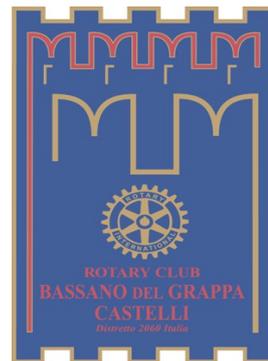




**Rotary**



**IL ROTARY  
AL SERVIZIO  
DELL'UMANITÀ**



*Distretto 2060 Italia Nord-Est Governatore Alberto Palmieri*

**ROTARY CLUB BASSANO DEL GRAPPA CASTELLI**  
*Presidente Alferio Crestani*

anno rotariano 2016-17 - XVIII del Club fondato il 27/07/1999

**Bollettino n° 34 -XVIII**

**18 maggio 2017**

***"VIRGO: una sfida tecnologica al limite dell'impossibile"***

***prof. Diego Passuello***



*Il prof. Diego Passuello*

Nato a Cittadella (PD) Diego Passuello ha conseguito la maturità scientifica presso il liceo "Jacopo da Ponte" di Bassano del Grappa. Si è laureato in Fisica nel 1974 presso l'università di Pisa con la votazione di 110 e lode. Dal 1975 al 1990, in qualità di Ricercatore dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), si è occupato della progettazione, realizzazione e messa in funzione di trigger avanzati e di sistemi di acquisizioni dati per esperimenti in Fisica delle Alte Energie al CERN di Ginevra ed al Fermilab di Chicago. Durante questi anni è stato coinvolto nelle prime prove di costruzione di sistemi antisismici da impiegare in futuri rivelatori di Onde Gravitazionali. Dal 1990 si è occupato a tempo pieno all'esperimento VIRGO, un interferometro con bracci di 3 km, per la rivelazione delle Onde Gravitazionali. In VIRGO è stato ed è tuttora responsabile della progettazione, sviluppo e realizzazione del sistema digitale di controllo inerziale dei punti di sospensione delle componenti ottiche dell'interferometro. Dal 2002 è Dirigente di Ricerca dell'INFN. È titolare del corso di "Elettronica e Sensori" per il corso di laurea magistrale in Fisica all'università di Pisa.

Per capire il funzionamento di un interferometro per Onde Gravitazionali come VIRGO o LIGO è necessaria una premessa su che cosa è la gravità e cosa sono le onde gravitazionali.

La gravità, questa strana forza che ci tiene legati al nostro pianeta, è sempre stata al centro dell'attenzione degli uomini fin dai tempi più antichi. Solo a partire però da Galileo si sono cominciati a fare esperimenti per determinarne in modo scientifico le proprietà. Il risultato più notevole ottenuto da Galileo si trova in un brano dei "Discorsi e Dimostrazioni Matematiche Intorno a Due Nuove Scienze" del 1638 nel quale Galileo fa dire a Salviati che i corpi nel vuoto, ossia in assenza di attrito con l'aria, cadono tutti con la stessa accelerazione, indipendentemente dalla natura e dal peso dei corpi stessi. C'è da dire che la stessa affermazione si trova anche nel "De rerum natura" di Lucrezio. L'affermazione di Galileo però, a differenza di quella di Democrito, si basa su esperienze fisiche effettivamente eseguite con i piani inclinati e quindi ha un carattere oggettivo e non speculativo. Comunque sia, questa proprietà della gravità scoperta da Galileo verrà successivamente chiamata da Einstein "l'indizio trascurato"; vedremo in seguito perché.

Dopo Galileo giunge Newton (nato nello stesso anno della morte di Galileo: si tratta proprio di un passaggio di testimone). Newton formula la legge di gravitazione universale, affermando che due corpi qualsiasi si attraggono con una forza che è proporzionale al prodotto delle masse dei due corpi ed inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. A proposito di ciò Newton, correttamente, afferma che tale legge spiega perfettamente il moto dei gravi e dei pianeti ma che non ha la minima idea del perché sia così (la famosa affermazione: *Hypothesises non fingo*).

La teoria di Newton è una teoria di notevole successo. In effetti:

- Spiega perfettamente il moto dei pianeti noti (a parte una piccola discrepanza nel moto di Mercurio).
- Permette di predire l'esistenza di nuovi pianeti dall'analisi del moto irregolare di altri pianeti (è il caso della scoperta di Nettuno a partire dal moto anomalo di Urano e successivamente alla scoperta di Plutone).
- È tuttora usata per il calcolo delle traiettorie dei satelliti artificiali: ha permesso all'uomo di giungere sulla Luna.

