice B i datasheet dei componenti ottici utilizzati), sono stati infatti utilizzati: una fibra ottica a mantenimento della polarizzazione come mezzo di propagazione della luce e due accoppiatori ottici utilizzati come "beam splitter" e "beam joiner". La sorgente luminosa monocromatica è costituita da un diodo laser ( $\lambda=635\text{nm}$ ) con una lunghezza di coerenza di 10 km. Il segnale ottico, generato dal diodo laser, è dapprima scisso in due (al 50%) dal "beam-splitter" (in pratica un accoppiatore direzionale che opera sulla potenza ottica d'ingresso con fattore d'accoppiamento  $\alpha=0,5$  con un'attenuazione di 3.7 dB). Questi due segnali prendono strade differenti lungo i due bracci dell'interferometro (ARM1 e ARM2) e si ricongiungono nel "beam-joiner". Qui le differenze di fase fra i due segnali danno luogo a effetti d'interferenza che si manifestano tramite le variazioni dell'intensità della luce, queste variazioni sono misurate dall'amplificatore a fotodiode e in uscita generano un segnale di tensione variabile nel tempo che è proporzionale all'intensità del segnale ottico d'ingresso e quindi (entro certi limiti), proporzionale al  $\delta t$  (eq. 11), [Cahill, 2007].



**Figura 6.** Interferometro con i suoi due bracci ortogonali e sulla sinistra il fotodiode.

Questo interferometro è stato utilizzato per costruire una stazione di misura indipendente e completa da installare in un luogo remoto non presidiato per limitare disturbi acustici, vibrazioni ed interferenze

elettromagnetiche. Lo schema a blocchi della stazione interferometrica a fibre ottiche (denominata FOIS “Fiber Optic Interferometric Station”) è schematizzata in figura 7. L’interferometro realizzato presso l’INGV è essenzialmente identico per tipologia all’apparato di Cahill [2003] con due differenze: la lunghezza d’onda è di 635 nm invece di 650 nm e la lunghezza dei cammini in fibra ottica è di 10 metri (10 metri di fibra ottica singolo modo e a mantenimento della polarizzazione). Come sorgente del segnale è stato utilizzato un diodo laser, alimentato a 5 Volt con una potenza di uscita di 4,5 mW, per le connessioni in fibra ottica sono stati utilizzati degli appositi connettori con un blocco meccanico per l’allineamento delle direzioni di polarizzazione delle fibre. Il segnale interferometrico è otticamente collegato al fotodiodo e convertito in tensione. La variazione dell’intensità luminosa dovuta all’accoppiamento delle due onde è convertita in una variazione di tensione, digitalizzata a 16 bit con una frequenza di acquisizione di 10 Hz. Per il sistema di acquisizione dati è stato usato un modulo convertitore analogico digitale della “National Instruments” NI USB 6211 collegato a un PC portatile. I dati sono memorizzati in file binari giornalieri con un “marker” temporale al secondo, generato dal clock del PC (Appendice A per i dettagli). Un GPS è collegato al computer di acquisizione per avere un preciso riferimento temporale, uno specifico programma sincronizza il clock del PC con il tempo del GPS quotidianamente. Una termocoppia tipo K è collegata all’interferometro e permette di rivelare la temperatura dell’acqua in cui è immerso l’interferometro, in modo da monitorarne continuamente le condizioni di funzionamento, data l’estrema sensibilità dello strumento alle variazioni di temperatura. Anche la temperatura viene registrata nel file dati ogni secondo, insieme con il marker temporale (Appendice A). Attraverso la scheda di rete del computer è possibile collegarsi in modo remoto alla stazione per controllarne il funzionamento e lo scarico quotidiano dei dati acquisiti.

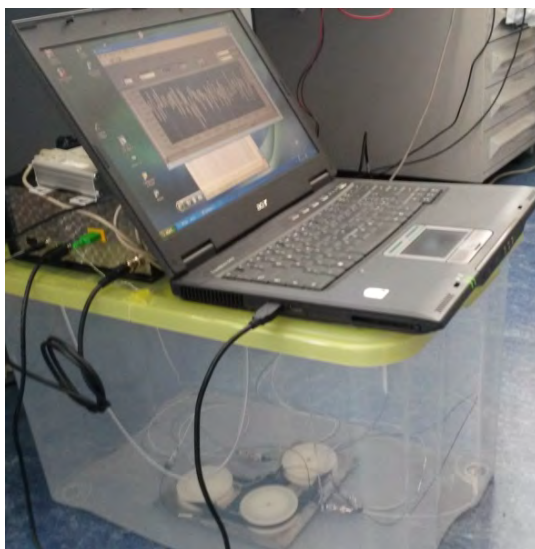


**Figura 7.** Schema della stazione interferometrica FOIS.

Durante le prime misure si sono evidenziati due problemi: la dipendenza delle misure dalla temperatura e l’estrema sensibilità dell’apparato alle vibrazioni. Per risolvere il problema della stabilizzazione della temperatura dell’apparato si è pensato ad una termostatazione passiva cioè tutte le parti ottiche del dispositivo sono state immerse in acqua demineralizzata. Come visibile dall’immagine della stazione in figura 8, l’interferometro è posto all’interno di una scatola di plastica contenente acqua, mitigando le rapide variazioni di temperatura della stazione dovute alle variazioni di temperatura dell’ambiente esterno. Per quanto riguarda la sensibilità alle vibrazioni non si è cercato di smorzare con filtri meccanici il piano dell’interferometro perché si cercherà di investigare correlazioni con eventi sismici di varie intensità, utilizzando quindi l’interferometro come un sismografo [Gardener, 1987]. Per questo motivo sono stati realizzati due interferometri uguali, uno dei due sarà installato presso la sede di Preturo (AQ) dell’INGV, l’altro rimarrà nei Laboratori di Elettronica di Roma.

