

## Gli aspetti computazionali del progetto Virgo

**Un esperimento scientifico dal costo di 150 e passa miliardi, che produrrà milioni di *Megabyte* di dati all'anno per molti anni, pone colossali problemi di analisi dei risultati sia dal punto di vista *hardware* che *software*.**

### Introduzione

Il progetto Virgo è un progetto Italo-Francese per la costruzione e l'uso di una antenna Laser per la ricezione di Onde Gravitazionali. Per descriverne in breve le caratteristiche ospito una nota di uno dei responsabili del progetto: il Prof. Fidecaro dell'Università di Pisa.

Dal mio punto di vista voglio accennare ai principali problemi matematici e numerici che comporta la rivelazione delle onde gravitazionali. Se i lettori di MC saranno interessati al problema (domanda retorica tanto lo faccio lo stesso!) potremo studiare in maggiore dettaglio, nei prossimi mesi, alcuni degli aspetti matematici e informatici di un problema di così grande attualità. Ovviamente l'esposizione sarà curata con l'aiuto di *Mathematica* (certamente il linguaggio più adatto per studi di questo tipo).

Gran parte del lavoro può essere fatto in questi anni in cui si sta costruendo materialmente il rivelatore; si possono distinguere 3 filoni principali.

- Studio delle caratteristiche delle sorgenti di Onde Gravitazionali e del segnale atteso;
- Studio delle caratteristiche del rumore e della distorsione;
- Analisi e sintesi degli algoritmi di rivelazione e loro *testing* su dati simulati.

### Le sorgenti

Il lavoro preliminare spetta ai fisici teorici che devono predire la forma in cui il segnale "buono" si può presentare per i casi tipo di fenomeni stellari suscettibili di generare onde gravitazionali (tipicamente applicando la teoria della relatività generale). Si distinguono sorgenti stazionarie (le Pulsar o Stelle a Neutroni che dovrebbero emettere O.G. in modo regolare,

con una stretta relazione con la loro emissione di onde radio) e sorgenti impulsive (catastrofi stellari quali la collisione tra stelle, le supernovae o la caduta di corpi massicci nei buchi neri). Le sorgenti impulsive sono molto più potenti di quelle stazionarie ma la loro emissione è imprevedibile e di brevissima durata.

Si noti che questa è la parte più critica; una volta che tutte le altre variabili del problema siano state studiate e analizzate con sufficiente chiarezza, e qualora i dati di più progetti (per esempio Virgo e Ligo) svolti in parti diverse del mondo e analizzati da equipe diverse con diversi algoritmi diano gli stessi risultati, sarà possibile usare questi esperimenti per convalidare o rifiutare parti delle varie teorie della gravitazione, tuttora prive di conferme. Allo stesso modo, in passato, i risultati degli esperimenti con i rivelatori di particelle hanno permesso di confermare o invalidare molte teorie sulla struttura della materia.

Una parte più alla portata di tutti è lo studio delle distorsioni motivate da cause astronomiche: la variazione in frequenza dovuta all'effetto Doppler della rotazione terrestre, e dell'orbita della terra intorno al sole e le variazioni in ampiezza dovute al variare dell'orientamento del rivelatore rispetto alla sorgente. Tutto il male non viene per nuocere, queste distorsioni, facilmente prevedibili e calcolabili, potranno servire per discriminare i segnali stazionari di origine terrestre da quelli di origine astronomica e convalidarne l'esatta collocazione nello spazio. In **Figura 1** si vede una mappa stellare (prodotta con *Mathematica*) in cui i punti colorati rappresentano le 706 pulsar note con il colore che schematizza la frequenza di emissione e la grandezza che rappresenta l'incertezza nella posizione.

