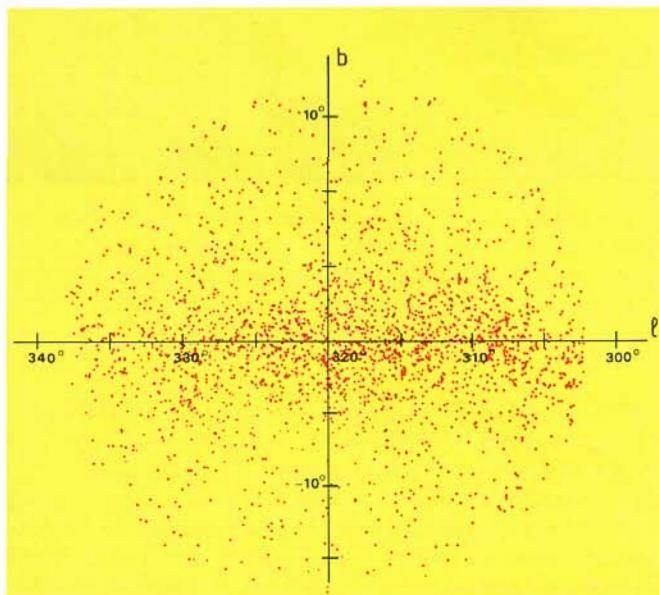


# Tutto il cielo in raggi gamma

**In sette anni di osservazioni COS-B ha scandagliato ogni angolo della Galassia. Ha rivelato pulsar, nubi molecolari, i bracci a spirale e l'emissione del disco. Ma anche il quasar 3C 273, la prima sorgente gamma extragalattica.**

14 **N**el precedente articolo sono state esposte le motivazioni teoriche che sono alla base del nostro interessamento per i fotoni gamma di alta energia e sono stati trattati i molteplici problemi sperimentali che si incontrano nella realizzazione delle missioni gamma. Intendiamo ora completare il quadro occupandoci dei risultati di questi esperimenti e delle loro implicazioni astrofisiche. Nostro punto di riferimento sarà la missione per astronomia gamma di alta energia portata a termine dal satellite dell'ESA (*European Space Agency*) COS-B alla quale l'Istituto di Fisica Cosmica del CNR di Milano ha collaborato sia durante la fase di costruzione dell'esperimento sia durante la fase di analisi dati (tuttora attivamente in corso).



*Immagine in raggi gamma di una regione del piano galattico centrata intorno a  $l = 320^\circ$  risultato di una osservazione di circa un mese del satellite COS-B. La concentrazione dei fotoni intorno al piano galattico risulta evidente. La forma circolare dell'immagine è fittizia e dipende dai criteri scelti per selezionare i fotoni usati per costruirla.*

Prima di passare alla presentazione dei risultati è però necessario familiarizzarsi con il tipo di informazioni che riceviamo da uno strumento per la rivelazione di raggi gamma, strumento che noi chiamiamo telescopio anche se poco o nulla ha a che fare con le immagini evocate da questo nome. Non dimentichiamo infatti che, alle frequenze gamma ( $\nu \geq 10^{22}$  Hz) la radiazione elettromagnetica mostra di preferenza la sua natura quantistica. Non trattiamo, quindi, onde che possono essere riflesse e focalizzate, ma singoli quanti di radiazione che possono essere rivelati solo con metodi propri della fisica delle alte energie.

Abbiamo chiamato il nostro strumento telescopio... cerchiamo quindi di darne i parametri caratteristici: COS-B ha una superficie utile di  $100 \text{ cm}^2$ , campo di vista di circa 1400 gradi quadrati e risoluzione angolare di 2-3 gradi; riceve circa un fotone all'ora dalle sorgenti più brillanti mentre per quelle più deboli il flusso scende ad un fotone al giorno. Il fatto che un fotone gamma trasporti da solo più energia di 100 milioni di fotoni ottici non è una consolazione sufficiente per gli astronomi gamma, i quali impiegano dei mesi a collezionare un numero di fotoni che i loro colleghi ottici raccolgono, con informazioni spaziali infinitamente migliori, in frazioni di secondo o, per le sorgenti più deboli, in pochi minuti.

Ci stiamo avvicinando, così, ad un nuovo tipo di astronomia: l'astronomia a *conteggio di fotone* le cui caratteristiche sono imposte, oltre che dal processo fisico che sta alla base della rivelazione, dalla complessità degli strumenti (che devono operare al di fuori dell'atmosfera per essere sensibili ad una radiazione energetica, ma fievolissima) e dalla conseguente necessità di tempi di integrazione di settimane per raccogliere un numero di fotoni sufficienti per l'analisi scientifica.

Superati tutti, o quasi, i preconcetti derivanti dalla lunga abitudine all'astronomia ottica, possiamo ora chiederci cosa ci si possa aspettare da una camera a scintille in orbita intorno alla Terra dopo, diciamo, un mese di osservazione ininterrotta di una regione del cielo. La figura a fianco mostra una delle 64 risposte che COS-B ha fornito a questa domanda nei suoi quasi sette anni di

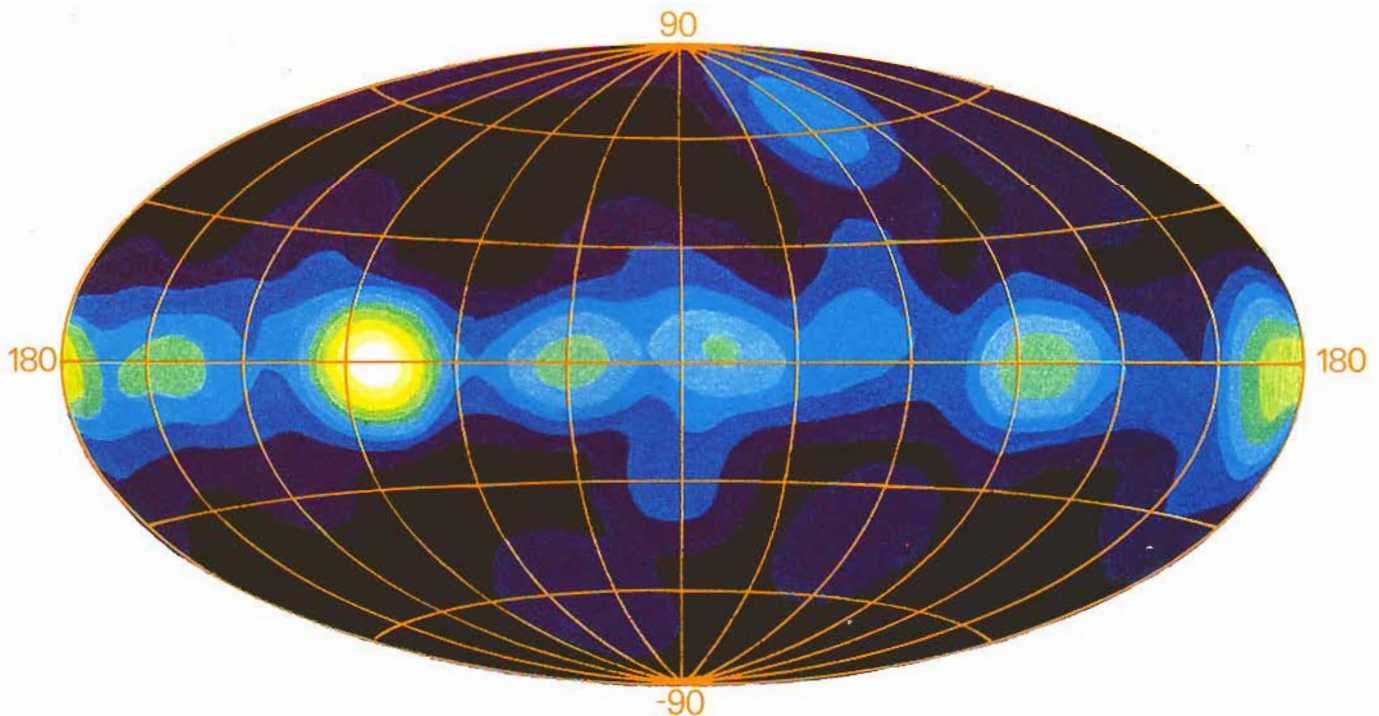
attività caratterizzati da 64 puntamenti in diverse regioni del cielo. Cosa rappresenta quel nugolo di puntini? La risposta è più difficile di quanto possa sembrare, vista la non usualità di queste immagini ove ogni punto rappresenta la direzione di arrivo di un fotone gamma quale è stato rivelato dalla camera a scintille, inviato alla stazione a terra e processato da un calcolatore secondo la procedura esposta nell'articolo precedente. Chiave fondamentale per la risoluzione del quesito è la dimensione angolare della striscia centrale che domina la figura. Solo un oggetto può occupare una regione di cielo di circa  $40^\circ$ : il disco della nostra Galassia. Il fatto che la striscia giaccia perfettamente diritta al centro della figura dipende dal sistema di coordinate usato che, non a caso, è quello galattico ed è definito in modo da "rettificare" il piano della Galassia (vedi riquadro). Che il piano della Galassia abbia rappresentato una notevole attrazione per COS-B risulta evidente dalla figura qui sotto dove, in coordinate galattiche, è rappresentata in forma schematica la copertura che COS-B ha fornito delle varie regioni del cielo. Perché concentrarsi tanto sul piano galattico quando con un campo di vista di circa 1400 gradi quadrati e 64 direzioni a disposizione si sarebbe potuto ricoprire tutta la volta celeste? (L'intera volta celeste è  $4\pi$  steradiani pari a 41253 gradi quadrati e avrebbe potuto essere coperta con 30 osservazioni). Il piano della Galassia rappresenta qualcosa di speciale per gli astronomi gamma? È un luogo privilegiato? Contiene oggetti eccezionali? La risposta è tutte e nessuna delle giustificazioni precedenti. Nello scegliere gli oggetti da osservare e nel dimensionare le nostre aspirazioni, bisogna tenere conto della potenza

dello strumento a nostra disposizione. Le dimensioni dei telescopi gamma attuali sono troppo modeste per permetterci di nutrire ambizioni extragalattiche; dobbiamo fermarci molto prima e limitare, o meglio, concentrare i nostri interessi alla nostra Galassia che, pur non presentando a prima vista caratteristiche peculiari, è l'oggetto a noi più vicino, il meglio studiabile e perciò il più interessante.

