



**Dipartimento Strutture  
Unità Organizzativa Programmazione**

**ANNESSO AL PIANO TRIENNALE  
INAF 2009-2011  
SCIENZA DI BASE**

**MACROAREA 4.  
ASTROFISICA DELLE ALTE ENERGIE E  
RELATIVITA'**



**Sommario:**

- 1. MATERIA IN CONDIZIONI ESTREME..... 4
  - 1.1 Scientific Background ..... 4
  - 1.2 La ricerca in Italia..... 5
    - 1.2.1 Candidati Magnetars: SGRs e AXPs ..... 6
    - 1.2.2 Stelle di Neutroni con Emissione Puramente Termica: XDINSs ..... 9
    - 1.2.3 Sorgenti radio intermittenti: RRaTs..... 9
  - 1.3 Programmi internazionali..... 10
  - 1.4 Programmi nazionali..... 10
  - 1.5 Utilizzazione grandi strutture ..... 10
- 2. FISICA DELL' ACCRESCIMENTO E DELL'ESPULSIONE DI MATERIA .. 12
  - 2.1 Scientific background a livello internazionale ..... 12
  - 2.2 Ricerche in Italia nel campo..... 15
  - 2.3 Utilizzo grandi strutture ..... 19
  - 2.4 Programmi di ricerca italiani..... 20
  - 2.5 Progetti e missioni future ..... 21
- 3. ASTROFISICA DEGLI OGGETTI COMPATTI..... 24
  - 3.1 Background scientifico ..... 24
  - 3.2 La ricerca in Italia negli anni recenti ..... 28
  - 3.3 La ricerca Italiana e Internazionale: prospettive ..... 32
- 4. LE PIU' POTENTI ESPLOSIONI COSMICHE: SUPERNOVAE E GAMMA RAY BURSTS ..... 36
  - 4.1 Scientific Background ..... 36
    - 4.1.1 Supernovae e Cosmologia ..... 36
    - 4.1.2 Supernovae e Gamma-Ray Bursts ..... 37
    - 4.1.3 Gamma Ray Bursts ..... 38
  - 4.2 Contributi italiani (oltre a quelli già citati) e programmi in corso ..... 40
    - 4.2.1 Supernovae di tipo Ia ..... 40
    - 4.2.2 Supernovae Core-Collapse ..... 41
    - 4.2.3 Associazione Supernovae-Gamma Ray Bursts ..... 41
    - 4.2.4 Gamma Ray Bursts ..... 41
  - 4.3 Progetti e Missioni future..... 43



4.4	Ricerche con fondi già assegnati.....	44
4.5	Proposte per progetti che sarebbe importante fare (in ordine di costo).....	45
4.6	Utilizzo delle grandi strutture.....	45
<b>5.</b>	<b>ORIGINE DEI RAGGI COSMICI E MATERIA OSCURA .....</b>	<b>49</b>
5.1	Scientific background a livello internazionale.....	49
5.2	Ricerche in Italia .....	50
5.2.1	Ricerca Teorica.....	51
5.2.2	KASCADE Grande.....	53
5.2.3	Il Pierre Auger Observatory (PAO).....	54
5.2.4	MAGIC .....	56
5.2.5	JEM-EUSO.....	56
<b>6.</b>	<b>FISICA DELLA GRAVITAZIONE E COSMOLOGIA CON L'ASTROMETRIA SPAZIALE DI ALTA PRECISIONE .....</b>	<b>58</b>
6.1	Scientific background .....	58
6.2	Programmi nazionali ed internazionali di attività in corso .....	58
6.3	Progetti che sarebbe estremamente importante fare in Italia .....	59
<b>7.</b>	<b>RIVELAZIONE DI ONDE GRAVITAZIONALI DA SORGENTI ASTRONOMICHE.....</b>	<b>60</b>
7.1	Scientific background a livello internazionale.....	60
7.2	Ricerche in Italia nel campo.....	61
7.3	Utilizzo grandi strutture.....	64
7.4	Programmi di ricerca italiani.....	65
7.5	Programmi di missioni future.....	65



## 1. MATERIA IN CONDIZIONI ESTREME

*Preparato da Roberto Turolla, Dipartimento di Fisica, Università di Padova con il contributo di A. Bonanno, G.L. Israel, S. Mereghetti, A. Possenti*

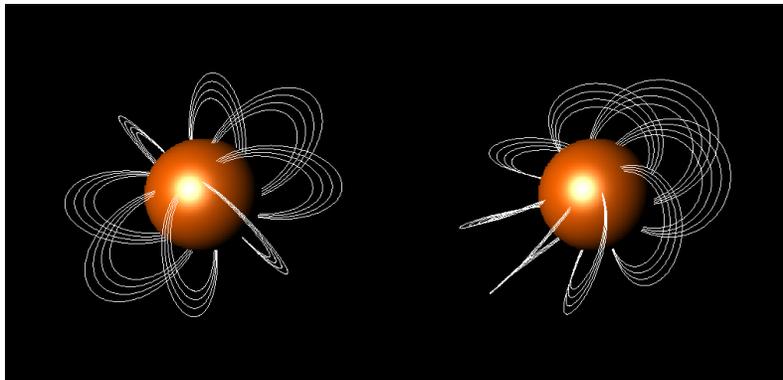
### 1.1 Scientific Background

Le stelle di neutroni rappresentano la fase finale dell'evoluzione di stelle massicce ( $8 \lesssim M \lesssim 25 M_{\odot}$ ) che terminano la loro vita in una core collapse supernova. Tutte le condizioni fisiche in questi oggetti sono estreme. Con densità centrali 5-10 volte la densità nucleare, esse rappresentano una delle forme più dense di materia nell'universo. Inoltre, le stelle di neutroni sono i più intensi magneti conosciuti. Il loro campo magnetico superficiale, tipicamente dell'ordine del TeraGauss, può raggiungere valori 1000 volte superiori nelle cosiddette "magnetars", superando abbondantemente il campo critico quantistico,  $B_Q = 4.4 \times 10^{13}$  G, a cui l'energia di ciclotrone diventa uguale alla massa a riposo. Le stelle di neutroni rappresentano quindi dei laboratori ideali per esplorare le proprietà della materia in condizioni non accessibili ad esperimenti sulla Terra e che non è possibile incontrare in altri contesti astrofisici.

Scoperte originariamente come radio pulsars, le stelle di neutroni isolate (INSs), cioè non facenti parte di sistemi binari, sono state successivamente osservate attraverso l'intero spettro elettromagnetico, fino ai raggi  $\gamma$  di altissima energia, e mostrano una fenomenologia complessa ed estremamente diversificata. In particolare le osservazioni ad alte energie hanno rivelato l'esistenza di nuove classi di INS radio-quiete, la cui esistenza sarebbe passata altrimenti inosservata. Negli ultimi anni, grazie alla migliorata sensibilità dei rivelatori, il numero di INS identificate in banda X è quasi raddoppiato, portando il totale a circa 110 sorgenti. Tale numero è destinato a crescere nel prossimo futuro con la piena operatività dei satelliti gamma AGILE e Fermi. Ad oggi la maggior parte (81 sorgenti) delle INS rivelate in X sono radio-pulsars (PSRs). L'elenco comprende tuttavia anche i Soft Gamma Repeaters (SGRs), gli Anomalous X-ray Pulsars (AXPs), i Central Compact Objects (CCOs) nei resti di supernova, le X-ray Dim Isolated Neutron Stars (XDINSs) e i Rotating Radio Transients (RRaTs). Le prime quattro classi sono state scoperte in banda X.

A differenza dei radio-pulsars, l'emissione di (alcune di) queste nuove classi non appare essere legata al rilascio di energia rotazionale, ma ad altri meccanismi, come il raffreddamento del core della stella e/o al decadimento di un campo magnetico ultra-forte. Uno dei gruppi più interessanti è certamente quello degli AXPs e SGRs, i candidati magnetar, che mostrano sporadici periodi di attività durante i quali emettono brevi ( $t \approx 0.1-1$  s) ed intensi ( $L \approx 10^{40}-10^{41}$  erg/s) bursts di radiazione X dura. I soft  $\gamma$ -repeaters sono anche responsabili dei giant flares, i più intensi fenomeni transienti finora osservati nella Galassia, con luminosità fino a  $10^{47}$  erg/s. La fenomenologia di queste sorgenti può essere spiegata dall'attività magnetosferica indotta da campi magnetici  $B \sim 10^{14}-10^{15}$  G. Recentemente alcuni magnetars sono stati osservati nel radio e mostrano attività transiente non dissimile da quella dei PSRs. Al contrario nessuna attività magnetosferica è osservata nelle XDINSs, sorgenti caratterizzate da emissione puramente termica nella banda X soffice (0.1-1 keV) dovuta al progressivo raffreddamento della loro superficie. SGRs/AXPs e XDINSs offrono l'opportunità di investigare ad un livello impensabile fino a pochi anni or sono aspetti fisici fondamentali, come le proprietà della materia e della radiazione in presenza di campi magnetici super-critici, le caratteristiche della superficie di un INS (distribuzione di temperatura, composizione chimica) e la topologia del campo magnetico. Lo studio dell'emissione termica

superficiale da stelle di neutroni isolate appare particolarmente promettente per ottenere una misura diretta del raggio della stella. Questo, insieme alla determinazione del rapporto M/R, da misure di redshift gravitazionale, è in grado di fornire informazioni sull'equazione di stato e quindi sulle proprietà della materia a densità supra-nucleari.



**Figura 1** Il modello di "twisted magnetosphere" (Thompson, Lyutikov & Kulkarni 2002). Il campo magnetico interno in una magnetar contiene una componente toroidale così intensa da deformare la crosta. Il trasferimento di elicità al campo esterno provoca la comparsa di una componente toroidale che richiede, per essere sostenuta, una corrente di conduzione. Le cariche che fluiscono nella magnetosfera hanno densità abbastanza elevata da rendere efficace lo scattering risonante dei fotoni termici prodotti dalla superficie, dando luogo alla formazione di una coda a legge di potenza nello spettro. Il pannello di sinistra mostra una magnetosfera puramente dipolare (twist nullo), quello di destra una magnetosfera con twist (grafica R. Turolla).

Recentemente alle classi di INS si sono aggiunte due nuove gruppi: i CCOs e i RRaTs. L'esatta natura dei primi, scoperti nell'X al centro di alcuni resti di supernova, è tuttora controversa. I RRaTs, sorgenti caratterizzate da emissione radio intermittente, potrebbero costituire una classe di stelle di neutroni più abbondanti nella Galassia delle stesse PSRs e potrebbero rappresentare l'anello di congiunzione tra queste ultime e altri gruppi (magnetars, XDINSs).

A tutt'oggi non è chiaro se la diversa fenomenologia osservata nei vari gruppi di INS, e quindi la loro stessa classificazione, rifletta differenze intrinseche (ad esempio progenitori con masse diverse o diversi periodi di rotazione e/o campi magnetici nella protostella di neutroni, PNS) oppure sia legata ad un processo evolutivo. Spiegare le diverse manifestazione delle stelle di neutroni isolate, la fisica alla loro base e il legame tra le diverse classi di sorgenti è certamente uno degli obiettivi più importanti dell'astrofisica degli oggetti compatti e può fornire la chiave per la completa comprensione della fase finale dell'evoluzione delle stelle massicce.

## **1.2 La ricerca in Italia**

La comunità scientifica italiana ha dato negli ultimi anni contributi di altissimo livello alla ricerca nel campo delle stelle di neutroni isolate. I ricercatori operano in un contesto internazionale con ampie collaborazioni e la qualità del lavoro trae beneficio dalla sinergia esistente da tempo tra i gruppi osservativi e teorici attivi in Italia. I principali filoni di ricerca, discussi più in dettaglio di seguito, comprendono le osservazioni multi banda (dall'infrarosso ai raggi gamma) di SGRs/AXPs e la relativa modellizzazione, le osservazioni ottiche/X delle XDINSs e dei CCOs e la costruzione di modelli dettagliati per la loro emissione superficiale, le osservazioni radio ed X dei RRaTs e dei magnetars transienti e lo studio comparativo di queste sorgenti in rapporto alle altre classi di INSs.



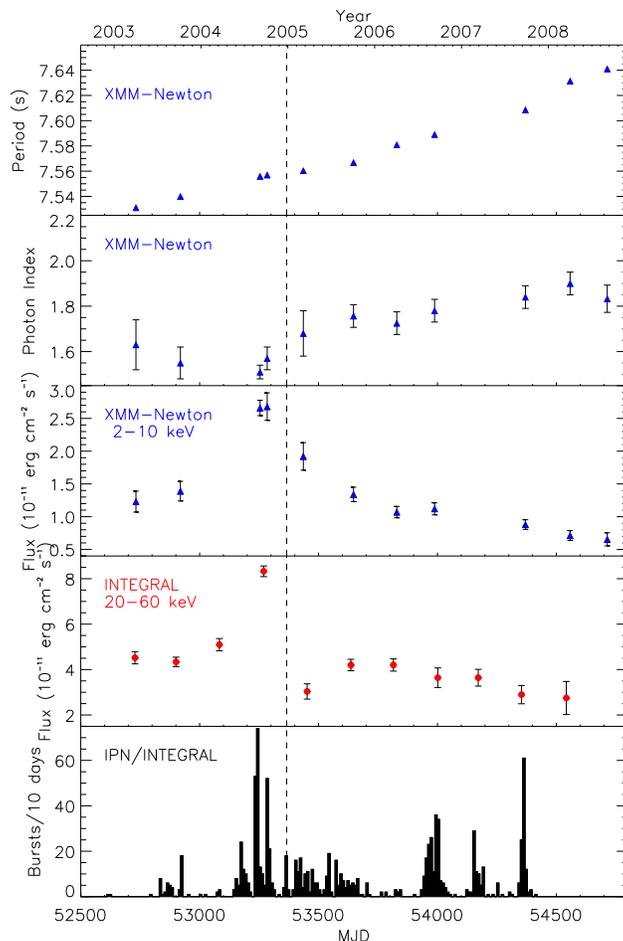
### 1.2.1 *Candidati Magnetars: SGRs e AXPs*

Variabilità temporale e spettrale a lungo termine di SGRs ed AXPs. La ricerca è focalizzata su alcune sorgenti particolarmente interessanti che vengono studiate su una larga banda di energia, principalmente con XMM-Newton ed INTEGRAL, ma anche con Suzaku e Swift.

- Le AXP transienti (TAXP), con il loro manifestarsi attraverso outbursts, permettono di studiare il comportamento di queste sorgenti (e di verificare le teorie finora proposte per l'emissione dagli AXP) su un ampio intervallo di flusso (Israel et al. 2007, Bernardini et al. 2008)
- Lo studio dei processi di emissione in condizioni fisiche estreme che avvengono in una "fireball" confinata magneticamente attraverso l'analisi spettrale su tempi scala brevi (ms) di eventi impulsivi come i bursts o i flares intermedi osservati in alcune SGR (Israel et al. 2008)
- SGR 1806-20 che viene regolarmente monitorato con XMM-Newton ed INTEGRAL per seguire la sua evoluzione dopo il giant flare del dicembre 2004 (Mereghetti et al 2005, 2006; Israel et al. 2005; Rea et al. 2005). Nella decaying tail che ha seguito il Giant Flare sono stati rivelati, per la prima volta, dei QPOs nell'emissione X di una magnetar, riconducibili alle oscillazioni indotte nella crosta della stella di neutroni dall'evento che ha prodotto il Giant Flare (Israel et al 2005a).
- il SGR transiente SGR 1627-41 che dopo essere stato osservato al livello minimo di luminosità (Mereghetti et al 2006), si è recentemente riattivato. Ciò ha consentito di determinare il periodo di rotazione della stella di neutroni mediante una osservazione ToO, nonché l'emissione X del resto di supernova possibilmente associato al repeater (Esposito et al. 2008, 2009).

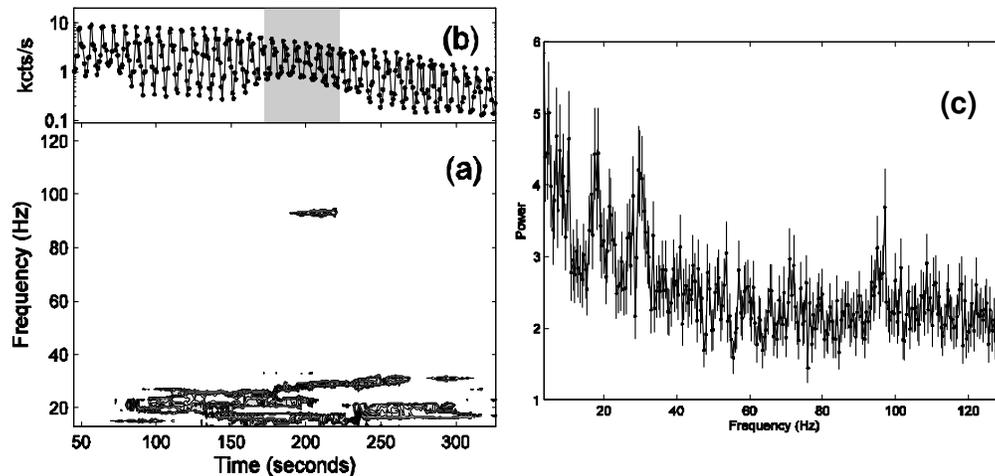
La scoperta delle TAXP ha aperto nuove prospettive nello studio di questa classe, suggerendo l'esistenza di un numero consistente di oggetti dormienti e ancora non rivelati, che presto o tardi si paleseranno tramite una fenomenologia di tipo "outburst". Lo studio delle tre TAXP è principalmente mirato a comprendere i processi di emissione di questi oggetti attraverso lo studio congiunto delle proprietà spettrali e temporali in funzione del flusso (che decade su tempi scala di 2-3 anni). Particolarmente intenso è stato, in questi anni, lo sforzo organizzativo e osservativo per rivelare gli "outburst" delle AXP note o di nuovi oggetti in modo da poter monitorare le fasi iniziali dell'attivazione durante le quali le proprietà variano su tempi scala del giorno. Di fondamentale aiuto è stato il satellite Swift che, solo nel 2008, ha permesso di monitorare due AXP note e scoprire un nuovo SGR, il primo da più di dieci anni.

Sempre il satellite Swift, durante il 2007, ha permesso di effettuare uno studio molto dettagliato, il primo nel suo genere con ottima statistica e su tempi scala del ms, delle "fireball" confinate magneticamente. Lo studio, effettuato sulla sorgente SGR1900+14 è stato di grande impatto avendo verificato indirettamente la presenza e il diverso comportamento dei fotoni polarizzati in modo ordinario e straordinario, come previsto dalla teoria in presenza di intensi campi magnetici che si suppone confinino la radiazione emessa dai magnetars (Israel et al 2008).



**Figura 2** L'evoluzione sul lungo periodo delle proprietà del SGR 1806-20. Dall'alto verso il basso: periodo, indice spettrale della coda di potenza (sotto 10 keV), flusso nelle bande 2-10 (XMM-Newton) e 20-60 keV (INTEGRAL), rate di emissione di bursts. La linea tratteggiata indica il Giant Flare del 27 dicembre 2004. Alcune evidenti correlazioni (flusso-spectral hardness, flusso-bursting activity, period derivative-indice spettrale) sono interpretabili in termini di un aumento del twist magnetosferico prima del Giant Flare e di un successivo untwist (Mereghetti 2008).

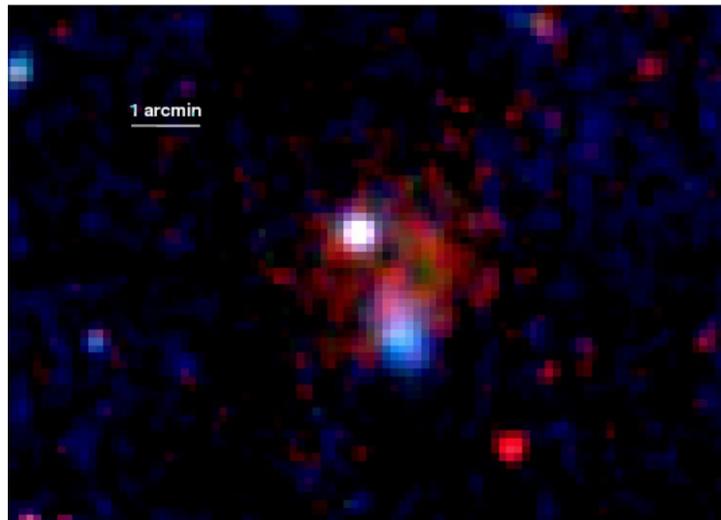
Lo studio delle magnetars si inserisce in un contesto più ampio relativo alle diverse popolazioni di stelle di neutroni, in cui diverse classi di oggetti sono state individuate mediante le osservazioni multifrequenza degli ultimi anni. Le relazioni e possibili legami evolutivi tra le magnetars (AXP e SGR), le sorgenti X al centro di resti di supernova (CCOs) e le XDINSs sono particolarmente interessanti. In questo contesto si inseriscono gli studi sulla sorgente peculiare al centro del resto di supernova RCW 103. Dopo la conferma della periodicità a 6 h (De Luca et al. 2006) è iniziato un monitoring con Swift/XRT per poter triggerare osservazioni XMM in caso di un nuovo outburst, sono state effettuate osservazioni ottiche/infrarosse profonde (De Luca et al. 2008) e sviluppato un nuovo modello teorico basato sulla possibile analogia di questo sistema con le variabili cataclismiche magnetiche (Pizzolato et al 2008).



**Figura 3** QPOs rivelati durante il Giant Flare di SGR 1806–20. Il pannello (a) mostra il power spectrum dinamico dove le frequenze dei QPOs possono essere seguite al variare del tempo. Il pannello (b) mostra la curva di luce della sorgente nello stesso intervallo di tempo. Il pannello (c) mostra il power spectrum nell’intervallo di tempo 200–300 s. I picchi corrispondenti ai QPOs alle frequenze di circa 18, 30 e 95 Hz sono chiaramente visibili. I QPOs sono attribuiti a modi oscillatori indotti nella crosta della stella di neutroni dall’evento cataclismico che ha prodotto il Giant Flare (Israel et al 2005a).

Proprietà spettrali delle magnetars. Lo studio è mirato a costruire modelli spettrali auto consistenti per l’emissione quiescente delle magnetars. Nel quadro del modello di “twisted magnetosphere” (Thompson, Lyutikov & Kulkarni 2002), è stato messo a punto un codice Monte Carlo per il calcolo del trasporto radiativo ed è stato creato un archivio di modelli già implementato in XSPEC per il fit degli spettri osservati (Nobili, Turolla & Zane 2008a). Il codice Monte Carlo è stato generalizzato per includere le sezioni d’urto per scattering completamente relativistiche, indispensabile per trattare l’emissione di alta energia di SGRs e AXPs (le code dure 20-200 keV rivelate da INTEGRAL) e configurazioni magnetiche multipolari (Nobili, Turolla & Zane 2008b; Pavan et al. 2009).

Generazione del campo magnetico nelle INS. Si è proposto un nuovo paradigma che spiega la generazione del campo magnetico nella fase di PNS tramite un fenomeno dinamo operante con l’instabilità neutron-finger. A differenza dello scenario classico alla Duncan & Thompson (1992) che lavora ad alti numeri di Rossby, la neutron-finger dinamo è operativa a bassi numeri di Rossby ed è quindi capace di generare un campo magnetico globale (Bonanno, Urpin & Belvedere 2006; Naso et al. 2008). Grazie ad una azione Marie Curie FP6 (TOK-COSMOCT) è stata quindi finanziata una linea di ricerca che ha come obiettivo lo studio in generale delle instabilità MHD in diversi ambienti astrofisici, ed in particolare lo studio delle possibili azioni dinamo nelle PNS. E’ interessante notare che alcune predizioni osservative di questo modello sono state recentemente riscontrate.



**Figura 4** Immagine del campo di SGR 1627–41 ottenuta con XMM EPIC/pn. SGR1627–41, che appare in bianco, è la sorgente più brillante. L’immagine rivela l’emissione X diffusa proveniente dal resto di supernova G337.0–0.1, visibile soprattutto nella banda X soffice (rosso). Il resto di supernova è probabilmente associato al SGR (Esposito et al 2009) .

### ***1.2.2 Stelle di Neutroni con Emissione Puramente Termica: XDINSs***

La ricerca osservativa sulle XDINSs si è concentrata principalmente su due sorgenti, RX J0720.4-3125 e RBS 1774. RX J0720.4-3125 è l’unica tra le sette XDINSs note che mostra variabilità. L’evoluzione dei parametri spettrali e delle proprietà di timing di questa sorgente, monitorata grazie a XMM su un arco di anni, è legata alla precessione della stella di neutroni con un periodo di circa 10 yrs (Haberl et al 2006; Hohle et al 2008). Si tratta del terzo caso in assoluto in cui la precessione viene osservata in una INS ed il primo in banda X. Il puntamento XMM dedicato ha dimostrato che RBS 1774 è la settima XDINS ed ha consentito di determinarne il periodo e di rivelare la presenza di una profonda riga in assorbimento, osservata anche in altre sorgenti di questa classe e in un RRaT (Zane et al. 2005). La stima del campo magnetico derivata dall’energia della riga è  $\sim 10^{14}$  G. vicino a quello dei magnetars. Un’osservazione VLT ha permesso di identificare la controparte ottica di RBS 1774 (Zane et al. 2008).

Lo studio teorico è stato essenzialmente rivolto alle proprietà di emissione della superficie. In particolare, è stato mostrato come lo spettro prodotto da una superficie solida (bare neutron star) sia molto vicino ad un black body (al contrario di quello emesso da un’atmosfera) e possa rendere conto degli spettri termici osservati nella banda 0.1-2 keV dalle XDINSs (Turolla, Zane & Drake 2004). Uno studio sistematico dei pulse profiles delle XDINSs ed un confronto con quelli prodotti da una distribuzione superficiale di temperatura prodotta da un campo magnetico dipolare/quadrupolare ha dimostrato che il campo esterno in queste sorgenti ha necessariamente una topologia più complessa di un semplice dipolo (Zane & Turolla 2006).

### ***1.2.3 Sorgenti radio intermittenti: RRaTs***

I ricercatori italiani sono stati in prima linea fin dall’inizio nell’indagine scientifica su queste sorgenti, avendo dapprima partecipato (oltre il 20% del team internazionale è italiano) all’esperimento (la Parkes Multibeam Survey del piano galattico) che condusse alla loro scoperta (McLaughlin et al. 2006) ed essendo poi stati coinvolti nell’identificazione nei raggi X della controparte del RRaT J1819-1458 (Reynolds et al 2006). In particolare, l’esame del suo spettro



(Reynolds et al. 2006; McLaughlin et al 2007), e l'osservazione di pulsazioni in banda X allo stesso periodo predetto dalle effemeridi radio (McLaughlin et al 2007) hanno definitivamente provato che queste sorgenti sono stelle di neutroni. L'obiettivo dei ricercatori italiani si è dunque spostato sulla ricerca di un legame osservativo e/o evolutivo fra i RRaTs e altri tipi di stelle di neutroni, con particolare riferimento alla classe delle XDINS e delle Magnetars. In particolare, lo studio teorico delle popolazioni di queste sorgenti (Popov, Turolla & Possenti 2006) ha suggerito che i RRaTs siano oggetti simili alle XDINSs, ma troppo lontani per essere osservabili nei raggi X con gli attuali strumenti. L'osservazione in banda radio di una emissione dalle XDINSs simile a quella dei RRaTs comproverebbe questa ipotesi. E' stata dunque progettata una vasta campagna osservativa (PI Possenti a GBT e GMRT, PI Burgay a Parkes) che ha ottenuto una notevole mole di tempo presso i maggiori radio telescopi del mondo. L'analisi dei dati (Burgay et al 2007, AIPC 924, 607; Joshi 2008, COSPAR37, 1409; Kondratiev et al 2008, AIP 983, 348) è in corso. L'ipotesi di una connessione fra RRaTs e magnetar (che presentano ben definite caratteristiche in banda IR, e.g. Israel et al 2005b) è stata invece indagata (PI Possenti) compiendo osservazioni profonde in banda infrarossa di alcuni RRaTs presso il VLT.

### **1.3 Programmi internazionali**

Nel quadro dello studio dei RRaTs, il più importante esperimento dei prossimi anni sarà la HITRUN survey presso il radiotelescopio di Parkes. Si tratta un progetto imponente (oltre 5000 ore di telescopio nel quadriennio 2009-2011) che vanta due scopi scientifici principali: raddoppiare il campione di pulsar velocemente rotanti (come discusso in altra parte di questo rapporto) ed effettuare la prima survey profonda e completa di tutto il cielo sud alla ricerca di emissioni radio rapidamente transienti, come appunto quella dei RRaTs. La partecipazione italiana in HITRUN è rilevante sia a livello umano (25% del team internazionale) sia per le nuove attrezzature che sono state installate a Parkes per condurre l'esperimento.

HITRUN: Ricerca di pulsar col telescopio di Parkes. PI M.Bailes, S.Johnston, M.Kramer, A.Possenti. Istituti: OACa (Italia), Swinburne University (Australia), University of Sydney (Australia), University of Manchester (UK). Partecipazione italiana: 25%. Inizio: nov 2008. Termine: 2012.

### **1.4 Programmi nazionali**

La ricerca nell'ambito delle stelle di neutroni isolate partecipa a progetti a livello nazionale:

Studio di Astrofisica delle Alte Energie (INAF-ASI), titolo: Spectral and Timing Properties of Isolated Neutron Stars, Magnetars, and Related Objects, PI: R. Turolla, istituti partecipanti: Università di Padova, INAF Roma, INAF Cagliari, durata: triennale (2007-2009)

Studio di Astrofisica delle Alte Energie (INAF-ASI), titolo: Study of Periodic and Aperiodic Variability of Cosmic X-ray Sources: Data mining in a Decade of Chandra/RXTE/Swift/XMM Databases, PI: G.L. Israel, istituti partecipanti: INAF Roma, INAF MI-Brera, durata: triennale (2007-2009)

### **1.5 Utilizzazione grandi strutture**

- **Satelliti per l'osservazione in banda X.** Come già accennato nella sezione 1, lo studio delle INSs è fondamentalmente basato sulla rivelazione della loro emissione di alta energia. La comunità scientifica italiana conduce da tempo un'intensa attività osservativa con tutti i



satelliti attualmente operativi in banda X: XMM-Newton, Swift., Chandra, Suzaku e Rossi XTE.

