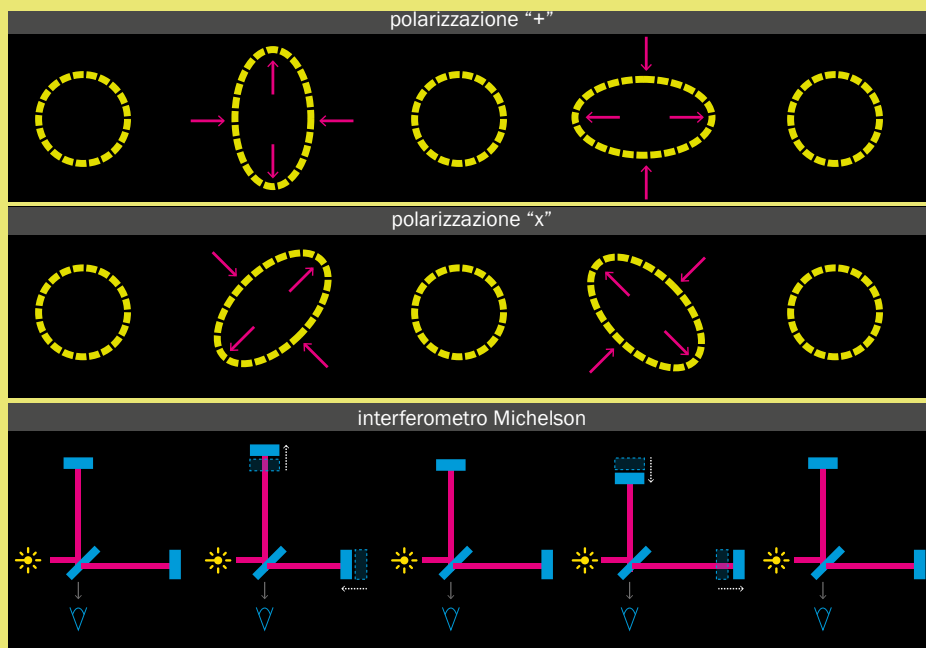


Antenne in ascolto

Presente e futuro dell'interferometria gravitazionale

di Michele Punturo

a.
Effetto del passaggio di un'onda gravitazionale. Un'onda che arriva perpendicolarmente al piano della figura possiede due modi di oscillazione principali (denominati polarizzazione "+" e polarizzazione "x") che inducono le deformazioni mostrate in figura su un anello circolare. Ad esempio, nel pannello superiore, il cerchio viene schiacciato orizzontalmente e allungato verticalmente, poi torna circolare, quindi la direzione di schiacciamento e allungamento si scambiano. Il terzo pannello dall'alto mostra cosa avviene di conseguenza sui due bracci di un interferometro gravitazionale, come Virgo. I bracci (in cui si propaga un raggio laser) sono inizialmente a riposo: quando passa l'onda gravitazionale vengono allungati e accorciati in accordo con quanto descritto sopra. La modifica della lunghezza dei bracci provoca un differente cammino dei raggi laser, e questo modifica la figura di interferenza tra i due fasci laser, mettendo così in evidenza il passaggio dell'onda.



Negli ultimi cinque anni abbiamo assistito a una serie di osservazioni astronomiche senza precedenti, che ci ha fornito il primo catalogo di eventi di onde gravitazionali. Tutto questo è stato possibile grazie alla costruzione e al potenziamento di una rete globale di rivelatori di onde gravitazionali: i due interferometri Ligo, negli Stati Uniti, e l'interferometro Virgo, in Italia, a Cascina (nei pressi di Pisa). Queste incredibili macchine sono il frutto della perseveranza degli scienziati: ideate negli anni '80, sono state realizzate nella loro configurazione iniziale a cavallo degli anni 2000, ma sono stati necessari ulteriori 15 anni di sviluppo e potenziamento per raggiungere la sensibilità necessaria alla rivelazione del passaggio di un'onda

gravitazionale, grazie alle ultime generazioni di interferometri Advanced Ligo e Advanced Virgo.

