

Niccolò Bucciantini

# Polarimetria nei raggi-X di Nebulose da Pulsar

*X-Ray polarimetry of Pulsar Wind Nebulae with XIPE*

INAF-Osservatorio di Arcetri

**Riassunto.** Le nebulose da pulsar sono fra gli oggetti più spettacolari dell'astronomia nei raggi X. La loro emissione X non è altro che la radiazione di sincrotrone del vento ultrarelativistico della pulsar, rallentato e compresso dal mezzo circostante. Siccome l'angolo di polarizzazione della radiazione è perpendicolare alla direzione del campo magnetico nel punto di emissione, e il grado di polarizzazione dipende dalla distribuzione in energia degli elettroni emettenti, misure di polarizzazione risolte spazialmente possono dare informazioni sulla topologia del campo magnetico e la sua connessione con gli elementi morfologici della nebulosa, offrendo un'opportunità unica di studiare processi fisici altrimenti inaccessibili. Missioni future come il satellite XIPE saranno cruciali a tale riguardo.

**Parole chiave:** Raggi-X, Polarimetria, Resti di Supernova

L'emissione di radiazione non termica nei raggi X è una caratteristica principale di molte sorgenti di alta energia in astrofisica, ed è dovuta alla presenza di elettroni relativistici che girano in un forte campo magnetico e producono radiazione di sincrotrone. Questa dovrebbe essere altamente polarizzata, ed è infatti grazie alla sua polarizzazione che è stata riconosciuta per la prima volta in una sorgente astrofisica, la Nebulosa dal Granchio, già negli anni 50. Lo studio della

**Abstract.** Pulsar Wind Nebulae are among the most spectacular targets of X-ray astronomy. Their X-ray emission is the synchrotron radiation of the ultrarelativistic pulsar wind shocked in the ambient medium. Since the polarization position angle is perpendicular to the direction of the magnetic field at the site of emission, and the degree of polarization depends on the energy spectrum of emitting electrons, spatially resolved polarization measurements will probe the magnetic field topology and its connection with the PWN morphological elements, providing a unique opportunity to investigate physical processes not otherwise accessible. Future missions such as XIPE will be crucial in this respect.

**Keywords.** X-Ray, Polarimetry, Supernova Remnants

Non-thermal X-Ray emission is a key feature of many high-energy astrophysical sources, and it is due to the presence of highly energetic electrons spiraling in a strong magnetic field and



radiazione di sincrotrone emessa da sorgenti astrofisiche può fornire una misura accurata della forza del campo magnetico, e della funzione di distribuzione delle particelle, a loro volta legate ai processi di accelerazione e raffreddamento che hanno luogo in quelle stesse sorgenti. Sfortunatamente si sa da lungo tempo che i meccanismi fisici in atto dipendono fortemente dalla geometria del campo magnetico, per esempio il livello di turbolenza magnetica, e che l'intensità di sincrotrone da sola non dà sufficienti informazioni, che potrebbero invece essere accessibili con la polarizzazione.

Negli ultimi anni sono state avanzate diverse proposte per satelliti per raggi X dedicati alla polarimetria. Recentemente, XIPE (X-ray Image Polarimetric Explorer, vedi anche [www.isdc.unige.ch/xipe/index.php/home](http://www.isdc.unige.ch/xipe/index.php/home)) è stato selezionato dall'ESA per la fase di studio avanzato [Soffitta et al., 2013]. Il gruppo di alte energie di Arcetri partecipa a questa missione per quanto riguarda lo studio delle Nebulose da Venti di Pulsar (PWNe) e per i Resti di Supernova (SNRs). Le PWNe sono bolle formate da un plasma di elettroni e positroni relativistici, generate dal vento delle pulsar, e caratterizzate da uno spettro di emissione a banda larga, dal Radio al TeV. La più luminosa (ed uno degli oggetti più studiati in astrofisica) è la Nebulosa del Granchio.

I campi magnetici nelle nebulose da Pulsar (PWNe) sono abbastanza ben ordinati, tali che l'emissione è localmente altamente polarizzata sia in Radio che in Ottico (fino al limite teorico del 60%). La stessa emissione della Pulsar è altamente polarizzata nelle medesime bande. L'emissione X delle nebulose è fortemente strutturata, come mostrato dal satellite Chandra, con una geometria caratteriz-

producing synchrotron radiation. This is expected to be highly polarized, and indeed it was as a result of its polarization, that synchrotron radiation was recognized for the first time in an astrophysical source, the Crab Nebula, as far back as the 1950s. The study of synchrotron radiation emitted from astrophysical sources can constrain the strength of the magnetic field and the particle distribution function, which are in turn connected with the acceleration and cooling processes taking place in those sources. Unfortunately, it has long been recognized that, while the physical mechanisms at work depend strongly on the geometry of the magnetic field, for example the level of magnetic turbulence, the Synchrotron intensity per se does not provide enough information, which could be accessible with polarization.

