

INTEGRAL: L'OSSERVATORIO SPAZIALE INTERNAZIONALE PER ASTRONOMIA GAMMA

di Pietro Ubertini

All'inizio degli anni '60 si apre una nuova era per l'esplorazione dello spazio. In 24 giorni si susseguono tre eventi che aprono la "nuova frontiera": il 12 Aprile 1961 inizia l'esplorazione umana dello spazio, con il breve volo del colonnello sovietico Yuri Gagarin attorno alla terra. Due settimane dopo viene lanciato il satellite Explorer-11, che formalmente rivela i primi fotoni di alta energia, raggi Gamma, da sorgenti cosmiche. Sette giorni dopo Alan Shepard jr. diviene il primo "astronauta" americano: 15 minuti di volo sub-orbitale a bordo di una capsula Mercury. È l'inizio dell'era spaziale: gli stessi giorni il presidente Kennedy promette di fronte al Congresso "to achieve the goal, before this decade is out, of landing a man on the Moon and returning him safely to the Earth". Nei due anni successivi nascono l'astronomia X e Gamma: si apre una nuova finestra osservativa su un Universo che appare subito 'violento' e 'variabile'.

Dopo un rapido cenno storico sulle origini dell'astronomia X e Gamma viene descritto il Programma INTEGRAL, l'Osservatorio spaziale per raggi Gamma dell'Agenzia Spaziale Europea, ideato e realizzato con forte contributo italiano, e messo in orbita il 17 novembre 2002. Verranno poi illustrati i primi, eccellenti, risultati ottenuti a poco più di un anno dal lancio.

L'ASTROFISICA DELLE ALTE ENERGIE: UNA SCIENZA GIOVANE

A poco più di un anno dall'inizio dell'esplorazione umana dello spazio, iniziata con la messa in orbita del sovietico Yuri Gagarin a bordo della *Vostok 1*, una nuova finestra osservativa si apriva il 19 giugno 1962 alle 6:59 UT con il lancio di contatori proporzionali sensibili ai raggi X a bordo di un *Aerobee 150* dalla base di White Sands nel New Messico. Infatti non è possibile rivelare con strumentazione da terra radiazione elettromagnetica di alta energia, raggi X o gamma, proveniente da oggetti celesti a causa dello schermo protettivo costituito dall'atmosfera terrestre: essa diviene trasparente ai raggi X solamente a quote superiori ai 40 km.

Questo piccolo razzo sonda riuscì a rimanere al di sopra dell'atmosfera terrestre per circa cinque minuti con un volo sub-orbitale, apogeo poco più di 100 km. Questo esperimento, simile a quello mostrato in figura 1, ideato per verificare la fluorescenza della superficie lunare, rivelò invece emissione di raggi X da un preciso punto del

cielo: fu immediatamente chiaro che responsabile di quella notevole quantità di energia sotto forma di raggi X fosse una sorgente cosmica della costellazione dello Scorpione già rivelata nell'ottico: la sua controparte di alta energia venne denominata SCO X-1. Inoltre l'analisi dettagliata di tutta l'osservazione dimostrò l'esistenza di una seconda sorgente puntiforme e di una radiazione "diffusa" che proveniva cioè da tutte le direzioni. Con 300 secondi di dati nasceva l'astronomia X! Soltanto due anni dopo, il 21 Luglio del 1964 veniva scoperta emissione di raggi gamma dalla Nebula di un resto di supernova nella costellazione del Granchio che conteneva anche una stella di neutroni fortemente magnetizzata rotante 30 volte al secondo: la *Crab Pulsar*. Questa volta tramite la strumentazione a bordo di un pallone stratosferico con a bordo contatori a scintillazione di notevole peso, lanciati dalla base di Palestine, Texas, divenuta tristemente famosa nel febbraio 2003 per la caduta dei resti dello *Shuttle Columbia*, esploso durante la fase di rientro nell'atmosfera e costato la vita dei sette astronauti a bordo.

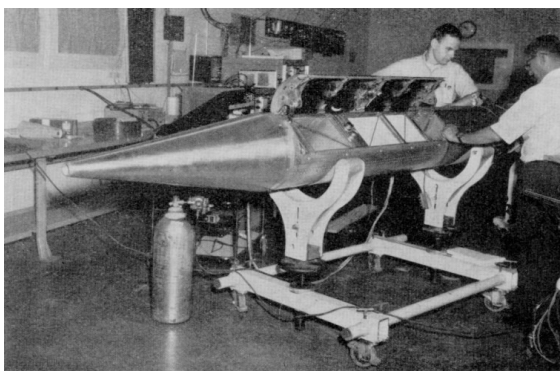
Era l'inizio di una nuova era, la chiave di volta per aprire una nuova finestra osservativa e guardare a lunghezze d'onda mai utilizzate prima, fenomeni di alta energia sino ad allora solo ipotizzati e finalmente rivelati. La scoperta di forte emissione di raggi X da sorgenti celesti già note dette un impulso notevole allo sviluppo dell'astronomia delle alte energie. Infatti il rapporto tra la loro luminosità X ed ottica appariva incredibilmente elevato se paragonato a quello del sole. Inoltre questi nuovi oggetti, già studiati in altre bande di energia, apparivano appartenere alle più disparate classi: singoli oggetti quali la *Crab pulsar*, già rivelata nel radio e nota come stella di neutroni fortemente magnetizzata, flebili resti di supernova, sistemi binari estremamente brillanti in raggi X come *Scorpio X1*, candidati "buchi neri" come *Cygnus X1*. L'energia emessa era intensa e variabile su tutte le scale di tempo; infine emissione da sorgenti extragalattiche che sin dall'inizio apparivano "estese" come l'ammasso di galassie del *Perseus* o di Coma o ai limiti dell'universo: i *Quasars*.

Dalla scoperta del cielo X con l'esperimento dell'italiano Riccardo Giacconi, allievo di Bruno Rossi emigrato negli Stati Uniti e professore di astrofisica presso il "Center for Astrophysics" di Boston, da sempre convinto dell'esistenza di "raggi cosmici" di natura extraterrestre, fu chiaro che questo tipo di radiazione estremamente energetica proveniva da sorgenti celesti sedi di processi "non convenzionali" e non riproducibili nei laboratori a terra e che coinvolgevano enormi quantità di energia. Processi "non termici" in cui la radiazione elettromagnetica interagisce con la materia in condizioni estreme in termini gravitazionali, di pressione e temperatura. Quasi tutte le sorgenti osservate apparivano variabili e molte di esse transienti. Una forte quantità di radiazione X era infine emessa dalla zona coincidente con il centro dinamico della via Lattea, come mostrato in un catalogo pubblicato nel 1968 (Figura 2). Sarebbero stati necessari più di 15

anni per ottenere le prime immagini a raggi X di queste sorgenti con l'impiego di telescopi ad "incidenza radente" che permettevano di focalizzare i raggi X di bassa energia su rivelatori dotati di buona risoluzione spaziale come i contatori proporzionali a gas prima o, più recentemente, su CCD del tipo ora usato per le comuni telecamere ma sensibili ai raggi X.