- **Satelliti per l'osservazione in banda  $\gamma$ .** L'utilizzo di INTEGRAL, grazie anche alla partecipazione italiana al core program, ha permesso di acquisire informazioni fondamentali sull'emissione persistente e di bursts ad energie  $> 20$  keV dei candidati magnetars (SGRs e AXPs).
- **Telescopi ottici.** Osservazioni da terra e dallo spazio (con VLT, Gemini, HST) sono correntemente effettuate per la rivelazione delle controparti ottiche/IR di SGRs/AXPs, XDINSs e RRaTs al fine di caratterizzare la SED di queste sorgenti.
- **Radiotelescopi.** L'osservazione in banda radio di di SGRs/AXPs, XDINSs e RRaTs è condotta presso i maggiori radiotelescopi (Parkes, GBT e GMRT)

### Bibliografia

- Bernardini, F., Israel, G.L., Dall'Osso, S. et al 2009, A&A, in press  
Bonanno, A., Urpin, V., Belvedere, A. 2006, A&A, 451, 1049  
De Luca, A., Caraveo, P.A., Mereghetti, S. et al 2006, Science, 313, 814  
Duncan, R.C., Thompson, C. 1992, ApJ, 392, L9  
Esposito, P., Israel, G.L., Zane, S. et al 2008, MNRAS, 390, L34  
Esposito, P., Tiengo, A., Mereghetti, S. et al 2009, ApJ, 690, 105  
Haberl, F., Turolla, R., de Vries, C.P. et al 2006, A&A, 451, L17  
Hohle, M.M, Haberl, F., Vink, J. et al 2008, A&A, submitted  
Israel, G.L., Belloni, T., Stella, L. et al 2005a, ApJ, 628, L53  
Israel, G., Covino, S., Mignani, R. et al 2005b, A&A, 438, L1  
Israel, G.L., Campana, S., Dall'Osso, S. et al 2007, ApJ, 664, 448  
Israel, G.L., Romano, P., Mangano, V. et al. 2008, ApJ, 685, 1114  
McLaughlin, M.A., Lyne, A.G., Lorimer, D.R. et al 2006, Nature, 439, 817  
McLaughlin, M. A., Rea, N., Gaensler, B. M. et al. 2007, ApJ, 670, 1307  
Mereghetti, S., Tiengo, A., Esposito, P. et al 2005, ApJ, 628, 938  
Mereghetti, S, Esposito, P., Tiengo, A. et al 2006, A&A 450, 759  
Mereghetti, S. 2008, A&A Rev., 15, 225  
Naso, L., Rezzolla, L., Bonanno, A. et al 2008, A&A, 479, 167  
Nobili, L., Turolla, R., Zane, S. 2008a, MNRAS, 386, 1527  
Nobili, L., Turolla, R., Zane, S. 2008b, MNRAS, 389, 989  
Pizzolato, F., Colpi, M., De Luca, A. et al 2008, ApJ, 681, 530  
Popov, S.B., Turolla, R., Possenti, A. 2006, MNRAS, 369, L23  
Pavan, L., Turolla, R., Zane, S. et al, 2009, MNRAS, in press  
Rea, N., Tiengo, A., Mereghetti, S. et al 2005, ApJ, 627, L133  
Reynolds, S.P., Borkowski, K.J.; Gaensler, B.M. et al 2006, ApJ, 639, L71  
Thompson, C., Lyutikov, M., Kulkarni, S.R. 2002, ApJ, 574, 332  
Turolla, R., Zane, S., Drake, J.J. 2004, ApJ, 603, 265  
Zane, S., Cropper, M., Turolla, R., et al 2005, ApJ, 627, 397  
Zane, S., Turolla, R. 2006, MNRAS, 366, 727  
Zane, S., Mignani, R.P., Turolla, R. et al 2008, ApJ, 682, 487

## 2. FISICA DELL'ACCRESIMENTO E DELL'ESPULSIONE DI MATERIA

*Preparato da Tomaso Belloni, con il contributo di F. Tavecchio, G. Matt, L. Foschini, M. Calvani, F. Capitanio, M. Cocchi, F. De Felice, M. Del Santo, D. De Martino, A. De Rosa, R. Farinelli, R. Iaria, M. Orio, A. Paizis, E. Pian, C. Raiteri, L. Sidoli, A. Wolter, L. Zampieri*

### 2.1 Scientific background a livello internazionale

La problematica dell'accrescimento su oggetti compatti e la espulsione di getti relativistici può essere suddiviso in tre sezioni: la prima riguarda le sorgenti blazar, in cui il getto domina il sistema, la seconda le binarie X e gli AGN non "beamed," in cui le proprietà di accrescimento e getto sono strettamente legate, e la terza sono le binarie contenenti oggetti compatti per quanto riguarda le proprietà specifiche dell'accrescimento.

Lo studio dei getti relativistici extragalattici si concentra sulle sorgenti note come blazars, caratterizzate dal piccolo angolo tra l'asse del getto e la Terra. Con questa geometria, l'emissione non termica (sincrotrone e Compton inverso) prodotta nel getto (che si estende su tutto lo spettro elettromagnetico, dal radio ai raggi gamma) risulta estremamente amplificata dagli effetti relativistici e domina in quasi tutte le bande.

In linea di principio i blazar permettono di affrontare molte questioni fondamentali relative alla formazione e alla dinamica dei getti relativistici, alla connessione tra getto e flusso di accrescimento, all'accelerazione di particelle energetiche nei plasmi (Blandford 2001). Data l'estrema ampiezza dello spettro emesso dai blazar e la loro estrema variabilità, uno spazio considerevole nello studio di queste sorgenti è quello relativo all'organizzazione di campagne osservative che coinvolgono diversi strumenti, sia da terra che dallo spazio. In questo campo l'Italia svolge un ruolo di primo piano (vedi sotto).

Negli anni recenti, la messa in opera di nuova strumentazione per osservare radiazione gamma sia da Terra (telescopi Cherenkov: HESS, MAGIC, VERITAS) che dalla spazio (AGILE, Fermi), ha fatto decisamente orientare il fuoco della ricerca sulla emissione di altissima energia. In questo ambito nell'ultimo quinquennio si sono avuti risultati estremamente interessanti, tra cui i) l'estensione sia numerica che tipologica del gruppo dei blazar noti alle altissime energie, ii) la scoperta (MAGIC) di emissione TeV da un quasar a redshift relativamente

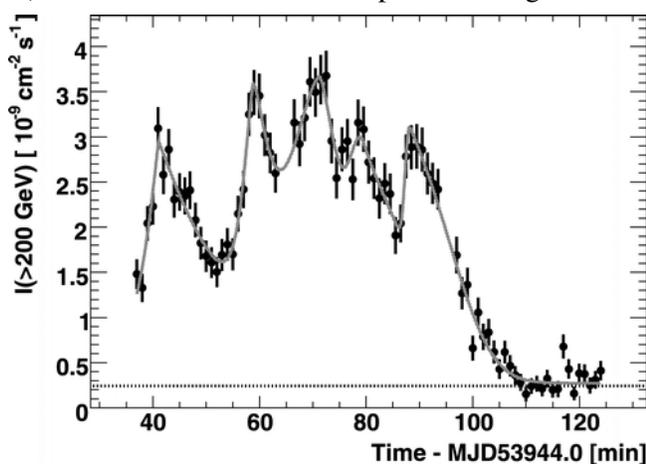


Figura 1: Curva di luce in banda TeV del blazar PKS 2155-304 ottenuta dalla collaborazione H.E.S.S. nel luglio 2006. Si osservano variazioni del flusso su tempi scala di 200 secondi, difficili da riconciliare con il modello standard elaborato per queste sorgenti.

elevato ( $z=0.536$ , Albert et al. 2008) e da alcune radiogalassie (HESS, MAGIC) e iii) l'osservazione di fasi di estrema emissione gamma in blazar da parte di AGILE e Fermi (in particolare i flare di 3C454.3 osservati da AGILE, Vercellone et al., 2008, 2009). Una nuova fase dello studio di queste sorgenti sarà certamente inaugurata dall'accesso pubblico a tutti i dati di Fermi previsto a partire dall'agosto 2009, al termine del primo anno di osservazioni. Le osservazioni in banda gamma, unite a quelle nelle band a UV e X garantite da Swift permetteranno di avere informazioni senza precedenti sull'evoluzione dell'emissione dei blazar, con un probabile drammatico impatto sui modelli interpretativi.

Tra le scoperte più significative in questo campo è sicuramente da menzionare la variabilità del flusso emesso su tempi scala dei minuti osservata da HESS e MAGIC nei blazar PKS 2155-304 e Mkn 501 (Aharonian et al., 2007; Albert et al. 2007; Fig. 1). Questi eventi, con tempi di salita attorno a due minuti, implicano che l'emissione provenga da regioni molto compatte e/o in moto estremamente rapido (Begelman et al. 2008; Ghisellini & Tavecchio 2008), mettendo a dura prova gli schemi interpretativi fin qui sviluppati.

In questo filone l'Italia gioca un ruolo da protagonista, grazie da una parte ad AGILE e alla importante partecipazione (INFN e INAF) alle collaborazioni GLAST-Fermi e MAGIC e, dall'altra, alla importante componente teorico-interpretativa.

Il modello di riferimento per gli AGN radio quieti prevede l'accrescimento di materia sul buco nero centrale attraverso un disco di plasma che si estende presumibilmente fino all'ultima orbita stabile e che si pensa sia responsabile dell'emissione ottica/UV, e la presenza di una corona a alta temperatura (dell'ordine di  $10^8$  K) che emette principalmente nei raggi X duri e generata per Comptonizzazione termica di elettroni sui fotoni UV/X molli. Su quest'ultima, la mancanza di osservazioni di qualità superiore nei raggi X duri non ha permesso significativi avanzamenti di conoscenza rispetto al quadro delineato da BeppoSAX: per passare da una semplice stima della temperatura alla misura di effetti più sottili, legati alla geometria della corona, bisognerà aspettare telescopi in grado di focalizzare i raggi X duri (NuStar, ASTRO-H, Simbol-X).

Significativi progressi sono stati invece compiuti nello studio delle righe del ferro distorte da effetti di relatività generale ("righe relativistiche"). Grazie a numerose osservazioni di alta qualità ottenute da XMM-Newton, è stato possibile stimare la frazione di oggetti in cui queste righe sono presenti al livello di flusso previsto; questa frazione è risultata essere del 30-50% (Nandra et al. 2007, De La Calle et al. 2009). Questo risultato mostra, da un lato, come le righe relativistiche siano relativamente comuni, ma dall'altro come siano assenti in numerose sorgenti, contrariamente al previsto. La ragione non è chiara: tra le possibili spiegazioni vi sono una estrema ionizzazione della materia oppure il troncamento del disco a raggi ben più elevati dell'ultima orbita stabile. Nessuna spiegazione è però, al momento, del tutto soddisfacente. Sono state poi osservate righe del ferro variabili

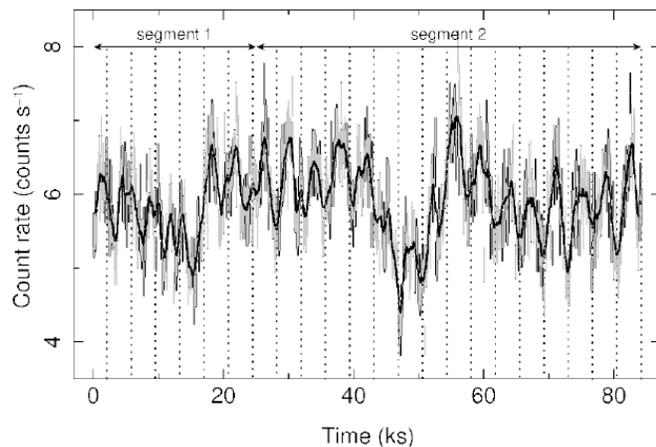


Figura 2: QPO osservata con XMM-Newton da RE J1034+396. Il periodo dell'oscillazione è di circa un'ora (Gierlinski et al. 2008).



in forma possibilmente periodica (Iwasawa et al. 2004, Tombesi et al. 2007). Anche se queste misure non possono ancora essere considerate incontrovertibili, aprono l'interessante possibilità di poter misurare la massa del buco nero centrale (e.g. Dovciak et al. 2004). Riguardo l'uso della riga del ferro per determinare i parametri del buco nero, e segnatamente il suo momento angolare, non ci sono stati significativi passi avanti. Al momento MCG-6-30-15 rimane l'unica sorgente per la quale ci sono convincenti evidenze che il buco nero sia rotante. Del tutto aperta è anche la questione dell'origine del cosiddetto "soft excess", una componente spettrale che appare nei raggi X molli. Riflessione da disco parzialmente ionizzato (Crummey et al. 2006) e assorbimento da un vento a velocità relativistiche (Done & Gierlinski 2004) sono le ipotesi più popolari, ma nessuna delle due è pienamente soddisfacente; il modello di assorbimento è stato mostrato essere probabilmente inadeguato dallo stesso gruppo che lo ha proposto (Schurch et al. 2009).

Probabilmente il risultato più interessante riguardo i processi di accrescimento è stato la prima convincente scoperta, ottenuta con Newton/XMM, di una Oscillazione Quasi-Periodica (QPO) in un AGN, RE J1034+396 (Gierlinski et al. 2008; Figura 2). Il periodo osservato suggerisce che l'emissione provenga da regioni molto vicine al buco nero centrale, quindi questa QPO può essere considerata l'analogo delle QPO ad alta frequenza (70-450 Hz) osservate nelle binarie X contenenti un buco nero e conferma che i fenomeni di accrescimento nelle due classi di sorgenti sono molto simili, a dispetto della enorme differenza nella massa dell'oggetto compatto.

Espulsione di materia sotto forma di venti ad altissime velocità (come evidenziato da righe di emissione fortemente spostate verso le alte energie) sono anche state osservate, soprattutto in oggetti con alto tasso di accrescimento. Queste misure sono però ancora controverse e andranno confermate con strumenti futuri di maggiore sensibilità. Va anche menzionato il risultato di Krongold et al. (2007) che, applicando un modello non di equilibrio al materiale ionizzato circostante il nucleo della galassia di Seyfert NGC 4051, hanno per la prima volta potuto stimare la distanza dal centro di tale materiale, che è risultata essere dell'ordine del giorno-luce. Hanno potuto quindi anche stabilire che la velocità di espulsione è inferiore, anche se non di molto, alla velocità di fuga a quella distanza.

Importanti risultati sono stati ottenuti nell'ambito della unificazione delle proprietà di accrescimento/eiezione in binarie X e AGN. Da una parte, l'unificazione delle proprietà degli outburst delle black hole binaries ha aperto la via al confronto con l'emissione X degli AGN (Fender, Belloni & Gallo 2004). Inoltre, nuove correlazioni che legano sistemi stellari a sistemi supermassivi sono state trovate mettendo in collegamento frequenze caratteristiche di variabilità e parametri fondamentali come massa del buco nero e tasso di accrescimento (McHardy et al. 2006; Kōrding et al. 2007). Queste relazioni indicano la presenza di leggi di scala nelle proprietà di accrescimento ed emissione di jet, leggi che si applicano non soltanto a buchi neri di diversa massa, ma anche a stelle di neutroni. Recentemente, è stata ottenuta un'indicazione che anche sistemi in accrescimento molto diversi come variabili cataclismiche possono essere interpretate nell'ambito di simili correlazioni (Kōrding et al. 2008).

Lo studio delle proprietà spettrali e temporali delle binarie X negli ultimi anni ha subito una forte espansione grazie alla presenza simultanea di strumenti per astronomia X con caratteristiche diverse: copertura di tutto il cielo (RXTE/ASM, Swift/BAT), alta risoluzione spettrale (Chandra, XMM-Newton), ampia banda di energia (RXTE, INTEGRAL, Suzaku) e in particolare missioni ad alto grado di flessibilità (RXTE, Swift).



Per quanto riguarda le LMXB contenenti stelle di neutroni, sono diversi i risultati importanti degli ultimi quattro anni. Uno dei risultati più importanti ottenuti con Rossi-XTE è stato la scoperta delle millisecond pulsar in accrescimento, l'anello mancante fra le LMXB brillanti e le pulsar radio al millisecondo. Una domanda importante rimane senza risposta: perché le pulsazioni sono osservate in alcuni sistemi (poco brillanti)? Una nuova finestra su questo problema è stata aperta nel 2008, con la scoperta delle pulsazioni intermittenti da binarie con stelle di neutroni. Il transiente brillante Aquila X-1 ha mostrato pulsazioni coerenti per 150 secondi su una esposizione totale di 1.3 Ms con RXTE (Casella et al. 2008), mentre SAX J1748.9-2021 ha evidenziato pulsazioni che appaiono e scompaiono su tempi scala di centinaia di secondi (Altamirano et al. 2008). La distinzione fra LMXB pulsanti e non pulsanti viene così sfumata e si apre la strada per nuovi modelli per le pulsar in accrescimento.

Nel 2006, un nuovo transiente molto brillante è stato scoperto e monitorato estensivamente con RXTE. Il sistema è risultato essere una sorgente di tipo 'Z', la classe di LMXB più brillanti (Homan et al. 2007). Soltanto sei sorgenti questo tipo erano conosciute, tutti persistenti. XTE J1701-462, seguito durante l'outburst fino allo stato di quiescenza, ha permesso di stabilire definitivamente una gerarchia in ordine di tasso di accrescimento per le varie classi di LMXB, risolvendo un problema aperto da più di vent'anni (Homan et al. 2009).

Righe di emissione del ferro molto allargate sono state osservate negli spettri X di diverse black hole binaries. Il loro allargamento è attribuito a effetti relativistici associati al moto Kepleriano nel disco di accrescimento interno. Le loro misure stanno permettendo le prime stime del momento angolare dei buchi neri. Negli ultimi anni, a partire dai risultati ottenuti nel 2005 da un gruppo comprendente astronomi INAF (Di Salvo et al. 2005), sono state scoperte righe allargate in diverse LMXB con stelle di neutroni, analoghe a quelle osservate in sistemi con buchi neri (vedi Cackett et al. 2008, 2009). Queste osservazioni sono molto importanti perché da una parte permettono lo studio dettagliato delle distorsioni relativistiche di queste righe e dall'altra forniscono una misura del raggio interno del disco di accrescimento indipendente da quella ottenuta dall'analisi della variabilità, fornendo una verifica dei modelli per quest'ultima.

Per quanto riguarda le binarie con buchi neri, il paradigma comunemente accettato che interpreta gli spettri di energia nello stato hard come originati da un disco di accrescimento "ritratto," con un raggio interno molto maggiore dell'ultima orbita stabile è stato messo in dubbio da nuovi risultati ottenuti mediante osservazioni combinate con XMM-Newton, Rossi-XTE e Swift. Una componente di disco termico è stata rivelata in diverse sorgenti nello stato hard, con una stima del raggio interno del disco comparabile con l'ultima orbita stabile intorno a un buco nero (Miller et al. 2006a,b; Rykoff et al. 2007). Se confermato (ci sono affermazioni contrastanti), questo risultato avrà un'influenza profonda sui modelli teorici per il flusso di accrescimento intorno a buchi neri, in quanto esclude la validità dei modelli ADAF e suggerisce una geometria di accrescimento molto diversa.

## **2.2 Ricerche in Italia nel campo**

Come menzionato, l'Italia gioca un ruolo di primo piano nello studio dei getti extragalattici e in particolare nei blazar. Dal punto di vista osservativo particolarmente rilevanti sono gli studi multifrequenza di blazar (in particolare nelle bande radio, ottico, X e gamma) che coinvolgono diverse strutture INAF (OATs, IASF-Pa, IASF-Bo, OABr, OATo, IASF-Mi) e Università (Insubria, Perugia). L'Italia ha una posizione di leadership nel monitoraggio ottico, avendo un ruolo di primo

piano nel consorzio di telescopi medio/piccoli GASP-WEBT. Risultati recenti si trovano in Raiteri et al. 2008, Villata et al. 2008, Foschini et al. 2007, 2008, Pian et al. 2006, 2007.

Particolare rilevanza in questo ambito hanno gli studi condotti con AGILE e REM (completamente italiani) da una parte, e Swift, Fermi e MAGIC (con essenziale contributo italiano) dall'altra. Per questi ultimi, il coinvolgimento qualificato di INAF nello sfruttamento dei dati scientifici è assicurato dalla presenza di diversi ricercatori nelle relative collaborazioni internazionali.

Uno dei risultati recenti più interessanti è stata l'osservazione da parte di AGILE di stati molto brillanti del blazar 3C454.3 (Vercellone et al. 2008, 2009; Figura 3). Osservazioni coordinate con Swift e da Terra hanno permesso di avere un'ottima descrizione della distribuzione spettrale di energia durante queste fasi. Queste osservazioni supportano un modello in cui la potenza trasportata dal getto rimane costante, mentre la forma della SED dipende dalla posizione della regione di emissione lungo il getto (Ghisellini et al. 2007).

Dal punto di vista teorico-interpretativo la posizione italiana è ottima, specialmente per quanto riguarda la modellizzazione dell'emissione dei blazars (e più in generale dei getti extragalattici; OABr, SISSA) che la simulazione numerica della formazione e della dinamica dei getti relativistici (OATo). Da segnalare anche lo studio, sia osservativo che interpretativo, dell'emissione multifrequenza di getti a grande scala (>100 kpc), campo in rapida evoluzione dopo le scoperte avviate da Chandra.

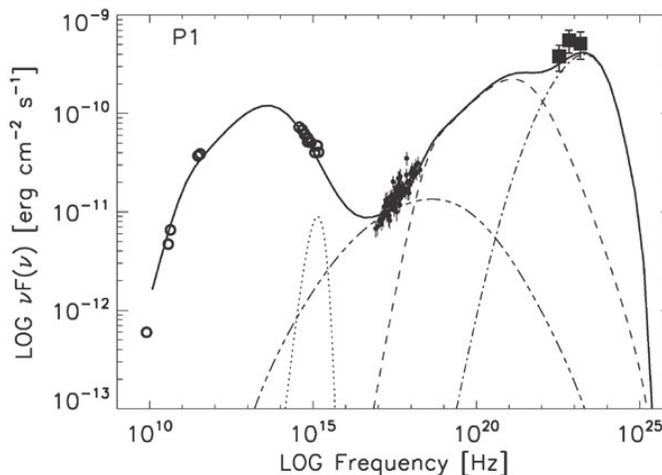


Figura 3: Distribuzione spettrale di energia del blazar 3C454.3 nel luglio 2007 ottenuta combinando osservazioni AGILE/GRID, Swift/XRT e dati ottico-UV. Le curve rappresentano il modello (sincrotrone e Compton inverso) usato per riprodurre i dati (da Vercellone et al. 2009).

L'insieme di queste ricerche ha portato ad avanzamenti notevoli delle conoscenze relative alla dinamica dell'emissione dei blazar e ad una valutazione piuttosto affidabile della potenza associata alla propagazione dei getti relativistici (per es. Tavecchio et al. 2007; Celotti & Ghisellini 2008), con la possibilità di confrontare quest'ultima con quella associata al flusso di accrescimento, primo passo verso una comprensione più profonda della connessione tra i due fenomeni.

Per quanto riguarda gli AGN radio-quieti, il contributo italiano è stato primario. Nella galassia di Seyfert NGC 1365, Risaliti et al. (2005a) hanno scoperto l'esistenza di elevato assorbimento variabile su tempi scala anche di ore. Questa scoperta ha permesso di stabilire l'esistenza di dense nubi di materia "fredda" in prossimità del nucleo, presumibilmente (come dedotto da un evento di "eclissi") nelle Broad Line Regions (BLR; Risaliti et al. 2008).

Bianchi et al. (2008), utilizzando osservazioni simultanee nell'X (XMM-Newton) e nell'ottico, hanno scoperto la prima Galassia di Seyfert 2 "vera" (NGC 3147), dove cioè la mancata osservazione delle BLR non è ascrivibile ad oscuramento, ma indica l'effettiva assenza di tali regioni. Questa osservazione sembra dare supporto a modelli che suggeriscono che le BLR non si formino a bassi tassi di accrescimento.

Riguardo i processi di espulsione di materia, il risultato più eclatante riguarda ancora NGC 1365, dove Risaliti et al. (2005b) hanno osservato, con XMM-Newton, righe del ferro altamente ionizzate in materiale di elevato spesso ottico che si allontana dal nucleo a velocità (variabili) dell'ordine delle migliaia di km/s. È questa la prima evidenza incontrovertibile di materiale espulso a tali elevate velocità. Evidenza di righe di assorbimento sia blue- che red-shifted in Mrk 509 è stata trovata nello stesso periodo da Dadina et al. (2005).

Inoltre ricercatori italiani hanno collaborato agli studi statistici sulle righe relativistiche e a quello sul materiale ionizzato di NGC 4051.

L'attività relativa a sorgenti in accrescimento di massa stellare si articola su diversi filoni.

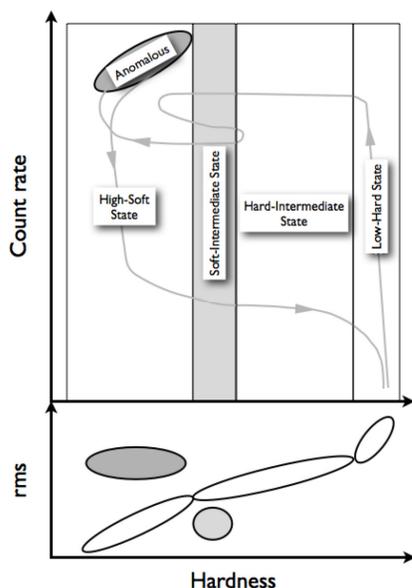


Figura 4: diagrammi colore-intensità e colore-variabilità di un tipico transiente BH (da Belloni 2009).

Lo studio dell'emissione in raggi X duri delle LMXB è molto importante e direttamente legato alla presenza di getti relativistici. Negli ultimi anni, sono state scoperte code dure negli spettri delle LMXB con stelle di neutroni, analoghe a quelle osservate nei candidati buchi neri. La ricerca osservativa su queste componenti è molto attiva sia dal lato NS (vedi e.g. Di Salvo et al., 2006, D'Ai et al. 2007, Piraino et al. 2007) che da quello BH (Del Santo et al. 2008a, 2009; Bouchet et al. 2009)

Una modellizzazione al di là delle forme empiriche normalmente usate viene portata avanti con successo da un'ampia collaborazione INAF (PRIN-INAF Cocchi), che ha prodotto un nuovo modello di Comptonizzazione (termica e di bulk, Farinelli et al. 2008) e propone per la prima volta uno scenario fisico auto-consistente per descrivere tutti gli stati spettrali osservati nelle LMXB con stelle di neutroni (Paizis et al 2006, Farinelli et al. 2007, 2008, Montanari et al. 2008). L'applicazione sistematica del modello e dello scenario proposto anche nell'ambito delle proprietà temporali delle LMXB, insieme alla finalizzazione della trattazione idrodinamica del flusso di

accrescimento saranno il cuore delle attività della collaborazione nei prossimi anni.

Per quanto riguarda l'evoluzione spettro-temporale dei transienti galattici e la sua relazione con l'emissione di getti relativistici, diverse collaborazioni internazionali sono attive, con contributo INAF. In particolare, è stata raggiunta una unificazione delle proprietà dei black hole transients basata sull'analisi spettrale e temporale di campagne RXTE (Dunn et al. 2008; Belloni 2009, vedi Figura 4), mentre le caratteristiche temporali sono state collegate a quelle dell'emissione radio ed estese agli AGN (Körding et al. 2007).

L'analisi temporale delle variazioni veloci delle sorgenti in accrescimento è particolarmente attiva. Da una parte, le pulsar al millisecondo in accrescimento, scoperte solo dieci anni fa, vengono studiate in dettaglio (Burderi et al. 2006, Di Salvo et al. 2008). Dall'altra, la variabilità aperiodica associata alle oscillazioni al kilohertz viene studiata in relazione alla rotazione delle stelle di neutroni, con risultati che mettono in dubbio i modelli esistenti (Méndez & Belloni 2007).

Gli strumenti a bordo di INTEGRAL e Swift sono ottimali per survey a grande campo su un ampio intervallo di frequenze. Una survey con INTEGRAL viene portata avanti a IASF-Rm e IASF-Bo, insieme all'Università di Southampton (vedi Bird et al. 2007, Bazzano et al. 2006). Le sorgenti rivelate tra 17-100 keV sono 490 e per la quasi totalità rappresentano sorgenti in accrescimento (AGN, HMXB, LMXB e CV), tra queste una parte importante consiste in sorgenti assorbite (principalmente AGN e HMXB); con un significativo numero di CV con uno spettro particolarmente "hard" e un 20% di sorgenti non-identificate. Per la loro identificazione è stato quindi attivato un programma di follow-up ad energie minori (X classico, ottico, infrarosso) di cui alcuni gruppi italiani sono PI. Particolare accento viene posto sulle osservazioni di AGN (vedi e.g. Molina et al. 2008; Malizia et al. 2008)

Parallelamente, due progetti separati per la produzione di survey ad alta sensibilità dai dati Swift/BAT sono in corso presso gli IASF-Pa IASF-Mi.

Un risultato particolarmente interessante derivato dalla survey INTEGRAL è stata la scoperta di una sottoclasse delle binarie X di grande massa, le Supergiant Fast X-ray Transients (SFXT; Sguera et al. 2006; Figura 5). La loro emissione nei raggi X è concentrata in flares brillanti (che giungono a  $10^{36}$ - $10^{37}$  erg/s e durano qualche ora), che fanno parte di outbursts della durata di alcuni giorni (Romano et al. 2007; Sidoli et al. 2008). Le proprietà spettrali di alta energia sono molto simili alle pulsars in accrescimento con emissione persistente. Questa somiglianza spettrale suggerisce che l'oggetto compatto sia una stella di neutroni. Inoltre tre membri di questa classe sono pulsar X. La scoperta della prima SFXT (la pulsar IGRJ11215-5952) con outburst ricorrenti periodicamente è italiana (Sidoli et al. 2006).

