



(Estratto dal sito: <http://www.ego-gw.it/virgodescription/italiano/indice.html>)

La **forza di gravità** è tra tutte le forze della Natura quella che conosciamo da più tempo. Una delle sue proprietà fondamentali - che tutti i corpi in caduta libera hanno la stessa accelerazione - fu identificata da Galileo all'inizio del diciassettesimo secolo. Verso la fine dello stesso secolo, Newton stabilì la legge di gravitazione universale responsabile sia della forza di caduta dei gravi sia della forza di attrazione tra pianeti. Infine Einstein, con la teoria della relatività generale, stabilì la connessione tra campo gravitazionale e struttura dello spazio-tempo. Tuttavia, ad oggi disponiamo di pochissimi elementi sulle proprietà della forza gravitazionale ed in particolare delle sue caratteristiche in condizioni estreme come quelle che presumibilmente dovevano esserci durante l'esplosione primordiale o durante la collisione tra buchi neri. Contrariamente a ciò che si potrebbe credere, l'interazione gravitazionale è la meno conosciuta fra le interazioni fondamentali.

La teoria di Einstein prevede l'esistenza di onde gravitazionali, simili alle increspature sulla superficie di uno stagno dopo il lancio di una pietra, che si diffondono nello spazio alla velocità della luce. Queste sono perturbazioni del campo gravitazionale, che, come per il campo elettromagnetico, possono viaggiare e trasportare energia su grandi distanze. Però mentre la radiazione elettromagnetica (per esempio la luce visibile) può essere completamente assorbita dalla materia, le onde gravitazionali possono viaggiare nello spazio senza essere assorbite dalle stelle o dalla materia interstellare. Questa interazione molto bassa, assieme alla debolezza della forza gravitazionale, rendono la loro rivelazione straordinariamente difficile. Di fatto, dopo 30 anni di intensa ricerca, abbiamo solo una prova indiretta della loro esistenza. Le onde gravitazionali non sono ancora state rivelate e questo costituisce una delle grandi sfide della fisica sperimentale.

Al fine di capire meglio l'Universo e la sua evoluzione è necessario potere interpretare tutti i messaggi che giungono dallo spazio lontano. Le radiazioni elettromagnetiche, di gran lunga il principale mezzo di osservazione astronomica, sono generate dall'eccitazione degli atomi. Al contrario, le onde gravitazionali hanno una natura totalmente diversa, essendo generate dal moto e la variazione di massa dei corpi celesti. In un certo senso, l'astronomia odierna si può confrontare al vedere un concerto in TV con il volume totalmente spento. Rivelare le onde gravitazionali può essere confrontato all'alzare del volume per ascoltare qualcosa di mai sentito prima. L'osservazione delle onde gravitazionali fornirà così informazioni significative e complementari all'osservazione di onde elettromagnetiche (luce, onde radio, raggi X e gamma) e di particelle elementari (raggi cosmici, neutrini) di origine astrofisica. Verranno svelati aspetti dell'Universo inaccessibili ai mezzi tradizionali: si estenderà il dominio osservabile fin dentro quelle zone del cosmo oscurate dalla polvere o da altri fenomeni.

I processi più drammatici del cosmo, come l'esplosione di una supernova, collisioni catastrofiche, fusione di sistemi binari, rotazione di pulsar, interazione di buchi neri o ancora il big bang primordiale sono fonte di onde gravitazionali. L'osservazione di onde gravitazionali emesse durante questi violenti processi è l'unico modo per ottenere informazione sulle masse coinvolte nel processo.