Il principio di funzionamento di Ligo e Virgo è strettamente legato all'effetto fisico prodotto dal passaggio di un'onda gravitazionale. Nella teoria della relatività generale di Einstein, le onde gravitazionali, infatti, sono una perturbazione della curvatura dello spaziotempo che viaggia alla velocità della luce. L'effetto sui corpi immersi nello spaziotempo è la modulazione, seppur quasi impercettibile, della loro dimensione secondo due schemi geometrici (vd. fig.a), definiti dalla polarizzazione delle onde stesse, indicate convenzionalmente dai simboli + e x. L'ampiezza dell'oscillazione della distanza

fra due punti è data dal prodotto fra l'ampiezza dell'onda gravitazionale, che è estremamente piccola, dell'ordine di 10^{-19} - 10^{-23} per eventi di buchi neri stellari, e la distanza originaria fra i due punti stessi. Per dare un'idea delle grandezze in gioco, è come se dovessimo misurare la variazione della distanza Terra-Proxima Centauri (la stella più vicina a noi fuori dal Sistema Solare, circa 260mila volte più distante del Sole) con una precisione pari alla dimensione di capello. Per rendere, quindi, tecnologicamente possibile la misura di tale oscillazione, la lunghezza del rivelatore deve essere la più grande possibile. Sulla superficie terrestre, curva, la dimensione lineare possibile per questi rivelatori è dell'ordine di qualche chilometro o al massimo di

poche decine di chilometri. Virgo è un interferometro con bracci di 3 km, Ligo di 4 km. La variazione, in questo caso, è di appena un milionesimo di miliardesimo di metro circa, meno di un millesimo del raggio di un protone!

Per estendere virtualmente i bracci a una lunghezza equivalente di qualche centinaio di chilometri, guadagnando proporzionalmente sensibilità, si inseriscono nell'interferometro grandi specchi che formano delle cavità ottiche risonanti nei bracci stessi. Essi costringono i fotoni della luce laser a rimbalzare ripetutamente e a spendere un tempo molto maggiore all'interno delle cavità stesse, come se fossero in un interferometro molto più lungo e quindi più sensibile. Una cura maniacale è applicata per isolare gli specchi dell'interferometro da ogni forma di disturbo esterno e interno, realizzando l'approssimazione più vicina alla condizione di un sistema in caduta libera (sul piano orizzontale). Il rumore sismico, dovuto alla vibrazione naturale e antropogenica del suolo, è abbattuto di circa 14 ordini di grandezza grazie a una serie di filtri sismici realizzati con una cascata di pendoli. Il rumore termico, quello dovuto alla vibrazione browniana delle molecole e ad altri meccanismi termo-meccanici e termo-ottici, è ridotto tramite l'opportuna scelta del disegno e dei materiali degli specchi e delle sospensioni. Il rumore dovuto alla natura quantistica della luce laser è evaso attraverso l'iniezione di stati "strizzati" di luce (*frequency independent squeezing*), che permettono di eludere il principio di indeterminazione di Heisenberg per l'ampiezza e la fase del segnale in uscita dell'interferometro.

Grazie alla raccolta dati delle prime tre fasi di osservazione, in pochi anni è stato svelato un universo oscuro, popolato da buchi neri di massa stellare e recentemente di massa intermedia (vd.

p. 14, ndr), è iniziata l'astrofisica gravitazionale in campo forte, con lo studio dei buchi neri, e si è aperta l'era dell'astronomia multimessaggera. E altre migliorie tecnologiche sono già in cantiere, con grandi aspettative per nuove scoperte.

A un certo punto, però, inevitabilmente si giungerà al limite imposto dall'infrastruttura di Virgo, che impedirà ulteriori miglioramenti della sensibilità. Per questo motivo, già da più di un decennio, si sta pensando alla progettazione della terza generazione di osservatori interferometrici di onde gravitazionali, in cui il progetto dell'infrastruttura ospitante l'osservatorio è elemento chiave. Nel 2020, l'Einstein Telescope (Et) è stato proposto come nuova infrastruttura di ricerca di rilevanza strategica. L'Italia si candida a ospitare Et in Sardegna grazie alle condizioni ambientali estremamente favorevoli offerte da tale collocazione: la Sardegna, infatti, presenta un livello di rumore sismico naturale e antropogenico bassissimo, caratteristiche geologiche, idrogeologiche e rocciose adatte a ospitare infrastrutture sotterranee e una tradizione storica nelle imprese minerarie. Un secondo sito è stato candidato nella regione del Mosa-Reno, a cavallo del confine fra Olanda, Belgio e Germania.

