



Il Colle di
Galileo

Astrofisica delle Alte Energie ad Arcetri

High Energy Astrophysics in Arcetri

Rino Bandiera, Barbara Olmi
INAF – Osservatorio Astrofisico di Arcetri

Riassunto. Con questo breve resoconto, necessariamente incompleto, spero di poter dare un assaggio sia dei progressi compiuti negli anni dal nostro gruppo in alcuni settori più tradizionali, sia della grande varietà di argomenti trattati, soprattutto in tempi più recenti.

Gli inizi

Tutto ebbe inizio nel 1978, quando Franco Pacini accettò l'incarico di professore ordinario all'Università di Firenze e fu anche nominato Direttore dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri (OAA). Egli portò con sé un patrimonio di conoscenze, idee e progettualità grazie al quale l'OAA ha notevolmente ampliato i propri ambiti di ricerca e l'eredità della sua azione è continuata fino ad oggi.

Uno dei suoi campi di ricerca preferiti è sempre stato l'Astrofisica delle Alte Energie e già prima di arrivare ad Arcetri Franco Pacini era uno dei maggiori esperti internazionali di stelle di neutroni. A lui si deve l'intuizione che tali stelle emettano energia sotto forma di radiazione di dipolo magnetico e, in particolare, che proprio una stella di neutroni alimentasse la Nebulosa del Granchio. Questo avveniva nel 1967, quasi in coincidenza con la scoperta di impulsi radio estremamente regolari da una sorgente, poi identificata con una stella di neutro-

Abstract. With this short and necessarily incomplete report, we hope to offer a taste of the progress achieved by our group over the years in some more traditional sectors, and of the wide variety of topics covered, especially in more recent times.

The beginnings

Everything began in 1978, when Franco Pacini accepted a position as full professor at the University of Florence, and was also appointed Director of the Arcetri Astrophysical Observatory (OAA). He brought with him a wealth of knowledge, ideas, and planning, thanks to which OAA considerably expanded its areas of research, and the legacy of his action continues today.

One of his favorite fields of research was always High Energy Astrophysics and, even before arriving in Arcetri, Franco Pacini had become a leading international expert in neutron stars. He had had the great intuition that rotating magnetised neutron stars emit energy in the

ni rotante (una “pulsar”). Lo studio delle pulsar e delle loro nebulose (le “pulsar wind nebulae” – PWNe) non solo proseguì attivamente negli anni successivi, ma è anche rimasto centrale nella storia delle Alte Energie ad Arcetri.

A metà degli anni '80 nacque ufficialmente il gruppo di Astrofisica delle Alte Energie ad Arcetri, con l'arrivo di Marco Salvati (dal CNR di Frascati) e di Rino Bandiera (da ESO Garching).

L'arricchimento del gruppo a cavallo del millennio

A partire dal 2000 il gruppo ha iniziato a crescere, sia in numero che nelle idee e nelle competenze. Alcuni di noi si sono formati in OAA/Università di Firenze, come:

- Elena Amato che, dopo un anno trascorso a Berkeley, nel 2001 conseguì il PhD a Firenze e subito dopo diventò Ricercatore ad OAA.
- Niccolò Bucciantini, che conseguì il PhD nel 2004 e, dopo anni trascorsi a Berkeley e NORDITA, nel 2011 tornò come Ricercatore.
- Barbara Olmi, che dopo il dottorato di ricerca nel 2015 ha lavorato come PostDoc Fellow fino al 2019, anno in cui è stata assunta come Ricercatore.

Alcuni altri sono venuti da fuori, come:

- Pasquale Blasi, arrivato da FermiLab nel 2001, poi passato nel 2017 al GSSI, dove è ora Professore Ordinario.
- Giovanni Morlino, PostDoc Fellow dal 2008 al 2012 e che, dopo un periodo

form of magnetic dipole radiation and that one such neutron star could be the energy source responsible for the activity observed in the Crab Nebula. This took place in 1967, almost coinciding with the discovery of extremely regular radio pulses from a source subsequently recognised to be a rotating neutron star (a “pulsar”). The study of pulsars, and especially their nebulae (“pulsar wind nebulae” – PWNe) not only continued actively in the following years, but also remained central to the history of High Energies at Arcetri.