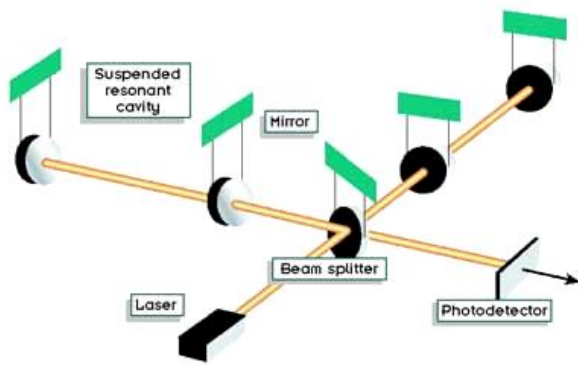
La massa totale dell'Universo, stimata dalla massa dei corpi visibili, della polvere cosmica e dei gas, è meno del 10% della massa necessaria per spiegare il moto delle galassie. Siccome le onde gravitazionali sono generate dal moto di grandi masse la loro osservazione potrà fornire informazioni fondamentali su questo mistero della massa mancante. Ogni nuovo strumento di osservazione della natura ha permesso di fare scoperte impreviste, che hanno arricchito la nostra conoscenza e spesso rivoluzionato la nostra immagine del mondo. E' probabile che i rivelatori di onde gravitazionali rivelino aspetti insospettati dell'Universo.

Un altro aspetto da prendere in considerazione è che, contrariamente ai telescopi, che possono osservare solo una piccola porzione del cielo alla volta, i rivelatori di onde gravitazionali sono per loro natura non direzionali e sono quindi in ascolto continuo di tutto l'Universo. Questo offre la possibilità di osservare eventi catastrofici di breve durata come l'esplosione di supernovae fin dai primi cruciali istanti, mentre i telescopi giungono a fare le loro osservazioni ben più tardi.

Le onde gravitazionali distorcono lo spazio tempo e producono forze in maniera tale che la distanza tra due masse altrimenti libere, aumenta e diminuisce alternativamente al passaggio dell'onda. Una caratteristica importante è che a un allontanamento in una direzione corrisponde un avvicinamento nella direzione perpendicolare. Il risultato è che se le masse sono disposte su un cerchio questo sarà alternativamente allungato e schiacciato in due direzioni perpendicolari.

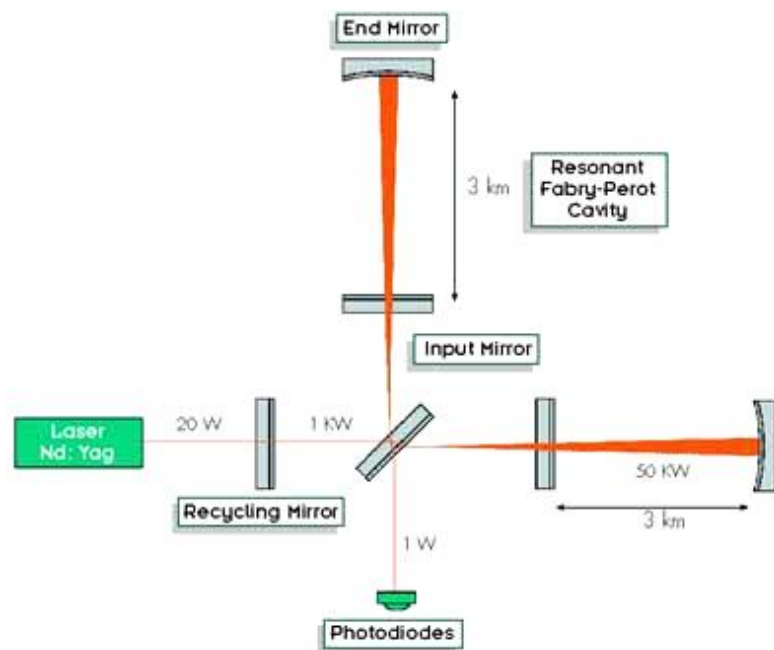


L'ampiezza delle onde gravitazionali, il parametro adimensionale h , è la misura della variazione relativa delle distanze tra due masse libere. Questa minuscola variazione è quindi proporzionale alla distanza tra le due masse: sarebbe 'grande' quanto la dimensione di un atomo se uno potesse misurare distanze dalla Terra fino al Sole, ed è cento milioni di volte più piccola per due punti separati da una distanza di pochi chilometri.



