

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
1.1	La teoria della relatività generale . . . . .	3
1.2	Onde gravitazionali . . . . .	3
1.3	Rivelazione delle onde gravitazionali . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Il rivelatore AURIGA</b>	<b>5</b>
2.1	Barra, catena di trasduzione e ambiente di analisi dati . . . . .	5
2.2	Rumore intrinseco e rumore non modellato . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Disturbi ambientali</b>	<b>6</b>
3.1	Disturbi antropici e loro influenza sul duty-cycle . . . . .	6
3.2	Impulsi a banda larga e loro influenza sull'efficienza . . . . .	7
3.3	Costruzione del veto di secondo livello . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Analisi in coincidenza</b>	<b>9</b>
4.1	La collaborazione IGEC . . . . .	10
4.2	Produzione dei file IGEC . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>12</b>
5.1	Statistica degli eventi wideband e duty-cycle . . . . .	12
5.2	Nuove sospensioni . . . . .	14

## Abstract

Scopo di questa tesi è illustrare l'attività di analisi dati svolta nell'ambito dell'esperimento AURIGA presso i Laboratori Nazionali di Legnaro.

È stato recentemente concordato, tra i gruppi di ricerca relativi ai rivelatori di onde gravitazionali a barra risonante attualmente in funzione, di effettuare uno scambio di eventi candidati per l'analisi in coincidenza; il periodo interessato è il mese di dicembre 2004. A questo scopo ad AURIGA è nata la necessità di organizzare i dati di quel periodo, producendo i file per lo scambio dati secondo il formato e le specifiche stabiliti dalla collaborazione. Dato che AURIGA ha subito modifiche importanti in seguito al precedente scambio dati, si è resa necessaria la creazione di un nuovo strumento software per la produzione di tali file. Inoltre un'informazione necessaria per questa produzione non è direttamente presente nei dati archiviati, ma deve essere ricavata a partire da questi; si tratta dello stato del rivelatore nel tempo, ovvero gli intervalli temporali in cui AURIGA è sensibile alle onde gravitazionali e quelli in cui è disturbato da cause ambientali.

La prima parte dell'attività riguarda la progettazione di uno strumento software per ricavare l'informazione sullo stato del rivelatore (capitolo 3); con la seconda parte è stato realizzato il software relativo alla produzione dei file per lo scambio dati (capitolo 4).

# 1 Introduzione

## 1.1 La teoria della relatività generale

Il Principio di Galileo afferma che, per quanto riguarda l'interazione gravitazionale, tutti i corpi accelerano nello stesso modo indipendentemente da qualunque proprietà fisica ed in particolare dalla massa; perciò, a parità di condizioni iniziali, essi seguono la stessa legge oraria. Lo stesso accade in assenza di campo gravitazionale quando si sceglie un sistema di riferimento non inerziale. Oggi ciò è verificato sperimentalmente con grande precisione, e porta alla necessità di postulare l'equivalenza tra massa intesa come *carica gravitazionale* e *massa inerziale* (*principio di equivalenza debole*). Se a questo si aggiunge la richiesta che le leggi fisiche siano invarianti sotto qualsiasi trasformazione di coordinate (*principio di equivalenza forte*) allora è necessario descrivere lo spaziotempo in termini geometrici e rinunciare all'idea dell'azione a distanza di Newton. In particolare, lo spaziotempo va pensato come una varietà deformata dalla presenza di materia (o più in generale di energia); un riarrangiamento della distribuzione di materia provoca un'alterazione della geometria dello spaziotempo. Tale variazione non può avvenire istantaneamente ma deve propagarsi con velocità finita e pari a quella della luce. La teoria che tiene conto di tutto questo è la *relatività generale* di Einstein [1]; la connessione tra distribuzione di materia/energia e metrica dello spaziotempo è data dalle equazioni di Einstein: si tratta di equazioni differenziali di natura tensoriale.

La richiesta di invarianza sotto qualsiasi trasformazione di coordinate porta inevitabilmente ad una teoria non lineare, e tale è la relatività generale. Questo fatto la rende una teoria matematicamente complessa e dalle conseguenze più inattese; basti pensare, ad esempio, all'esistenza dei buchi neri. Trovare soluzioni alle equazioni di Einstein non è semplice, perché esse non permettono di separare la determinazione della metrica dalla determinazione del moto della materia che la genera; tuttavia finora sono state trovate alcune importanti soluzioni analitiche come la *metrica di Schwarzschild* (spaziotempo in presenza di una distribuzione di materia a simmetria sferica, statica) e la *metrica di Kerr* (spaziotempo in presenza di una distribuzione di materia a simmetria sferica, in rotazione). Un'altra soluzione, descritta in dettaglio nel prossimo paragrafo, è costituita dalle onde gravitazionali.

## 1.2 Onde gravitazionali

Se siamo sufficientemente lontani da corpi massivi lo spaziotempo è poco deformato; vicino alla Terra ciò è verificato con buona approssimazione. In queste condizioni è lecito approssimare la metrica dello spaziotempo  $g_{\mu\nu}$  con una metrica di Minkowski  $\eta_{\mu\nu} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$  perturbata, scrivendo  $g_{\mu\nu} \simeq \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$  dove  $h_{\mu\nu}$  è una piccola perturbazione. Assegnato questo "spaziotempo di background" è possibile linearizzare le equazioni di Einstein e verificare che ammettono soluzioni in cui la perturbazione ha tutte le caratteristiche di un'onda piana, che si propaga attraverso lo spaziotempo alla velocità della luce. Queste perturbazioni sono chiamate *onde gravitazionali*; senza entrare nei dettagli, tali onde presentano svariate analogie con le onde elettromagnetiche (trasportano anch'esse, ad esempio, energia, quantità di moto e momento angolare) ma anche importanti differenze come il carattere tensoriale anziché vettoriale e l'assenza della componente di dipolo.