L'astronomia gamma di alta energia è quindi attualmente una *scienza galattica*.

La familiarizzazione con i dati gamma non può considerarsi completa senza un esempio di cosa sia una sorgente puntiforme per un telescopio gamma e tutto il sistema di analisi dati ad esso collegato.

Ben due spettacolari sorgenti sono presenti nella figura a pag.17 in alto, costruita in modo analogo alla prima per una diversa regione del piano galattico: l'*anticestro*. Le due condensazioni di direzioni di arrivo di fotoni gamma, rivelate dallo strumento nel corso di tre osservazioni di un mese ciascuna, sono due delle più intense sorgenti di radiazione gamma rivelate da COS-B. È interessante notare che la condensazione centrata intorno a  $l = 185^\circ$   $b = -5^\circ$ , benché sia sicuramente identificata con un oggetto puntiforme, è stata "spalmata" dalla scarsa risoluzione dello strumento su diverse decine di gradi quadrati. La sorgente centrata a  $l = 195^\circ$   $b = +4^\circ$  è invece non identificata e, benché sembri più concentrata della precedente, la qualità dei dati non è tale da permetterci di chiamarla sicuramente puntiforme. A chi obiettasse che la rappresentazione dei dati usata finora è troppo rozza, la figura a pag.17 in basso mostra in forma tridimensionale gli stessi dati dopo che



Esposizione relativa delle regioni della volta celeste osservate dal satellite COS-B. Le linee uniscono i punti che sono stati osservati per tempi utili uguali. La prima isoesposizione corrisponde ad un tempo utile di 8 giorni (pari a circa un mese di osservazioni) l'ultima corrisponde a 72 giorni. Il salto tra una isoesposizione e l'altra è di 8 giorni di tempo utile.

sono stati sottoposti ad accurate procedure atte a correggere, per quanto possibile, gli allargamenti dovuti allo strumento e alla fisica della rivelazione. Le due sorgenti hanno ora la caratteristica forma a campana che rappresenta la degradazione dell'informazione introdotta dal sistema di rivelazione colpito da fotoni collimati e paralleli provenienti *da un punto* dello spazio. In altre parole la campana rappresenta la risposta dello strumento ad una sorgente puntiforme nel cielo. Ecco allora il grande punto dolente dell'astro-

nomia gamma odierna: pure usando *al meglio* gli strumenti a disposizione, non si può né localizzare con buona precisione le condensazioni di raggi gamma chiaramente presenti nei dati, né decidere se tali condensazioni siano state prodotte da un oggetto puntiforme piuttosto che da uno esteso; la degradazione spaziale introdotta dallo strumento, infatti è virtualmente la stessa per un oggetto puntiforme e per uno con estensione di 1-2 gradi nel cielo. Ora, avendo toccato con mano il tipo e la qualità delle

## Coordinate galattiche e struttura a spirale

16

La Via Lattea è un disco appiattito di stelle e materia gassosa, principalmente idrogeno neutro e molecolare, ordinato secondo un "grande disegno" a spirale a più bracci.

Per studiare la radiazione proveniente dalla Galassia e/o la distribuzione di oggetti galattici risulta utile definire un sistema di coordinate ancorato al piano della Galassia. In questo sistema di coordinate, schematizzato in figura, la posizione di un oggetto nel cielo è definita da due angoli:

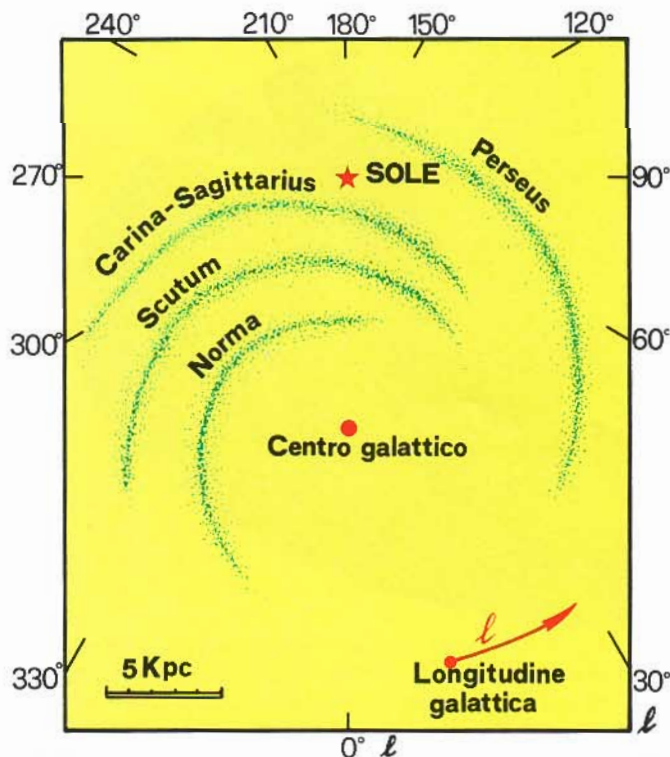
$b$  : l'angolo tra l'oggetto e il piano di simmetria del sistema, chiamato *latitudine galattica* (varia ovviamente tra  $-90^\circ$  e  $+90^\circ$ );

$l$  : l'angolo tra l'intersezione del piano (normale al disco galattico) che contiene l'oggetto e lo stesso disco della Galassia e la direzione Sole-centro della Galassia,

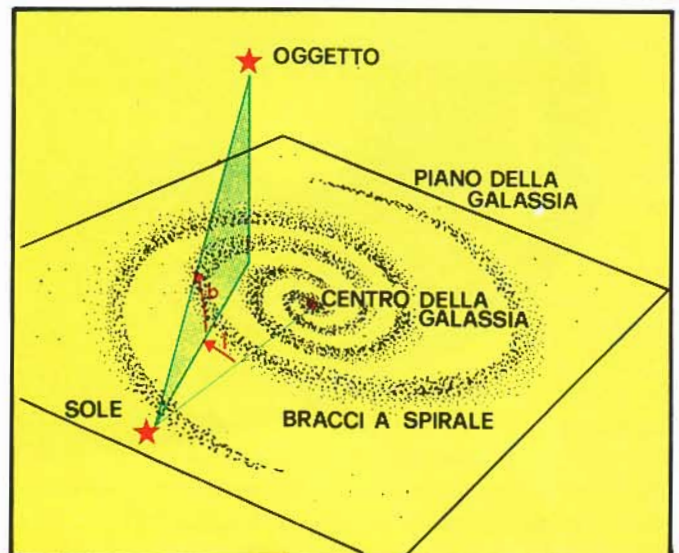
chiamato *longitudine galattica* (varia tra  $0^\circ$  e  $360^\circ$ ); (Particolare importante: il piano della Galassia, che in coordinate riferite all'equatore celeste è sinuoso, risulta rettificato e di immediata individuazione).

Il "grande disegno" della nostra Galassia è per noi molto difficile da conoscere. Infatti, vista quale è la nostra posizione all'interno della Galassia, noi non possiamo osservare direttamente la sua struttura, ma dobbiamo faticosamente ricostruirla partendo da osservazioni di non facile interpretazione. Questo crea una certa ambiguità e... tutta una famiglia di schemi possibili. Un possibile schema di struttura a spirale è riportato in figura.

(sotto) Schema esplicativo del sistema di coordinate cosiddetto galattico.



(a fianco) Visione schematica di un possibile "grande disegno" di struttura a spirale nel piano della nostra Galassia. I bracci, che delineano le maggiori concentrazioni di gas e stelle giovani, sono stati ricostruiti a partire dalle osservazioni delle regioni HII giganti.