The High Energy group at OAA was officially founded in the mid '80s, with the arrival of Marco Salvati (from CNR Frascati) and Rino Bandiera (from ESO Garching).

The enrichment of the group at the turn of the millennium

As of the year 2000, our group began to grow, in number as well as in ideas and expertise. Some of us were educated at the OAA/University of Florence:

- Elena Amato, who, after a year at Berkeley, attained her PhD in Florence in 2001 and became a researcher at the OAA soon after.
- Niccolò Bucciantini, who attained his PhD in 2004 and, after some years at Berkeley and NORDITA, came back as a researcher in 2011.
- Barbara Olmi, who, after attaining her PhD in 2015, worked as a postdoc fellow until 2019, when she was hired as a researcher.

Others came from abroad:

trascorso in Francia (APC), USA (Purdue) e presso il GSSI, a partire dal 2019 è tornato come Ricercatore.

- Damiano Caprioli, in arrivo dalla Scuola Normale Superiore, che fu PostDoc Fellow ad Arcetri dal 2011 al 2014, per poi trasferirsi a Princeton. Ora è Professore Associato all'Università di Chicago.
- Roberto Aloisio, ricercatore ad Arcetri dal 2011 al 2017, e ora Professore Ordinario al GSSI.
- Martina Cardillo, PostDoc Fellow ad Arcetri dal 2014 al 2017, e ora Ricercatore ad INAF/IAPS.

Negli anni si sono poi instaurate strette collaborazioni con i colleghi del Dipartimento di Astronomia – Università degli Studi di Firenze. Tra loro Luca Del Zanna e Delia Volpi.

Il gruppo ha negli anni ampliato i suoi interessi, restando legato soprattutto a sorgenti Galattiche e concentrandosi su processi fisici o su alcuni problemi fondamentali.

Fisica, struttura ed evoluzione di PWNe

Una PWN è schematizzabile come una bolla formata da campo magnetico e particelle relativistiche.

Il gruppo di Arcetri ha contribuito profondamente (e continua tutt'ora) alla comprensione del funzionamento di queste sorgenti, soprattutto dal punto di

- Pasquale Blasi arrived from FermiLab in 2001 and moved to the GSSI in 2017, where he is now full professor.
- Giovanni Morlino, postdoc fellow between 2008 and 2012, who, after some time in France (APC), the US (Purdue) and at the GSSI, returned to the OAA as a researcher in 2019.
- Damiano Caprioli, from the Scuola Normale Superiore, who was a postdoc fellow in Arcetri between 2011 and 2014, and then moved to Princeton. He is now associate professor at the University of Chicago.
- Roberto Aloisio was a researcher at Arcetri between 2011 and 2017 and is now full professor at the GSSI.
- Martina Cardillo, postdoc fellow in Arcetri between 2014 and 2017, and now a researcher at INAF/IAPS.

Close collaborations have been established over the years with colleagues of the Astronomy Department - University of Florence, including Luca Del Zanna and Delia Volpi.

Our group's research has expanded its interests over the years to a wider range of topics, mostly related to Galactic sources, but essentially focusing on physical processes or some fundamental problems.

Physics, structure and evolution of PWNe

A PWN can be considered as a bubble made of magnetic fields and relativistic particles.

vista della modellizzazione teorica e numerica. Il confronto tra la nebulosa simulata e lo spettro di emissione multibanda ci ha permesso di vincolare alcune proprietà non direttamente osservabili del vento di pulsar, come la sua magnetizzazione e il contenuto in particelle, ingredienti essenziali per svelare come le particelle vengano accelerate in queste sorgenti, note per essere i più efficienti acceleratori nella Galassia.