Queste minuscole variazioni di distanza possono essere rivelate sfruttando il fenomeno dell'interferenza. Un interferometro Michelson a laser è molto sensibile a differenze di lunghezza tra i suoi bracci ed è quindi ideale per la rivelazione di onde gravitazionali. Per l'altissima sensibilità richiesta, la lunghezza dei bracci deve essere di molti chilometri. Questo non può essere facilmente realizzato sulla Terra e si usano riflessioni multiple per aumentare artificialmente la lunghezza dei bracci. Tipicamente nei rivelatori interferometrici di onde gravitazionali vengono usate cavità risonanti ottiche Fabry-Perot.

Virgo è un interferometro laser di tipo Michelson con due bracci di 3 km disposti ad angolo retto. Uno specchio semitrasparente divide il fascio laser incidente in due componenti uguali mandate nei due bracci dell'interferometro. In ciascun braccio una cavità risonante Fabry-Perot formata da due specchi estende la lunghezza ottica da 3 a circa 100 chilometri per via delle riflessioni multiple della luce e pertanto amplifica la piccola variazione di distanza causata dal passaggio dell'onda gravitazionale. I due fasci di luce laser, provenienti dai due bracci, vengono ricombinati in opposizione di fase su un rivelatore di luce in maniera che, normalmente, non arrivi luce sul rivelatore. La variazione del cammino ottico, causata dalla distanza tra gli specchi che varia, produce un piccolissimo sfasamento tra i fasci e quindi un'alterazione dell'intensità luminosa osservata, proporzionale all'ampiezza dell'onda gravitazionale.



In questo schema, però, gran parte della luce torna indietro verso il laser. Per aumentare la potenza disponibile questa luce viene rimandata nell'interferometro da uno specchio di ricircolo, in fase con il fascio incidente, aumentando la potenza luminosa che può raggiungere svariate decine di chilowatt nelle cavità risonanti Fabry-Perot. Una elevata potenza luminosa è importante perché consente un miglioramento della sensibilità di misura. Con queste cavità risonanti accoppiate l'interferometro può essere visto come una gigante trappola di luce.

Se l'ottica fosse perfetta e gli specchi perfettamente in quiete la luce non raggiungerebbe il rivelatore eccetto che al passaggio di un'onda gravitazionale. La qualità e stabilità dell'ottica rappresentano una delle maggiori sfide dell'interferometro.

VIRGO è sensibile alle onde gravitazionali in un ampio spettro di frequenze, da 10 a 10,000 Hz. Questo dovrebbe consentire la rivelazione di radiazione gravitazionale causata dalla coalescenza di sistemi binari (stelle o buchi neri), pulsar, e quella prodotta da supernovae nella Via Lattea e nelle galassie esterne, per esempio fino all'ammasso di galassie Virgo, che dà il nome a questo progetto.

VIRGO funziona giorno e notte, ascoltando tutti i segnali che arrivano a qualsiasi momento da qualunque parte dell'Universo. I dati acquisiti con l'interferometro come pure i dati ausiliari necessari per il suo controllo (4Mbytes/s) sono sottoposti ad una analisi preliminare per la rivelazione veloce di segnali anomali potenzialmente interessanti. I dati vengono poi messi a disposizione della collaborazione scientifica per una analisi più approfondita.

L'area centrale, il cuore dell'interferometro, è un immenso tavolo ottico sotto ultra alto vuoto. Ogni elemento ottico è sospeso a un sistema di isolamento sismico contenuto in una torre da vuoto. Le torri sono connesse tra loro da tubi a vuoto. I tubi che connettono le torri delle cavità Fabry-Perot hanno un diametro di 1.20 m e una lunghezza di 3km. Siccome la presenza di gas residuo perturberebbe la misura, il percorso del fascio di luce tra gli specchi deve trovarsi alla pressione estremamente bassa di 10^{-10} mbar, così che la camera a vuoto di Virgo è il più grande volume sotto ultra alto vuoto in Europa (6800 m³). Per raggiungere questi bassissimi valori sono stati sviluppati processi metallurgici speciali come il desorbimento dell'idrogeno a 400°C, per la fabbricazione dei componenti. Successivamente, per eliminare il vapore di acqua, tutti i componenti subiscono un riscaldamento a 150 gradi per alcuni giorni all'inizio di ogni ciclo di pompaggio. Nonostante l'isolamento termico ognuno dei tubi da 3 km richiede per questa operazione una potenza di 1MW! I tubi a vuoto sono situati all'interno di tunnel che devono rimanere molto stabili su lunghi periodi di tempo. I tunnel sono fatti di elementi prefabbricati di cemento di 20 m di lunghezza supportati da pilastri che raggiungono gli strati più stabili del terreno. Approssimativamente 1000 pilastri profondi da 20 a 50 metri sono stati posati in opera per VIRGO.