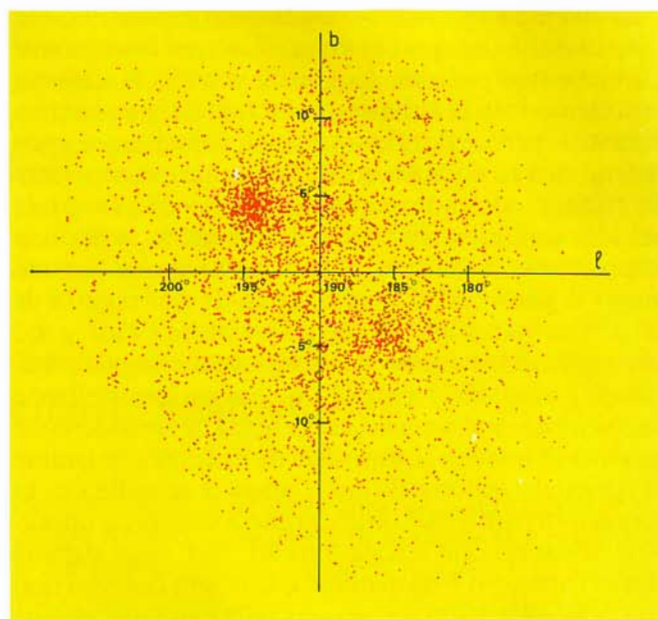


misure di un satellite come COS-B, siamo pronti ad affrontare una rassegna critica dei risultati, iniziando con l'esaminare l'emissione gamma del disco della nostra Galassia. Le misure sono state fatte separatamente in una quarantina di periodi di osservazione della durata di circa un mese, ognuno dei quali ha fornito un'immagine di una regione del piano galattico del tipo mostrato nelle figure precedenti. Per dare una visione di insieme le immagini sono state accuratamente sommate e sono state rappresentate nella loro totalità usando la tecnica dei contorni o delle linee di uguale intensità di radiazione misurata. La figura a pag.18 rappresenta il risultato finale di questo lungo e delicato esercizio. Si nota subito che l'emissione non è uniforme. Le isofote delineano chiaramente la presenza di due tipi di strutture:

- quelle circolari, circoscritte a regioni relativamente piccole, cioè a sorgenti non risolte; (nel seguito, le indicheremo come "sorgenti")
- quella allungata, che si estende per decine di gradi di longitudine galattica, l'emissione più propriamente diffusa.

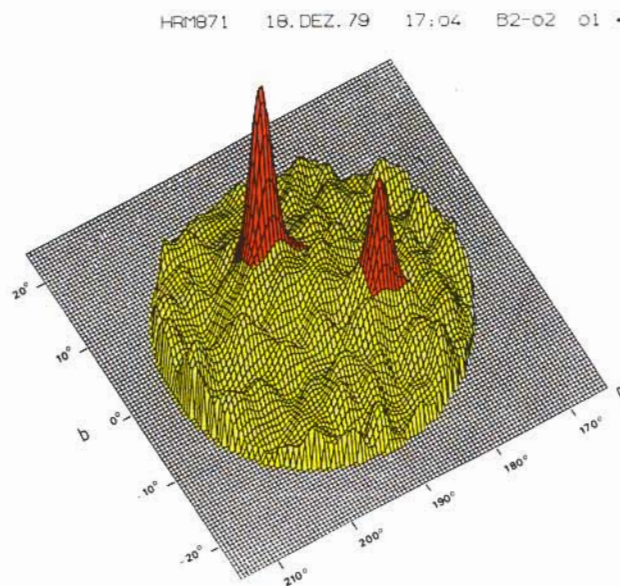
Non sempre le due strutture si presentano in modo da essere facilmente "separabili" (come capita, per esempio, nella regione dell'anticentro galattico e per  $l = 264^\circ$ ); spesso le "sorgenti" si sovrappongono alla già complessa struttura diffusa rendendo problematico il loro stesso riconoscimento. La scelta di rappresentare i dati come in figura di pag.18 è ottimale per lo studio delle strutture a larga scala, ma non lo è per quelle localizzate, che riescono ad emergere solo se sono particolarmente intense. Tralasciamo per il momento le brillanti macchie circolari e concentriamoci sulle strutture diffuse, la più cospicua delle quali è senz'altro il largo massimo di emissione tra  $l = 300^\circ$  ed  $l = 60^\circ$ . Le note raccolte nel primo riquadro ci aiutano ad associare a questi numeri delle più "concrete" direzioni nel cielo. In particolare, per i valori di longitudine indicati, la nostra linea di vista intercetta le parti centrali della Galassia, il che significa, visto la posizione eccentrica del Sole rispetto al centro della stessa, percorrere il più lungo cammino possibile all'interno della Galassia. Poiché la nostra galassia è composta per il 10% della sua massa da gas (principalmente idrogeno nelle sue diverse forme: neutro, molecolare e ionizzato) bombardato da un flusso continuo di particelle relativistiche (protoni, elettroni e nucleoni), che chiamiamo genericamente *raggi cosmici*, disponiamo di tutti gli ingredienti necessari perché abbiano luogo due interazioni: quella protone-protone, protoni dei raggi cosmici sui protoni bersaglio dell'idrogeno interstellare; quella elettrone-nucleone, elettroni dei raggi cosmici frenati dai campi elettrici dei protoni e dei nucleoni del mezzo interstellare. Come discusso nell'articolo precedente, queste interazioni costituiscono la via maestra per la produzione di raggi gamma.

Se raggi cosmici e gas sono uniformemente distribuiti nel piano della Galassia, è inevitabile che siano le regioni che comprendono le parti centrali della Galassia ad essere le più brillanti.



17

(sopra) Immagine in raggi gamma della regione dell'anticentro galattico. Sono presenti due intense sorgenti gamma. L'eccesso centrato a  $l = 184^\circ$   $b = -5^\circ$  emette raggi gamma pulsati con periodo di circa 33 ms, lo stesso della Crab pulsar. L'altro eccesso, centrato a  $l = 195^\circ$   $b = 4,5^\circ$ , che chiameremo Geminga (pronunciato Gheminga), poiché è una sorgente gamma nella costellazione dei Gemelli, è stato recentemente identificato con una sorgente X dalle caratteristiche più uniche che rare. Ne parleremo in dettaglio in un prossimo lavoro. (sotto) Rappresentazione tridimensionale della stessa zona di cielo. Le due sorgenti mostrano qui la caratteristica forma allargata a campana che rappresenta la risoluzione angolare dello strumento di COS-B. Se pensiamo che almeno una delle due sorgenti è sicuramente identificata con un oggetto puntiforme, la campana dà un'idea della degradazione dell'informazione spaziale introdotta dal telescopio, la cui risoluzione angolare dipende dall'energia dei fotoni incidenti. I gamma provenienti da Geminga sono più energetici di quelli emessi dalla Crab pulsar: la risoluzione angolare è migliore e la campana risulta sensibilmente più stretta.



18

Vista la semplicità di questo argomento geometrico ci si potrebbe chiedere perché venga usato per l'astronomia gamma e non per altre lunghezze d'onda. Poiché noi misuriamo solo la radiazione che non è stata assorbita durante il percorso tra la sorgente e l'osservatore, questo argomento geometrico si può applicare solo quando si lavori con radiazioni poco o per nulla assorbite nel loro cammino. Le polveri assorbono la radiazione ottica e non ci permettono di andare molto lontano lungo il piano della nostra Galassia; nei raggi X la situazione è analoga, perché l'assorbitore è l'idrogeno interstellare. Un fotone gamma, invece, viaggia praticamente insensibile alle polveri ed al gas interstellare e può venire assorbito solo in presenza di considerevoli quantità di materia (l'atmosfera della Terra o le lamine di materializzazione di una camera a scintille) o, in condizioni particolari, da un fotone X di energia opportuna (l'interazione fotone-fotone). Nei raggi gamma l'intero universo è trasparente e la nostra Galassia non fa eccezione. Un fotone emesso nella parte più lontana della Galassia, viaggiando per 80.000 anni luce, ha una probabilità ridicolmente piccola di essere assorbito. La Galassia è dunque accessibile nella sua totalità all'astronomo gamma, che è limitato solo dall'esiguo numero dei fotoni a disposizione. La figura qui sotto contiene circa 100.000 fotoni raccolti in cinque anni di osservazioni continue. Possiamo ora dire con piena cognizione di causa che è logico aspettarsi che la radiazione gamma del piano galattico abbia un largo massimo per le longitudini centrali.

In effetti, un esame più accurato dei dati mostra che le semplici considerazioni geometriche non sono sufficienti per spiegare i flussi osservati... ma, mentre su queste c'è un accordo sostanziale tra gli scienziati, quando si tenta una spiegazione quantitativa le possibilità che si offrono sono diverse, ed implicano ipotesi

sulla distribuzione dei raggi cosmici e della materia nella Galassia più sofisticate di quelle da noi assunte come prime ipotesi semplificatrici.

Una delle possibili soluzioni è stata suggerita dall'ottima correlazione esistente tra i dati gamma ed il "grande disegno" a spirale della nostra Galassia. Infatti, a parte il largo massimo centrale che abbiamo già commentato, nella figura si nota che le direzioni tangenti ai bracci di spirale rivelano dei massimi di emissione gamma, mentre in direzione dei "buchi galattici" troviamo dei minimi di emissione.