Recentemente la modellizzazione è stata estesa anche ad oggetti evoluti, quando la PWN inizia ad interagire con il resto di supernova (SNR). In questo caso è fondamentale determinare la compressione che il SNR esercita sulla PWN: la compressione può infatti provocare il bruciamento di gran parte delle particelle di alta energia nella nebulosa, cambiandone l'aspetto spettrale, soprattutto nei raggi gamma, dove gli oggetti evoluti sono generalmente più brillanti. Questo aspetto è fondamentale, in vista di stimare il numero di PWNe rivelabili dai futuri telescopi gamma, come il Cherenkov Telescope Array (CTA), nella nostra Galassia.

Pulsar bow-shock nebulae

Quando una pulsar attiva e con alta velocità alla fine sfugge al suo SNR originale, inizia a interagire con il mezzo ambiente e in questo modo si forma un bow shock. La PWN è ancora presente, ma più piccola e distorta. Una delle prime “*pulsar bow shock nebulae*” ad essere scoperte, in emissione della linea di Balmer, è stata la Guitar Nebula, seguita poi da alcune altre (viste in ottico, radio o X). Nel 2007 è

The Arcetri group contributed largely (and still does) to the comprehension of the mechanisms governing these sources, especially thanks to theoretical and numerical models. The comparison between the simulated nebula and the multiband observed emission spectrum allowed us to constrain some of the hidden properties of the pulsar outflow, like its magnetization and particle content, elements that were key to unveiling how particles are accelerated in these sources, which are known as the most efficient accelerators in the Galaxy.

Recently the modelling has been extended also to evolved sources, when the interaction with the SNR begins. In this case, it is essential to determine the amount of compression exerted by the SNR on the PWN: compression might cause the burn-off of a large part of the high energy particles in the nebula, completely changing its spectral features especially in gamma-rays, where evolved systems are generally brighter. This aspect is fundamental with a view to estimating the number of PWNe that future gamma-ray telescopes, like the Cherenkov Telescope Array, will detect in our Galaxy.

Pulsar bow-shock nebulae

When an active and fast-moving pulsar eventually escapes its original SNR, it begins interacting with the ambient medium and a bow shock is formed. The PWN is still present, but smaller and distorted. One of the first pulsar bow shock nebulae to be discovered, in Balmer line emission, was the Guitar Nebula, followed by a few others (seen in optical, radio or X-

stato osservato il primo esempio di “coda X disallineata” (“*misaligned X-ray tail*”) proprio nella Guitar Nebula: una struttura apparentemente originata dalla testa del *bow shock*, quasi lineare e molto estesa (~ 1 pc), fortemente disallineata dalla direzione di moto della pulsar e vista solo ai raggi X. Strutture simili sono state in seguito viste in altri sistemi (e.g. la Lighthouse Nebula (2014) e PSR J2030+4415 (2020)). Il nostro gruppo ha lavorato attivamente sulla modellizzazione sia delle sorgenti (recentemente anche con modelli numerici 3D, si veda Fig. 1), che sull’interpretazione delle code X. L’interpretazione comunemente accettata ad oggi si basa su un’idea di uno di noi, secondo cui gli elettroni di più alta energia riescano a fuoriuscire dalla testa del *bow shock* e fluire passivamente lungo le linee del campo magnetico interstellare. Questa ipotesi è stata recentemente confermata grazie a modelli numerici 3D di fuga delle particelle sviluppati da una parte degli altri membri del gruppo.

La connessione delle PWNe evolute con la fuga di particelle, in alcuni casi visibile come alone estesi al TeV attorno alla sorgente piuttosto che come strutture filamentari nei raggi X (come nel caso dell’alone attorno alla PWN Geminga), rende lo studio di queste particolari sorgenti estremamente attuale, di nuovo in connessione con i futuri strumenti gamma.