Il contributo italiano nello studio di questa classe di sorgenti è cruciale sia nello sfruttamento dei dati INTEGRAL, sia nell'uso di osservazioni di follow-up con Swift e XMM-Newton (vedi e.g. Sguera et al. 2007,2008). Inoltre, una sistematica campagna di monitoring di un campione di SFXTs è in atto a partire dalla fine del 2007 con il satellite Swift, e vede la collaborazione di IASF-Mi e IASF-Pa con il Team di Swift.

Con i telescopi X di ultima generazione, è stata scoperta una nuova classe di binarie X con luminosità  $10^{34}$ - $10^{36}$  erg/s: le Faint X-ray binaries. Questi sistemi, sia transienti (VFXT) che persistenti, sono molto probabilmente una classe non-omogenea di sorgenti. È stato proposto che un numero consistente di questi oggetti siano stelle di neutroni con basso tasso di accrescimento, che mostrano flash termonucleari con tempi di ricorrenza lunghi (anni). L'analisi dei dati INTEGRAL e di altri osservatori X da parte di gruppi IASF è alla base di progetti osservativi per fare luce su questi sistemi (vedi e.g. Del Santo et al. 2007, 2008b).

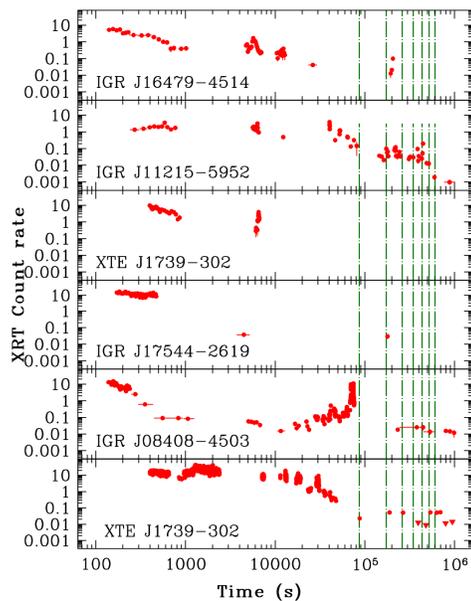


Figura 5: Curve di luce Swift/XRT di un campione di SFXT.



Una collaborazione OAPd, Univ. Padova, OABr, Univ. Milano-Bicocca ha in corso un progetto per lo studio delle Ultra-Luminous X-Ray binaries tramite osservazioni XMM-Newton e Chandra (vedi e.g. Mapelli et al. 2008; Wolter et al. 2006). Osservazioni dettagliate di molti sistemi sono necessarie per risolvere il problema fondamentale della natura di questi sistemi: se buchi neri di massa intermedia (100-1000 masse solari) o binarie X con accrescimento supercritico o microblazar dove il beaming domina l'emissione. Follow-up ottico per la ricerca di periodi orbitali sono programmati.

L'Italia copre un ruolo importante nello studio di binarie compatte con nane bianche beneficiando di programmi con leadership e co-I italiana che contemplano osservazioni nella banda X con Chandra, XMM-Newton, Swift ed INTEGRAL e nella banda ottica con telescopi sia italiani che all'ESO. I progetti in corso riguardano variabili cataclismiche magnetiche, supersoft sources in galassie del gruppo locale e le novae classiche.

Studi teorici del fenomeno dell'accrescimento nelle immediate vicinanze di un buco nero sono alla base di progetti per l'interpretazione dei flares di Sgr A\* (OAPd e Univ/ Lubiana, Cadež et al. 2008) e per la determinazione di fenomeni osservabili prodotti da accrescimento su singolarità nude (INFN, e.g. Preti & De Felice 2008).

### **2.3 Utilizzo grandi strutture**

- Satelliti per astronomia X (Swift, Chandra, XMM-Newton, Suzaku, RossiXTE). Missioni dalle caratteristiche diverse e complementari, sono gli strumenti essenziali per lo studio dell'emissione ad alta energia da sorgenti in accrescimento sia galattiche che extragalattiche. I primi tre vedono una partecipazione italiana.
- INTEGRAL. Satellite ESA per astronomia gamma  $< 1$  MeV, realizzato con un consistente contributo italiano da parte di istituti IASF. I suoi diversi strumenti coprono una banda energetica larga a sensibilità non elevata. Più adatto per sorgenti galattiche.
- AGILE. Satellite italiano per astronomia gamma (da 30 MeV a 50 GeV), lanciato nel 2007, realizzato da ASI, INAF e INFN, con prestazioni comparabili a CGRO/EGRET.
- Fermi. Satellite NASA con partecipazione italiana per astronomia gamma (20 MeV-300 GeV). Copre il cielo con una survey completa ogni tre ore. Le sue prestazioni eccezionali permettono un salto di qualità notevole rispetto ai dati precedenti ottenuti con gli altri satelliti di questa classe. Lanciato nel 2008, tutti i dati saranno pubblici da agosto 2009. Ideale per sorgenti con getti relativistici.
- MAGIC. Consorzio Germania-Spagna-Italia (INFN+INAF)+altri. È il telescopio Čerenkov più grande del mondo, che permette di osservare a basse energie (fino a 50 GeV). È in fase di completamento la costruzione di un secondo telescopio con contributo portante INAF (specchi). Ideale per sorgenti con getti relativistici.
- Telescopi ottici/IR da terra (VLT, TNG, REM). Importanti per osservazioni multifrequenza di sorgenti in accrescimento e con getti relativistici, in cui l'emissione è distribuita su tutto lo spettro elettromagnetico.
- Radiotelescopi. Importanti in quanto i getti vengono osservati principalmente nella banda radio. Si sottolinea il telescopio LOFAR, in fase di implementazione, che fornirà un survey del cielo a bassa frequenza e permetterà la scoperta e lo studio di fenomeni transienti nel radio.



## 2.4 Programmi di ricerca italiani

PI	Titolo	Istituti	Fondi	Inizio	Fine
A. Celotti	Studio dei getti relativistici e del fondo cosmico con i blazars	SISSA, OABr, Univ. Insubria	MIUR, INAF	Nov. 2008	Nov. 2010
C.M. Raiteri	Broad-band multiwavelength observations of blazars	OATo, OABr, OATs, Univ. Insubria, IASF-Bo, Univ. Perugia	ASI	Giu. 2007	Giu. 2009
G.L. Israel	Study of periodic and aperiodic variability of cosmic X-ray sources: data mining in a decade of Chandra/RXTE/Swift/XMM databases	OARm, OABr	ASI	Giu. 2007	Giu. 2009
T.M. Belloni	Studying extreme physical conditions through time-series of aperiodic signals: from X-ray binaries to soft-gamma repeaters	OABr, OARm	INAF	Mar 2007	Mar 2009
T.M. Belloni (coord. Locale)	Black-Hole Universe	OABr, U. Erlangen (coordinatore), U. Southampton, CEA Saclay, U. Amsterdam, Sabanci U. U. Cagliari	EU	Ott. 2008	Ott. 2011
M. Cocchi	Bulk motion Comptonisation models in X-ray Binaries: from phenomenology to Physics	IASF-Rm, IASF-Bo, IASF-Mi, IASF-Pa, Univ. Ferrara	INAF	Feb. 2008	Feb. 2010
M. Orio	The role of fundamental parameters in the evolution of interacting white dwarf binaries	OAPd, OACn, IASF-Rm, U. Padova, OATs	INAF	Mar. 2008	Mar. 2010
L. Bassani	Using archival X-ray observations to characterize Integral sources	IASF-Bo, U. Ferrara, OACn, IASF-Mi	ASI	Giu. 2008	Giu. 2009
P. Ubertini	Attività scientifiche e di supporto in orbita per il programma INTEGRAL	IASF-Rm, IASF-Bo, U. Southampton, IASF-Mi	ASI	2007	2009
A. Bazzano	Scientific exploitation of INTEGRAL GOP data & related follow-up	IASF-Rm, IASF-Mi	ASI	Giu. 2007	Giu. 2009



	observations				
L. Zampieri	Probing the nature of Ultra Luminous X-ray sources	OA-Pd, U. Padova, OABr, U. Bicocca	INAF	Apr. 2008	Apr. 2010
M. Calvani (coordinatore italiano)	La fisica ai confini dei buchi neri	U. Lubiana (coordinatore)	Cooperazione governi Italiano e Sloveno	2008	2009
M. Cappi	Accretion Processes in Nearby and Distant Radio-Quiet AGN/QSOs	IASF-Bo, Univ. Bologna, Univ. Roma 3, IASF-Rm, OARm	ASI	Giu. 2007	Giu. 2009

## 2.5 Progetti e missioni future

- CTA (Cherenkov Telescope Array). Strumento per l'osservazione nella banda TeV, con aumento di sensibilità di almeno dieci volte e più basse energie di soglia. L'Italia, contribuisce tramite INAF e INFN agli studi preliminari. È pensato per un utilizzo come osservatorio, a differenza degli strumenti attuali.
- EXIST. Satellite con uno scanning telescope a grande area con telescopi IR/X per puntamenti. Ancora in fase di studio.
- Simbol-X. Missione per raggi X duri (fino a 80 keV) con telescopio focalizzante (Francia, Italia, Germania +). Missione finanziata con partecipazione italiana in evoluzione.
- SVOM. consorzio Francia-Cina-Italia dedicato ai GRB. Missione già finanziata da Cina e Francia, si sta aspettando la valutazione ASI per il telescopio X XIAO.
- IXO. Missione internazionale NASA/ESA/JAXA. Osservatorio basato su ottiche focalizzanti a grande area. È il risultato della fusione dei progetti XEUS (ESA) e Con-X (NASA). Attualmente in fase di definizione, tempi di realizzazione intorno al 2020 e oltre.
- POLARIX. Missione di polarimetria in banda X. Approvata per lo studio di fase A (appena completato) nell'ambito del programma piccole missioni dell'ASI. Se definitivamente approvata, lancio previsto per il 2014.

## REFERENZE

- Aharonian, F., et al., 2007, ApJ, 664, L71  
 Albert, J., et al. 2007, ApJ, 669, 862  
 Albert, J., et al. 2008, Science, 320, 1752  
 Altamirano, D., et al. 2008, ApJ, 674, L45  
 Bazzano, A., et al, 2006 ApJ, 649, L9  
 Begelman, M.C., Fabian, A.C., & Rees, M.J. 2008, MNRAS, 384, L19  
 Belloni, T., 2009, in "The jet paradigm: from microquasars to quasars", Springer LNP, in press  
 Bird, A., et al., ApJS, 170, 1875, 2007  
 Blandford, R.D. 2001, ASP Conf.Ser.250: Particles and Fields in Radio Galaxies Conference, 250, 487  
 Bouchet, L., et al., 2009, ApJ, in press (arXiv:0811.3311)  
 Burderi et al., 2006, MNRAS, 653, L13  
 Cackett, E.M., et al., 2008, ApJ, 674, 415



- Cackett, E.M., et al., 2009, ApJ, 690, 1847  
Cadež, A., Calvani, M., Kostic, U.: 2008, A&A, 487, 527  
Casella, P., et al., 2008, ApJ, 674, L41  
Celotti, A., & Ghisellini, G. 2008, MNRAS, 385, 283  
Crummy, J., et al., 2006, MNRAS, 365, 1067  
Dadina, M., et al., 2005, A&A, 442, 461  
D'Ai A., et al., 2007, ApJ, 667, 411  
De Angelis, A., Mansutti, O., Persic, M., 2008, La Rivista del Nuovo Cimento, 31, n.4, 187 (arXiv:0712.0315)  
De la Calle, I., et al., 2009, in preparation  
Del Santo, M., et al., 2007, A&A, 468, L17  
Del Santo, M., et al., 2008a, MNRAS, 390, 227  
Del Santo, M., et al., 2008b, AIPC, 1010, 162  
Del Santo, M., et al., 2009, MNRAS, in press (arXiv:0810.3556)  
Di Salvo, T., et al., 2005, ApJ, 623, L121  
Di Salvo, T., et al., 2006, ApJ, 649, L91  
Di Salvo, T., et al., 2008, MNRAS, 389, 1851  
Done, C., et al., 2004, MNRAS, 349, 1261  
Dovciak, M., et al., 2004, MNRAS, 350, 745  
Dunn, R., et al., 2008, MNRAS, 387, 545  
Farinelli, R., et al., 2007, ApJ, 662, 1167  
Farinelli, R., et al., 2008, ApJ, 680, 602  
Fender, R.P., et al., MNRAS, 355, 1105  
Foschini, L., et al.2007, ApJL, 657, L81  
Foschini, L., et al. 2008, A&A, 484, L35  
Ghisellini, G., & Tavecchio, F. 2008, MNRAS, 386, L28  
Ghisellini, G., Foschini, L., Tavecchio, F., & Pian, E. 2007, MNRAS, 382, L82  
Gierlinski, M. et al., 2007, Nature, 455, 369  
Homan, J., et al., 2007, ApJ, 656, 420  
Homan, J., et al., 2009, in preparation  
Iwasawa, K., et al., 2004, MNRAS, 355, 1073  
Körding, E., et al., 2007, MNRAS, 380, 301  
Körding, E., et al., 2008, Science, 320, 1318  
Krongold, Y., 2007, Apj, 659, 1022  
Malizia, A., et al., 2008, MNRAS, 389, 1360  
Mapelli, M., et al., 2008, MNRAS, 383, 230  
McHardy, I., et al., 2006, Nature, 444, 630  
Méndez, M., Belloni, T., 2007, MNRAS, 381, 790  
Miller, J.M., et al., 2006a, ApJ, 652, L113  
Miller, J.M., et al., 2006b, ApJ, 653, 525  
Molina, M., et al., 2008, MNRAS, 390, 1217  
Montanari et al., 2008, ApJ, in press  
Nandra, K., et al., 2007, MNRAS, 382, 194  
Paizis A., et al., 2006, A&A, 459, 187  
Pian, E., et al. 2007, ApJ, 664, 106  
Pian, E., et al. 2006, A&A, 449, L21



- Piraino S., et al., 2007, A&A, 471, L17  
Preti, G., de Felice, F., 2008, American Journal of Physics  
Raiteri, C.M., et al. 2008, A&A, 491, 755  
Romano, P., et al., 2007, A&A, 469, L5  
Rykoff, E.S., et al., 2007, ApJ, 666, 1129  
Schurch, N.J., et al., 2009, ApJ, in press (arXiv:0810.0884)  
Sguera, V., et al. 2006, ApJ, 646, 452  
Sguera, V., Hill, A. B.; Bird, A. J.; 2007, A&A, 467, 249  
Sguera, V., et al., 2008, A&A, 487, 619  
Sidoli, L., et al., 2006, A&A, 450, L9  
Sidoli, L., et al., 2008, ApJ, 690, 120  
Tavecchio, F., et al. 2007, ApJ, 662, 900  
Tombesi, F., et al., 2007, A&A, 467, 1057  
Vercellone, S., et al. 2008, ApJ, 676, L13  
Vercellone, S., et al. 2009, ApJ, 690, 1018  
Villata, M., et al. 2008, A&A, 481, L79  
Volter, A., Trinchieri, G., & Colpi, M., 2006, MNRAS, 373, 1627

### 3. ASTROFISICA DEGLI OGGETTI COMPATTI

Preparato da Niki D'Amico con il contributo di A. Possenti, L. Stella, R. Bandiera, F. Ferraro, P. Caraveo, E. Costa, T. Di Salvo

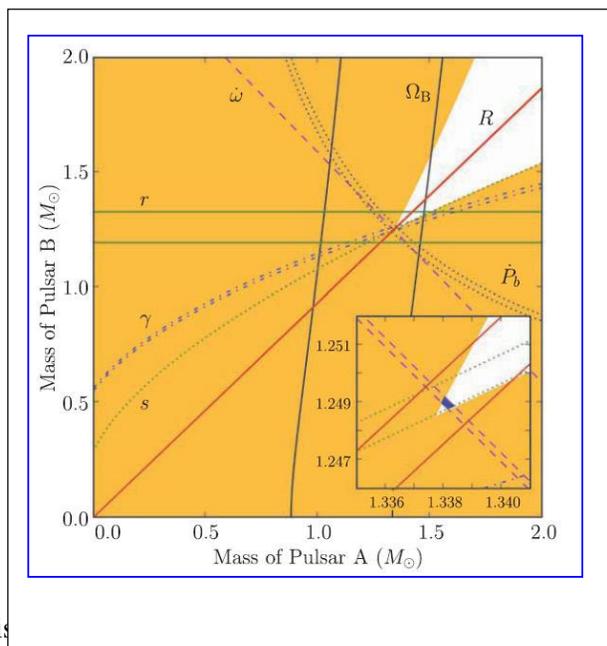
#### 3.1 Background scientifico

Lo studio e l'osservazione degli oggetti compatti (stelle di neutroni e buchi neri), costituisce un potente strumento di indagine della materia ultra densa, consente di misurare molteplici effetti della teoria della Relatività Generale, si presenta come un canale naturale di approfondimento dell'astrofisica delle alte energie, e fornisce informazioni preziose sulla dinamica degli ammassi globulari.

Una delle manifestazioni più studiate delle stelle di neutroni sono le pulsar. Le pulsar infatti sono stelle di neutroni rapidamente rotanti e fortemente magnetizzate, che emettono fasci collimati di onde radio, osservabili come impulsi una volta per rotazione. La massa cospicua e la velocità rotazionale elevata di questi oggetti li rende simili a volani cosmici, i cui segnali radio possono essere riguardati come il ticchettio di un orologio. Il loro monitoraggio regolare (mediante la procedura detta di timing) consente di derivare una gran messe di accurate misure scientifiche e rende le pulsar strumenti di laboratorio ideali per condurre esperimenti in vari settori della fisica fondamentale e dell'astrofisica: dalle teorie della gravità alla osservazione diretta delle onde gravitazionali (quest'ultimo aspetto è trattato in un'altra sezione di questo rapporto), dalla fisica della materia superdensa alla ricerca di pianeti extrasolari, dallo studio delle interazioni dinamiche negli ammassi globulari all'evoluzione dei sistemi binari, dalla determinazione del campo magnetico della Galassia allo studio del mezzo interstellare.

La persistente vitalità di questo filone di ricerca (ad oltre 40 anni dalla scoperta della prima pulsar) è testimoniata dall'ampia produzione di risultati scientifici rilevanti durante l'ultimo quinquennio, fra i quali si stagliano la scoperta e il timing della prima pulsar doppia, e la scoperta e il timing di 33 pulsar nell'ammasso globulare Ter 5.

Ai fini del timing, una classe privilegiata di pulsar è quella delle pulsar binarie riciclate: l'età relativamente vecchia rispetto alle pulsar ordinarie e i periodi di rotazioni corti fanno sì che molte di queste pulsar siano orologi particolarmente stabili e accurati. Si ritiene che esse si formino quando una stella di neutroni in un sistema binario viene riaccelerata dal trasferimento di massa dalla stella compagna. In particolare, se la stella compagna della pulsar è inizialmente di massa elevata (e il sistema sopravvive anche alla seconda esplosione di supernova) si genera un sistema formato da due stelle di neutroni. Il primo famosissimo esempio è rappresentato dal sistema binario B1913+16, il cui studio





ventennale condusse Hulse & Taylor ad ottenere la prima conferma indiretta dell'esistenza della radiazione gravitazionale (e il premio Nobel 1993). Gli ultimi 5 anni sono stati assai prolifici per lo studio di questa classe di oggetti: non solo è stato raddoppiato il campione noto (oggi formato da circa una decina sistemi), ma è stata scoperta il primo esemplare di pulsar doppia, J0737-3039 (Burgay et al 03, Nature, 426, 531; Lyne et al 04, Science, 303, 1153), in cui entrambe le stelle di neutroni emettono come radio pulsar. Tale scoperta ha segnato una pietra miliare nella storia dello studio delle pulsar, poiché tale sistema binario costituisce il miglior laboratorio oggi disponibile per lo studio della Relatività Generale in campo forte. A conferma di queste uniche prerogative, durante l'ultimo triennio le osservazioni della J0737-3039 hanno dapprima condotto a testare la Relatività Generale con un'accuratezza dello 0.05% (Kramer et al 06, Science, 314, 97), un fattore 4 meglio di quanto ottenuto in 30 anni di studi della pulsar B1913+16. Più recentemente (Breton et al 08, Science, 321, 104) è stato possibile osservare l'effetto di precessione geodetica relativistica dell'asse di rotazione di una delle due pulsar nel sistema, mostrando - per la prima volta in campo forte - che la sua entità è compatibile con le previsioni delle relatività einsteiniana.

Le pulsar riciclate ospitate negli ammassi globulari costituiscono un'altra classe di corpi celesti il cui studio è in grado di garantire un elevato ritorno scientifico. Infatti, esse sono oggetti puntiformi e possono essere usate per investigare gli effetti gravitazionali negli ambienti di elevate densità stellare di un ammasso globulare. La loro osservazione ha già permesso di indagare importanti questioni fisiche ed astrofisiche come: la forma della buca di potenziale di un ammasso globulare, le interazioni dinamiche nel nucleo di un ammasso, il contenuto di gas in un ammasso globulare, la frazione di stelle di neutroni trattenute dall'ammasso globulare, l'evoluzione binaria in un ambiente stellare ultradenso. In questo campo due sono stati i principali esperimenti degli ultimi anni, uno condotto al radiotelescopio di Parkes (Australia), e il secondo al radiotelescopio di Green Bank (USA). La combinazione delle scoperte compiute ha determinato il triplicamento delle pulsar note in seno ad ammassi globulari, rivitalizzando un campo di ricerca che aveva subito un rallentamento nella seconda metà degli anni novanta. In particolare, il risultato più eclatante degli ultimi 3 anni è stata la scoperta a Green Bank di ben 33 pulsar nell'ammasso Terzan 5, fra cui quella più velocemente rotante nota a tutt'oggi (periodo di 1.39 millisecondi: Hessels et al 06, Science, 311, 1901). Alcune di queste pulsar (così come alcune altre da poco scoperte a Green Bank in altri cluster) sembrano possedere masse significativamente maggiori (anche doppie) delle 1.4 masse solari attorno a cui si distribuiscono finora le masse delle stelle di neutroni misurate accuratamente nei sistemi binari relativistici. Se confermate dal prosieguo del timing, queste masse elevate avranno un impatto nel vincolare l'equazione di stato per la materia nucleare.

Nel quadro degli studi connessi all'evoluzione di sistemi binari contenenti una pulsar, la scoperta più intrigante degli ultimi 3 anni è stata quella di J1903+0327 (Champion et al 08, Science, 320, 1309). Si tratta di una radio pulsar completamente riciclata (ossia rotante con un periodo inferiori ai 10 millisecondi), che percorre un'orbita altamente eccentrica attorno ad un compagno di massa dell'ordine di una massa solare, probabilmente identificato (grazie ad osservazioni infrarosse) con una stella di sequenza principale. I modelli evolutivi convenzionali escludono orbite eccentriche e/o compagni di sequenza principale per una pulsar completamente riciclata, e quindi lo studio di J1903+0327 promette di aprire nuovi orizzonti in questo campo di ricerca.

Fra le pulsar non riciclate, si staglia la classe delle pulsar cosiddette giovani, ossia di età inferiore a qualche centinaia di migliaia di anni. Esse sono utili per una vasta gamma di studi riguardanti ad esempio: l'associazione con resti di supernova e/o con una pulsar wind nebula, la velocità di kick delle pulsar, l'origine dei glitch (repentini ed imprevedibili incrementi nella velocità rotazionale



della stella di neutroni) e i conseguenti vincoli sulla struttura interna della stella di neutroni, l'evoluzione del campo magnetico superficiale. Le pulsar giovani costituiscono infine appetibili targets per la ricerca di una controparte della pulsar radio nella banda ad alte energie. In effetti, numerosi studi hanno indicato che rivelare un congruo numero di pulsar radio nella banda gamma è un ingrediente chiave per comprendere la fisica della magnetosfera delle pulsar e per discriminare tra i due principali modelli proposti, noti come il modello a cappe polari e il modello del gap esterno. Fino a poco tempo fa', solo 8 pulsar (6 delle quali pulsar giovani) avevano una controparte con emissione pulsata in banda gamma e non era quindi possibile trarre conclusioni. Tale situazione è ora in fase di superamento grazie a 2 satelliti, AGILE e Fermi-GST, recentemente messi in orbita, che dovrebbero rivelare pulsazioni gamma provenienti da svariate decine di radio pulsar. Agile è un satellite completamente italiano (vedi <http://agile.asdc.asi.it/>) lanciato il 23 aprile 2007. I due strumenti principali sono il GRID (Gamma-Ray Imaging detector, operante nel range di energie 30 MeV-30 GeV) sviluppato da INAF-INFN e SuperAgile (un telescopio a maschera codificata, in grado di rivelare fotoni di energia compresa fra 18 e 60 keV) sviluppato da INAF. Il Fermi Gamma-ray Space Telescope (Fermi-GLAST, vedi <http://www-glast.stanford.edu/>) è una grande missione della NASA, il cui lancio è avvenuto l'11 giugno 2008. La partecipazione italiana è molto rilevante: mentre l'INFN ha curato la realizzazione e la calibrazione dello strumento principale (LAT, Large Area Telescope, sensibile a fotoni fra 100 MeV e 300 GeV circa), l'INAF partecipa all'analisi e allo sfruttamento scientifico dei dati, con il supporto di un contratto dedicato erogato da ASI (coordinatore nazionale: P.A. Caraveo). Il ruolo delle osservazioni di timing delle pulsar in banda radio è essenziale ai fini di un completo sfruttamento delle capacità dei due satelliti. La rivelazione delle pulsar gamma aventi i flussi più deboli richiede infatti la determinazione accurata della fase rotazionale di ogni singolo fotone gamma, il che richiede a sua volta la conoscenza precisa delle effemeridi delle pulsar sotto esame. Negli ultimi 18 mesi i principali gruppi internazionali coinvolti nell'osservazione delle radiopulsar hanno dunque avviato delle intense campagne di timing, focalizzate su un ampio campione di pulsar (circa 200, principalmente giovani) selezionate sulla base della probabilità che esse emettano un segnale gamma pulsato percepibile dai satelliti summenzionati.

Lo studio e l'osservazione di pulsar giovani ed energetiche, porta poi allo studio delle cosiddette Pulsar Wind Nebulae. Le Pulsar Wind Nebulae (o plerioni) nascono dal confinamento dei venti relativistici magnetizzati emessi da una pulsar ad opera del mezzo circostante. Il vento relativistico, composto principalmente di elettroni e positroni e un campo magnetico toroidale, viene bruscamente frenato a velocità non relativistiche al cosiddetto termination shock, dove il campo magnetico è compresso e il grosso del flusso energetico si trasforma in calore e/o accelera particelle a energie ultra relativistiche. Sono queste particelle che originano la radiazione emessa, che spazia dalle onde radio fino ai raggi gamma, e viene interpretata come emissione di sincrotrone e di Compton inverso. Le osservazioni della Crab Nebula con il satellite Chandra (Weisskopf et al. 2000) rivelarono per la prima volta in dettaglio una morfologia a jet+toro, che è stata poi osservata in altre PWNae. Le simulazioni numeriche degli ultimi anni (Komissarov & Lyubarsky 2003, 2004; Del Zanna, Amato & Bucciantini 2004) hanno permesso di superare le iniziali difficoltà interpretative mostrando che la morfologia jet+toro si produce naturalmente qualora il flusso di energia trasportato dal vento della pulsar sia anisotropico, ed in particolare più intenso nel piano equatoriale di rotazione della pulsar. A dispetto di questi sensibili progressi fatti registrare nell'ultimo quinquennio, molti aspetti restano irrisolti, a cominciare ad esempio dal cosiddetto "paradosso del  $\sigma$ " (e.g. Amato 2003), ove  $\sigma$  è definito come il rapporto tra il flusso di Poynting e il flusso di energia trasportato dalle particelle entro il vento della pulsar. I modelli MHD mono-



dimensionali (Kennel & Coroniti 1984a,b) limitano  $\sigma$  a piccoli valori in prossimità del termination shock. In contrasto, un valore molto alto di  $\sigma$  è atteso (Goldreich & Julian, 1969) al cosiddetto cilindro luce della pulsar (dove il raggio di corotazione eguaglia la velocità della luce nel vuoto), in pratica laddove inizia la regione del vento. Nessun modello è sinora stato in grado di spiegare in maniera convincente come il valore di  $\sigma$  possa variare in modo tanto ragguardevole.

Come ricordato sopra, il modello standard di formazione di pulsar binarie riciclate prevede che esse si generino in sistemi binari contenenti una stella di neutroni, che viene accelerata attraverso l'accrescimento di massa da una stella compagna. Il risultato finale di tale processo è un sistema binario contenente una stella di neutroni rapidamente rotante (pulsar al millisecondo) ed una nana bianca (generalmente di elio). Il sistema degli ammassi globulari galattici, pur avendo una massa 100 volte inferiore a quella del disco della Galassia, contiene più del 50% della popolazione di pulsar riciclate oggi nota. Tale evidenza implica che esiste uno stretto legame tra la dinamica interna degli ammassi globulari e la formazione di tali oggetti: infatti, mentre nel disco galattico l'unico loro canale di formazione è l'evoluzione di binarie primordiali, le interazioni stellari che si verificano nei nuclei ultra densi degli ammassi globulari possono portare alla formazione di vari tipi di sistemi binari contenenti stelle di neutroni, che vengono poi riciclate dal processo di accrescimento di massa. Il preciso meccanismo di formazione delle pulsar riciclate e la natura della stella compagna, però, sono ancora poco conosciuti. In questo contesto è di fondamentale importanza riuscire ad identificare la stella compagna attraverso osservazioni ottiche mirate. Questo permette, infatti, di svelare lo stadio evolutivo e le proprietà fisiche di tale stella, ovvero di meglio comprendere i meccanismi di formazione ed evoluzione del sistema binario; permette inoltre di porre vincoli alla massa della stella di neutroni e, di conseguenza, all'equazione di stato della materia a densità nucleari.

