

Radiografia del cosmo

Misure di polarizzazione dei raggi X

di Luca Baldini

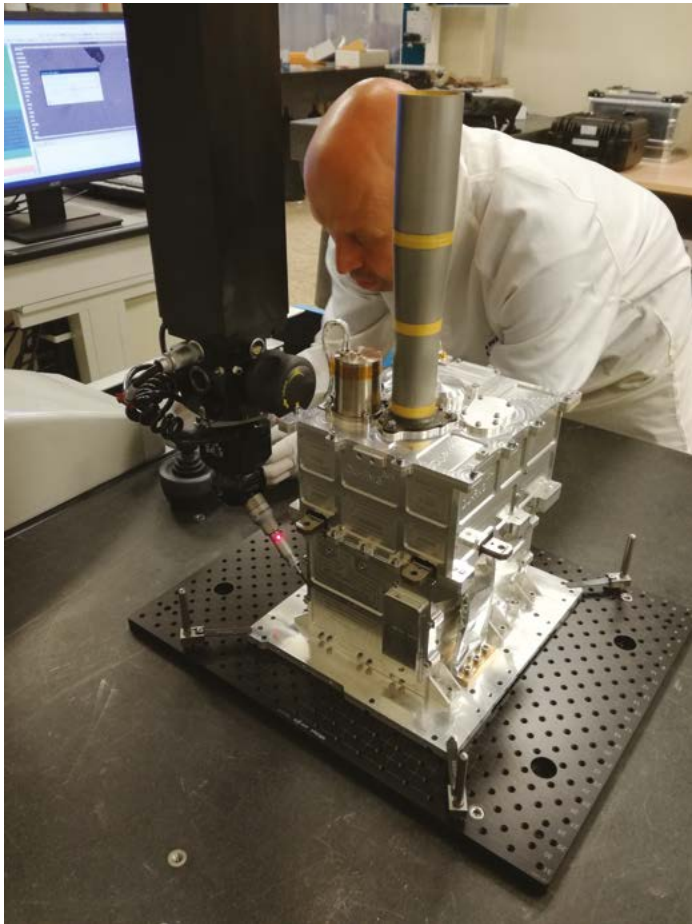
Lanciata il 9 dicembre 2021 dallo storico Launch Complex 39 A del John F. Kennedy Space Center (quello utilizzato per il programma Apollo, vd. fig. d p. 8, ndr), la missione IXPE (Imaging X-ray Polarimetry Explorer) ha aperto una nuova finestra osservativa sull'universo, quella della polarimetria a raggi X. Si tratta di una piccola missione selezionata dalla NASA nel 2017 e realizzata in collaborazione con l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), con un fortissimo e caratterizzante contributo italiano, in particolare dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e dell'Istituto Nazionale di Astrofisica.

Ma che cosa vuol dire "polarimetria"? Un'onda elettromagnetica consiste

essenzialmente nell'oscillazione sincronizzata di due campi (uno elettrico e uno magnetico) e le proprietà geometriche della direzione di oscillazione di questi campi costituiscono la "polarizzazione" della radiazione. La "polarimetria" è appunto l'insieme delle tecniche utilizzate per misurare la polarizzazione della radiazione. I polaroid che troviamo comunemente negli occhiali da sole e negli obiettivi delle macchine fotografiche sono oggetti di uso comune che mettono in evidenza questa proprietà della luce: si tratta di cristalli trasparenti solo a un particolare stato di polarizzazione della luce, quello in cui il campo elettrico oscilla

a. Rappresentazione dell'osservatorio IXPE nella configurazione in cui, da più di un anno, orbita intorno alla Terra osservando l'universo nei raggi X. Lo strumento è composto da tre telescopi identici, ciascuno dei quali comprende una serie di specchi concentrici che focalizzano i raggi X su un rivelatore sensibile alla polarizzazione posto a 4 m di distanza.





b. Test metrologico di una delle unità di volo a bordo di IXPE, nelle camere pulite della sezione di Pisa dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. L'involucro metallico contiene il *Gas Pixel Detector* e l'elettronica di lettura associata. A bordo di IXPE ci sono tre unità identiche, al fuoco di altrettante ottiche a raggi X.

perpendicolarmente alla direzione della struttura cristallina. Gli astronomi ottici e radio li utilizzano comunemente per studiare gli oggetti di loro interesse: la polarizzazione fornisce infatti informazioni preziose sui processi fisici in atto nelle sorgenti, complementari alle misure di posizione, tempo ed energia acquisite con tecniche tradizionali.