Accelerazione di particelle in SNR, origine e trasporto dei raggi cosmici nella Galassia

I SNR sono laboratori unici per testare problemi relativi a molti argomenti diversi, come l’evoluzione e la chimica stellare, i processi di emissione, la fisica del plasma e la teoria cinetica.

rays). In 2007, the first example of “misaligned X-ray tail” was observed in the Guitar Nebula: apparently originating from the bow shock head, quasi-linear and extremely extended (~ 1 pc), severely misaligned with respect to the direction of the pulsar and only seen in X-rays. Similar structures were then detected in other systems (e.g. the Lighthouse Nebula (2014) and PSR J2030+4415 (2020)). Our group worked actively on the modelling of both bow shock nebulae (recently also with 3D simulations, see Fig. 1) and of misaligned tails. The commonly accepted interpretation to date is based on the idea that one of us had regarding the fact that the highest energy electrons are able to escape from the bow shock head and passively flow along interstellar magnetic field lines. This hypothesis has been recently confirmed by 3D numerical models of the escape of particles developed by some of the other members of the group.

The link between evolved PWNe with particle escape, in some cases visible as an extended halo at TeVs around the source rather than as filamentary structures in X-rays (as in the case of the halo around the PWN Geminga), makes the study of these particular sources extremely topical, again in connection with future gamma instruments.

Particle acceleration in SNRs, origin and transport of cosmic rays in the Galaxy

SNRs are unique laboratories for testing problems related to many different topics, like stellar evolution and chemistry, emission processes, plasma physics and kinetic theory. Over the years, our group has investigated these sources from different points of view, paying particular

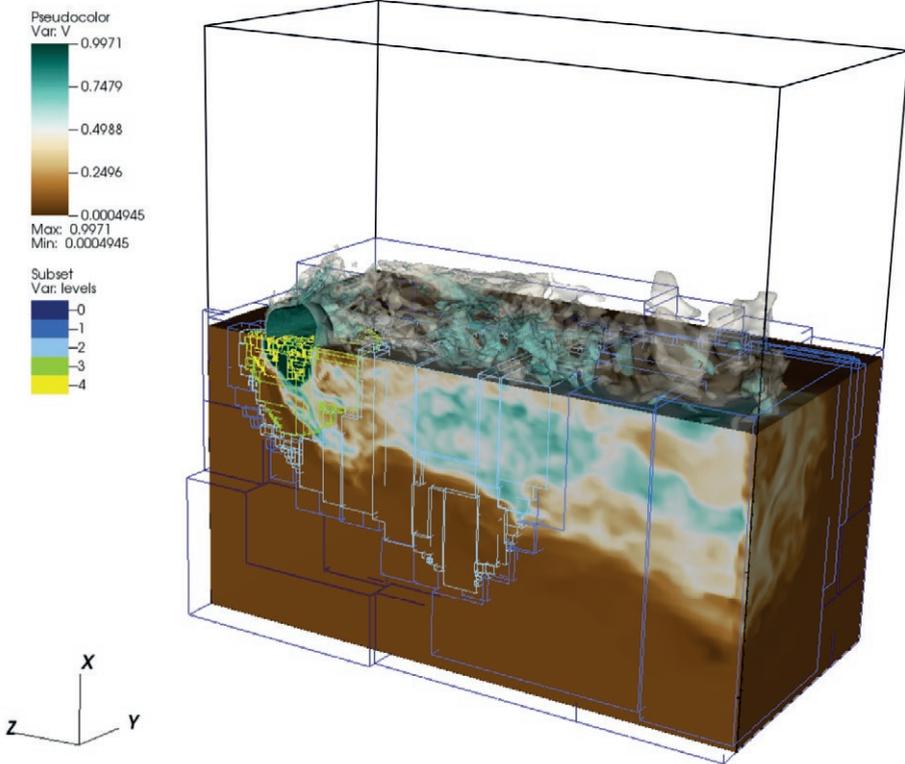


Figura 1. Mappa della magnitudine della velocità del flusso (in unità di c), derivata da una simulazione MHD 3D relativistica di una *pulsar bow shock nebula*. La pulsar è in moto lungo Z . La parte inferiore (colori pieni) rappresenta un taglio 2D lungo i piani ortogonali $X=Y=0$, mentre la parte superiore mostra isocontorni 3D. I rettangoli colorati (secondo la scala di colori più in basso, denominata “levels”) mostrano le zone della griglia numerica (adattiva) a diversa risoluzione. Immagine tratta da Olmi & Bucciantini 2019a.