Lo studio delle proprietà ottiche degli ammassi globulari contenenti pulsar è una ulteriore linea di ricerca che ha avuto un notevole impulso nell'ultimo lustro. Quando accoppiato a precise misure del centro di gravità e della densità di luminosità centrale di un ammasso, il timing delle pulsar prossime al centro di un ammasso globulare può infatti fornire una misura diretta del rapporto massa su luminosità nelle regioni centrali del sistema stellare. Questo valore può a sua volta essere usato per selezionare quegli ammassi globulari più promettenti ai fini della ricerca, nel loro interno, di un buco nero di massa intermedia (IMBH, con masse  $M_{\text{BH}}=10^2-10^3 M_{\odot}$ ). Benché predetti teoricamente, tali oggetti non sono stati ancora osservati in maniera sicura e, secondo i più recenti modelli, gli ammassi stellari densi sarebbero proprio il loro habitat ideale. La dimostrazione empirica della loro esistenza avrebbe notevoli implicazioni per la soluzione di diversi problemi ancora aperti, che spaziano dalla formazione dei buchi neri super-massicci (SMBH,  $M_{\text{BH}}=10^6-10^9 M_{\odot}$ ) osservati al centro degli sferoidi locali, alla co-evoluzione di SMBH e galassie, alla natura delle sorgenti X ultra-luminose, fino alla rivelazione di onde gravitazionali attraverso la prossima generazione di detector.

Stelle di neutroni e buchi neri sono oggetti celesti per la cui descrizione non si può prescindere dall'utilizzo di teorie non classiche della gravità. Donde l'aspettativa di utilizzarli appunto come laboratori ove indagare la teoria della relatività generale e/o ridurre lo spazio dei parametri di teorie alternative. Si è già detto del ruolo delle radio pulsar binarie (e della pulsar Doppia in particolare) in questo contesto. In altre lunghezze d'onda è un'impresa difficile ottenere misure "in loco", ossia misurazioni capaci di testare la relatività generale in regime di campo forte (i.e. nelle regioni molto vicine ad un oggetto compatto). Sebbene i mezzi diagnostici atti a raggiungere questo scopo siano pochi, nell'ultima decade si è comunque iniziato a comprendere il loro potenziale e la loro



importanza (si veda Psaltis, 2008, *Living Reviews in Relativity*, Vol. 11, 9). Il moto della materia in accrescimento su questi oggetti compatti svolge un ruolo cruciale in ognuno di questi mezzi diagnostici: maggiore è la profondità del potenziale gravitazionale, maggiore è la velocità del moto della materia accresce. In queste regioni, l'energia gravitazionale della materia in accrescimento è convertita in radiazione (per lo più in banda X e Gamma) con grande efficienza. Poiché le stelle di neutroni e i buchi neri sono oggetti davvero compatti, la materia in possesso di momento angolare (seppur piccolo) tenderà a disporsi in un disco e a spiraleggerà gradualmente verso l'oggetto compatto a causa della viscosità che agisce tra strati di materia in orbita a raggi diversi. Questo disco di accrescimento può estendersi fino al raggio dell'orbita marginalmente stabile ( $r_{ms} = 6GM/c^2 = 9 \text{ km} (M/M_o)$  per un buco nero non rotante). Il moto della materia nelle regioni più interne del disco può dunque fornire importanti informazioni sull'intensissimo campo gravitazionale in prossimità di una stella di neutroni o di un buco nero. Le metodologie già utilizzate e/o proposte per questi studi nella banda dei raggi X spaziano dalla spettroscopia, al timing rapido, alla polarimetria.

### **3.2 La ricerca in Italia negli anni recenti**

Il ruolo della comunità italiana nel filone di ricerca sugli oggetti compatti, e in particolare pulsar è ben consolidato da oltre tre lustri e si è confermato di primo piano anche nell'ultimo periodo. Il fiore all'occhiello è ovviamente rappresentato dalle attività connesse alla scoperta e alle osservazioni di timing del sistema binario J0737-3039, altresì noto come pulsar doppia. Un corpo celeste senza precedenti, la cui scoperta ha una valenza scientifica paragonabile a quella della prima pulsar binaria (1974) o a quella della prima pulsar riciclata al millisecondo (1982). Protagonista della scoperta della binaria (Burgay et al 2003, *Nature*, 426, 531), la comunità italiana è parte della collaborazione internazionale coinvolta nei test della relatività generale resi possibili da questo sistema (vedere la sezione precedente e Possenti et al 2005, *AIPC*, 801, 272), e ha guidato importanti studi in banda radio ed X (e.g. Burgay et al 2005, *ApJ*, 624, 113; Possenti et al 2008, *ApJ*, 680, 654) concernenti le peculiari proprietà di emissione di questo oggetto.

La scoperta della pulsar doppia è stata il coronamento di una serie di esperimenti di ricerca di nuove pulsars condotti presso il radio telescopio di Parkes dal gruppo italiano (e.g. Burgay et al 2006, *MNRAS*, 368, 283) e dal team anglo australiano (e.g. Lorimer et al 2006, *MNRAS*, 372, 777) con cui esso coopera. Tali esperimenti hanno determinato una autentica esplosione di scoperte di nuove radio pulsar, di fatto più che raddoppiando il campione di oggetti catalogati. Molte di esse appartengono a classi di sorgenti rare: pulsar giovani ed energetiche, sistemi binari contenenti una pulsar e una stella massiccia di sequenza principale, pulsar con un elevato campo magnetico o con parametri rotazionali indistinguibili da quelli delle cosiddette Anomalous X-ray Pulsar.

Utilizzando un apparato sperimentale simile a quello delle ricerche di pulsar nel piano galattico, i ricercatori italiani hanno guidato una survey profonda del sistema degli ammassi globulari con il telescopio di Parkes (P.I. Nichi D'Amico). Fin ad ora sono state scoperte 12 pulsar riciclate in 6 ammassi nei quali in precedenza non si erano osservate pulsar. Parallelamente alla ricerca di nuove sorgenti, è stato avviato un intenso programma di timing (100 ore di media allocate negli ultimi 5 anni) delle pulsar già scoperte. Esso sta assicurando un copioso numero di risultati rilevanti (e.g. Possenti et al 06, *ChJAS*, 6, 176 per una rassegna). Di particolare interesse il caso della binaria ad eclisse J1740-5340 nell'ammasso NGC6397: le osservazioni di timing hanno portato all'identificazione ottica della stella compagna, così evidenziando che si tratta del primo esempio di



una pulsar orbitante una stella che sta perdendo massa dal lobo di Roche a seguito della propria evoluzione orbitale e nucleare e non per gli effetti di irraggiamento da parte della pulsar. Intrigante anche il caso delle 5 pulsar a millisecondo scoperte in NGC6752: tutte mostrano peculiarità, o per la loro decentrata collocazione nell'ammasso o per l'entità della accelerazione cui sono sottoposte, probabilmente dovuta alla buca di potenziale dell'ammasso stesso. Da ciò l'ipotesi di un inusuale stato dinamico per il nucleo dell'ammasso, forse governato dalla presenza di buchi neri di massa intermedia. E' opportuno notare come lo studio di questi oggetti ha rappresentato un caso emblematico di sinergia fra diversi gruppi di ricercatori italiani (radio astronomi, astronomi stellari, teorici della evoluzione stellare e della dinamica), che ha permesso di ottenere risultati di notevole eco internazionale, aprendo al contempo nuove linee di ricerca nel nostro paese. Ad esempio, a tutt'oggi oltre metà delle identificazioni in banda ottica delle stelle compagne di pulsar in ammassi globulari è opera di ricercatori italiani (e.g. Ferraro et al 2003, ApJ, 596, 211; Cocozza et al. 2008, ApJ, 679, 105), mentre la peculiare dinamica in NGC6752 ha stimolato l'avvio di una serie di studi accurati concernenti l'impronta lasciata da buchi neri di massa intermedia sulla dinamica delle stelle in un ammasso globulare (e.g. Colpi et al 2003, ApJ, 599, 1260; Mapelli et al. 2005, MNRAS, 364, 1315; Devecchi et al. 2007, MNRAS, 380, 691).

A partire dal 2006 la comunità pulsaristica italiana fa parte dell'Epta (European Pulsar Timing Array), di cui risulta essere uno dei membri fondatori. L'obiettivo scientifico è di moltiplicare le sinergie fra i maggiori gruppi di ricerca europei in questo settore, sfruttando appieno le potenzialità osservative offerte dalla presenza in Europa di 4 (e presto 5) fra gli 8 migliori telescopi del mondo per l'osservazione di pulsar. Un esempio di questa collaborazione è rappresentato dal varo nel 2007 di un programma di osservazioni regolari di timing di un insieme di pulsar di interesse per i satelliti AGILE e Fermi-GST, operanti nella banda dei raggi gamma. Esse saranno di indispensabile ausilio per ottimizzare i risultati scientifici delle due missioni negli anni a venire. La summenzionata campagna osservativa è infatti destinata a protrarsi per altri 3-5 anni e permetterà altresì di approfondire sia lo studio dei glitch sia quello del timing noise, entrambi fenomeni che si presentano specialmente nella classe delle pulsar giovani.

Le effemeridi rotazionali risultanti da queste osservazioni hanno già permesso di testare in orbita la strumentazione di Agile (Pellizzoni et al. 2008, ApJ, in stampa) e di scoprire nuove pulsar gamma con questo satellite (Pellizzoni et al. 2009, in stampa). Al contempo i primi 6 mesi di dati raccolti da Fermi-GST hanno confermato appieno le potenzialità della missione, grazie alla sensibilità e alla risoluzione angolare senza precedenti dello strumento LAT. In particolare, si staglia la scoperta di una nuova pulsar radio-quieta (Abdo et al. 2008), ottenuta utilizzando dati ottenuti nella sola fase di commissioning degli strumenti.

Nel campo di ricerca delle Pulsar Wind Nebulae, la comunità italiana ha recentemente messo a punto una tecnica per produrre spettri e mappe sintetiche di emissione multi frequenza basate sulla dinamica del plasma relativistico risultante da simulazioni numeriche bidimensionali in regime di MHD relativistica. I processi di emissione considerati sono sincrotrone (per radiazione di frequenza dal radio ai raggi X) e scattering Compton inverso (per fotoni in banda gamma). Le particelle responsabili dell'emissione si assumono accelerate allo shock di terminazione del vento della pulsar e le loro perdite di energia, mentre si propagano nel volume nebulare, sono adeguatamente tenute in conto. Tali studi hanno avuto inizialmente il merito di confermare l'idea che la morfologia jet-toro osservata in banda X per molte PWN fosse da attribuirsi all'anisotropia del flusso di energia nel vento della pulsar. Inoltre, attraverso un confronto dettagliato tra i dati e le mappe sintetiche di emissione è stato possibile dedurre proprietà del vento altrimenti inosservabili, quali livello e



struttura di magnetizzazione. Allo stesso tempo tale modello, nella sua più recente estensione (che include l'emissione a energie nell'intervallo GeV-TeV) permette di fare previsioni che potranno essere verificate dalle prossime osservazioni in banda gamma, con Fermi-GST. Tra gli scopi è anche quello di porre dei vincoli sull'eventuale presenza di protoni relativistici nei venti delle pulsar, ad oggi uno dei maggiori misteri sulla fisica di questi oggetti. Una modellizzazione accurata dell'emissione gamma attesa nel caso di scattering Compton inverso fornirebbe infatti un limite superiore al contributo di origine adronica, essendo questa la banda spettrale in cui il decadimento di pioni neutri creati da collisioni nucleari di ioni relativistici si manifesterebbe. Porre dei limiti sulla presenza di protoni relativistici nel vento della pulsar è di fondamentale importanza per comprendere come funzionano le magnetosfere di questi oggetti e perfino per ottenere informazioni sulle caratteristiche della materia alla superficie di una stella di neutroni. Oltre alle caratteristiche spaziali e spettrali dell'emissione, una speciale attenzione è stata rivolta negli ultimi anni allo studio della sua variabilità temporale. Strutture rapidamente variabili sono osservate nella parte più interna di diverse PWN e sono tipicamente attribuite a processi di fisica cinetica, mentre studi condotti da gruppi italiani hanno mostrato come un'interpretazione in termini di MHD sia altrettanto plausibile. In questo scenario, la variabilità sarebbe da attribuirsi alla vorticità del plasma che produce oscillazioni del fronte dello shock piuttosto che ad effetti cinetici legati alla presenza di ioni relativistici nel vento da pulsar. Nel caso di pulsar che si muovono supersonicamente rispetto al mezzo circostante, la PWN associata cambia drasticamente la propria struttura, e forse anche differenti processi fisici entrano in gioco. Simulazioni MHD relativistiche di tali oggetti sono state oggetto di ricerca di gruppi italiani di astrofisici italiani (Bucciantini et al. 2005). Tuttavia alcuni oggetti osservati mostrano caratteristiche, fra cui la loro stessa forma, che deviano da quanto previsto. Il caso più noto è quello della cosiddetta "Guitar Nebula", osservabile in emissione H $\alpha$ . Recentemente debole emissione X è stata rivelata, ma al di fuori della nebulosa ottica e con un'enigmatica struttura lineare. Per spiegare questa fenomenologia è stato proposto uno scenario (Bandiera 2008) in cui gli elettroni di maggiore energia riescono a diffondere fuori dal bow-shock stesso e interagiscono direttamente con il campo magnetico interstellare.

Il lavoro degli astrofisici italiani ha altresì fornito nell'ultimo lustro un contributo sostanziale sul fronte della identificazione ottica della stella compagna di una pulsar riciclata. In particolare 3 delle sole 6 controparti ottiche note di pulsar riciclate in ammassi globulari sono state scoperte dalla comunità scientifica nazionale (Ferraro et al. 2003, ApJ 596, L211; Cocozza et al. 2006, ApJ 641, L129; Cocozza et al. 2008, ApJ 679, L105). In alcuni casi ne è risultato che la stella compagna non è una nana bianca di elio (come atteso), ma una stella meno evoluta, probabilmente di sequenza principale. Queste identificazioni sono particolarmente utili proprio per oggetti contenuti in ammassi globulari, poiché in questo caso sono note (per altre vie) la distanza, l'arrossamento e l'assorbimento verso queste stelle. Il che permette di determinare raggio e altre proprietà fisiche della stella compagna; informazioni basilari per stabilire lo stadio evolutivo della stella e dunque meglio comprendere i meccanismi di formazione ed evoluzione delle pulsar riciclate. Le informazioni sul raggio della stella compagna permettono anche di porre vincoli alla massa della stella di neutroni e, di conseguenza, all'equazione di stato della materia a densità nucleari. Lo stesso gruppo di lavoro che ha ottenuto i risultati summenzionati, negli ultimi anni ha avviato un nuovo ampio programma di osservazioni in banda ottica, volte alla rivelazione di IMBH nel centro di ammassi globulari galattici. Tale indagine si avvale dello studio accurato dei profili di densità e di dispersione di velocità degli ammassi, e della ricerca di stelle con velocità anomala, accelerate dall'interazione gravitazionale con l'IMBH.



Le tecniche basate sulla spettroscopia X sono state ampiamente utilizzate negli ultimi anni ai fini di testare la relatività generale in regime di campo forte. Esse si sono principalmente focalizzate sullo studio di righe di emissione molto larghe prodotte da dischi di accrescimento (in particolare righe del Fe, si veda a questo riguardo la sezione ??? ). Al fianco di questa diagnostica, si sono recentemente sviluppati metodi di indagine basati sulle misure di timing rapido in raggi X dei dischi di accrescimento, una linea di ricerca che appare molto promettente. In particolare vi è ormai forte evidenza che le veloci oscillazioni quasi periodiche (QPO) - fino a frequenze di oltre 1000 Hz - osservate nel flusso di raggi X di un elevato numero di sorgenti binarie contenenti una stella di neutroni o un buco nero, riflettano le frequenze fondamentali del moto della materia nelle regioni più interne del disco. In questo caso, esso possono dunque fornire informazioni mai ottenute prima sullo spazio-tempo altamente relativistico in prossimità di stelle di neutroni e buchi neri di massa stellare (van der Klis, 2006, in "Compact Stellar X-ray Sources", Cambridge Univ. Press, p.39). Interessante ricordare che le QPO sono state osservate anche nel flusso X dei buchi neri molto massivi all'interno dei nuclei galattici attivi, AGN (Gierlinski et al., 2008, Nature, 455, 369). L'osservazione diretta di effetti relativistici, quali il trascinarsi del sistema di riferimento ("frame dragging", che si manifesta anche nel cosiddetto effetto di "Lense-Thirring") e la precessione del periastro in regime di campo forte, nonché la misurazione di parametri cruciali, come la massa e lo spin di un buco nero, sono sicuramente tra gli obiettivi alla portata dei metodi diagnostici basati sulle QPO (per una rassegna ed una bibliografia recente su questi temi si veda Stella 2009 in "Physics of Relativistic Objects in Compact Binaries: from Birth to Coalescence", Ap. Sp. Sc. Library, Vol. 359, eds. Colpi, Casella, Gorini, Moschella, Possenti).

Anche la polarimetria nella banda X si presenta come un importante e innovativo strumento per lo studio di buchi neri e delle sorgenti compatte. Fin dalla nascita dell'astronomia X è stato sottolineato come la radiazione proveniente da queste sorgenti potrebbe essere parzialmente polarizzata. Nel caso dei buchi neri galattici, la polarizzazione dovrebbe emergere dalla diffusione dei fotoni sul disco di accrescimento ed essere parallela od ortogonale ad esso a seconda dello spessore ottico. Tuttavia, il ruolo della polarimetria non si limiterebbe a svelare la geometria del sistema. Da circa 30 anni si teorizza che un campo gravitazionale forte può modificare sensibilmente la polarizzazione. Tali studi degli effetti di Relatività Generale sull'angolo di polarizzazione dei fotoni X in funzione dell'energia sono stati ripresi dalla comunità italiana in collaborazioni con ricercatori cechi (es.: Doviak, Muleri, Goosmann, Karas, Matt 2008 "Thermal disc emission from a rotating black hole: X-ray polarization signatures?", MNRAS, 391, 32). Questi effetti variano con l'energia, poiché radiazione più energetica è prodotta in regioni più interne del disco dove il campo è più intenso. L'effetto complessivo sarebbe quello di una elevata rotazione del piano di polarizzazione con l'energia. Nell'intervallo di energia tra 2 e 10 keV, accessibile alle prossime missioni basate su tecnologia sviluppata in Italia, la rotazione attesa è di alcune decine di gradi nel caso di un buco nero rotante. La polarimetria risulta quindi un sensibile strumento per investigare il buco nero centrale, da affiancare alle altre tecniche summenzionate. Anche per buchi neri super massivi ci si aspetta un consistente grado di polarizzazione, derivante dalla diffusione della radiazione sulla distribuzione altamente non sferica presente. La polarimetria potrebbe chiarire la geometria e quindi in definitiva il processo di emissione da queste sorgenti. Un consistente grado di polarizzazione è atteso pure nel caso delle stelle di neutroni. A causa dell'intenso campo magnetico, l'opacità per radiazione polarizzata ortogonalmente al campo magnetico è diversa da quella per radiazione polarizzata parallelamente. Nel primo caso l'interazione con la materia risulta ridotta e quindi la radiazione può emergere più facilmente dagli strati più profondi e caldi dell'atmosfera. La polarizzazione dovrebbe essere molto sensibile sia al campo magnetico,



fornendone una stima diretta, sia al rapporto massa/raggio della stella di neutroni. Il secondo aspetto è di particolare importanza perchè permette di studiare l'equazione di stato della materia super densa. Fenomenologie diverse sono infine attese nel caso di stelle di neutroni con campi magnetici "normali" (cioè minori di  $10^{13}$  G) e le cosiddette magnetar. Nel primo caso il piano di polarizzazione al di sopra di alcuni keV dovrebbe essere in contro-fase rispetto a quello ad energie minori. Invece per le magnetar ci si aspetta che esse siano in fase. Questo effetto potrebbe fornire una misura indipendente dell'entità dei campi magnetici, estremi, attesi nelle magnetar.

### **3.3 La ricerca Italiana e Internazionale: prospettive**

L'attività di ricerca osservativa sulle pulsar si articola in due filoni, uno dedicato alla scoperta di nuovi oggetti, il secondo focalizzato sulle osservazioni di timing delle pulsar più interessanti. Nel prossimo triennio si svilupperanno importanti progetti internazionali su entrambi questi fronti. I due maggiori esperimenti che coinvolgeranno i ricercatori italiani sono:

- HITRUN: Ricerca di pulsar col telescopio di Parkes. PI M.Bailes, S.Johnston, M.Kramer, A.Possenti. Istituti: OACa (Italia), Swinburne University (Australia), University of Sydney (Australia), University of Manchester (UK). Partecipazione italiana: 25%. Inizio: nov 2008. Termine: 2012.
7. LEAP: Timing di pulsar con un tied-array di telescopi. PI M.Kramer, University of Manchester (UK). Osservatori coinvolti: Jodrell Bank (UK), SRT (Italia), Nancay (Francia), Effelsberg (Germania), WSRT (Olanda). Inizio: aprile 2009. Termine: 2014.

Per quanto riguarda la ricerca di nuove pulsar, tre grandi surveys andranno a compimento: la PALFA survey a 20cm presso il Radiotelescopio di Arecibo, la Drift-Scan Survey a 90cm presso il Radiotelescopio di Green Bank e la Hitrun Survey a 20cm presso il Radiotelescopio di Parkes. La prima survey sfrutta un sistema multibeam a 7 feed per scandagliare la porzione del piano galattico visibile dallo strumento. Sebbene l'area di cielo investigata sia relativamente piccola, la impareggiata sensibilità istantanea del disco di Arecibo dovrebbe permettere la scoperta di svariate centinaia di pulsar, con una buona percentuale di oggetti appartenenti a binarie strette, e quindi di primario interesse astrofisico. L'esperimento in corso a Green Bank coprirà invece l'intero cielo settentrionale, compensando l'assenza di un sistema multi-ricevitore grazie alle dimensioni maggiori del beam di osservazione garantite dalla lunghezza d'onda prescelta. Il fatto di operare a 90cm farà sì che il target principale di questa survey saranno pulsar riciclate collocate fuori dal piano galattico, laddove lo scattering non inibisce la visibilità di pulsar velocemente rotanti.

Il terzo grande progetto (la HITRUN survey) combina invece i vantaggi di operare a lunghezze d'onda più corte (20cm), con la disponibilità di un sistema multi ricevitore a 13 beam. In questo modo sarà possibile compiere in tempi ragionevoli una ricerca profonda di pulsar riciclate in tutto il cielo meridionale, ivi compreso gran parte del piano galattico (un esperimento gemello di questo sarà effettuato nel cielo nord usando il radiotelescopio di Effelsberg). Rispetto agli esperimenti precedenti condotti a Parkes – già oltremodo fruttuosi, come riportato nella sezione precedente – il nuovo progetto si avvale di un hardware di nuova concezione, che sfrutterà una banda osservativa più larga, con una risoluzione in frequenza molto migliore. Per quanto riguarda le pulsar riciclate, ne consegue la capacità di sondare un volume di piano galattico quasi 10 volte maggiore che in precedenza, dal che si attende la possibilità di raddoppiare il numero delle pulsar a millisecondo note nel disco galattico. Questo ultimo progetto coinvolge direttamente i ricercatori italiani, che



rappresentano circa il 25% della collaborazione internazionale (italo anglo australiana) che ha dapprima progettato l'esperimento, poi installato a Parkes il nuovo hardware necessario per il suo svolgimento e sta ora per avviare la raccolta dati. Si tratta di un progetto di larghissimo respiro, al quale saranno dedicate oltre 5000 ore di tempo osservativo al telescopio di Parkes.

A livello di osservazioni di timing, i prossimi anni saranno all'insegna dei Pulsar Timing Array: PPTA (PI Dick Manchester, istituto di riferimento ATNF, progetto prevalentemente australiano); NANOGRV (PI da decidere, collaborazione fra vari istituti statunitensi) e EPTA (collaborazione europea). In altra parte di questo rapporto è descritta in dettaglio la metodologia che, partendo dal timing di precisione di un numero sufficiente di pulsar riciclate, potrà condurre alla osservazione diretta delle onde gravitazionali appartenenti al fondo cosmico. Oltre a questa meta ambiziosa, i Timing Array condurranno a notevoli miglioramenti nella determinazione dei parametri di pulsar di primario interesse, come ad esempio sono le binarie relativistiche e la pulsar Doppia in primis. Per quest'ultimo oggetto, l'obiettivo dei programmi di timing a lungo termine – che vedono una partecipazione italiana rilevante – è la misura del momento di inerzia di una delle due pulsar, che porterebbe a vincolare direttamente l'equazione di stato della materia nucleare, risolvendo uno dei problemi di base della fisica della materia condensata.

L'esperimento di timing più ambizioso, denominato LEAP (Large European Array for Pulsar), vedrà altresì un coinvolgimento diretto dei ricercatori italiani e del nascente radiotelescopio SRT, il cui ricevitore confocale a due lunghezze d'onda (90 cm e 20 cm) sarà uno strumento di assoluta rilevanza mondiale per il timing di precisione delle pulsar. Informalmente nato nel contesto dell'Epta, LEAP è un progetto europeo quinquennale che prevede di effettuare osservazioni simultanee di pulsar presso i 5 maggiori telescopi del continente (SRT compreso). Ciò garantirà una sensibilità equivalente a quella ottenibile con un telescopio di circa 200 metri di diametro e ricadute scientifiche molto promettenti, sia per la succitata rivelazione diretta di onde gravitazionali, sia per misurare effetti relativistici mai testati finora.

I due satelliti Agile e ancora più Fermi-GST sono destinati a rivoluzionare la nostra conoscenza del cielo sopra i 100 MeV. In particolare, fra gli obiettivi riguardanti oggetti relativistici galattici, il primo obiettivo sarà la compilazione di un grande catalogo di pulsar gamma identificate, comprendente (potenzialmente) diverse centinaia di sorgenti, sia pulsar osservate in banda radio, sia pulsar gamma radio-quiete. La disponibilità di questo catalogo permetterà di fare luce su alcuni fra i maggiori problemi tuttora aperti riguardanti la fisica delle stelle di neutroni, come la geometria delle regioni di emissione nella magnetosfera, la configurazione del campo magnetico, la fisica (e il bilancio) della perdita di energia rotazionale. A tal fine verranno studiate in dettaglio sorgenti brillanti, completando i dati Fermi-GST con osservazioni multi lunghezze d'onda; saranno anche analizzate le proprietà statistiche dei campioni di stelle di neutroni identificate nelle diverse bande dello spettro elettromagnetico. Le osservazioni di questi satelliti permetteranno anche di approfondire la comprensione della natura di sistemi binari peculiari come LSI +61 303, uno dei più interessanti oggetti galattici, potenzialmente associati a sorgenti di raggi gamma. Infine naturalmente si sarà la possibilità di investigare la natura delle sorgenti di raggi gamma galattiche finora non identificate, uno dei problemi di punta dell'astrofisica delle alte energie (basti ricordare che nel catalogo di EGRET meno del 10% delle sorgenti a bassa latitudine galattica è stato identificato - e sono tutte stelle di neutroni isolate). In questo contesto sarà cruciale un approccio multi lunghezza d'onda, in sinergia con la collaborazione Swift.



Per quanto concerne gli studi sulle Pulsar Wind Nebulae, gli sviluppi futuri più immediati saranno rivolti ad un raffinamento della modellistica, che permetta di tenere in conto anche di possibili anisotropie del meccanismo di accelerazione delle particelle allo shock. In particolare una promettente ipotesi di lavoro è quella di assumere che lungo il fronte dello shock di terminazione del vento siano all'opera diversi meccanismi di accelerazione a diverse latitudini, a seconda del livello di magnetizzazione del plasma. Lo spettro di particelle risultante sarà pertanto diverso anch'esso a diverse latitudini. Tenere in conto questo effetto dovrebbe consentire di risolvere il mistero dell'accelerazione delle particelle all'origine dell'emissione radio della Nebulosa del Granchio e porre ulteriori vincoli sulle proprietà del vento in termini di magnetizzazione, composizione e fattore di Lorentz terminale, fornendo anche informazioni pressoché dirette su processi ancora poco compresi, come la riconnessione magnetica in un flusso relativistico. Sulla base dello scenario proposto per la Guitar Nebula, verranno investigati modelli atti a giustificare teoricamente le forme di queste nebulose, che in diversi casi differiscono sensibilmente dalla forma classica del bow-shock. Attualmente forme anomale vengono giustificate introducendo gradienti "ad hoc" per la densità del mezzo ambiente, mentre il passo futuro sarà di investigare quali processi fisici potrebbero condurre a risultati simili anche in presenza di un mezzo ambiente omogeneo. Ad esempio nella Guitar Nebula, la prima parte della coda mostra una forma ben approssimata da un cono. Tale forma sarebbe ottenuta naturalmente se il moto di flusso all'interno della coda fosse subsonico, contrariamente a quanto previsto dai modelli MHD esistenti. Si possono tracciare diversi scenari che permetterebbero di avere una coda subsonica come, ad esempio, un riscaldamento del plasma in coda a seguito dell'interazione con elettroni di così alta energia che l'approssimazione fluida potrebbe non applicarsi ad essi, almeno nelle regioni più vicine alla testa del bow-shock (la presenza di tali elettroni sarebbe giustificata all'interno dello scenario sviluppato per spiegare la struttura nebulare osservata in raggi X).