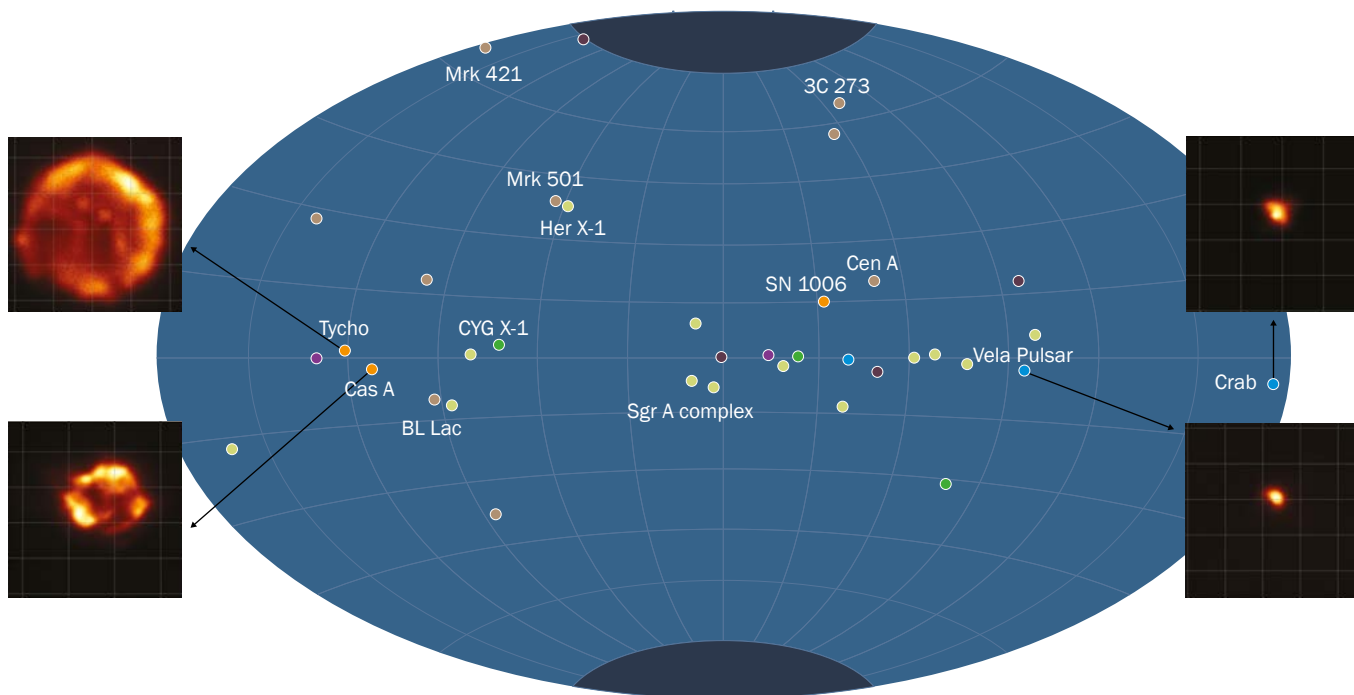
Lo scopo di IXPE è quello di estendere questa tecnica osservativa a energie più elevate. Ma misurare la polarizzazione nei raggi X non è semplice come per la luce visibile. I raggi X sono caratterizzati da lunghezze d'onda migliaia di volte più piccole di quelle della luce visibile, dell'ordine di grandezza delle dimensioni atomiche, e non è possibile creare strutture ordinate su scale di lunghezza così piccole. I raggi X interagiscono con la materia in modo fondamentalmente diverso, mettendo in evidenza le proprietà corpuscolari della luce: vengono assorbiti dai singoli atomi liberando "fotoelettroni" (elettroni a bassa energia). Questi ultimi, essendo particelle cariche, vengono emessi preferenzialmente lungo la direzione di oscillazione del campo elettrico associato alla radiazione incidente e proprio questa è la chiave per la misura della polarizzazione in questa banda di energia: se siamo capaci di misurare la direzione di emissione degli elettroni possiamo risalire alla polarizzazione della radiazione incidente.

Lo sviluppo della tecnologia dei *Gas Pixel Detector* (GPD), i rivelatori a bordo di IXPE, inizia nella seconda metà degli anni '90, e si inserisce nello sviluppo più ampio dei rivelatori a gas miniaturizzati costruiti con le tecniche tipiche dell'industria della microelettronica. Il GPD, ottimizzato per la polarimetria a raggi X sotto la guida di Ronaldo Bellazzini, è una sorta di "macchina fotografica" pensata per realizzare immagini delle tracce dei "fotoelettroni", lunghe tipicamente qualche centinaio di micrometri, con un livello di dettaglio tale da permettere di ricostruire il punto di assorbimento e la direzione di emissione, che sono i due ingredienti fondamentali alla base della tecnica di misura.

