

Dall'astronomia multi-messaggera all'astronomia infrarossa nel dominio del tempo

di Alessandro Drago, PhD

Relazione presentata all'evento ASTRIS "Le Perseidi", tenutosi a Cervara il 12 agosto 2026.

La relazione illustra motivazioni e risultati di uno studio di fattibilità sviluppato in collaborazione con l'Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Fisica e Astronomia, e i Laboratori Nazionali di Frascati dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, negli anni 2021-2025.

Indice degli argomenti

Antenne per onde gravitazionali

Dall'astronomia multi-messaggera all'astronomia nel dominio del tempo

Osservazione di transienti astronomici: l'enigma dei Fast Radio Bursts (FRBs)

Come rilevare i lampi infrarossi veloci: il progetto FAIRTEL (Fast Infra-Red TElescope)

Conclusioni

Antenne per onde gravitazionali

Negli USA e in Italia sono stati messi in funzione da qualche anno dei rivelatori terrestri di onde gravitazionali: LIGO (2 antenne: Hanford e Livingston, negli USA) e VIRGO sito a Cascina, presso Pisa. VIRGO è un interferometro che ha due bracci lunghi 3 km e ortogonali tra loro dove segnali ottici impulsivi segnalano la variazione di lunghezza del percorso. Dall'analisi delle differenze dei tempi si possono rilevare variazioni spaziali e di conseguenza onde gravitazionali.

Una nuova antenna gravitazionale di concezione più evoluta, l'Einstein Telescope, è stata proposta per essere realizzata in Sardegna. E' ancora alla ricerca di approvazione. Se approvata potrebbe essere operativa nel 2040.

Lo spettro delle onde gravitazionali può variare in base al tipo di evento che produce l'onda, che può avere differenti ampiezze e frequenze. Di conseguenza diversi tipi di rivelatori per onde gravitazionali possono o potrebbero essere utilizzati. Gli eventi considerati possono variare da molto lenti ad abbastanza veloci, in una scala temporale da anni a millisecondi.

Dall'astronomia multi-messaggera all'astronomia nel dominio del tempo

Dopo la rilevazione dell'onda gravitazionale GW170817 proveniente dalla fusione di due stelle di neutroni binarie e la simultanea rilevazione di segnali elettromagnetici, l'astronomia multi-messaggera è entrata in una nuova era. Bisogna ricordare che la prima era dell'astronomia multi-messaggera è iniziata con l'osservazione della supernova SN 1987A, rilevata tramite radiazioni elettromagnetiche e neutrini. Inoltre, i lampi gamma (GRB) e i misteriosi lampi radio

veloci (FRB) hanno suscitato interesse nello sviluppo di nuovi rivelatori e telescopi dedicati all'astronomia nel dominio del tempo in tutto lo spettro elettromagnetico.

L'astronomia multi-messaggera si propone di osservare e mettere in correlazione onde gravitazionali, neutrini e fotoni di varie energie. Per osservare segnali quasi simultanei, sono necessari rivelatori e telescopi operanti nel dominio del tempo e molto differenti tra loro.

Il GRB (Gamma Ray Burst ovvero Lampo veloce di raggi gamma) è prodotto dall'esplosioni più potenti e luminose dell'Universo. Il GRB rilascia in pochi secondi o minuti un'energia immensa, spesso superiore a quella che il Sole produrrà in tutta la sua intera vita. I GRB si dividono principalmente in due categorie in base alla loro durata: i lampi lunghi (Long GRB): durano più di due secondi (fino a diversi minuti) e sono causati dal collasso catastrofico di stelle molto massicce (supernove o ipernove) che finiscono per formare un buco nero; i lampi brevi (Short GRB) durano meno di due secondi (talvolta millisecondi). Sono generati dalla fusione di due oggetti ultra densi, come due stelle di neutroni o una stella di neutroni e un buco nero.

Il Fermi Gamma-ray Space Telescope della NASA, lanciato l'11 giugno 2008, è un potente osservatorio orbitale progettato per studiare l'universo attraverso i raggi gamma, la forma di luce più energetica. Grazie ai suoi due strumenti principali, il telescopio LAT e il monitor GBM, permette agli scienziati di mappare l'intero cielo e di rivelare transienti veloci nei raggi gamma. E' situato nella orbita terrestre bassa (LEO, Low Earth Orbit), che è un'orbita intorno alla Terra con altitudine compresa tra 200 e 2000 km dal suolo.