In recent years several proposals have been put forward for X-ray satellites devoted to polarimetry. Recently, the XIPE (X-ray Image Polarimetric Explorer, see also [www.isdc.unige.ch/xipe/index.php/home](http://www.isdc.unige.ch/xipe/index.php/home)) was selected by ESA for the advanced study phase [Soffitta et al., 2013]. The high energy astrophysics group in Arcetri is involved in this mission for the study of Pulsar Wind Nebulae (PWNe) and Supernova Remnants (SNRs). PWNe are bubbles of relativistic electron-positron plasma and magnetic fields, produced by a pulsar wind, that have a very broad band emission from radio to TeV. The brightest of them (and one of the most studied objects in astrophysics) is the Crab Nebula

Magnetic fields in Pulsar Wind Nebulae (PWN) are rather well organized, so the emission is locally highly polarized in the radio and optical bands (up to 60%, close to the theoretical limit). The pulsar emission itself is also highly polarized in the same bands. The X-ray emission

zata da un toro ed un jet. Dal momento che gli elettroni che emettono raggi X hanno vite per sincrotrone assai più brevi di quella di particelle che emettono a lunghezze d'onda maggiori, i raggi X vengono prodotti in regioni prossime a quelle in cui gli elettroni vengono accelerati e quindi offrono un'immagine molto più chiara delle regioni interne, che non, per esempio, l'ottico. Misure dettagliate e risolte spazialmente con XIPE ci permetteranno di determinare l'orientazione del campo magnetico nel toro, nel jet ed a varie distanze dalla pulsar. Questo è particolarmente interessante, perché rispetto all'emissione di sincrotrone totale, l'emissione polarizzata è un indicatore più sensibile alla dinamica del plasma in queste nebulose. Questo è anche il miglior strumento per investigare nuovi scenari, basati su simulazioni MHD 3D, che suggeriscono un cambio di paradigma nella dinamica delle PWNe: suggeriscono la conversione di energia magnetica in energia delle particelle nella zona radiativa a valle dello shock, piuttosto che a monte o nello stesso shock. Tali scenari richiedono la crescita della turbolenza, ed un'efficiente dissipazione del campo magnetico in una regione che può essere studiata direttamente solo con osservazioni di polarimetria X. Le informazioni sulla magnetizzazione del vento della pulsar e sulla sua evoluzione sono essenziali per chiarire dove e come sono accelerate le particelle in tali nebulose, che sono spesso considerate tipici prototipi per acceleratori sia nella Galassia che oltre. XIPE può misurare in 20 mila secondi il grado e l'angolo di polarizzazione in molte sotto-regioni, con una accuratezza migliore dell'1% sulla frazione di polarizzazione e di 1 grado sull'angolo. Sono accessibili anche altre PWNe giovani o di età media, e si possono studiare differenze e somiglianze con la Crab. In par-

of the nebula is highly structured, as shown by Chandra, with a torus plus jet geometry. Since X-ray emitting electrons have a synchrotron lifetime which is far shorter than that of particles which emit at longer wavelengths, X-rays are produced in the regions close to where the electrons are accelerated and therefore provide a much clearer view of the inner regions than optical, for instance. Detailed and spatially-resolved measurements by XIPE will allow us to determine the magnetic field orientation in the torus, the jet and at various distances from the pulsar. This is of special interest because, compared to the total synchrotron emission, polarized emission is a more sensitive probe of the plasma dynamics in these nebulae. It is also the best tool to test the emergent scenarios, based on 3D MHD simulations, which suggest a paradigm change for PWN dynamics: they invoke the conversion of magnetic energy into particle energy in the radiation region, downstream of the termination shock, rather than upstream, or at the shock itself. Such scenarios require the growth of turbulence and efficient magnetic field dissipation in a region which can be directly probed only by X-ray polarimetric observations. Information on the pulsar wind magnetization and its evolution is essential to clarify the sites and mechanism(s) of particle acceleration in these nebulae, which are used as proxy for other kinds of accelerators in the Galaxy, and beyond. XIPE can measure, in 20 ks, the degree and angle of polarization in many subregions with an accuracy higher than 1% in polarization degree and 1 degree in polarization angle. Other young and middle-aged PWNe will also be accessible, and similarities and differences with respect to the Crab can be explored. In particular, a subject of current debate is the dichotomy between nebulae characterized by radial