Inoltre un’altra particolarità di questo interferometro è che esso può rivelare la presenza di onde gravitazionali “light-speed anisotropy fluctuations” (la cui esistenza è stata messa in evidenza nella Teoria della Relatività di Einstein). In questo modo, un qualunque segnale che possa generare onde gravitazionali sarà rivelato su entrambi i dispositivi contemporaneamente e potrà essere evidenziato attraverso la ricerca di eventi coincidenti. I disturbi locali invece, non correlati nei due siti, non saranno presi in considerazione.



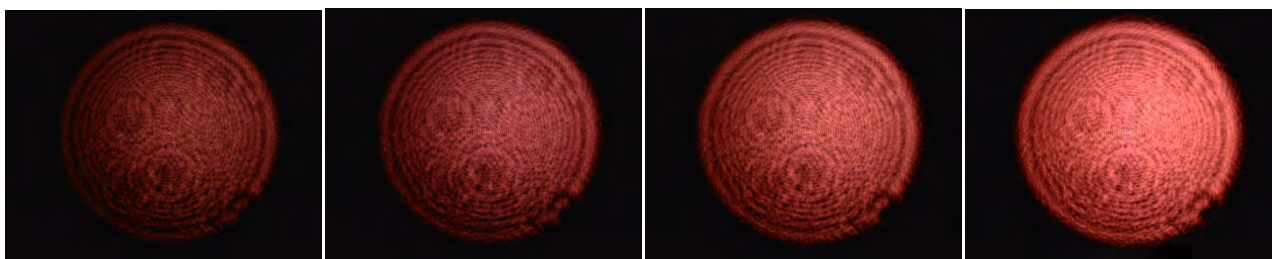


**Figura 8.** Immagine della stazione interferometrica FOIS.

## 8. Misure e Analisi

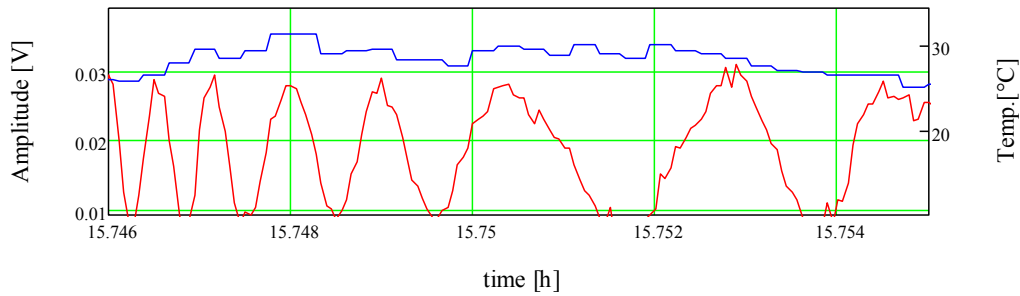
Per verificare il funzionamento dell'interferometro realizzato sono state effettuate delle misure di controllo.

Inizialmente, collegando una telecamera con una lente di ingrandimento all'uscita del "beam joiner" è stato possibile visualizzare l'intensità del raggio luminoso all'interno della fibra (figura 9). Riscaldando la fibra in un punto di uno dei due bracci è stato possibile visualizzare le variazioni dell'intensità luminosa (figura 9) dovute all'allungamento di uno dei bracci per il calore. Scollegando uno dei rami e ripetendo l'operazione di riscaldamento, l'intensità rimane costante. Questa è una prova dell'interferenza delle onde lungo i due rami dell'interferometro.



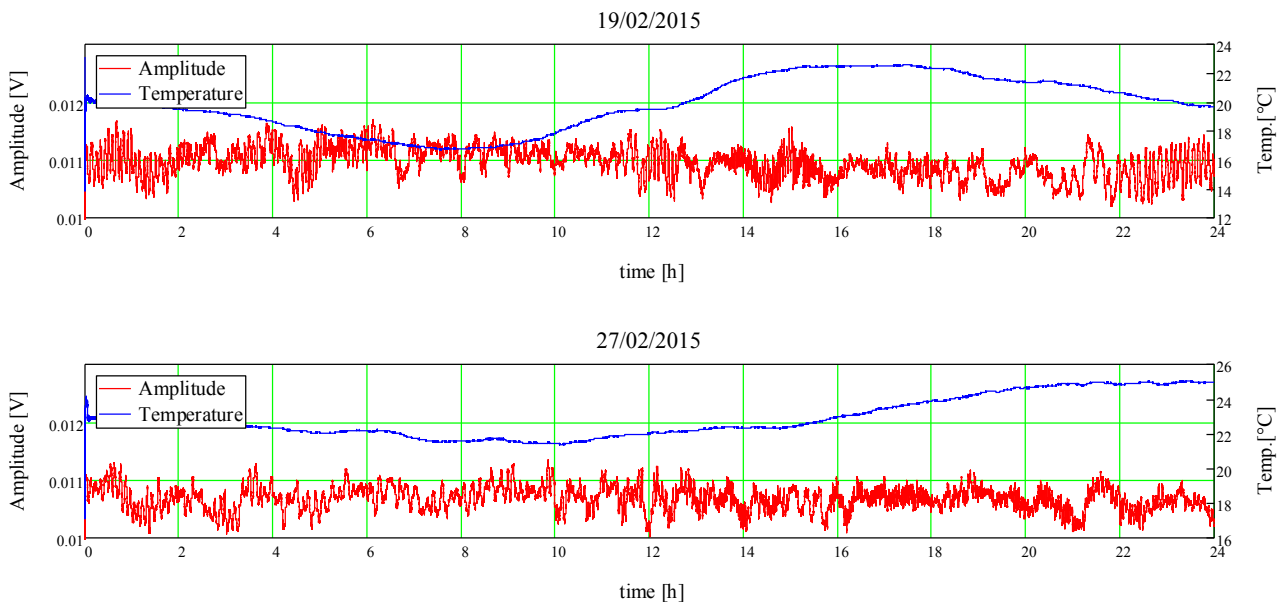
**Figura 9.** Variazioni dell'intensità luminosa all'interno della fibra dell'interferometro.