La grandezza fisicamente importante (cioè invariante e misurabile) trasportata da un'onda gravitazionale non è la metrica  $g_{\mu\nu}$  bensì la *curvatura* dello spaziotempo. In regime di grandi lunghezze d'onda si può infatti provare che  $R^0_{\mu 0\nu} = -\frac{1}{2c^2}\ddot{h}_{\mu\nu}$ , dove

$R_{\mu\nu\sigma\rho}$  è il tensore di Riemann dello spaziotempo, grandezza collegata appunto alla sua curvatura.

Così come il moto accelerato di una carica elettrica genera onde elettromagnetiche, il moto accelerato di una massa produce onde gravitazionali; le sorgenti più intense di tali onde sono da ricercarsi tra i fenomeni astrofisici violenti, che coinvolgono il moto di grandi masse e velocità vicine a quella della luce. È importante sottolineare che viene emessa radiazione gravitazionale solo in presenza di moti asimmetrici, in particolare deve essere grande la loro componente quadrupolare: un'esplosione a simmetria sferica o l'oscillazione dipolare di due masse, ad esempio, non producono radiazione gravitazionale. In letteratura le sorgenti si suddividono in *periodiche* (nel caso emettano un segnale gravitazionale continuo, come un sistema di due stelle in rotazione) e *impulsive* (nel caso producano un impulso di durata relativamente breve, come l'esplosione di supernovæ, la caduta di materia nei buchi neri e la coalescenza di stelle).

### 1.3 Rivelazione delle onde gravitazionali

Sebbene ci siano evidenze sperimentali indirette dell'esistenza delle onde gravitazionali [9], a tutt'oggi tale fenomeno non è mai stato rivelato direttamente in laboratorio. Ci sono comunque buone ragioni per continuare questa ricerca. Oltre alla conferma di previsioni della relatività generale, riuscire ad osservare la radiazione gravitazionale proveniente dal cosmo fornirebbe un'informazione che ora non abbiamo. Infatti la radiazione elettromagnetica emessa da un corpo celeste (ciò che abbiamo osservato finora) trasporta informazioni sui fenomeni che avvengono solamente sulla sua *superficie*; invece la radiazione gravitazionale, per sua natura, contiene informazioni sui fenomeni che avvengono all'*interno* del corpo stesso. All'interno di corpi estremamente densi come le stelle di neutroni avvengono processi molto particolari, impossibili da riprodurre in laboratorio e di cui mancano modelli teorici completi (si tratta di fisica della materia alla densità del nucleo atomico); la radiazione gravitazionale generata potrebbe essere l'unico modo di ricavare informazioni sperimentali su questi fenomeni.

La rivelazione del passaggio di un'onda gravitazionale viene tentata con due approcci sperimentali differenti. Il primo consiste nell'osservare le vibrazioni di un corpo di grande massa, generalmente una barra di metallo di qualche tonnellata; si può infatti dimostrare che l'onda cede una piccola frazione della sua energia alla barra, eccitandone il modo di oscillazione fondamentale. L'altro approccio sfrutta l'interferenza ottica tra raggi di luce LASER riflessi da un sistema di specchi; la deformazione dello spaziotempo provocata dall'onda gravitazionale causa uno sfasamento dei fotoni, che si manifesta con una variazione della figura d'interferenza.

In ogni caso, rivelare gli effetti di un'onda gravitazionale non è facile. La natura stessa dell'interazione gravitazionale fa sì che un'onda ceda pochissima energia alla materia. Questo comporta la necessità di costruire rivelatori straordinariamente sensibili e gestire adeguatamente il problema del rumore, che diventa estremamente importante. Altro problema è che un'intensità così piccola rende praticamente impossibile la produzione di onde gravitazionali rivelabili in laboratorio; bisogna quindi cercare di rivelare onde provenienti dal cosmo, per esempio brevi impulsi prodotti da coalescenze o esplosioni di stelle. Questi segnali sono di difficile previsione teorica, in particolare non sono noti la forma d'onda e il tempo d'arrivo. Servono quindi rivelatori in costante osservazione, pronti a rivelarli in qualsiasi istante.

## 2 Il rivelatore AURIGA

### 2.1 Barra, catena di trasduzione e ambiente di analisi dati

Nella configurazione attuale [8] il rivelatore AURIGA impiega una barra di alluminio Al5056 di 2.3 tonnellate come massa sensibile alle onde gravitazionali. La scelta del materiale è dettata principalmente dal basso costo e dal grande fattore di merito  $Q$ . Le vibrazioni longitudinali della barra sono convertite in un segnale elettrico tramite un trasduttore risonante capacitivo applicato ad una delle facce; il segnale è successivamente amplificato da un'apposita catena elettronica e convertito in formato digitale tramite un modulo ADC. I suoi campioni sono quindi archiviati per le successive analisi (ricerca di eventi candidati).

Per quanto riguarda l'analisi dati, il tempo osservativo di AURIGA è suddiviso in *run* numerati; ad ogni run è associata una particolare directory contenente i dati relativi al run stesso, sia quelli provenienti direttamente dal rivelatore (dati raw) che quelli derivati da successive analisi offline (dati filtrati, parametri stimati del rivelatore ...). Il complesso ambiente software per l'analisi dei dati è chiamato ADA (AURIGA Data Analysis) ed è costruito sul framework ROOT [11] sviluppato al CERN; ADA ne estende le funzionalità di analisi tramite apposite librerie sviluppate per AURIGA [3].

### 2.2 Rumore intrinseco e rumore non modellato

Come per tutte le antenne gravitazionali a barra risonante, anche in questo caso il rumore è un problema fondamentale: il segnale in uscita dal rivelatore è infatti costituito praticamente da rumore, in cui sono immersi gli eventi gravitazionali. Tale rumore è la sovrapposizione di due componenti ben distinte.

Una componente è costituita da un segnale stocastico, essenzialmente rumore stazionario e gaussiano proveniente sia dall'agitazione delle molecole della barra (rumore termico meccanico) che dall'elettronica della catena di amplificazione. Tale componente, che rappresenta il rumore intrinseco del rivelatore e di cui si ha un modello teorico molto accurato, è governata dal teorema di fluttuazione-dissipazione, quindi l'ampiezza delle fluttuazioni è esprimibile in termini di  $k_B T/Q$ , dove  $k_B$  è la costante di Boltzmann,  $T$  e  $Q$  sono rispettivamente temperatura e fattore di merito della barra. In particolare la dipendenza lineare dalla temperatura è stata verificata sperimentalmente.