Figure 1. Map of the flow velocity magnitude (in c units), derived from a relativistic 3D MHD simulation of a pulsar bow shock nebula. The pulsar is moving along Z . The bottom part (solid colours) shows a 2D section along the orthogonal planes $X=Y=0$, while the upper part shows 3D isocontours. The coloured boxes (following the bottom colour scale indicated as “levels”) show the different zones with different resolutions of the (adaptive) numerical grid. Image taken from Olmi & Bucciantini 2019a.

Nel corso degli anni il nostro gruppo ha studiato queste sorgenti sotto diversi punti di vista, con particolare attenzione ai meccanismi di accelerazione delle particelle allo shock, ai meccanismi di fuga e propagazione e al contributo di queste particelle allo spettro di raggi cosmici (CR) Galattici.

Tra i principali risultati del gruppo in questo campo possiamo citare lo sviluppo di un modello cinetico in grado di mappare le popolazioni di atomi neutri sia a valle dello shock che nel precursore che, tramite confronto con le osservazioni (specialmente righe Balmer), permette di stimare direttamente la frazione di energia dello shock che viene convertita in CR; lo studio della propagazione dei CR nella Galassia e gli effetti di feedback delle particelle sul mezzo, come la generazione di instabilità e la possibile amplificazione di campi magnetici turbolenti; il *grammage* (la quantità di materia attraversata dai CR prima di lasciare la Galassia) come vincolo alle condizioni di trasporto dei CR nella Galassia; l'identificazione delle pulsar, in particolare associate a *bow shock nebulae*, come sorgenti primarie dell'eccesso di positroni misurato da PAMELA nello spettro dei CR leptonici.

Accelerazione di particelle dai venti degli ammassi stellari

Un problema fondamentale è l'origine dei CR a più alta energia nella nostra Galassia. Seppur restando i migliori candidati ad essere sorgenti di CR, i SNR tipici riescono a spiegare al massimo particelle fino ad energie di 10-100 TeV, mentre si

attention to the particle acceleration mechanisms at the shock, to the escape and propagation mechanisms and to the contribution of these particles to the Galactic cosmic rays (CRs) spectrum.

Some of the group's major achievements in this field include the development of a kinetic model capable of mapping several populations of neutrals both downstream of the shock and in the precursor which, thanks to comparison with observations (especially Balmer lines), allows the direct estimate of the fraction of the shock energy converted into CRs; the study of CR propagation in the Galaxy and the effects of particle feedback on the ambient medium, such as the formation of instability with possible amplification of turbulent magnetic fields; the *grammage* (the amount of matter traversed by CRs before leaving the Galaxy) as a restriction of the transport conditions of CRs in the Galaxy; the identification of pulsars, especially those associated with bow shock nebulae, as primary sources of the positron excess measured by PAMELA in the leptonic CR spectrum.

Particle acceleration from winds of star clusters

A fundamental problem is the origin of the highest-energy CRs in our Galaxy. While SNRs are still the best candidate CR factories, it has been shown that the effective maximum energy reached during the life of a typical SNR is in the 10-100 TeV range, whereas all CRs below 3 PeV (the so called "knee") in the CR spectrum must be of Galactic origin. Consequently, a quest is open for the Galactic PeVatrons (non-occasional sources of CRs with $E > 1$ PeV). Some

ritiene che tutti i CR ad energie inferiori ai 3 PeV (sotto il cosiddetto “ginocchio”) debbano essere di origine Galattica. Pertanto si è recentemente aperta una caccia ai PeVatroni Galattici (vale a dire fonti non occasionali di CR con $E > 1$ PeV). Recentemente una parte del nostro gruppo si è dedicata proprio alla ricerca di possibili sorgenti alternative ai SNR, dimostrando che sia gli shock terminali in ammassi stellari che le galassie di tipo *starburst* sono candidati perfetti per raggiungere energie di accelerazione fino a centinaia di PeV.