### Il rumore

Oltre alle attese O.G. il rivelatore sarà affetto da molti tipi di rumore, alcuni dei quali di intensità molto superiore al segnale buono:



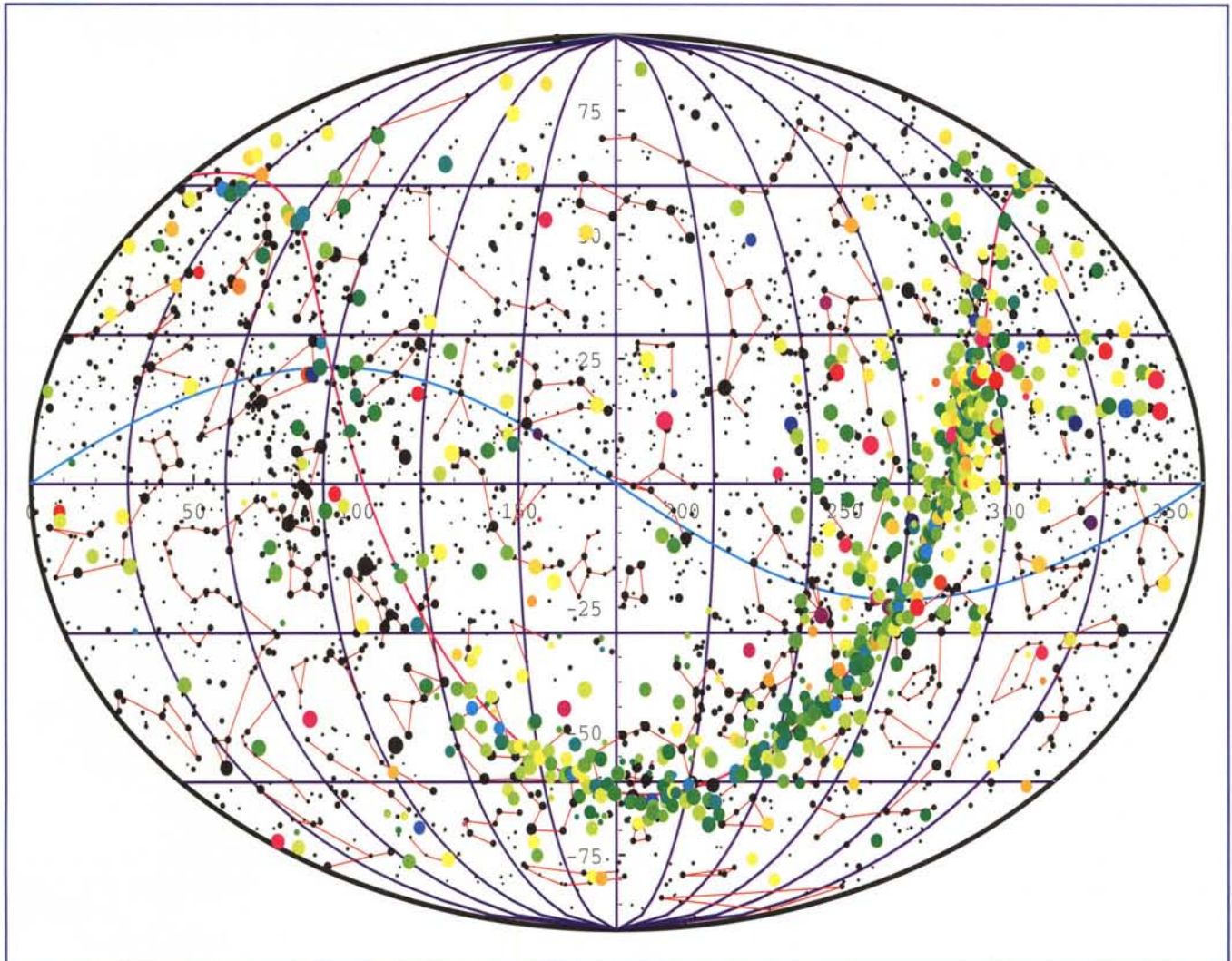


Figura 1

- rumore sismico (terremoti, autocarri sulla vicina superstrada, fisici con il raffreddore allergico nelle vicinanze degli specchi);
- rumore elettromagnetico (linee ad alta tensione, stazioni radio, macchie solari, telefonini nelle vicinanze);
- rumore meccanico delle parti del rivelatore (risonanze degli specchi sospesi);
- rumore di conteggio dei fotoni della luce laser (ticchettio o *shot noise*);
- rumore elettrico delle apparecchiature analogiche a valle dei fotodiodi;
- rumore digitale dovuto al processo di discretizzazione (campionamento e conversione analogico/digitale, irregolarità della base dei tempi, aliasing, etc.).