L'altra componente del rumore, non stazionaria, costituisce la parte non intrinseca, di cui non siamo in grado di dare un modello teorico. Essa infatti è dovuta all'interazione

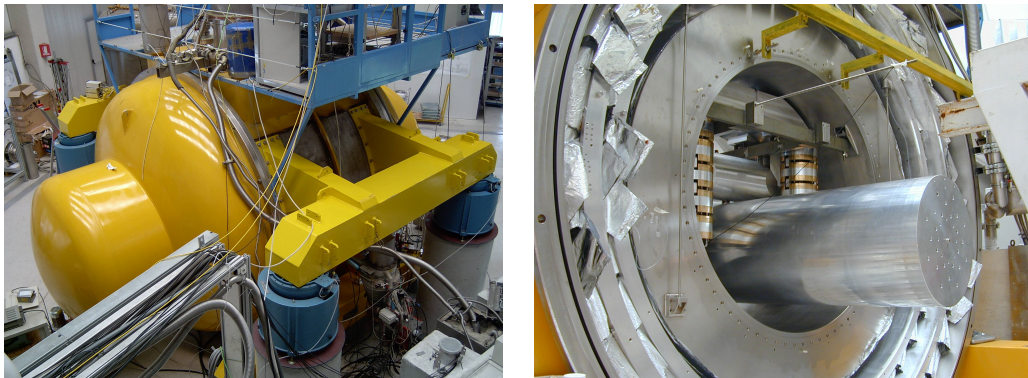


Figura 1: Il rivelatore AURIGA, in funzione e aperto (si noti la barra)

del rivelatore con l'ambiente circostante e può essere ridotta ma non eliminata. È più appropriato parlare in questo caso di *disturbi ambientali*. Alcune possibili sorgenti di tali disturbi sono

- accoppiamento dell'elettronica e dei cavi con la rete elettrica di alimentazione (sono evidenti i picchi a frequenze multiple di 50 Hz nello spettro del segnale);
- influenza di raggi cosmici;
- fluttuazioni istantanee nell'elettronica (spikes elettromagnetici);
- rumore sismico e acustico, sia naturale che dovuto all'attività umana, trasmesso al contenitore esterno e da questo alla barra.

Le prime tre cause sono essenzialmente elettromagnetiche, costituendo sorgenti di disturbo localizzabili tra la barra e la catena elettronica; l'ultima causa invece è meccanica e disturba l'intera catena di trasduzione, perché contribuisce al moto della barra.

### 3 Disturbi ambientali

#### 3.1 Disturbi antropici e loro influenza sul duty-cycle

La barra del rivelatore è sospesa all'interno del suo contenitore tramite una cascata di filtri meccanici, per attenuare le vibrazioni ad essa trasmesse. L'insieme contenitore-sospensione-barra costituisce un sistema meccanico molto complesso, la cui dinamica presenta termini non lineari che — anche se piccolissimi — possono dare contributi non trascurabili al segnale di AURIGA. In particolare vibrazioni a bassa frequenza del contenitore esterno, causate principalmente da rumore sismico antropico, non vengono riportate linearmente nello spettro del segnale ma provocano la comparsa di famiglie di picchi a frequenze molto più alte. Alcuni di questi picchi cadono proprio all'interno della banda utile del rivelatore ( $850 \div 950$  Hz): si tratta di disturbi molto gravi ai fini dell'indagine gravitazionale, in cui è necessario che l'onda sia l'unico fenomeno a portare energia nella banda utile [5].

Nonostante la non linearità del sistema di attenuazione sia un problema, essa fa sì che il fenomeno della comparsa di questi picchi presenti delle soglie sperimentalmente evidenti. Ad esempio, quando l'intensità del “rumore forzante” scende sotto ad una certa soglia, l'ampiezza dei picchi in banda utile diventa trascurabile rispetto al rumore intrinseco. È possibile quindi identificare intervalli temporali in cui questi disturbi sono presenti e intervalli in cui sono assenti, riducendo in questo modo la complessità del fenomeno dei disturbi antropici ad un semplice stato binario *on/off*.

Con la configurazione attuale del rivelatore sono state individuate due famiglie di picchi, che vengono identificate con le sigle **f1** ed **f8** [3]. La loro presenza in un dato istante viene stabilita campionando l'energia  $E_{f1}$  ed  $E_{f8}$  nelle relative bande di frequenza, e definendo una soglia per tali valori. L'importanza di questi disturbi ha portato alla decisione di considerare il rivelatore completamente cieco quando essi sono presenti. La caratteristica del rivelatore influenzata direttamente da questi disturbi risulta quindi il *duty-cycle*, cioè la frazione del tempo osservativo in cui il rivelatore è effettivamente in grado di rivelare un'onda gravitazionale. Ogni evento registrato in presenza di questi disturbi viene marcato con due appositi flag di *veto* (presenza/assenza di **f1** o **f8**).

L'origine umana di questi disturbi fa sì che essi non seguano una statistica ben definita. Ci si può tuttavia aspettare che siano concentrati prevalentemente nei periodi lavorativi e molto ridotti di notte e nei fine settimana.