Più in particolare:

a  $l = 60^\circ$ , nella costellazione della Vulpecula, notiamo la presenza del ben noto "buco" galattico corrispondente alla linea di vista che attraversa una regione galattica particolarmente "vuota";

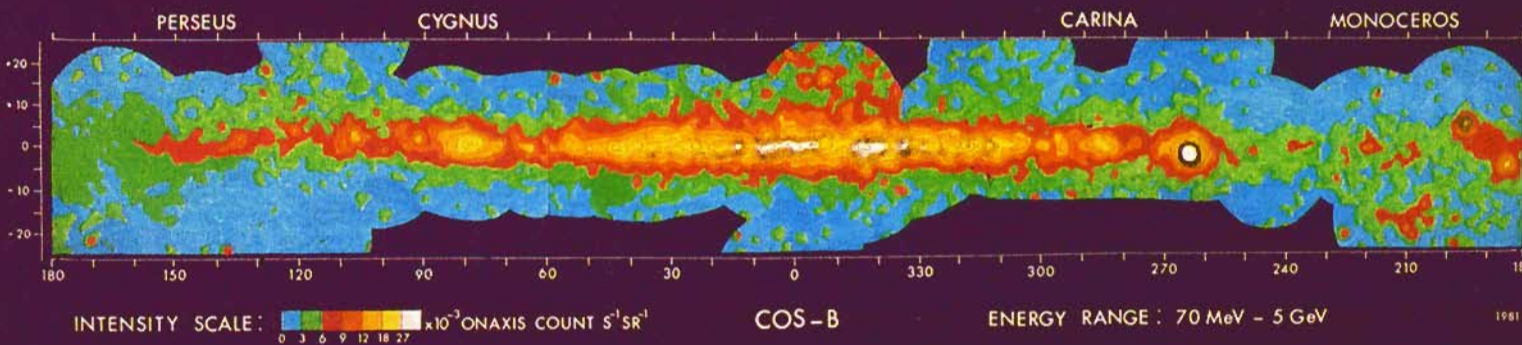
a  $l = 210^\circ - 250^\circ$ , nelle costellazioni di Vela-Puppis, un minimo di emissione gamma corrisponde ad una zona poco densa della Galassia;

a  $l = 285^\circ$ ,  $l = 330^\circ - 335^\circ$ ,  $l = 340^\circ$  tre massimi gamma in corrispondenza di direzioni tangenti ai bracci spirale di Carina, Scutum-Crux e Norma.

Dal momento che le concentrazioni di materia presenti nei bracci a spirale non bastano a spiegare questi massimi, si è ipotizzato un aumento di raggi cosmici proporzionale alla densità di materia. In questo modo si sono potuti riprodurre in modo molto soddisfacente i dati gamma, fornendo, come prodotto secondario, una convincente prova della natura galattica dei raggi cosmici responsabili della produzione dei fotoni gamma di alta energia.

Ma continuiamo nell'esame della figura. Dopo aver studiato i massimi di emissione nel piano galattico, concentriamo la nostra attenzione sulla prima isofota in colore che demarca la zona significativa di emissione gamma. Colpisce la chiara asimmetria della isofota

### GALACTIC GAMMA-RAY EMISSION



Rappresentazione bidimensionale della radiazione proveniente dal disco della nostra Galassia. Le linee di uguale intensità (isofote) sono evidenziate secondo il codice di colore indicato a piè figura. La radiazione diffusa proveniente dal disco della Galassia (grossolanamente per latitudini comprese tra  $-5^\circ$  e  $+5^\circ$ ) è la struttura dominante. Da essa emergono chiaramente alcune sorgenti molto brillanti. A  $l = 180^\circ$  ritroviamo le sorgenti delle figure di pag.17. La regione intorno a  $l = 265^\circ$  è dominata dalla pulsar nella costellazione delle Vele. Nelle regioni di Orione ( $l = 210^\circ$   $b = 20^\circ$ ) e di Ofiuco ( $l = 353^\circ$   $b = 16^\circ$ ) stanno i due complessi molecolari rivelati, per la prima volta, da COS-B.

rispetto al piano  $b = 0^\circ$ ; decisamente preponderante a latitudini positive tra  $l = 300^\circ$  e  $l = 40^\circ$  e tra  $l = 90^\circ$  e  $l = 140^\circ$ ; decisamente preponderante a latitudini negative tra  $l = 180^\circ$  e  $l = 220^\circ$  e tra  $l = 270^\circ$  e  $l = 330^\circ$  (in quest'ultima zona la preponderanza negativa non è però certissima, a causa della non sufficiente esposizione disponibile). Questo è esattamente quanto ci aspetteremmo di vedere se le strutture locali (vedi riquadro) fossero responsabili dell'emissione gamma. Dove l'una o l'altra delle strutture locali emerge dal ben

più brillante piano galattico troviamo infatti le più significative asimmetrie. È la prova che il gas presente nelle *Gould's e Dolidze Belts*, colpito dai raggi cosmici, emette raggi gamma o, in altre parole, che i gamma sono traccianti della struttura locale. Particolarmente interessante è il caso della *Gould's Belt*, che è delimitata alle due estremità dai complessi molecolari di Ofiuco e di Orione, entrambi riscontrabili nella figura, come struttura circolare il primo ( $l = 353^\circ$   $b = 16^\circ$ ) come struttura estesa il secondo ( $l \cong 210^\circ$   $b \cong 20^\circ$ ). Vale la

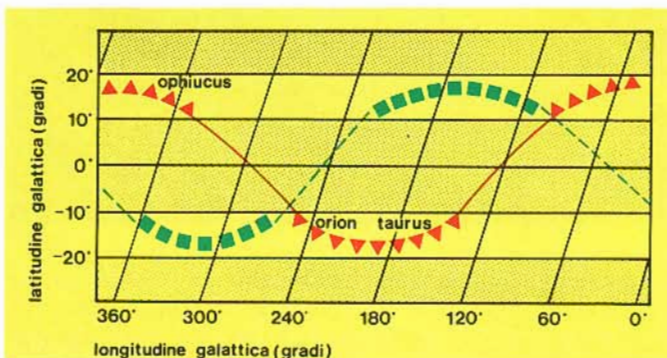
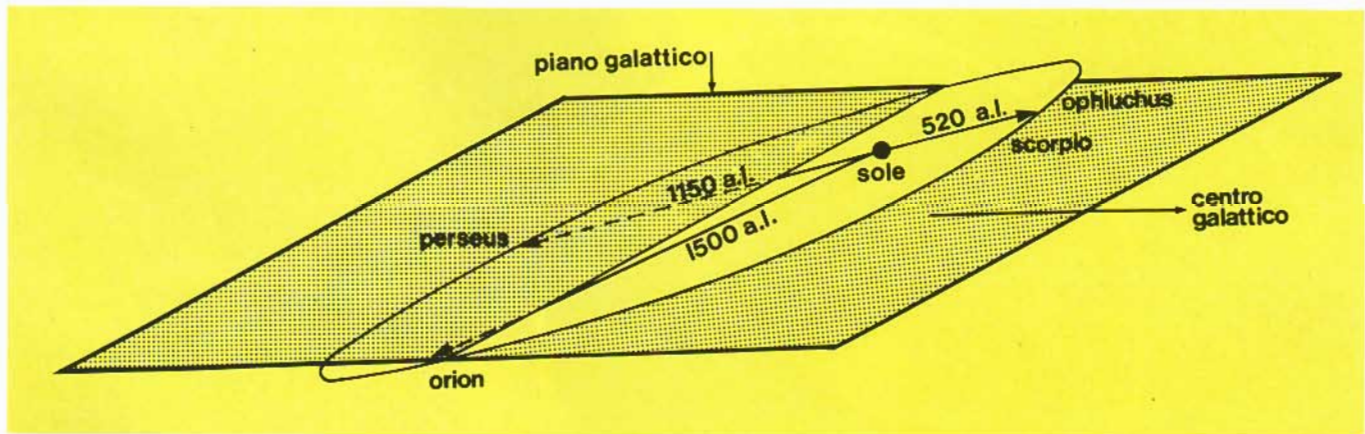
## Sistemi locali in coordinate galattiche

Gli attenti osservatori del cielo sanno che le stelle brillanti non sono uniformemente distribuite sulla volta celeste. Nel cielo invernale le costellazioni più cospicue (Orione e Toro) si trovano a sud del piano galattico mentre nel cielo estivo si riscontra l'effetto contrario con le costellazioni più ricche di stelle brillanti (Cigno e Scorpione) a nord di esso. L'effetto è ancora più evidente se visto dai cieli australi dove durante l'inverno (la nostra estate) dominano le costellazioni del Centauro e del Lupo entrambe a nord del piano galattico.

Fu proprio studiando la distribuzione di stelle brillanti nei cieli australi che Sir John Herschel, prima, e B. A. Gould, dopo, scoprirono che le stelle più brillanti giacciono in un piano inclinato di circa  $16^\circ$  sul piano

della Galassia, orientato approssimativamente nelle direzioni  $l \cong 0^\circ$  (massime latitudini positive raggiunte) e  $l \cong 180^\circ$  (massime latitudini negative). La struttura, nota come *Gould's Belt*, è schematizzata nella figura che mostra anche la posizione eccentrica del Sole rispetto ad essa. Le dimensioni della *Gould's Belt* sono tali da farla classificare tra le strutture locali.