Nel prossimo triennio la campagna osservativa indirizzata all'indagine degli oggetti compatti negli ammassi globulari, si focalizzerà sulle regioni più interne e di alta densità stellare di un campione di ammassi globulari galattici. Verranno a tale scopo utilizzati dati ad alta risoluzione angolare, ottenuti sia con le camere ACS, WFPC2 e WFC3 a bordo del telescopio spaziale Hubble (HST), sia con strumenti dotati di ottiche adattive montati su telescopi terrestri della classe degli 8-10m (NACO, MAD, ecc). Questi dati saranno combinati con immagini a grande campo ottenute da Terra (per esempio con LBT o la camera WFI dell'ESO). Un tale database fotometrico permetterà di derivare con una precisione senza precedenti il centro di gravità e l'intero profilo di densità degli ammassi globulari considerati (si veda un primo risultato in Lanzoni et al. 2007, ApJ 668, L139). Questa prima parte di indagine permetterà di identificare gli ammassi che mostrano deviazioni significative dei profili di densità dal modello di King di riferimento. Per questi sistemi verrà poi determinato il profilo di dispersione di velocità, utilizzando dati cinematici ad alta risoluzione spaziale (per le regioni centrali) e a grande campo (per coprire l'intera estensione radiale degli ammassi), che saranno raccolti rispettivamente con gli spettrografi SINFONI (Integral Field Unit) e FLAMES/GIRAFFE (multi-oggetto), montanti all'ESO-VLT. Nel futuro a breve termine, è previsto l'utilizzo combinato delle osservazioni ad alta risoluzione spaziale recentemente raccolte per un campione di ammassi globulari galattici, utilizzando il telescopio spaziale HST (diverse orbite di osservazione sono state assegnate a questo progetto durante l'imminente ciclo17) e la strumentazione con ottiche adattive presso il telescopio VLT dell'ESO. Per le controparti più brillanti saranno pianificati e richiesti eventuali follow-up spettroscopici.

Ai fini dello studio degli effetti relativistici nella banda dei raggi X, l'attività si svilupperà nel prossimo triennio lungo due linee diverse e tra loro complementari. Da un lato sarà necessario



sviluppare ulteriormente i modelli e le tecniche di analisi dei dati esistenti (in particolare di quelli ottenuti con il Rossi X-ray Timing Explorer), con l'obiettivo di corroborare e rendere univoca l'interpretazione delle diverse QPO osservate e il legame tra le frequenze delle QPO e le frequenze fondamentali del moto della materia in regime di campo gravitazionale forte. Dall'altro lato si dovrà delineare una chiara prospettiva di sviluppo di strumentazione per raggi X di elevatissima area efficace (idealmente di 10-20 m<sup>2</sup>), atta a sfruttare appieno il potenziale offerto dagli studi di variabilità temporale rapida. A questo riguardo sarà importante valutare sia la prospettiva di lungo termine offerta dalla missione a collaborazione mondiale IXO, che la possibilità di sviluppare in tempi più contenuti un progetto di satellite di classe MIDEX (o equivalente) con strumentazione innovativa, interamente mirato a studi di variabilità temporale in banda X. Nel campo della polarimetria in banda X l'osservabilità degli effetti relativistici discussi è stata valutata nel quadro di missioni pathfinder (come POLARIX e HXMT) e della missione ESA/NASA IXO, nella quale il polarimetro è incluso proprio come strumento per lo studio dei campi gravitazionali estremi in oggetti compatti. Questi studi saranno uno dei driver principali per queste missioni, che potrebbero arrivare al lancio rispettivamente nel 2014 ed intorno al 2020. Le valutazioni compiute dimostrano che una verifica del modello su dati della GRS1915+105, con netta distinzione tra i casi di BH rotante e non rotante, sarà già possibile con la missione POLARIX, che nel 2007 ha compiuto lo studio di fase A. IXO potrà estendere l'analisi ad un ricco campione di BH galattici. La identificazione di tale campione, anche in sinergia con dati di spettroscopia X e di interferometria radio, è uno dei compiti che saranno svolti nei prossimi anni.



## **4. LE PIU' POTENTI ESPLOSIONI COSMICHE: SUPERNOVAE E GAMMA RAY BURSTS**

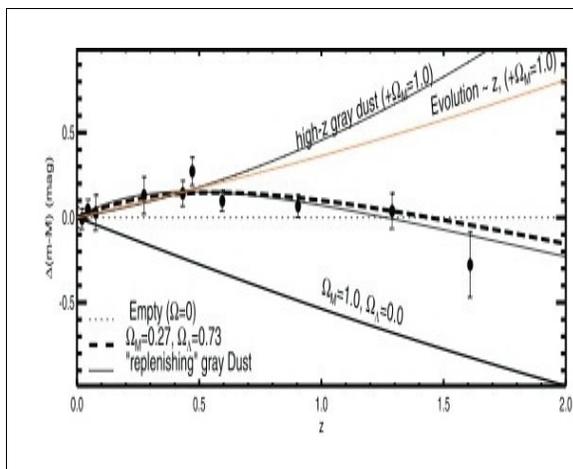
*Preparato da Gabriele Ghibellini e Massimo Della Valle con il contributo di L. Piro, S. Mereghetti, G. Tagliaferro, S. Campana, E. Pian, L. Amati, E. Palazzi, C. Morello, E. Del Monte, F. Mannucci, A. Tornambè, M. Turatto, P. Mazzali, S. Benetti, E. Cappellaro, L. Greggio*

### **4.1 Scientific Background**

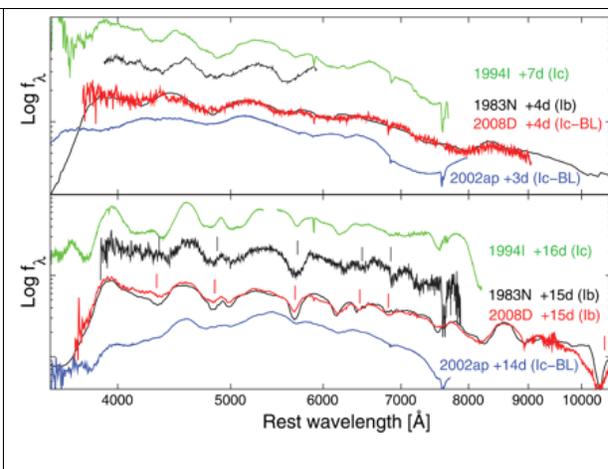
Una supernova (SN) può emettere  $10^{53}$  erg in neutrini,  $10^{51}$  erg in energia cinetica degli ejecta,  $10^{49}$  erg in fotoni. Un Gamma Ray Burst (GRB) potente emette fino a  $10^{54}$  erg in fotoni se la sua emissione è isotropa, in appena pochi secondi. La luminosità di Planck (i.e. l'energia di Planck divisa per il tempo di Planck) è  $3.6 \times 10^{59}$  erg/s, che non è enormemente più grande di quella osservata, in neutrini, di una SN e di quella, in fotoni, di un GRB. Lo studio delle SN è direttamente collegato ad alcuni dei più importanti settori della moderna astrofisica, come l'evoluzione stellare e la cosmologia. Con i GRB studiamo fenomeni fisici in condizioni estreme, e li usiamo come illuminatori dell'Universo lontano. Possiamo rivelarli, nella banda dei raggi X duri (per cui l'Universo è molto trasparente), fino a red-shift di circa 20: possiamo avere informazioni sulla Pop III stellare, l'epoca di re-ionizzazione, la distribuzione di materia tra noi e il GRB, e individuare le galassie ospiti a grandi redshift. Le correlazioni tra le loro proprietà spettrali e l'energia emessa potrebbero permettere di usare i GRB come candele standard, per studiare l'espansione dell'universo in modo alternativo e complementare alle SNe di tipo Ia. Inoltre, sia SN che GRB sono e soprattutto saranno fondamentali per lo studio dei neutrini e delle onde gravitazionali.

#### *4.1.1 Supernovae e Cosmologia*

L'osservazione di SN ha mostrato che l'espansione dell'Universo potrebbe essere accelerata da una forma ancora sconosciuta di energia ("Dark Energy"). In particolare l'osservazione delle SN di tipo Ia ha mostrato, che in media, le SNe esplose circa 4-5 miliardi di anni fa appaiono più deboli (di un 20% circa) di quanto ci si aspetterebbe se l'universo decelerasse e fosse caratterizzato da una bassa densità di materia. Per contro le SNe esplose circa 8-10 miliardi di anni fa appaiono sistematicamente più brillanti della stessa quantità (Fig. 1). I punti osservati sono molto distanti dalla traccia (linea continua)  $\Omega_M=1$ ,  $\Omega_\Lambda=0$ , corrispondente ad un universo dominato dalla materia, mentre mostrano un ottimo accordo con la traccia rappresentata dalla linea tratteggiata,  $\Omega_M=0.27$ ,  $\Omega_\Lambda=0.73$ , corrispondente ad un universo nel quale la densità di materia è largamente minoritaria (circa 1/2) rispetto alla densità di energia oscura responsabile dell'accelerazione. Le osservazioni di Perlmutter et al. 1998, 1999 e Riess et al. 1998, 2004, hanno cambiato radicalmente le nostre idee sull'evoluzione dell'universo.



**Fig. 1.** Diagramma di Hubble per le SN Ia ad alto  $z$  (Riess et al. 2004).



**Fig. 2.** La "metamorfosi" spettroscopica di SN 2008D/GRB 080109 (Mazzali et al. 2008), da tipo Ic a tipo Ib.

#### 4.1.2 Supernovae e Gamma-Ray Bursts

Supernovae e GRB risultano connessi. Le SN associate ai GRB sono di tipo diverso da quelle descritte in precedenza. Sono di tipo Ic/b e sono il prodotto del collasso gravitazionale di stelle molto massicce, circa 40-50 volte la massa del Sole. In realtà le osservazioni hanno dimostrato che solo le SN più energetiche risultano essere associate ai GRB. L'energia cinetica associata a questi eventi, circa  $10^{52}$  erg, è circa 10 volte più grande di quella associata a SN dello stesso tipo che non producono un GRB. Questa è la ragione per la quale le SN associate ai GRBs spesso vengono chiamate Hypernovae. Questi risultati poggiano su alcuni dati osservativi incontrovertibili, molti dei quali ottenuti dalla ricerca italiana.

i) A basso  $z$  la connessione tra SNe-Ic/b e GRBs è testimoniata da 5 eventi ben studiati. SN 1998bw/ GRB 980425 (Galama et al. 1998); SN 2003dh/GRB 030329 (Hjorth et al. 2003); SN 2003lw/GRB 031203 (Malesani et al. 2004); SN 2006aj/GRB 060218 (Campana et al. 2006, Pian et al. 2006) e più recentemente SN 2008D/GRB 0801009 (Mazzali et al. 2008). In quest'ultimo caso, la SN è di tipo Ib, caratterizzata da un'energia cinetica intermedia tra una SN Ic "standard" e una Hypernova. Il transiente X associato è ben 5 ordini di grandezza più debole di un GRB "standard". La scoperta di quest'ultimo evento è fondamentale: rappresenta l'anello di congiunzione tra SNe senza GRBs e SNe associate ai GRBs e dimostra l'esistenza di un continuo di proprietà tra le due classi di sorgenti.

ii) ad alto  $z$  sono state osservate 3 associazioni SNe-GRBs: SN 2002lt/GRB 021211 a  $z$  circa 1 (Della Valle et al. 2003); SN 2005nc/GRB 050525A, a  $z=0.7$  (Della Valle et al. 2005) sebbene in questo caso uno scenario alternativo a quello della SN non sia escluso ("light-echo?"); e più recentemente GRB 081007 a  $z=0.5$  associato con SN-Ic 2008hw (Della Valle et al. 2008).

iii) Lo studio degli hosts dei GRB (Fruchter et al. 2006) ha mostrato che queste galassie sono caratterizzate da bassa metallicità e alta star formation rate (specific) e che i GRB sono associati alle regioni di più alta luminosità. Recentemente Raskin et al. 2008 utilizzando le distribuzioni spaziali di SNe e GRB hanno trovato masse per i progenitori dei GRB  $> 40$  masse solari.



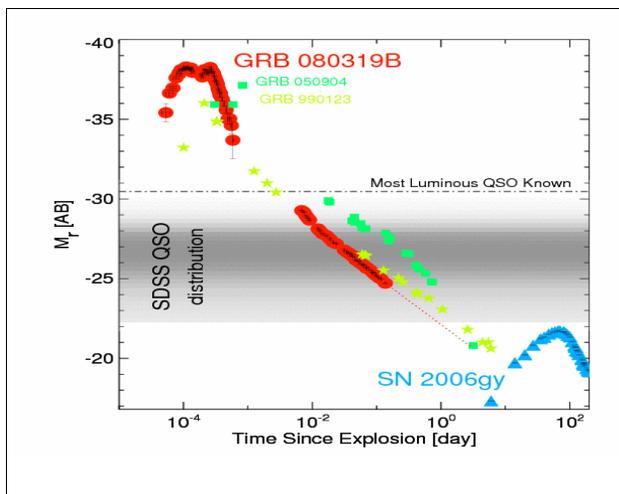
iv) Osservazioni spettroscopiche di SNe-Ic con e senza GRB hanno permesso di concludere che le SNe con GRB sono fortemente asimmetriche mentre quelle senza GRB mostrano una deviazione dalla simmetria sferica molto meno accentuata (Mazzali et al. 2005, Taubenberger et al. 2009).

v) Diversi lavori sia osservativi (Guetta & Della Valle 2007) che teorici (Bissaldi et al. 2007) hanno trovato che solo una minuscola frazione ( $\sim 0.1\%$ ) di SNe-CC produce GRBs, suggerendo che altre condizioni (e.g. mancanza dell'involucro di H/He, binarietà, bassa metallicità, rotazione) oltre che una grande massa devono realizzarsi perché l'esplosione di una stella sia associata ad un GRB.

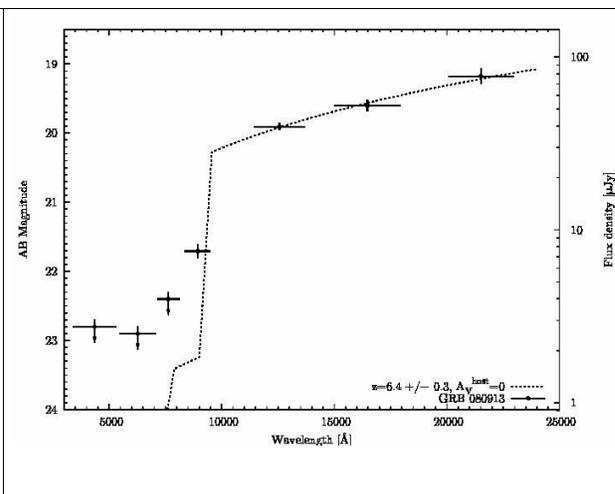
Lo scenario fin qui delineato, vero nelle sue linee generali, risulta "complicato" da GRB 060614. Questo GRB aveva tutte le caratteristiche per essere prodotto nell'esplosione di una Hypernova, che non è stata osservata (Della Valle et al. 2006). Questo suggerisce che le stelle massicce possano terminare la loro vita non solo attraverso l'esplosione di SN brillanti, ma seguendo "canali", almeno in apparenza, meno energetici.

#### 4.1.3 Gamma Ray Bursts

Per i **GRB di durata > 2 s**, la teoria prevalente ipotizza il collasso del core di una stella di grande massa, e la formazione di un buco nero con grande spin circondato da un toro molto denso. L'accrescimento rapido di questo materiale, probabilmente accompagnato dalla formazione di campi magnetici super-critici (i.e.  $B > 4.4 \times 10^{13}$  Gauss) libera  $10^{51}$ - $10^{52}$  erg in pochi secondi, formando una (o una serie di) fireball che accelerano sotto la spinta della loro pressione interna. Urti tra fireball con velocità diversa convertono energia cinetica in radiazione, che origina la fase prompt. L'urto della fireball con il materiale circumburst origina l'emissione di afterglow. La mole di dati Swift ha mostrato una complessità di comportamenti che questo schema di base non sempre riesce a spiegare. Non sappiamo ancora con chiarezza il ruolo del campo magnetico: se dominante, allora si spiegherebbe perché il cosiddetto "optical flash" (emissione intensa, rapidamente decrescente, dovuta al materiale della fireball quando è decelerata dalla materia circumburst) si vede così raramente, anche quando si riesce a rivelare l'inizio stesso dell'afterglow (come nei GRB lunghi studiati con REM da Molinari et al. 2007). Inoltre, il ruolo della stella progenitrice nel collimare la fireball e nel dissipare parte della sua energetica (in aggiunta o in alternativa agli urti interni) potrebbe essere importante.



**Fig. 3.** La curva di luce di GRB 080319B ( $z \sim 1$ , ha raggiunto  $m \sim 5$ ) confrontata sia con i quasar tipici come rivelati dalla SDSS survey (banda grigia) che con le SN. E' evidente la grande opportunità offerta dai GRB per studiare l'Universo lontano (da Bloom et al. 2008).



**Fig. 4.** Flussi fotometrici dell'afterglow di GRB 080913. Il crollo del flusso a piccole  $\lambda$  se dovuto all'assorbimento di idrogeno neutro, indica  $z = 6.695$ . L'analisi spettroscopica conferma. Questo ne fa il più lontano GRB noto (da Greiner et al. 2008).

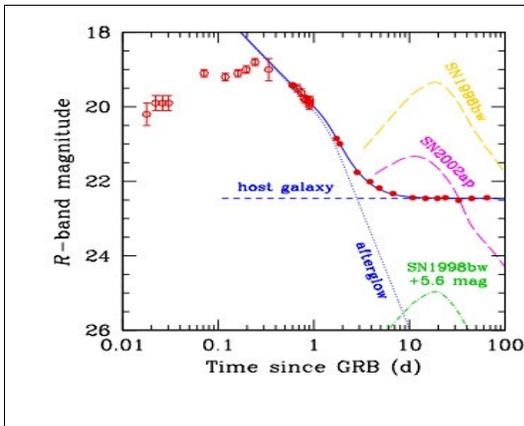
Per i **GRB corti** (prompt  $< 2$  s) l'idea prevalente è che siano il risultato del merging di oggetti compatti (2 stelle di neutroni o buco nero + stella di neutroni). Per tempi di coalescenza dell'ordine di un miliardo di anni, il sistema fa in tempo ad uscire dal luogo originario di formazione stellare, e in qualche caso anche dalla galassia ospite che nel frattempo diminuisce il suo tasso di formazione stellare. Quindi ci si aspetta che siano a redshift medi minori di quelli lunghi, e posizionati nelle periferie di galassie sia spirali che ellittiche. I GRB corti con redshift sono ancora troppo pochi per studi statistici, ma le prime indicazioni non sono univoche. Anche la definizione stessa di GRB corto è sotto revisione: esistono GRB con uno spike iniziale breve, ma seguito da una emissione lunga più soft e più debole, che rende la loro classificazione incerta. Esistono GRB corti a redshift relativamente grandi. Infine la divisione in durata osservata non tiene conto della dilatazione temporale cosmologica. GRB 080913 a  $z = 6.7$ , dura 8 secondi, che nel rest frame corrispondono a poco più di 1 secondo: se fosse un GRB corto il merging di oggetti compatti sarebbero comuni anche quando l'Universo aveva molto meno di un miliardo di anni.

La ricerca internazionale sui GRB si avvale ancora e principalmente dei dati raccolti dal satellite Swift (con partecipazione italiana, sia hardware che scientifica, guidata dall'OABr) mentre Fermi (che ospita oltre allo strumento principale, sensibile tra 0.05 e 100 GeV, anche un burst monitor sensibile tra 8 keV e 30 MeV) ha già rivelato parecchi bursts, tra cui qualcuno fino ad energie di qualche GeV. Per i prossimi 3 anni la ricerca sui GRB si focalizzerà sui risultati di questi 2 satelliti. Anche AGILE, lanciato nell'aprile del 2007, ha già dato e darà contributi significativi. L'Imager X SuperAGILE localizza circa 1 GRB al mese (nella banda tra 17 e 60 keV; Del Monte et al. 2008), mentre il Minicalorimetro rivela circa un evento a settimana, tra 300 keV e 100 MeV (Marisaldi et al. 2008). Il Gamma Ray Imaging Detector (GRID) di AGILE, con un campo di vista di circa 2.5 sr e una sensibilità comparabile a quella di EGRET, può cercare la controparte dei GRB localizzati da SuperAGILE e anche da altri strumenti (Swift, INTEGRAL e Fermi) e fornisce flussi o limiti superiori tra 30 MeV e 50 GeV.

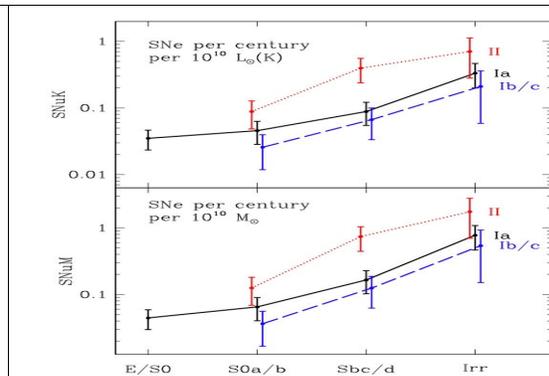
## 4.2 Contributi italiani (oltre a quelli già citati) e programmi in corso

### 4.2.1 Supernovae di tipo Ia

L'ipotesi che sta alla base dei risultati cosmologici sopra descritti è che i progenitori delle SN Ia non risentano di effetti sistematici al variare dell'età dell'universo: l'utilizzo delle SN in cosmologia assume implicitamente che le SN vicine siano uguali a quelle lontane. Solo così possiamo attribuire la diminuzione o l'aumento della luminosità al variare della distanza ad effetti cosmologici e non a variazioni intrinseche della loro luminosità. Perciò in questi anni è stato dato grande risalto allo studio delle potenziali sistematicità che potrebbero invalidare i risultati cosmologici. In particolare sono state messe a punto tecniche osservative tese all'identificazione dei progenitori delle SN Ia ed elaborati modelli teorici di progenitori per riprodurre le sistematicità osservate.



**Fig. 5.** Osservazioni VLT di GRB 060614 (Della Valle et al. 2006). Se una SN fosse associata a questo evento dovrebbe essere almeno 100 volte più debole delle tipiche SN associate ai GRB.



**Fig. 6.** SN rate vs colore/morfologia della parent galaxy (Mannucci et al. 2005). Le galassie più prolifiche di SN-Ia (di solito associate ad una popolazione stellare "vecchia") sono, inaspettatamente, quelle nelle quali la star formation è ancora attiva (Spirali avanzate o Irregolari).

I primi risultati basati: a) sullo studio della dipendenza delle frequenze delle esplosioni di SN dalle proprietà degli ambienti stellari circostanti e caratterizzati da diverse età, composizioni chimiche, proprietà radio, clusters vs. field, polveri (Cappellaro et al. 2005; Della Valle et al. 2005, Greggio 2005, Mannucci et al. 2005, 2006, 2007, Elias-Rosa et al. 2006) e b) l'osservazione degli effetti dell'esplosione di SN sull'ambiente circostante (Panagia et al. 2006; Patat et al. 2007a, 2007b) hanno fornito elementi per comprendere la grande varietà di proprietà spettroscopiche e fotometriche osservate (Benetti et al. 2005, Mazzali et al. 2005) e hanno dimostrato che il ~ 90% dei progenitori delle SNe-Ia hanno masse simili al momento dell'esplosione. Questo conferma l'idea che tutte le esplosioni avvengano secondo un unico processo, al raggiungimento della massa di Chandrasekhar, probabilmente via "delayed-detonation" (Mazzali et al. 2007). Una differenziazione all'interno del modello unico, suggerita dalle osservazioni, può essere indotta dalla rotazione (differenziale) delle stelle progenitrici (Piersanti et al. 2003 e Dominguez et al. 2006).

Gli studi sulle frequenze di esplosioni di SN hanno avuto due importanti ricadute: a) il loro utilizzo per riprodurre l'evoluzione chimica di galassie di diverso tipo (Matteucci et al. 2006, Loewenstein 2006, Calura e Matteucci 2006; Calura et al. 2007); b) lo studio delle SN oscurate dalle polveri (Maiolino et al. 2002, Mannucci et al. 2003, Cresci et al. 2007) da cui emerge che le survey di SN



in galassie di tipo starburst, condotte a lunghezze d'onda ottiche, perdono circa il 70% di oggetti rispetto alle survey condotte nel vicino infrarosso, a causa dell'assorbimento delle polveri ( $A_V \sim 30$ ).

#### 4.2.2 *Supernovae Core-Collapse*

Le SNe provenienti dall'esplosione di stelle massicce hanno mostrato, fin dai tempi della classificazione di Minkowski (anni 50) un elevato grado di individualità delle loro proprietà fotometriche e spettroscopiche. Tuttavia quanto osservato negli ultimi 3-4 anni possiede elementi di straordinarietà. Da un lato è stata trovata e studiata una famiglia di SNe "ultra-faint", cioè più deboli di  $M_B \sim -13$  (al massimo) e velocità di espansione dell'ordine di 1000 km/s (Pastorello et al. 2007a).

Questo dimostra che SN 1997D (Turatto et al. 1998) non è una SN peculiare insolitamente debole, ma il prototipo di una classe di esplosioni 100-200 volte meno energetiche di un evento core-collaps "standard". Per lo studio teorico di questi oggetti è stato sviluppato un codice (Zampieri et al. 2003), che mostra l'esistenza di un continuo di proprietà nel passare dagli oggetti meno energetici (e.g. 1997D) ai più brillanti (e.g. SN 1983K). L'esistenza di SNe core-collaps "ultra-faint" potrebbe avere importanti implicazioni anche per lo studio dei GRB "silenti".

All'altro estremo abbiamo lo studio di SN straordinariamente brillanti, con luminosità al picco che sfiorano  $M_B \sim -22$ , circa 100 volte più brillanti di una tipica SN II. Anche in questo caso il grado di individualità nelle proprietà manifestate è elevatissimo. Ci sono oggetti 2006jc-like (Pastorello et al. 2007b, 2008), classificati come Ib-n, che derivano dall'esplosione di W-R stars immerse in nubi gassose circumstellari ricche di He (materiale perso durante episodi eruttivi di mass-loss) e polveri (Di Carlo et al. 2008) e per contro oggetti unici come SN 2006gy (Agoletto et al. 2008), con una evoluzione fotometrica straordinariamente lenta e la cui natura è tuttora controversa.

Risulta opportuno sviluppare le trattazioni idrostatiche dei progenitori delle SN core-collaps tenendo conto della rotazione differenziale.

#### 4.2.3 *Associazione Supernovae-Gamma Ray Bursts*

Contrariamente a quanto si pensava, non tutti i GRB lunghi sono associati a SN (i.e. GRB 060614, Gehrels et al. 2006; Della Valle et al. 2006, Mangano et al. 2007), o almeno a SN di magnitudine assoluta tipica di una Ic. Per contro, GRB 060218 ha fornito l'esempio più eclatante di associazione SN-GRB, e ha dato la possibilità di osservare il sistema dal suo nascere (Campana et al. 2006). L'evento chiamato GRB 080109 è stato interpretato sia come pura emissione di SN (con il relativo shock break out, Soderberg et al. 2008), sia come GRB sotto-luminoso (Li 2008; Mazzali et al. 2008).

#### 4.2.4 *Gamma Ray Bursts*

Vari gruppi italiani, sia INAF che INFN, fanno parte dei gruppi di ricerca legati a Swift (vedi <http://www.merate.mi.astro.it/docM/OAB/Research/SWIFT/contacts.html>), a AGILE e a Fermi (vedi <http://www-glast.stanford.edu/cgi-bin/people>). Inoltre, c'è un notevole contributo teorico sulle tematiche inerenti all'uso cosmologico dei GRBs, sui meccanismi di emissione, sull'interpretazione dei GRB corti, e sulla connessione GRB/SN. Si sono anche avviati programmi per la costruzione del catalogo di tutti i GRB rivelati da INTEGRAL (Vianello et al. 2008). IBAS (per INTEGRAL; Mereghetti et al. 2003) è stato il primo sistema a dare localizzazioni precise in real time ed è ancora operativo con circa un GRB/mese. AGILE ha rivelato GRB 080514B tra 30 MeV e 50 GeV (Giuliani et al. 2008): la sua emissione gamma è estesa nel tempo, con un terzo dei fotoni rivelati

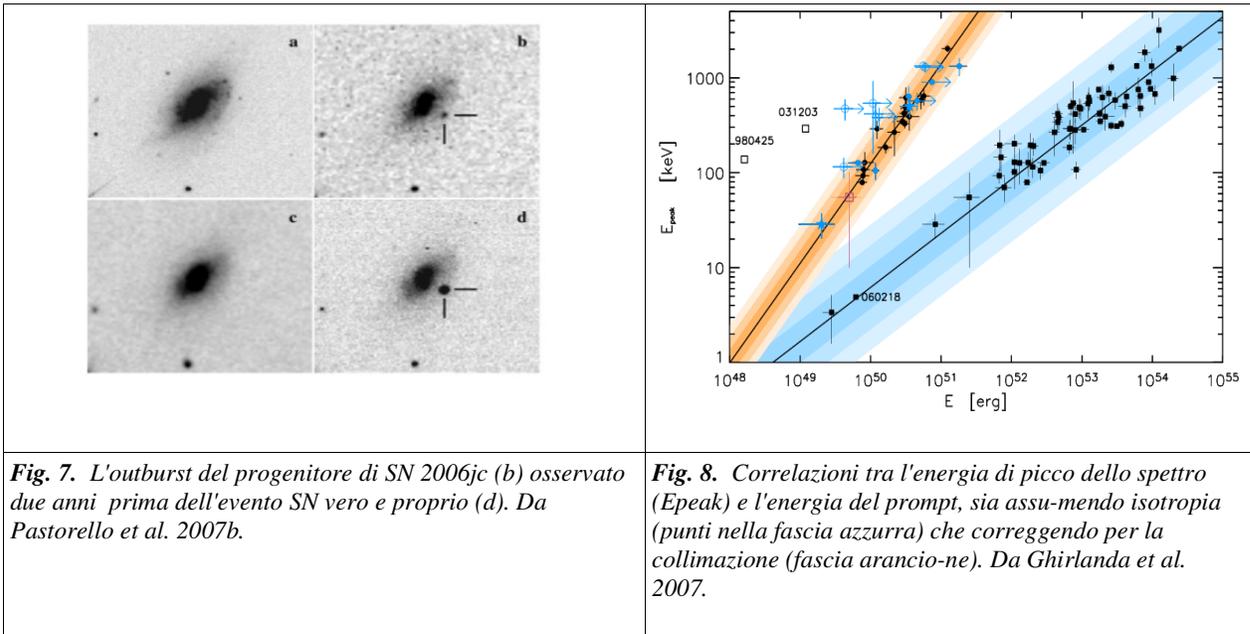
durante l'emissione prompt nell'hard X), e il resto a tempi fino a tre volte quello dell'emissione prompt.