### 3.2 Impulsi a banda larga e loro influenza sull'efficienza

Altra importante fonte di disturbo è costituita da frequenti e improvvise fluttuazioni del segnale, di durata molto breve e quindi banda molto larga (*disturbi wideband*); nella maggior parte dei casi esse vengono identificate dall'analisi dati come eventi impulsivi. Osservandone gli spettri e utilizzando la funzione di trasferimento dei diversi elementi della catena di trasduzione si può dedurre che l'origine di tali disturbi è di natura elettromagnetica. Infatti lo spettro di un impulso gravitazionale viene modificato dalla funzione di trasferimento complessiva della catena di trasduzione, mentre tali impulsi sono modificati solamente della parte elettronica (che è diversa, per esempio, nel numero di zeri): questo significa che l'ingresso di tali disturbi è a valle della barra. Si può pensare che essi siano dovuti allo SQUID, un dispositivo usato nella catena come amplificatore. Tale elemento è estremamente sensibile alle variazioni del flusso magnetico concatenato; eventi casuali come il movimento di flussoni nella sua scatola metallica o vibrazioni della scatola stessa producono una piccolissima variazione del flusso concatenato con lo SQUID e quindi un impulso spurio nel segnale. In quanto provocate da eventi casuali rari, ci si può aspettare che i tempi d'arrivo di queste fluttuazioni seguano una statistica di Poisson: la durata  $\Delta t$  dell'intervallo tra due impulsi wideband successivi dovrebbe perciò distribuirsi secondo un istogramma esponenziale decrescente  $e^{-\lambda\Delta t}$ , dove  $\lambda$  è la densità del processo di Poisson.

La caratteristica di avere uno spettro molto ampio, al di fuori della banda utile di rivelazione, permette di escludere tali fluttuazioni dall'insieme dei candidati eventi gravitazionali. A questo scopo viene campionata l'energia  $E_{wb}$  in due bande di frequenza adiacenti alla banda utile del rivelatore; ad ogni evento registrato in corrispondenza a valori di  $E_{wb}$  oltre una certa soglia viene applicato un *veto di wideband* (**wb**). Naturalmente con questo sistema di vetaggio un evento può risultare vetato sia dai flag **f1/f8** che **wb**: i due tipi di veto sono indipendenti.

A differenza di **f1/f8** i disturbi **wb** non incidono sul duty-cycle del rivelatore: la loro presenza non disturba l'antenna in modo così grave da impedire completamente la rivelazione di onde gravitazionali, poiché per definizione di **wb** la durata del disturbo è molto breve. La loro presenza può essere modellata da un "generatore di eventi" con tempi di arrivo casuali e indipendenti dal tempo di arrivo di eventi gravitazionali. Di conseguenza, la grandezza da essi influenzata è l'*efficienza di rivelazione*: in periodi con rate di **wb** estremamente alti il rivelatore risulterà meno efficiente, in quanto i candidati eventi gravitazionali avranno una maggior probabilità di presentarsi in coincidenza con un evento **wb** e quindi non essere rivelati.

### 3.3 Costruzione del veto di secondo livello

Per quanto si è visto, la presenza di **f1/f8** influisce sul duty-cycle di AURIGA in modo molto semplice: il rivelatore è *off* se **f1** o **f8** sono *on* e ogni evento che si presenti con il rivelatore *off* viene vetato. Tuttavia il duty-cycle di un rivelatore ha dei requisiti che con questo sistema non sono in linea di principio rispettati. In particolare si può pensare che **f1** ed **f8** siano presenti aleatoriamente, producendo un tempo osservativo estremamente frammentato che non è sicuramente accettabile: un rivelatore *off* per dieci minuti, alternativamente *on/off* per qualche secondo e nuovamente *off* per molti minuti è da considerarsi insensibile in tutto l'intervallo di tempo considerato, specie se deve lavorare in coincidenza con rivelatori analoghi. Altro possibile caso da evitare è un periodo *on* di pochi secondi immerso in un intervallo molto lungo di stato *off*: l'intero intervallo temporale è, ai fini pratici, da considerarsi *off*. Affrontando la richiesta in termini più precisi si chiede che il tempo osservativo presenti intervalli *on* abbastanza

lunghi (limite inferiore sulla durata degli intervalli *on*) e non sia affetto da alternanze di stato *on/off* troppo frequenti (limite superiore sul rate di alternanze). Questo significa che oltre a vetare eventi in corrispondenza di **f1** ed **f8** è necessario vetare anche quelli all'interno di intervalli *on* troppo brevi o in presenza di alternanze troppo frequenti. Derivando da una sintesi di informazioni questo costituisce un *veto di secondo livello*; è stato indicato con la sigla **s1**. Ovviamente eventi già vetati **f1** od **f8** risulteranno automaticamente vetati anche **s1**.

La costruzione di questo nuovo tipo di veto è stata implementata definendo una struttura dati chiamata *state switch*, che rappresenta l'istante di passaggio allo stato *on* oppure *off*. Ogni *state switch* contiene:

- il tempo  $t$  di switch, secondo il formato temporale GPS utilizzato in AURIGA;
- un flag che indica il tipo di switch (*on*  $\rightarrow$  *off* oppure *off*  $\rightarrow$  *on*);
- l'intervallo  $\Delta t$  in cui lo stato è costante (differenza con il tempo dello switch successivo).

Un array di *state switch* associato ad ogni run di AURIGA rappresenta completamente lo stato del rivelatore durante tutta l'estensione temporale del run, risultando quindi rappresentativo del duty-cycle. Eventi compresi all'interno di intervalli *off* sono da considerarsi vetati **s1**, anche se non risultano vetati dai veti **f1/f8**. Il campo  $\Delta t$  è ovviamente informazione ridondante; è stato inserito al solo scopo di istogrammare la durata degli stati *on/off* e studiare la statistica degli *state switch*.

L'array viene riempito considerando i campioni di  $E_{f1}$  ed  $E_{f8}$  che superano le rispettive soglie. In corrispondenza di ognuno di questi campioni viene aperta una piccola finestra temporale centrata sul tempo  $t_s$  del campione, corrispondente ad un intervallo *off* per il rivelatore (figura 2); questo viene fatto inserendo nell'array uno *switch off* seguito da uno *on*. Successivamente viene effettuata un'unione (in senso insiemistico) di tutti questi intervalli producendo lo stato "raw" del rivelatore, affetto dai problemi di frammentazione prima affrontati. A questo punto vengono applicati due algoritmi di filtro all'insieme di *switch*, che rispettivamente

- pongono a *off* gli intervalli *on* più brevi di  $\Delta t_{\min}$  (filtro *min-on*);
- pongono a *off* intervalli in cui lo stato si alterna  $N_{\text{rate}}$  volte se più brevi di  $\Delta t_{\text{rate}}$  (filtro *rate*).