Le vibrazioni sismiche del terreno sono miliardi di volte più grandi delle variazioni di distanza indotte dalle onde gravitazionali. Di conseguenza è essenziale evitare movimenti spuri dei componenti ottici. L'isolamento sismico viene realizzato attraverso una catena di filtri sismici equipaggiati di molle a balestra triangolari. Le molle provvedono all'isolamento nella direzione verticale mentre il pendolo composto assicura l'isolamento nella direzione orizzontale. Per ridurre ulteriormente il disturbo di origine sismica questa catena è sospesa a una piattaforma stabilizzata attivamente in grado di correggere moti di grande ampiezza a bassa frequenza. Questa piattaforma assicura il controllo della posizione al micron.

Un secondo controllo della posizione viene svolto all'estremità della catena di sospensione da una marionetta alla quale sono sospesi con fili molto sottili lo specchio e una massa di rinculo. Il controllo ultimo della posizione dello specchio è ottenuto attraverso forze piccolissime tra lo specchio e la massa di rinculo generate da bobine e magneti oppure da attuatori elettrostatici. In definitiva l'ambiente dell'interferometro VIRGO sarà molto più quieto di quanto lo sia quello di un velivolo spaziale in orbita intorno alla Terra.

Alle basse frequenze (10-200 Hz), la sensibilità di VIRGO sarà limitata inizialmente dal cosiddetto 'rumore termico', cioè dal fatto che ogni modo di vibrazione dello specchio e della sua sospensione vengono continuamente eccitati casualmente, con una energia proporzionale alla temperatura assoluta T. Se questi modi hanno uno smorzamento molto basso la loro energia è concentrata intorno alle frequenze di risonanza, e non introducono rumore alle altre frequenze. Ma se uno di questi modi viene smorzato l'energia si distribuisce su tutto lo spettro di frequenze introducendo rumore nella misura. E' così estremamente importante ridurre al minimo tutte le sorgenti di smorzamento meccanico selezionando accuratamente i materiali e il modo di congiungere i vari elementi tra loro per evitare attrito. Ulteriori miglioramenti richiederanno di raffreddare l'interferometro fino a bassissime temperature, vicino a 20°Kelvin (-253 gradi centigradi) per abbassare quanto più possibile l'energia termica.

Con l'elevatissima potenza ottica accumulata nelle varie cavità risonanti qualsiasi difetto o contaminazione delle superfici ottiche può generare effetti indesiderati come diffusione o assorbimento della luce e deformazione o danni irreversibili degli elementi ottici.



Durante tutti i passi della produzione degli elementi ottici e soprattutto durante la loro posa in opera deve essere adottata una grande cura per prevenire contaminazioni. Ogni componente meccanico, che dovrà stare nell'ultra alto vuoto, viene pulito in una speciale macchina automatica e mantenuto in condizioni di estrema pulizia durante tutta la fase di assemblaggio e integrazione. I componenti ottici vengono trattati con cura ancora maggiore.

Il laser al Neodimio-YAG da 20 Watt di VIRGO fa parte di una nuova generazione di laser ultrastabili ed è uno degli oscillatori (orologi) più stabili mai costruiti. Prima di essere iniettato nell'interferometro il fascio laser viene modulato, stabilizzato in frequenza e ampiezza e i modi di ordine più elevato vengono filtrati da una cavità ottica di 140 metri di lunghezza, chiamata "Mode cleaner", lasciando solo il modo fondamentale TEM 00. Gli specchi di VIRGO combinano la più alta qualità di superficie (a meglio del centesimo di micron) con una diffusione e un assorbimento bassissimi (meno di una parte per milione). In collaborazione con l'industria, materiali trasparenti con eccezionali proprietà di basso assorbimento e alta omogeneità sono stati prodotti. Un impianto di deposizione di grandi dimensioni (2.5x2.5 metri) unico al mondo, è stato costruito per la realizzazione di strati riflettenti con ultra basso assorbimento e diffusione. Una metrologia altamente sofisticata è stata anch'essa sviluppata per controllare le eccezionali caratteristiche raggiunte.