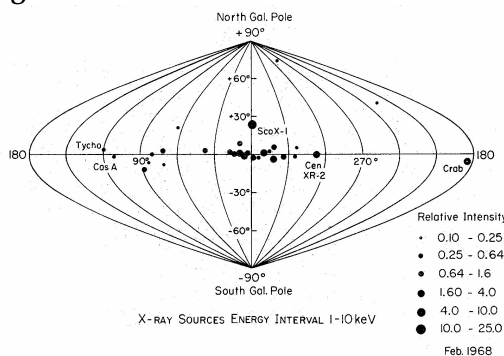
All'inizio degli anni '70 venivano messi in orbita due satelliti dalla base italiana San Marco (Malindi) allestita su una piattaforma petrolifera 'off shore': lo *Small Astronomical Satellite* - SAS1 (12 dicembre 1970), denominato *Uhuru*, in dialetto locale *Swahili* significa libertà, operante nella banda dei raggi X e il SAS 2 (15 novembre 1972), con lo scopo di fare il primo catalogo celeste nei raggi gamma. Mentre il primo riesce a localizzare circa 300 oggetti galattici ed extragalattici il secondo dimostra l'esistenza dell'emissione gamma diffusa dalla galassia ma riesce a rivelare solo alcune sorgenti. L'esistenza di un cielo gamma di alta energia composto da un numero limitato di sorgenti, molte delle quali *Pulsars*, e di una forte emissione diffusa coincidente col piano della via Lattea viene confermata solo alcuni anni dopo con il lancio del satellite *CosB* dell'ESA (9 agosto 1975). L'intero decennio sarà caratterizzato dal lancio di decine di satelliti dedicati all'esplorazione di questa nuova scienza: uno tra tutti l'*Einstein Observatory* (13 novembre 1978) sarà il primo telescopio per raggi X in grado di fornire vere immagini e sarà un fondamentale passo in avanti nel campo.

Figura 1: Il carico scientifico di uno dei primi razzi sonda utilizzati per la rivelazione di raggi X lanciato dalla base di Withe Sands Missile Range, vicino ad El Paso, New Mexico



Siamo agli anni '80 e i pochi spettri disponibili a larga banda, dal radio, IR, ottico al gamma, indicano che molte sorgenti X emettono la maggior parte della loro energia al di sopra di qualche kiloelettronvolt (keV).

Figura 2: Il cielo X come noto nel 1968

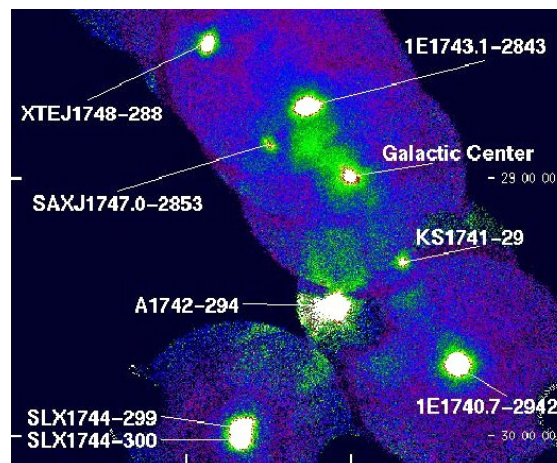


Per poter capire in dettaglio il tipo di emissione spettrale e quindi caratterizzare e comprendere i processi fisici operanti era necessario da un lato costruire potenti telescopi per spettroscopia a raggi X e dall'altro estendere la risposta in energia da qualche keV alle decine-centinaia di keV ed oltre.

Era sempre più impellente la necessità di strumenti diversi e più complessi: i raggi gamma non si possono focalizzare in alcun modo e per rivelarli sono necessarie tecniche non convenzionali e strumenti di grande massa e complessità. Esattamente 40 anni dopo la scoperta della prima sorgente celeste di raggi X viene messo in orbita *INTEGRAL* (*INTERNational Gamma Ray Astrophysics Laboratory*), il primo Osservatorio Spaziale

Internazionale in grado di fornire immagini dettagliate del cielo in raggi gamma.

Figura 3: La regione del Centro della via Lattea vista dai telescopi a raggi X a bordo del satellite Italo-Olandese *BeppoSAX*



Due sono i problemi principali connessi con la rivelazione di radiazione di alta energia da oggetti celesti: l'atmosfera, completamente opaca a queste lunghezze d'onda, e l'impossibilità di "focalizzare" raggi X e gamma. Mentre la radiazione ottica, infrarossa o radio si può "riflettere" con specchi di grandi dimensioni e focalizzare verso rivelatori compatti che formeranno quindi le immagini dell'oggetto da studiare, ciò non è possibile per la radiazione di alta energia.

Figura 4: Il telescopio X dell'ESA *XMM-Newton* in una visione artistica



GLI SPECCHI A INCIDENZA RADENTE E LE MASCHERE CODIFICATE

Per i raggi X è stata trovata una sorta di compromesso facendo riflettere con un piccolo angolo i fotoni su superfici metalliche estremamente levigate (tipicamente oro, cadmio o nichel). In tal modo si ottengono dei "concentratori" di radiazione, i cosiddetti telescopi a riflessione radente che permettono di avere grandi superfici di collezione della radiazione che viene poi focalizzata verso rivelatori di piccole dimensioni: la distanza focale di questi "specchi" è di vari metri. Si ottengono così due vantaggi fondamentali dal punto di vista realizzativo: il peso da mettere in orbita, sia degli specchi che dei rivelatori, è limitato e i rivelatori stessi sono poco "attivati" dai raggi cosmici e dalle particelle cariche emesse dal sole che li rendono "radioattivi", peggiorandone la capacità di distinguere i raggi X da rivelare. Focalizzare però fotoni al di sopra delle decine di keV e raggi gamma non è possibile a causa della grande energia trasportata da ogni singolo raggio che tenderà quindi ad attraversare la materia invece di essere riflesso o rifratto. Impossibile quindi fare immagini in modo tradizionale: la rivoluzione nell'astronomia gamma, a metà degli anni Settanta, avviene con l'uso delle cosiddette maschere codificate accoppiate a rivelatori sensibili alla radiazione: interponendo una placca di materiale metallico tra la sorgente di raggi gamma, in questo caso il cielo, ed un rivelatore, si proietteranno "ombre" gamma in posizione diversa, funzione della distanza angolare della sorgente dall'asse ottico dello strumento. Niente di particolarmente nuovo visto che lo stesso Aristotele ragionava sul fatto che guardando l'ombra proiettata per terra da un albero alle sue spalle poteva intuirne la posizione e la natura dalla

direzione e forma dell'ombra delle foglie! La dimensione dei fori nella piastra metallica e la distanza piastra-rivelatore determinano la risoluzione angolare del telescopio gamma mentre le dimensioni della maschera e del rivelatore ne determinano il campo di vista.