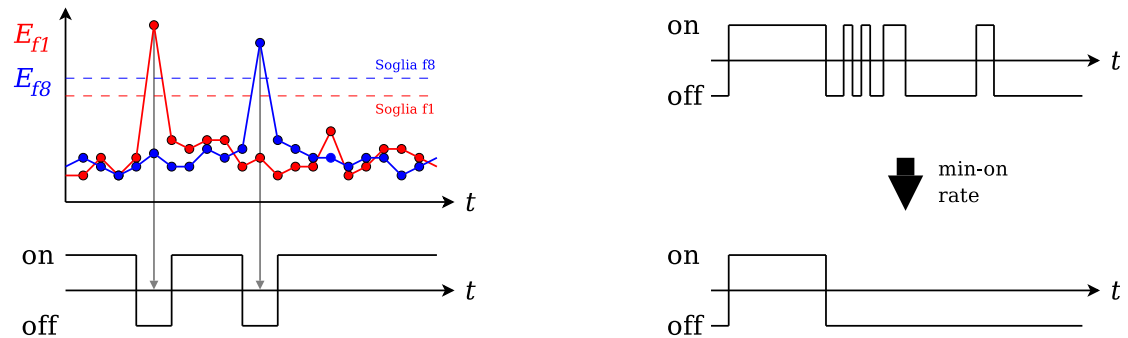


Figura 2: Costruzione dello stato del rivelatore ed effetto dei filtri

L'operazione di porre a *off* intervalli temporali si riflette nell'eliminazione degli opportuni *state switch* dall'array. L'array risultante contiene pochi *state switch* rispetto a quello di partenza, rappresentando un tempo osservativo poco frammentato con lunghi periodi *on*. Questo array viene archiviato in un tree <sup>1</sup> chiamato 's1', appartenente ad un file ROOT situato all'interno della directory del run in esame (`runN/AuVSL/VSL.root`). Nello stesso file sono archiviati altri tre array chiamati 'f1', 'f8' e 'wb', risultati intermedi della creazione dell'array 's1'. Essi contengono gli *state switch* separati relativi alla presenza dei tre corrispondenti disturbi. Il tree 's1', quindi, non è altro che l'unione dei tree 'f1' e 'f8' a cui sono stati successivamente applicati i filtri. La ragione per cui gli *state switch* vengono memorizzati anche in forma separata e non filtrata è essenzialmente la comodità e la possibilità di studiare separatamente le caratteristiche delle tre cause di disturbo. Per esempio il tree 'wb' permette di analizzare la statistica degli eventi wideband, dato che i suoi intervalli *off* hanno durata trascurabile e quindi quelli *on* non sono altro che la distanza tra eventi wideband.

L'intero procedimento di analisi e creazione dei veti di secondo livello è stato implementato in forma di macro ADA, scritta in linguaggio C++ e chiamata `genvs1.C`.

Bisogna dire che durante il riempimento dell'array 's1' vengono presi in considerazione anche i disturbi *wb*, ma solamente quando si presentano così fitti da produrre un unico intervallo *off* continuo di durata superiore ad un certo valore  $\Delta t_{wb}$ . A rigore, per come sono definiti i *wb*, questa scelta non ha fondamento fisico; tuttavia si è pensato che *wb* troppo frequenti possano essere sintomo di fenomeni non previsti e quindi potenzialmente così gravi da incidere sul duty-cycle. Casi del genere, comunque, non si sono mai verificati nei run analizzati.

La determinazione dei valori appropriati per i parametri dei filtri è stata fatta empiricamente, essendo importante ma non critica; si è cercato essenzialmente di diminuire il più possibile il numero di *switch*, evitando però che i filtri riducessero eccessivamente il tempo *on* vetando anche periodi di buon funzionamento. Per determinare un duty-cycle adatto per il successivo scambio dati è stato posto

$$\Delta t_{\min} = 600 \text{ s}, \quad N_{\text{rate}} = 4, \quad \Delta t_{\text{rate}} = 1200 \text{ s}.$$

## 4 Analisi in coincidenza

Un rivelatore di onde gravitazionali non è in grado di discriminare autonomamente un impulso spurio da un vero segnale gravitazionale di origine astrofisica. Perciò è necessario costruire una *rete* di rivelatori simili e indipendenti in grado di lavorare in coincidenza, distribuiti in tutto il mondo. Ogni rivelatore deve, indipendentemente dagli altri, occuparsi di vetare gli eventi spuri secondo le proprie analisi e produrre una lista di candidati eventi gravitazionali, completi di informazioni come tempo di arrivo e sua incertezza, rapporto segnale/rumore, ampiezza e relativa incertezza. Tali liste devono quindi essere scambiate per l'*analisi in coincidenza*, consistente nel confrontare i tempi di arrivo degli eventi provenienti dai diversi rivelatori. Questo confronto viene fatto, considerando per semplicità due soli rivelatori, costruendo un grafico che presenta in ogni asse i tempi di arrivo degli eventi provenienti dai diversi rivelatori. Sul piano di questo grafico vengono tracciati punti corrispondenti ad ogni coppia di eventi. Si considerano quindi solo i punti vicini alla bisettrice, entro una certa tolleranza, che rappresentano coppie di eventi con tempi di arrivo vicini. Con un tale sistema di rivelatori

---

<sup>1</sup>Il *tree* è una struttura dati molto generica di ROOT che può rappresentare una lista di campi; in questo caso ogni campo è uno *state switch*.

- la probabilità di rivelare impulsi spuri si riduce enormemente, perché tutte le cause di disturbo “locali” ad ogni rivelatore sono scorrelate e non influenzano gli altri; esiste comunque la possibilità che impulsi spuri siano in coincidenza.
- diventa possibile estrarre più informazioni da un eventuale fronte d’onda gravitazionale, per esempio la sua direzione di provenienza, che può essere stimata conoscendo le posizioni relative delle antenne e il tempo d’arrivo dell’onda misurato da ognuna di esse.
- è possibile stimare il *fondo di coincidenze*, cioè il rate di coincidenze non dovute ad eventi gravitazionali.