VIRGO è stato finanziato dalla Francia tramite il CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) e dall'Italia tramite l'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare). La costruzione di VIRGO ha combinato con profitto competenze in numerosi settori avanzati della scienza e della tecnologia. VIRGO è il risultato di una stretta collaborazione tra diverse centinaia di fisici, ingegneri e tecnici appartenenti a undici laboratori di ricerca. Diverse industrie, quali CNIM (F), SDMS (F), Pirelli (I), Belleli (I), Impregilo (I), Heraeus (D), VAT (CH) hanno partecipato alla realizzazione.

Principle: Michelson laser interferometer with two Fabry-Perot cavities in the arms and power recycling.

Arms length:	3 kilometers
Vacuum tube:	120 cm diameter, fully welded (no seal)

Vacuum performance:

Pressure after baking at 150o C:	< 10-9 mbar
hydrocarbons partial pressure	10-13 mbar

Laser and injection system:

Nd:YAG diode-pumped laser at 1064 nm	
Laser power:	20 W
Mode cleaner:	144 m long, 3 mirrors ring cavity
Finesse of mode cleaner cavity	1000
Frequency stability	< 10-4 Hz ^{1/2} at 1 kHz
Relative Intensity Noise (RIN)	< 10-7 at 1 kHz
Power Stored in Fabry-Perot cavity:	15 to 50 kW (depending of finesse)
Power Stored in recycling cavity:	1 kW

Optics

Main mirror substrates	special "Virgo" grade fused silica absorption < 1 ppm/cm diameter 350mm
Reflective coatings	absorption < 1ppm
Anti reflection coatings	reflection < 0.1 %
Surface quality	λ/200 rms
Surface microroughness	< 1 Angstrom

Suspensions

Inverted pendulum pre-isolator plus 6 passive stages.	
Active control on first and last stage and on mirror.	
Seismic attenuation	10-11 at 10 Hz
rms mirror motion before locking:	<1 mm, < 0.1 mradian
Thermal stabilization	+/- 0.1 degree C

Frequency range

10 Hz to 10 kHz

Sensitivity

h ~ 3 10-21 Hz-1/2 at 10 Hz
h ~ 3 10-23 Hz-1/2 at 1 kHz

Provision for future implementation of signal recycling technique

Diverse tecnologie usate per Virgo sono state sviluppate in stretta collaborazione con l'industria e possono avere un impatto su altre attività scientifiche o industriali.

Sistemi di isolamento sismico e accelerometri ultrasensibili possono trovare applicazioni in altri settori scientifici o industriali.

La più grande camera a vuoto d'Europa ha richiesto lo sviluppo di speciali processi produttivi in metallurgia e la realizzazione di elementi in acciaio di grandi dimensioni ed alta precisione.

Superfici ottiche a bassissima diffusione hanno richiesto la costruzione di un impianto speciale a Lione (F).

La richiesta per l'ottica di VIRGO di un assorbimento estremamente basso e di una alta omogeneità, ha avuto come risultato un notevole miglioramento del processo produttivo di un tipo di silice fusa di alta qualità, ora disponibile anche per altre applicazioni.

Con due grandi interferometri, VIRGO e GEO (situato vicino ad Hannover in Germania) e tre antenne risonanti criogeniche (a una temperatura inferiore a quella dell'elio liquido) al CERN a Ginevra, a Frascati e a Legnaro, l'Europa è in prima linea nella ricerca sulle onde gravitazionali.