Si ottengono così strumenti con grandi campi di vista, centinaia-migliaia di gradi quadrati, e capacità di misurare con buona precisione la posizione di tutte le sorgenti osservate: meglio di un minuto d'arco, niente male considerando che i raggi gamma da rivelare sono in grado di attraversare un metro di cemento o vari centimetri di piombo o tungsteno! Fotoni di questo tipo non vengono ovviamente fermati dal mezzo interstellare, flebile gas o polvere, e ci giungono quindi fin dalle regioni più remote dell'Universo: siamo quindi in grado di farne radiografie dettagliate. E dato che andare lontano nello spazio equivale ad andare indietro nel tempo, possiamo ora osservare oggetti lontani nelle prime fasi della loro evoluzione. Un problema però insormontabile risiede nella necessità di avere grandi aree di collezione dei raggi gamma, visto il debole segnale che ci giunge dalle sorgenti celesti, anche se molto vicine a noi in termini astronomici.

Figura 5: L'insieme degli strumenti di Integral: sulla sinistra è visibile SPI con la sua forma cilindrica e sulla destra IBIS, con il dettaglio della maschera codificata ancora non coperta dallo scudo termico.

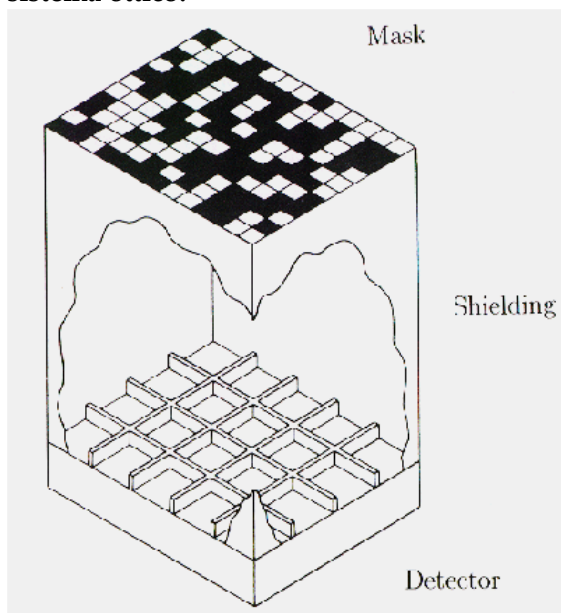


Sono necessari grandi e pesanti maschere e rivelatori per avere una sensibilità sufficiente per rivelare le sorgenti gamma da studiare, farne gli spettri in energia e quindi capire i processi fisici che avvengono quando la materia è in condizioni estreme in termini gravitazionali, di pressione e temperatura come sulla superficie di una stella di neutroni o al bordo di un buco nero. Per questo motivo *IBIS* e *SPI*, i rivelatori principali di *Integral*, pesano rispettivamente 900 e 1500 kg.

Strumenti basati su questo principio sono stati impiegati a bordo di palloni stratosferici e poi, in orbita sullo *Shuttle* con un breve volo di circa 2 settimane a bordo dello "*Spacelab 2*" e sullo strumento franco-russo *SIGMA* a bordo del satellite sovietico *Granat*, in orbita agli inizi del '90 e sul satellite italo-olandese *BeppoSAX* (lanciato il 30 aprile 1996).

Questi due ultimi satelliti hanno ottenuto grandi risultati scientifici: il primo ha fornito le prime immagini del centro galattico nella banda di energia da 40 a 1000 keV, il secondo ha permesso di svelare, dopo 30 anni di esperimenti e misure non conclusive, la natura dei *gamma-ray Bursts* (lampi gamma).

Figura 6: Esempio di telescopio X o gamma operante con maschera codificata come sistema ottico.



Infatti la loro accurata localizzazione in cielo fatta per la prima volta con *Wide Field Camera* di *BeppoSAX* ha permesso misure immediate con i telescopi X di bordo e nella banda ottica dallo *Hubble Space Telescope* che hanno dimostrato la loro natura extragalattica e più di recente essere dovuti all'emissione di grandi quantità di energia emessa da alcuni tipi di supernovae durante i momenti finali del loro collasso gravitazionale.

Il grande interesse scientifico suscitato dai risultati delle emissioni X e gamma e gli interrogativi sui processi di emissione si è concretizzato agli inizi degli anni '90 con la decisione dell'ESA di realizzare un osservatorio per raggi gamma. Gli strumenti principali del satellite dovevano essere due telescopi di alta energia l'uno capace di fare immagini con una precisione e sensibilità mai raggiunte sino ad allora e l'altro con grandi capacità spettroscopiche per la misura delle righe nucleari.

INTEGRAL

INTEGRAL è stato lanciato con successo da Baikhonur (Kazakistan) il 17 Ottobre 2002 per una missione di 2 anni, estesa poi a 5, dopo essere stato approvato nell'aprile 1993 nell'ambito del programma strategico dell'ESA HORIZON 2000. Originariamente fu proposto nel 1989 da un consorzio internazionale di astrofisici delle alte energie come osservatorio spaziale di grandi dimensioni e sensibilità aperto alla comunità scientifica internazionale. È formato dal satellite, costruito dall'Alenia Spazio di Torino con un contratto dell'ESA e dal carico scientifico ideato da Istituti di ricerca e realizzato dall'industria con contratti delle agenzie spaziali nazionali.