Recentemente l'astronoma russa M. Dolidze ha messo in evidenza l'esistenza di una seconda struttura locale inclinata di circa  $17^\circ$  sul piano della Galassia orientata nelle direzioni  $l \cong 120^\circ$  (massime latitudini positive raggiunte) e  $l \cong 300^\circ$  (massime latitudini negative). Se rappresentate in coordinate galattiche le due strutture hanno una caratteristica forma sinusoidale, mostrata in figura.



Rappresentazione (tridimensionale) schematica della *Gould's Belt*. Le costellazioni più cospicue sono indicate insieme alle loro distanze approssimate dal sistema solare.

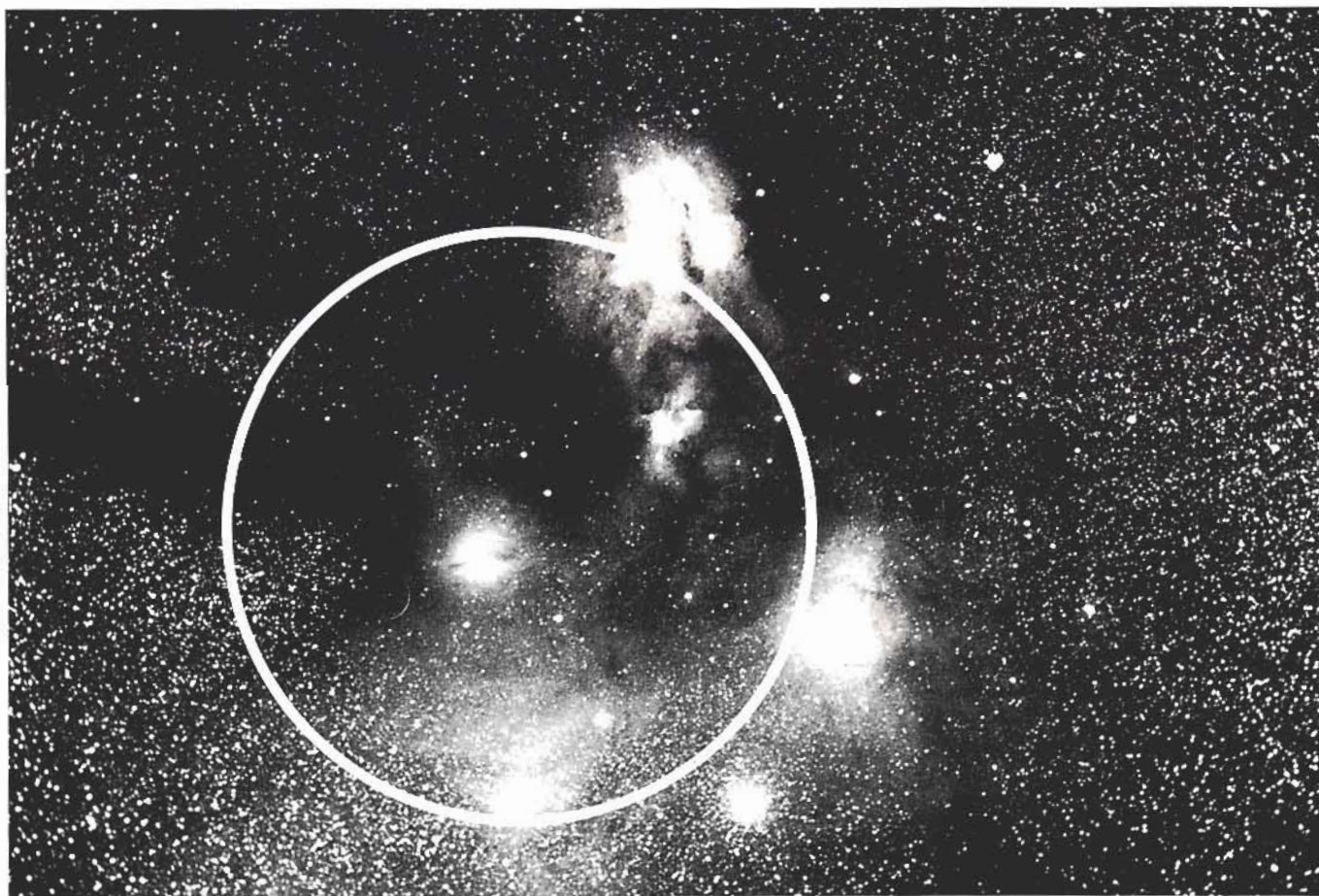
Rappresentazione bidimensionale in coordinate galattiche delle due strutture locali *Gould's Belt* (indicata con  $\Delta\Delta\Delta$ ) e *Dolidze's Belt* (indicata con  $\square\square$ ). La forma sinusoidale è caratteristica. Nel disegno si sono evidenziate le parti tra  $10^\circ$  e  $20^\circ$  a latitudini positive e negative in quanto in queste regioni il paragone con i dati gamma è particolarmente significativo.

pena di chiarire che la apparente differenza tra i due complessi molecolari dipende solo dalle loro diverse dimensioni angolari. Ofiuco, piccola nube compatta, appare puntiforme allo strumento (fig. sotto), mentre il complesso molecolare gigante di Orione, contenente almeno 100 volte più materia di Ofiuco ed esteso su diverse centinaia di gradi quadrati viene risolto dallo strumento. La massa di entrambi i complessi è dovuta principalmente all'idrogeno molecolare (oltre che neutro e ionizzato) che, schermato dalla materia circostante, non viene scisso dalla radiazione ultravioletta, come invece accade all'idrogeno molecolare che si forma nel mezzo interstellare. Sfortunatamente, l' $H_2$  è difficilissimo da misurare in forma diretta; è necessario ricorrere a metodi indiretti consistenti nel "mappare" l'emissione radio di altre specie molecolari, principalmente CO, la cui densità si ipotizza in proporzione a quella dell' $H_2$ . La massa così calcolata è quindi affetta da un consistente margine di errore.

Però, la massa delle nubi in esame è stata oggetto di accurate determinazioni, oltre che in radio, in ottico ed infrarosso. Disponiamo, quindi, di stime relativamente precise della massa dei due complessi che consideriamo sorgenti gamma passive, cioè agglomerati di ma-

teria bombardati da un flusso continuo di raggi cosmici. Possiamo quindi calcolare il flusso gamma previsto e confrontarlo con quello misurato da COS-B. Il flusso proveniente da Ofiuco è circa quattro volte maggiore di quello aspettato, il che ci costringe, ancora una volta, ad ipotizzare che là vi sia una maggiore densità di raggi cosmici, responsabili dell'emissione gamma. Dal complesso molecolare gigante di Orione, invece, riceviamo il flusso atteso in base ai calcoli e la distribuzione spaziale dei fotoni gamma risulta quasi identica alla distribuzione del CO, appositamente misurato su una vastissima area per consentire il confronto.

Torniamo ancora una volta alla figura di pag. 18 per esaminare le strutture circolari che prima avevamo trascurato. Si tratta di strutture più piccole della risoluzione angolare dello strumento che, per comodità, abbiamo chiamato "sorgenti". Abbiamo già detto che la rappresentazione generale ad isofote non è la più adatta ad evidenziare la presenza di sorgenti. Meglio partire dai dati rozzi e cercare di vedere punto per punto nel cielo se la distribuzione delle direzioni di arrivo dei fotoni segue oppure no la caratteristica forma a campana. Con questo metodo sono state evidenziate 25 sorgenti, la posizione delle quali è indicata in coor-



*Alla foto della nube oscura in prossimità della stella rho Opbiuci è stato sovrapposto il cerchio d'errore della sorgente centrata a  $l = 353^\circ$   $b = 16^\circ$ . La coincidenza spaziale farebbe pensare alla nube come sorgente di raggi gamma, ma il meccanismo di emissione passiva, discusso nel testo, non sembra applicabile in questo caso. Il flusso gamma è circa 4 volte maggiore di quello atteso a partire dalla massa della nube e dal flusso dei raggi cosmici galattici. È quindi necessario ipotizzare una maggiore densità di raggi cosmici, prodotti localmente.*