Ciò nonostante la teoria di Newton è sbagliata! Essa entra in crisi con l'avvento della Teoria della Relatività Ristretta (RR) del 1905 di Einstein. Con la RR infatti la velocità della luce diventa una velocità limite indipendente dal Sistema di Riferimento: nessuna interazione fra corpi può propagarsi con velocità superiore a  $c$ . Però la formula della gravitazione universale richiede per funzionare, ossia per essere coerente con le osservazioni, che la forza agente sulla prima massa dipenda dalla posizione istantanea della seconda massa.

Anche l'intervallo di tempo tra due eventi non è più un assoluto: dipende (è relativo) dal sistema di riferimento. Cade pertanto anche il terzo principio della dinamica, quello di azione-reazione. Il tempo e lo spazio non sono più assoluti dati a-priori come asserito da Newton e poi da Kant: dipendono dal moto relativo dei sistemi di riferimento: "lo spazio si tramuta in tempo e viceversa". Si deve parlare di un ente a quattro dimensioni, lo spazio-tempo.

Tutta la meccanica, o meglio la fisica, è da rivedere. In particolare bisogna riformulare la gravità da un altro punto di vista.

Già dal 1909 Einstein, analizzando l'indizio trascurato, ossia l'osservazione di Galileo che tutti i corpi cadono con la stessa legge oraria, si rende conto che la gravità è una proprietà del punto, del luogo: l'accelerazione di un corpo in un certo punto dipende solamente dal punto stesso e non dalla costituzione e dal peso del corpo: la gravità, cioè, deve essere una proprietà geometrica. Basandosi su questa osservazione ne deduce l'impossibilità di distinguere, in una porzione limitata dello spazio-tempo, la forza di gravità dalla forza apparente presente in un riferimento accelerato (il famoso ascensore di Einstein). Formula così il Principio di Equivalenza.

Utilizzando tale principio decide che la gravità non esiste: è una forza apparente dovuta al fatto che ci muoviamo in uno spazio-tempo curvo. Sostituisce il primo principio della meccanica o principio di inerzia (un corpo lontano dall'influenza di altri corpi si muove di moto rettilineo uniforme) con un nuovo principio: un corpo, non impedito nel suo moto da vincoli esterni, si muove lungo una geodetica dello spazio-tempo (le "rette" delle geometrie non euclidee).

Esaminiamo per esempio il comportamento di due viaggiatori che partono alla stessa velocità costante dal polo di una superficie sferica in direzioni diverse. Ognuno si muove in "linea retta", ossia si muove lungo un meridiano della sfera. All'inizio il loro moto relativo è rettilineo uniforme, ma man mano che si avvicinano all'equatore smettono di allontanarsi per poi cominciare ad avvicinarsi. Ognuno di essi interpreta questo comportamento come una forza di attrazione, ossia una forza gravitazionale. In realtà la forza è solo apparente ed è dovuta al fatto che si muovono su una superficie curva. Lo stesso avviene nel nostro spazio-tempo se questo è curvo, non euclideo. In tale spazio-tempo non possiamo stare fermi: siamo costretti per lo meno a muoverci nel tempo (anzi alle velocità spaziali piccole corrisponde una velocità nel tempo essenzialmente pari alla velocità della luce).