Figura 7: Dettaglio della maschera codificata di *IBIS*. Il materiale è Tungsteno (densità 20) un singolo elemento-foro ha dimensioni di 12x12 mm. Lo spessore della maschera è

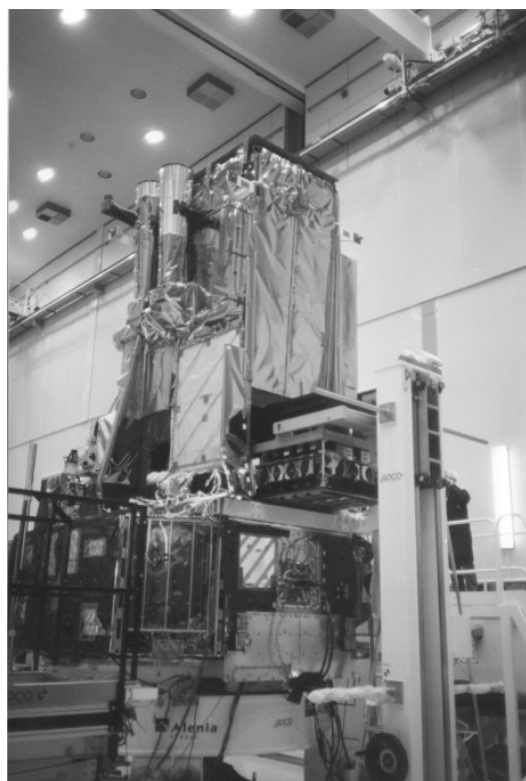
16 mm, in grado di assorbire il 30% dei fotoni con energie inferiori a 3 MeV e la sua dimensione è di oltre un metro quadrato, il peso 204 kg. È visibile una parte dello scudo termico che protegge lo strumento in volo.



Uno sforzo di oltre 800 persone che hanno partecipato al programma fin dall'inizio nell'aprile del 1993 e che ha visto coronato da successo il contributo sostanziale di molti paesi della vecchia Europa che hanno ideato, realizzato e fornito gli strumenti di bordo ed il centro di raccolta dei dati scientifici, con sede a Ginevra. Al programma ha partecipato inoltre la Russia con l'affidabile lanciatore Proton che con i suoi quattro stadi ed un peso di oltre 700 tonnellate al lancio ha immesso con precisione millimetrica l'osservatorio nell'orbita prevista con perigeo di 9000 km e un apogeo di 153.000 km. L'orbita estremamente eccentrica è stata studiata per minimizzare il fondo strumentale indotto dai raggi cosmici intrappolati nelle fasce magnetiche terrestri sino a circa 6000 km dalla terra e per permettere lunghe osservazioni delle deboli sorgenti gamma da studiare.

Gli USA hanno partecipato mettendo a disposizione la stazione di terra di Goldstone della NASA Deep Space Network che insieme a quella dell'ESA di Redu, in Belgio,

Figura 8: Integral durante le operazioni di integrazione del rivelatore IBIS presso l'ESTEC (ESA-Olanda).



permette di ricevere dati in tempo reale dal satellite e di inviare i telecomandi di bordo per la gestione della missione e l'invio delle coordinate per le osservazioni scientifiche pianificate.

Figura 9: Integral durante le operazioni di integrazione con il quarto stadio del razzo PROTON nella sala di assemblaggio di Baikhonur.

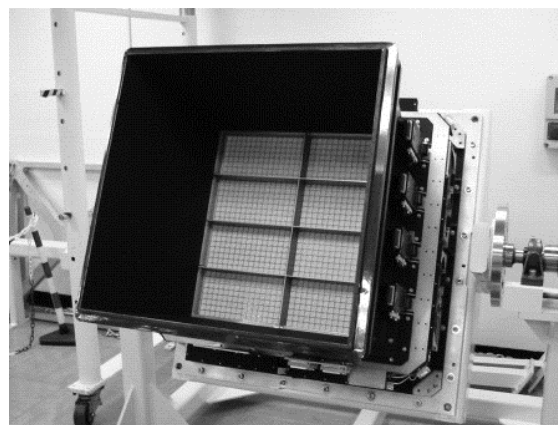


UN LABORATORIO DI RICERCA IN ORBITA

INTEGRAL, con la sua massa di circa 4 tonnellate, è un vero e proprio laboratorio di ricerca in orbita dedicato all'osservazione dei raggi gamma emessi da oggetti celesti sia appartenenti alla Via Lattea, la "nostra" Galassia, sia dagli oggetti celesti più grandi e lontani: Quasars, Ammassi di Galassie, Radiogalassie etc. I due strumenti di bordo principali, IBIS e SPI, sono ottimizzati per fare immagini e spettri nei raggi gamma con grande precisione e sensibilità. A bordo ci sono anche due 'monitor' che complementano gli strumenti principali facendo osservazioni contemporanee nei raggi X, da 3 a 10 keV, e nell'ottico, nella banda V a 550nm. IBIS è stato proposto e realizzato da un consorzio internazionale coordinato dall'Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica di Roma con finanziamento dell'Agenzia Spaziale Italiana. È un gioiello della tecnologia basato su rivelatori a stato solido, frutto della tradizione della fisica delle alte energie sviluppata in Italia sulle orme della scuola di Enrico Fermi la cui eredità raccolta da Bruno Rossi ed Edoardo Amaldi si è materializzata, nel campo dell'astrofisica spaziale, con l'impegno della comunità italiana sia in ambito ESA che in ambito nazionale. I ricercatori dei laboratori del CNR afferenti al settore agli inizi degli anni '70 capiscono che ricerca di eccellenza si può fare solo coniugando le tecnologie della fisica nucleare con lo spazio: nasce l'astrofisica spaziale, scienza di frontiera a Milano, nell'istituto diretto da Beppo Occhialini, a Frascati con Livio Gratton, Bologna con Brini e a Palermo con Livio Scarsi. Dopo il lancio dei primi esperimenti a bordo di razzi sonda nel 1967 e 1969 e di decine di esperimenti a bordo di palloni stratosferici i quattro istituti si consorziano con l'idea di proporre un satellite scientifico nazionale: BeppoSAX sarà la prima di una serie di notevoli successi, seguito dalle missioni XMM Newton e Integral ed in prospettiva Agile.

I rivelatori di IBIS sono formati da due piani diversi: il primo basato su 16.384 rivelatori di Telloruro di Cadmio, per basse energie (15-1000 keV) ed il secondo su di 4.096 rivelatori di Ioduro di Cesio (0.17-10 MeV). In questo modo si ottiene una ottima risoluzione angolare, pari a 12 minuti d'arco su un grande campo di vista (circa 30x30 gradi quadrati), una ampia risposta spettrale (15 keV - 10 MeV) ed una eccezionale risoluzione temporale pari a 60 microsecondi, necessaria a studiare le *Pulsar* più veloci e le strutture temporali fini dei *gamma-ray bursts* più intensi.

Figura 10: Il rivelatore di raggi gamma del telescopio IBIS durante una fase di test presso la ditta Laben di Milano. Il rivelatore è composto da circa 20.000 singoli elementi ognuno con la sua catena elettronica separata. Il peso totale è di oltre 380 kg.



