

ACCADDE QUELL'ANNO

Cinquant'anni con Geminga, una sorgente di raggi gamma che ha fatto la storia

Fifty years with Geminga, a gamma ray source that has made history

Patrizia A. Caraveo

IASF-INAF, Milano, Italia

Riassunto. Geminga è una brillante sorgente di fotoni gamma di alta energia la cui emissione è stata registrata per la prima volta dal satellite della NASA SAS-2 nel 1972. Capire quale fosse l'oggetto celeste responsabile dell'emissione gamma è stata una sfida durata oltre vent'anni. La caccia all'enigmatica sorgente ha comportato osservazioni radio, X ed ottiche grazie alle quali abbiamo capito di essere di fronte ad una stella di neutroni che ci voltava le spalle e quindi risultava invisibile in radio. Si è trattato di uno dei primi esempi di campagna multilunghezza d'onda sviluppatasi nel corso degli anni grazie alla visione di Nanni Bignami che, oltre ad avere dato il nome alla sorgente, ha capito che per svelarne la natura occorreva andare oltre all'astronomia gamma. La sorgente ha ripagato i nostri sforzi svelandoci le sue caratteristiche uniche che l'hanno fatta entrare nella storia dell'astronomia. Dopo decenni di solitudine, Geminga ora è la capostipite di una numerosa famiglia di stelle di neutroni *Geminga-like*.

Abstract. Geminga is a bright source of high-energy gamma-ray photons and its emission has been recorded for the first time by the NASA SAS-2 satellite in 1972. Pinpointing the celestial object responsible for the gamma-ray emission has been a challenging 20 yearlong effort. To chase the enigmatic source we used radio, X-ray and optical telescopes. Each wavelength provided a piece of the puzzle finally yielding the solution: a pulsar which was not pointing in our direction, thus invisible at radio wavelengths, while emitting in gamma-X-rays and optical. The chase for Geminga has been one of the first examples of multiwavelength campaign which went on for several years thanks to Nanni Bignami's unrelenting efforts. After naming the source, Nanni understood that its identification needed the contribution of all branches of astronomy. The source unique characteristics made it a prototype worth of a place in the astronomy books. After decade of being the only example of radio-quiet neutron stars, today we know dozens of Geminga-like pulsars.

Poiché i fotoni gamma vengono assorbiti dall'atmosfera terrestre, l'astronomia gamma che cattura i fotoni celesti ha potuto svilupparsi solo quando è stato possibile portare i rivelatori in orbita ⁽¹⁾.

Tuttavia, anche supponendo di avere la tecnologia per portare e fare operare la strumentazione in orbita, studiare i fotoni gamma non è affatto un compito banale. Si tratta di fotoni di alta energia che non possono essere riflessi e focalizzati (come succede per i fotoni ottici). Bisogna ricorrere a tecniche prese in prestito dalla fisica delle alte energie [1].

Per rivelare un fotone gamma occorre farlo interagire con la materia per trasformarlo in una coppia elettrone positrone che deve poi essere tracciata con metodi tipici della fisica delle particelle perché è dalla traiettoria seguita dalle due particelle che si può ricostruire la direzione di arrivo e l'energia del raggio gamma. Il processo di materializzazione del fotone avviene in un ambiente caratterizzato dalla presenza soverchiante di particelle cariche che possono inquinare le misure. Si tratta degli onnipresenti raggi cosmici, che devono essere riconosciuti ed eliminati attraverso circuiti di anticoincidenza che discriminano le particelle cariche dai raggi gamma che sono neutri. I rivelatori gamma sono quindi più simili ad uno strumento da acceleratore che ad un telescopio ottico. Con le informazioni sulla direzione di arrivo e sull'energia di ciascun fotone, è possibile costruire, punto per punto, carte del cielo in raggi gamma. La qualità della mappa dipende, ovviamente, dal numero dei fotoni rivelati e dalla precisione della ricostruzione della direzione di arrivo di ciascun fotone.

1. Nasce l'astronomia gamma

Per poter studiare il cielo in raggi gamma occorre sviluppare strumentazione ed avere la possibilità di mandarla in orbita. Questo fu uno dei compiti che venne affidato a Nancy Grace Roman, la prima Chief Astronomer della NASA. Nancy Roman era arrivata alla NASA nel 1959, un anno dopo la costituzione dell'Agenzia, quando il programma della scienza spaziale era tutto da inventare. Resasi conto che la comunità astronomica americana non aveva alcuna familiarità con le possibilità offerte dagli strumenti in orbita, iniziò dei giri di conferenze nelle università per cercare di suscitare interesse perché la sua ambizione era fare partire delle serie di satelliti dedicati a diversi tipi di astronomie impossibili da terra [2].

Così nacquero le serie OSO (Orbiting Solar Observatory), OAO (Orbiting Astronomical Observatory) e SAS (Small Astronomical Satellite) che fecero decollare l'astronomia ultravioletta, quella X e quella gamma.

La prima carta del cielo gamma venne costruita grazie al satellite OSO-3, lanciato nel 1967, che rivelò 621 fotoni gamma, abbastanza per capire che i fotoni erano

⁽¹⁾ In parallelo, si è iniziato a sviluppare strumentazione al suolo per rilevare la radiazione Cherenkov emessa dalle particelle secondarie prodotte dall'interazione dei fotoni gamma celesti con l'atmosfera [1]. Lo sviluppo dei rivelatori gamma a terra è stato più lento di quello degli strumenti in orbita che hanno monopolizzato l'attenzione degli astrofisici per diversi decenni.

concentrati intorno al piano della nostra galassia ma troppo pochi da vedere alcun dettaglio [3].

Il passo decisivo venne fatto da SAS-2 lanciato il 15 novembre 1972 dalla base italiana San Marco, una ex piattaforma petrolifera ancorata nei pressi di Malindi, in Kenya. Il lancio da una base situata praticamente sull'equatore aveva inserito la missione gamma in un'orbita equatoriale, particolarmente vantaggiosa per il naturale taglio nel numero dei raggi cosmici. SAS-2 montava una camera a scintilla, dove i raggi gamma si dovevano materializzare per poi essere tracciati, interamente circondata da uno scintillatore che doveva servire da anticoincidenza. I raggi cosmici, inevitabilmente presenti in numero molto superiore ai raggi gamma, sarebbero stati facilmente rivelati dallo scintillatore che avrebbe impedito alla camera a scintille di attivarsi. Un secondo scintillatore posto sotto la camera aveva il compito di rivelare l'eventuale coppia formata dalla materializzazione del raggio gamma. Un segnale dallo scintillatore inferiore senza un corrispondente segnale da quello superiore puntava al passaggio di un raggio gamma, un fotone che non triggerava il primo scintillatore ma, una volta trasformato in elettrone-positrone lasciava traccia del suo passaggio nel secondo. La tecnica funzionò benissimo, peccato che lo strumento ebbe un problema all'alimentazione e si spense dopo appena 7 mesi.

Nonostante la breve durata, SAS-2 rappresenta l'inizio dell'astronomia gamma. È nella sua mappa del cielo gamma, compilata usando poco meno di 12.000 fotoni che si apprezza per la prima volta la presenza di agglomerati di fotoni gamma che diventeranno una nuova realtà astronomica, le sorgenti gamma [4].

2. La scoperta

Quando, nel 1973, il satellite SAS-2 completò l'intera osservazione del disco galattico nei raggi gamma per mezzo di una camera a scintilla ci si accorse, con estrema sorpresa, della presenza di due addensamenti di fotoni nei pressi dell'anticentro galattico (fig. 1).

Parliamo di addensamenti, piuttosto che di sorgenti, perché all'epoca le idee in proposito non erano molto chiare. La direzione di arrivo di ciascuno dei fotoni gamma emessi da un'ipotetica sorgente puntiforme, e materializzati nella camera a scintilla, viene ricostruita con una notevole incertezza, tanto maggiore quanto più bassa è l'energia del fotone. Piuttosto che vedere fotoni che vengono tutti esattamente dalla stessa direzione si noterà un addensamento nelle direzioni di arrivo. Tecnicamente si chiama *Point Spread Function* e dice quanto lo strumento allarghi una sorgente puntiforme. È un concetto che si è chiarito nel corso degli anni e, durante l'analisi dei dati SAS-2, era ancora abbastanza confuso. Vista la limitata risoluzione angolare dello strumento, non era possibile dire se si trattasse di sorgenti puntiformi, capaci di produrre autonomamente fotoni così energetici, oppure di sorgenti estese, come una nube molecolare colpita dai raggi cosmici che, interagendo con i protoni del gas della nube, avrebbero facilmente prodotto fotoni gamma.

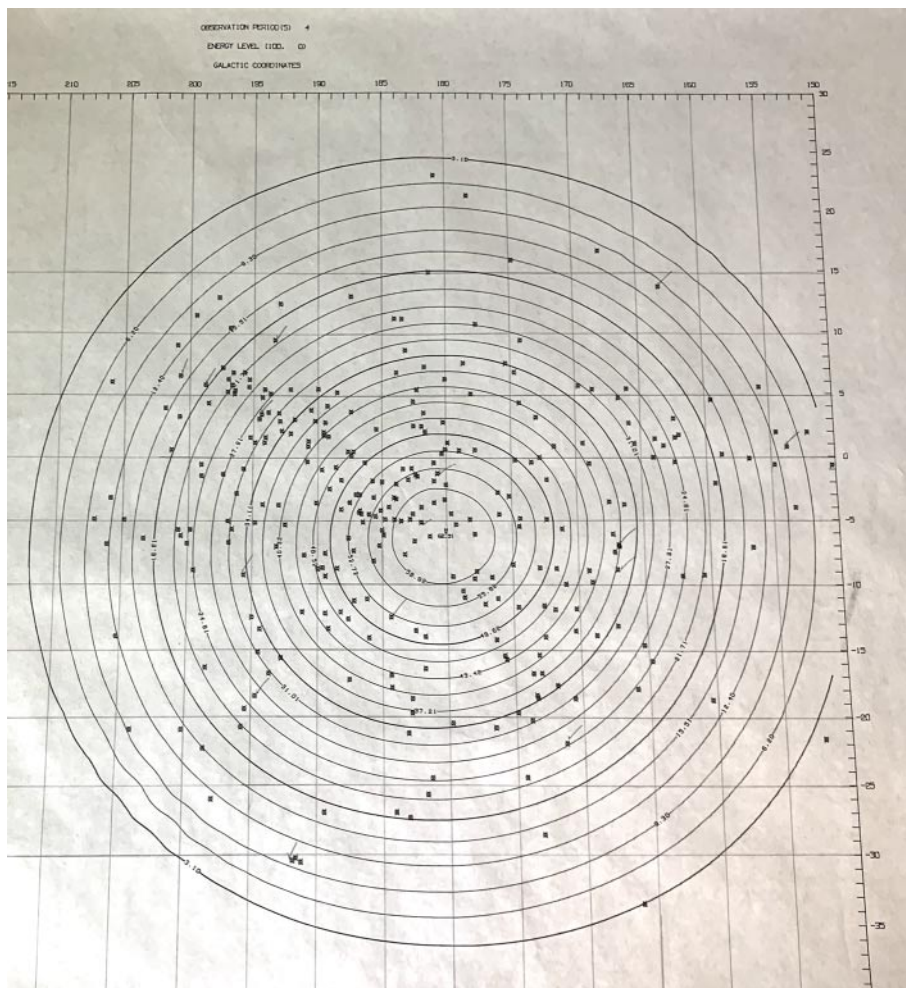


Fig. 1. – Prima mappa dell'anticentro galattico ottenuta dopo una settimana di osservazione di SAS-2. Ogni stellina rappresenta la direzione di arrivo di un fotone gamma. Le stelline non sono uniformemente distribuite ma si notano due addensamenti, quello immediatamente sopra a sinistra del centro dei cerchi concentrici è la pulsar del Granchio ancora più sopra sempre a sinistra, l'addensamento che verrà chiamato $\gamma 195+5$. La mappa originale ha grandezza di circa un metro ed è stata gentilmente fornita da D.J. Thompson (credito NASA).