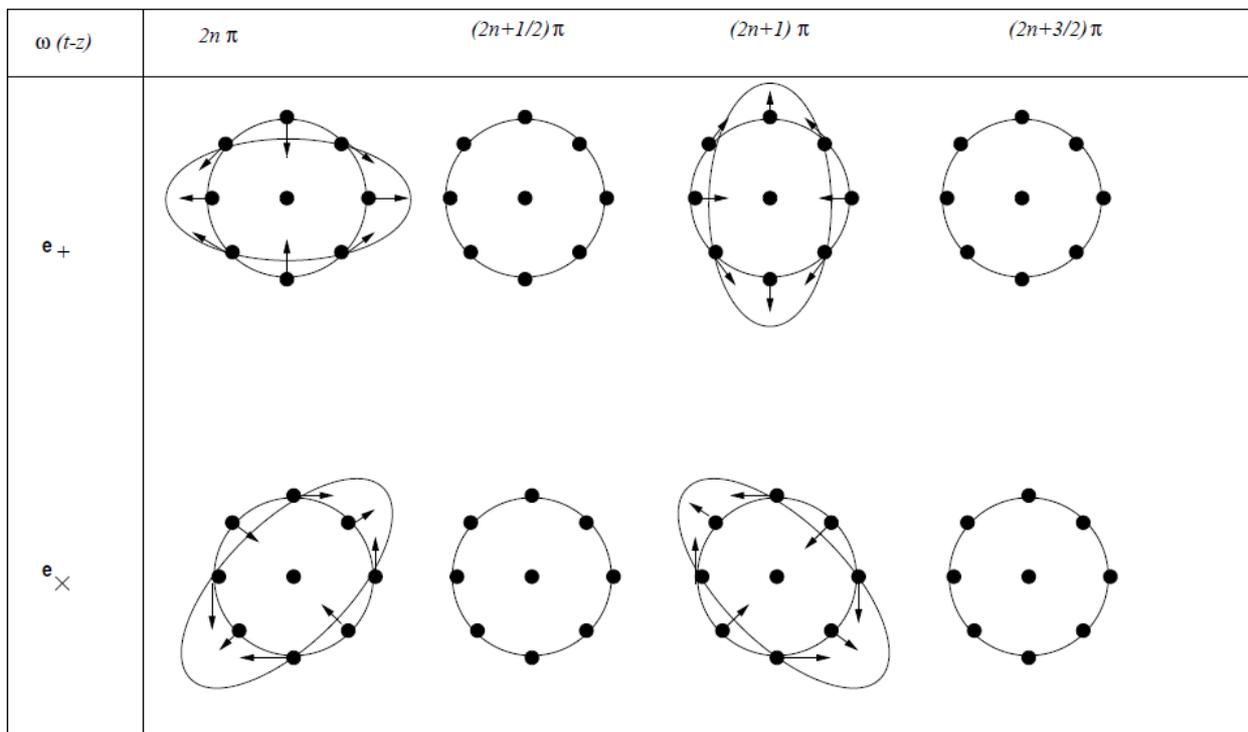
Mediante questa idea ed utilizzando tutto un armamentario già pronto per trattare le proprietà delle geometrie non euclidee rimanendo all'interno delle stesse geometrie (calcolo differenziale assoluto o calcolo tensoriale, sviluppato soprattutto da una scuola di geometri italiani: Ricci Curbastro, Tullio Levi Civita, Luigi Bianchi, Eugenio Beltrami, Ferrara ed altri) Einstein, basandosi anche su richieste di alcune simmetrie, riesce a formulare la Legge del Campo Gravitazionale: l'energia, e quindi anche la materia, dice allo spazio-tempo come curvarsi e lo spazio-tempo curvo dice alla materia come muoversi. Per piccole densità di energia e per piccole velocità tale legge si riduce alla legge di gravitazione di Newton. Inutile dire che tale nuova teoria spiega perfettamente il comportamento anomalo di Mercurio dovuto alla sua piccola distanza dal Sole dove è più deformata la geometria dello spazio-tempo.

Due oggetti di grande massa e molto compatti in orbita reciproca deformano notevolmente lo spazio-tempo nelle loro vicinanze e producono addirittura delle oscillazioni nella geometria dello spazio-tempo che si propagano alla velocità della luce. Sono queste oscillazioni della trama dello spazio-tempo le Onde Gravitazionali.

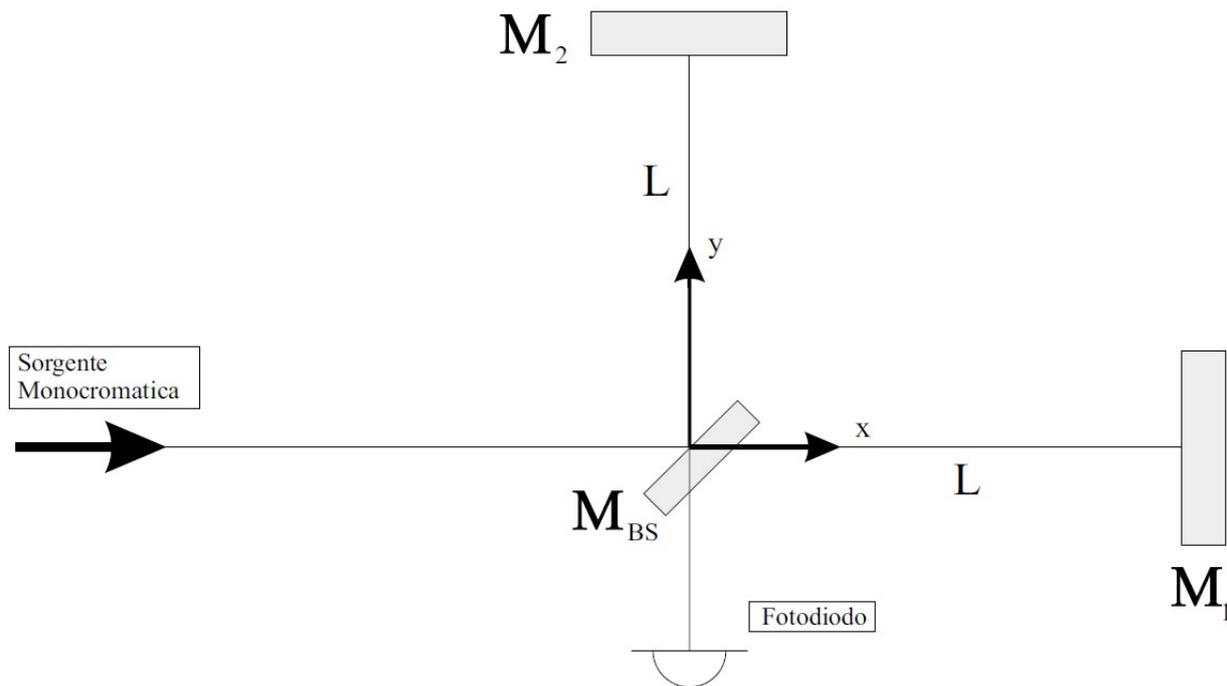
L'ampiezza prevista di queste onde è estremamente piccola.

Per la rivelazione delle Onde Gravitazionali sono possibili essenzialmente due tecniche diverse:

- **Rivelatori risonanti:** essi sono costituiti di una barra cilindrica di alluminio della massa di alcune tonnellate portata ad una temperatura prossima allo zero assoluto. Al passaggio di un'onda gravitazionale la barra, che ha una frequenza propria caratteristica, comincia ad oscillare variando la sua lunghezza di una piccola quantità. Se la frequenza dell'onda gravitazionale cade nella banda passante della barra allora è possibile misurarne la variazione di lunghezza.
- **Rivelatori interferometrici:** sfruttano la notevole proprietà delle onde gravitazionali di alterare la distanza relativa di un insieme di masse in caduta libera disposte lungo una circonferenza. Se due masse diametralmente opposte si avvicinano sotto l'influenza di un'onda gravitazionale, allora due masse poste su un diametro ortogonale al primo si allontanano reciprocamente. L'entità di questo avvicinamento ed allontanamento è proporzionale all'ampiezza dell'onda ed è anche proporzionale alla distanza delle masse: più lontane sono le masse e più vistoso è l'effetto. Un interferometro ottico è lo strumento ideale per la misura della variazione della distanza di due specchi posti a 90 gradi da un punto centrale.



*Possibili moti relativi di masse in caduta libera soggette ad un'onda gravitazionale.*



*Un interferometro ottico misura la variazione di cammino ottico fra  $M_{bs}-M_1$  ed  $M_{bs}-M_2$*

VIRGO è un rivelatore di onde gravitazionali di tipo interferometrico. In esso le masse di test soggette alle onde gravitazionali sono costituite da specchi. In un tale interferometro una sorgente di luce laser monocromatica viene inviata verso uno specchio semi riflettente (Beam Splitter) che la divide in due fasci ortogonali. La luce prosegue fino a due specchi riflettenti che ne invertono il moto. La luce di ritorno dei due fasci si ricombina nel Beam Splitter e se la differenza dei due cammini ottici è pari ad un multiplo intero di lunghezze d'onda si ottiene quella che si chiama interferenza costruttiva e tutta la luce raggiunge il fotodiodo rivelatore. Se invece la differenza di cammino ottico è pari ad un multiplo dispari di lunghezze d'onda, si ha interferenza distruttiva e nessuna luce raggiunge il rivelatore. È questa la condizione di funzionamento nominale dell'interferometro. Se un'onda gravitazionale altera la lunghezza dei cammini ottici, una debole luce raggiunge il rivelatore segnalandone il passaggio. Per avere una sensibilità sufficientemente elevata gli specchi debbono essere posti ad una grande distanza. In VIRGO la lunghezza dei bracci dell'interferometro è di 3 km. VIRGO deve essere in grado di misurare variazioni di distanze su una base di 3 km pari ad un millesimo del diametro del nucleo di un atomo. È questa richiesta che fa dire ad Einstein che la rivelazione delle Onde Gravitazionali è un'impresa impossibile. A sua discolpa possiamo dire che ai suoi tempi non era ancora stata sviluppata la Meccanica Quantistica e quindi niente Laser; l'elettronica era ai primordi: i computer e la microelettronica era roba da fantascienza e la stessa ottica non era così avanzata come è oggi.

Comunque per poter rivelare spostamenti così esigui bisogna superare una serie di problemi tecnici al limite del possibile:

1. Gli specchi non possono essere appoggiati al terreno perchè quest'ultimo è in continua agitazione (rumore sismico). I movimenti del terreno in condizioni di quiete sono dell'ordine di un micrometro, ossia almeno un milione di milioni di volte più grande degli spostamenti indotti dal passaggio di un'onda gravitazionale. È necessario pertanto poter isolare gli specchi dal rumore sismico. La cosa si può fare mediante l'uso dei così detti Super Attenuatori, dispositivi meccanici basati sulla proprietà filtrante dei pendoli, sviluppati a Pisa ed in grado di attenuare il rumore sismico di almeno 12 ordini di grandezza a 10 Hz. È questa una caratteristica di VIRGO che lo differenzia dall'interferometro americano LIGO.
2. Gli specchi devono essere quanto più perfetti possibile dal punto di vista ottico. Le loro superfici non possono discostarsi dalle superfici ottimali per più di qualche nanometro. La riflettività degli specchi terminali deve essere superiore al 99.999%. Questi ultimi sono investiti da una intensità luminosa pari a quella prodotta da centinaia di kW. Il loro assorbimento non deve superare qualche parte per milione, pena la distruzione dello strato riflettente. I classici specchi metallici che utilizziamo nella vita comune riflettono al più il 96% della luce incidente e non sono adatti al nostro scopo. È stata costruita a Lione una apposita struttura per la produzione degli specchi sia di VIRGO che di LIGO.
3. I fasci laser devono propagarsi nel vuoto. La presenza anche di una piccolissima quantità di aria lungo il tragitto della luce, con la sua fluttuazione, induce variazioni della lunghezza del cammino ottico nei due fasci producendo un rumore che sovrasta il segnale da rivelare. Per questo tutto l'interferometro, ossia i Super Attenuatori, i tubi di collegamento fra le varie parti ottiche ecc., deve essere posto sotto il migliore vuoto che si riesca a realizzare. La pressione residua è minore di  $10^{-12}$  atmosfere. Con il suo volume di circa 7000 metri cubi, VIRGO è il sistema di ultravacuo più grande d'Europa.
4. Il Laser che produce la luce che illumina l'interferometro deve essere, dal punto di vista spettrale, il più puro che si possa ottenere. Deve inoltre essere di una affidabilità esasperata dato che deve essere in grado di fornire una potenza di centinaia di watt ininterrottamente per tutto il periodo di una presa dati che può durare anche alcuni mesi.
5. La meccanica dei super attenuatori deve essere di una qualità tale da non introdurre nell'interferometro del rumore termico. Si è dovuto fare uso di acciai speciali, quali il maragin, dello stesso tipo in uso in ambiente militare.
6. Infine bisogna avere a disposizione una potenza di calcolo notevole per il controllo attivo della posizione di tutte le componenti ottiche e per l'analisi dei segnali prodotti dall'interferometro. La potenza di calcolo necessaria per estrarre il segnale gravitazionale, come quello prodotto dalla fusione di due buchi neri, è dell'ordine di migliaia di miliardi di operazioni aritmetiche al secondo.

Solamente tenendo conto di tutti i vincoli descritti sopra, i nostri colleghi americani, con il supporto essenziale del team di VIRGO, è riuscito lo scorso anno ad effettuare la prima rivelazione di un'onda gravitazionale.

Diego Passuello



“... immaginate di versare in mare un bicchiere d'acqua e di misurare poi l'innalzamento conseguente del livello degli oceani. Ebbene questo vi dà l'idea e la misura della difficoltà di misurare le onde gravitazionali, ... ecco la sfida di VIRGO al limite dell'impossibile” Così Diego Passuello in chiusura della sua lezione. *Lectio Magistralis* la definisce il presidente Alferio Crestani omaggiando il Relatore a fine serata. A Cascina si racconta che senza Diego Passuello non sarebbe stato possibile VIRGO. Bravo Diego, illustre bassanese!

### **soci presenti**

Bruno Bertacco, Luigi Binda, Alessandro Campana, Lino Canepari, Luigi Colognese, , Alferio crestani, Bruno Crestani, Roberto Ferro, Renato Graziani, Paolo Grendele, EnricoMarin, Gianni Maroso, Gianna Miola, Alessandro Morello, Mario Patuzzi, Stefano Pillitu, Giovanni Rigo, Bianca Riva, Giancarlo Rossi, Renata Scala, Roberto Xausa.

### **ospiti dei soci**

Maria Grazia (Mario Patuzzi)

### **Ospiti del club**

Diego Passuello e le sorelle Mariagrazia, Patrizia e Rosalinda