In un range energetico minore, il James Webb Space Telescope (JWST) è il telescopio spaziale più grande, potente e complesso mai costruito dall'umanità. E' stato sviluppato dalla NASA in collaborazione con ESA e CSA, è stato lanciato il 25 dicembre 2021 ed è ottimizzato per l'astronomia a raggi infrarossi. Il JWST è un telescopio riflettore di tipo Cassegrain evoluto. Sfrutta la configurazione anastigmatica a tre specchi per garantire immagini geometricamente perfette a tutte le lunghezze d'onda dell'infrarosso. Questa tecnologia gli permette di guardare indietro nel tempo fino a 13,5 miliardi di anni fa, catturando la luce delle prime stelle e galassie nate dopo il Big Bang. Lo specchio primario è composto da 18 segmenti esagonali in berillio placcati d'oro, per un diametro totale di 6,5 metri. L'orbita stabile si trova al secondo punto di Lagrange (L2), a circa 1,5 milioni di chilometri dalla Terra, muovendosi attorno al Sole in sincronia con il nostro pianeta. A bordo è equipaggiato con quattro strumenti avanzati (NIRCam, NIRSpec, MIRI e FGS-NIRISS) che lavorano nel vicino infrarosso (NIR, Near IR).

Il telescopio spaziale Ariel (acronimo di Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey) è la quarta missione scientifica di classe media (M4) del programma Cosmic Vision dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA). Il suo lancio è programmato a bordo di un razzo Ariane 6 per il 2029 (ma potrebbe slittare al 2031). Anche Ariel sarà posizionato in un'orbita attorno al punto lagrangiano L2 del sistema Sole-Terra, a 1,5 milioni di chilometri dal nostro pianeta. L'obiettivo principale dello strumento è effettuare il primo censimento chimico su larga scala delle atmosfere degli esopianeti. Analizzerà la composizione e la struttura termica di circa 1.000 mondi extrasolari noti. Come metodo di osservazione, Ariel utilizzerà

principalmente la spettroscopia di transito. Scomporrà la luce della stella ospite filtrata attraverso l'atmosfera del pianeta (o riflessa da esso) per trovarne le impronte chimiche. ARIEL dispone di un telescopio Cassegrain con uno specchio primario ellittico di $1,1 \times 0,7$ metri. Come copertura spettrale, ARIEL lavorerà contemporaneamente dal visibile fino al vicino e medio infrarosso (lunghezze d'onda da 0,5 a 7,8 μm). Per evitare deformazioni dovute agli sbalzi termici, l'intera struttura ottica e lo specchio sono realizzati in alluminio anziché in vetro.

Bisogna ricordare che gran parte della radiazione solare è schermata dall'atmosfera, quindi i telescopi terrestri all'infrarosso possono utilizzare solo una parte della radiazione infrarossa che colpisce la terra, che però per l'astronomia nel dominio del tempo è sufficiente.

Osservazione di transienti astronomici: l'enigma dei Fast Radio Bursts (FRBs)

Un transiente astronomico è definito in senso lato come qualsiasi evento che appare e scompare su una scala temporale osservabile dall'uomo o anche inferiore. Un FRB è un transiente a radiofrequenza che di solito dura dal millisecondo a 2-3 secondi. I ricercatori hanno proposto diverse ipotesi per le sorgenti dei FRB. Nella letteratura recente non è emersa una teoria dominante sull'argomento e sono state proposte molte interpretazioni diverse per spiegare questi fenomeni.

Le possibili sorgenti di lampi veloci, radio o infrarossi, sono raccolte e discusse nel catalogo web <https://frbtheorycat.org>. Di seguito è riportato un elenco parziale di modelli di sorgente proposti per spiegare i lampi veloci, radio o infrarossi:

- a) Transizione quantistica da buco nero (BH) a buco bianco (WH) (Haggard & Rovelli 2015).
- b) Fusione di stelle di neutroni binarie (NS) con GRB brevi e duri (Keane et al. 2012, Totani et al. 2013).
- c) Supernovae a collasso del nucleo (Thornton, Burgay et al. 2013).
- d) Fusione di nane bianche binarie (WD) in una nana bianca rotante altamente magnetica (Kashiyama et al. 2013).
- e) Interazione della magnetosfera di un asteroide/pianeta/nana bianca con il vento di una pulsar/nana bianca in orbita (Mottez & Zarka 2014).
- f) Evaporazione di un buco nero primordiale (Keane et al., 2012).
- g) Collisione tra stelle assioniche e stelle di neutroni (Iwazaki 2014).
- h) Decadimento esplosivo di mini-cluster di assioni (Tkachev 2015).
- i) Anelli di stringhe cosmiche superconduttive (SCS) (Cao & Yu. 2018) oscillanti nel campo magnetico cosmico (Yu et al. 2014).
- j) Collasso di un blitzar in un buco nero o in una stella di neutroni supermassiccia (Falcke & Rezzolla 2014).
- k) Eruzioni giganti di magnetar (Popov et al. 2018; Thornton et al. 2013; Israel et al. 2021).
- l) Iperpulsioni da stelle di neutroni extragalattiche (Cordes & Wasserman 2016).
- m) Magnetosfera di pulsar "pettinata" da un flusso di plasma (AGN, SN, GRB,...) (Zhang et al. 2017).

