

# Report Progetto:

## “Three-dimensional relativistic MHD simulations of bow shock nebulae”

**PI:** Barbara Olmi

**Codice Progetto:** INA17\_C2A14

**Classe Progetto:** A

**Monte ore assegnato:** 4.000.000 ore su KNL

### Breve descrizione della ricerca:

Le bow shock nebulae fanno parte della famiglia delle pulsar wind nebulae, nebulose prodotte dal vento emanato da una pulsar a seguito del rallentamento nella rotazione della stella. Le bow shock sono associate ad oggetti molto evoluti (età  $\geq 20000$  anni).

Poiché si è stimato che una percentuale rilevante di tutte le pulsar (10-50%) sia nata con una velocità di kick dell'ordine di 100-500 km/s, mentre il materiale residuo dell'esplosione di supernova è in espansione decelerata nel mezzo interstellare circostante, queste pulsar sono destinate a fuoriuscire dal remnant su tempi scala dell'ordine delle migliaia di anni, molto inferiori cioè alla loro vita media. Una volta lasciato il residuo della stella progenitrice, la pulsar continuerà ad alimentare la nebulosa con il materiale prodotto nella sua magnetosfera, ma adesso questo interagirà direttamente con il mezzo interstellare. Poiché la velocità del suono caratteristica nel mezzo interstellare è inferiore a quella della pulsar ( $\sim 10-100$  km/s), appena la stella è fuoriuscita dal remnant la nebulosa sarà morfologicamente modificata a causa dell'interazione col mezzo circostante. Si formerà cioè un bow-shock, e la nebulosa risultante assumerà una caratteristica forma cometaria, con la pulsar posta nella testa della cometa, seguita da una lunga coda di materiale iniettato a tempi via via più remoti tanto più ci si allontana dalla sorgente.

Molte bow shock nebulae sono state osservate come sorgenti di emissione non termica in banda radio o X (Kargaltsev & Pavlov 2008, Brownsberger & Romani 2014). In alcuni casi sono disponibili anche misure polarimetriche che suggeriscono una grande varietà di configurazioni magnetiche sia nella testa che nella coda. Le osservazioni a multi-banda hanno recentemente rivelato pattern di emissione molto diversi, ed in particolare morfologie delle code variabili, con presenza di jet disallineati con la velocità della pulsar.

Questa varietà di fenomeni al momento non è stata spiegata dettagliatamente. Comprendere come questi oggetti possano produrre una così larga varietà di fenomeni diversi porterebbe a nuove conoscenze circa la fisica dei plasmi relativistici che le formano, così come importanti informazioni sulla fisica delle magnetosfere delle pulsar, dove vengono generati.

Le bow shock nebulae sono state osservate anche in emissione Ha e sono oggetti perfetti in cui studiare l'interazione tra venti relativistici e un mezzo parzialmente ionizzato.

Come parte dello studio preliminare di questi oggetti abbiamo riprodotto con un modello 2D le previsioni analitiche presentate in Morlino et al. 2015, in cui viene discusso come l'interazione del vento con gli atomi neutri del mezzo interstellare si rifletta in una variazione consistente della morfologia della coda. La nostra analisi numerica ha mostrato che questo risultato è in realtà mitigato dalla presenza della ram pressure del mezzo circostante, per cui allargamenti molto pronunciati così come previsto dal modello analitico sono in realtà possibili solo nel caso di velocità della pulsar subsoniche. L'analisi completa e la descrizione del modello numerico sono stati pubblicati in Olmi et al. 2018.

Una modellizzazione esaustiva di questi oggetti complessi richiede sicuramente una modellizzazione in 3 dimensioni, l'unica in grado di render conto della complessa geometria delle code, delle asimmetrie osservate, e della corretta riproduzione del campo magnetico. Il nostro strumento di ricerca è il codice numerico PLUTO (Mignone et al. 2007), che permette l'utilizzo di metodi di Adaptive Mesh Refinement (AMR) per l'aumento adattivo della risoluzione numerica dove necessario, in modo da poter risolvere le grande varietà di scale spaziali coinvolte nella modellizzazione di questi sistemi.