Successivamente si è cercato di misurare il coefficiente di espansione lineare delle fibre ottiche sfruttando la misura precedente. Infatti registrando la variazione di temperatura tra quattro massimi consecutivi dell'intensità luminosa e considerando che in base all'equazione (9) questo accade per una variazione di fase di  $2\pi$  per ogni massimo che corrisponde ad un allungamento totale della fibra pari a quattro volte la lunghezza d'onda ( $\lambda = 635 \text{ nm}$ ), ci permette di calcolare il coefficiente di allungamento. In figura 10 è possibile vedere la variazione di temperatura (linea blu) tra quattro massimi (linea rossa) partendo dal tempo  $t = 15.748$  con una temperatura di  $31.4^\circ\text{C}$ , fino alla fine del grafico, con una temperatura di  $26.6^\circ\text{C}$ . In questo modo si ottiene il coefficiente di espansione termica pari a  $0.53 \cdot 10^{-6} \text{ m}/^\circ\text{C}$ , comparabile con i valori pubblicati in letteratura. A questo punto continuando a scaldare la fibra si è cercato di calcolare la lunghezza di coerenza ma si è sempre vista la figura di interferenza. Abbiamo anche aggiunto altri 10 metri di fibra su di un lato dei rami senza distruggere la figura d'interferenza.



**Figura 10.** Allungamento della fibra con il riscaldamento.

In figura 11 si possono vedere due grafici della tensione di uscita dall'amplificatore a fotodiode in un periodo di 24 ore. I dati sono acquisiti a 10 campioni al secondo e mediati con una finestra di 100 s. Il giorno 19 febbraio (in alto) l'interferometro era in aria mentre il giorno 27 l'interferometro era immerso in acqua per una termostatazione passiva. Dal grafico della temperatura (linea blu) si nota, infatti, una diminuzione dell'escursione termica per quel giorno.



**Figura 11.** Due giorni di dati acquisiti dalla stazione interferometrica.

Dal grafico dell'ampiezza del segnale dell'interferometro (linea rossa) si notano subito comportamenti diversi nelle varie ore del giorno con oscillazioni a frequenze differenti che si cercherà di investigare nel tempo anche con tecniche spettrali e analisi di rumore per la singola stazione e correlazioni temporali per la ricerca di coincidenze tra le due stazioni.

## 9. Conclusioni

Completata la fase di realizzazione e caratterizzazione dello strumento, seguirà una lunga fase di acquisizione e analisi dei dati nei due siti prescelti di Roma e L'Aquila. Importante sarà la continuità di funzionamento dello strumento, garantito dal personale dei laboratori della sezione. L'analisi dei dati permetterà di verificare il funzionamento dello strumento, e di individuare i punti di miglioramento. Parallelamente alla fase di analisi dei dati saranno individuati e analizzati tutti i possibili nuovi impieghi di questo sensibilissimo strumento.

## Bibliografia

- Born M., and Wolf E., (1970). *Principles of Optics*. 4<sup>th</sup> ed., Pergamon, Oxford, UK.
- Cahill R.T., (2007). *Optical-fiber gravitational wave detector: Dynamical 3-space turbulence detected*. Prog. Phys., 4, 63-68, 2007.
- Cahill R.T. and Kitto K., (2003). *Michelson-Morley Experiments Revisited*. Apeiron, 10 (2),104-117.
- Cahill R.T., (2005). *The Michelson and Morley 1887 Experiment and the Discovery of Absolute Motion*. Progress in Physics, 3, 25-29, 2005.
- Hough J. and Rowan S., (2005). *Laser interferometry for the detection of gravitational waves*. J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 7 S25. doi:10.1088/1464-4258/7/6/001.
- Jia D., Fang, N., Wang L., & Huang Z., (2008). *Distributed Fiber Optic In-Line Intrusion Sensor System*. Proceeding of Microwave Conference, 2008 China-Japan Joint, pp. 608-611, ISBN 978-1-4244-3821-1.
- Gardener D.L., Hofler T., Baker S.R., Yarber R.K., Garrett S.L.A, (1987). *Fiber-optic Interferometric Seismometer*. Journal of Lightwave Technology, vol. LT-5, N. 1, July 1987 953.
- Michelson A.A., Morley E.W. (1887). *On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Aether*. Amer. J. Sci, Vol 34, No 203 333-345.
- Rowan S and Hough, J, (2000). *Gravitational Wave Detection by Interferometry*. (Ground and Space) Living Rev. Relativity, 3, 3. <http://www.livingreviews.org/Articles/Volume3/2000-3hough/>.
- Weber J., (1968). *Gravitational-Wave-Detector Events*. Phys. Rev. Lett., 20, 1307.