La mappa dell'emissione gamma dell'anticentro galattico riprodotta in fig. 2 è dominata da due addensamenti, quello sotto il piano della galassia (grossomodo alla posizione, in coordinate galattiche, $l = 185^\circ$ $b = -5^\circ$) venne facilmente identificato come la pulsar della nebulosa del Granchio, scoperta da poco grazie alle regolari pulsazioni radio [6]. In effetti, anche i fotoni gamma risultano pulsati a riprova che sono stati prodotti dalla stella di neutroni [7]. La seconda, sopra il piano della galassia con coordinate $l = 195^\circ$ e $b = +5^\circ$, chiamata, senza troppa fantasia, $\gamma 195+5$, non sembrava correlata ad alcuna sorgente nota. Per completezza, bisogna aggiungere

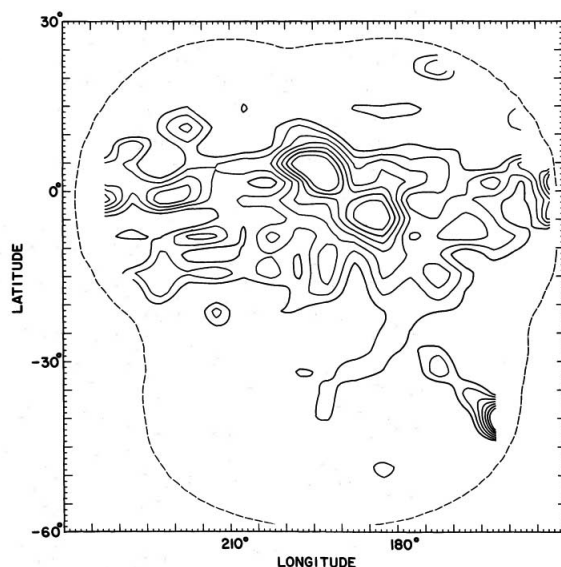


Fig. 2. – Mappa dell'emissione gamma (con energia al di sopra di 35 MeV) rivelata dal satellite SAS-2 nella direzione dell'anticentro galattico. Si tratta del risultato finale della missione dove la densità di fotoni è stata trasformata in isofote. Sono evidenti i due addensamenti che contraddistinguono l'apparenza dell'anticentro della galassia [5].

che SAS-2 aveva visto un altro agglomerato di fotoni gamma nella regione delle Vele all'interno di un resto di supernova che era risultato essere la pulsar PSR 0835-45 [8].

γ 195+5, a differenza delle altre due sorgenti, non si trovava all'interno di un resto di supernova (anche se la sua approssimata posizione non era troppo lontana dal resto di supernova IC443) e non presentava alcuna emissione radio.

3. Entra in scena COS-B

Il lancio del satellite COS-B [9] nell'agosto del 1975 rivoluzionò le conoscenze nel campo dell'astronomia gamma. Come si intuisce dalla fig. 3, la missione era concettualmente molto simile a quella di SAS-2, il telescopio di bordo era costituito da una camera a scintille per determinare la direzione di provenienza dei fotoni e da un calorimetro che consentiva una ricostruzione grossolana dell'energia tra alcune decine di MeV e circa 1 GeV.

La regione di cielo che venne osservata per prima fu l'anticentro galattico, in un mese di osservazioni si ottenne una statistica migliore di quella ottenuta da SAS-2 durante la sua totale vita operativa. COS-B produsse un'immagine che mostrava l'anticentro galattico con la pulsar del Granchio appena al di sotto del piano galattico e la sorgente misteriosa che, presto, non fu più un caso unico perché, grazie ad una serie di osservazioni dedicate alla mappatura del piano galattico, il numero di sorgenti gamma crebbe. Era un risultato importante e venne pubblicato un catalogo

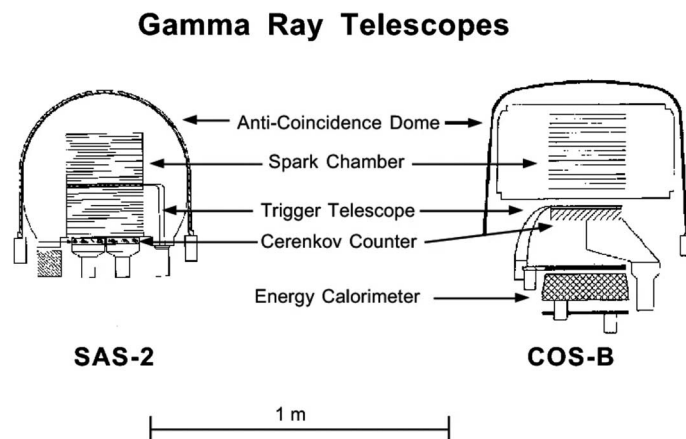


Fig. 3. – Confronto, in scala, tra i rivelatori di SAS-2 e COS-B.

contenente una dozzina di sorgenti [10] che vennero chiamate con la sigla CG (per *Cos-B Gamma-ray source*) seguita dalle coordinate galattiche. La sorgente misteriosa dell'anticentro divenne CG195+4.

Grazie alla longevità della missione COS-B, che continuò a raccogliere dati fino al 1982, il numero delle sorgenti gamma crebbe ed il catalogo finale prodotto dalla missione COS-B ne contiene una ventina adesso descritte con la sigla 2CG seguita dalle coordinate galattiche di ciascuna [11].

Delle nuove sorgenti solo 4 avevano una identificazione: 2 erano le pulsar già viste da SAS-2 alla quale si erano uniti il quasar 3C273 e la nube molecolare ρ Oph. Per le sorgenti non identificate Giovanni (Nanni) Bignami coniò l'acronimo UGO per *Unidentified Gamma Objects*.

La corsa all'identificazione delle sorgenti gamma diventava sempre più pressante e la misteriosa sorgente dell'anticentro galattico era la prima della lista. Su di lei, COS-B aveva fornito due informazioni molto importanti. Grazie a ripetute lunghe osservazioni, era stato possibile ottenere il primo spettro di questa sorgente, che poteva essere descritto da una legge di potenza con esponente pari ad 1.8. Decisamente più "duro" di quello della pulsar del Granchio, cioè più ricco di fotoni di alta energia. La differenza tra le due sorgenti balza subito all'occhio nella fig. 4 che contiene tre visioni dell'anticentro galattico ottenute selezionando fotoni appartenenti a tre intervalli di energia. Mentre alle energie più basse, la pulsar del Granchio è preponderante, alle energie più alte la sorgente più brillante diventa la nostra sconosciuta. Da notare anche che alle energie più alte i fotoni appaiono più addensati perché lo strumento ricostruisce meglio la direzione d'arrivo e quindi la risoluzione angolare migliora sensibilmente. Proprio questa caratteristica strumentale, unita allo spettro duro della sorgente ha consentito la riduzione del cerchio di errore a 24 minuti d'arco, un livello mai raggiunto sino ad allora in astronomia gamma.

Questo risultato fece riprendere la ricerca della controparte radio e ottica, anche se tutto finì con un nulla di fatto.

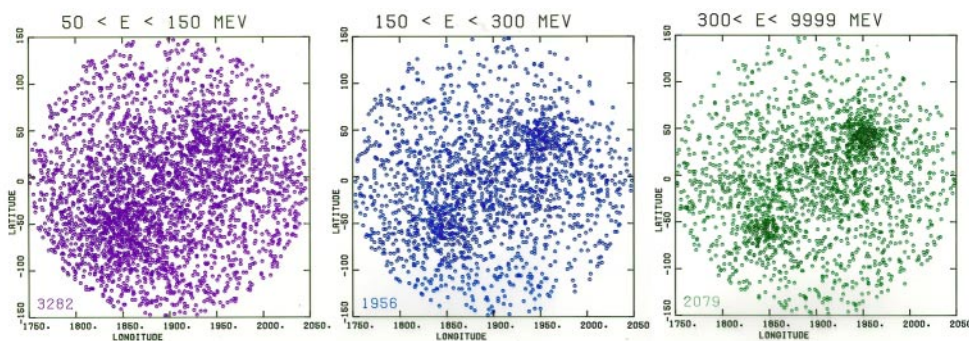


Fig. 4. – Visione di COS-B dell’anticentro galattico selezionando diversi intervalli di energia per i fotoni gamma. Le cifre in basso a sinistra rappresentano il numero di fotoni contenuti in ciascun riquadro.

Intanto, analizzando tutti i fotoni di $\gamma 195+5$ raccolti da SAS-2 [5] venne notata la presenza di una marginale periodicità di circa 59 secondi caratterizzata da un altissimo valore della derivata del periodo. Con un totale di soli 121 fotoni questo effetto non aveva grande significatività statistica ed il maggior numero di fotoni raccolti da COS-B non lo confermò.

4. La ricerca di una controparte porta ad un nuovo nome

Vista la completa assenza di emissione radio pulsata si pensò che l’emissione gamma fosse dovuta ad un’invisibile galassia compagna della Via Lattea [12]. La ricerca di questa ipotetica galassia, che venne effettuata in banda radio a 610 Mhz, non diede frutti astronomici [13] ma va ricordata per motivi semantici. Alla regione di cielo in cui doveva essere effettuata la ricerca occorreva dare un nome. Nanni Bignami, dovendo rispondere ai colleghi radioastronomi, iniziò a giocare con le parole e così nacque *Geminga* da *GEMINi GAMMA source* (sorgente gamma nei Gemelli) ma che, per un orecchio milanese, aveva un doppio senso, infatti Geminga, letta con la “g” dura, diventa “Gh’e Minga”, ovvero “non c’è”. Un nome perfetto per una sorgente misteriosa che si rivelò anche molto fortunato e che Nanni Bignami sosteneva essere il suo più grande contributo all’astrofisica.