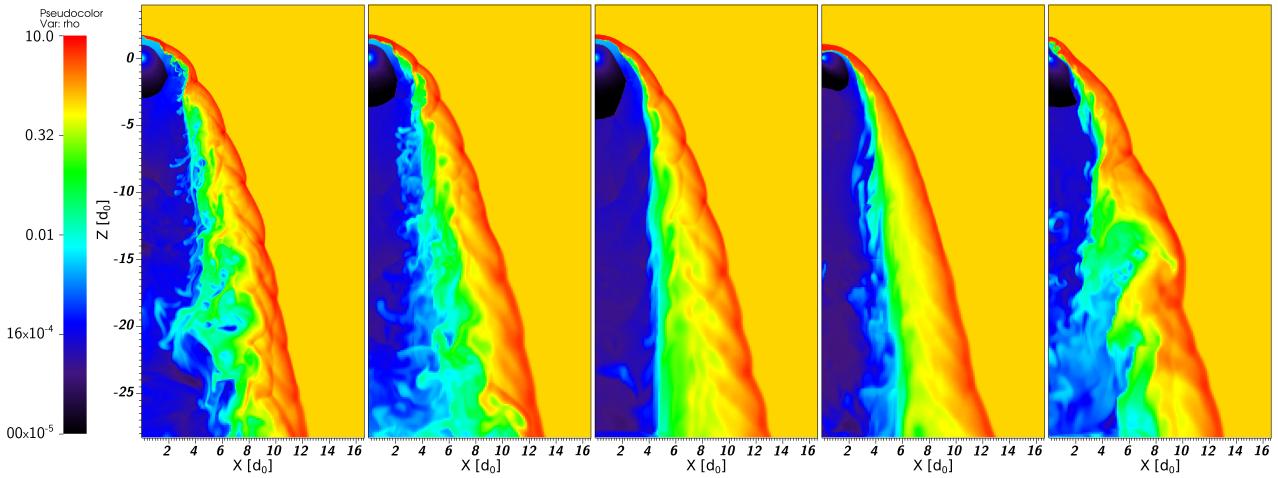


Figura 1. Tagli 2D di mappe di densità per diversi modelli, confrontati al medesimo stadio di evoluzione. Da sinistra a destra: 2D idrodinamico; 3D idrodinamico; 3D con vento isotropo, magnetizzazione massima ( $\sigma=1$ ) ed campo magnetico allineato con la velocità della pulsar; 3D con  $\sigma=1$ , campo magnetico allineato con la velocità della pulsar e vento anisotropo; 3D con  $\sigma=1$ , campo magnetico inclinato di  $45^\circ$  rispetto alla velocità della pulsar e vento anisotropo.

Si varia infatti dalla piccola regione di iniezione del vento di pulsar fino alla coda della bow shock, per una variazione di 3 ordini di grandezza in scala spaziale.

Il setup numerico è stato ottimizzato in una prima fase di lavoro, nella quale si sono definiti i metodi numerici, la griglia base ed il numero di livelli AMR da utilizzare per una miglior modellizzazione del problema, ottimizzando sia le richieste di risorse di calcolo che il tempo necessario per portare a termine le simulazioni. Abbiamo in particolare modificato le condizioni di applicazione dei Riemann solver in modo da rilassare il solver standard HLLD ad HLL in tutte le regioni caratterizzate dalla presenza del vento relativistico, premettendo di utilizzare un fattore di Lorentz elevato ( $\gamma=10$ ) mantenendo il codice stabile. Il dominio cartesiano è stato definito in modo che la pulsar si trovi al centro della griglia con velocità diretta lungo l'asse z, considerando il sistema di riferimento solidale con la pulsar stessa. In questo modo il mezzo interstellare circostante è visto come un mezzo uniforme, non magnetizzato e con velocità diretta lungo -z. Il dominio si estende tra  $[-17d_0; +17d_0]$  in direzione x ed y e  $[-28d_0; +5d_0]$  lungo z, dove si forma la coda della bow shock. Le distanze spaziali sono scalate in funzione del parametro caratteristico delle bow-shock nebulae, la così detta “stand-off distance”:

$$d_0 = [L/(4\pi c \rho_{ISM} v_{PSR}^2)]^{1/2}$$

dove L è la luminosità di spin-down della pulsar,  $\rho_{ISM}$  la densità del mezzo interstellare e  $v_{PSR}$  la velocità della pulsar rispetto al mezzo, mentre c è la velocità della luce.

La griglia base è composta da  $128^3$  punti griglia equi-spaziati e 4 livelli AMR, per una risoluzione massima equivalente pari a  $2048^3$  punti griglia, sufficienti ad assicurare la risoluzione necessaria sia alla regione di iniezione del vento di pulsar (vicino al centro del dominio,  $r < 0.2d_0$ ) sia in tutta la regione dinamica della testa della bow shock nebula.

Abbiamo studiato un ampio set di modelli fisici che ci permettesse di analizzare le caratteristiche delle bow-shock nebulae, variandone i parametri più rilevanti. In particolare abbiamo definito 4 livelli diversi di magnetizzazione (da non magnetizzato ad altamente magnetizzato, con parametro di magnetizzazione  $\sigma=[0, 0.01, 0.1, 1]$ ), diversi angoli di inclinazione del campo magnetico rispetto alla velocità della pulsar ( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ) e due diversi modelli per il vento della pulsar (con distribuzione dell'energia isotropa o anisotropa, con maggior concentrazione nella direzione equatoriale della pulsar).