Il piano di rivelazione basato sui CdTe è stato realizzato dal Laboratorio di Astrofisica Sap/CEA di Saclay, con finanziamento del CNES, sotto la direzione del Dr. Francois Lebrun mentre il piano di alta energia, basato su cristalli di CsI con lettura a fotodiodi è stato realizzato dalla ditta Laben con la responsabilità scientifica dell'Istituto TESRE di Bologna guidato dal Dott. Guido di Cocco.

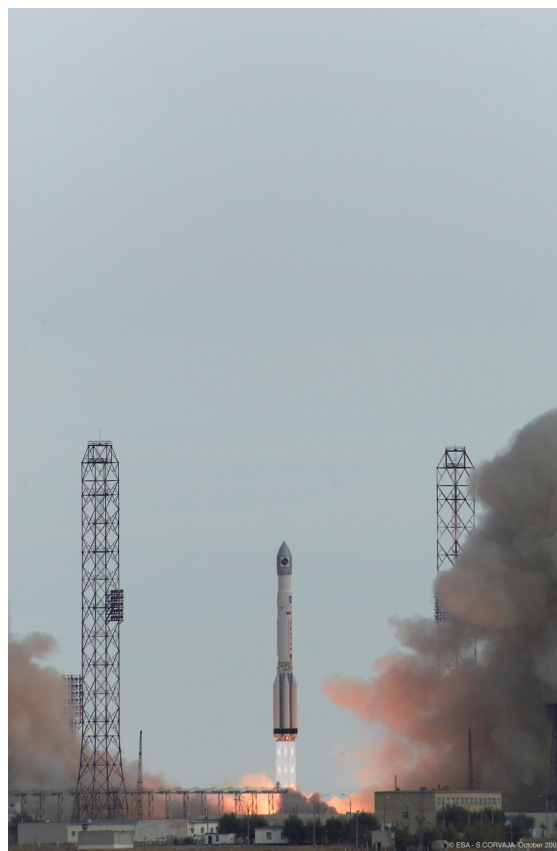
SPI è uno spettrometro ad alta risoluzione spettrale composto da 19 rivelatori al germanio raffreddati a circa 100 gradi Kelvin che operano con una maschera codificata con elementi di tungsteno spessi 50 mm. È in

grado di fare spettroscopia ad alta risoluzione ($E/\Delta E=1000$) tra 20 keV e 8 MeV con una sensibilità senza precedenti all'emissione gamma diffusa con un grande campo di vista ($\sim 25^\circ$ FWHM). Questo strumento è stato fornito all'ESA da un consorzio Franco-Tedesco. Il banco di rivelatori al Germanio dal CNRS di Tolosa, responsabile il Dr. J. Pierre Roques ed il sistema di anticoincidenza dal Max Planck Institute di Garching, responsabile il Prof. Volker Shoenfelder.

UN ANNO IN ORBITA: I PRIMI RISULTATI SCIENTIFICI

A quindici mesi dalla messa in orbita tutti i sistemi di bordo ed i rivelatori, IBIS, SPI, Jem-X e OMC funzionano perfettamente. Questa formidabile batteria di strumenti, co-allineati tra loro entro alcuni secondi d'arco è in funzione dall'inizio della missione 24 ore su 24 dopo un periodo iniziale di messa a punto in orbita ed accurata calibrazione avvenuto alla fine del 2003.

Figura 11: Il lancio di *Integral* a bordo del PROTON dal cosmodromo di Baikonur.



L'Osservatorio ha completato le osservazioni scientifiche previste per il primo anno in orbita ed è ormai utilizzato normalmente da gran parte della comunità scientifica internazionale. Ha dimostrato di essere una "facility" di eccellenza dopo aver fornito le prime immagini ad alta risoluzione del cielo gamma e sta dando una serie di risultati scientifici di assoluto rilievo internazionale: i veli che sino ad ora hanno oscurato il cielo gamma e la poca capacità di ottenere immagini "a fuoco" che ha limitato le missioni di alta energia a disposizione degli scienziati sembrano sciogliersi come la neve di primavera.

IBIS FA LA PRIMA IMMAGINE IN RAGGI GAMMA DEL NUCLEO DELLA GALASSIA

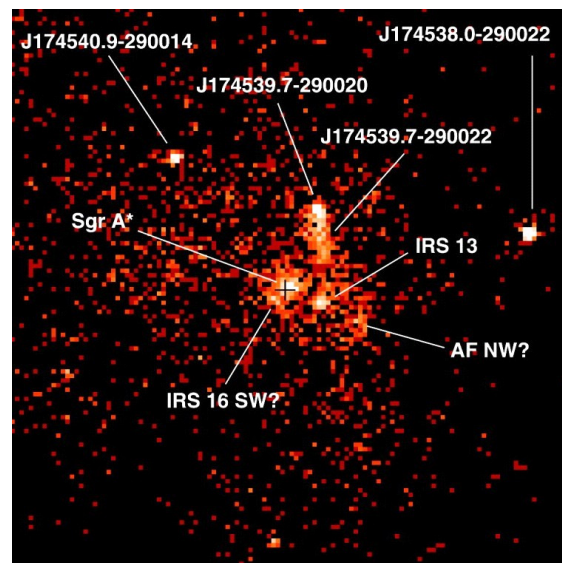
Astronomy and Astrophysics, la più importante rivista europea di astrofisica, ha dedicato un numero speciale alla missione

INTEGRAL: circa 80 articoli, in forma di brevi lettere, sono stati pubblicati sul numero di Novembre dello scorso anno (A&A, Vol.411, N1, November 2003). Tra i tanti risultati interessanti ce ne sono alcuni che hanno una particolare rilevanza perché aggiungono un tassello importante per la comprensione dell'accrescimento di materia stellare verso oggetti collassati e ci permettono di capire meglio l'origine della straordinaria quantità di energia che emettono sotto forma di raggi gamma. Ciò è cruciale per la comprensione dei processi fisici che sono alla base del motore centrale della Via Lattea il cui nucleo contiene una notevole parte di tutta la materia della Galassia: regioni di formazione stellare, nubi di gas freddo, stelle evolute ormai collassate allo stato di stelle di neutroni o di buchi neri generalmente confinate in sistemi binari, *pulsars* fortemente magnetizzate che ruotano con periodi fino a pochi millisecondi e materia di ogni genere è confinata in una regione 'piccola' in termini astronomici.