L’ultima informazione è estremamente importante per affermare di aver rivelato o meno dei veri eventi gravitazionali; il solo numero di coincidenze non è infatti sufficiente. Esiste un *ritardo luce massimo*  $\Delta t_{\max}$  tra tutti i rivelatori, dato dal tempo che un’onda gravitazionale impiega ad attraversare la Terra nell’ipotesi che si propaghi alla velocità della luce. Nel caso in cui un vero evento gravitazionale venga rivelato da due diverse antenne, i due tempi di arrivo non potranno differire di una quantità superiore a  $\Delta t_{\max}$ . Tenendo conto di questo fatto si introducono appositamente ritardi superiori a  $\Delta t_{\max}$  tra i tempi di arrivo dei diversi rivelatori, effettuando traslazioni temporali *rigide*, cioè traslando della stessa quantità gli eventi di uno singolo rivelatore. Si effettua quindi l’analisi in coincidenza con i tempi modificati. Qualsiasi coincidenza dovesse risultare sarebbe sicuramente spuria; con questo sistema si ha perciò una stima del rate di coincidenze spurie, o fondo di coincidenze. Noto questo valore si procede con l’analisi a tempi di arrivo non traslati, ottenendo un secondo rate da confrontare con il fondo. Senza entrare ulteriormente nei dettagli, da questo confronto, con considerazioni sulla statistica di Poisson, è possibile stabilire con che confidenza un eventuale eccesso di coincidenze a tempi non modificati è compatibile con la rivelazione di onde gravitazionali [7].

#### 4.1 La collaborazione IGEC

I rivelatori a barra risonante attualmente esistenti sono cinque (ALLEGRO, AURIGA, EXPLORER, NAUTILUS, NIOBE; quest’ultimo è stato recentemente dismissed) e la collaborazione istituita per analizzare i loro eventi in coincidenza è denominata IGEC (International Gravitational Event Collaboration) [12]. In figura 3 è visibile la posizione dei rivelatori sulla Terra.

Con la creazione di IGEC è stato definito un particolare protocollo per scambiare i dati [13]. Secondo la versione attuale, tale protocollo prevede che il flusso di eventi e informazioni relative a ciascun rivelatore venga memorizzato in file ASCII giornalieri, strutturati secondo un particolare formato. Le informazioni da scambiare corrispondono a singole righe (campi) nel corpo del file, ognuna composta da un nome (che specifica il tipo di informazione) seguito da una serie di valori (l’informazione stessa). Le informazioni obbligatorie da scambiare sono riassunte nella tabella seguente.

Tipo di informazione	Nome del campo IGEC
Candidato evento gravitazionale	\$EVT
Evento vetato (non gravitazionale)	\$VETO
Informazioni su parametri del rivelatore	\$STATUS
Passaggio del rivelatore allo stato on	\$START
Passaggio del rivelatore allo stato off	\$STOP

Ogni file IGEC inizia con un header che definisce quali informazioni sono date nei vari tipi di campo; questo permette a ciascun rivelatore di inserire informazioni facoltative o

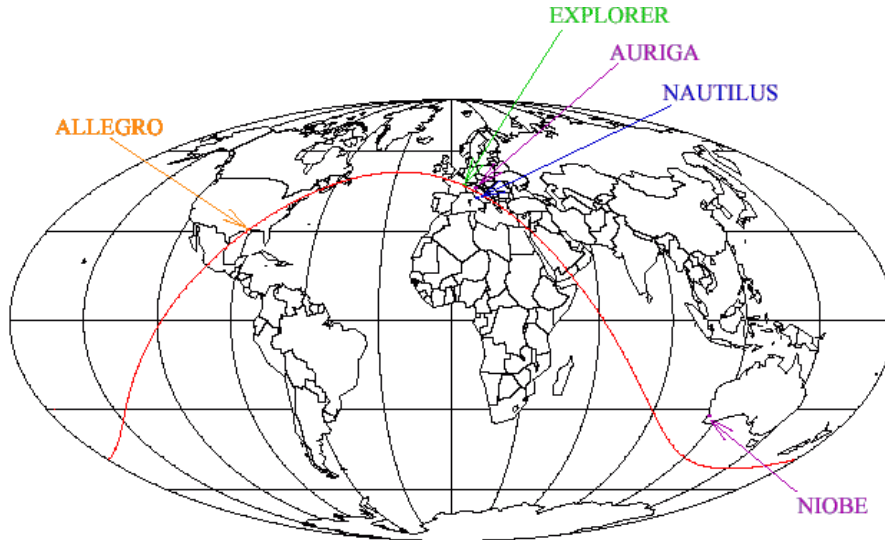


Figura 3: Rivelatori IGEC attualmente esistenti

tralasciare informazioni che nel suo caso specifico non hanno senso. Ad esempio, nel caso del campo `$EVT` oltre al tempo, ampiezza e altre informazioni obbligatorie è possibile (anche se non richiesto dal protocollo) inserire informazioni ausiliarie come il risultato del test del  $\chi^2$  ridotto; in tal caso nell'header si trova una dichiarazione del tipo

```
#EVT 9 CHI R
```

il cui significato è: il nono valore di ogni campo `$EVT` è un numero reale (R) e contiene il valore del  $\chi^2$  ridotto per quell'evento (CHI).

Terminato l'header inizia il corpo vero e proprio del file IGEC che è semplicemente un blocco di campi (righe); nel caso di un candidato evento gravitazionale si ha per esempio

```
$EVT 2004 12 3 16 6 43.624135 4.54e+00 7.541e-22 0.66 23 0.200 8.88e-01
```

dove significato e tipo di dato dei vari campi sono specificati nell'header.

Il protocollo prevede inoltre che il nome di ogni file contenga una sigla che indentifica il rivelatore di provenienza, la data del giorno corrispondente al file e la *release di analisi* di cui il file fa parte; per esempio, uno dei file prodotti in questa analisi è `AU20041207.evt1` (7 dicembre 2004, release 1).