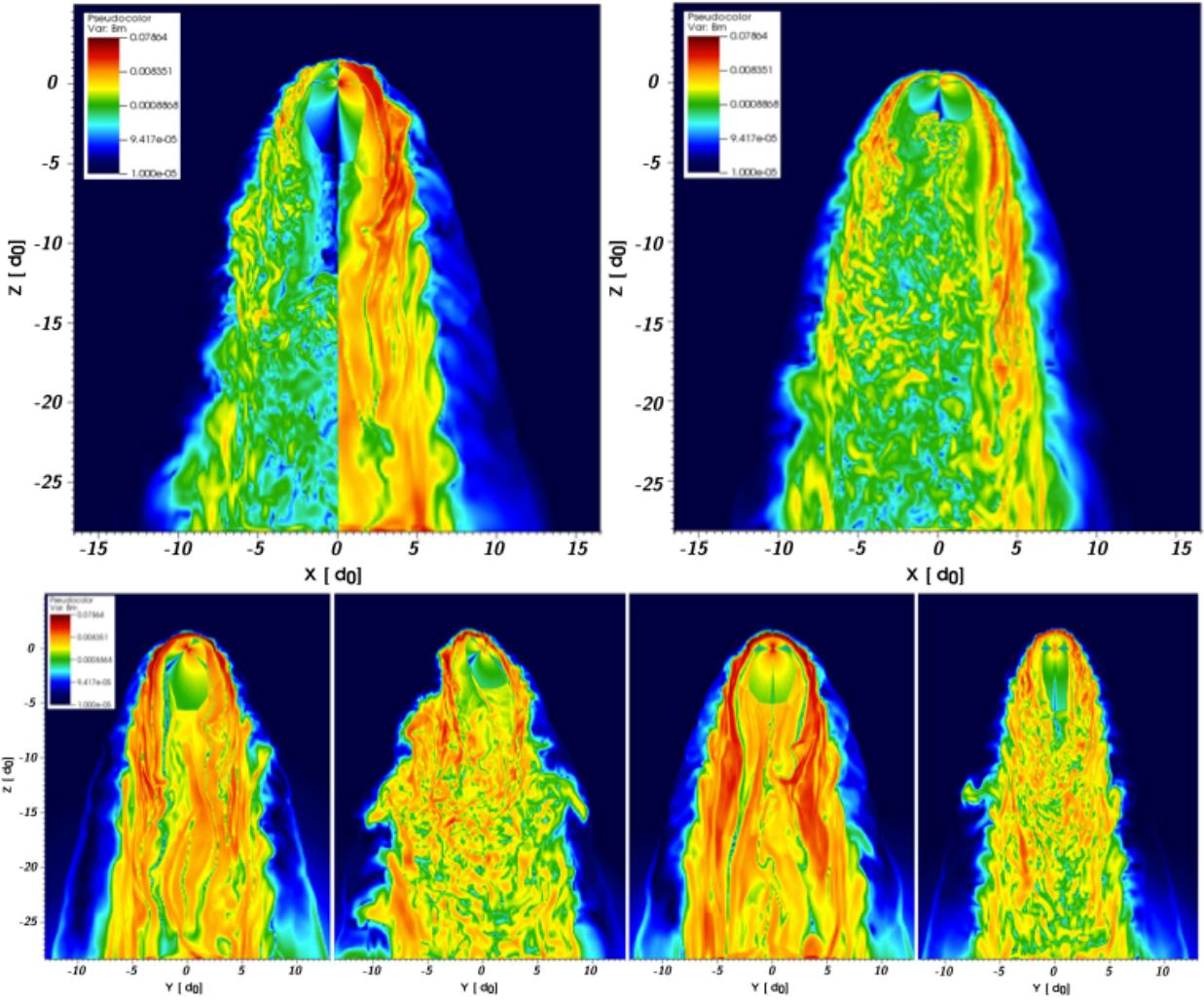


Figura 2. Tagli 2D di mappe di campo magnetico (in unità codice), normalizzate al valore massimo, per diversi modelli. Pannello superiore: confronto per i modelli 3D con campo allineato con la velocità della pulsar (inclinazione  $0^\circ$ ) e vento isotropo (figura di sinistra) o anisotropo (figura di destra) per i casi di bassa (sinistra) e alta (destra) magnetizzazione. Pannello inferiore: plot per il caso  $\sigma=1$  per i modelli: vento isotropo, inclinazione  $45^\circ$ ; vento anisotropo, inclinazione  $45^\circ$ ; vento isotropo, inclinazione  $90^\circ$ ; vento anisotropo, inclinazione  $90^\circ$ .

Abbiamo dunque studiato la dinamica della coda per tutte le configurazioni considerate, confrontando le caratteristiche tra i diversi casi ed isolando i parametri più importanti per le variazioni morfologiche delle bow shock nebulae. Un esempio di confronto macroscopico della morfologia della coda tra diversi modelli si può trovare in Fig. 1, dove si nota come la struttura a larga scala sia confrontabile tra casi diversi, con la maggior variazione legata all'inclinazione del campo magnetico rispetto alla velocità della pulsar (pannello a destra).

Abbiamo inoltre studiato l'effetto dei diversi parametri sulla struttura del campo magnetico (mostrato in Fig. 2), scoprendo che per i casi a bassa magnetizzazione la struttura di iniezione del campo è completamente annientata dalla turbolenza che si sviluppa localmente in tutta la coda della bow shock nebula. Nel caso di elevata magnetizzazione invece la struttura di iniezione è ben riconoscibile fino a circa metà dell'estensione della coda: il fluido mantiene una struttura circa laminare, e la current sheet resta ben visibile. Il caso che mostra una maggiore turbolenza è quello con vento anisotropo, inclinazione del campo magnetico di  $45^\circ$  rispetto alla velocità della pulsar e magnetizzazione  $\sigma=0.01$ . In questo caso infatti la bassa magnetizzazione e la struttura dello shock