Particolarmente difficile da interpretare era la natura della radiosorgente compatta coincidente con il centro dinamico della Galassia: SgrA* (Sagittarius A*) che sembra coincidere con il candidato "*super massive black hole*": uno dei più misteriosi ed intriganti rompicapo della astrofisica delle alte energie ancora non risolto completamente. Già nel 1971 Lynden Bell e Martin Rees ne avevano predetto l'esistenza quale "motore primo" responsabile della grande quantità di energia emessa dal Centro Galattico in varie bande spettrali. Poco dopo era stata rivelata emissione di raggi X da quella regione, anche se con scarsa accuratezza per le limitazioni degli strumenti impiegati, come detto nel paragrafo iniziale. Più di 30 anni ed una campagna osservativa senza precedenti sono stati necessari per confermare in modo inequivocabile che l'emissione di radiazione X veniva dal centro galattico grazie al satellite Chandra con la sua incredibile risoluzione angolare.

Ma le sue immagini per quanto accurate ed incredibilmente 'a fuoco' non permettevano ancora di confermare gli indizi circa la presenza di un buco nero supermassiccio: la natura enigmatica dell'emissione X e le misteriose caratteristiche della brillante radiosorgente denominata Sgr A* e coincidente col Centro Galattico, rimanevano insolute. Confermare l'esistenza del buco nero di grande massa, capirne il comportamento e riuscire a modellizzare i processi fisici che governano l'enorme emissione di energia che proviene da questa singolarità posta esattamente nel centro dinamico della Galassia, è indispensabile per progredire nella conoscenza dei meccanismi che regolano la caduta di materia verso il buco nero centrale e che governano, su più larga scala, l'evoluzione dell'Universo stesso.

Figura 12: Osservazione CHANDRA del Centro Galattico in raggi X (estensione di 1 arco minuto). Sgr A* è contrassegnata dalla croce nera e corrisponde alla sorgente X più brillante (Cortesia della NASA, 1999).



Una importante misura di variazione temporale del flusso X dal Centro Galattico è stata ottenuta col telescopio X Newton/XMM dell'ESA. La rivelazione di un brillamento, o "*flare*" che ha fatto aumentare di 160 volte la debole emissione X del centro galattico in un

tempo incredibilmente breve: un altro indizio della esistenza del buco nero supermassivo, a lungo ipotizzato dalla fervida intuizione degli astrofisici nella seconda metà del secolo appena passato. Sinora infatti l'unica prova osservativa convincente, seppure indiretta, della sua esistenza è stata la rivelazione di peculiari moti orbitali di alcune stelle, attribuita alla perturbazione gravitazionale indotta da una enorme massa centrale.

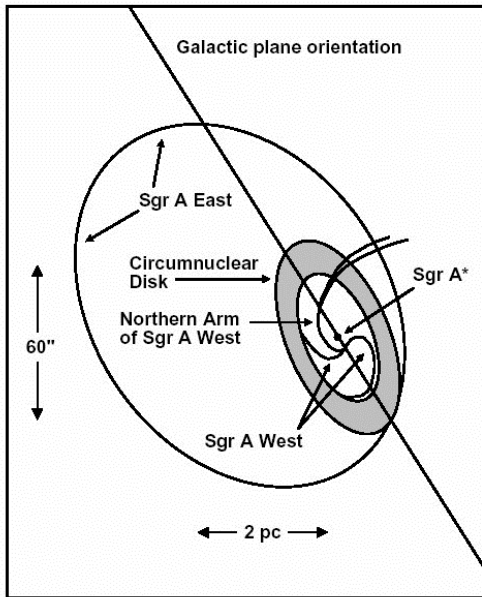
Il suggerimento della esistenza di un forte campo gravitazionale anomalo risultava evidente da una serie di misure condotte per anni con notevole tenacia da un gruppo di ricercatori tedeschi del *Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik* di Garching (Monaco), con i più sofisticati strumenti operanti nell'infrarosso, e posti nel piano focale dei migliori telescopi. Il moto di alcune stelle orbitanti nelle vicinanze di Sgr A* è stato studiato per oltre 10 anni e le orbite accuratamente registrate spiegabili solo con la presenza di un "sole" con una massa compresa tra 2.4 e 3.3 milioni di masse solari che ne regola il moto. In particolare una stella abbastanza brillante da essere seguita per oltre 6 anni ha mostrato una orbita molto eccentrica con un periodo di 15.2 anni. Fino a qui nulla di particolarmente esotico. Il dato unico registrato è stato però il passaggio della stella al cosiddetto "periastro", cioè il punto di massima vicinanza al "suo sole". La stella ha mostrato un incredibile cambio di velocità, da circa i 600 km/s registrati nel 1996, praticamente al punto più lontano da Sgr A* è passata a 5000 km/s nel 2002... niente male per un oggetto con una massa stellare! La ferrea legge Kepleriana ci dice che l'oggetto attorno a cui orbita questa stella deve avere una massa enorme.

Le misure ottiche ed infrarosse disponibili dai moderni telescopi come il VLT dell'ESO o il *Large Binocular Telescope* di nuova generazione, dotati delle cosiddette 'ottiche adattive', permetteranno di ottenere dati di una accuratezza impensabile soltanto alcuni anni fa. Ma per quanto eccezionali, le informazioni ottenute circa l'esistenza del

buco nero centrale sono ancora indirette. Stiamo infatti vedendo gli effetti di una grande massa attorno a cui orbitano le stelle del nucleo galattico: non è ancora una prova che questa massa sia "collassata" in una singolarità, un buco nero.

È stato necessario attendere INTEGRAL che è riuscito, dopo oltre 30 anni di osservazioni non conclusive, a misurare emissione di raggi gamma nella banda di energia tra 20 e 120 keV facendo la prima "immagine" gamma di SgrA*: radiazione proveniente dalla regione nucleare della Galassia, topologicamente molto complessa perché formata da varie componenti che interagiscono tra loro gravitazionalmente, elettromagneticamente e adronicamente. Esse sono: il buco nero supermassiccio (SMBH) di massa compresa tra 2.4 e 2.8 milioni di masse solari, un anello di polvere molecolare all'interno del quale è presente un ammasso di stelle di età diverse e quindi a diverso stadio evolutivo; un braccio di spirale formato da gas ionizzato con tre diverse elongazioni; le tracce di un "vecchio" resto di supernova e del gas ad elevata temperatura, responsabile dell'emissione X diffusa che è stata già da tempo rivelata da una zona estesa circa 10 arcominuti attorno al centro.

Figura 13: Schematizzazione della morfologia della zona nucleare della via Lattea, contenente il buco nero supermassivo e la radiosorgente SgrA* (Cortesia della NASA).