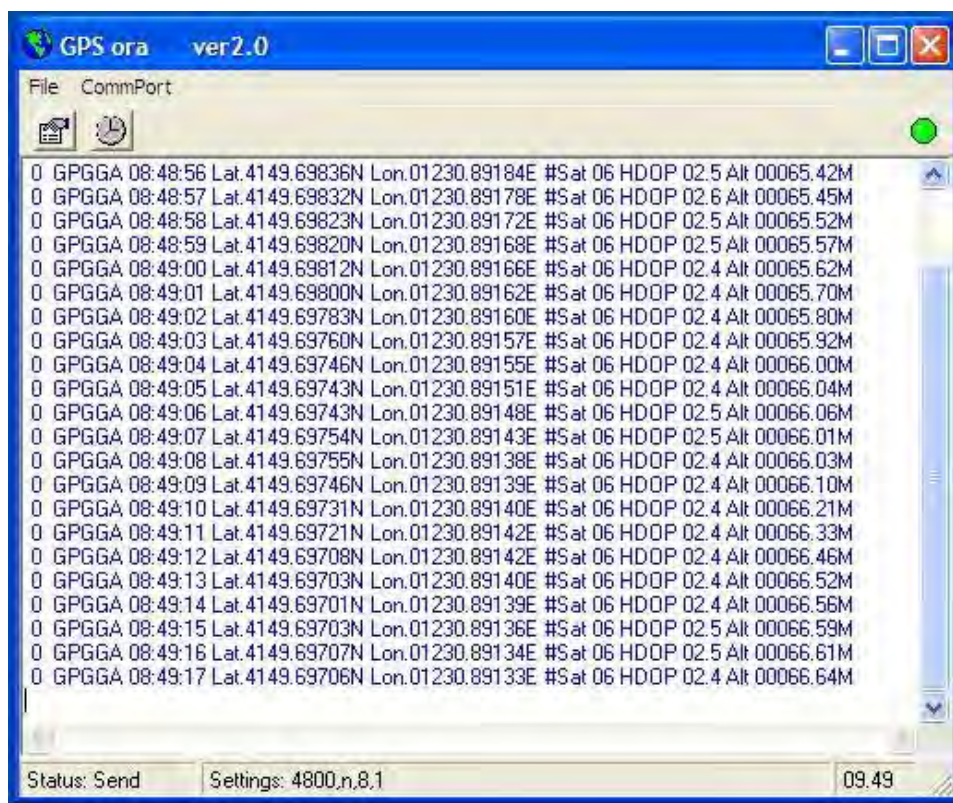
## Sitografia

- <http://www.minigrail.nl/>
- <http://www.auriga.lnl.infn.it/>
- <http://tamago.mtk.nao.ac.jp/>
- <http://www.geo600.de/>
- <http://www.ligo.caltech.edu/>
- <http://www.virgo.infn.it/>
- <http://www.ligo.caltech.edu/advLIGO/>
- <http://wwwcascina.virgo.infn.it/advirgo/>
- <http://www.et-gw.eu/>



## Appendice A

Il programma GPSora, la cui schermata è visibile in figura A1, è stato scritto in Visual Basic VB6 e permette di sincronizzare l'ora del computer con l'ora GPS (Global Positioning System). Il programma legge i dati del GPS collegato alla porta seriale del PC, o tramite un'interfaccia USB seriale. Il GPS invia i dati al computer tramite i codici NMEA (National Marine Electronics Association) uno standard di comunicazioni dati tra strumentazione marina comunemente utilizzata dai sistemi GPS. Tra tutti i codici di questo standard vengono presi in considerazione solamente i tre codici: GPGGA (Global Positioning System Fix Data), GPRMC (Recommended minimum specific GPS/Transit data), GPZDA (Date & Time), in quanto contengono nella risposta il tempo GPS. Il programma permette nella configurazione oltre al settaggio della porta seriale e della sua velocità di comunicazione anche il particolare codice che si vuole utilizzare. Una volta stabilita la comunicazione con il GPS viene inviata la richiesta di interrogazione e il GPS risponde con una stringa formattata di dati.



The screenshot shows a Windows application window titled "GPS ora ver2.0". The window has a menu bar with "File" and "CommPort". Below the menu bar are two icons: a printer and a clock. The main area of the window contains a list of 20 lines of NMEA data, all starting with "0 GPGGA". Each line contains a timestamp, latitude, longitude, and other technical details. At the bottom of the window, there is a status bar with "Status: Send", "Settings: 4800,n,8,1", and "09.49".

```
0 GPGGA 08:48:56 Lat.4149.69836N Lon.01230.89184E #Sat 06 HDOP 02.5 Alt 00065.42M
0 GPGGA 08:48:57 Lat.4149.69832N Lon.01230.89178E #Sat 06 HDOP 02.6 Alt 00065.45M
0 GPGGA 08:48:58 Lat.4149.69823N Lon.01230.89172E #Sat 06 HDOP 02.5 Alt 00065.52M
0 GPGGA 08:48:59 Lat.4149.69820N Lon.01230.89168E #Sat 06 HDOP 02.5 Alt 00065.57M
0 GPGGA 08:49:00 Lat.4149.69812N Lon.01230.89166E #Sat 06 HDOP 02.4 Alt 00065.62M
0 GPGGA 08:49:01 Lat.4149.69800N Lon.01230.89162E #Sat 06 HDOP 02.4 Alt 00065.70M
0 GPGGA 08:49:02 Lat.4149.69783N Lon.01230.89160E #Sat 06 HDOP 02.4 Alt 00065.80M
0 GPGGA 08:49:03 Lat.4149.69760N Lon.01230.89157E #Sat 06 HDOP 02.4 Alt 00065.92M
0 GPGGA 08:49:04 Lat.4149.69746N Lon.01230.89155E #Sat 06 HDOP 02.4 Alt 00066.00M
0 GPGGA 08:49:05 Lat.4149.69743N Lon.01230.89151E #Sat 06 HDOP 02.4 Alt 00066.04M
0 GPGGA 08:49:06 Lat.4149.69743N Lon.01230.89148E #Sat 06 HDOP 02.5 Alt 00066.06M
0 GPGGA 08:49:07 Lat.4149.69754N Lon.01230.89143E #Sat 06 HDOP 02.5 Alt 00066.01M
0 GPGGA 08:49:08 Lat.4149.69755N Lon.01230.89138E #Sat 06 HDOP 02.4 Alt 00066.03M
0 GPGGA 08:49:09 Lat.4149.69746N Lon.01230.89139E #Sat 06 HDOP 02.4 Alt 00066.10M
0 GPGGA 08:49:10 Lat.4149.69731N Lon.01230.89140E #Sat 06 HDOP 02.4 Alt 00066.21M
0 GPGGA 08:49:11 Lat.4149.69721N Lon.01230.89142E #Sat 06 HDOP 02.4 Alt 00066.33M
0 GPGGA 08:49:12 Lat.4149.69708N Lon.01230.89142E #Sat 06 HDOP 02.4 Alt 00066.46M
0 GPGGA 08:49:13 Lat.4149.69703N Lon.01230.89140E #Sat 06 HDOP 02.4 Alt 00066.52M
0 GPGGA 08:49:14 Lat.4149.69701N Lon.01230.89139E #Sat 06 HDOP 02.4 Alt 00066.56M
0 GPGGA 08:49:15 Lat.4149.69703N Lon.01230.89136E #Sat 06 HDOP 02.5 Alt 00066.59M
0 GPGGA 08:49:16 Lat.4149.69707N Lon.01230.89134E #Sat 06 HDOP 02.5 Alt 00066.61M
0 GPGGA 08:49:17 Lat.4149.69706N Lon.01230.89133E #Sat 06 HDOP 02.4 Alt 00066.64M
```