L'idea originale di Et consiste nella realizzazione di una infrastruttura di ricerca capace di coprire il più ampio spettro di frequenze misurabili da terra, con una speciale attenzione alle basse frequenze (da pochi Hz fino a 10 Hz), in grado di operare sia in rete con altri osservatori di 2^a e 3^a generazione, sia da solo, e capace di ospitare per molte decadi le evoluzioni della tecnologia dei rivelatori, senza ridurne le potenzialità. Sarà un osservatorio sotterraneo, per ridurre l'impatto diretto e indiretto del rumore sismico, in cui ogni rivelatore sarà



b. Adalberto Giazotto, uno dei padri dell'interferometro Virgo, davanti a uno dei bracci dell'esperimento nel 2010. Il tubo a vuoto si estende per 3 km e al suo interno rimbalza il fascio laser, riflesso dai due grandi specchi che compongono la cavità ottica di Fabry-Perot.



c. Installazione dei sismometri all'interno della miniera di Sos Enattos (in provincia di Nuoro), per la qualificazione del sito in Sardegna candidato a ospitare l'Einstein Telescope.

composto da due interferometri, uno specializzato sulla bassa frequenza e uno sull'alta frequenza. L'intero osservatorio sarà composto da tre rivelatori disposti sui lati di un triangolo equilatero avente lato lungo circa 10 km.

L'interferometro specializzato per l'alta frequenza porterà al limite le soluzioni tecnologiche attuali, iniettando maggiore potenza laser nelle cavità di Fabry-Perot, realizzando specchi più grandi e pesanti, migliorando le prestazioni termomeccaniche delle ottiche, aumentando il fattore di *squeezing*. L'interferometro per la bassa frequenza, invece, richiederà lo sviluppo di nuove tecnologie, abbattendo il rumore termico attraverso la criogenia e con nuovi materiali per le ottiche e le sospensioni,

sviluppando laser e opto-elettronica che lavorano a una lunghezza d'onda diversa da quella usata nei rivelatori attuali. L'insieme di queste soluzioni tecnologiche e il fatto di avere bracci molto più lunghi dei rivelatori attualmente in funzione consentirà un miglioramento generalizzato della sensibilità di almeno un fattore dieci (e molto di più a bassa frequenza).

L'impatto sulla scienza sarà rivoluzionario: Et potrà accedere a coalescenze di buchi neri di massa stellare (inferiore a 100 masse solari) e intermedia (tra 100 e 10.000 masse solari) in quasi tutto l'universo, fino a raggiungere l'era oscura prima della formazione delle prime stelle. Questo ci fornirà preziose informazioni sull'evoluzione dell'universo, su come si sono formati i buchi neri supermassicci presenti al centro delle galassie, sulla fisica della gravitazione in condizione di campo estremo e potrebbe anche portare sorprendenti soluzioni sulla natura della materia oscura nell'universo. Et ci mostrerà con grande dettaglio e grande statistica la coalescenza di stelle di neutroni, aiutandoci a comprendere la fisica nucleare all'interno di tali corpi compatti. L'osservazione contemporanea dell'emissione di onde gravitazionali e di fotoni (e neutrini) permetterà sia di provare modelli per tali stelle, sia di effettuare misure cosmologiche, sia di provare i modelli di propagazione delle onde gravitazionali sviluppati nell'ambito della relatività generale.

Biografia

Michele Punturo, dirigente di ricerca presso la sezione Infn di Perugia, è stato *detector coordinator* dell'esperimento Virgo, coordinatore scientifico del disegno concettuale dell'Einstein Telescope e coordinatore di diversi progetti europei rivolti alla definizione delle tecnologie abilitanti di Et. Attualmente è responsabile nazionale del progetto Et, coordinatore internazionale della proposta Et presso Esfri (European Strategy Forum on Research Infrastructures).

DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.30.8