Una volta ottenuto il modello (o più probabilmente una serie di modelli di accuratezza crescente) è possibile generare dati "simulati" in cui un segnale buono di caratteristiche stabilite a priori è stato opportunamente iniettato e mascherato con il rumore. Quando sarà disponibile il primo prototipo si potranno infine fare misure dirette sulla forma del rumore.

## Gli algoritmi di rivelazione

Si noti che tipicamente per le sorgenti stazionarie la potenza istantanea del rumore è qualche ordine di grandezza sopra quella del segnale, la speranza di una rivelazione si basa sul fatto che essendo il rumore in gran parte scorrelato, in una integrazione a lungo periodo la media del rumore tende a zero e il segnale (fortemente correlato) può affiorare.

Per le sorgenti impulsive il problema principale è la ricerca nel "pagliaio" del rumore dei pochi "aghi" (i rari eventi catastrofici) e nessun limite si pone alla fantasia dello sviluppatore di algoritmi.



# L'interferometro VIRGO:

## Un esperimento per rivelare le onde gravitazionali

di Francesco Fidecaro

La gravità governa innumerevoli fenomeni. Causa della caduta dei corpi, la forza di gravità agisce, apparentemente, in maniera sempre uguale. La direzione verticale non è cambiata nei secoli (anche se la torre di Pisa vorrebbe sostenere il contrario). Ma l'azione della gravità è sempre la stessa? La direzione della verticale, indicata dal filo a piombo, rimane costante? Vedremo che questa domanda, apparentemente innocente, porta a esplorare un argomento fondamentale della Fisica.

Corpi massivi si attraggono. La Terra attrae un corpo che si trova nelle sue vicinanze e la direzione della forza esercitata punta verso il centro del nostro pianeta. Questa direzione è quella che chiamiamo verticale e che dovrebbe rimanere costante nel tempo. Ma va considerata un'altra caratteristica di questa forza, ovvero che l'effetto diminuisce al crescere della distanza, senza annullarsi mai. Sorge il sospetto che occorra considerare altri corpi massivi, come la Luna e il Sole, e in effetti questi astri hanno una influenza rilevante. Il risultato è che la forza di gravità non è costante, cambia leggermente nel tempo, secondo la posizione relativa di Sole, Terra e Luna. Osservando un filo a piombo sufficientemente preciso si può studiare la gravità. Si hanno piccole variazioni della posizione del piombo, la forza di gravità non è costante, ma per cause note: la Luna e il Sole.

La forza gravitazionale diventa rapidamente trascurabile con la distanza. Una stella non è in grado di avere la minima influenza sugli eventi terrestri. Esiste però anche un altro fenomeno: quando un oggetto massivo quanto una stella si muove in maniera brusca, con grandi accelerazioni, sorgono nuovi effetti connessi con la gravità. La caratteristica più saliente è che essi si propagano a grande distanza e giungono fino a noi. All'attrazione gravitazionale terrestre si sovrappone una perturbazione, il filo a piombo si muove, questa volta per una causa molto più remota che non la presenza della Luna o del Sole. In questa situazione si parla di "onde gravitazionali". Onda, per analogia con l'onda sull'acqua che nasce dove cade un sasso e si propaga; gravitazionale, perché agisce su qualsiasi corpo massivo, come la gravità che conosciamo.