Oltre al problematiche legate ai GRB corti, discusse sopra, qui di seguito riportiamo alcuni temi:

**Origine dell'afterglow X e ottico** - Nelle due bande l'afterglow si comporta in maniera diversa e diversamente da quanto ci si aspettava (Tagliaferri et al. 2005) basandoci sui risultati di BeppoSAX (De Pasquale et al. 2006). C'è la possibilità che, soprattutto in X, l'emissione sia dovuta ancora al motore centrale, invece che allo scontro della fireball con il mezzo interstellare (Ghisellini et al. 2009).

**Origine dei flare X** - In circa un terzo dei GRB, Swift osserva dei flare nella banda X dopo ore-giorni dal tempo di trigger (Chincarini et al. 2007). Si discute tuttora circa la loro natura, ma l'idea prevalente è che siano anch'essi una manifestazione dell'attività della macchina centrale, che continua a funzionare anche molto dopo la durata dell'emissione gamma (Lazzati et al. 2008).

**Ambiente circumburst** - Ci si aspetta che la fireball viaggi in un mezzo la cui densità scala come  $1/R^2$  (vento stellare) mentre numerose indicazioni suggeriscono un mezzo omogeneo con densità di circa 1 particella/cm<sup>3</sup>. Il progenitore dovrebbe "abitare" in regioni di formazione stellare, con probabile forte estinzione ottica, e questo potrebbe giustificare come mai, in circa la metà dei GRB con afterglow X rivelato, non si riesce a rivelare la controparte ottica. Ma per l'altra metà dei GRB, rivelati in ottico, l'estinzione che si misura è piccola, spesso discordante (cioè molto minore) con la stima della colonna di idrogeno neutro derivante dai fit nella banda X (Stratta et al. 2004, Nardini et al. 2008). Una soluzione potrebbe essere nel tipo di composizione della polvere (Campana et al. 2007).



**Meccanismi di emissione dell'emissione prompt** - L'opinione più diffusa ritiene che l'emissione prompt sia dovuta a sincrotrone, che però produce spettri troppo soft rispetto a quelli osservati. Le varie alternative proposte (anche da gruppi italiani) quali Comptonizzazione termica, bulk



Compton, insieme di corpo nero più sincrotrone, non sono completamente convincenti. La svolta in questo campo si avrà con la conoscenza dello spettro ad altissima energia (GeV) da parte di Fermi.

**Relazioni spettro-energia** - La scoperta che l'energia di picco  $E_{peak}$  dell'emissione prompt correla sia con l'energia totale (sia isotropa che corretta per la collimazione, vedi Fig. 8), sia con la luminosità di picco, permette di standardizzare l'energia dei GRB e quindi di usarli per porre limiti ai parametri cosmologici. Queste correlazioni, trovate da gruppi italiani (Amati et al. 2002, 2006; Ghirlanda et al. 2004; Firmani et al. 2009), hanno stimolato un intenso dibattito a livello internazionale (e anche in Italia, e.g. Rossi et al. 2008), che ha portato ad una sofisticata disamina dei possibili effetti di selezione (Ghirlanda et al. 2008). Questi sono presenti, ma non fondamentali.

**Magnetar e GRB sottoluminosi** - GRB 060218 (Campana et al. 2006a) potrebbe essere il capostipite di una nuova classe di burst, dall'energetica più piccola dei burst classici (fattore 100-1000), dalla fase prompt particolarmente lunga (migliaia di secondi) e da una energia di picco  $E_{peak}$  bassa. Eventi di questo tipo devono essere molto frequenti (Pian et al. 2006), ma inosservati finora perché lo spettro picca a energie inaccessibili agli strumenti precedenti a Swift. E' stato proposto che il loro progenitore sia la nascita di una magnetar (stella di neutroni dal campo magnetico  $>10^{14}$  Gauss). Potrebbero produrre raggi cosmici di altissima energia (Arons 2003), associati agli eventi rivelati da Auger (Ghisellini et al. 2008). La loro vicinanza li rende estremamente interessanti per i prossimi rivelatori di onde gravitazionali, e per il legame con i cosiddetti X-ray Flashes (e.g. D'Alessio et al. 2006).

**Emissione di alta energia (GeV-TeV)** - I satelliti AGILE e Fermi e i telescopi Cerenkov (a movimentazione rapida, come MAGIC) potranno testare vari modelli di emissione di alta energia proposti sia per la fase prompt che afterglow (e.g. Corsi e Piro 2006; Galli & Piro 2008). Anche gli apparati a sciame (che rivelano le particelle secondarie che arrivano al suolo) con il loro grande campo di vista sono particolarmente adatti per osservazioni di GRB. Dopo MILAGRO (e MILAGRITO, che ha rivelato un segnale a  $3\sigma$  da GRB 970417A per  $E > 650$  GeV, Atkins et al. 2000), chiuso nell'Aprile 2008, l'unico apparato funzionante al mondo è ARGO-YBJ, collocato in Tibet a 4300 m s.l.m. E' una collaborazione italo-cinese con contributo italiano INFN, IFSI-To, IASF-PA, IASF-BO e di varie università. Nonostante il basso rate atteso di GRB rivelabili (0.1-0.5/anno, paragonabile a quello per MAGIC), osservazioni (ora pionieristiche) di questo tipo sono certamente interessanti.

**Host, mezzo interstellare e intergalattico** - Il "Rapid Response Mode" al VLT permette di osservare l'afterglow pochi minuti dopo lo scoppio e quindi fare spettroscopia ad alta risoluzione. Si possono così ottenere informazioni dettagliate sulla geometria, dinamica, chimica del gas presente nella zona di vicino al GRB, dell'ISM della galassia ospite e anche dell'IGM lungo la sua linea di vista. Questa è una opportunità unica per lo studio dell'ISM di galassie ad alto  $z$  (D'Elia et al. 2008).

### 4.3 Progetti e Missioni future

**E-ELT**: telescopio di nuova generazione, 42 metri. Per spettroscopia di afterglow e di galassie ospiti di GRB distanti. Osservazione in spettroscopia a bassa risoluzione di SNe-IIP, e SNe-IIL, SNe-Ia, HNe sino a  $z \sim 3$  e 5 rispettivamente (e oggetti brillanti nell'UV, tipo SN 1998S, fino a  $z \sim 8$ ). Anche se non ideale per una search, è perfetto per il follow-up. Grande sinergia tra ELT e future missioni spaziali. Lo  $\langle z \rangle$  dei GRB scoperti da Swift è circa 2, con ELT potremo seguire l'evoluzione fotometrica e spettroscopica dei progenitori di GRBs fino a  $z \sim 4$  (adesso siamo limitati a  $z < 1$ ).



**Upgrade di LVD (Large Volume Detector, rivelatore di neutrini):** si sta studiando la possibilità di drogare lo scintillatore liquido con Gadolinio, che permetterebbe una riduzione di un ordine di grandezza del tempo di cattura neutronica rispetto ad ora.

**GRB Monitor leggero (~30 kg)** IASF-Bo e Uni FE con contributi di IASF-Rm e IASF-Pa. Rivelatore <10 - 700 keV sia per LOBSTER-ISS che per SPECTRUM-RG. Basato su tecnologie innovative (e.g. scintillatori associati a rivelatori al silicio utilizzando tecniche a drift) che permettono l'estensione (in basso) della banda energetica fino a 1-2 keV.

**CTA (Cherenkov Telescope Array).** Con aumenti di sensibilità di almeno 10 volte e più basse energie di soglia. L'Italia, adesso presente sia in MAGIC che in HESS, contribuisce tramite INAF e INFN agli studi preliminari, mentre alle Canarie sta per finire l'implementazione del secondo telescopio MAGIC (con notevole contributo italiano) che permetterà già nel 2009 dei miglioramenti notevoli. La movimentazione rapida (decine di secondi) permette di seguire i GRB addirittura durante la loro fase prompt.

Satellite **EUCLID.** Esiste la possibilità che le SNe possano essere inserite come "scienza secondaria". In questo caso il goal scientifico non sarebbe la cosmologia, ma lo studio dei rates vs. redshift.

Satellite **SVOM** (dedicato ai GRB): consorzio franco-cino-italiano. Lancio previsto: fine 2013 (la parte italiana è guidata da IASF-Mi, PI: S. Mereghetti). Questa missione è già stata finanziata dalla parte cinese e francese. Si sta aspettando la valutazione ASI per **XIAO** (il telescopio X; Mereghetti et al. 2008) che dovrebbe essere fatto dall'Italia. Strumenti: ECLAIRS: maschera codificata [4-250 keV]; GRM [50 keV- 5 MeV]; XIAO [0.5-2 keV]; VT [0.4-0.95 micron]. Slew veloce e puntamento antisolare.

Satellite **JANUS** (Joint Astrophysics Nascent Universe Satellite; proposta SMEX, lancio previsto: 2012. Partecipazione italiana: uso di Malindi come stazione a terra). Per studiare in particolare l'epoca di re-ionizzazione sia con GRB ( $5 < z < 12$ ), che con quasar ( $6 < z < 10$ ). Rate previsto: circa 50 GRB a  $z > 5$ , 5 GRB a  $z > 8$ . Strumenti: HEMI [0.02- 1.5 MeV]; XRFM [1-20 keV]; NIRT [0.7- 1.7 microns]; Prisma obiettivo a grande campo per rivelare circa 400 quasar con  $6 < z < 10$ . Slew veloce.

Satellite **EDGE/XENIA** (Piro et al. 2008). Proposal per Decadal Survey NASA per mid-size mission. (PI per la parte italiana: L. Piro) Drive science: Evoluzione e Cosmologia con GRB e strutture cosmologiche a larga scala (cluster, WHIM). Inoltre: GRB physics, NS EOS, compact object, Surveys. Capacità strumentali: alta risoluzione spettrale, imaging a grande campo di strutture di bassa brillantezza superficiale e survey, sky monitor. Slew veloce.

Satellite **EXIST:** Proposal per Decadal Survey NASA per mid-size mission. Simile a Swift, ma più grande, con maschera codificata (10-600 keV) di sensibilità 10x-20x quella di BAT su Swift, telescopio X con circa 10 volte l'area efficace di XRT di Swift, e telescopio ottico-IR di 1.4 m di diametro. Lancio previsto nel 2017, L'Italia partecipa per il telescopio X. Slew veloce.

#### 4.4 Ricerche con fondi già assegnati.

PI	Istituti	Fondi	Finanziamento	Titolo	anno
Chincarini	Uni. Bicocca MI, OABr, OAPd, OARm, IASF-Mi, IASF-Bo, OACn, MPA Garching+TNG +Valencia	PRIN-MIUR	153.800	La fisica dei GRB, SN e molto di più.....	2008



Ghisellini	OABr, IASF-Mi, IASF-Bo	PRIN- INAF	55.000	Long and Short GRBs: the prompt emission	2008-2009
Della Valle	OAAr, OABr, OAPd, OATs	PRIN- INAF	60.0000	SN-GRB connection in the local universe	2006-2007

#### **4.5 Proposte per progetti che sarebbe importante fare (in ordine di costo)**

Se uno dei progetti spaziali per i GRB viene approvato: ottimizzazione del follow-up di GRB, organizzazione di osservazioni multi lambda da terra ottimizzando in maniera coordinata quanto già esiste, contributo a ground segment per analisi in real time e sfruttamento teorico/interpretativo. 2-3 post-doc INAF. Preparazione di giovani su GRB e Fermi: 2-3 borse per dottorato di ricerca e qualche post-doc.

Un centro di eccellenza sui GRB come il Dark Energy Center a Copenhagen. Costo: 2-3 Meuro/anno.

Partecipazione ad un consorzio internazionale per la costruzione di un array di telescopi Cherenkov (CTA) (che costerebbe complessivamente sui 100-130 milioni di euro). L'Italia potrebbe partecipare con una somma adeguata.

#### **4.6 Utilizzo delle grandi strutture**

Per le SN, l'ambiguità single-degenerate vs double-degenerate non è stata ancora risolta, tuttavia sono stati individuati alcuni mezzi di indagine per arrivare all'identificazione dei progenitori di SNe-Ia (SN rate vs. z, SN rate vs. environment, spettroscopia ad alta risoluzione di elementi con bassissimo potenziale di ionizzazione, osservazioni radio, osservazione spettroscopica di HIV). I risultati sono ancora contraddittori ma è probabile che nel volgere di qualche anno potremmo stabilire se l'apparente contraddittorietà sia o no dovuta alla varietà di progenitori e/o meccanismi esplosivi. Operativamente la ricerca italiana sulle SNe si sta sviluppando lungo linee di ricerca "consolidate", anche teoriche, descritte in precedenza, ma senza perdere di vista le opportunità offerte dalla nuova strumentazione. Sotto l'aspetto teorico va sviluppata e consolidata la modellistica dell'accrescimento di materia su WDs rotanti differenzialmente. Nel caso di accrescimento di idrogeno i risultati potranno essere di aiuto per capire quanto efficace possa essere il modello di progenitore "singolo degenerare" nella produzione di SN Ia. Inoltre gli effetti della rotazione differenziale dovranno anche studiati nel caso del modello "doppio degenerare" al momento testato positivamente solo con assunzione di rotatore rigido.

Sono attualmente in corso programmi osservativi per migliorare la conoscenza del rate di SN a z intermedi (Botticella et al. 2008). Altri sono in via di pianificazione (LBT). VST potrebbe rivelarsi una risorsa importante per le surveys, ma è difficile fare previsioni sul suo utilizzo. Programmi per l'osservazione di SN locali, per studiare la varietà dello "zoo" core-collapse e le sistematicità nelle SNe-Ia (fondamentale per il loro utilizzo cosmologico) ricevono continuamente tempo ai **telescopi ESO e in quelli nazionali**. Negli ultimi 5 anni astronomi italiani hanno guidato campagne osservative a **VLT e NTT** di ESO, con una media di 4 proposte approvate per anno.

La sinergia con **Swift e Galex** è in corso d'opera, con particolare interesse rivolto all'osservazione fotometrica di SNe nell'UV con UVOT e alla detection di shock break-out con Galex.



**3sqdeg** (WF spectrograph per un 8-10m) - E' una delle maggiori priorità scientifiche per la comunità astronomica europea (vedi Astronet Roadmap (<http://www.astronet-eu.org/Press-Conferences>). L'Italia ha grande interesse e disponiamo anche di un concetto strumentale molto innovativo (Ragazzoni et al. 2005). Le SNe ad alto z sono uno dei driver scientifici più importanti. Permetterà di classificare le SN di alto z scoperte con WF imagers su telescopi di 4-8m e di studiarne le proprietà fisiche per verificare se le SN-Ia lontane sono uguali a quelle vicine.

Oltre ai GRB, osservati di routine, **REM** ha già osservato una dozzina di SN in NIR. L'idea di una SN search in NIR è in fase di studio (il maggior ostacolo sembra essere la mancanza di man-power). L'implementazione di uno spettroscopio renderebbe REM una facility unica nel suo genere.

**X-SHOOTER**: spettrografo IR-ottico di nuova generazione al fuoco di un VLT, Particolarmente adatto per oggetti transienti osservati con ToO, come SN e GRB. Uso estensivo sia in tempo GTO italiano (in collaborazione con i partners danesi) che in open time.

Il Large Volume Detector (**LVD**), situato nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso alla profondità equivalente in acqua di 3600 m, è un rivelatore di neutrini a scintillatore liquido di 1000 tonnellate suddivise in 840 contatori, progettato principalmente per la rivelazione di neutrini da collasso gravitazionale (Aglietta et al. 1992). E' in presa dati dal 1992, e dal 2001 è nella sua configurazione finale. E' tra i rivelatori più sensibili esistenti (Agafonova et al. 2007; 2008), e può operare come singolo osservatorio oppure inserito nella rete di osservatori neutrinici **SNEWS (LVD + SuperKamiokande+Amada-Icecube)**. E' finanziato da INFN e dall' INR di Mosca. Per l'Italia, oltre all'INFN, partecipa l'ISFI di Torino e ricercatori dell'Univ. di Torino e di Bologna.

Dato che i GRB emettono su tutto lo spettro elettromagnetico, ci si avvale di tutti gli strumenti disponibili, sia da terra che dallo spazio. L'unica banda non utilizzata dai ricercatori italiani è quella radio, dato che i flussi radio tipici (microJy) richiedono l'uso del VLA (con programmi a guida americana). Si utilizzano: **VLT, LBT, TNG, REM, Swift, AGILE, Fermi, XMM, INTEGRAL**.

### Referenze

- Aglietta M., et al., 1992, Il Nuovo Cimento A., 105, 1793  
Agafonova N. Yu, et al., 2007, Astrop. Phys., 27, 254, (hep-ph/069305)  
Agafonova N. Yu, et al., 2007, Astrop. Phys., 28/6, 516, (hep-ph/0710.0295)  
Agnolotto, I., Benetti, S., Cappellaro, E. et al. 2008, ApJ, in press  
Acernese F., et al., 2008, Class. Quantum Grav., 25, 225001  
Amati L., Frontera F., Tavani M. et al., 2002, A&A, 390, 81  
Amati L., 2006, MNRAS, 372, 233  
Arons J., 2003, ApJ, 589, 871  
Atkins R., Benbow W., Berley D. et al. 2000, ApJ, 533, L119  
Benetti, S., Cappellaro, E., Mazzali, P. et al. 2005, ApJ, 623, 1011  
Bissaldi, E. Calura, F., Matteucci, F. et al. 2007, A&A, 471, 585  
Bloom J.S., Perley D.A., Li W. et al., 2008, ApJ subm. (astro-ph/0803.3215)  
Botticella, M., Riello, M., Cappellaro, E. et al. 2008, A&A, 479, 49  
Calura, F. & Matteucci, F. 2006, ApJ, 652, 889  
Calura, F. Matteucci, F, Tozzi, P. 2007, ApJ, 378, L11  
Campana S., Mangano V., Blustin A.J. et al., 2006, Nature, 442, 1008  
Campana S., Lazzat D., Ripamonti E., et al., 2007, ApJ, 654, L17  
Cappellaro, E., Riello, M., Altavilla, G. et al. 2005, A&A, 430, 83  
Chincarini G., Moretti A., Romano P., et al., 2007, ApJ, 671, 1903



- Corsi A. & Piro L., 2006, *A&A*, 458, 741  
Cresci, G., Mannucci, F., Della Valle, M., Maiolino, R. 2007, *A&A*, 462, 927  
D'Alessio V., Piro L. & Rossi E., 2006, *A&A*, 460, 653  
D'Elia V., Fiore F., Perna R. et al. et al., 2008 *ApJ* subm, (astro-ph/0804.2141)  
Della Valle M., Chincarini G., Panagia N., et al., 2006, *Nature*, 444, 1050  
Della Valle, M., Malesani, D., Benetti, S. et al. 2003, *A&A*, 406, L33  
Della Valle, M., Panagia, N., Padovani, P. et al. 2005, *ApJ*, 629, 750  
Della Valle, M., Malesani, D., Bloom, J. et al. 2006, *ApJ*, 642, L103  
Della Valle, M., Benetti, S., Mazzali, P. et al. 2008, *CBET*, 1602  
Del Monte E., Feroci M., Pacciani L., et al., 2008, *A&A*, 478, L5  
de Pasquale M., Piro L., Gendre, B., et al., 2006, *A&A*, 455, 813  
Di Carlo, E., Corsi, C., Arkherov, A. et al. 2008, *ApJ*, 684, 471  
Dominguez, I., Piersanti, L., Bravo, E. et al. 2006, *ApJ*, 644, 21  
Elias-Rosa, N., Benetti, S., Turatto, M. et al. 2008, *MNRAS*, 384, 107  
Firmani C., Cabrera J.I., Avila-Reese V., et al., 2009, *MNRAS*, in press (astro-ph/ 0811.1578)  
Galli A. & Piro L., 2008, *A&A*, 489, 1073  
Gehrels, N., Norris, J., Barthelmy, S. et al. 2006, *Nature*, 444, 1044  
Ghirlanda G., Ghisellini G., Lazzati D., 2004, *ApJ*, 616, 331  
Ghirlanda G., Nava L., Ghisellini G., Firmani C., Cabrera I.J., 2008, *MNRAS*, 387, 319  
Ghirlanda G., Nava L., Ghisellini G., Firmani C., 2007, *A&A*, 466, 127  
Ghisellini G., Ghirlanda G., Fraternali F., Pareschi G., 2008, *MNRAS*, 390, L88  
Ghisellini G., Nardini M., Ghirlanda G., Celotti A., 2009, *MNRAS*, in press (astro-ph/0811.1038)  
Giuliani A.A., Mereghetti S., Fornari F., et al. 2008, *A&A*, 491, L25  
Greggio, L. 2005, *A&A*, 441, 1055  
Greiner J., Kruehler T. Fynbo J.P.U. et al., 2008, *ApJ* subm. (astro-ph/0810.2314)  
Lazzati D., Perna R., Begelman M.C., 2008, *MNRAS*, 388, L15  
Li L.-X., 2008, *MNRAS*, 388, L603  
Maiolino, R., Vanzi, L., Mannucci, F. et al. 2002, *A&A*, 389, 84  
Malesani, D., Tagliaferri, G., Chincarini, G. et al. 2004, *ApJ*, 609, L5  
Mangano V., Holland S.T., Malesani D. et al., 2006, *A&A*, 470, 105  
Mannucci, F. Della Valle, M. Panagia, N. et al. 2005, *A&A*, 433, 807  
Mannucci, F., Della Valle, M., Panagia, N. 2006, *MNRAS*, 370, 773  
Mannucci, F., Maiolino, R., Cresci, G., et al. 2003, *A&A*, 401, 519  
Marisaldi M., Labanti C., Fuschino F., et al., 2008, *A&A*, 490, 1151  
Matteucci, F., Panagia, N., Pipino, A. et al. 2006, *MNRAS*, 372, 265  
Mazzali P.A., Valenti S., Della Valle M., 2008, *Science*, 321, 1185  
Mazzali, P., Benetti, S., Altavilla, G. et al. 2005, *ApJ*, 623, L37  
Mazzali, P., Kawabata, K., Maeda, K. et al. 2005, *Science*, 308, 1284  
Mazzali, P., Ropke, F., Benetti, S., Hillebrandt, W. 2007, *Science*, 315, 825  
Mereghetti S. et al., 2003, *A&A*, 411, L291  
Mereghetti S., De Luca A. & Fiorini M., 2008, *SPIE*, in press (arXiv:0807.0893 )  
Molinari E., Vergani S.D., Malesani D., et al. 2007, *A&A*, 469, L13  
Nardini M., Ghisellini G., Ghirlanda G., 2008, *MNRAS*, 383, 1049  
Panagia, N., Van Dyk, S., Weiler, K. et al. 2006, *ApJ*, 646, 369  
Pastorello, A., Della Valle, M., Smartt, S. et al. 2007a, *Nature*, 449, 1  
Pastorello, A., Smartt, S., Mattila, S. et al. 2007b, *Nature*, 447, 829



- Pastorello, A., Mattila, S., Zampieri, L., et al. 2008, MNRAS, 389, 113  
Patat, F., Chandra, P., Chevalier, R. et al. 2007, Science, 317, 924  
Patat, F., Benetti, S., Justham, S. et al. 2007, A&A, 474, 931  
Perlmutter, S., Aldering G., Della Valle, M. et al. 1998, Nature, 391, 51  
Perlmutter, S., Aldering, G., Goldhaber, G. et al. 1999, ApJ, 517, 565  
Pian E., Mazzali P.A., Masetti N., et al., 2006, Nature, 442, 1011  
Piersanti, L., Gagliardi, S., Iben I., Tornambe, A. 2003, ApJ, 583, 885  
Piro L. & the EDGE Collaboration, 2008, Exp. Astronomy, Online First, in press  
Raskin, C., Scannapieco, E., Rhoads, J., Della Valle, M. 2008, ApJ, 689, 358  
Riess, A., Filippenko, A., Challis, P. et al. 1998, AJ, 116, 1009  
Riess, A., Strolger, L., Tonry, J. et al. 2004, ApJ, 607, 655  
Rossi F., Guidorzi C., Amati L., et al., 2008, MNRAS, 388, 1284  
Soderberg A.M., Berger E., Page K.L., et al., 2008, Nature, 453, 469  
Stratta G., Fiore F., Antonelli L.A. et al., 2004, ApJ, 608, 846  
Tagliaferri G., Goad M., Chincarini G., et al., 2005, Nature, 436, 985  
Taubenberger, S., valenti, S., Benetti, S. et al. 2009, MNRAS, submitted  
Turatto, M., Mazzali, P., Young, T. et al. 1998, ApJ, 498, L129  
Vianello G., Götz D. & Mereghetti S., 2008, A&A in press (arXiv:0812.3349)  
Zampieri, L., Pastorello, A., Turatto, M. et al. 2003, MNRAS, 338, 711



## 5. ORIGINE DEI RAGGI COSMICI E MATERIA OSCURA

Preparato da Pasquale Blasi con il contributo di E. Amato, R. Bandiera, G. Brunetti, C. Morello, O. Catalano, M. Salvati

### 5.1 Scientific background a livello internazionale

Gli ultimi tre anni hanno visto uno sviluppo senza precedenti nel campo della fisica dei raggi cosmici, sia dal punto di vista osservativo che teorico: il lancio del satellite PAMELA ha, negli ultimi mesi del 2008 condotto alla tanto attesa misura, fra le altre cose, degli spettri di positroni e antiprotoni, ingrediente essenziale nella comprensione non solo della propagazione dei raggi cosmici ma anche della possibile esistenza di segnali dovuti alla annichilazione di materia oscura nell'alone della Galassia. PAMELA ha anche misurato gli spettri di raggi cosmici di diversa composizione chimica sino a circa 500 GeV di energia. Le osservazioni condotte con i telescopi Cerenkov, MAGIC, VERITAS ed HESS, hanno condotto alla rivelazione di radiazione gamma di alta energia da resti di supernova, i candidati più plausibili ad essere sorgenti dei raggi cosmici di origine galattica. In alcuni casi, come nel *remnant* RXJ1713.7-3946, è stato dimostrato che lo spettro gamma si estende sino ad energie di circa 100 TeV, una possibile evidenza di una origine adronica della radiazione da un resto di supernova. Il recente lancio del telescopio Fermi (già noto come GLAST) dovrebbe consentire in tempi abbastanza rapidi di stabilire se questo è il caso, misurando il flusso gamma ad energie più basse, ove l'interpretazione leptonica ed adronica conducono a predizioni significativamente diverse. Fermi avrà anche un ruolo importante nella misura del fondo gamma diffuso, sia di origine galattica che extragalattica. La rivelazione di radiazione gamma nella regione del TeV ha più o meno coinciso temporalmente con un altro risultato sperimentale di grandissima importanza: il satellite Chandra ha mostrato che l'emissione X non termica da molti resti di supernova *a shell* è molto concentrata spazialmente, tipicamente confinata a regioni di  $\sim 0.01$  pc. L'interpretazione più immediata di questo dato è che si stia osservando la regione in cui gli elettroni ultra-relativistici perdono energia per sincrotrone. Questa interpretazione condurrebbe a dedurre che l'intensità del campo magnetico in questa zona è 100-1000 volte superiore a quella nel mezzo interstellare, fornendo così la prima evidenza di una forte amplificazione del campo magnetico, probabilmente indotta dai raggi cosmici stessi. Se confermato, questo sarebbe il tassello mancante per comprendere come i resti di supernova possano accelerare raggi cosmici sino al cosiddetto *ginocchio*,  $\sim 3 \times 10^{15}$  eV. La piccola dimensione della regione di emissione X potrebbe però risultare dal *damping* del campo magnetico, nel qual caso la stima del campo stesso diviene molto più problematica. Osservazioni nel radio potranno chiarire quale sia l'interpretazione corretta. Sta intanto procedendo la misura dello spettro di raggi cosmici di energia attorno a  $10^{17}$ - $10^{18}$  eV con KASCADE-GRANDE. Questa regione spettrale è di grande importanza per comprendere la natura della transizione da raggi cosmici galattici ad extragalattici. L'ormai storica interpretazione della *caviglia* (*ankle*) come la zona di transizione fra una componente Galattica ed una extragalattica, negli ultimi tre anni è stata soppiantata da un paio di altre possibilità, il *modello del dip* e il *modello a composizione mista*.



Nella regione di energia  $>10^{18}$  eV, gli ultimi anni hanno visto la pubblicazione dei tanto attesi dati del *Pierre Auger Observatory (PAO)*. Questi dati confermano la presenza della soppressione GZK prevista nel 1966 da Greisen, Zatsepin e Kuzmin, ma, cosa forse ancora più importante, mostrano la prima evidenza diretta di anisotropia nelle direzioni di arrivo ed una possibile correlazione con AGN, o con sorgenti la cui distribuzione spaziale correla con quella degli AGN. E' plausibile che questo sia l'inizio dell' Astronomia a Raggi Cosmici, visto che ci si aspetta che le direzioni di arrivo per energie al di sopra di  $5 \times 10^{19}$  eV puntino entro 1-3 gradi dalle sorgenti, essendo solo debolmente influenzate dal campo magnetico Galattico. Il PAO ha anche fornito importanti informazioni sulla composizione chimica dei raggi cosmici a queste energie estreme.

Da un punto di vista teorico, gli ultimi anni hanno visto lo sviluppo di una teoria non lineare della accelerazione di particelle in resti di supernova, ingrediente cruciale per comprendere l'origine dei raggi cosmici e per descrivere le osservazioni a multifrequenza da queste sorgenti. Tale teoria consente di inserire la gran parte delle osservazioni sopra menzionate in un contesto teorico appropriato e soprattutto di poter appurare o rigettare l'associazione fra raggi cosmici galattici e resti di supernova.