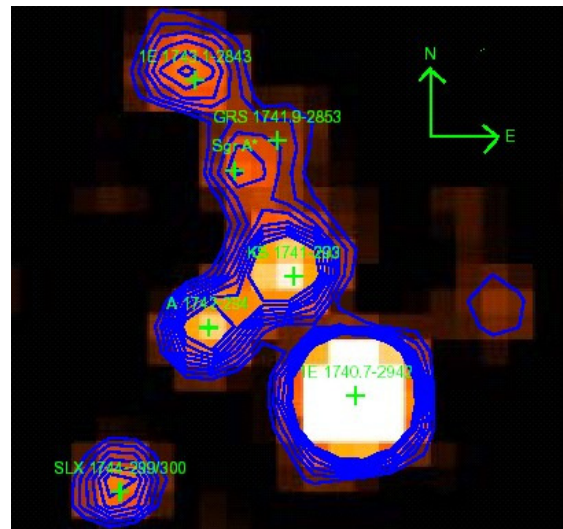


IBIS ha rivelato emissione di raggi gamma da una regione di cielo coincidente con Sagittarius A* e che ha una estensione calcolabile in circa 200 milioni di km, grosso modo le dimensioni dell'orbita terrestre. È questa la prima chiara indicazione di una sua emissione di alta energia. Con la sua sensibilità e incredibile precisione nel misurare l'emissione nei raggi gamma IBIS ha forse eliminato l'ultimo velo scoprendo l'esistenza di questa sorgente puntiforme di raggi gamma, battezzata IGR J17456-2901.

Nella stessa zona di quattro gradi quadrati IBIS ha rivelato varie sorgenti gamma: la più luminosa è la 1E1740.7-2942, sistema binario contenente un buco nero di massa stellare e considerato un piccolo "quasar" a causa di emissione di raggi X e radio superluminale e che rappresenta un altro mistero non ancora risolto di questa zona di cielo. Ci sono poi A1742-294, KS1741-293 e SLX1744-299 che sono state identificate con tre stelle di neutroni debolmente magnetizzate in sistemi binari che emettono lampi di raggi X su tempi scala di alcune decine di secondi. Questo fenomeno, gli *X-Ray Bursts*, sono il risultato di brillamenti termonucleari di elio ed idrogeno in forma nucleare che avvengono sulla 'crosta' della superficie rigida delle stelle di neutroni quando la

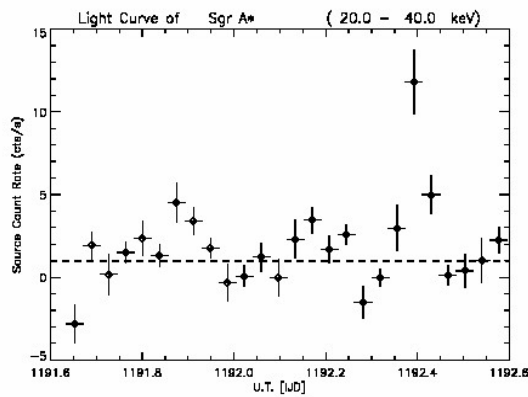
materia che viene strappata alle stelle binarie compagne raggiunge temperature e pressioni sufficienti ad innescare una reazione esplosiva.

Figura 14: Prima immagine a raggi gamma (20-120 keV) della zona del nucleo Galattico con almeno 7 sorgenti di alta energia rivelate da IBIS. Campo di vista 2 x 2 gradi quadrati (Cortesia Guillaume Belanger e Andrea Goldwurm, Sap/Cea IBIS Team, *ApJ Letters*, 2004, in Press).



IBIS è stato anche in grado di rivelare un drastico aumento di flusso gamma dal centro galattico di circa 10 volte in meno di 40 minuti: una indicazione forte che il processo fisico responsabile della emissione X scoperta da CHANDRA e da Newton-XMM sia lo stesso che genera i raggi gamma: proprio il buco nero da ~3 milioni di masse solari.

Figura 15: Flare nei raggi gamma del Centro galattico registrato da IBIS. Ogni osservazione ha una durata di 40 minuti (Cortesia IBIS Team).



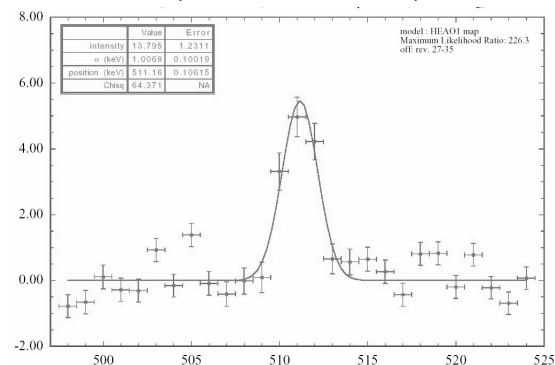
UNA FONTANA DI MATERIA ED ANTIMATERIA DAL CENTRO DELLA GALASSIA

Ma se IBIS sembra risolvere la presenza di questo super *'black hole'* al centro della Via Lattea, un nuovo recente mistero diventa più fitto: chi genera la forte emissione diffusa di raggi gamma di energia 511 keV rivelati dallo SPI, lo strumento spettrometrico a bordo di INTEGRAL, e da esperimenti fatti precedentemente, anche se con accuratezza minore? E chi genera il necessario flusso di elettroni e positroni necessari a spiegare l'emissione diffusa rivelata da INTEGRAL? La radiazione a 511 keV, segnatura inequivocabile di annichilazione di un elettrone e un positrone, è centrata di nuovo attorno al centro Galattico e presuppone una notevole quantità di materia ed antimateria. Agli albori della gamma astronomia, nel 1972, i primi esperimenti da pallone della NASA avevano indicato la presenza di una possibile emissione monocromatica di raggi gamma di alta energia, erroneamente ritenuta centrata a 476 keV da Neil Johnson e collaboratori. Negli anni ottanta l'avvento di rivelatori basati su spettrometri al Germanio dimostravano che l'energia della riga era intorno ai 511 keV. L'ulteriore informazione da altri esperimenti circa una possibile variazione del flusso di materia ed antimateria in tempi brevi portò immediatamente alla ipotesi che l'origine

prima della radiazione fosse proprio Sgr A*, di nuovo invocato a "motore primo" della nostra Galassia. Una revisione critica dei risultati che in dieci anni di osservazioni avevano portato a pensare che questa "fontana galattica" di materia ed antimateria fosse variabile fu possibile soltanto dopo le prime misure dell'osservatorio per raggi gamma della NASA CGRO, il Compton gamma Ray Observatory lanciato il 5 aprile 1991. Questa impressionante macchina orbitante, tanto grande da occupare completamente il "cargo bay" dello Space Shuttle che lo mise in orbita, confermò che nessun segno di variazione temporale era presente. Allo stesso tempo però confermava che almeno una parte dei raggi gamma venivano dal centro galattico.