Una strada differente venne intrapresa da un altro gruppo di ricercatori [14] che cercarono di correlare l’osservazione gamma della misteriosa sorgente con i dati in raggi X, ottenuti dai satelliti Uhuru e HEAO-1 che allora avevano a disposizione grazie ai programmi sponsorizzati dall’ufficio di Nancy Grace Roman. L’idea era molto interessante e sostanzialmente corretta, ma la strumentazione di Uhuru e HEAO-1 non era abbastanza sensibile.

La situazione cambiò col satellite Einstein, che non disponeva di semplici rivelatori X, ma di un vero e proprio telescopio caratterizzato da specchi ad incidenza radente.

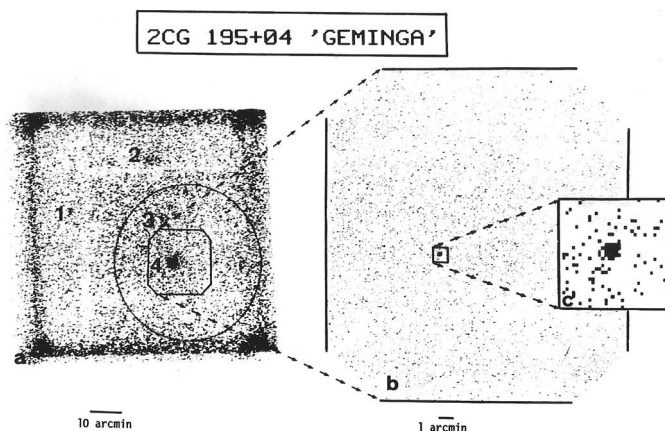


Fig. 5. – I dati ottenuti dal satellite Einstein mostrano per la prima volta la controparte X della sorgente gamma [15]. A sinistra, l'immagine dello IPC con il cerchio a rappresentare l'area di incertezza del posizionamento di COS-B, a destra quella dello HRI.

L'osservatorio Einstein era in grado di produrre immagini nei raggi X nella banda di energia tra 0.2 e 4 keV. Le osservazioni potevano essere effettuate con due strumenti: l'*imaging proportional counter* (IPC) che consentiva di determinare la posizione delle sorgenti celesti con un errore di 1 minuto d'arco all'interno di un campo di vista di 1° e l'*high resolution imager* (HRI), che lavorava con un campo di vista più stretto con la straordinaria risoluzione di 4 arcosecondi.

Davanti a questo strumento rivoluzionario che permetteva, anche a scienziati che non avevano collaborato alla sua costruzione, di chiedere tempo di osservazione, Nanni ebbe l'idea di sfruttare questa nuova opportunità e ottenne tempo per realizzare immagini X delle regioni di errore relative a diverse sorgenti rivelate da COS-B, ovviamente iniziando da Geminga. Su quest'ultima, Einstein effettuò due osservazioni con l'IPC, il cui campo di vista copriva interamente il cerchio di errore della sorgente COS-B 2CG195+4, a queste seguì un terzo puntamento dello HRI. Come chiaramente visibile nella fig. 5, nei dati dell'IPC compaiono diverse sorgenti, ma solo la più luminosa di esse, chiamata 1E 0630+178 (a significare che si trattava di una sorgente scoperta dalla missione Einstein, mentre i numeri indicavano le coordinate celesti), è situata all'interno del cerchio di errore di COS-B. Proprio questa nuova sorgente è stata oggetto del puntamento con lo HRI, che ha fornito una posizione molto precisa [15].

Lo IPC consentiva anche la misura dell'energia dei fotoni incidenti, permettendo di ottenere il primo spettro nei raggi X di 1E 0630+178. Il rivelatore mostrò uno spettro molle (cioè con molti fotoni di bassa energia) ma la sorpresa fu l'osservazione di un bassissimo assorbimento interstellare che poteva essere interpretato come dovuto ad una relativa vicinanza della sorgente, circa 100 parsec (ovvero poco più di 300 anni luce).

Dalla posizione precisa di 1E 0630+178, che noi speravamo ardentemente essere la controparte X di Geminga, ripartimmo con la ricerca della controparte ottica per

individuare la natura della sorgente gamma. L'ispezione del Palomar Observatory Sky Survey (POSS) non rivelò nulla, una eventualità sorprendente nel panorama dell'astronomia X dell'epoca. Questo ci fece sospettare che si trattasse di una stella di neutroni perché l'altra sorgente gamma nella costellazione delle Vele, che era certamente una stella di neutroni, aveva molte similitudini con Geminga, in particolare per entrambe rapporto tra la luminosità gamma e quella X e tra la luminosità X e ottica era molto elevato.

Ma noi non inseguivamo solo Geminga, l'osservatorio Einstein aveva puntato, con alterne fortune, altre sorgenti gamma. Un sommario di quanto avevamo imparato alla fine della missione dello Einstein Observatory è presentato in [16].

5. Alla ricerca della controparte ottica

Rimaneva da cercare ancora la controparte ottica e radio di Geminga. Insieme a colleghi francesi, amici di vecchia data, decidemmo di utilizzare il telescopio da 3.5 m CFHT (per Canada-France-Hawaii Telescope) che, nel 1984, fornì un'immagine del cerchio di errore [17] più profonda del POSS, riprodotta nella fig. 6.

Nella nuova immagine, ottenuta con uno rivelatore digitale del tipo Charge-Coupled Device (CCD) piuttosto che con una lastra fotografica, si notava un oggetto, che avevamo chiamato G, al limite della regione di incertezza di 1E 0630+178 (rappresentata con un quadrato), che ci apparve plausibile ritenere la controparte ottica di Geminga. Bloemen [18] ricercò nel POSS la sorgente G, e trovò una sorgente di pari luminosità (quindi debolissima) ma spostata di 7 secondi d'arco. Questo fece pensare che la sorgente G fosse animata da un elevato moto proprio. Oggi sappiamo in realtà che G non si muove e non è la controparte ottica di Geminga. Ma è interessante notare che l'idea era corretta. Ulteriori immagini profonde confermavano che G non si muoveva, anzi indagini spettrali la identificavano come una probabile stella di campo di magnitudine 20.5. Nel 1985 un lavoro del gruppo della Columbia University [19] dimostrava che il rapporto tra la luminosità X e ottica era stato sottostimato, quindi in realtà la controparte ottica di Geminga doveva essere molto meno luminosa di G. Contemporaneamente osservazioni X effettuate da noi con il satellite europeo EXOSAT confermavano la posizione di Geminga ed il suo spettro.

Nel 1986 Djorgovsky e Kulkarni [20] iniziarono a sondare la regione del cerchio d'errore con immagini molto profonde ottenute con un CCD applicato al telescopio da 3 metri del Lick Observatory trovando una sorgente molto più debole di G, che chiamarono G', ed una ulteriore sorgente, ancora più debole, indicata come G'' che gli autori considerarono, però, una fluttuazione statistica. Stimolati da questo risultato, decidemmo di sommare tutte le immagini che erano state ottenute nel 1984 al CFHT ottenendo un'immagine molto profonda [21] (riprodotta in fig. 7). Ora, oltre a G e G', si vedeva anche una sorgente più debole che prese il nome di G'' che però non coincideva con quella notata in [20] che doveva effettivamente essere una fluttuazione statistica, oppure un asteroide di passaggio.

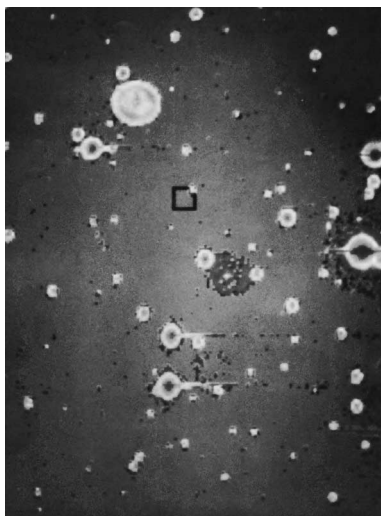


Fig. 6. – Riproduzione dell'immagine ottenuta con il filtro R al Canada France Hawaii Telescope [17]. Il quadrato rappresenta la posizione della sorgente X.

La caratteristica più importante per decidere quale tra G' e G'' fosse la controparte più promettente era certamente il colore, dal momento che erano troppo deboli per ottenere uno spettro. Le nostre osservazioni con i filtri R e V puntavano a G'' , che appariva più brillante in V rispetto al filtro rosso; poiché l'emissione X di Geminga

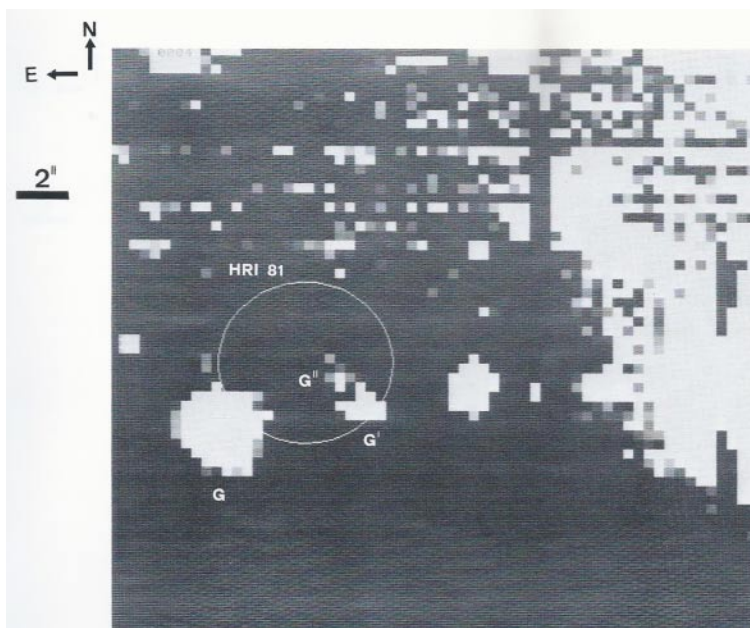


Fig. 7. – La somma di 12 esposizioni di 12 minuti ciascuna nel filtro R mostra, per la prima volta G'' . Il cerchio indica l'incertezza della posizione della sorgente X. Le immagini erano state ottenute nel 1984, ma la somma venne pubblicata nel 1987 [21].