- n) Maser astronomici (Elitzur, M., 1992), emissione di maser ciclotronici o di sincrotrone (Lyubarsky 2014; Beloborodov 2017; Waxman 2017).

Commento al punto a):

La transizione da buco nero a buco bianco (Rovelli 2015, 2021 e 2023) è stata ipotizzata nel 2015, basandosi sulla natura quantistica della Relatività Generale, nell'articolo "Black Hole Fireworks: Quantum-gravity Effects Outside the Horizon Spark Black to White Tunnelling" (Haggard & Rovelli, 2015). Un altro articolo, "Fast Radio Bursts and White Hole Signals" (Barrau, Rovelli, Vidotto 2014), afferma che: "Una forte esplosione in una piccola regione dovrebbe emettere un segnale con una lunghezza d'onda dell'ordine delle dimensioni della regione o in qualche modo maggiore, convertendo una frazione della sua energia in fotoni. Pertanto, è ragionevole aspettarsi da questo scenario un segnale elettromagnetico emesso nell'infrarosso con lunghezza d'onda λ prevista $\geq 0,02$ cm

Commento al punto k):

Gelfand e Gaensler (2007, rev. 2018) presentano osservazioni a raggi X, infrarossi e radio del campo centrato sulla magnetar sorgente di raggi X 1E 1547.0-5408 (PSR J1550-5418) nel piano galattico a una distanza di 9 kpc. Un'osservazione nel vicino infrarosso di questo campo mostra una sorgente con magnitudine $K_s \approx 16$ vicino alla posizione della magnetar, ma il rapporto implicito tra il flusso di raggi X e quello infrarosso indica che l'emissione infrarossa proviene molto probabilmente da una sorgente di campo non correlata, permettendoci di limitare la magnitudine IR di qualsiasi controparte a $> 17,5$ (Zhang et al. 2023).

In conclusione di questa sezione, i possibili modelli proposti per la spiegazione dei FRB possono in molti casi essere rivisti o adattati per fotoni astronomici di diversa energia, come ad esempio nell'infrarosso. Questo è il caso del modello proposto per i buchi bianchi (Rovelli, 2024). I lampi infrarossi veloci (FIRB), con una durata compresa tra 1 s e 1 ns, sono stati relativamente poco studiati, spesso a causa della mancanza di strumenti IR adeguati per l'osservazione e l'analisi. La ricerca di FIRB (Fast InfraRed Burst) in questo intervallo temporale richiede l'utilizzo di rivelatori dedicati, da affiancare ai tradizionali telescopi riflettori come i Ritchey-Chrétien o i Cassegrain. La ricerca di impulsi infrarossi veloci richiede antenne in grado di osservare intervalli temporali da pochi secondi fino al nanosecondo e intervalli temporali diversi possono richiedere sistemi di rilevamento diversi.

Come rilevare i lampi infrarossi veloci: il progetto FAIRTEL (Fast Infra-Red TElescope)

L'esperimento FAIRTEL (FASt InfraRed TElescope), proposto da chi scrive, è stato approvato nel 2021 e finanziato per l'anno 2022 dal CSN5 (Commissione Scientifica Nazionale 5) dell'INFN. Il progetto è stato sviluppato presso i Laboratori Nazionali di Frascati (LNF) negli anni 2022-23-24. I test sono stati condotti presso SINBAD, la linea di fascio infrarosso di DAFNE, il collisore circolare e⁺/e⁻ dei LNF. Lo studio proposto si propone di essere un passo verso la realizzazione di un rivelatore astronomico nel dominio del tempo.

In un acceleratore circolare, i campi magnetici vengono utilizzati per forzare le particelle a curvarsi, ma causando una perdita di energia. In un magnete di curvatura (bending magnet), il fascio di particelle cariche emette fotoni per accelerazione di sincrotrone, producendo la cosiddetta luce di sincrotrone. Nei Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN, il collisore DAFNE emette luce di sincrotrone infrarossa pulsata tramite la linea di fascio SINBAD. Gli impulsi hanno una durata di 2,7 ns. Solitamente, è presente anche almeno un intervallo tra i pacchetti di impulsi per evitare l'effetto di intrappolamento degli ioni. Riguardo alla progettazione del detector, per rilevare segnali veloci nel medio infrarosso per l'astronomia nel dominio del tempo, sono stati utilizzati fotoconduttori al mercurio-cadmio-tellurio (HgCdTe). Ciascun detector è dotato di un pixel singolo con area attiva di 50x50 μm oppure di 200x200 μm . Sono stati provati anche numerosi amplificatori ad alta e bassa frequenza.