Figura A1. Schermata del programma GPSora.

La stringa viene scomposta e vengono estratti i dati utili. In figura A1 è visibile la risposta al comando GPGGA che oltre all'ora invia la posizione, il numero di satelliti in ricezione, la qualità del segnale e l'altitudine. Il primo numero sulla sinistra è invece il numero di volte che il programma ha resettato il clock del PC. Questo avviene una volta al giorno alle 23:00 solo se il GPS sta ricevendo almeno 2 satelliti. È possibile tramite il pulsante con l'orologio, resettare l'ora del PC immediatamente, mentre tramite l'altro pulsante impostare i parametri di comunicazione.



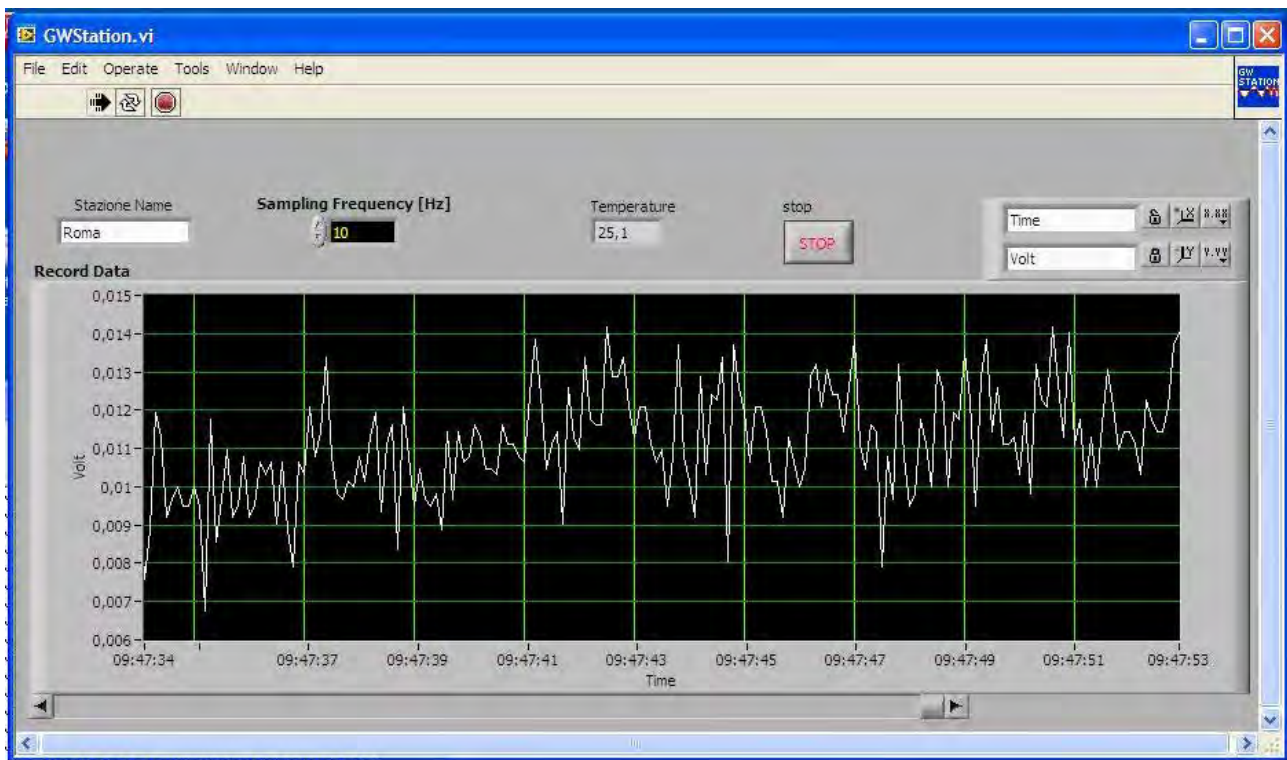


Figura A2. Schermata del programma GWStation.