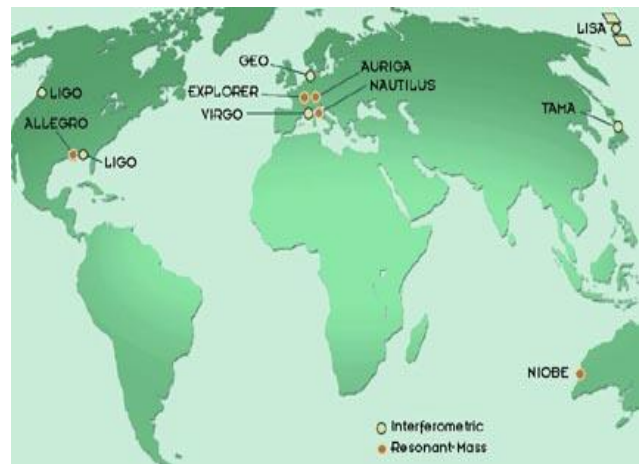
Più di venti laboratori e diverse centinaia di ricercatori in sei paesi europei sono già coinvolti in sviluppi sperimentali legati alla rivelazione delle onde gravitazionali. Un gran numero di fisici teorici e di astrofisici lavorano alla previsione delle caratteristiche delle sorgenti di onde gravitazionali ed all'analisi dei dati sperimentali. I rivelatori risonanti del futuro potrebbero utilizzare sfere invece che barre. Potranno essere di complemento alla rete di interferometri.

Mentre le antenne attuali potranno giungere alla prima rivelazione di onde gravitazionali, è già chiaro che sfruttare completamente l'opportunità offerta da questa nuova finestra di osservazione richiede un miglioramento significativo della loro sensibilità.

Mentre ci sono già piani negli Stati Uniti e in Giappone per costruire un rivelatore di seconda generazione, sono in corso attualmente discussioni in Europa tra le varie istituzioni e gruppi interessati a porre le basi per un progetto europeo di seconda generazione.

Questa nuova antenna lavorerà molto probabilmente alla temperatura dell'elio liquido, avrà un'ottica di dimensioni maggiori ed è probabile che vengano usati nuovi materiali, laser di altissima potenza e che sia situata sotto terra per evitare perturbazioni ambientali e da raggi cosmici.

Cinque interferometri nel mondo si apprestano a produrre dati scientifici prima del 2004 (VIRGO e GEO in Europa, i due interferometri di LIGO negli Stati Uniti e TAMA in Giappone). Un interferometro australiano è in progetto mentre il Giappone ha in piano la costruzione di un secondo interferometro criogenico. Un totale di cinque rivelatori risonanti, di cui tre in Europa, sono in funzione. LISA, un interferometro realizzato dalle agenzie spaziali europea e americana (ESA e NASA), dovrà essere messo in orbita solare alla fine del decennio e sarà particolarmente sensibile alle frequenze molto basse che sono fuori dalla portata degli interferometri terrestri a causa del rumore ambientale. Vi è una stretta collaborazione tra i vari gruppi attraverso varie riunioni, scambi di dati e analisi congiunte, allo scopo di creare un network mondiale di rivelatori. Un organismo mondiale (Gravitational Waves International Committee) assicura questo alto livello di coordinamento.



L'Osservatorio Gravitazionale Europeo (EGO in inglese) è stato istituito nel dicembre 2000, dall'INFN e il CNRS per assicurare il completamento e poi lo sfruttamento scientifico a lungo termine di VIRGO nonché per sostenere e promuovere in Europa ricerca e collaborazione in questo settore nascente. Assieme ai laboratori associati, EGO assicurerà il funzionamento e la necessaria manutenzione di VIRGO e di eventuali altri rivelatori. Creerà e assicurerà il funzionamento di un centro di calcolo per l'analisi dati in linea, promuoverà attività di Ricerca e Sviluppo utili per la rivelazione delle onde gravitazionali, svolgerà altra ricerca nel campo della gravitazione di interesse per i suoi membri, promuoverà la cooperazione nel campo della ricerca sperimentale e teorica sulle onde gravitazionali in Europa, nonché contatti tra scienziati e ingegneri, la disseminazione dell'informazione e la formazione avanzata di giovani ricercatori.