Questa perturbazione dello spazio vuoto può percorrere l'intero Universo senza venire apprezzabilmente alterata, portando informazioni su quello che avviene ai confini dell'Universo, oppure in posti inaccessibili alle tecniche astronomiche.

Le onde gravitazionali sono previste dalla teoria della Relatività Generale, elaborata da Einstein e pubblicata nel 1916. Non sono mai state osservate sperimentalmente, ovvero nessuno ha visto un filo a piombo (o uno strumento equivalente) muoversi per causa loro. Si ha solo una evidenza indiretta della loro esistenza, in condizioni molto particolari. Sono stati identificati dei sistemi composti da due stelle che ruotano l'una attorno all'altra molto rapidamente, una rivoluzione in qualche decina di ore. La traiettoria delle stelle può essere calcolata con o senza l'ipotesi di emissione di onde gravitazionali, ottenendo dei risultati

notevolmente diversi. Ebbene, le stelle di questi sistemi si muovono in preciso accordo con l'ipotesi di esistenza delle onde gravitazionali.

Per vedere effetti indiretti dovuti alle onde gravitazionali è stato quindi necessario trovare sistemi di stelle in condizioni veramente particolari: tuttora tra le numerosissime stelle studiate si conoscono solo tre sistemi di coppie di stelle che mostrano l'effetto delle onde gravitazionali. Agli astrofisici Hulse e Taylor, per aver scoperto il primo di questi sistemi, è stato assegnato il premio Nobel per la Fisica nel 1993.

La dimostrazione sperimentale dell'esistenza di onde gravitazionali consiste nella messa in evidenza del loro passaggio, per esempio osservando lo spostamento di un filo a piombo. Un metodo per osservare deviazioni dalla direzione verticale è quello di usare due fili a piombo e confrontare la distanza tra i due piombi. È caratteristica peculiare delle onde gravitazionali agire tanto più diversamente sui due fili a piombo quanto più essi sono lontani. Ma l'effetto è veramente minuto: se si mettesse un filo a piombo sulla Terra e l'altro alla distanza della stella più vicina si osserverebbe uno spostamento del piombo minore del diametro di un capello. Rimanendo sulla Terra e allontanando i piombi l'uno dall'altro di alcuni chilometri lo spostamento previsto è di un milionesimo del diametro di un atomo. E questo benché alla fonte ci sia una catastrofe a livello cosmico, come la morte di una stella, uno dei pochi eventi che possa causare una intensa emissione di onde gravitazionali.

Per tanto tempo i fisici hanno ritenuto che non sarebbe mai stato possibile dimostrare l'esistenza delle onde gravitazionali perché esse non avrebbero avuto effetti misurabili su oggetti terrestri. Ma mentre la ricerca di fenomeni cosmici che potessero essere potenti sorgenti di onde gravitazionali andava avanti, dagli anni '60 si sono sviluppate tecniche di fisica sperimentale sempre più sensibili. L'ingegno mostrato nell'immaginare nuovi sensori e il progresso tecnologico sono stati tali da potere progettare apparecchiature in grado di rivelare i segnali di alcune potenti sorgenti. La rivelazione delle onde gravitazionali costituisce una delle grandi sfide scientifiche per la Fisica. Raggiunto questo obiettivo lo studio delle loro caratteristiche permetterà di approfondire le nostre conoscenze sulla gravità. Migliorando la sensibilità degli strumenti si potranno registrare onde gravitazionali provenienti dai limiti dell'Universo a noi accessibile, e si potrà parlare di una nuova Astronomia che sfrutta un occhio diverso da quello usato finora.

Uno strumento con una adeguata sensibilità per rivelare onde gravitazionali provenienti da catastrofi stellari verrà costruito sul territorio del Comune di Cascina (in Provincia di Pisa). Esso porta il nome "Virgo", dall'ammasso di galassie suscettibile di emettere i segnali ricercati. Si tratta di uno strumento in grado di misurare minute variazioni di distanza tra masse sospese (i nostri fili a piombo) e isolate al meglio da ogni perturbazione terrestre.