Il programma di acquisizione dei dati dell'interferometro visibile in figura A2, è stato scritto con il linguaggio di programmazione a icone Labview. Il codice (disegno) del programma è visibile in figura A3. Il programma permette di acquisire i dati di due canali del convertitore analogico digitale. Sul primo canale è collegato il fotodiodo e sono acquisiti i dati dell'interferometro. Sul secondo canale invece vengono acquisiti i dati di temperatura tramite una termocoppia di tipo K. La termocoppia è collegata al convertitore AD tramite un circuito elettronico di condizionamento del segnale realizzato con uno specifico integrato Analog Device AD595. In questo modo è possibile misurare ogni secondo la temperatura del bagno dell'interferometro (nell'intervallo da 0 – 300 °C), visualizzarla sul computer e memorizzarla nel file dati.

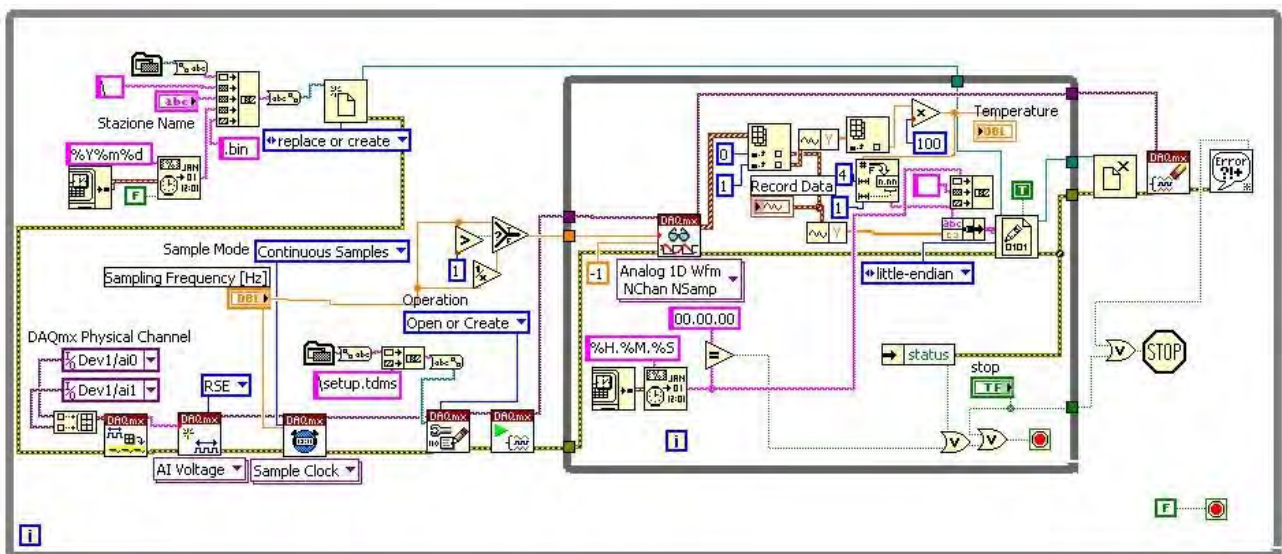


Figura A3. Codice del programma GWStation.

Il file dati viene nominato con il nome della stazione, anno, mese, giorno e l'estensione “.bin” (es: Roma20150211.bin). I dati sul primo canale sono acquisiti ad una frequenza di campionamento (impostabile tramite il controllo sull'interfaccia grafica in figura) di 10 Hz. I dieci campioni al secondo vengono visualizzati su di un grafico con l'ora e memorizzati in un file binario. Il file dati binario viene aperto dal programma di acquisizione alle ore 00:00:00 di ogni giorno e chiuso dopo 24 ore, in base al clock del computer. I dati hanno un marker temporale al secondo del tipo hh.mm.ss con aggiunta la temperatura misurata in quel secondo nel formato TT,T. Successivamente una serie di dieci dati vengono scritti continuamente in formato float a 8 Byte. Un esempio è rappresentato nella figura A4, il marker temporale (composto da un totale di 24 byte), inizia con una successione di 4 codici esadecimali 10, 00,00,00 seguiti dalla stringa in formato ASCII “11.58.11 24,1” dell'ora e della temperatura (per un totale di 16 byte), seguiti di nuovo da 4 codici esadecimali OA, 00,00,00, che terminano il marker temporale. Seguono i 10 dati nel formato float a 8 byte (per un totale di 80 byte) e il tutto si ripete fino alla mezzanotte. Ogni secondo vengono così prodotti 104 byte per un totale di 8.9856 MB giornalieri