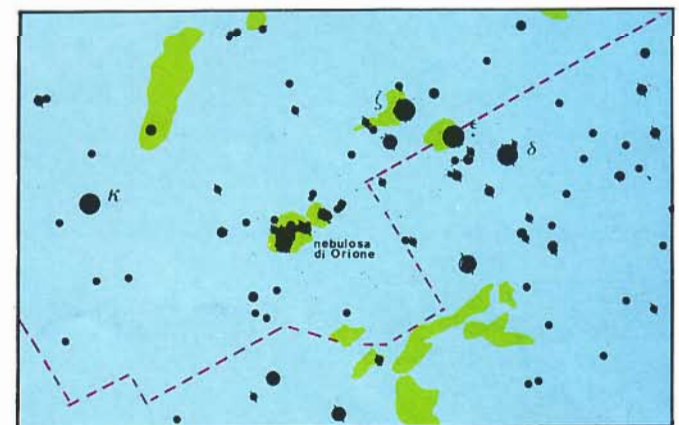
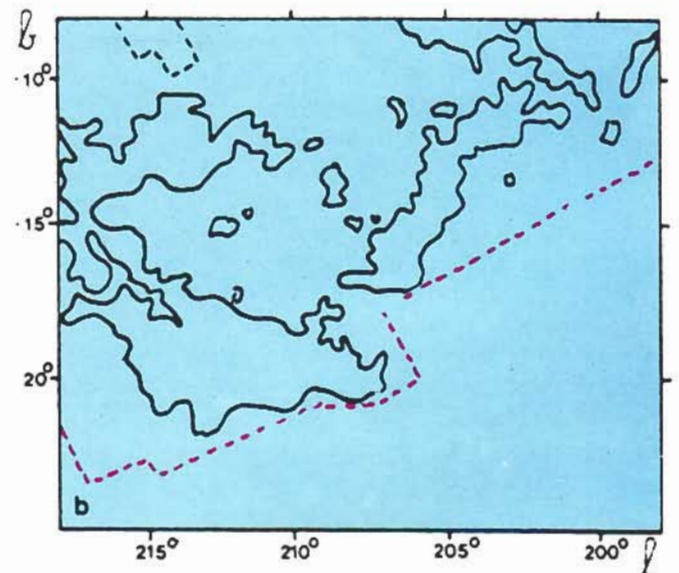
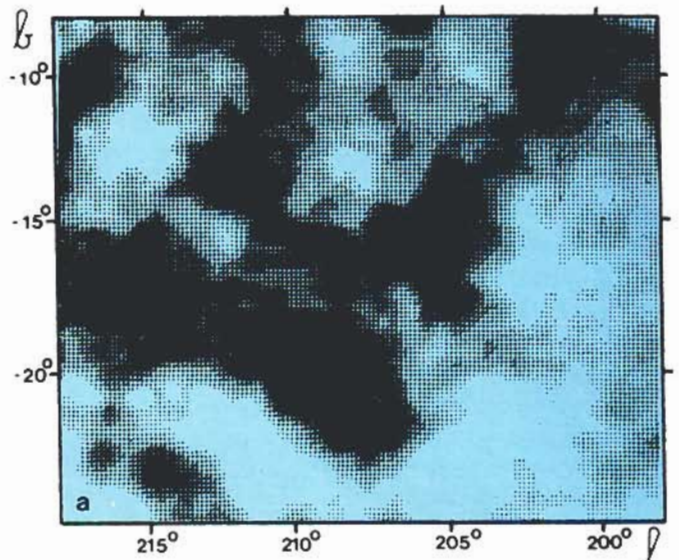
dinate galattiche in tabella a pag. 22. Notiamo che 23 delle 25 sorgenti sono contenute nella regione di cielo coperta dalla figura ed un confronto accurato mostra che effettivamente tutte le sorgenti vi sono presenti, anche se risulta difficile isolarle dalla radiazione circostante. Oltre che dalla sua posizione nel cielo una sorgente gamma è caratterizzata dal valore del flusso e dall'area di incertezza, o *cerchio di errore*, ad essa associata (è l'area di cielo da cui la radiazione può avere avuto origine). Nella tabella sono riassunti i parametri fondamentali delle sorgenti gamma battezzate per brevità con la sigla 2CG (2° Catalogo COS-B Gamma) seguita dai valori troncati della longitudine e latitudine galattica. Diciamo subito che è il valore del cerchio d'errore il parametro più critico per il presente ed il futuro dell'astronomia gamma. Dalle dimensioni dell'area di incertezza associata ad una sorgente dipende, infatti, la possibilità di identificare l'eccesso gamma con oggetti noti ad altre lunghezze d'onda. Abbiamo già avuto modo di constatare che, purtroppo, la risoluzione angolare degli strumenti gamma è ben lontana dagli standard astronomici. Guardando la tabella vediamo infatti che il raggio d'errore medio di una sorgente gamma è circa 1°: un valore troppo grande per poter sperare nella possibilità di una identificazione posizionale. Un cerchio di 1° di raggio in regioni nel piano galattico contiene migliaia di oggetti!

L'unica classe di oggetti potenzialmente identificabile con le nostre sorgenti sono quelli variabili periodicamente nel tempo (tipicamente pulsar e una sottoclasse di binarie X). Infatti, solo conoscendo da misure radio e X i parametri temporali di un'eventuale sorgente periodica situata all'interno del cerchio di incertezza associato alla sorgente, è possibile verificare se i tempi di arrivo dei gamma seguono l'andamento periodico dell'oggetto in esame. Questo metodo è stato applicato a diverse sorgenti gamma, selezionate per la proprietà di contenere nei loro cerchi di errore sorgenti radio (*pulsar*) e X (*binarie*) *periodiche*. Gli unici risultati positivi ottenuti fino ad ora sono relativi alle sorgenti: 2CG 263-02, la più brillante delle sorgenti, identificata con la pulsar PSR 0833-45 nel resto di supernova nella costellazione delle Vele.

2CG 184-05, la terza sorgente gamma del cielo, identificata con la pulsar PSR 0531 +21 nel resto di supernova noto come Nebulosa Granchio, o Crab Nebula, nella costellazione del Toro.

Si tratta di due pulsar libere (cioè non in sistemi binari) tra le più giovani e più veloci che si conoscano: l'una (Crab) con età "anagrafica" di circa 1000 anni, compie una rotazione ogni 33 millisecondi; l'altra, con età stimata di circa 10.000 anni, compie una rotazione ogni 89 millisecondi.

Mentre la pulsar della Crab è caratterizzata dall'emettere a tutte le lunghezze d'onda un flusso pulsato con una curva di luce ben definita e sostanzialmente la stessa come struttura, dalle onde radio fino ai raggi gamma, la pulsar delle Vele ha un solo picco in radio, due in ottico e due in gamma, apparentemente scorrelati fra loro. Quello che stupisce, però, non sono tantò



Un confronto tra la mappa delle intensità gamma per energie comprese tra 100 MeV e 5 GeV (in alto) la prima isofota radio (al centro) e una carta celeste della corrispondente regione di Orione. (sotto). L'isofota radio indica i limiti delle nubi oscure del complesso molecolare gigante in Orione che ben corrispondono alla sorgente gamma estesa. Questo fatto, assieme alla corrispondenza dei livelli del flusso gamma con le previsioni teoriche, fanno di questa regione il prototipo di sorgente gamma passiva.



le differenze a tutte le lunghezze d'onda, quanto l'incredibile somiglianza delle curve di luce dei due oggetti nei raggi gamma. Dal momento che è generalmente accettato che la forma della curva di luce rispecchi la geometria del sistema (un dipolo magnetico con asse di rotazione non coincidente con l'asse magnetico), questa somiglianza crea non pochi problemi dal punto di vista teorico-interpretativo. Infatti non è facile costruire un modello per la pulsar della Crab, che ha le emissioni a tutte le lunghezze d'onda in fase, e poi adattarlo per la pulsar delle Vele che è gemella nei raggi gamma, ma è così diversa alle altre lunghezze d'onda.

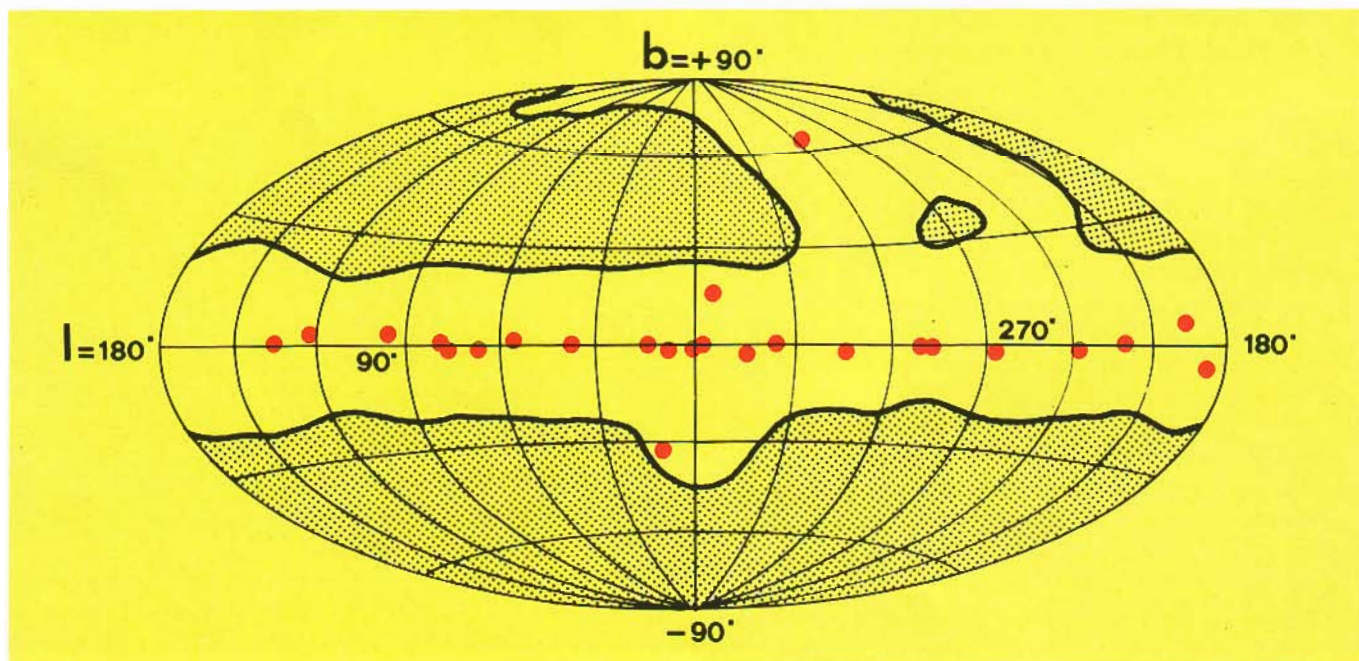
Recentemente è emersa una importante differenza nell'emissione gamma delle due pulsar. Entrambe le sorgenti sono state osservate numerose volte da COS-B e mentre la curva di luce di una delle due (Vele) appare sostanzialmente immutata nel tempo, quella della Crab denuncia la progressiva scomparsa del secondo picco che, a partire dalla prima osservazione, appare decisamente affievolirsi. Il confronto diretto, presentato nel grafico di pag.25 è assai convincente. La variabilità su lunga scala della Crab è senza dubbio uno dei più importanti tra i risultati di COS-B, che il satellite deve solo alla sua eccezionale longevità. È, infatti, grazie alla lunghissima copertura temporale di queste sorgenti che un tale risultato ha potuto emergere. Non a caso COS-B ha finito la sua vita scientifica puntando ancora una volta (la sesta) la pulsar della Crab che era stata la prima direzione di puntamento del satellite nell'agosto del 1975.