Il "cuore" del GPD è un circuito integrato di lettura di $1,5 \times 1,5 \text{ cm}^2$ che è stato progettato e caratterizzato nei laboratori INFN. Si tratta di un chip altamente ottimizzato che non solo è sensibile alla carica elettrica prodotta dal fotoelettrone nella sua interazione con il gas, ma è capace anche di "accorgersi" in autonomia del passaggio di una particella, e di identificare la sottoregione della matrice di lettura interessata dall'evento, limitando drasticamente il tempo di lettura.

I tre anni che vanno dalla selezione alla consegna dello strumento alla NASA sono stati un periodo di eccezionale intensità per tutto il gruppo di ricerca di IXPE. Si tratta di quella fase in cui i prototipi di laboratorio debbono essere ingegnerizzati, integrati in un sistema completo e qualificati per lo spazio, il tutto all'interno dell'involucro limitato di dimensioni, massa e potenza disponibili.

La sfida più grande del programma IXPE non è stata portare in orbita un rivelatore mai utilizzato prima nello spazio, quanto piuttosto completare gli sviluppi tecnologici necessari nel tempo estremamente ridotto tipico delle missioni della sua classe. Basti pensare che l'immediato predecessore di IXPE, GEMS, che aveva obiettivi scientifici molto simili, era stato cancellato nel 2012 proprio per le difficoltà tecniche incontrate nella fase di ingegnerizzazione. Il modello di lavoro adottato, in cui i rivelatori sono stati non solo progettati, ma interamente realizzati nei



- plerioni e pulsar radio
- magnetar
- resti di supernova
- nuclei galattici attivi e Sgr A*
- buchi neri di massa stellare
- blazar e radiogalassie
- nane bianche e stelle di neutroni

c.
Rappresentazione in coordinate galattiche delle 37 sorgenti osservate da IXPE nel primo anno di presa dati, disaggregate per tipologia di oggetto. Si tratta di un campione rappresentativo di tutte le classi di sorgenti X. Per circa metà di queste sorgenti IXPE ha misurato un grado di polarizzazione non nullo con alta significatività statistica.

laboratori INFN, coniugando la creatività e la flessibilità tipiche degli istituti di ricerca con le tecniche industriali di gestione progetto e controllo della qualità, è stato la chiave che ha permesso la consegna dello strumento nei tempi e costi previsti. Dopo un periodo di verifica del funzionamento del telescopio di circa un mese, IXPE ha cominciato le osservazioni scientifiche l'11 gennaio 2022, puntando per circa 20 giorni il residuo di supernova Cassiopea A. Nel primo anno in orbita, IXPE ha puntato 37 sorgenti distinte, con tempi di osservazione che vanno da alcune ore a diverse settimane, misurando un livello di polarizzazione non nulla con alta significatività statistica per circa la metà di esse. Il "catalogo" del primo anno di IXPE include un campione rappresentativo di tutte le classi di sorgenti X rilevanti, sia galattiche che extragalattiche, e rappresenta la prima osservazione sistematica dell'universo polarizzato a queste lunghezze d'onda. Questo primo segmento di missione ha messo in discussione alcune delle idee comunemente accettate sull'universo ad alta energia, offrendoci una messe di informazioni preziose sulla geometria, l'orientamento, la magnitudine e la turbolenza del campo magnetico e i meccanismi di emissione in atto in oggetti celesti completamente diversi tra loro come buchi neri, stelle di neutroni, sistemi binari, galassie attive, resti di supernova. Non senza sorprese del tutto inaspettate, come il lampo gamma GRB 221009A (il GRB del secolo), che è stato possibile osservare

ripuntando velocemente il satellite in virtù della sua luminosità senza precedenti (vd. p. 12, ndr). Lo sviluppo temporale della missione prevede una prima fase di tre anni, ma la stabilità del funzionamento dell'osservatorio permetterà con ogni probabilità di estendere significativamente le osservazioni. I dati raccolti e gli strumenti di analisi sono fin dall'inizio disponibili a tutta la comunità, con un'enfasi sul funzionamento "da osservatorio" crescente nel tempo. Le scoperte sorprendenti che IXPE sta facendo fanno ben sperare che l'esplorazione dell'universo polarizzato possa procedere con futuri strumenti via via più sensibili.

Biografia

Luca Baldini è professore presso l'Università di Pisa. Impegnato attivamente nella missione spaziale Fermi dal 2002, a seguito dell'approvazione di IXPE ha guidato il team di fisici, ingegneri e tecnici che ha progettato, realizzato e qualificato i rivelatori sensibili alla polarizzazione al piano focale della missione.

10.23801/asimmetrie.2023.34.3