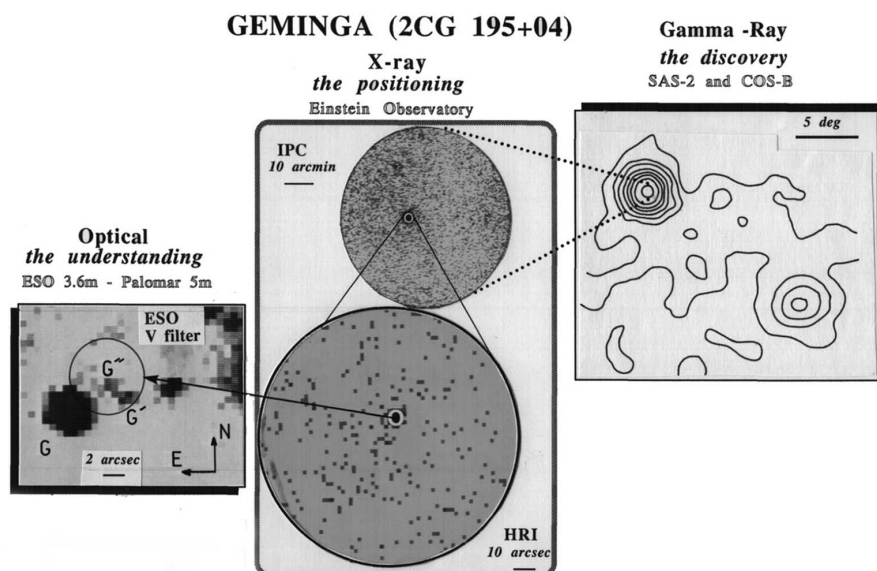


Fig. 8. – lo stato delle osservazioni in gamma, X e ottico alla fine degli anni '80.

era consistente con una temperatura superficiale di un milione di gradi K, era logico supporre che la sua controparte ottica apparisse come un oggetto tendenzialmente bluastro. Il colore di G'' venne confermato da ulteriori osservazioni di Jules Halpern che utilizzò il telescopio di 5 m di monte Palomar [22].

Nel 1988 ci arrischiavamo a fare una posa molto lunga con il telescopio da 3.6 metri dell'ESO a La Silla usando il filtro blu [23]. G'' risultò avere una magnitudine blu di 26.5; molto vicina alla magnitudine limite della strumentazione a disposizione in quel periodo. Dalla distribuzione dei colori risultò che G'' non era blu ma si presentava come una sorgente tendenzialmente verde. Grazie al suo colore inusuale, G'' venne indicata come la più probabile controparte ottica di Geminga. Non c'era molto altro che si potesse fare con i telescopi e la strumentazione disponibile alle fine degli anni '80. Non potevamo lamentarci: la decade ci aveva permesso di evidenziare 1E0630+178 come la più probabile controparte X e la debolissima G'' come la putativa controparte ottica. La fig. 8 fornisce un riassunto dello studio multilunghezza d'onda di Geminga che avevamo svolto fino ad allora.

Tutto puntava ad una stella di neutroni che non volgeva il suo cono di emissione radio verso di noi, ma non c'era ancora la pistola fumante che sarebbe venuta nel decennio successivo grazie ad una nuova accoppiata di strumenti X e gamma ed allo Hubble Space Telescope (HST).

6. Una stella di neutroni nei raggi X e gamma

Agli inizi degli anni novanta vennero lanciati gli osservatori X e gamma di terza generazione, si trattava di strumenti più complessi e accurati che avrebbero potuto colmare i buchi lasciati da COS-B ed Einstein. Parliamo del Compton Gamma Ray

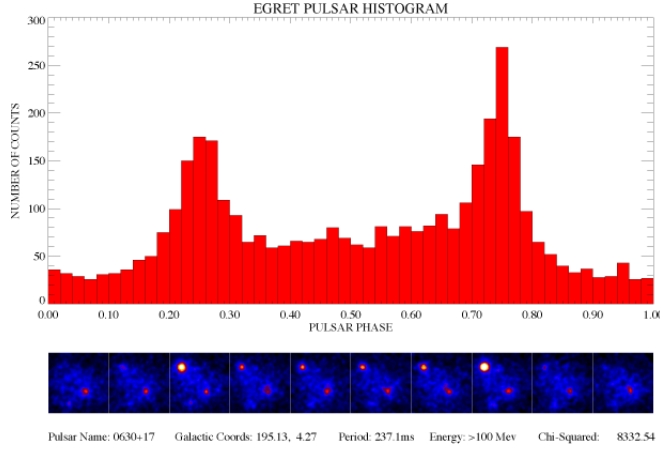


Fig. 9. – Curva di luce di Geminga ottenuta con telescopio gamma EGRET [26]. Da notare il *pulsar name* 0630+17, le coordinate celesti della sorgente X scoperta dal satellite Einstein.

Observatory (CGRO) e del Roentgen Satellite (ROSAT). Il primo, grazie ai suoi strumenti COMPTEL ed EGRET, consentiva di osservare il cielo nei raggi gamma nell'intervallo di energia da poche decine di MeV a qualche GeV [24]; il secondo invece operava nei raggi X. Nel 1992 ROSAT scoprì pulsazioni nell'emissione X di Geminga con periodo di 237 ms [25], un valore che punta ad una stella di neutroni giovane o di mezza età. I colleghi che gestivano EGRET, lo strumento di alta energia a bordo del CGRO, vennero immediatamente avvisati della scoperta in modo che potessero cercare questa periodicità anche nei loro dati. Il risultato fu eclatante, i fotoni gamma erano pulsati con periodo di 237 ms [26]. Era la dimostrazione che la sorgente gamma e la sorgente X erano lo stesso oggetto cioè una stella di neutroni in rapida rotazione.

La curva di luce di Geminga (riprodotta nella fig. 9) è straordinariamente simile a quelle rivelate per la pulsar del Granchio e per quella delle Vele, difficile chiedere di meglio. Il team di EGRET non solo confermò il periodo di Geminga ma riuscì a stimare la sua variazione in circa $1.1(\pm 0.17) \cdot 10^{-14}$ s/s la cui precisione era però limitata dalla breve base temporale delle osservazioni. Anche noi ricevemmo una telefonata che ci avvisava della scoperta della periodicità e passammo la notte ad analizzare i dati COS-B che erano stati acquisiti nel corso di 7 anni. Vedere i fotoni che si organizzavano in chiarissime curve di luce [27] a due picchi fu una grande emozione (fig. 10).

A 10 anni dalla fine della missione, i dati di COS-B si dimostravano utilissimi, a riprova che lo sforzo di preservarli era stato benemerito. Benché il numero di fotoni rivelati da COS-B fosse inferiore a quelli disponibili ai colleghi di EGRET, essendo distribuiti su base temporale molto più lunga, permisero di migliorare la stima della derivata del periodo che risultò di $1.099(\pm 0.001) \cdot 10^{-14}$ s/s, valore che permise di stimare il campo magnetico ($1.5 \cdot 10^{12}$ G), l'età della stella di neutroni (340000 anni) e l'energia rotazionale dissipata ($3.2 \cdot 10^{34}$ erg/s).

Anche i dati SAS-2 mostrarono la presenza della periodicità [28].

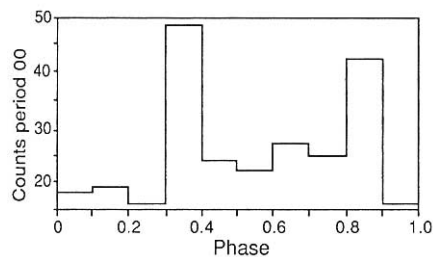


FIG. 1 Geminga γ -ray 10-bin light curve for COS-B observing period 00. The γ -rays per bin are 18, 19, 16, 49, 24, 22, 27, 25, 43, 16. Numbers for three other observing periods — 14, 39 and 64, respectively — are:

40, 37, 50, 91, 51, 38, 63, 55, 75, 64
 43, 33, 31, 83, 27, 23, 36, 27, 63, 26
 33, 34, 27, 70, 44, 47, 41, 40, 75, 36.

Fig. 10. — La pulsazione era presente, forte e chiara, anche nei dati COS-B [27].

7. Dal moto proprio alla distanza

La scoperta delle pulsazioni ci spinse a moltiplicare i nostri sforzi per la ricerca del moto proprio che rappresentava l'unica pistola fumante per associare la debolissima controparte ottica alla pulsar X e gamma. Al momento avevamo solo due immagini di G'' riprese con due telescopi diversi nel 1984 (con il CFHT) e nel 1987 (con il 3.6 m dell'ESO). La prima opportunità per osservare Geminga cadde in autunno del 1992 col New Technology Telescope (NTT) dell'ESO. L'immagine del 1992 mostrava uno spostamento di G'' di 1.5 secondi d'arco rispetto alla posizione nell'immagine del 1984, ma la sorpresa arrivava dall'immagine del 1987 dove G'' appariva in posizione intermedia tra le due. Il confronto tra le tre immagini (riprodotte nella fig. 11) non lasciava spazio a dubbi. Fu immediato calcolare il moto proprio in 0.17 arcsec/anno [29].

Un moto proprio così elevato per una sorgente così debole punta ad una sola classe di oggetti celesti: le stelle di neutroni. Inoltre, facendo delle ipotesi ragionevoli sulla velocità trasversale della sorgente, era possibile stimare la distanza che risultò veramente esigua, dell'ordine di un centinaio di pc, proprio come avevamo intuito sulla base del trascurabile assorbimento dei fotoni X.

A questo punto, 20 anni dopo il lancio di SAS-2 la caccia alla controparte di Geminga era finita. Sapevamo che la sorgente gamma e quella X coincidevano perché pulsavano all'unisono mentre l'identificazione ottica era basata sul moto proprio.

La divisione di astrofisica delle alte energie della American Astronomical Society riconobbe l'importanza del risultato e, nel 1993, conferì il premio Bruno Rossi a Nanni Bignami e a Jules Halpern che, come abbiamo ricordato, aveva dato contributi importanti allo studio della controparte ottica. Era la prima volta che il premio Bruno Rossi veniva assegnato ad un italiano e Nanni, che aveva conosciuto Bruno Rossi, ne fu immensamente orgoglioso.

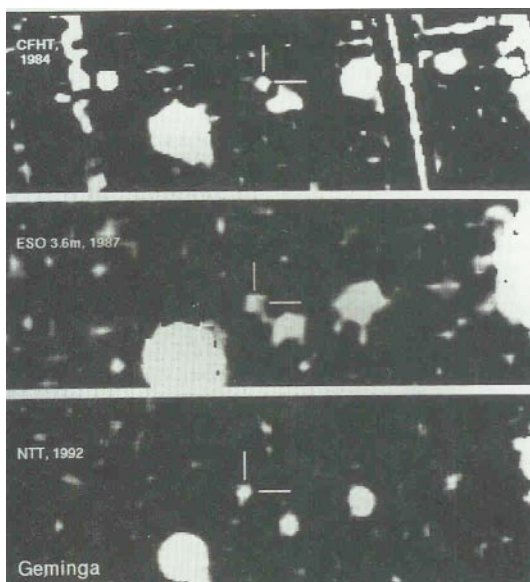


Fig. 11. – Il confronto di tre immagini prese a distanza di 8 anni mostra chiaramente lo spostamento di G'' [29].