ticolare, al momento, un oggetto di discussione, è la dicotomia tra nebulose caratterizzate da una struttura del campo magnetico radiale rispetto a quelle con campo toroidale, così come osservato in banda Radio. La polarimetria a raggi X, data la sua maggior sensibilità alle zone interne, è in grado di determinare se la geometria su larga scala è dovuta alla dinamica del plasma relativistico, o piuttosto all'interazione con il circostante SNR.

## Bibliografia

[Soffitta et al., 2013] Soffitta, P., Barcons, X., Bellazzini, R., et al. (incluso Bucciantini N.) 2013, "XIPE: the X-ray imaging polarimetry explorer", *Experimental Astronomy*, 36, 523

Niccolò Bucciantini è un ricercatore presso INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri, ed è stato il terzo italiano a vincere la prestigiosa Hubble Fellowship. I suoi interessi scientifici includono l'astrofisica delle alte energie, la fisica numerica dei plasmi relativistici, le nebulose da Pulsar, ed inoltre è fra i proponenti del modello a magnetar per i Gamma-Ray Bursts.

versus toroidal field geometry, as inferred from radio polarimetry. X-ray polarization, with its enhanced sensitivity to the inner regions, can help to determine whether the large scale field geometry is related to the relativistic plasma dynamics or rather induced by the interaction with the surrounding SNR.

## Bibliography

[Soffitta et al., 2013] Soffitta, P., Barcons, X., Bellazzini, R., et al. (including Bucciantini N.) 2013, "XIPE: the X-ray imaging polarimetry explorer", *Experimental Astronomy*, 36, 523

Niccolò Bucciantini is a research scientist at INAF- Arcetri Astrophysical Observatory and was the third Italian to win the prestigious Hubble Fellowship. His scientific interests include high-energy astrophysics, numerical relativistic plasma physics, Pulsar Wind Nebulae and he is also a proponent of the Magnetar model for Gamma-Ray Bursts.

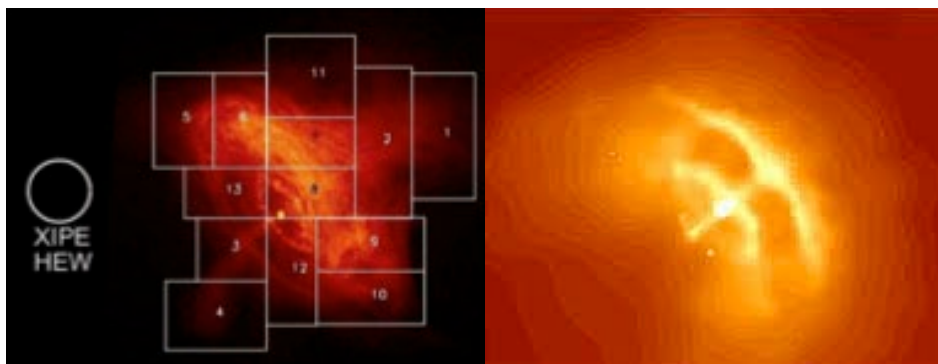


Figura 1. Sinistra: Risoluzione angolare di XIPE, come larghezza a metà energia, sovrapposta ad una immagine della Crab Nebula del Chandra X-ray Observatory. Una osservazione di 20ks con XIPE, potrà misurare in ciascuna regione una polarizzazione minima del 2% (la polarizzazione media della nebulosa è 19%). Destra: Risoluzione angolare di XIPE, come larghezza a metà energia, sovrapposta ad una immagine della Vela Nebula del Chandra X-ray Observatory.

Figure 1. Left panel: Angular resolution of XIPE, expressed as the Half Energy Width, superimposed on the Crab Nebula image by the Chandra X-ray Observatory. A 20 ks observation with XIPE will be able to detect in each region a minimum polarization of 2% (the average nebula polarization is 19%). Right panel: Angular resolution of XIPE, expressed as the Half Energy Width, superimposed on the Vela Nebula image by the Chandra X-ray Observatory.