Infine, altri dettagli del protocollo richiedono di specificare immediatamente uno `$STATUS` all'inizio di ogni file e dopo ogni `$START` e di non inserire alcuna informazione tra uno `$STOP` e uno `$START`; considerando AURIGA, questo significa che gli eventi vetati `f1` ed `f8` non vengono a tutti gli effetti scambiati e l'unica origine dei campi `$VETO` è il veto di wideband.

## 4.2 Produzione dei file IGEC

Per come è costruita l'analisi dati dell'esperimento AURIGA, la costruzione di file IGEC relativi ad un dato intervallo temporale (insieme di run) richiede semplicemente la raccolta e l'unione di informazioni presenti nelle directory dei run interessati. La provenienza delle diverse informazioni è riassunta nella seguente tabella.

Informazione IGEC	Provenienza in AURIGA
\$EVT, \$VETO	Lista di eventi impulsivi con veti di primo livello
\$STATUS	Simulazioni Monte Carlo (lista di status)
\$START, \$STOP	Veti di secondo livello (lista di <i>state switch</i> )

Concettualmente l'algoritmo per la scrittura dei file è molto semplice. Viene effettuato un ciclo sull'insieme di run interessati, e per ognuno di essi vengono lette la lista di eventi, la lista di status e la lista di *state switch*. Queste informazioni, contenenti tutte un tempo  $t$ , vengono inserite in una lista globale. La lista viene quindi ordinata per tempi crescenti e per ogni suo elemento viene scritta la corrispondente voce IGEC (purché in quell'istante lo stato del rivelatore sia on). Al superamento di una giornata viene chiuso il file IGEC corrente e aperto quello successivo.

Questo algoritmo è stato implementato nuovamente come macro ADA in C++, chiamata `genigec.C`; il periodo di cui si sono prodotti i file IGEC va dal 3 dicembre 2004 al 5 gennaio 2005 (comprende i run 608, 610 e 612).

## 5 Conclusioni e sviluppi futuri

### 5.1 Statistica degli eventi wideband e duty-cycle

Tracciando l'istogramma dell'intervallo temporale tra gli eventi wideband relativi ai run analizzati si nota un andamento esponenziale decrescente (una retta in scala logaritmica), in accordo con la prevista statistica poissoniana di tali eventi (figura 4). Tuttavia, espandendo la scala e osservando tempi dell'ordine del decimo di secondo si nota una divergenza dalla statistica di Poisson; questo può far pensare a diverse cause per gli eventi wideband, che comunque restano sicuramente di tipo elettromagnetico per il loro particolare spettro. Indagare ulteriormente su queste cause, sebbene argomento di grande interesse, va oltre lo scopo della tesi.

Il rate di wideband risulta piuttosto elevato, intorno ai 200 eventi all'ora. Osservando i file IGEC prodotti si nota che una percentuale altissima di eventi compare come \$VETO: si tratta proprio degli eventi vetati *wb*.

Per quanto riguarda il veto di secondo livello, l'istogramma della durata degli intervalli *on* non rivela una statistica particolare bensì un semplice andamento decrescente, come ci si attendeva; è visibile invece l'effetto dei filtri min-on e rate, che si manifestano come un taglio netto dell'istogramma per tempi minori di  $\Delta t_{\min} = 600$  s (figura 5).

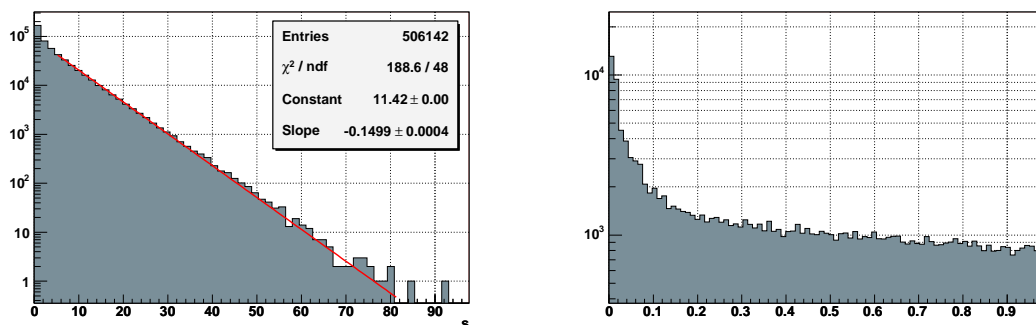


Figura 4: Iistogramma della distanza tra eventi wideband consecutivi; notare la divergenza dalla statistica di Poisson per tempi piccoli

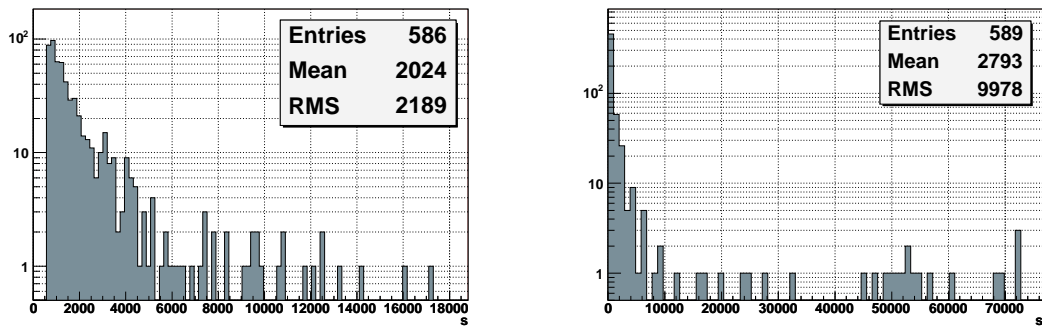


Figura 5: Durata di intervalli a stato *on* (sinistra) e *off* (destra) nei tre run analizzati

Inoltre osservando lo stato del rivelatore in funzione del tempo si può notare un certo effetto giorno-notte: la variabile booleana tende a presentare un andamento periodico, con periodo intorno alle 24 ore. Questo effetto in alcuni casi è molto pronunciato (figura 6; si nota anche il sopraggiungere del fine settimana) e conferma l'ipotesi di origine principalmente antropica dei disturbi *f1* ed *f8*; si può dire che il rivelatore è *off* in prevalenza nei periodi lavorativi. Calcolando il duty-cycle totale per il mese di dicembre 2004 si ottiene un valore intorno al 50%; i filtri min-on e rate lo diminuiscono di qualche unità percentuale soltanto, perciò funzionano secondo le previsioni senza eliminare significativamente periodi di buon funzionamento.