Rimaneva però ancora molto lavoro da fare, per esempio continuando a misurare la posizione di G'' [30] per permettere di migliorare il moto proprio per poter prevedere la posizione in vista della nuova sfida: la determinazione della distanza attraverso la misura dello spostamento parallattico.

Purtroppo G'' è una sorgente troppo debole per permettere tale misura con un telescopio al suolo, per questo chiedemmo tempo di osservazione con lo Hubble Space Telescope. Per eseguire il nostro programma, però, fu necessario aspettare che Hubble riacquistasse la sua acuità visiva con la prima missione di manutenzione in orbita del 1993. Fu allora che la Wide Field and Planetary Camera 2 (WFPC2) produsse una bellissima immagine di G'' (fig. 12).

Per il programma dedicato allo spostamento parallattico, G'' venne osservata in tre occasioni, nel 1994 e nel 1995 durante gli equinozi, quando l'ampiezza dell'oscillazione parallattica raggiungeva il valore massimo. La parallasse annua sarebbe stata naturalmente sovrapposta al moto proprio di 170 mas/anno ma la WFPC2 forniva la corretta risoluzione angolare e disponeva di un campo sufficientemente ampio per effettuare tale misura usando un numero sufficiente di stelle di riferimento. La posizione di Geminga, misurata rispetto alle stelle del campo, mostrava chiaramente un piccolo scostamento sovrapposto al moto proprio (fig. 13). Il valore che meglio descrive le tre posizioni è uno spostamento parallattico di 0.6 pixel corrispondenti a $0.0064(\pm 0.0017)$ secondi d'arco che indicano una distanza di circa 157 parsec, come abbiamo mostrato in [31].

A questo punto la storia sembrava proprio finita e Nanni ed io accettammo l'invito di raccontarla sulla pagine dell' *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* [32].

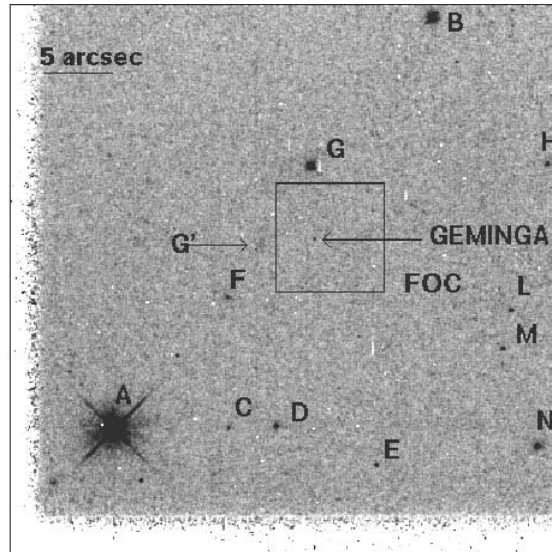


Fig. 12. – G'' appare nel puntamento della WFPC2 di HST [31] dove vediamo anche G e G' (quest'ultimo chiaramente non puntiforme). Anche la Faint Object Camera (FOC) osservò Geminga, ma il suo piccolo campo di vista (indicato con un quadrato) non la rendeva adatta alla misura dello spostamento parallattico perchè non conteneva stelle di riferimento.

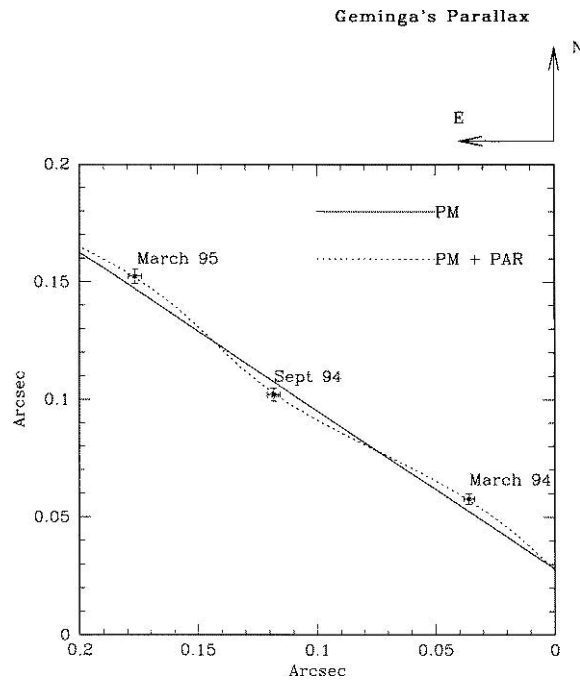


Fig. 13. – Le tre misure della posizione di G'' mostrano lo spostamento parallattico sovrapposto al moto proprio.

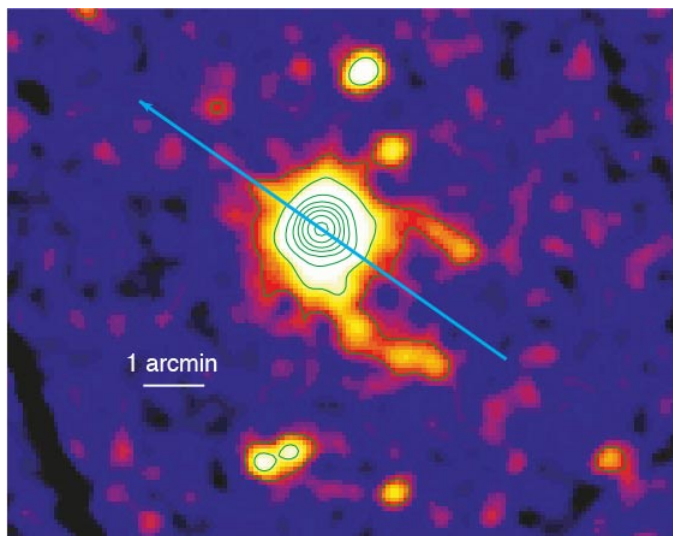


Fig. 14. – Immagine smussata dei dati raccolti da XMM Newton ai quali è stato sovrapposto il vettore del moto proprio [38].

Ovviamente, non smetteremo di lavorare sulla nostra sorgente preferita cercando di migliorare la determinazione della posizione, un parametro importantissimo quando si voglia fare l'analisi temporale di fotoni raccolti durante lunghi lassi di tempo. Geminga ebbe l'onore di essere la prima stella di neutroni posizionata con grandissima accuratezza grazie ai dati del satellite astrometrico Hipparcos [33]. Questa informazione, insieme al moto proprio, permise di migliorare le curve di luce gamma, confermando, se mai ce ne fosse stato bisogno, che la sorgente ottica era proprio la controparte di Geminga [34].

In effetti, la debole controparte ottica non smetteva di attirare l'attenzione degli astronomi ed altri gruppi cercarono di misurare il suo spettro [35] e di capire se l'emissione ottica fosse pulsata. I primi risultati, non del tutto convincenti [36], furono poi confermati qualche anno più tardi [37].

8. Le doppie code

Il nostro interesse per l'emissione di più alta energia di Geminga non era affatto svanito. Quando si trattò di decidere quali sorgenti osservare con il nuovo e potente telescopio X dell'Agenzia Spaziale Europea XMM-Newton, Geminga venne ovviamente inclusa nelle nostre richieste. Onestamente, non saprei dire cosa ci aspettassimo, ma l'esperienza ci aveva insegnato che Geminga aveva sempre in serbo qualcosa di nuovo. L'osservazione venne effettuata nell'aprile 2002 e, anche questa volta, Geminga riuscì a stupire tutti. Infatti le immagini dello European Photon Imaging Camera (EPIC) mostravano *due code allineate* con la direzione di moto proprio, come evidente dalla fig. 14 [38].

Le code viste da XMM sono dovute all'emissione di sincrotrone di elettroni (o positroni) energetici che, dopo essere stati accelerati dalla stella di neutroni, sono riusciti a diffondere fuori dalla magnetosfera ma sono rimasti imprigionati nel campo magnetico interstellare compresso dal moto della stella di neutroni. I fotoni X rivelati, insieme a ragionevoli ipotesi sul valore del campo magnetico compresso dall'onda di shock suggerisce che gli elettroni prodotti da Geminga abbiano un'energia di 10^{14} eV. Questi elettroni descrivono orbite a spirale attorno alle linee di campo emettendo radiazione di sincrotrone e perdendo energia. La loro vita media di 800 anni, combinata al moto proprio di Geminga, è in perfetto accordo con la lunghezza delle code osservata.

In più, la forma delle code ci dice che il mezzo interstellare presenta una densità molto bassa e che la direzione del moto di Geminga è quasi perpendicolare alla linea di vista: la sorgente si muove sul piano del cielo.

9. Spicchi di Geminga

L'analisi dei dati raccolti da XMM-Newton ha fornito ulteriori sorprese per Geminga. Mentre due rivelatori dello strumento EPIC ottenevano le immagini, il terzo, chiamato PN, raccoglieva informazioni temporali accurate sui tempi di arrivo dei singoli fotoni X. Durante il puntamento di Geminga, il PN ha raccolto più di 53000 fotoni, circa il doppio dei fotoni X accumulati nei 20 anni precedenti.

Il numero elevato di fotoni ha permesso un'indagine spettrale della sorgente in funzione della fase di rotazione, in particolare siamo riusciti a ricostruire lo spettro della sorgente e ad osservare come questo varia durante la rotazione della stella di neutroni [39].

La procedura classica per descrivere lo spettro di una stella di neutroni usa due ingredienti, uno spettro termico, descritto da una legge di corpo nero con temperatura di circa mezzo milione di gradi, ed uno non termico, dovuto all'interazione delle particelle con i campi elettromagnetici che circondano le pulsar. Questa componente è descritta da una legge di potenza dove l'esponente è sempre negativo perché il numero di fotoni emessi decresce col crescere della frequenza (o dell'energia).