favoriscono la dissipazione del campo già nella testa della bow shock nebula, così come l'instaurarsi di moti turbolenti che mischiano il plasma. La struttura locale in questo caso è ben lontana dall'essere laminare, mentre si osservano vortici su scale molto piccole, senza una direzione preferenziale. La turbolenza in questo caso in particolare è stata caratterizzata attraverso la funzione di struttura del secondo ordine della velocità, ripetendo la procedura per diversi tagli lungo la coda della bow shock in modo da aumentare la statistica dell'analisi. Il trend trovato alle piccole scale risulta compatibile con quanto trovato in letteratura per la turbolenza MHD in plasmi a bassa magnetizzazione (Zrake & McFayden 2012).

Questo studio rappresenta uno dei primi tentativi nella letteratura di modellizzare consistentemente le bow shock nebulae, ed ha permesso di identificare i parametri più importanti circa la descrizione della dinamica di questi oggetti. Inoltre ha premesso di identificare le differenze morfologiche tra i diversi casi considerati, e di rapportare tali differenze a specifici parametri del modello fisico. In particolare si è notato come solo i modelli con magnetizzazione elevata mostrino un comportamento magnetico effettivamente diverso a tutti gli altri casi, mantenendo memoria della forma del vento all'iniezione ed essendo meno interessati dallo sviluppo di turbolenza. La turbolenza inoltre si è dimostrata non efficace nell'amplificazione del campo magnetico. Le variazioni maggiori della morfologia della coda si osservano invece per i casi in cui il campo magnetico è fortemente disallineato rispetto alla direzione di moto della pulsar, mentre in tutti i casi allineati si osservano strutture molto simili.

Tutti i risultati qui brevemente discussi sono stati pubblicati in Olmi & Bucciantini 2019, mentre l'analisi delle proprietà emissive e polarimetriche verrà pubblicata in un secondo manoscritto attualmente in stesura (Olmi & Bucciantini II, 2019, in prep.).

**Funzione “incubatrice” del progetto:** il progetto non ha svolto la funzione di incubatrice per progetti di dimensioni maggiori (come ISCRA o PRACE), ma ha attualmente in corso un follow-up in classe A: “Escape of particles from bow shock pulsar wind nebula”, INA17\_C4A31, sempre in convenzione MoU CINECA-INAF, con assegnazione di 3.000.000 ore su KNL.

**Considerazioni sull'accesso a risorse tramite MoU CINECA-INAF:** l'accesso alle risorse in convenzione ha permesso di ottenere tempo di calcolo per il progetto con maggior facilità rispetto normali canali di CINECA. Il format di richiesta semplice permette una rapida stesura dei progetti; il supporto in convenzione MoU CINECA-INAF è stato spesso di grande aiuto; i tempi di risposta più rapidi rispetto ai normali canali di CINECA permettono di procedere velocemente alla realizzazione pratica di un progetto.

27/05/2019

*Barbara Olmi*

## BIBLIOGRAFIA

- Abeysekara A. U. e. a., 2017, Science, 358, 911
- Blasi P., Amato E., 2011, ArXiv:1007.4745
- Kargaltsev O., Pavlov G. G., Klingler N., Rangelov B., 2017, Journal of Plasma Physics, 83, 635830501
- Brownsberger S., Romani R. W., 2014, ApJ, 784, 154
- Morlino G., Lyutikov M., Vorster M., 2015, MNRAS, 454, 3886
- Olmi B., Bucciantini N., Morlino G., 2018, MNRAS, 481, 3394
- Zrake J., MacFadyen A. I., 2012, ApJ, 744, 32
- Mignone, A., Bodo, G., Massaglia, S., Matsakos, T., Tesileanu, O., Zanni, C., Ferrari, A., 2007, ApJS, 170, 228M
- Olmi B. & Bucciantini N., 2019, 484, 5755, MNRAS