Dal momento che stiamo parlando di sorgenti identificate ricordiamo il caso della nube *rho* Oph associata

**Catalogo 2CG delle sorgenti gamma COS-B**

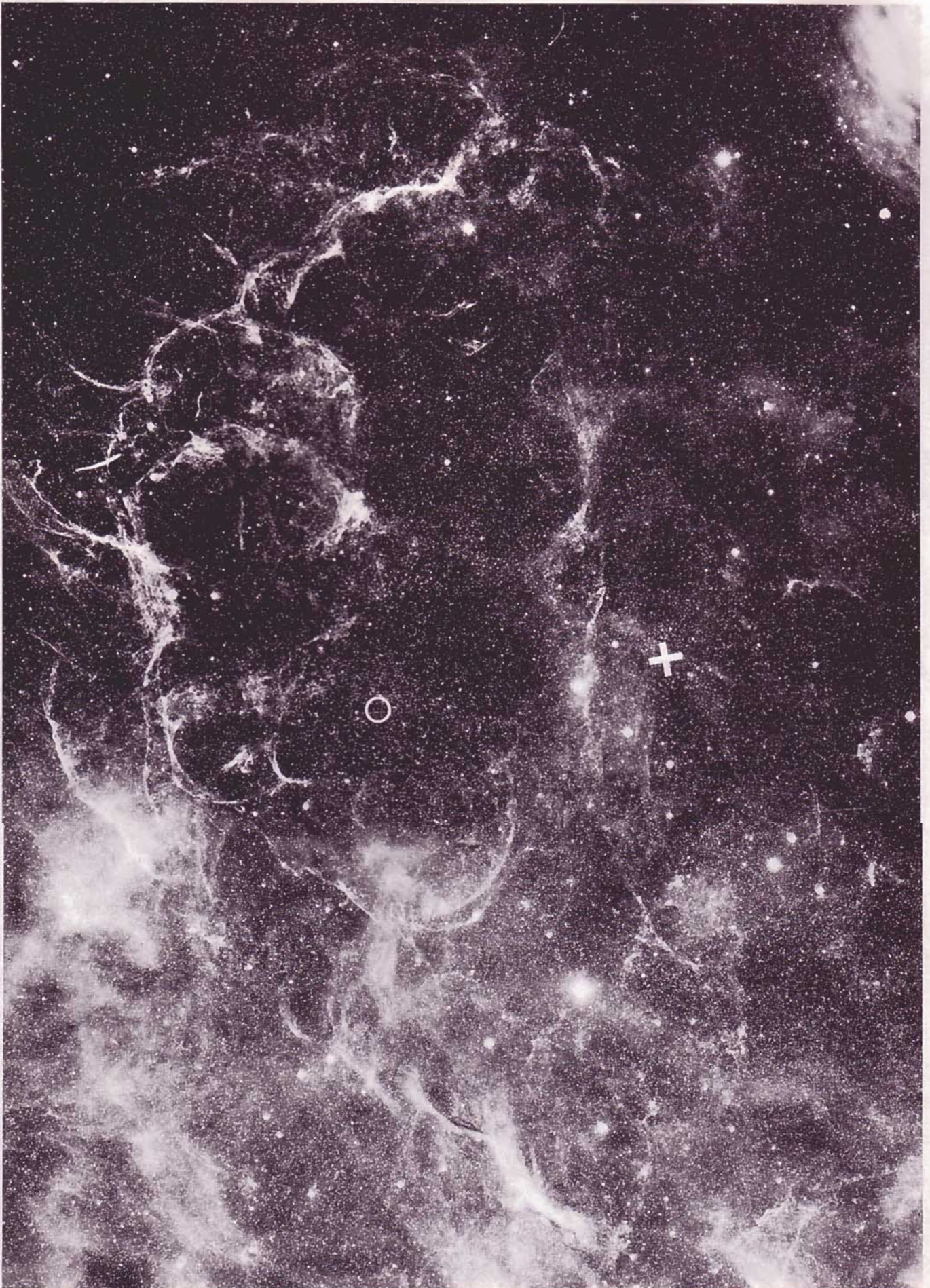
Nome della sorgente	posizione		raggio errore (gradi)	flusso E>100 MeV (10 <sup>-4</sup> fot cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )
	<i>l</i> (gradi)	<i>b</i> (gradi)		
2CG006 - 00	6,7	- 0,5	1,0	2,4
2CG010 - 31	10,5	-31,5	1,5	1,2
2CG013 + 00	13,7	0,6	1,0	1,0
2CG036 + 01	36,5	1,5	1,0	1,9
2CG054 + 01	54,2	1,7	1,0	1,3
2CG065 + 00	65,7	0,0	0,8	1,2
2CG075 + 00	65,7	0,0	0,8	1,2
2CG078 + 01	78,0	1,5	1,0	2,5
2CG095 + 04	95,5	4,2	1,5	1,1
2CG121 + 04	121,0	4,0	1,0	1,0
2CG135 + 01	135,0	1,5	1,0	1,0
2CG184 - 05	184,5	- 5,8	0,4	3,7
2CG195 + 04	195,1	4,5	0,4	4,8
2CG218 - 00	218,5	- 0,5	1,3	1,0
2CG235 - 01	235,5	- 1,0	1,5	1,0
2CG263 - 02	263,6	- 2,5	0,3	13,2
2CG284 - 00	284,3	- 0,5	1,0	2,7
2CG288 - 00	288,3	- 0,7	1,3	1,6
2CG289 + 64	289,3	64,6	0,8	0,6
2CG311 - 01	311,5	- 1,3	1,0	2,1
2CG333 + 01	333,5	1,0	1,0	3,8
2CG342 - 02	342,9	- 2,5	1,0	2,0
2CG353 + 16	353,3	16,0	1,5	1,1
2CG356 + 00	356,5	0,3	1,0	2,6
2CG359 - 00	359,5	- 0,7	1,0	1,8

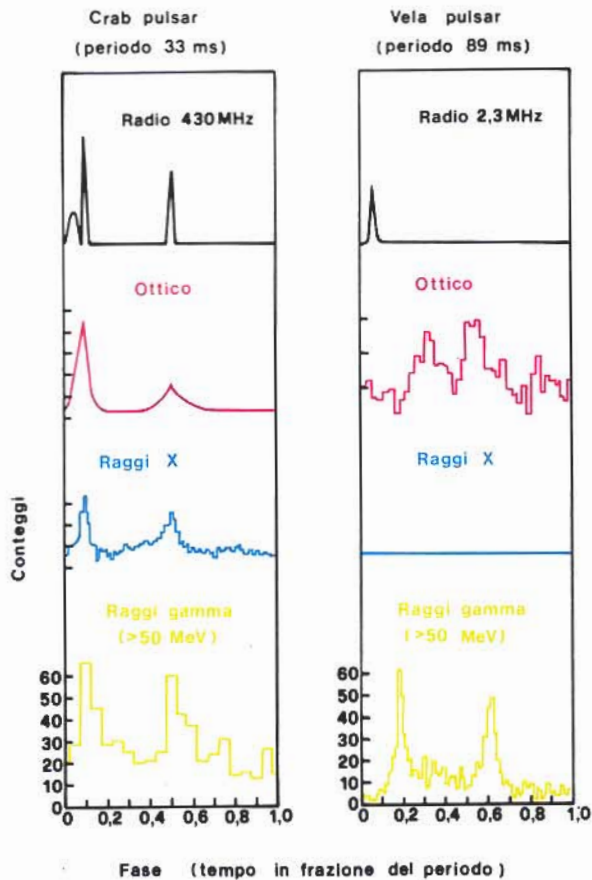
22



(sopra) Distribuzione spaziale delle 25 sorgenti di radiazione gamma di alta energia rivelate da COS-B. L'area in colore non è stata coperta durante la ricerca di sorgenti. I nomi convenzionali delle sorgenti, le coordinate galattiche, il raggio d'errore e il flusso sono riportati in tabella.