Applicando il metodo standard ci rendemmo conto che c'erano alcuni intervalli di fase per i quali non era possibile riprodurre lo spettro di Geminga con due sole componenti, ma occorreva aggiungere una terza componente spettrale di tipo termico con una temperatura di 2 milioni di gradi! L'abbondanza di fotoni disponibili ci ha permesso di applicare una nuova tecnica di indagine detta di ripiegamento in fase: ogni fotone veniva classificato in un periodo temporale preciso, cioè in una fase corrispondente ad un decimo del periodo di rotazione della stella di neutroni. In pratica, Geminga veniva divisa in 10 spicchi ciascuno ampio 36° e per ogni spicchio veniva ottenuto lo spettro della sorgente. Confrontando i vari spettri, riprodotti in fig. 15, si è avuta conferma della presenza di una regione con una temperatura di 2 milioni di gradi dalle dimensioni di 120 metri che periodicamente transita lungo

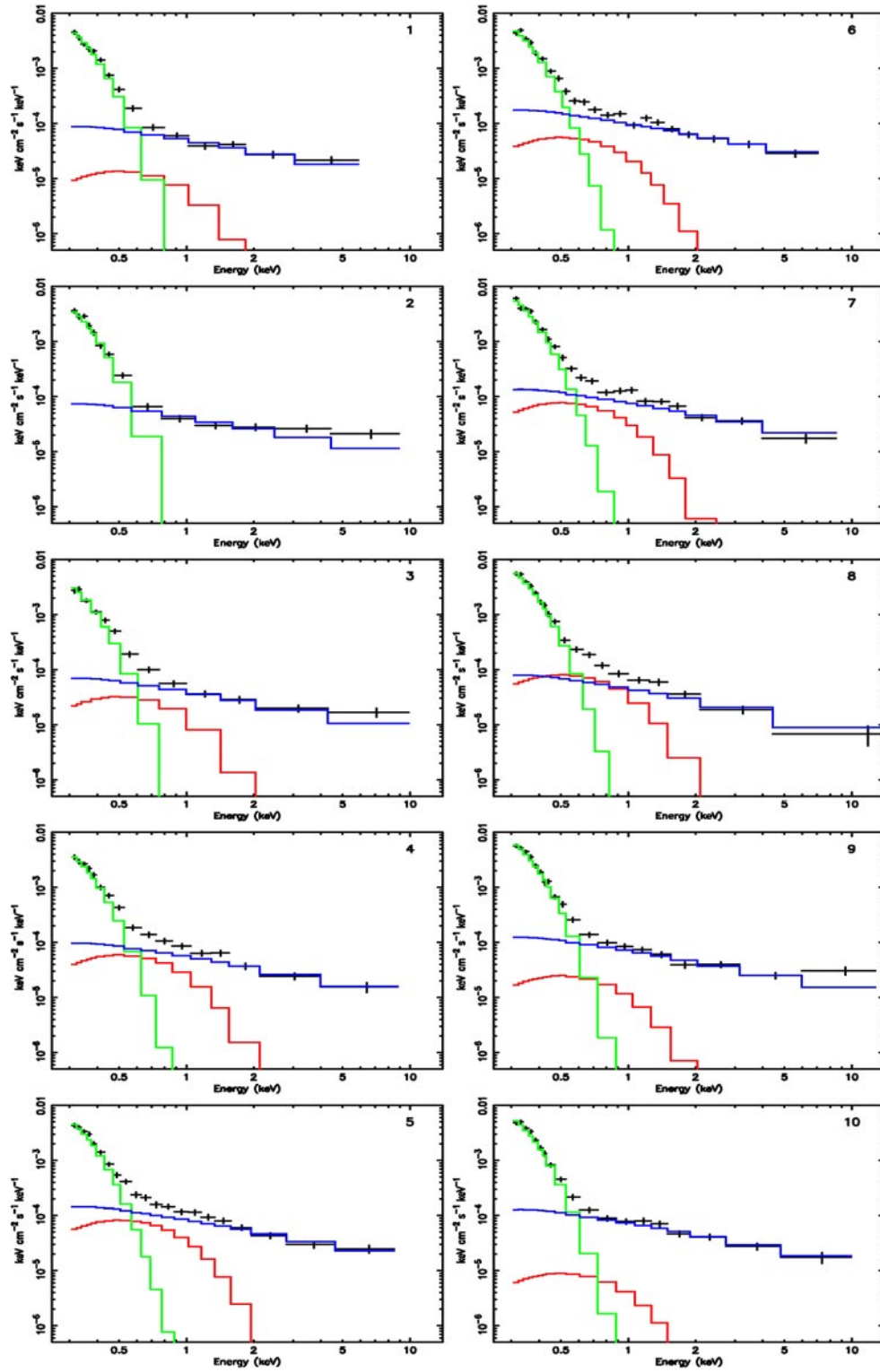


Fig. 15. – Analisi spettrale dei 10 spicchi di Geminga [39]. La curva verde rappresenta il corpo nero “freddo”, che copre la maggior parte della superficie della stella, la curva rossa rappresenta il corpo nero caldo, che interessa solo una piccola macchia, mentre la componente blu è la legge di potenza, che rappresenta la parte non termica dello spettro.

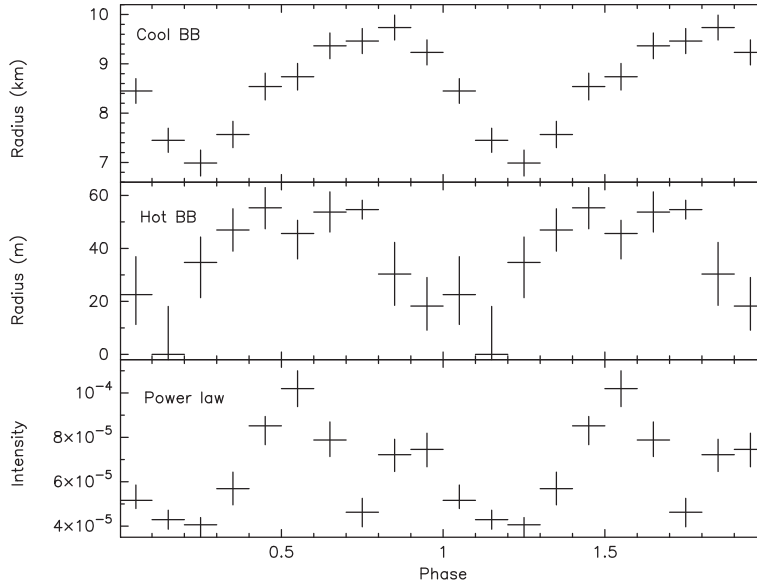


Fig. 16. — I tre grafici mostrano come le tre componenti dello spettro di Geminga varino lungo la fase rotazionale. Il corpo nero “freddo” varia tra i 7 ed i 10 km di raggio (compatibile con la totalità della stella di neutroni) mentre quello caldo varia tra 0 e 60 metri di raggio. Un risultato straordinario [39].

la nostra linea di vista e fa cambiare lo spettro della stella. I parametri delle tre componenti spettrali che emergono dal nostro lavoro sono riassunti nella fig. 16.

I risultati di XMM avevano messo in evidenza l'attività di Geminga come acceleratore di particelle generate dall'interazione dei fotoni gamma di altissima energia con il campo magnetico in prossimità della stella di neutroni. Il processo genera coppie di elettroni e positroni che vengono accelerate in direzioni opposte ed XMM ci ha permesso di “vederle” entrambe. Da un lato c'erano le particelle di alta energia che erano fuggite dalla magnetosfera della stella e si diffondevano nel mezzo interstellare dando origine alle due code osservate, dall'altro c'erano le antiparticelle, accelerate in direzione opposta, che colpivano la superficie della stella di neutroni, riscaldandola. La possibile esistenza di macchie calde sulla superficie delle stelle di neutroni era stata più volte ipotizzata ma i dati X di Geminga hanno fornito la prima evidenza sperimentale. Inoltre, le dimensioni molto ridotte della macchia calda fanno supporre che Geminga sia un rotatore con l'asse di rotazione perpendicolare alla nostra linea di vista.

Ulteriori osservazioni X fatte con il satellite Chandra, che raggiunge risoluzioni angolari superiori a quelle di XMM, hanno mostrato che Geminga, oltre agli strascichi scoperti da XMM, ha anche una piccola coda cometaria [40, 41].

10. Geminga e le sue sorelle

In questi anni siamo i testimoni dell'epoca d'oro dell'astronomia gamma con ben due missioni in orbita, una coincidenza che non si era mai verificata nella storia (breve ma intensa) dell'astronomia gamma.

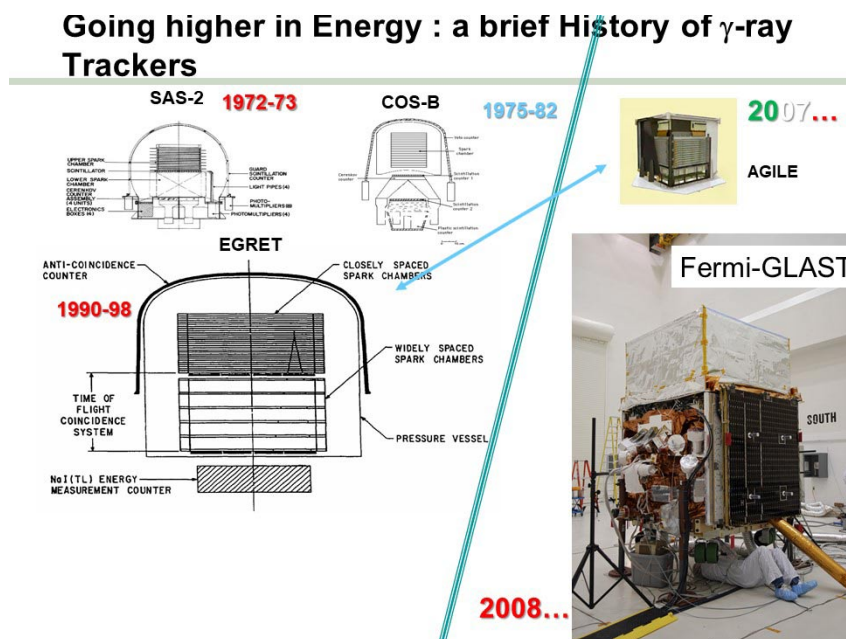


Fig. 17. – Mezzo secolo di astronomia gamma. A sinistra le camere a scintille, a destra i rivelatori al silicio.

Nell'aprile 2007 è partito il telescopio Agile una piccola missione dell'Agenzia Spaziale Italiana [42], l'apripista della nuova era nel campo dell'astrofisica delle alte energie. Era la prima missione gamma ad utilizzare rivelatori al silicio, molto più performanti della tecnologia della camera a scintille utilizzata dalle missioni precedenti. Con un quarto delle dimensioni di EGRET, Agile poteva fare di più e meglio del predecessore.

Nell'agosto 2008 è stato lanciato Glast [43], una missione NASA con un importante contributo italiano. Glast è una specie di fratello maggiore di Agile perché utilizza la stessa tecnologia al silicio ma è 16 volte più grande, quindi è capace di rivelare un numero molto più alto di fotoni gamma.