I test dei detector sono stati effettuati presso la linea di luce di sincrotrone IR SINBAD che ha una configurazione con sei specchi interni e tre specchi esterni. Il rivestimento degli specchi è costituito da un sottile strato d'oro, ma sono possibili anche soluzioni in argento o alluminio.

La luce di sincrotrone infrarossa è pulsata e consente di valutare le prestazioni dei dispositivi nel dominio del tempo. La miglior configurazione dei dispositivi sotto test ha fornito un tempo di salita e di discesa del segnale di 1 ns. Considerando la possibilità concreta, per il sistema progettato, di utilizzare uno stadio di amplificazione da 80 dB, il sistema di rilevamento sarà sensibile fino a 1 fotone per lo 0,1% della larghezza di banda infrarossa ($\delta\lambda/\lambda$).

Conclusioni

Sono auspicabili nuovi rivelatori e telescopi dedicati all'astronomia nel dominio del tempo, che coprano l'intero spettro elettromagnetico, con sistemi in grado di acquisire segnali astronomici tra 1 s e 1 ns. I ricercatori hanno proposto diverse spiegazioni per le sorgenti dei Fast Radio Burst (FRB), estendibili anche alla banda infrarossa (FIRB). Tra i modelli proposti, è stata ipotizzata l'esistenza di esplosioni di buchi neri primordiali, a conferma dell'ipotesi di transizione da buco nero a buco bianco con emissione nella banda infrarossa, sulla base della possibile natura quantistica della Relatività Generale. L'esperimento FAIRTEL, basato su concetti sviluppati per la diagnostica per luce di sincrotrone, utilizzando la rivelazione diretta in banda base, è stato testato per la progettazione di dispositivi nell'infrarosso nel dominio del tempo per l'astronomia. In conclusione sono stati presentati la progettazione e i test del sistema di rivelazione FAIRTEL nella banda del medio infrarosso per la realizzazione di un telescopio terrestre ultraveloce per transienti.

Le possibili caratteristiche di un telescopio per FAIRTEL sono le seguenti: lunghezza d'onda: 1 μm - 1 mm; numero di pixel: uno (più uno per il segnale di buio); interferometria: non utilizzata (telescopio singolo); configurazione ottica: Ritchey-Chrétien; diametro dello specchio primario: 800 mm; lunghezza focale: 6400 mm; rapporto focale: F/8; lunghezza del tubo: 2030 mm; diametro del tubo: 1010 mm.

Oggetti astronomici interessanti da osservare nella Via Lattea; Centro galattico e buco nero Sgr A*; magnetar PSR J1745-2900 (Centro galattico); Cygnus-X, una massiccia regione di

formazione stellare situata nella costellazione del Cigno; la Pulsar del Granchio (PSR B0531+21 o Stella di Baade) una stella di neutroni relativamente giovane; nebulosa di Orione (M42): questa regione di formazione stellare si trova a meno di 1400 anni luce di distanza, il che la rende la più grande regione di formazione stellare vicina alla Terra; Cassiopea A (SN 1671) è un resto di supernova nella costellazione di Cassiopea e la più brillante radiosorgente extrasolare del cielo a frequenze superiori a 1 GHz; pulsar PSR B1257+12; ASKAP J1935+2148, una stella di neutroni o magnetar con un periodo di rotazione di 53,8 minuti, a circa 15.800 anni luce di distanza; magnetar 1E 1547.0-5408 (PSR J1550-5418) con emissioni di raggi X, infrarossi e radio; la pulsar Vela (PSR J0835-4510 o PSR B0833-45), una pulsar che emette onde radio, ottiche, raggi X e raggi gamma, associata al resto di supernova nella costellazione della Vela; Puppis A (Pup A), un resto di supernova di circa 100 anni luce di diametro e distante circa 6.500-7.000 anni luce; PSR J0659+1414, una stella di neutroni situata a 288 pc dal Sole; altre pulsar conosciute della Via Lattea.

Oggetti extra-galattici interessanti da osservare: primordial black hole explosions per verificare la teoria di Carlo Rovelli sui Buchi Bianchi; FRB 121102's host galaxy; FRB 110214 con la galassia elliptical FRL 692 at $z \sim 0.025$; M87* black hole; Cygnus A (3C 405), una radiogalassia, una delle sorgenti radio più potenti del cielo, contenente un nucleo galattico attivo..

Per ulteriori approfondimenti si può consultare il sito <https://orcid.org/0000-0002-4117-9356>