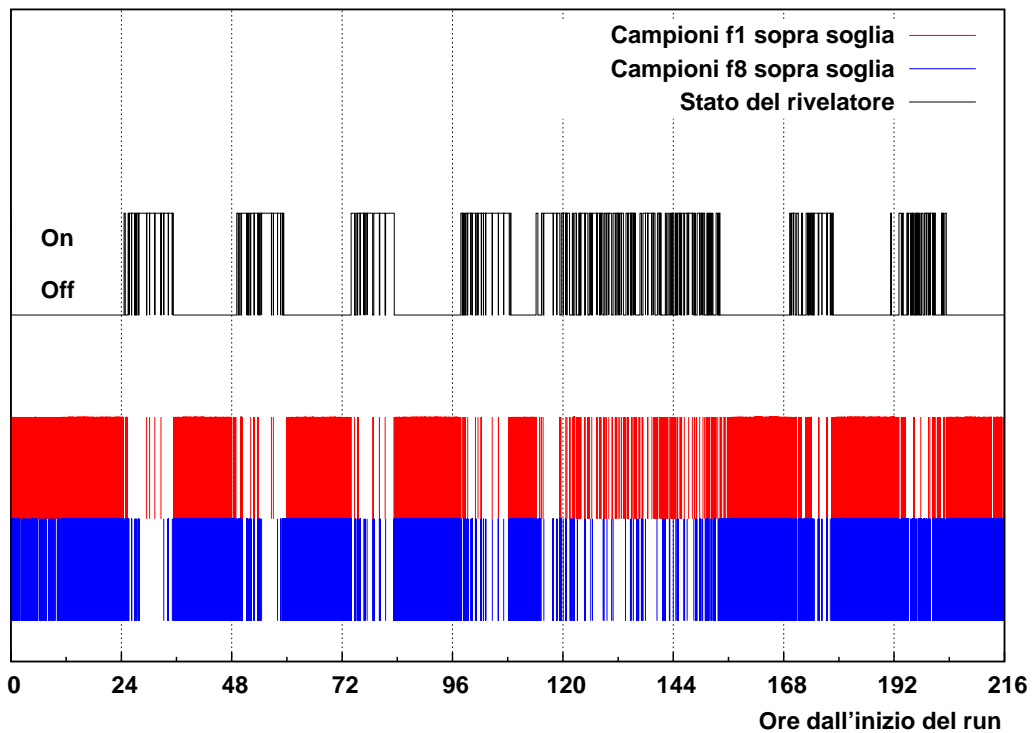


Figura 6: Stato del rivelatore e presenza di *f1* ed *f8* nel tempo (run 610)

## 5.2 Nuove sospensioni

Durante la progettazione delle due macro è stata effettuata una modifica alle sospensioni del rivelatore. Precedentemente esso era semplicemente appoggiato al suolo, separato da questo tramite uno spessore di materiale fortemente dissipativo; tuttavia questo isolamento non attenuava la sollecitazione all'origine dei disturbi **f1** ed **f8**. Con il nuovo sistema, invece, l'antenna è isolata in modo molto più efficiente da quattro sospensioni pneumatiche (visibili in figura 1); questa modifica l'ha resa praticamente insensibile al rumore ambientale che origina le famiglie di picchi **f1** ed **f8**, per cui il duty-cycle ha subito un miglioramento sostanziale, raggiungendo ora valori intorno al 95%. L'effetto giorno-notte e la correlazione con attività antropiche sono praticamente scomparsi, e il rate di eventi si è corrispondentemente ridotto. Nonostante i veti **f1** ed **f8** non possano essere eliminati (sono ancora presenti periodi con tali veti attivi, anche se molto rari), con questa nuova configurazione l'utilizzo degli algoritmi qui sviluppati, e la regolazione dei loro parametri, saranno probabilmente ancora meno critici.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Si veda per esempio A. Einstein, *Il significato della relatività*, Bollati Boringhieri
- [2] A. Ortolan, *Realizzazione ed ottimizzazione di un osservatorio di onde gravitazionali* (capitolo 1), Università di Ferrara, 1990-1991
- [3] L. Baggio et al., *Characterization of the AURIGA gw detector*, INFN-LNL (REP) 204 2005, p. 121
- [4] A. Cesaracciu, *Progettazione e realizzazione di un sistema di acquisizione dati per l'esperimento AURIGA*, Università di Padova, 2000-2001
- [5] S. Fattori, *Risultati del primo run scientifico del rivelatore di onde gravitazionali AURIGA-II*, Università di Padova, 2003-2004
- [6] A. Ortolan, G.Vedovato, *Decimazione e ricostruzione della banda ottima di AURIGA*, LNL-INFN (REP) 109/96
- [7] P. Astone et al., *Methods and results of the IGEC search for burst gravitational waves in the years 1997-2000*, Phys. Rev. D 68 (2003) 022001
- [8] J. P. Zendri et al., *Status report and near future prospects for the gravitational wave detector AURIGA*, Class. Quant. Grav. 19 (2002)
- [9] Hulse e Taylor sono stati insigniti del premio Nobel per aver correttamente spiegato la perdita progressiva di energia del sistema binario PSR1913+16 per emissione di onde gravitazionali. Si veda Taylor et al., *Measurements of general relativistic effects in the binary pulsar PSR1913+16*, J.M. 1979, Nature 277, 437
- [10] S. Bergia, A. P. Franco, *Le strutture dello spaziotempo*, CLUEB 2001
- [11] ROOT: an object-oriented data analysis framework, <http://root.cern.ch>
- [12] International Gravitational Event Collaboration, <http://igec.lnl.infn.it>
- [13] P. Astone et al., *IGEC-2000 Protocol version Dec. 4<sup>th</sup>*, <http://igec.lnl.infn.it/fundamentals/protocol/IGECprotocol2000vdec4.pdf>