La fig. 17 riunisce, nella giusta scala, le cinque missioni gamma che fanno parte di questa storia.

Subito ribattezzata Fermi, la missione sulla carta prometteva di essere in grado di rivelare autonomamente le pulsazioni di sorgenti simili a Geminga. A questo fine, era stato messo a punto un metodo basato sulle differenze tra i tempi di arrivo dei fotoni gamma [44] capace di rivelare stelle di neutroni con le stesse caratteristiche di Geminga che, per 15 anni, era stato l'unico esempio conclamato di stella di neutroni che pulsava in gamma ed in X, ma senza alcuna emissione radio.

Durante il periodo di verifica orbitale Fermi venne puntato su una sorgente gamma non identificata all'interno del resto di supernova CTA-1 che i dati X e ottici facevano sospettare fosse molto simile a Geminga [45] e il nuovo algoritmo mostrò forte e chiaro

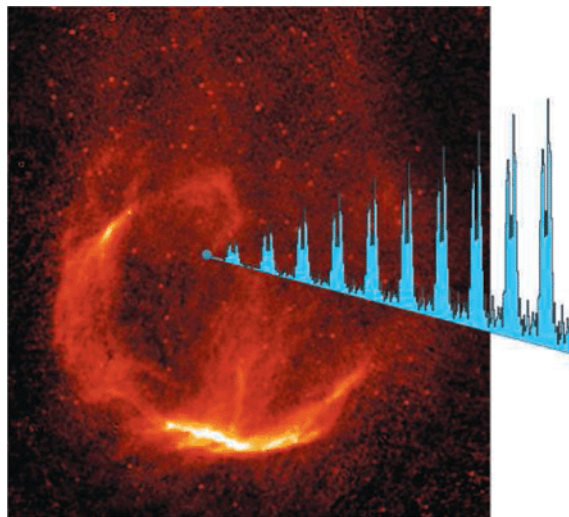


Fig. 18. – Montaggio dei dati radio, che mostrano il bellissimo resto di supernova CTA-1, con le pulsazioni gamma [47] (Cortesia di G. Kanbach).

il segnale periodico nell'emissione gamma [46]. Era veramente una cugina di Geminga ma si trovava all'interno di un resto di supernova (fig. 18).

Il lavoro che a noi aveva richiesto anni era stato compresso in poche settimane, senza nessun aiuto dell'astronomia X. Nanni Bignami esprime il suo entusiasmo in un bellissimo editoriale su *Science*, pubblicato nello stesso fascicolo che ospitava l'articolo della scoperta, che iniziava con le parole “Only Galileo was quicker” [47].

La cosa aveva dell'incredibile, ma era solo l'inizio. Nei sei mesi successivi ci sarebbero state altre 16 pulsar *Geminga-like* e i numeri erano destinati a crescere. È uno degli aspetti della rivoluzione che abbiamo visto succedere nello studio delle pulsar gamma che ho avuto l'onore di commentare in un articolo del 2014 intitolato “Gamma-Ray Pulsar Revolution” [48].

Ovviamente anche Geminga ebbe la sua dose di attenzione dal momento che rimane una delle sorgenti gamma più brillanti del cielo ed il telescopio gamma a bordo del satellite Fermi ci ha permesso di vedere la curva di luce in grandissimo dettaglio [49].

Ma Geminga non si accontenta di produrre raggi gamma di alta energia, il telescopio Cherenkov ⁽²⁾ MAGIC, che opera all'osservatorio di Roque de los Muchachos a La Palma, ha misurato le sue pulsazioni fino a 75 GeV [50]. Un risultato che ob-

⁽²⁾ Dal momento che il numero dei fotoni gamma decresce all'aumentare dell'energia per poter studiare il comportamento delle sorgenti celesti ad energie di centinaia di GeV fino ad arrivare ai TeV occorre utilizzare rivelatori molto più grandi di quelli che è possibile mettere in orbita. Per questo sono stati sviluppati degli speciali specchi che misurano il breve lampo di luce emesso dalle particelle create dai raggi gamma di altissima energia che interagiscono con gli atomi dell'atmosfera. Si chiamano telescopi Cherenkov perché il lampo di luce è stato scoperto da Pavel Cherenkov. Ne ho parlato nell'articolo “Il futuro dell'astronomia gamma” [1].

bliga a ripensare i meccanismi di emissione che erano stati utilizzati per spiegare i dati Fermi, ma che conferma la geometria, con la linea di vista quasi perpendicolare all'asse di rotazione, che avevamo ipotizzato per spiegare l'esiguità delle dimensioni della macchia calda che avevamo rivelato nei raggi X.

Nel frattempo, la ricerca delle pulsar “Geminga-like” era diventato uno dei filoni più interessanti per i cacciatori di nuove pulsar gamma all'interno della collaborazione Fermi. Per trovare stelle di neutroni senza emissione radio si procede alla cieca, applicando algoritmi di ricerca di periodicità sviluppati tenendo conto delle caratteristiche del segnale delle pulsar gamma. Le probabilità di successo dipendono dal numero di fotoni rivelati e dalla potenza di calcolo disponibile. Dai cluster di computer, normalmente presenti negli istituti di ricerca, si è passati al supercomputer dell'Albert Einstein Institute di Hannover e poi al sistema di calcolo distribuito *Einstein@home* che, sfruttando un network di decine di migliaia di personal computer, utilizzati quando i loro proprietari non li usano, rivaleggia con i più grandi supercomputer, ma non costa niente. È una delle applicazioni della *Citizen Science* grazie alla quale tutti i “cittadini” volenterosi possono dare il loro contributo alla ricerca nei vari campi dell'astrofisica. Così la famiglia delle pulsar simili a Geminga è salita fino ad arrivare a 80 componenti che faranno parte del terzo catalogo di pulsar gamma che è in corso di preparazione.

11. L'alone di Geminga

Disporre di una così grande abbondanza di fotoni gamma, che sono stati continuamente raccolti dal telescopio Fermi a partire dal lancio nell'agosto 2008, ha permesso di rivelare la presenza di un debole alone diffuso analizzando 10 anni di dati [51]. La ricerca, oggettivamente molto impegnativa, era stata motivata dalla rivelazione di un evidente alone centrato su Geminga prima da parte di Milagro e successivamente da HAWC [52]. Si tratta di esperimenti Cherenkov in acqua ⁽³⁾ che operano al suolo e sono in grado di rivelare fotoni di energie 1000 volte superiori ai più energetici fotoni di Fermi. Né Milagro, né HAWC hanno visto la sorgente puntiforme, solo un alone piuttosto esteso, diffuso su almeno 2°, che doveva essere prodotto da particelle di alta energia, con ogni probabilità elettroni o positroni accelerati dal campo magnetico di

⁽³⁾ Gli strumenti Cherenkov ad acqua vengono costruiti per rivelare fotoni di energie più grandi di quelle accessibili agli specchi Cherenkov e sono costituiti da grandi serbatoi di acqua posti in alta montagna per intercettare le particelle prodotte dai fotoni gamma di altissima energia nel corso della loro inevitabile interazione con gli atomi dell'atmosfera. Fotoni di altissima energia penetrano a fondo nell'atmosfera e le particelle secondarie vengono prodotte troppo in basso e non hanno lo spazio di emettere il lampo di radiazione Cherenkov rivelabile dai telescopi. I rivelatori ad acqua misurano tutto ciò che li colpisce da qualsiasi direzione. Per ogni segnale riconosciuto come prodotto da un fotone gamma si procede alla ricostruzione della direzione d'arrivo e dell'energia. I rivelatori ad acqua hanno il pregio di operare di giorno e di notte accumulando dati su tutto il cielo che li sovrasta ma la precisione della ricostruzione della direzione d'arrivo dei fotoni è limitata, quindi le carte celesti che vengono prodotte non sono estremamente dettagliate [53].



Fig. 19. – 14 gennaio 2010 ricevimento al Quirinale dopo che il Presidente Napolitano mi ha consegnato il Premio Presidente della Repubblica.

Geminga poi sfuggiti e diffusi nel mezzo interstellare. Il problema dell'alone non è di tipo energetico, dal momento che assorbe solo 1% dall'energia rotazionale di Geminga, piuttosto il quesito è capire come queste particelle possano diffondere in modo così efficiente nel mezzo interstellare. Ancora una volta Geminga ci sta indicando qualcosa. Il rivelatore di raggi cosmici AMS-2, che opera attaccato alla ISS [54], e, prima di lui, lo strumento Pamela [55], avevano contato un numero dei positroni decisamente maggiore di quanto sarebbe lecito aspettarsi in base alla fisica delle propagazione dei raggi cosmici le cui interazioni “strada facendo” sono l'unica sorgente “naturale” di positroni. È forse Geminga, magari insieme ad altre stelle di neutroni, la responsabile di questo eccesso?

12. Tutte le prime di Geminga

Anche se è ora capostipite di una grande famiglia, Geminga mantiene intatto il suo fascino, dopo tutto è la stella di neutroni radio quieta più vicina ed, in astronomia, la distanza è un fattore criticamente importante.

Oltre a essere la prima stella di neutroni senza emissione radio, Geminga è stata la prima sorgente gamma ad essere identificata grazie ad una campagna multilunghezza d'onda.

Come stella di neutroni, è stata la prima a mostrare un moto proprio della controparte ottica (le altre pulsar vengono studiate in radio), ed è stata la prima a vantare la misura (difficilissima) dello spostamento parallattico della controparte ottica.

Come sorgente X, la nostra stella è stata la prima a mostrare un doppio strascico che è intimamente legato all'accelerazione di particelle alle quali è riconducibile anche l'esistenza della macchia molto calda, grande come un campo da calcio, sulla sua superficie. È quasi inutile sottolineare che, anche in questo caso, si tratta di una prima.

La capacità di accelerare particelle è testimoniata anche dagli aloni visti nei raggi gamma di diverse energie. Inoltre, la presenza di un acceleratore naturale, così vicino a noi, potrebbe influire sull'abbondanza anomala dei positroni che viene misurata dagli strumenti in orbita.

Avere dedicato una parte così importante della mia carriera a Geminga, mi ha fruttato due importanti premi dei quali sono molto orgogliosa. Nel 2009 ho ricevuto il Premio Nazionale Presidente della Repubblica, mentre nel 2021 mi è stato conferito il Premio Enrico Fermi della Società Italiana di Fisica che ho condiviso con Elena Aprile. È stata la prima volta che il Premio più prestigioso della SIF si è tinto di rosa, riconoscendo i successi di due scienziate.

Voglio finire questa lunga storia astronomica con la foto del ricevimento al Quirinale nel gennaio 2010.

Mi piace ricordare così mio marito Nanni Bignami mentre insieme brindiamo con il Presidente Giorgio Napolitano (fig. 19).