(pagina a fronte) Resto di supernova nella costellazione delle Vele. La X denota il centro geometrico della bolla di gas in espansione mentre la O denota la posizione della pulsar PSR 0833—45, la più brillante sorgente gamma del cielo.



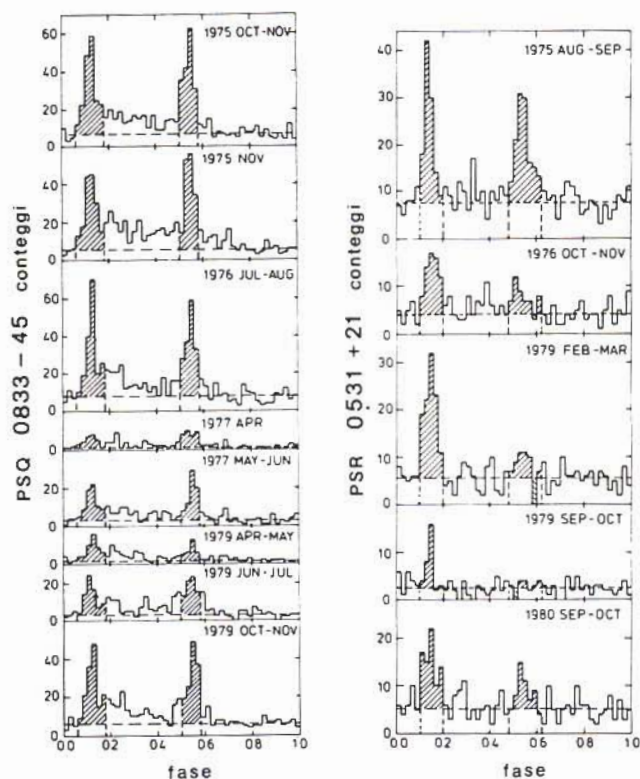


(a sinistra) Confronto tra le emissioni delle pulsar PSR 0531+21 (Crab pulsar) e PSR 0833-45 (Vela pulsar) a lunghezze d'onda radio, ottiche, X e gamma. Mentre la radiazione pulsata emessa dalla Crab è caratterizzata dalla presenza di due picchi allineati in fase a tutte le frequenze coperte, l'emissione pulsata da Vela ha curve di luce diverse alle diverse frequenze: un picco in radio, due in ottico, nessuna emissione pulsata in X e due picchi in gamma non in fase con quelli radio e ottici. A causa dei diversi valori dei periodi delle due pulsar il confronto è qualitativo e non quantitativo. Il confronto tra i flussi reali è, però, estremamente istruttivo: nelle onde radio Crab è da 10 a 100 volte (a seconda della frequenza scelta) più debole di Vela; in ottico Crab è 1500 volte più brillante di Vela; in X, Crab è tra le più brillanti sorgenti del cielo mentre Vela non emette radiazione pulsata misurabile con gli strumenti usati finora; in gamma Crab è tre volte più debole di Vela.

(nella pagina accanto, a sinistra) confronto tra le curve di luce di PSR 0833-45, osservata otto volte da COS-B e PSR 0531+21, osservata cinque volte da COS-B. Il fatto che le curve di luce relative ad una stessa sorgente abbiano numero di conteggi drasticamente diverso non è significativo. L'effetto è strumentale. Il confronto va fatto all'interno di ogni curva di luce tra l'intensità relativa dei picchi (le zone ombreggiate). Mentre per la Vela l'intensità relativa non cambia nel corso dei cinque anni di osservazione, per la Crab la variazione è evidente.

(nella pagina accanto, a destra) COS-B prima del lancio. (sotto) Resto di supernova nella costellazione del Toro (Nebulosa Granchio). La pulsar PSR 0531 + 21 ad esso associata (la cui posizione è indicata da una freccia) ruota intorno al proprio asse in 33 ms.



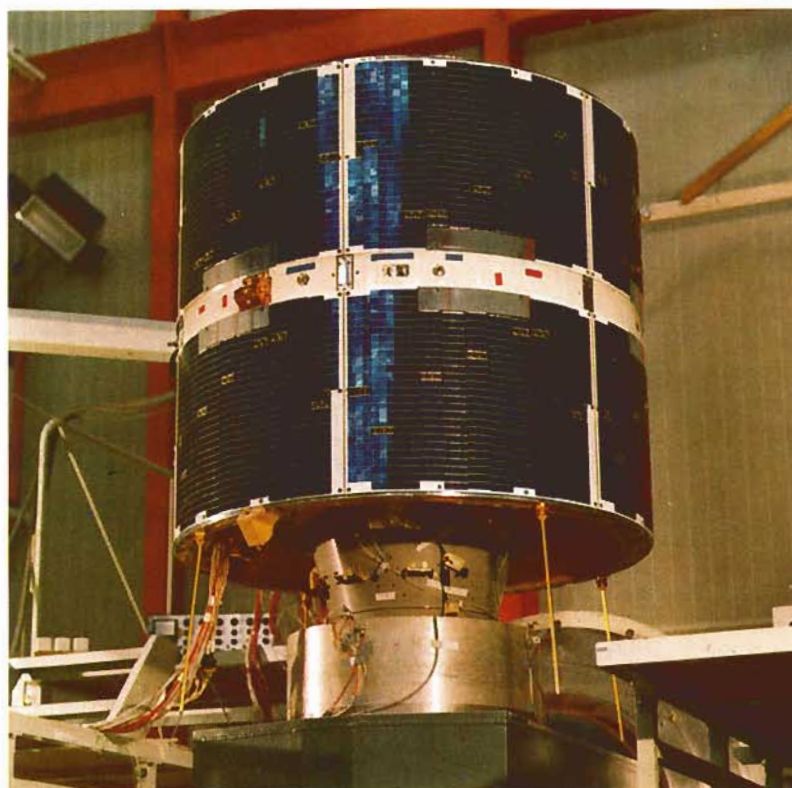


alla sorgente gamma 2CG 353+16, poiché il cerchio di errore gamma è dominato dalla presenza della nube molecolare. In questo caso, specialmente in mancanza di altri forti candidati, è ragionevole parlare di identificazione in base ad associazione spaziale. Lo stesso argomento può essere applicato a 2CG 289+64 nel cui cerchio di errore, ben lontano dal piano galattico e quindi relativamente spopolato, troviamo il quasar 3C 273 il più brillante dei quasar noti. 2CG 289+64 è la più debole delle sorgenti gamma ma non per questo è da considerarsi in qualche modo incerta. Il quasar è stato puntato per tre volte e per tre volte la sorgente ha emesso all'interno del mese di osservazione ad essa dedicato, un flusso gamma rivelabile di circa 40 fotoni che, se provenienti dalla distanza calcolata a partire del redshift cosmologico delle righe di emissione del quasar, corrisponde ad una luminosità superiore a  $10^{46}$  erg/s, più di 10.000 volte la luminosità gamma della nostra Galassia.

Riassumendo, delle 25 sorgenti rivelate da COS-B, due sono sicuramente identificate con pulsar; una è associata ad una nube molecolare a 500 anni luce di distanza; ed una è associata ad un quasar a 2,6 miliardi di anni luce. E le altre 21?

La loro distribuzione in latitudine, così "piccata" per  $b = 0^\circ$ , è prova sufficiente della loro natura galattica, mentre la loro distribuzione in longitudine le pone mediamente ad una distanza tra 6 mila e 23 mila anni luce.

Le ricerche di controparti ad altre lunghezze d'onda sono ormai troppo numerose per poter essere qui elencate. Basti dire che, nonostante gli sforzi dedicati al problema, non si è sufficientemente chiarita la natura di neppure una di tali sorgenti. A parte il loro interessè



individuale, le sorgenti gamma non identificate pongono degli interessanti quesiti quando le si consideri globalmente. Dal momento che la distanza media delle sorgenti gamma è molto minore delle dimensioni della Galassia è ragionevole aspettarsi la presenza di sorgenti analoghe a quelle rivelate, ma più lontane e più deboli, completamente affogate nella radiazione del piano. Quante di queste sorgenti è possibile aspettarsi? O, in altre parole, quanta della radiazione del piano è dovuta a sorgenti troppo lontane e troppo deboli per poter essere riconosciute singolarmente?

Siamo così tornati al problema del contributo aggiuntivo richiesto per la spiegazione del largo massimo di emissione in corrispondenza delle parti centrali della Galassia. Le sorgenti non risolte potrebbero fornirlo in tutto o in parte. Quantificare il contributo dovuto ad una popolazione di sorgenti completamente sconosciuta non è facile... ciò però non significa che non sia da prendere in considerazione, o che non possa comunque portare a qualche risultato interessante.

**PATRIZIA CARAVEO.** Nata a Milano l'8/4/1954 laureata in fisica all'Università di Milano nel 1977. Nel periodo 77-78 ha lavorato al Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay (Francia) e al Goddard Space Flight Center della NASA.

Dal '78 è all'Istituto di Fisica Cosmica del CNR di Milano, prima come borsista quindi come C.T.P. Si occupa di astrofisica delle alte energie con particolare riguardo all'analisi ed interpretazione dei dati da satellite. È membro del Data Reduction Group del Caravane Collaboration per il satellite COS-B ed è Guest Observer sui satelliti per astronomia X HEAO-2 (Einstein) e per il satellite per astronomia ultravioletta IUE.