Un settore importante dell'astrofisica delle alte energie, con una forte sovrapposizione con l'astrofisica dei raggi cosmici è rappresentato dallo studio della fenomenologia non termica in strutture su grande scala, come gli ammassi di galassie, che confinano le particelle accelerate al loro interno per periodi che eccedono l'età dell'Universo. Gli ultimi anni hanno visto lo sviluppo di complesse modellistiche di accelerazione di particelle negli ammassi che, assieme ai grandi sviluppi osservativi, hanno permesso di definire un primo quadro di riferimento per l'interpretazione di tale fenomenologia.

L'accelerazione, la propagazione e l'emissione di queste particelle rappresenta un campo molto attivo, che aspetta da Fermi, dai telescopi Cherenkov e soprattutto dai futuri radio telescopi, quali LOFAR e LWA, degli *input* cruciali.

## **5.2 Ricerche in Italia**

Gli studi sull' origine dei raggi cosmici hanno una lunga tradizione in Italia e la comunità italiana continua oggi ad avere un ruolo estremamente importante ed attivo. Questa attività rappresenta un esempio di sovrapposizione di interessi con la comunità INFN, che ha contribuito in modo determinante alla realizzazione di alcuni dei progetti sopra elencati (ad esempio PAMELA, Fermi, MAGIC, PAO). Se la costruzione materiale di alcuni di questi esperimenti (PAMELA, Fermi, PAO) è stata quasi totalmente appannaggio dell' INFN, il contributo in termini di supporto scientifico e di analisi dei dati, nonché l'interesse per le tematiche coperte, si estendono abbondantemente nell'INAF, come testimoniato non solo dal numero di scienziati a vario titolo implicati, ad esempio, nella ricerca di sorgenti con il satellite Fermi o nelle operazioni del PAO, ma anche dalla portata e dalla risonanza dei risultati da essi raggiunti. L'INAF sta inoltre contribuendo in modo determinante anche alla costruzione *hardware* del telescopio MAGIC-II.

Nel seguito discuteremo brevemente alcune delle ricerche condotte in Italia in ambito INAF nel campo della fisica dei raggi cosmici ed argomenti correlati.



### 5.2.1 Ricerca Teorica

Ci sono stati due sviluppi importanti negli ultimi tre anni sul piano teorico-fenomenologico: 1) la formalizzazione di una teoria non lineare della accelerazione di particelle ad onde d'urto, 2) la formulazione del modello del *dip* per la transizione da raggi cosmici galattici ad extragalattici.

La teoria non lineare dell'accelerazione di raggi cosmici consente di determinare lo spettro (in forma e normalizzazione) delle particelle accelerate ad un'onda d'urto, situazione tipica ad esempio dei resti di supernova. La teoria non rappresenta una piccola correzione al ben noto meccanismo di Fermi, ma piuttosto ne rivela il modo di funzionamento reale, basato su un complesso gioco di accelerazione, generazione di turbolenza magnetica, reazione dinamica delle particelle accelerate e del campo magnetico sull'acceleratore stesso. Una parte determinante di questo lavoro è stato compiuto dal Gruppo di Arcetri, ed è stato finanziato tramite PRIN MIUR, PRIN INAF e Grant ASI. Le basi della teoria non lineare sono state pubblicate da Amato & Blasi (2005, 2006), che hanno per la prima volta incluso la trattazione dell'amplificazione del campo magnetico per instabilità di *streaming* indotta dalle stesse particelle accelerate. Gli effetti non lineari influiscono in modo determinante sull'energia massima delle particelle accelerate, che solo grazie a tali effetti può diventare dell'ordine di grandezza della energia del ginocchio (Blasi, Amato & Caprioli 2007). Caprioli, Blasi, Amato & Vietri (2008a, 2008b) hanno dimostrato che il campo magnetico amplificato, perfettamente compatibile con quello ottenuto dalle misure X di Chandra dello spessore dei filamenti osservati in molti resti di supernova, induce una reazione dinamica sull'acceleratore, in modo da rendere il plasma meno comprimibile. Questa scoperta ha consentito di riconciliare le predizioni con le osservazioni relative alla distanza dello shock principale dalla discontinuità di contatto misurata in alcuni resti di supernova che mostrano attività non termica.

Questi effetti non lineari hanno profonde implicazioni per la connessione fra le particelle accelerate e i raggi cosmici come rivelati a Terra: i raggi cosmici sono, molto probabilmente, costituiti da particelle accelerate e che sfuggono dallo shock (flusso di fuga) verso upstream solo quando hanno energia prossima alla massima energia a un dato tempo nella fase di Sedov-Taylor. Lo studio di questo complesso fenomeno è stato iniziato da Caprioli, Blasi e Amato (2008).

L'approccio teorico sopra proposto è stato poi applicato alla fenomenologia a multi-frequenza del resto di supernova RXJ1713.7-3946 (Morlino, Amato & Blasi 2008), osservato da HESS sino ad energia di circa 100 TeV, in uno studio sistematico degli argomenti in favore e contro una interpretazione adronica dei dati a multifrequenza.

Questi sviluppi teorici portano ad una serie di conclusioni: 1) Specie nucleari di carica  $Z$  vengono accelerate ad energie  $Z$  volte superiori a quelle dedotte per protoni (per i quali l'energia massima è circa quella del ginocchio); 2) il ginocchio nello spettro complessivo è molto probabilmente dovuto alla sovrapposizione degli spettri delle diverse componenti nucleari, ciascuna con la propria energia massima; 3) lo spettro dei raggi cosmici galattici dovrebbe terminare ad energie  $\sim 10^{17}$  eV.

Questo terzo punto ha aperto un dibattito molto acceso sulla transizione fra raggi cosmici galattici ed extragalattici, che tradizionalmente è stata fatta coincidere con la caviglia dello spettro, a  $\sim 5 \cdot 10^{18}$  eV, molto più in alto di quanto previsto sopra. In modo indipendente da quanto sopra descritto, due interpretazioni della transizione sono apparse in letteratura: una basata sul modello di composizione mista, principalmente proposta da un gruppo franco-americano, e l'altra, il modello del *dip*, proposta da un gruppo italiano a componente mista INAF-INFN. Nel modello del *dip*, la caviglia è naturalmente descritta in termini di espansione dell'universo e perdite per produzione di coppie. Il modello fa predizioni molto precise circa lo spettro e la composizione chimica dei raggi cosmici



nella zona di transizione ed oltre (Aloisio et al. 2007, 2008), che potranno essere verificate o confutate da esperimenti come KASCADE GRANDE e PAO.

Come accennato sopra, molte delle tematiche che sono basilari per la ricerca sull'origine dei raggi cosmici è comune all'investigazione di fenomeni non termici in ammassi di galassie. La comunità italiana ha un ruolo molto importante in questo campo avendo dato contributi fondamentali all'attuale quadro interpretativo della fenomenologia.

Lo sviluppo più importante che si è avuto negli ultimi tre anni riguarda lo studio dell'interazione non lineare fra particelle e onde MHD (Brunetti & Blasi 2005, Brunetti & Lazarian 2007), che rappresenta il meccanismo più promettente per comprendere la fenomenologia dell'emissione radio diffusa negli ammassi. Tale modello predice l'esistenza di un gran numero di sorgenti di emissione radio diffusa a spettro molto ripido negli ammassi (Cassano et al. 2006, 2008), pertanto le surveys a bassa frequenza con i futuri radio telescopi, LOFAR e LWA, forniranno elementi utili a chiarire l'attuale quadro teorico-interpretativo. In tale contesto, è di rilievo la recente scoperta di emissione a spettro molto ripido nell'ammasso Abell 521, il possibile prototipo di tali sorgenti (Brunetti et al. 2008).

Nell'INAF la ricerca sull'origine dei raggi cosmici e argomenti correlati è svolta principalmente presso l'OAAr e l'IRA di Bologna. La ricerca viene finanziata tramite PRIN MIUR, PRIN INAF, e ASI (si veda prospetto riassuntivo).

I prossimi anni saranno un periodo d'oro per la ricerca nel settore dei raggi cosmici visto che il telescopio Fermi, i telescopi Cherenkov e rivelatori da terra stanno già inondando il settore di dati preziosi. A questi si aggiungono radio telescopi come LOFAR, particolarmente importanti per le problematiche legate ai fenomeni non termici in ammassi di galassie. I gruppi italiani hanno fornito dei contributi fondamentali allo sviluppo del settore e continueranno l'investigazione dei molti aspetti ancora non chiari di questo complesso problema, dalla connessione fra fenomenologia di resti di supernova e raggi cosmici osservati a Terra all'estensione degli studi sull'interazione fra raggi cosmici e la regione attorno alla sorgente, e all'accelerazione, propagazione e ruolo dinamico dei raggi cosmici durante la formazione della struttura su grande scala dell'Universo.

A dispetto della portata degli studi condotti nel campo teorico dell'astrofisica dei raggi cosmici, essi sono stati ottenuti da un numero ristretto di ricercatori, parecchi dei quali personale a tempo determinato (studenti e postdoc). Il mantenimento di un livello di eccellenza in questo settore di ricerca dipenderà dalla capacità dell'INAF di investire nell'assunzione di personale di alta qualità, sia a tempo indeterminato che determinato.

Tipo/Sorgente	Numero id.	PI	Base	Scadenza	Titolo	Note
PRIN MIUR		Blasi	Arcetri	09/02/2009	Fenomeni di alta energia nelle fasi successive al collasso stellare e l'origine dei raggi cosmici	
ASI	ASI-INAF I/088/06/0	Blasi	Arcetri	14/06/2009	Nonlinear particle acceleration at shock waves: implications for X/gamma ray astronomy and the origin of cosmic rays	Secondo anno di un progetto di durata triennale

ASI	ASI-INAF I/088/06/0	Bandiera	Arcetri	14/06/2009	MHD simulations of relativistic plasmas and of their high-energy emission	Secondo anno di un progetto di durata triennale
ASI	ASI-INAF I/088/06/0	Aloisio	LNGS/INFN	14/06/2009	UHECR and neutrinos	Secondo anno di un progetto di durata triennale
ASI	ASI-INAF I/088/06/0	Brunetti	IRA-Bologna	14/06/2009	Acceleration of high energy particles in galaxy clusters	Secondo anno di un progetto di durata triennale
PRIN INAF		Brunetti	IRA-Bologna	2010	Non thermal components in galaxy clusters	

**Prospetto riassuntivo dei finanziamenti a gruppi teorici con componente INAF che operano nel settore della astrofisica dei raggi cosmici o argomenti correlati.**

### 5.2.2 KASCADE Grande

KASCADE GRANDE mira alla rivelazione di sciame estesi (*Extensive air showers, EAS*) indotti dalle interazioni di raggi cosmici nell'atmosfera. La tecnica consente di misurare spettro, composizione chimica e anisotropia dei raggi cosmici primari in base alle caratteristiche degli EAS. L'esperimento è frutto di una collaborazione internazionale tra Italia, Germania, Polonia e Romania ed è in funzione presso il Forschungszentrum Karlsruhe. La componente italiana è costituita da ricercatori dell'Università e dell' IFSI-To. L'IFSI partecipa con 3 ricercatori ed 1 dottorando di ricerca la cui borsa di dottorato è finanziata dall' INAF, la componente universitaria (1 professore ordinario, 1 associato, 1 ricercatore e 1 assegnista) è associata all'INAF. Questo Gruppo è responsabile del rivelatore della componente elettromagnetica (Grande) sia per quanto riguarda la parte hardware che di ricostruzione, analisi ed interpretazione degli eventi.

Spoke-person dell'esperimento è Andreas Haungs. Il progetto è stato finanziato (per la sola componente universitaria) con fondi MIUR e per la parte INAF con i fondi del PRIN INAF 2006 per il progetto "*Primary cosmic ray spectrum and composition measurements by ground based arrays*", P.I.: Morello Carlo.

La ricostruzione degli eventi consente di ottenere la massima efficienza di trigger e di ricostruzione ad energie attorno a  $2 \times 10^{16}$  eV per sciame con direzioni di arrivo fino a  $40^\circ$ . In parallelo alla misure descritte è sperimentata, con buon successo, la rivelazione degli EAS con tecnica radio.

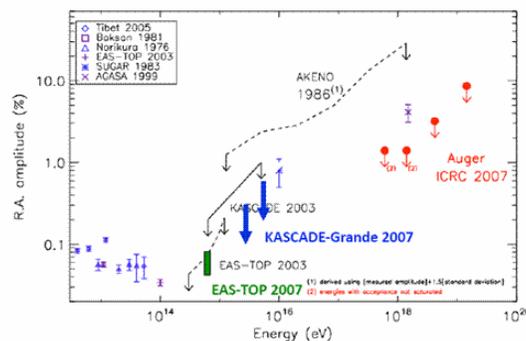


Fig. 1: Riassunto di recenti misure di anisotropia dei raggi cosmici su un vasto range di energia e primi limiti di KASCADE Grande.

Lo scopo scientifico principale dell'esperimento è lo studio della zona di transizione fra raggi cosmici galattici ed extragalattici, principalmente tramite una misura attendibile dello spettro, dell'anisotropia e della composizione chimica in tale zona. Nella figura allegata sono riportate le misure di anisotropia effettuate con EASTOP, Auger e i primi limiti ottenuti da KASCADE Grande. Le analisi per lo studio dello spettro primario nell'intervallo  $10^{16}$ – $10^{18}$  eV sono attualmente in corso.

### 5.2.3 Il Pierre Auger Observatory (PAO)

IL PAO è un esperimento mirato ad esplorare l'origine dei raggi cosmici di altissima energia ( $> 10^{18}$  eV) tramite la rivelazione di sciame atmosferici con un rivelatore di superficie ed uno a fluorescenza. Sin dalla sua concezione, il PAO è stato pensato come composto da due parti, una per ciascun emisfero, al fine di avere una copertura completa del cielo. Con i circa  $3000 \text{ km}^2$  di superficie coperti con 1600 rivelatori Cherenkov ad acqua e 4 telescopi a fluorescenza, la parte del PAO collocata nell'emisfero sud rappresenta il più grande osservatorio al mondo per lo studio dei raggi cosmici. Il completamento del rivelatore di superficie e dei telescopi a fluorescenza è avvenuto nel 2008. Il PAO è l'unico osservatorio che consente la rivelazione di uno stesso sciame atmosferico con entrambe le tecniche di rivelazione, fatto questo di grande importanza per chiarire problemi di calibrazione relativa che hanno influenzato altri esperimenti.

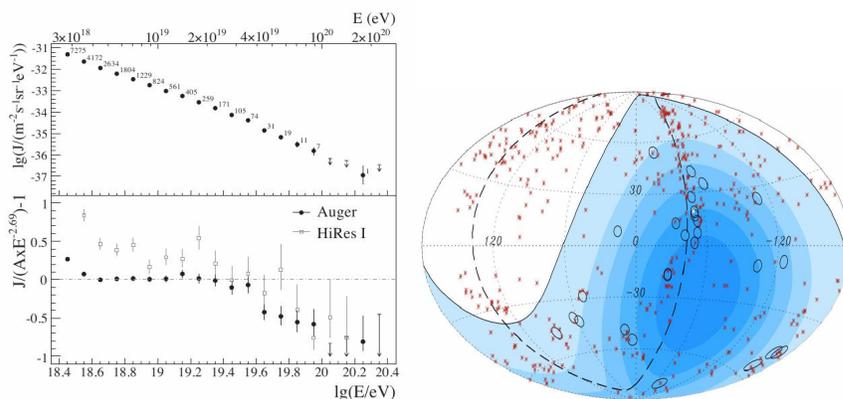


Fig. 2. Sinistra) in alto: flusso differenziale misurato da Auger in funzione dell'energia; in basso: confronto tra le misure di HIRES I ed Auger relative ad uno spettro con indice 2,69. Destra) Direzioni di arrivo degli eventi con  $E > 52 \text{ EeV}$  (cerchi blu). La posizione degli AGN è indicata con i punti rossi.

Il PAO è in presa dati da gennaio 2004 (Abraham et al. 2004). I risultati finora ottenuti si possono sintetizzare come segue:

- lo spettro di energia (Fig. 2, sinistra) mostra la “caviglia” a circa  $6 \times 10^{18}$  eV e la soppressione GZK ad energie maggiori di  $60 \text{ EeV}$  (Abraham et al. 2008a);
- ad energie maggiori di circa  $60 \text{ EeV}$  le direzioni di arrivo dei raggi cosmici diventano anisotrope (Vedi Fig. 2 destra per le direzioni di arrivo sovrapposte alle posizioni di AGN) (Abraham et al. 2008c, 2007);
- la frazione di fotoni primari è minore del 2% al di sopra di  $10^{19}$  eV (c.l. del 95%); questo limite condiziona i modelli di tipo top-down per l'origine dei raggi cosmici di altissima energia (Abraham et al. 2008b, 2007b);



- limite superiore (90% c.l.) al flusso diffuso di neutrini di tipo  $\tau$ ,  $\nu_\tau$ , di alta energia nell'intervallo  $2 \times 10^{17} < E_\nu < 2 \times 10^{19}$  eV:  $E_\nu^2 dN_{\nu\tau}/dE_\nu < 1.3 \times 10^{-7} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$  (Abraham et al. 2008d).

I risultati accennati costituiscono un passo storico nel campo della fisica cosmica e forniscono la prospettiva di dare inizio ad una astronomia a raggi cosmici, ovvero di identificare e studiare le sorgenti di queste particelle estremamente energetiche. Per una copertura totale del cielo e per consentire di aumentare ulteriormente la statistica di eventi rivelati, la comunità sta lavorando alla progettazione e costruzione del sito del PAO nell'emisfero nord, in Colorado. L'apparato Nord del PAO è uno dei 7 progetti prioritari inseriti nel programma strategico europeo redatto dal network ASPERA per lo sviluppo delle ricerche nel campo della fisica astroparticellare.

Alla collaborazione internazionale per il Pierre Auger Observatory partecipano 17 paesi, tra cui l'Italia. La partecipazione italiana è supportata dai finanziamenti INFN ed include ricercatori dell'INFN, di diverse Università e dell'INAF (IFSI-To, IASF-Pa, OAAr). *Spoke-person* del PAO è Giorgio Matt (Università di Roma II).

L'IFSI-To partecipa al progetto dal 2001 con 5 ricercatori, 2 assegnista di ricerca, 2 professori universitari associati all'INAF e 1 tecnico, occupati nella progettazione, realizzazione, *commissioning*, calibrazione, gestione ed analisi dati del rivelatore di superficie. I ricercatori IFSI sono anche coinvolti nello studio della ricostruzione energetica ed angolare, nella ricerca di sorgenti ed anisotropie e nello studio della composizione chimica dei primari. I ricercatori dell'IFSI di Torino coordinano 2 degli 8 task di gestione dell'esperimento (prestazioni dei fotomoltiplicatori del rivelatore di superficie e selezione degli eventi ed apertura/trigger del rivelatore) e 2 dei 13 task di analisi (ricostruzione degli eventi del rivelatore di superficie e sorgenti puntiformi).

L'IASF-Pa partecipa al PAO dal 2006 con 5 ricercatori. L'attività è dedicata *a*) alla messa a punto di tecniche e procedure per lo studio della trasparenza del cielo e della luce diffusa di fondo notturno a diverse lunghezze d'onda (UVscope); *b*) allo sviluppo di tecniche di visione stereoscopica per la determinazione dell'altezza e profondità ottica delle nuvole. Entrambe le attività (UVscope e nuvole) sono anche legate al sito Nord dell'Osservatorio.

Le dimensioni dell'apparato, il luogo geografico in cui opera e la necessaria stabilità di misure di alta qualità che si protraggano per molti anni richiedono la continuazione delle attività hardware e software per il controllo e la calibrazione dei rivelatori. In parallelo sarà continuato lo sfruttamento scientifico dei dati per la ricerca di sorgenti, anisotropie, studio dello spettro e della composizione primaria.

Nel 2009 inizierà la dislocazione sul sito Nord di alcuni rivelatori di prova e saranno effettuati test con il sistema di trasmissione dati. Sarà inoltre sviluppata una attività di R&D per migliorare sia le prestazioni dei rivelatori di superficie che del rivelatore di fluorescenza. L'inizio della costruzione vera e propria è previsto per il 2011. Visti i risultati e il ruolo della comunità italiana in PAO, è naturale pensare ad un eguale ruolo nella sezione nord del PAO.

Il PAO è incluso tra i principali progetti del Piano a Lungo Termine dell'INAF. Finora l'Ente non ha supportato economicamente la partecipazione dei suoi ricercatori al progetto. E' auspicabile che in un prossimo futuro l'INAF assuma iniziative atte a supportare, anche solo parzialmente e nel limite di quanto consentito dal suo bilancio, la partecipazione allo sfruttamento dei risultati scientifici del progetto Auger ed alla realizzazione dell'apparato nell'emisfero nord.



#### 5.2.4 *MAGIC*

Il telescopio MAGIC ha giocato un ruolo da protagonista negli sviluppi dell'astronomia al TeV negli ultimi anni. Assieme al telescopio HESS ha aperto la possibilità di osservare sorgenti galattiche ed extragalattiche con un'accuratezza senza precedenti. MAGIC ha ottenuto risultati di straordinaria importanza in astronomia extragalattica, con l'osservazione di nuclei galattici attivi ed altri tipi di galassie con intensa attività non termica. MAGIC ha inoltre osservato sorgenti galattiche come sistemi binari e pulsar, misurando l'emissione pulsata dalla Crab pulsar ad energie superiori a 25 GeV (Albert et al. 2008).

Nel 2007-2008 l'INAF ha firmato una serie di MoU con la collaborazione MAGIC (preliminari nel 2007, definitivi nel 2008), in forza dei quali l'INAF ha fornito 104 pannelli di circa un metro quadro ciascuno per coprire metà della superficie di MAGIC-II. La tecnica adottata è quella di sandwich di vetro messi "in forma" tramite cold slumping. Il valore di investimento attribuito a questo contributo è stato di 300,000 Euro, inclusivi sia del contratto industriale (con Media Lario) sia dell'attività di ricerca e sviluppo (OABr OAPa). Il montaggio degli specchi a La Palma è stato curato da personale INAF degli OABr, OAPd e del TNG. In conseguenza del MoU, l' INAF ha il diritto di partecipare al Board della collaborazione; sei *'full scientist'* e due postdoc sono coinvolti nelle attività scientifiche e di gestione, e compaiono nella lista di autori dei lavori MAGIC; altri scienziati INAF possono essere coinvolti, se e quando necessario. Le attività scientifiche e di gestione sono state finanziate con 20 kEuro/anno; sia questi fondi sia quelli iniziali di investimento sono stati erogati dal Dipartimento Progetti dell'INAF. Questi stessi fondi contribuiscono a mantenere un minimo di partecipazione INAF alle attività di preparazione del Cherenkov Telescope Array (CTA), che rappresenta la frontiera futura dell'astronomia Cherenkov, naturale evoluzione di progetti come HESS, MAGIC e VERITAS.

#### 5.2.5 *JEM-EUSO*

(Extreme Universe Space Observatory on board of the Japanese Experimental Module of the International Space Station)

Questo esperimento è mirato alla misura del flusso di raggi cosmici di energia superiore a  $4 \cdot 10^{19}$  eV tramite rivelazione dallo spazio della luce di fluorescenza indotta dal passaggio di sciame in atmosfera. JEM-EUSO è il primo esperimento ad adottare questa strategia. Il modulo sperimentale giapponese (JEM) ospiterà JEM-EUSO sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS). Si prevede che JEM-EUSO osserverà  $2 \cdot 10^5$  km<sup>2</sup> di atmosfera terrestre da 400 km di altezza e consentirà di rivelare circa 1000 particelle con energia superiore a  $7 \cdot 10^{19}$  eV in tre anni, fornendo così informazioni utili alla identificazione delle sorgenti. Il PI dell'esperimento è Toshi Ebisuzaki e i Paesi coinvolti sono Giappone, Italia (Univ. Firenze, Univ. Napoli, Univ. Palermo, Univ. Roma "Tor Vergata", Univ. Torino, INOA/CNR, IASF-Pa, IFSI-To, INFN), Francia, Germania, Spagna, Corea del Sud, Messico, Russia, Svizzera, USA. Complessivamente 28 ricercatori italiani sono coinvolti, su tematiche legate alla caratterizzazione dei fotomoltiplicatori, al primo e secondo livello di trigger a definizione algoritmi (task leader), alla progettazione e implementazione di interfacce e protocolli CPU di bordo (task leader), alla ricostruzione geometrica di eventi mediante simulazioni e alla ricostruzione dell'altezza delle nuvole da dati IR (infrarosso).

JEM-EUSO è stato Selezionato dall'agenzia Giapponese Spaziale JAXA per la fase A/B (studio di fattibilità e progetto preliminare) nel Maggio 2007. La JAXA deciderà se proseguire con la fase C/D (progetto finale e costruzione esperimento) nella primavera del 2009. In caso di decisione positiva di JAXA, il lancio è previsto per il 2013.



Nell'ambito dello studio AAE (Astrofisica Alte Energie) JEM-EUSO è stato finanziato nel 2008 per 74.000 Euro. Una richiesta di co-finanziamento di 100.000 Euro è stata approvata nello stesso anno dal MAE (Ministero Affari Esteri) nell'ambito del bando "Progetti grandi rilevanza" tra Italia e Giappone.

Il finanziamento ottenuto dall'AAE e MAE ha permesso ai ricercatori Italiani interessati a JEM-EUSO di poter partecipare al progetto limitatamente alla fase A/B. Un simile livello di coinvolgimento negli eventuali sviluppi successivi richiederebbe un intervento dell'Ente, con un riconoscimento del Progetto e un supporto adeguato.

### Referenze

- Abraham, J., et al. (PAO Coll.), 2008a, *Phys. Rev. Lett.*, 101, 061101  
Abraham, J., et al. (PAO Coll.), 2008b, *Astropart. Phys.*, 29, 243  
Abraham, J., et al. (PAO Coll.), 2008c, *Astropart. Phys.*, 29, 188  
Abraham, J., et al. (PAO Coll.), 2008d, *Phys. Rev. Lett.*, 100, 211101  
Abraham, J., et al. (PAO Coll.), 2007, *Science* 318, 939  
Abraham, J., et al. (PAO Coll.), 2007a, *Astropart. Phys.*, 27, 244  
Abraham, J., et al. (PAO Coll.), 2007b, *Astropart. Phys.*, 27, 155  
Abraham, J., et al. (PAO Coll.), 2004, *Nuclear Instruments and Methods*, A523, 50  
Albert, J., et al. (MAGIC Coll.), 2008, *ApJ*, 674, 1037  
Aloisio, R., Berezhinsky, V., Blasi, P., Gazizov, A., Grigorieva, S., and Hnatyk, B., 2007, *Astropart. Phys.*, 27, 76  
Aloisio, R., Berezhinsky, V., Blasi, P., Ostapchenko, S., 2008, *PRD*, 77, 025007  
Amato, E., and Blasi, P., 2005, *MNRAS Lett.*, 364, 76  
Amato, E., and Blasi, P., 2006, *MNRAS*, 371, 1251  
Blasi, P., Amato, E., and Caprioli, D., 2007, 375, 1471  
Brunetti, G., Blasi, P., 2005, *MNRAS* 363, 1173  
Brunetti, G., Lazarian, A., 2007, *MNRAS* 378, 245  
Brunetti, G., et al., 2008, *Nature* 455, 944  
Caprioli, D., Blasi, P., Amato, E., 2008, *MNRAS*, in press (arXiv0807.4259)  
Caprioli, D., Blasi, P., Amato, E., and Vietri, M., 2008a, *ApJ Lett.*, 679, 139  
Caprioli, D., Blasi, P., Amato, E., and Vietri, M., 2008b, *MNRAS*, in press (arXiv0807.4261)  
Cassano, R., Brunetti, G., Setti, G., 2006, *MNRAS* 369, 1577  
Cassano, R., et al., 2008, *A&A* 480, 687  
Morlino, G., Amato, E., and Blasi, P., 2009, *MNRAS*, 392, 240



## **6. FISICA DELLA GRAVITAZIONE E COSMOLOGIA CON L'ASTROMETRIA SPAZIALE DI ALTA PRECISIONE**

*Preparato da M. Gai*

### **6.1 Scientific background**

Il miglioramento della precisione nella verifica della Relatività Generale (GR) rappresenta un risultato cruciale per la fisica fondamentale, con impatti cosmologici ed astrofisici a tutte le scale.

Infatti lo studio dell'evoluzione dell'Universo, in un arco temporale di 60 ordini di grandezza, dai primordi fino al presente, dipende essenzialmente dalla comprensione dell'interazione gravitazionale, la cui interpretazione più accreditata è costituita dalla Relatività Generale.

Le condizioni iniziali dell'Universo stabiliscono come si sono formate le prime strutture a grande scala, fino alle galassie ritenute, queste, il risultato delle fluttuazioni di un campo scalare, accoppiato con la metrica, che guidò l'inflazione nei primi stadi dell'evoluzione dell'Universo. Diverse teorie alternative della gravità richiedono l'esistenza di un tale campo e prevedono che esso si indebolisca nel tempo in maniera tale da manifestarsi, al presente, sotto forma di piccolissime deviazioni dalla Relatività Generale.

Lo strumento teorico attualmente più usato per il confronto di queste teorie su scala locale è il formalismo PPN, nel quale ciascuna teoria è caratterizzata da precisi valori assunti da un set di parametri che vengono stimati dai risultati degli esperimenti. Tra questi parametri,  $\gamma$  (legato alla curvatura dello spaziotempo indotta dalla massa) è quello più studiato, e anche quello *miglior accessibile tramite misure astrometriche*. La stima di questo stesso parametro consente di porre vincoli stringenti anche ad altre formulazioni alternative proposte, es. MOND e  $f(R)$  (Capozziello et al., 2005), che possono modificare sensibilmente le stime attuali della frazione di massa / energia oscura. *In questo senso, la misura del parametro  $\gamma$  può essere considerata un potente test cosmologico effettuato tramite misure locali!*

La migliore accuratezza raggiunta finora per  $\gamma$ , con l'esperimento Cassini ( $\sigma=10^{-5}$ , Bertotti et al., 2003) non è sufficiente a rilevare le deviazioni previste da questi scenari, che si collocano nel range  $10^{-5}$ - $10^{-7}$  (Damour et al., 2002; Capozziello et al., 2005). L'accesso a misure astrometriche sempre più accurate, tali da permettere la determinazione diretta della deviazione della gravità dalla teoria di Einstein, appare dunque come uno strumento formidabile per l'avanzamento della fisica fondamentale, attraverso una migliore comprensione della natura della gravitazione, e della cosmologia.