Per essere certi che la variazione di distanza sia dovuta al passaggio di un'onda gravitazionale, si usano due coppie di masse sospese e si confrontano le distanze tra le masse di ciascuna coppia. Le masse vanno disposte in posti diversi, altrimenti si muoverebbero all'unisono. La disposizione più efficiente richiede di misurare distanze lungo rette perpendicolari tra loro. Questo porta a usare un apparato sperimentale a forma di L, con due bracci uguali. Per aumentare la sensibilità al passaggio dell'onda gravitazionale i bracci devono essere della massima lunghezza possibile. Il costo e le capacità di accoglienza del territorio hanno imposto un limite pratico, decisamente ragguardevole, di 3 chilometri per ciascuno di essi.

L'interferometro Virgo è costituito da due tubi a vuoto di tre chilometri di lunghezza perpendicolari l'uno all'altro con, alle estremità, delle torri contenenti pendoli in cascata che sorreggono specchi. Una sorgente laser di una ventina di watt e grande stabilità emette il fascio usato per le misure di distanza. Un sensore permette la registrazione dell'intensità luminosa, e il profilo del segnale verrà poi analizzato per capire se siamo in presenza di "rumore" residuo, oppure dei tanto attesi segnali provenienti dal cosmo.

Il problema dell'analisi del segnale, cioè dell'identificazione di un evento stellare mischiato a innumerevoli segnali spuri provenienti da cause terrestri, è di difficoltà notevole. Le informazioni saranno raccolte al ritmo di un *Megabyte* al secondo e l'apparato, attivo per anni, accumulerà enormi quantità di dati. Il riconoscimento del segnale dovrà quindi avvenire con metodi automatici, basandosi su modelli per le possibili forme di onde gravitazionali. Per essere pronti fin dal primo istante a "macinare" i dati raccolti è in corso già da tempo un notevole sforzo teorico e pratico per sviluppare gli algoritmi necessari.

L'esperimento Virgo viene realizzato da una collaborazione di fisici di Annecy, Orsay, Parigi e Lione in Francia, e di Frascati, Napoli, Perugia, Pisa e Roma in Italia, che lavorano nei laboratori del *Conseil National de la Recherche Scientifique* (CNRS) e dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). In aggiunta gruppi di ricerca dei Dipartimenti di Fisica e di Informatica dell'Università di Pisa si stanno interessando allo sviluppo di nuovi algoritmi per l'analisi dei dati.

È merito dei due promotori dell'esperimento, Adalberto Giazotto (della Sezione di Pisa dell'INFN) ed Alain Brillet (del Laboratorio di Orsay) che gli Enti di Ricerca dei due paesi abbiano scelto di finanziare una impresa di tali dimensioni (un investimento di 65 milioni di ECU). Che il sito per l'esperimento si trovi in Italia è merito di quella simbiosi di Università, Scuole ed Enti di Ricerca con la città di Pisa e il territorio circostante. Come termine di paragone si può menzionare che un progetto simile da parte di tedeschi e inglesi rimarrà in letargo ancora per diversi anni e una sorte simile sta avendo l'interferometro australiano. L'equivalente statunitense di Virgo si chiama LIGO (*Laser Interferometry Gravitational wave Observatory*) ed è frutto di una collaborazione tra il *California Institute of Technology* (Caltech) ed il *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), ovvero i due più prestigiosi Politecnici degli Stati Uniti.

L'esperimento Virgo inizierà tra breve la costruzione, che si prevede termini alle soglie dell'anno 2000. I fisici pisani dovranno sormontare ancora numerose difficoltà tecniche e anche amministrative per mantenere i tempi previsti, che coincidono con quelli della costruzione dell'apparato concorrente LIGO.

*Francesco Fidecaro è docente di Fisica presso l'Università di Pisa (fidecaro@galileo.pi.infn.it)*

Figura 2 - Come potrebbe apparire dall'alto l'insediamento di Virgo a Cascina.