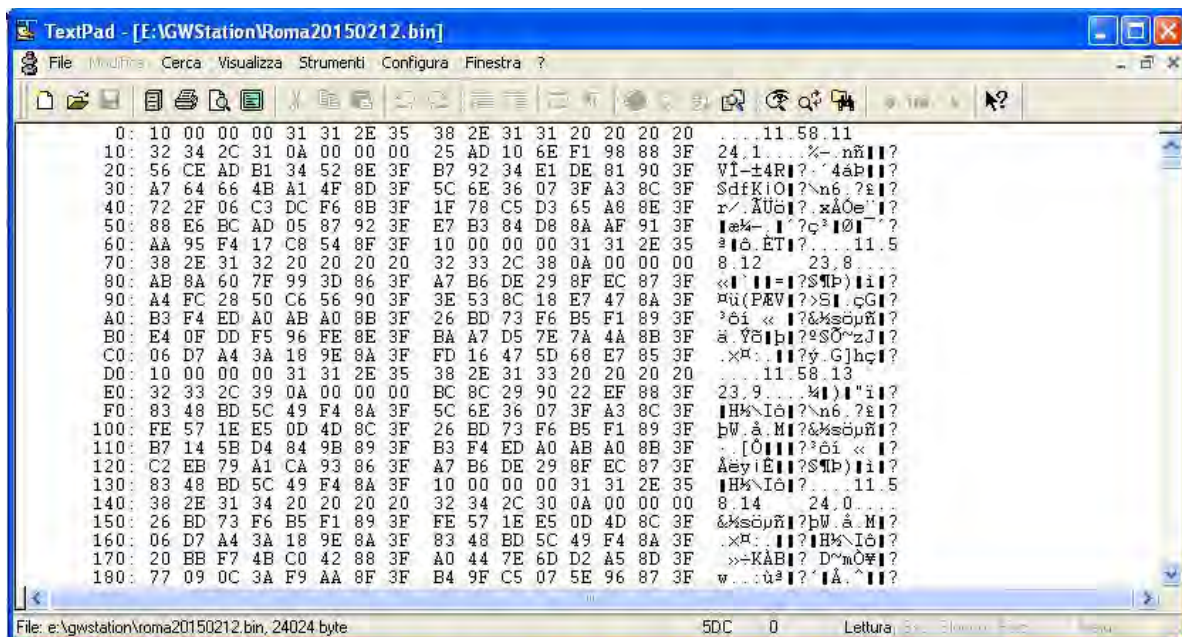


Figura A4. File dati binario.

# Appendice B

## Datasheet

**Thorlabs, Inc.** 435 Route 206 • Newton, NJ 07860 • Sales (973) 579-7227 • Fax (973) 300-3600

### Collimator Pen

**CPS182**

#### Description

Type number: CPS182  
 Order number: 432211375971  
 Date of first issue: Aug-27-98  
 Date of change: Sep-01-98

#### Properties

Housing: Aluminum  
 Lens: Glass  
 Type of laser: N-type

#### Features

Operating temperature: -10 to 60 °C  
 Storage temperature: -40 to 85 °C  
 Application: Test & Measurement  
 Alignment

#### Operational Hazard Semiconductor Laser Diode

This laser pen emits radiation that is visible to the human eye. When in use, do not look directly into the device. Direct viewing of laser diode emission at close range may cause eye damage, especially in conjunction with collimating lenses. Extreme care must be taken to prevent the beam from being viewed directly or through external optics or mirrors.



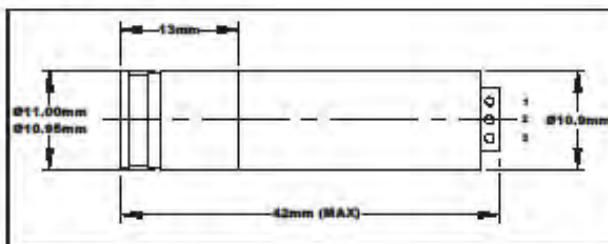
This product conforms to all applicable standards of FDA regulations (DHHS, 21 CFR subchapter J). In combination with a power supply the laser module falls within Safety Class 3R. Due to the small size of these devices, the required warning is affixed to the box containing the laser modules.

#### Quick reference data

T<sub>case</sub> = (25 ± 2) °C P<sub>o</sub> = 4.0mW, unless otherwise specified

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	unit
$\lambda$	Wavelength			635	640	nm
P <sub>o</sub>	Optical output power	At 100mm from pen	4.0		4.5	mW
d ⊥ x	Beam diameter perpendicular x parallel to the laser stripe	FWHM at pen exit		4		mm
d //				0.6		mm
θ ⊥ x	Beam divergence	Including natural divergence			0.6	mrad
θ //					1.8	mrad
α <sub>om</sub>	Optical-mechanical axis deviation			7	15	mrad
d <sub>ca</sub>	Clear aperture			4		mm
I <sub>op</sub>	Operating current laser pen			55		mA
V <sub>op</sub>	Operating voltage	With reference to ground	-4.5	-5	-5.5	V

#### Laser pen dimensions



Dimensions in mm (unless otherwise specified)

#### Pinning

- 1=5V
- 2=Not connected
- 3=Ground

The information presented in this document does not form part of any quotation or contract, is believed to be accurate and reliable and may be changed without notice. No liability will be accepted by the publisher for any consequence of its use. Publication thereof does not convey nor imply any license under patent- or other industrial or intellectual property rights.