### **6.2 Programmi nazionali ed internazionali di attività in corso**

E' previsto che la missione GAIA possa raggiungere per  $\gamma$  misurando con precisioni senza precedenti l'evoluzione temporale della posizione di più di un miliardo di oggetti sparsi su tutta la volta celeste, l'accuratezza  $10^{-6}$  a  $3\sigma$  (Vecchiato et al., 2003) nell'ipotesi di prestazioni nominali. Le verifiche numeriche e le parti rilevanti di codice sono in corso di sviluppo presso OATo nell'ambito del relativo contratto ASI, coordinato con l'attività del consorzio europeo DPAC per la riduzione dati da Gaia.



Altre missioni di grandi dimensioni (LATOR e ASTROD), basate su costellazioni di satelliti drag-free monitorati con metrologia laser, in fase di studio preliminare, mirano all'obiettivo  $10^{-8}$  su  $\gamma$ .

Il gruppo di astrometria dell'OATo ha un'esperienza decennale nei problemi di astrometria relativistica ad alta precisione, base nell'ambito di Gaia delle attività (i) di sviluppo di modelli di misura astrometrici fondati su teorie relativistiche della gravitazione (De Felice et al., 1998, 2001, 2004, 2006) e (ii) della loro applicazione al problema della riduzione dei dati da misure di astrometria globale (Vecchiato et al., 2003). Questa attività ha generato un'expertise unico in Italia, e di eccellenza nel mondo, per il corretto approccio a questo tipo di problemi di fisica fondamentale. Questa attività di ricerca ha lo scopo (i) di sviluppare e diffondere nella comunità scientifica i metodi e le tecniche per affrontare e interpretare correttamente i problemi connessi all'astrometria relativistica e all'uso di cataloghi astrometrici al microsecondo d'arco, e (ii) di sviluppare un'attività sperimentale che permetta di effettuare test ad alta precisione, in particolare tramite misure astrometriche, delle teorie della gravità.

### **6.3 Progetti che sarebbe estremamente importante fare in Italia**

Sulla base dei concetti precedenti, dell'esperienza astrometrica acquisita e delle competenze locali in ambito coronografico, è stato definito all'OATo il concetto di una piccola missione astrometrica dedicata GAME (Gamma Astrometric Measurement Experiment) che, tramite una riedizione moderna in chiave spaziale dell'esperimento di Dyson ed Eddington del 1919 e quindi un approccio totalmente indipendente dalle missioni citate, possa raggiungere a basso costo e con alta affidabilità l'obiettivo  $\sigma(\gamma) = 10^{-7}$ - $10^{-8}$  (Gai et al., 2008; Vecchiato et al., submitted to ASR). L'idea è stata presentata in campo nazionale ed internazionale, coinvolgendo la comunità scientifica, e sono previste proposte di studi di fattibilità per possibili enti finanziatori (ASI, EU, ...).

Le misure astrometriche di GAME consentono di mettere alla prova le teorie della gravitazione anche con altri tipi di test. Un esempio è dato dalla possibilità, disponibile anche con Gaia ma con maggiori difficoltà ed a più bassa precisione, di misurare la deflessione della luce causata dal momento di quadrupolo di un pianeta gigante del sistema solare (Crosta and Mignard, 2005; Crosta et al., 2008), prevista dalla GR, ma mai verificata sperimentalmente. GAME, come missione puntata, sarà nelle condizioni più favorevoli per questo tipo di test.

Le tecnologie coinvolte sono in buona parte consolidate, ma si raccomanda lo studio approfondito della missione, ed in particolare il perfezionamento delle tecnologie relative alla metrologia dell'angolo di base ed alla riedizione efficiente del flusso luminoso solare.



## **7. RIVELAZIONE DI ONDE GRAVITAZIONALI DA SORGENTI ASTRONOMICHE**

*Preparato da L. Stella con il contributo di A. Corsi, D. De Martino, V. Ferrari, A. Giazotto, L. Gualtieri, J. Miller, I.M. Pinto, L. Piro, R. Schneider, M. Visco*

### **7.1 Scientific background a livello internazionale**

La ricerca delle onde gravitazionali conosce in questi anni una fase di profondo cambiamento, in larga misura dettato dagli sviluppi legati alla strumentazione. Da un lato vi è l'inizio della fase operativa degli interferometri di prima generazione, LIGO e Virgo, che avendo praticamente raggiunto la sensibilità nominale inizieranno nel 2009 il primo run scientifico congiunto per la ricerca di segnali di onde gravitazionali di alta frequenza. Sono già in atto sviluppi volti a migliorare la sensibilità di questi interferometri, mentre è stato avviato uno studio per la progettazione di interferometri di terza generazione (progetto ET). Dall'altro la prospettiva di lungo termine offerta dall'interferometro spaziale LISA, apre nuove frontiere allo studio (per ora solo dal punto di vista della teoria) delle onde gravitazionali di bassa frequenza da sorgenti di grande rilevanza per la cosmologia e/o per la rivelazione di effetti di relatività generale in campo forte.

Al contempo è ormai prossima la dismissione degli esperimenti per la rivelazione di onde gravitazionali basati sulle barre risonanti, non più competitivi. Di particolare rilevanza per i futuri run scientifici di LIGO e Virgo dei prossimi anni sono i metodi di analisi coerente dei dati, mirati alla rivelazione e alla ricostruzione del segnale di onde gravitazionali attraverso rete di interferometri. Si tratta di tecniche largamente ancora in fase di sviluppo e basate sulla sintesi di apertura per massimizzare il rapporto segnale/rumore di onde gravitazionali provenienti da una data direzione nel cielo. A queste tecniche si aggiungono quelle volte alla rivelazione delle onde gravitazionali sulla base di un singolo rivelatore, che mettono a frutto l'enorme lavoro svolto negli anni sia per caratterizzare i segnali di onde gravitazionali aspettati da diverse classi di sorgenti astrofisiche, che per ottimizzare le tecniche di rivelazione.

Dal punto di vista delle osservazioni astronomiche di potenziale rilevanza per la rivelazione di eventi di onde gravitazionali di alta frequenza, l'approccio di gran lunga dominante è quello basato sugli allerta ("trigger") astrofisici (e.g. Abbott et al 2008). Una volta che un evento potenzialmente rilevante per l'emissione di onde gravitazionali viene rivelato con telescopi o satelliti astronomici, si ricerca la presenza di un segnale concomitante (se non strettamente simultaneo) negli esperimenti di onde gravitazionali, facendo uso, laddove può essere rilevante, anche dell'informazione di posizione degli eventi astrofisici. Gli eventi impulsivi di radiazione di alta energia che sono oggetto di maggiore interesse in queste ricerche sono i Gamma Ray Bursts ed i flares giganti dei Soft Gamma Repeaters, SGR, che vengono attualmente rivelati su base regolare da diversi satelliti per l'astronomia in raggi X e Gamma. Eventi esplosivi osservati normalmente nella banda ottica, soprattutto Supernovae che si originano dal collasso stellare, e le variazioni improvvise del periodo di rotazione delle stelle di neutroni, quali i cosiddetti "glitch" delle pulsar radio giovani (le pulsar della Crab e di Vela) o delle magnetars contenute negli SGRs e nelle Anomalous X-ray Pulsars, costituiscono anch'essi "trigger" astrofisici di rilevanza per la ricerca di onde gravitazionali. Vi sono poi sorgenti astrofisiche stazionarie che, in virtù del segnale periodico legato alla rotazione della stella di neutroni in esse contenute, si prestano alla ricerca di segnali di onde gravitazionali



strettamente periodici e di frequenza nota. Tra queste spiccano le pulsar radio e le stelle di neutroni rapidamente rotanti contenute nelle binarie X di piccola massa ("low mass X-ray binaries").

Negli ultimi anni la sensibilità raggiunta dagli interferometri ha consentito di iniziare a porre limiti astrofisicamente rilevanti al segnale di onde gravitazionale emesso da alcune sorgenti astrofisiche sopra menzionate. Ad esempio i dati di LIGO hanno già permesso di mettere limiti non banali alla possibile deformazione della pulsar Crab (Abbott et al 2007a). Inoltre il limite superiore derivato da LIGO all'energia emessa in onde gravitazionali durante il flare gigante del 27 Dicembre 2004 dalla candidata magnetar SGR 1806-20 è paragonabile all'energia emessa in onde elettromagnetiche dallo stesso evento (Abbott et al 2007a).

Ad assumere particolare rilevanza in questi anni sono anche gli studi legati alla stima del rateo degli eventi astronomici che potranno essere rivelati dagli interferometri per onde gravitazionali, sia nella configurazione base (quella attuale) che in quelle "Enhanced" e "Advanced" previste per i prossimi anni (la terminologia è quella di LIGO). Ad esempio, per quanto riguarda le sorgenti più promettenti, cioè i sistemi binari costituiti da due stelle di neutroni che arrivano a coalescenza, la stima più accurata del rateo di questi eventi è attualmente incerta per un fattore di oltre 10 (Kalogera et al 2004). Gli studi basati su sintesi di popolazione (particolarmente rilevante in questo senso sono i risultati ottenuti con il codice STARTRACK; Belczynski et al. 2008) hanno avuto notevole impulso, ma le previsioni fin qui ottenute rimangono incerte a causa del notevole numero di parametri coinvolti nelle simulazioni, alcuni dei quali sono noti con scarsa precisione. Per aumentare l'accuratezza di queste stime è necessario un input astrofisico più dettagliato. Ad esempio la scoperta della pulsar doppia PSR J0737-3039 ha dato luogo ad una revisione verso l'alto di quasi un fattore 10 nel rateo aspettato per la coalescenza di sistemi binari con due stelle di neutroni.

Le ricerche riguardanti la teoria delle sorgenti di onde gravitazionali prosegue sia con studi basati su tecniche analitiche che mettendo a frutto i recenti progressi nei calcoli numerici. Particolarmente importante è prevedere accuratamente il segnale aspettato in onde gravitazionali; infatti la rivelazione di un segnale gravitazionale richiede la conoscenza dettagliata delle forme d'onda e l'informazione fisica può essere estratta dai dati attraverso tecniche di "template matching", basati su modelli affidabili di segnale. Lo sviluppo di modelli teorici dettagliati, oltre al valore in sé di questi studi, è mirato ad aumentare le possibilità di rivelazione, e, in prospettiva, costituisce il mezzo principale per avere informazioni fisiche sulle sorgenti, gettando le basi per l'astronomia delle onde gravitazionali. Particolarmente rilevanti negli ultimi sono stati i progressi ottenuti con nuove tecniche numeriche nello studio delle onde gravitazionali emesse da buchi neri binari coalescenti (le cosiddette tecniche di "excision"). Oggetto di importanti sviluppi è stato inoltre lo studio analitico dell'accoppiamento di diversi modi di oscillazione delle stelle di neutroni e i possibili effetti sullo sviluppo delle instabilità (ad esempio le instabilità a barra) che portano alla produzione di un forte segnale di onde gravitazionali.

## **7.2 Ricerche in Italia nel campo**

La comunità scientifica italiana attiva in questo settore non è particolarmente numerosa, ma svolge un'attività molto qualificata su diversi temi. Mentre la maggior parte delle attività su Virgo e LISA (e in misura minore sulle barre) si svolge presso l'INFN ed i gruppi universitari ad esso legati, presso l'INAF e alcuni gruppi universitari vengono portati avanti molti degli studi di onde gravitazionali di più diretta pregnanza astrofisica. Da diversi anni il Virgo EGO Science Forum,



VESF, ha iniziato a sviluppare il collegamento a livello europeo tra il progetto Virgo e la comunità scientifica interessata ai diversi aspetti della rivelazione e dello studio delle onde gravitazionali.

Di rilevanza per l'applicazione ai prossimi run scientifici di LIGO e Virgo sono le attività recentemente intraprese anche in ambito INAF circa l'eventuale connessione tra eventi parossistici di alta energia ed onde gravitazionali. Queste attività sfruttano i "trigger", soprattutto GRB e flares di magnetars, rivelati (prevalentemente) con il satellite Swift per la ricerca segnali di onde gravitazionali. Alcuni gruppi sono direttamente impegnati nell'analisi dei dati dai precedenti run scientifici sia di LIGO che di Virgo (e.g. Abbott et al 2007b, Acernese, F. et al. 2007, 2008) e nello sviluppo di algoritmi e tecniche di ricerca di segnale avanzate (e.g. Croce et al. 2004).

La ricerca svolta in tale ambito è mirata anche ad individuare nuove classi di segnali gravitazionali in coincidenza con i GRB. Particolare attenzione viene rivolta allo studio dell'emissione in onde gravitazionali associabile a specifiche segnature nel segnale elettromagnetico dell'afterglow del GRB, come ad esempio la presenza di flare e plateau, ricollegabili all'esistenza di una sorgente centrale compatta attiva su tempi scala ben più lunghi dell'esplosione gamma iniziale. Questa analisi permetterà di fornire informazioni per l'esplorazione di nuovi scenari di progenitore, come ad esempio quelli che legano il GRB alla nascita di una magnetar, piuttosto che di un buco nero.

Al contempo il progresso ottenuto nello studio della classe dei GRB brevi (quelli di durata inferiore a 3 secondi circa) ha evidenziato come in media la distanza di questi eventi sia considerevolmente inferiore a quelli dei GRB lunghi (quelli di durata superiore a circa 3 secondi). Al contrario di questi, i GRB brevi non si originano dal collasso di stelle massive (infatti non sono mai associati a supernovae). Il modello più promettente per i GRB brevi prevede che questi eventi si originino nella coalescenza di sistemi binari costituiti da due stelle di neutroni, o da una stella di neutroni ed un buco nero di massa stellare, uno scenario di evidente rilevanza per l'emissione di onde gravitazionali di alta frequenza. La stima del rateo locale di GRB brevi, così come la determinazione del grado di collimazione dei GRB stessi, rivestono quindi una particolare importanza per ottenere una stima del numero di eventi di coalescenza rivelabili in onde gravitazionali con LIGO e Virgo. Sebbene incerti, i valori fin qui derivati con questo nuovo metodo sono paragonabili a quelli ottenuti con altri metodi, e suggeriscono che un 10-20 % degli eventi rivelabili nell'universo locale potrebbe essere associato a GRB brevi. Di particolare interesse è inoltre la possibilità che una frazione cospicua dei sistemi binari contenenti due stelle di neutroni si formi per interazione tra stelle negli ammassi globulari, piuttosto che da sistemi stellari che nascono come binari (Salvaterra et al 2008; Guetta & Stella 2008).

Una diversa linea di ricerca in questo settore è mirata allo studio dei segnali di onde gravitazionali che si possono generare da magnetars neonate rapidamente rotanti, indipendentemente da un'eventuale associazione tra queste ed eventi di tipo GRBs. Le caratteristiche del flare gigante del 27 Dicembre 2004 da SGR 1806-20, indicano infatti che il campo magnetico interno di una magnetar è così alto da causare una deformazione sensibile della stella e da portare all'emissione di un forte segnale di onde gravitazionale per alcuni giorni immediatamente successivi alla formazione di questi oggetti. Gli studi attuali sono volti a determinare con maggior precisione il rateo atteso di questi eventi, l'intensità e l'evoluzione nel tempo del segnale di onde gravitazionali, e a sviluppare tecniche mirate alla rivelazione dei segnali stessi (Stella et al. 2005, Dall'Osso et al 2008).



L'attività teorica è anche molto sviluppata. Le oscillazioni delle stelle di neutroni sono oggetto di ricerca avanzata. Per quanto riguarda i modi quasi normali (oscillazioni smorzate non radiali) associati all'emissione di onde gravitazionali, le frequenze e i tempi di decadimento di queste oscillazioni contengono informazioni sulla struttura della stella e sull'equazione di stato della materia (Ferrari et al 2003). L'adozione delle più recenti equazioni di stato, coefficienti di viscosità e di trasporto di calore in stelle di neutroni calde (perché formate da poco) consente di estendere il calcolo dei modi quasi normali al regime più rilevante dal punto di vista dell'emissione di onde gravitazionali.

E' noto da tempo che a causa della rotazione, alcuni modi di oscillazione delle stelle di neutroni possono diventare instabili. La comprensione di questi fenomeni è ancora incompleta, a causa delle difficoltà legate alla simulazione numerica di stelle che ruotino e oscillino allo stesso tempo. Recentemente è stato proposto un nuovo approccio perturbativo per studiare oscillazioni e instabilità (Ferrari et al 2007). Il metodo, che è stato già applicato al caso di rotazione lenta, verrà generalizzato e applicato a stelle in rapida rotazione.

Un nuovo approccio "semi-relativistico" viene applicato alla modellizzazione di sistemi binari composti da oggetti compatti (buchi neri, stelle di neutroni o nane bianche) nella fase di pre-merging. Tale approccio permette di riprodurre con buona approssimazione i risultati della relatività generale, ma richiede molta meno potenza computazionale, una caratteristica essenziale per la costruzione di una biblioteca di forme d'onda da utilizzare nell'analisi dei dati.

Dal punto di vista calcoli numerici vi è stata una rilevante partecipazione allo sviluppo del codice "Whisky" per effettuare simulazioni di idrodinamica general-relativistica in 3D. Tra le prime applicazioni vi è stato lo studio della formazione di buchi neri rotanti e la crescita di instabilità non assi-simmetriche. Inoltre, attraverso l'utilizzo del codice CoCoNuT (che risolve le equazioni della relatività generale nella formulazione conformalmente piatta) è stato studiato il collasso del nucleo di una stella di neutroni come risultato di una transizione di fase, ed il collasso di una nana bianca come risultato di accrescimento di materia. Questi lavori saranno estesi ad impiegare descrizioni più realistiche della microfisica, inclusi gli effetti dei campi magnetici e dell'emissione di neutrini. L'obiettivo è di ottenere stime più affidabili della produzione di onde gravitazionali da parte di questi eventi astrofisici.

Un altro progetto di relatività numerica è mirato al calcolo dell'emissione di onde gravitazionali da parte di un toro di materia ultradensa in orbita nelle immediate vicinanze di un buco nero o di una stella di neutroni appena formati, includendo tra l'altro l'eventuale presenza di campi magnetici estremamente intensi del toro e/o della stella di neutroni. Questo scenario astrofisico è alla base di diversi modelli per la generazione di GRB. Lo studio utilizzerà una versione opportunamente modificata del codice di magneto-fluido-dinamica ZEUS MP.

I fondi stocastici di onde gravitazionali generati da popolazioni cosmologiche di sorgenti astrofisiche sono oggetto di studio da almeno un decennio. Gli studi più recenti si avvalgono dei risultati sull'emissione di segnali gravitazionali prodotti dal collasso a buco nero di stelle di Popolazione III (che sono emettitori di onde gravitazionali molto più forti delle normali supernovae a collasso del nucleo) e di sofisticate simulazioni numeriche che consentono di predire il rate di formazione nel contesto di uno scenario cosmologico in accordo con le osservazioni

disponibili. Questi lavori sono mirati a calcolare il fondo stocastico di onde gravitazionali prodotto da queste prime sorgenti stellari e valutare la possibilità che questo segnale possa limitare la sensibilità dei rivelatori di onde gravitazionali esistenti o in fase di progetto, rappresentando una



fonte di rumore aggiuntivo rispetto ai segnali gravitazionali da epoche ancora più antiche (emessi durante l'Inflazione). Questo studio è anche fortemente motivato dal fatto che un'eventuale futura detezione del fondo stocastico di onde gravitazionali prodotto dal collasso di stelle di popolazione III si rivelerebbe un utile strumento per comprendere l'evoluzione stellare dell'Universo ad alto redshift (Schneider et al 2003, 2006, Tornatore et al 2007).

Di grande importanza per la missione LISA saranno i sistemi binari costituiti da buchi neri massivi. I segnali di onde gravitazionali di bassa frequenza generati da questi sistemi durante la fase di coalescenza sono i più intensi dell'universo e consentiranno la rivelazione di una serie di effetti di relatività generale in campo forte. Vi è inoltre notevole interesse di tipo astrofisico per questi sistemi. I buchi neri massivi che si trovano nel nucleo delle galassie possono formare dei sistemi binari di due buchi neri per effetto di eventi successivi di merging delle galassie ospiti e arrivare a coalescenza in tempi relativamente brevi. LISA sarà in grado di rilevare il segnale di questi sistemi binari di buchi neri fino a distanze molto elevate (redshift pari  $z \sim 10-15$ ) e con ratei fino a centinaia di eventi all'anno. Le misure di LISA potranno quindi fornire anche informazioni cruciali sui processi che portano alla formazione di buchi neri massivi e sui fenomeni di merging di galassie e protogalassie ad alto redshift. Sono attivi in questo settore alcuni gruppi che portano avanti simulazioni numeriche dettagliate per lo studio di queste problematiche sia dal punto di vista dell'astrofisica dei sistemi di buchi neri binari che per il possibile impatto cosmologico di questi sistemi. Vista l'importanza di queste sorgenti per LISA, la determinazione del rateo atteso per gli eventi rivelabili di coalescenza di buchi neri massivi potrà essere di aiuto nella pianificazione di tecniche e strategie per l'analisi dei dati (Sesana et al. 2005, 2008).

Su scala molto più locale, sistemi binari ultra-compatti di tipo AM CVn, costituiti da due nane bianche, sono tra i maggiori emettitori di onde gravitazionali di bassa frequenza in virtù del loro brevissimo periodo orbitale (Israel et al 1999). Le AM CVn rappresentano anche delle potenziali sorgenti di calibrazione per LISA. Le stime del numero di sistemi ultra-compatti sino a periodi orbitali di circa 3 minuti evidenziano che LISA potrà rivelare e studiare circa un migliaio di sistemi di questo tipo. Per contro, i modelli prevedono anche che l'intera popolazione galattica di sistemi AM CVn possa contribuire all'emissione di onde gravitazionali non risolte in un range di frequenze di grande rilevanza per LISA. In questa prospettiva è importante identificare e studiare sistemi AM CVn attraverso survey sia nella banda ottica, che in quella dei raggi X molli, per arrivare ad una più dettagliata comprensione e classificazione di questi sistemi prima dell'avvento di LISA.

L'attività di analisi dei dati dagli strumenti a barra (Auriga, Explorer e Nautilus) è ormai molto modesta e prossima alla chiusura. E' tuttavia verosimile che fino al rientro in funzione con continuità di LIGO e VIRGO, le barre svolgano ancora un'azione di "sentinella" per eventi molto rari, quali supernovae vicine. Si ricercano eventi a bassissima probabilità statistica in coincidenza nelle antenne. La produzione di upper-limits non ha più senso a causa del gap di sensibilità con gli interferometri.

### **7.3 Utilizzo grandi strutture**

- Virgo
- LIGO



## **7.4 Programmi di ricerca italiani**

Non e' attualmente attivo alcun progetto su questi temi nell'ambito del PRIN-MUR e del PRIN-INAF.

## **7.5 Programmi di missioni future**

- Advanced LIGO
- Advanced Virgo
- Einstein Telescope
- LISA

## **BIBLIOGRAFIA**

- Abbott, B., et al., 2007a, PRD 76, 042001  
Abbott, B., et al., 2007b, PRD 76, 062003  
Abbott, B., et al. 2008 ArXiv 0802.4320  
Acernese, F. et al, 2007, Class. Quantum Grav., 24, S671  
Acernese, F. et al., 2008, Class. Quantum Grav. 25, 225001  
Belczynski, K. et al. 2008 ApJS 174 223  
Croce, R.P. et al. 2004 PRD 70, 122001  
Dall'Osso, S., Shore, S, Stella, L. 2008 MNRAS, in press, arXiv:0811.4311  
Ferrari, V. et al., 2003 MNRAS 342, 629  
Ferrari, V. et al., 2007 PRD 76, 104033  
Guetta, D. & Stella, L. 2008 A&A, in press, arXiv0811.0684  
Israel, G. L., et al. 1999, A&A, 349, L1  
Kalogera, v., et al. 2004, ApJ, 601, L179  
Salvaterra, R. et al. 2008 MNRAS, 388, L6  
Schneider R., et al. 2003, Nature, 422, 869  
Schneider R., Salvaterra R., Ferrara A., Ciardi B. 2006, MNRAS, 369, 825  
Sesana, A., Haardt, F., Madau, P. Volonteri, M, 2005 ApJ 623, 23  
Sesana, A.; Volonteri, M.; Haardt, F. 2008 Class. Quantum Grav., in press, arXiv:0810.5554  
Stella, L. et al. 2005, ApJ, 634, L165  
Tornatore L., Ferrara A., Schneider R. 2007, MNRAS, 382, 945



## Indice Analitico

<p><b>3</b></p> <p><b>3sqdeg</b>; 46</p> <p><b>A</b></p> <p>ACS; 34  AGILE; 4; 12; 13; 16; 19; 39; 41; 43; 46  <b>Amada-Icecube</b>; 46  Arecibo; 32  ASTROD; 59  ASTRO-H; 13  Auger; 43; 50; 54; 55  Auriga; 64</p> <p><b>B</b></p> <p>BeppoSAX; 13; 42</p> <p><b>C</b></p> <p>Chandra; 10; 11; 14; 16; 19; 20; 26; 48; 49; 51  CNR; 56  Con-X; 21  CTA; 21; 44; 45; 56</p> <p><b>E</b></p> <p>EASTOP; 54  ECLAIRS; 44  <b>EDGE/XENIA</b>; 44  <b>E-ELT</b>; 43  Effelsberg; 32  EGRET; 19; 33; 39  Einstein Telescope; 65  EPTA; 33  ESA; 19; 21; 35  ESO; 19; 34; 45  ET; 60  <b>EUCLID</b>; 44  EXIST; 21; 44  Explorer; 35; 64</p> <p><b>F</b></p> <p>Fermi; 12; 13; 16; 19; 26; 29; 30; 33; 39; 41; 43; 45; 46; 49;  50; 51; 52  FERMI; 4  Fermi-GLAST; 26  FLAMES/GIRAFFE; 24</p> <p><b>G</b></p> <p>GAIA; 58  <b>Galex</b>; 45  GAME; 59  GASP-WEBT; 16  Green Bank; 25; 32  GRID; 26; 39</p>	<p><b>H</b></p> <p>HEMI; 44  HESS; 12; 13; 44; 49; 51; 56  HITRUN; 10; 32  HST; 11; 34</p> <p><b>I</b></p> <p>IASF; 15; 18; 19; 20; 21; 43; 44; 45; 55; 56  IASF-Bo; 15; 18; 20; 21; 44; 45  IASF-Mi; 15; 18; 20; 44; 45  IASF-Pa; 15; 18; 20; 44; 55; 56  IASF-Rm; 18; 20; 21; 44  IFSI-To; 43; 55; 56  IFSI-To; 53  INFN; 13; 19; 21; 26; 41; 43; 44; 46; 50; 51; 53; 55; 56; 61  INTEGRAL; 6; 7; 8; 11; 14; 18; 19; 20; 39; 41; 46  IRA; 52; 53  IXO; 21; 35</p> <p><b>J</b></p> <p><b>JANUS</b>; 44  JAXA; 21; 56  <b>JEM-EUSO</b>; 56; 57</p> <p><b>K</b></p> <p>KASCADE-GRANDE; 49</p> <p><b>L</b></p> <p>LAT; 26; 29  LATOR; 59  LBT; 34; 45; 46  LEAP; 32; 33  LIGO; 60; 61; 62; 64; 65  LISA; 60; 61; 64; 65  LOBSTER-ISS; 44  LOFAR; 19; 50; 52  <b>LVD</b>; 44; 46  LWA; 50; 52</p> <p><b>M</b></p> <p>MAD; 34  MAGIC; 12; 13; 16; 19; 43; 44; 49; 50; 56; 57  MAGIC-II; 50; 56  MILAGRITO; 43  MILAGRO; 43</p> <p><b>N</b></p> <p>NACO; 34  NANOGRAV; 33  NASA; 19; 21; 26; 35; 44  Nautilus; 64</p>
---	--



NIRT; 44  
NuStar; 13

**O**

OAAr; 45; 52; 55  
OABr; 15; 16; 19; 20; 21; 39; 44; 45; 56  
OACa; 10; 32  
OACn; 20; 44  
OAPd; 19; 20; 44; 45; 56  
OARm; 20; 44  
OATo; 15; 16; 20; 58; 59  
OATs; 15; 20; 45

**P**

PAMELA; 49; 50  
PAO; 50; 52; 54; 55; 57  
Parkes; 9; 10; 11; 25; 28; 32  
POLARIX; 21; 35  
PPTA; 33

**R**

REM; 16; 19; 38; 46  
Rossi XTE; 11  
Rossi-XTE; 15  
RXTE; 10; 14; 15; 17; 20

**S**

SDSS; 39  
Simbol-X; 13; 21  
SINFONI; 34  
SNEWS; 46  
SPECTRUM-RG; 44

SRT; 32; 33  
SuperAgile; 26  
SuperAGILE; 39  
**SuperKamiokande**; 46  
Suzaku; 6; 11; 14; 19  
SVOM; 21; 44  
Swift; 6; 7; 10; 11; 13; 14; 15; 16; 18; 19; 20; 33; 38; 39; 41;  
42; 43; 44; 45; 46; 62

**T**

TNG; 19; 44; 46; 56  
TOK-COSMOCT; 8

**V**

VERITAS; 12; 49; 56  
Virgo; 60; 61; 62; 64; 65  
VLA; 46  
VLT; 9; 10; 11; 19; 34; 40; 43; 45; 46

**W**

WFC3; 34  
WFI; 34  
WFPC2; 34

**X**

XEUS; 21  
XIAO; 21; 44  
XMM; 6; 7; 9; 10; 11; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 46  
XMM-Newton; 6; 7; 11; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19  
XRFM; 44  
X-SHOOTER; 46