Con circa 3 settimane di osservazione lo Spettrometro di INTEGRAL ha dimostrato che l'emissione non viene da un singolo punto, il centro galattico, ma da una zona abbastanza grande, estesa circa una decina di gradi più o meno centrata attorno a SgrA*. Infatti SPI con il suo potere spettroscopico e la capacità di fare immagini ci ha fornito la prima immagine della "fontana galattica" con un ottimo contrasto. Ha inoltre eliminato ogni dubbio sulla energia della riga: materia ed antimateria viene generata e si autodistrugge annichilendosi in fotoni di energia pari a 511 keV, misurata con un errore di appena 0.1 keV, nella zona centrale della nostra Galassia.

Figura 16: Picco di emissione della riga di 511 keV misurato dallo Spettrometro di INTEGRAL (Cortesia SPI Team).



Almeno una parte della radiazione diffusa vista dallo Spettrometro di INTEGRAL e l'emissione di raggi X da parte di SgrA* recentemente scoperta da XMM/Newton e CHANDRA sono in qualche modo alimentate dallo stesso motore o comunque generate da un identico processo fisico: caduta di materia nel super 'black hole' centrale rivelato da IBIS? Se così fosse capire fino in fondo ciò che vediamo sotto forma di radiazione di alta energia dal centro della Via Lattea e dal nucleo degli oggetti più grandi e lontani dell'Universo, quali galassie di Seyfert, QSOs, radiogalassie, è il punto di partenza per una migliore comprensione della composizione e dell'evoluzione del nostro Universo. Studiare in dettaglio e con tutti gli strumenti della moderna astronomia il centro della nostra Galassia a diverse lunghezze d'onda ci aiuterà a capire finalmente la fisica dei buchi neri supermassivi e forse l'origine stessa dell'Universo.

INTEGRAL ha festeggiato il primo anno in orbita e dopo 450 giorni nello spazio seguita a fare il suo lavoro di Osservatorio con indefessa precisione. Scienziati europei, russi, statunitensi, giapponesi e di tutto il mondo ricevono attraverso l'immateriale sistema della rete informatica i dati relativi alle loro osservazioni scientifiche: le migliori idee, con cadenza annuale vengono vagliate ed approvate da un comitato scientifico internazionale quindi pianificate con i vari strumenti di bordo.

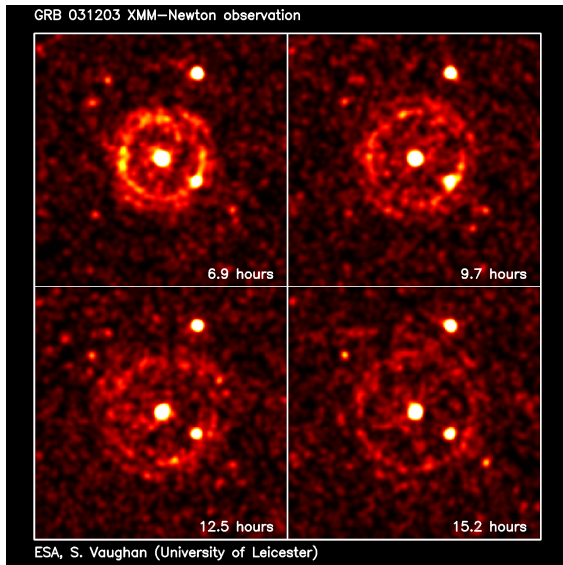
Ormai centinaia di campi di cielo sono stati studiati con sensibilità mai ottenuta prima e osservati contemporaneamente dai raggi X ai raggi gamma e monitorati con il telescopio ottico di bordo: vere e proprie radiografie del cielo che hanno bisogno di esposizioni lunghe, nei casi estremi di varie settimane per rivelare il debole segnale che arriva da oggetti extragalattici distanti miliardi di anni luce da noi e che riusciamo finalmente a vedere poco dopo la loro formazione. Oppure intensi *gamma-ray Bursts*,

tra i più energetici segnali che ci giungono dalle galassie lontane, registrati da INTEGRAL: la loro intensità e posizione accurata è inviata, via *web*, in tempo quasi reale a singoli ricercatori, Osservatori ed Istituti di ricerca internazionali.

L'ultimo "lampo gamma" registrato da INTEGRAL, lo scorso 3 dicembre, è durato 30 secondi ed era già sulla rete 15 secondi dopo il suo inizio: decine di telescopi robotizzati venivano ripuntati immediatamente nella sua direzione per studiarlo nelle bande visibili da terra. Intanto l'Osservatorio per raggi X dell'ESA XMM-Newton veniva ripuntato verso questa supernova con la speranza di vederne "l'*afterglow*" ossia l'emissione X generata dalla enorme quantità di raggi gamma prodotti dal collasso gravitazionale della stella in "buco nero". In figura 17 si può chiaramente vedere la forte emissione X che diventa sempre più debole col passare delle ore dall'inizio del "*burst*". Di incredibile bellezza sono gli anelli di raggi X generati dall'interazione della radiazione X con la polvere presente nella nostra Galassia: sono una sorta di "eco" che si espande col passare delle ore.

È la prima volta che questo fenomeno viene rivelato grazie all'azione coordinata di INTEGRAL che ha rivelato il *gamma ray burst* in tempo reale e XMM-Newton che lo ha potuto studiare in dettaglio nei raggi X grazie alla sua eccezionale sensibilità.

Figura 17: Le immagini in raggi X "dell'*Afterglow*" generato dal *gamma Ray-burst* GRB031203, rivelato in tempo reale da INTEGRAL e studiato in dettaglio da XMM-Newton. L'anello che si vede espandere è dovuto alla deflessione dei raggi X che interagiscono con la polvere intergalattica (cortesia: ESA, S. Vaughan, University of Leicester).



PIETRO UBERTINI

Laureato in Fisica presso l'Università La Sapienza nel 1973. Attualmente Dirigente di Ricerca presso l'Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica (IASF) del CNR, ora confluito nell'Istituto Nazionale di Astrofisica. È responsabile italiano del programma INTEGRAL (International Gamma Ray Astrophysical Laboratory), l'osservatorio Spaziale per Astronomia gamma dell'ESA in orbita dall'ottobre 2002. Principal Investigator del consorzio internazionale che ha proposto e realizzato il telescopio IBIS a bordo di INTEGRAL.

Contatti:

CNR-INAF, Ist. Astrofisica Spaz.e Fisica Cosmica
Tel. 06-49934090

Via Fosso del Cavaliere 100 00133 Roma
Email ubertini@rm.iasf.cnr.it