## PDA36A Operating Manual - Switchable Gain, Amplified Silicon Detector

### Description:

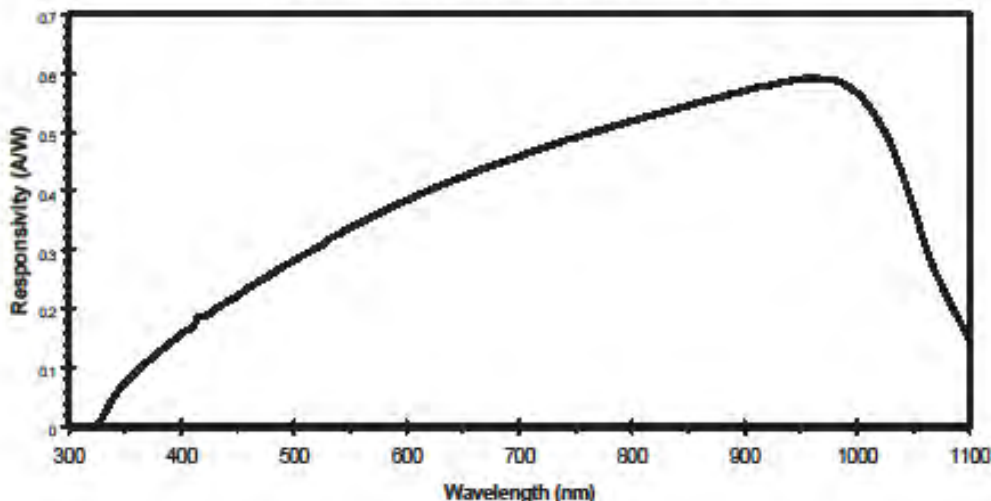
The PDA36A is an amplified, switchable-gain, silicon detector designed for detection of light signals over 350 – 1100nm wavelength range. An eight-position rotary switch allows the user to vary the gain in 10 dB steps. A buffered output drives 50Ω load impedances up to 5 volt. The PDA36A housing includes a removable threaded coupler (SM1T1) and retainer ring (SM1RR) that is compatible with any number of Thorlabs 1" threaded accessories. This allows convenient mounting of external optics, light filters, apertures, as well as providing an easy mounting mechanism using the Thorlabs cage assembly accessories.

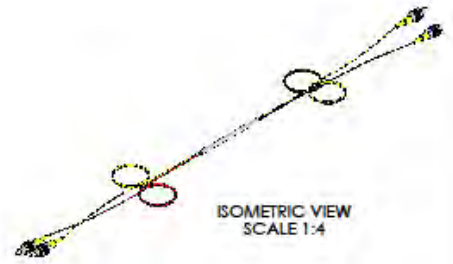
The PDA36A has two #8-32 tapped mounting holes with a 0.25" mounting depth and includes a 120VAC power AC/DC supply. The PDA36A-EC has two M4 tapped mounting holes and includes a 230VAC AC/DC power supply.

### Specifications:

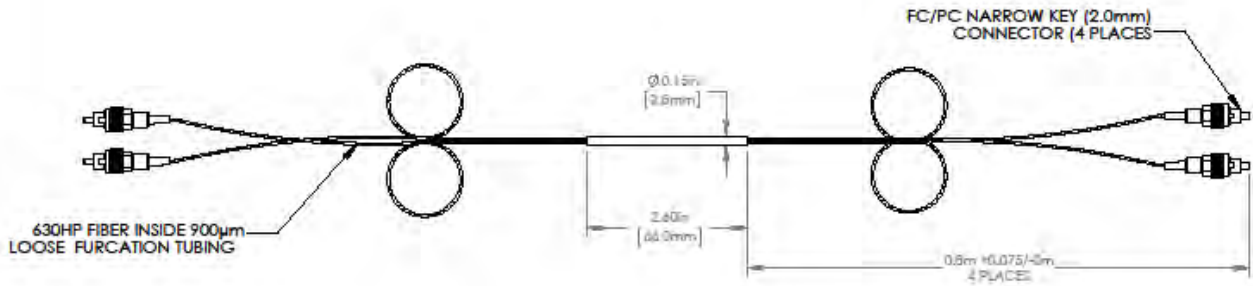
General Specifications			
Detector:	Si PIN	Gain Switch:	8-Pos Rotary
Active Area:	3.6x3.6mm (13mm <sup>2</sup> )	On / Off Switch:	Slide
Surface Depth:	0.16" (4.1mm)	Output:	BNC
Wavelength Range:	350-1100nm	Optical Head Size:	2.76" x 2.06" x 0.88" 70.1 x 52.3 x 22.4 mm
Peak Wavelength ( $\lambda_p$ ):	970nm	Weight <sup>3</sup> :	0.15 / 2.1lbs
Peak Response:	0.65 A/W (@ $\lambda_p$ )	Accessories:	SM1T1, SM1RR
Output Voltage <sup>1</sup> (50Ω):	0-5V	AC Power Supply:	AC-DC Converter
(Hi-Z):	0-10V	Power Supply	31W
Output Impedance:	50Ω	Input Power <sup>4</sup> :	100-120VAC, 50-60Hz (220-240VAC -EC)
Max Output Current:	100mA	Storage Temp:	-55 to 125 °C
Load Impedance:	50Ω – Hi-Z	Operating Temp:	0 to 40 °C
Gain Adj. Range:	70dB		
Gain Steps:	8x 10dB steps		

Figure 1 – PDA36A Spectral Responsivity





ISOMETRIC VIEW  
SCALE 1:4



COUPLER SPECIFICATIONS	
CENTER WAVELENGTH	632 nm
OPERATING BANDWIDTH	+/- 15 nm
COUPLING RATIO	50:50
INSERTION LOSS	3.7 dB
TYPICAL EXCESS LOSS	0.7 dB
PDL	<0.2 dB
DIRECTIVITY	>55 dB
OPERATING TEMPERATURE *C	-40 TO 85 *C

\* ALL SPECIFICATIONS ARE GIVEN BASED ON NON-CONNECTORIZED MODEL

FOR INFORMATION ONLY  
NOT FOR MANUFACTURING PURPOSES

DRAWING PROJECTION				<b>THORLABS</b> www.thorlabs.com	
NAME	DATE	2 x 2, 632nm SM COUPLER, 50:50		REV	
DRAWN KH	10/AUG/11	MATERIAL	N/A	C	
APPROVAL KAH	20/OCT/11	ITEM #		APPROX WEIGHT	
COPYRIGHT © 2011 BY THORLABS		FC632-50B-FC		0.05 kg	
VALUES IN PARENTHESES ARE CALCULATED AND MAY CONTAIN ROUND OFF ERRORS					



# Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2015 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

**<http://www.ingv.it>**



**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia**