

# La ricerca delle onde gravitazionali

## Teoria e problemi per un esperimento osservativo

**Sergio Frasca (Scienza e Società, 1984)**

Tra le quattro interazioni (o forze) fondamentali individuate dalla Fisica, la gravitazione è stata la prima ad essere nota all'umanità e quella di più immediata esperienza: il neonato che fa cadere i giocattoli dal seggiolone fa i suoi primi esperimenti di fisica con la realtà esterna, verificando gli effetti pratici dell'interazione gravitazionale.

Essa è anche l'unica ad essere comune a tutte le particelle (o specie di materia) che sono state finora scoperte.

Tuttavia, tra le interazioni fondamentali, è la più misteriosa e quella che più sfugge all'unificazione con le altre, malgrado i numerosi tentativi.

I primi studi sperimentali sulla gravitazione furono intrapresi da Galileo, il quale scoprì che tutti i corpi, lasciati cadere (in assenza dell'attrito dell'aria), acquistavano la stessa accelerazione. Era il primo abbozzo del principio di equivalenza tra massa inerziale e gravitazionale, che ancora oggi manca di una soddisfacente spiegazione teorica.

Il secondo grosso contributo fu dato da Newton che riuscì a spiegare le tre leggi empiriche di Keplero sul moto dei pianeti postulando una forza, la gravità appunto, la cui intensità è inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra il Sole e ciascun pianeta e proporzionale al prodotto delle masse dei due corpi celesti interagenti. Si noti che solo dopo un secolo Cavendish riuscì a misurare questa forza tra oggetti terrestri per mezzo di un esperimento di laboratorio e a determinare la costante di proporzionalità della legge trovata da Newton.

Einstein, con la sua teoria della relatività generale, dette alla teoria della gravitazione la sua forma attuale. Con lui la gravità perde le caratteristiche di una forza classica e diventa una deformazione del continuo spazio-temporale. John Archibald Wheeler sintetizza così la teoria di Einstein: "Lo spazio agisce sulla materia, dicendole come muoversi. A sua volta la materia reagisce sullo spazio, dicendogli come curvarsi".

Ci sono alcune differenze e somiglianze tra il campo elettromagnetico e quello gravitazionale. Innanzitutto c'è la similitudine della legge di Coulomb e quella di Newton, entrambe dipendenti dall'inverso del quadrato della distanza e dal prodotto delle due cariche o masse interagenti; ma, mentre le cariche elettriche sono di due tipi differenti (positive e negative), si conosce un solo tipo di massa gravitazionale; inoltre due cariche di diverso segno si attraggono e due eguali si respingono, mentre l'interazione gravitazionale è solo attrattiva.

Un'altra differenza sta nel fatto che le equazioni dell'elettromagnetismo sono lineari, mentre quelle della gravitazione no; ciò ha profonde implicazioni teoriche e una profondamente pratica: il campo gravitazionale è estremamente più difficile da studiare e delle sue equazioni sono note solo alcune soluzioni particolari e, a parte casi estremamente semplici, approssimate.

In entrambi i tipi di campo, una carica (o massa) accelerata genera onde, che sono rispettivamente le ben note onde elettromagnetiche e le onde gravitazionali. Entrambi questi tipi di onde sono trasversali, hanno la funzione di portare l'informazione di variazione del campo, dalla sorgente alla periferia, e viaggiano alla velocità della luce. Le

differenze però sono notevoli: mentre le prime sono radiazioni di dipolo (o vettoriali), le seconde sono quadrupolari (o tensoriali). Cioè, mentre una carica libera investita da radiazione elettromagnetica viene messa in moto, una massa investita da radiazione gravitazionale rimane nella situazione di moto precedente, ma viene deformata; nel caso di due masse, cambia la distanza tra di esse.

Ciò, insieme al valore molto piccolo della costante di gravitazione, fa sì che tali onde interagiscano pochissimo con la materia (possono attraversare la Terra senza sensibile assorbimento). Questo fatto, se costituisce il motivo della difficoltà nella rivelazione di questa radiazione, è anche alla base dell'interesse degli astrofisici per essa. Infatti le onde gravitazionali potrebbero farci "vedere" cose come i centri delle galassie o l'interno delle stelle o anche i primi istanti di vita dell'universo che ci sono nascoste "guardando" con le onde elettromagnetiche a causa dell'elevato assorbimento di queste.

Pochi anni dopo la scoperta teorica da parte di Maxwell delle onde elettromagnetiche, Hertz riuscì a produrre e a rivelare in laboratorio tali tipi di onde (peraltro già note da sempre nella forma di radiazione luminosa) partendo da circuiti elettrici e realizzando così la prima rudimentale trasmissione radio. Oltre sessant'anni dopo la scoperta teorica delle onde gravitazionali da parte di Einstein, siamo ancora ben lontani dal realizzare un esperimento "alla Hertz"; infatti nessun esperimento eseguibile con la tecnologia di oggi è in grado di generare onde gravitazionali così intense da poter essere rivelate con le attuali antenne. Siamo così costretti a cercare di rivelare le fortissime onde prodotte da particolari eventi astronomici.

Parleremo tra poco delle sorgenti gravitazionali e della nuova branca dell'astrofisica che tale ricerca fa nascere: l'Astronomia Gravitazionale. Soffermiamoci invece su un aspetto concettuale degli esperimenti di rivelazione delle onde gravitazionali. Essi non seguono i canoni classici degli esperimenti di laboratorio in cui l'oggetto della ricerca viene prodotto o almeno tenuto sotto controllo dagli sperimentatori. Si tratta invece di esperimenti "osservativi", dove il laboratorio non è racchiuso da quattro mura, ma si estende per un bel pezzo di universo. Un principio fondamentale della scienza è la ripetibilità degli esperimenti: è condizione necessaria perché un esperimento sia ritenuto valido, che esso sia ripetuto con analoghi risultati da altri ricercatori. Ciò non pone in genere grossi problemi per i buoni esperimenti di laboratorio, ma non è così per quelli osservativi, in cui le condizioni di svolgimento sono solo in parte sotto il controllo dello sperimentatore: egli controlla il suo dispositivo sperimentale di osservazione, ma non l'oggetto osservato.

Nel caso della ricerca delle onde gravitazionali, l'oggetto osservato sono alcuni processi astrofisici che si distinguono soprattutto per le elevatissime densità di materia e velocità dei corpi celesti interessati.

Grossi impulsi di radiazione gravitazionale vengono emessi durante l'esplosione di una supernova, processo che caratterizza la fase finale della vita di alcune stelle, quando, terminato il combustibile nucleare, collassano bruscamente per effetto della propria gravità, formando spesso una stella di neutroni o un buco nero. Tali oggetti hanno densità superiore a un milione di miliardi di volte quella della materia terrestre: un cucchiaino di stella di neutroni peserebbe quanto una montagna, mentre se il Sole diventasse una stella di neutroni, avrebbe il diametro di pochi chilometri.

Eventi come l'esplosione di una supernova sono però alquanto rari, almeno nella nostra galassia; si stima che si verifichi una di queste catastrofi ogni dieci anni, sebbene l'ultima visibile dalla Terra fu osservata da Galilei. La frequenza aumenta parecchio se si

considerano anche le galassie vicine, ma in tal caso il flusso che investe la Terra è, a causa della maggiore distanza, alquanto inferiore.

Un altro processo che si è calcolato dovrebbe generare grossi impulsi di onde gravitazionali è la caduta di materia in un buco nero. E un grosso buco nero si suppone sia al centro della nostra galassia: lo si può immaginare come un gigantesco maelstrom in cui precipiterebbe pian piano la materia circostante. L'astronomia gravitazionale potrebbe dare informazioni preziose per questo processo, invisibile per le onde elettromagnetiche a causa delle nubi di polvere che ci nascondono il centro della galassia.

Nel caso di stelle di neutroni rotanti intorno a se stesse, o di stelle doppie particolarmente dense e vicine, si ha un'emissione continua di onde gravitazionali. Essa però è molto più debole che nei casi catastrofici visti prima; tuttavia si pensa di poterla rivelare con affinamenti della attuale tecnica.

Per rivelare le onde gravitazionali sono stati studiati vari dispositivi che si "accorgono" della deformazione dello spazio circostante causata dal loro passaggio. Tra questi le antenne risonanti sono le uniche attualmente già in funzione. Esse sono in genere costituite da un cilindro di alluminio o altro materiale elastico (il cui peso varia da pochi chili ad alcune tonnellate) che, investito da un'onda gravitazionale, entra in oscillazione. Ad esso è quindi connesso un sofisticato trasduttore che trasforma la vibrazione meccanica in un segnale elettrico (come fa un comune microfono) il quale viene amplificato e registrato su nastro per poter poi essere analizzato dal calcolatore. Il problema è che l'ampiezza della vibrazione prodotta nel cilindro è veramente molto piccola: per le onde gravitazionali più forti che ci si aspetta di trovare, essa è inferiore a un milionesimo del diametro di un atomo.

A questo punto bisogna ricordare che tutta la materia è in continuo moto caotico (la cosiddetta "agitazione termica" o "moto browniano"), con energia proporzionale alla temperatura assoluta, e ciò significa che il cilindro è sempre in vibrazione, con un'ampiezza ben maggiore di quella dovuta ad un grosso impulso gravitazionale. La situazione migliora se l'antenna è raffreddata e ciò viene realizzato per le cosiddette antenne criogeniche, le quali sono portate a temperature di circa -270 gradi centigradi mediante elio liquido.

L'amplificazione del segnale elettrico introduce altri inevitabili disturbi che sono ridotti tramite opportuni sistemi elettronici e particolari analisi al calcolatore. Per migliorare la rivelazione dei segnali gravitazionali è molto utile che l'antenna abbia una grande massa e basse dissipazioni ovvero che sia lungo il tempo di smorzamento di una vibrazione instaurata da una breve eccitazione. Infine, sebbene il cilindro sia isolato dall'esterno da vari contenitori e filtri meccanici, sono ancora presenti disturbi dovuti all'attività umana o a quella sismica. Questi, come anche particolari disturbi elettromagnetici, possono mettere in vibrazione l'antenna, risultando indistinguibili nel segnale di uscita da impulsi gravitazionali. Questi disturbi hanno però carattere locale e possono essere eliminati mettendo contemporaneamente in misura due o più antenne lontane e considerando solo gli eventi in coincidenza.

Quindici anni orsono Joe Weber, il pioniere della ricerca delle onde gravitazionali, pubblicò i risultati di alcuni mesi di osservazione con varie antenne risonanti non raffreddate poste presso l'università del Maryland e il laboratorio di Argonne nell'Illinois. In tale breve periodo egli trovò ben diciassette eventi in coincidenza e, data la distanza fra le antenne che escludeva i disturbi locali, sostenne che i suoi rivelatori erano stati

eccitati da onde gravitazionali (l'articolo, pubblicato su Physical Review, si intitolava "Evidenza per la scoperta delle onde gravitazionali").

In successive osservazioni Weber trovò che gli eventi da lui rivelati erano più frequenti quando, a causa della rotazione della Terra, la direzione del centro della nostra galassia (nella costellazione del Sagittario) era perpendicolare all'asse delle antenne: ciò si poteva spiegare se le supposte onde gravitazionali provenivano da quella direzione. D'altronde, come abbiamo già visto, il centro della Galassia è uno dei più validi candidati degli astrofisici come ospite di una potente sorgente di onde gravitazionali.

I teorici tuttavia rimasero sconcertati dall'ampiezza e dall'elevato numero degli eventi che mal si accordavano con l'esistenza stessa della Galassia (che sarebbe dovuta essere già scomparsa da vari miliardi di anni, essendosi convertita in buchi neri e onde gravitazionali).

Non fu tuttavia l'opinione dei teorici (sempre pronti del resto a cambiare o ad adattare le teorie ogni volta che un esperimento le contraddice) a rendere dubbiosi i fisici rispetto ai risultati di Weber, quanto invece il fatto che successive ripetizioni dell'esperimento da parte di altri ricercatori non dettero gli stessi risultati positivi.

Situazioni analoghe si sono avute di recente per due altri importanti esperimenti della Fisica fondamentale: la ricerca dei quark isolati (da parte di Fairbank) e dei monopoli magnetici (da parte di Cabrera).

Nel primo caso si trattava di un esperimento concettualmente simile a quello di Millikan per la determinazione della carica dell'elettrone: si tentava di trovare sferette di niobio con carica non multipla intera della carica dell'elettrone. Infatti i quark, componenti della maggior parte delle particelle elementari, hanno cariche elettriche pari a un terzo o a due terzi di quella dell'elettrone; essi però non sono mai stati trovati isolati, ma a triplette o, al più, a coppie.

Nel secondo caso invece, tramite un sofisticato dispositivo, si fa un esperimento "osservativo", aspettando che passi un monopolo (una particella "inventata" teoricamente da Dirac cinquant'anni fa e mai trovata, che ha le caratteristiche sorprendenti di una calamita con un polo solo) vagante per lo spazio. Il giorno di san Valentino del 1982 il rivelatore di Cabrera segnò un tale evento e da allora i teorici continuano a trovare motivi per dimostrare che esso è impossibile (a meno che non sia un caso eccezionale).

Anche per questi due esperimenti i risultati inizialmente positivi non si sono ripetuti e altri due premi Nobel non sono (ancora) stati consegnati.

I gruppi di ricerca che attualmente nel mondo si occupano della ricerca delle onde gravitazionali, sono una decina. In Italia, presso il Dipartimento di Fisica dell'università "La Sapienza" di Roma, esiste un gruppo di ricerca diretto dai professori Amaldi, Pizzella e Pallottino, che ha realizzato varie antenne gravitazionali risonanti.

La più sensibile di esse è un'antenna criogenica del peso di circa due tonnellate e mezzo, situata presso i laboratori del CERN a Ginevra e attualmente è in fase di messa a punto. In precedenza, con antenne meno sensibili, il gruppo di Roma ha effettuato alcuni mesi di osservazione (sparsi in alcuni anni) e per primo dopo Weber ha dato notizia di eventi in coincidenza su due antenne lontane (5 eventi in due notti con le antenne poste a Roma e a Frascati). Inoltre, con una sola antenna in misura, ha verificato il cosiddetto "effetto siderale" già trovato da Weber, cioè il fatto che si hanno più eventi quando la direzione del centro della Galassia è perpendicolare all'asse dell'antenna, ovvero circa ogni 718 minuti. Caratteristica fondamentale di questi eventi è quella di essere vari ordini di grandezza più grandi delle più ottimistiche aspettative per gli impulsi gravitazionali.

I dubbi sugli esperimenti di Weber sono dunque stati risolti? Purtroppo non ancora, e ciò perché negli eventi delle antenne del gruppo di Roma sono state trovate periodicità di tipo terrestre, come quelle legate alle maree luni-solari o alle oscillazioni libere della Terra. D'altronde lo stesso "effetto siderale" potrebbe essere di origine mareale. Quindi ciò che le antenne "vedono" potrebbero non essere onde gravitazionali, ma qualche effetto geofisico ancora ignoto, collegato alle deformazioni periodiche della Terra. A confortare questa ipotesi c'è il fatto che talora gli eventi trovati dai ricercatori italiani non hanno l'andamento aspettato per gli eventi gravitazionali.

Per dirimere la questione è stata costruita a Roma un'antenna gravitazionale funzionante a temperatura ambiente, quindi di bassa sensibilità, ma sufficiente per gli eventi enormi visti in passato. Contemporaneamente al segnale dell'antenna vengono registrate le uscite di un gravimetro e di vari rivelatori di disturbi sismici ed elettrici. Si hanno così un totale di sedici canali di misura che vengono "letti" ogni secondo.

Si pensa di lasciare tale sistema in misura per almeno un anno. Dalla massa di dati raccolta (un miliardo di misure, molte di più di quante ne sono occorse per l'edificazione di tutta la Fisica Classica) si spera di poter capire se gli eventi che sono stati osservati sono dovuti a qualche fenomeno geofisico, o a errori di misura, o (ma sembra meno plausibile) a onde gravitazionali.

Potrebbe anche succedere che gli eventi visti in passato non si ripetano e ciò perché il fenomeno astrofisico (o geofisico) che li aveva causati è cessato.

Comunque non disperiamo: potrebbe sempre ricominciare l'anno prossimo. O tra un milione di anni.