Modelli numerici

Fin dagli anni 2000, grazie anche all’assidua collaborazione con L. Del Zanna, il nostro gruppo si è dedicato allo sviluppo di codici numerici applicati allo studio di sistemi astrofisici relativistici e plasmi relativistici, con molte declinazioni diverse: PWNe giovani o evolute; fuga di particelle; studio di oggetti collassati (tra cui equilibri di magnetars e getti relativistici); instabilità di dinamo relativistiche in dischi di accrescimento spessi attorno a buchi neri rotanti; deformazione di stelle di neutroni secondo teorie tensore-scalare.

Uno sguardo osservativo

Sebbene il gruppo sia sempre stato a traino teorico, non sono mancate, fin dai tempi di Marco Salvati (convolto in progetti di aerostati spaziali per l’astrono-

members of our group recently devoted their attention to the search for possible alternative sources to SNRs, showing that both the terminal shocks of stellar cluster winds and starburst galaxies are perfect candidates for reaching acceleration energies up to hundreds of PeV.

Numerical models

Since the 2000s, thanks partly to assiduous collaboration with L. Del Zanna, our group has worked on the development of numerical codes for high energy astrophysics and very different plasma physics applications: young and evolved PWNe; escape of particles; studies of collapsed objects (including equilibrium solutions in magnetars and relativistic jets); relativistic dynamo instabilities in thick accretion disks around rotating black holes; deformations of neutron stars in scalar-tensor theories.

An observational look

Although the group has always been theory-driven, there has been no shortage of direct involvement in high-profile observational projects since the days of Marco Salvati (involved in space balloon projects for gamma ray astronomy, such as FIGARO I-II and Beppo-SAX). In more recent times, members of the group have played prominent roles in some of the most important experiments/observatories for High Energy astrophysics (as coordinators for CTA

mia gamma, come i FIGARO e Beppo-SAX) i coinvolgimenti diretti in progetti osservativi di alto rilievo. Nei tempi più recenti membri del gruppo hanno infatti avuto ruoli di rilievo in alcuni dei più importanti esperimenti/osservatori per l'astrofisica delle Alte Energie (come coordinatori di gruppi di lavoro in CTA – E. Amato, G. Morlino e B. Olmi – o come responsabile del gruppo di lavoro su PWNe per il polarimetro X della NASA IXPE – N. Bucciantini).

Rino Bandiera è Astronomo Associato in INAF – Osservatorio Astrofisico di Arcetri. Ha iniziato a lavorare ad Arcetri nei primi anni '80. I suoi principali campi di ricerca sono le *pulsar wind nebulae*, i resti di supernova e i processi di accelerazione in questi oggetti.

Barbara Olmi è Ricercatrice in INAF – Osservatorio Astrofisico di Arcetri, dal 2020. I suoi principali campi di interesse sono le *pulsar wind nebulae*, i modelli numerici e i fenomeni di emissione non termica.

working groups – E. Amato, G. Morlino, B. Olmi – or as team leader for the PWNe topical group for the NASA X-ray polarimeter IXPE – N. Bucciantini).

Rino Bandiera is associate astronomer at INAF - Osservatorio Astrofisico di Arcetri. He began working at Arcetri in the early '80s. His main fields of research are pulsar wind nebulae, supernova remnants and acceleration processes in these objects.

Barbara Olmi has been a researcher at INAF - Osservatorio Astrofisico di Arcetri since 2020. Her main research fields are pulsar wind nebulae, numerical models and non-thermal radiation phenomena.