Bibliografia

- [1] CARAVEO P. A., “Il futuro dell’astronomia gamma”, *G. Fis.*, **60** (2019) 123.
- [2] ROMAN N. G., “Nancy Grace Roman and the Dawn of Space Astronomy”, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **57** (2019) 1.
- [3] KRAUSHAAR W. L. *et al.*, “High-energy Cosmic Gamma-Ray Observations from the OSO-3 Satellite” *Astrophys. J.*, **177** (1972) 341.
- [4] FICHTEL C. E. *et al.*, “High-energy Gamma-Ray results from the second small astronomy satellite”, *Astrophys. J.*, **198** (1975) 163.
- [5] THOMPSON D. J. *et al.*, “Final SAS-2 Gamma-ray Results on Sources in the Galactic Anticenter Region”, *Astrophys. J.*, **213** (1977) 252.
- [6] STAELIN D. H. and REIFENSTEIN E. C., “Pulsating radio sources near the Crab Nebula”, *Science*, **162** (1968) 1481.
- [7] KNIFFEN D. A., HARTMAN R. C., THOMPSON D. J., BIGNAMI G. F., FICHTEL C. E., ÖGELMAN H. and TURNER T., “The gamma radiation above 35 MeV from the Crab nebula”, *Nature*, **251** (1974) 397.
- [8] THOMPSON D. J., FICHTEL C. E., KNIFFEN D. A. and ÖGELMAN H. B., *Astrophys. J. Lett.*, **200** (1975) L79.
- [9] BIGNAMI G. F. *et al.*, “The COS-B experiment for Gamma-Ray Astronomy”, *Space Sci. Instrum.*, **1** (1975) 245.
- [10] BENNETT K. *et al.*, “New high-energy gamma-ray sources observed by COS-B”, *Nature*, **262** (1977) 494.
- [11] SWANENBURG B. *et al.*, “Second COS-B Catalog of high-energy gamma-ray sources”, *Astrophys. J.*, **243** (1981) L69.
- [12] BIGNAMI G. F., MACCACARO T. and PAIZIS C., “Search for a correlation between the new Milky Way satellite and an unidentified gamma ray source”, *Astron. Astrophys.*, **51** (1976) 319.
- [13] BIGNAMI G. F., GAVAZZI G. and HARTEN R. H., “Synthesis observations of the region near the proposed new Milky Way companion at 0.610 GHz”, *Astron. Astrophys.*, **54** (1977) 951.
- [14] JULIEN P. F. and HELMKEN H. F., “Faint X-ray sources detected near COS-B gamma-ray positions”, *Nature*, **272** (1978) 699.
- [15] BIGNAMI G. F. and CARAVEO P. A. LAMB, “An identification for Geminga (2CG195+4): 1E0630+178, a unique object in the error box of the high-energy gamma-ray source”, *Astrophys. J.*, **272** (1983) L9.
- [16] BIGNAMI G. F. and HERMEN W., “Galactic Gamma-Ray Sources”, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **21** (1983) 67.

- [17] CARAVEO P. A., BIGNAMI G. F., VIGROUX L. and PAUL J. A., "An identification for Geminga (2CG195+4): the optical counterpart of 1E0630+178, a unique object in the gamma-ray error box", *Astrophys. J.*, **276** (1984) L45.
- [18] BLOEMEN J. B. G. M., "Proper motion of a unique object in the error box of the high-energy gamma-ray source Geminga", *Astron. Astrophys.*, **131** (1984) L7.
- [19] HALPEN J. P., GRIDLAY J. E. and TYTLER D., "Observation of the Geminga Optical candidate", *Astrophys. J.*, **296** (1985) 190.
- [20] DJORGOVSKY S. and KULKARNI S. R., "Optical study of the Geminga candidate field", *Astron. J.*, **91** (1986) 90.
- [21] BIGNAMI G. F., CARAVEO P. A., SALOTTI L., PAUL J. A. and VIGROUX L., "A deep optical study of the field of 1E0630+178", *Astrophys. J.*, **319** (1987) 358.
- [22] HALPERN J. P. and TYTLER D., "the Geminga X-ray Counterpart and a blue optical identification", *Astrophys. J.*, **330** (1988) 201.
- [23] BIGNAMI G. F., CARAVEO P. A. and PAUL J. A., "On The Colours Of G" the proposed optical counterpart of GEMINGA", *Astron. Astrophys. Lett.*, **202** (1988) L1.
- [24] KANBACH G. *et al.*, "The project EGRET (energetic gamma-ray experiment telescope) on NASA's Gamma-Ray Observatory GRO", *Space Sci. Rev.*, **49** (1988) 69.
- [25] HALPERN J. P. and HOLT S. S., "Discovery of Soft X-ray Pulsations from the gamma-ray source Geminga" *Nature*, **357** (1992) 222.
- [26] BERTCH D. L., BRAZIER K. T. S., FICHEL C. E., *et al.*, "Pulsed high-energy gamma radiation from Geminga (1E0630+178)", *Nature*, **357** (1992) 306.
- [27] BIGNAMI G. F. and CARAVEO P. A., "Geminga: New Period, Old Gamma-rays", *Nature*, **357** (1992) 287.
- [28] MATTOX J. R., BERTSCH D. L., FICHEL C. E., HARTMAN R. C., KNIFFEN D. A. and THOMPSON D. J., "SAS-2 observation of pulsed high-energy gamma radiation from Geminga", *Astrophys. J.*, **401** (1992) L23.
- [29] BIGNAMI G. F., CARAVEO P. A. and MEREGHETTI S., "The proper motion of Geminga's optical counterpart", *Nature*, **361** (1993) 704.
- [30] MIGNAMI R., CARAVEO P. A. and BIGNAMI G. F., "Geminga, 10 years of optical observations", *Messenger*, **76** (1994) 32.
- [31] CARAVEO P. A., BIGNAMI G. F., MIGNAMI R. and TAFF L. G., "Parallax Observations with the Hubble Space telescope yield the distance to Geminga", *Astrophys. J. Lett.*, **461** (1996) L91.
- [32] BIGNAMI G. F. and CARAVEO P. A., "Geminga its phenomenology, its fraternity, and its physics", *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **36** (1996) 331.
- [33] CARAVEO P. A., LATTANZI M. G., MASSONE *et al.*, "Hipparcos positioning of Geminga: how and why", *Astron. Astrophys.*, **329** (1998) L1.
- [34] MATTOX J. R., HALPERN J. P. and CARAVEO P. A., "Timing the Geminga pulsar with gamma-ray observations", *Astrophys. J.*, **493** (1998) 891.
- [35] MARTIN C., HALPERN J. P. and SCHIMINOVICH D., "The optical spectrum of the Geminga Pulsar", *Astrophys. J.*, **494** (1998) L211.
- [36] SHEARER A., GOLDEN A. and HARFST, "Possible pulsed optical emission from Geminga", *Astron. Astrophys.*, **335** (1998) L21.
- [37] KARGALTSEV O. Y., PAVLOV G. G. and ZAVLIN V. E., "Ultraviolet, X-ray and Optical radiation from the Geminga Pulsar", *Astrophys. J.*, **625** (2005) 307.
- [38] CARAVEO P. A., BIGNAMI G. F., DE LUCA A., *et al.*, "Geminga's Tails: a Pulsar Bow-Shock Probing the Interstellar Medium", *Science*, **301** (2003) 1345.
- [39] CARAVEO P. A., DE LUCA A., MEREGHETTI S., PELLIZZONI A. and BIGNAMI G. F., "Phase resolved spectroscopy of Geminga shows rotating hot spot(s)", *Science*, **305** (2004) 376.
- [40] DE LUCA A., CARAVEO P. A., MATTANA F., MEREGHETTI S. and BIGNAMI G. F., "On the complex X-ray structure tracing the motion of Geminga", *Astron. Astrophys.*, **445** (2005) L9.
- [41] PAVLOV G. G., BHATTACHARYYA S. and ZAVLIN V. E., "New X-ray observations of the Geminga pulsar wind nebula", *Astrophys. J.*, **715** (2010) 66.
- [42] TAVANI M. *et al.*, "The AGILE mission", *Astron. Astrophys.*, **502** (2009) 995.
- [43] FERMI COLLABORATION (ATWOOD W. B. *et al.*), "The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission", *Astrophys. J.*, **697** (2009) 1071.
- [44] ATWOOD W. B., ZIEGLER M., JOHNSON R. P. and BAUGHMAN B. M., "A time-differencing

- technique for detecting radio-quiet gamma-ray pulsars”, *Astrophys. J. Lett.*, **652** (2006) L49.
- [45] HALPERN J. P. *et al.*, “X-Ray, Radio, and Optical Observations of the Putative Pulsar in the Supernova Remnant CTA 1”, *Astrophys. J.*, **612** (2004) 398.
 - [46] FERMI LAT COLLABORATION (ABDO A. A., ACKERMANN M., ATWOOD W. B., *et al.*), “The Fermi gamma-ray Space Telescope discovers the pulsar in the young galactic supernova Remnant CTA-1”, *Science*, **322** (2008) 1218.
 - [47] BIGNAMI G. F., “Gamma-rays and Neutron Stars”, *Science*, **322** (2008) 1193.
 - [48] CARAVEO P. A., “Gamma-ray pulsar revolution”, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **52** (2014) 211.
 - [49] FERMI COLLABORATION (ABDO A. A. *et al.*), “Fermi-LAT observations of Geminga pulsar”, *Astrophys. J.*, **720** (2010) 272.
 - [50] MAGIC COLLABORATION (ACCIARI V. A. *et al.*), “Detection of the Geminga pulsar with MAGIC hints at a power-law tail emission beyond 15 GeV”, *Astron. Astrophys.*, **643** (2020) L14.
 - [51] DI MAURO M., MANCONI S. and DONATO F., “Detection of the gamma-ray halo around Geminga with the Fermi-LAT and implications for the positron Flux”, *Ph Rv D*, **100** (2019) 123015.
 - [52] HAWC COLLABORATION (ABEYSEKARA A. U. *et al.*), “Extended gamma-ray sources around pulsars constrain the origin of the positron flux at Earth”, *Science*, **358** (2017) 911.
 - [53] CARAVEO P. A., “The golden age of high-energy gamma-ray astronomy: the Cherenkov telescope Array in the multimessenger era”, *Riv. Nuovo Cimento*, **43** (2020) 281.
 - [54] AMS COLLABORATION (AGUILAR M. *et al.*), “Electron and Positron fluxes in primary cosmic rays measured with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station”, *Phys. Rev. Lett.*, **113** (2014) 121102.
 - [55] ADRIANI O. *et al.*, “An Anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 0,15-100 GeV”, *Nature*, **458** (2009) 607.