

# Gammasterrenkunde

## met COS - B

Dr. W. Hermsen

Werkgroep Kosmische Straling Huygens Laboratorium, Leiden

### 1. Inleiding

Gammasterrenkunde is de jongste tak van één van de oudste experimentele wetenschappen. Gammasterrenkunde is het onderzoek aan de meest energierijke fotonen afkomstig uit ons melkwegstelsel of daarbuiten. Bij energien groter dan ongeveer 1 MeV spreekt men reeds van zachte gammastraling. In dit verhaal beperken we ons tot het energiegebied boven 50 MeV tot ongeveer 5 GeV. Dan is de frequentie minimaal  $10^{22}$  Hz, de golflengte maximaal  $2 \times 10^{-12}$  cm. In dit energiegebied heeft de Europese (ESA) kunstmaan COS-B vanaf augustus 1975 tot april 1982 de hemel bestudeerd. Met de verkregen resultaten heeft de gammasterrenkunde een belangrijke stap voorwaarts gemaakt. Niet alleen is de grootschalige structuur, maar ook zijn een groot aantal bronnen van gammastraling waargenomen, waarvan slechts een klein aantal is geïdentificeerd met verschillende hemellichamen. Voor de overige bronnen, waarvan alleen bekend is dat ze overwegend grote hoeveelheden energie uitzenden in de vorm van gammastraling, is nog geen overtuigende verklaring gevonden.

### 2. Belangrijke productieprocessen

Radio, optische en röntgenastronomen hebben vaak te maken met thermische straling. Het opwekken van thermische gammastraling zou evenwel temperaturen vergen van  $10^{11}$  tot  $10^{13}$  K! Deze mogelijkheden kunnen we zelfs in astrofysische situaties ter zijde schuiven. Gammastraling kan in principe wel worden geproduceerd door praktisch iedere combinatie van hoog-energetische deeltjes aan de ene kant en materie (gas of stof), zeer sterke magneetvelden of een grote dichtheid aan licht (fotonen) aan de andere kant. De

belangrijkste produktiemechanismen in het energiegebied boven 1- MeV zijn:

#### a) Inverse Compton proces

Dit proces houdt in de botsing van een hoogenergetisch electron  $e^-$  (energie  $E_e = \gamma mc^2$ , met  $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ ) de Lorentzfactor,  $m$  de massa van het electron en  $c$  de lichtsnelheid) met een laagenergetisch foton (energie  $\epsilon = h\nu$ , met  $h$  de constante van Planck en  $\nu$  de frequentie). Een voorbeeld: voor electronen met een energie groter dan of gelijk aan 2 GeV ( $2 \times 10^9$  eV) kan dan een foton van het zichtbare licht van sterren (ongeveer 2 eV) omgezet worden in een gammafoton met een energie ( $E_\gamma$ ) groter dan 10 MeV (zie schets in figuur 2a).

#### b) Bremsstrahlungs-proces

Bremstrahlung, het Duitse woord voor "remstraling", is straling die uitgezonden wordt door een geladen deeltje dat een vertraging ondergaat. In astrofysische situaties bijvoorbeeld een hoogenergetisch electron dat, onder het uitzenden van een gammafoton, van zijn baan wordt afgebogen in een Coulomb veld van een atoomkern  $N$  van de interstellaire materie (figuur 2b).

#### c) Kern-kern interacties

Bij een botsing tussen twee kernen kan een grote verscheidenheid aan secundaire deeltjes gevormd worden waaronder instabiele deeltjes. Deze kunnen vervolgens weer uiteenvallen, o.a. onder het uitzenden van één (of meer) gammafoton(en). In de ruimte is de meest voorkomende botsing die tussen 'n kosmisch stralings-proton en een waterstofkern (proton) van het interstellaire gas. Hierbij kan het instabiele

deeltje  $\pi^0$  geproduceerd worden, dat vervolgens (vervaltijd  $10^{-6}$  seconde) uiteenvalt in twee gammafotonen (fig. 2c). Beide fotonen hebben een energie  $E_\gamma = m_{\pi^0} c^2/2 = 68 \text{ MeV}$  in het rust-systeem van het meson.

Uit het bovenstaande blijkt dat gammastraling ontstaat in astrofysische processen waarin de grootste overdracht aan energie kan plaatsvinden. In veel gevallen zijn de hiervoor noodzakelijke concentraties aan energie niet bij andere golflengten waarneembaar, noch kunnen zij gevonden worden door relativistische deeltjes te bestuderen. Hoogenergetische, geladen deeltjes hebben namelijk alle informatie over hun plaats van herkomst verloren bij aankomst bij de aarde door verstrooiing onder invloed van de magnetevelden in de ruimte. Dit in tegenstelling tot de gammastraling die zich vanaf de plaats van oorsprong ongehinderd voortbeweegt door de ruimte. Bovendien is het doordringend vermogen van gammastraling zo groot dat zij ons kan bereiken vanaf praktisch elke plaats in ons melkwegstelsel of daarbuiten. Dit geldt niet, of in mindere mate voor de zachtere (= van lagere energie) fotonen die al snel geabsorbeerd worden. Daarom biedt de gammastralenkunde een unieke mogelijkheid om tot nu toe niet waargenomen extreem hoogenergetische processen op het gebied van de "hoge-energie astrofysica" te onthullen.

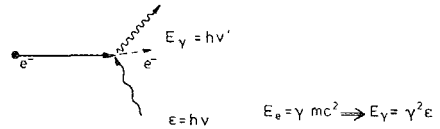
### 3. Oorspronkelijke verwachtingen

In het begin van de zestiger jaren hadden radio-astronomische waarnemingen van de 21 cm-lijn van neutraal waterstof reeds een goed beeld gegeven van de verdeling van de atomaire waterstof in ons melkwegstelsel. Figuur 2 toont onze Melkweg in de 21 cm-lijn waargenomen vanuit de positie van de zon (galactische coördinaten 1 and b), in de vorm van een contourplot met grijschaal van de atomaire waterstof kolom dichtheid (aantal waterstofatomen per  $\text{cm}^2$ ). Deze kaart is samengesteld uit de meest complete en meest gedetailleerde waarnemingen die op dit moment beschikbaar zijn. De hoogste

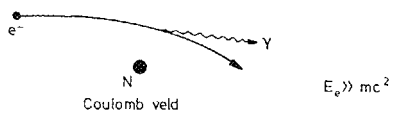
dichtheden zijn zichtbaar in een smalle band voor  $b \approx 0^\circ$ , dat wil zeggen in richtingen waarin we door de bij benadering platte schijf van ons melkwegstelsel "kijken", het z.g. melkwegvlak. Langs dit vlak worden de hoogste dichtheden aangetroffen binnen ongeveer  $60^\circ$  van het centrum ( $l=0^\circ$ ,  $b=0^\circ$ ) van de Melkweg. Voor deze richtingen "kijken" we over maximale afstanden door ons melkwegstelsel.

Eveneens in het begin van de zestiger jaren hadden radio-astronomische waarnemingen en metingen aan de kosmische straling sterke aanwijzingen gegeven dat ons melkwegstelsel gevuld is met relativistische deeltjes (electronen, protonen en zwaardere kernen). De combinatie van de

(a) Inverse Compton effect



(b) Bremsstrahlung



(c) Kern - Kern interacties

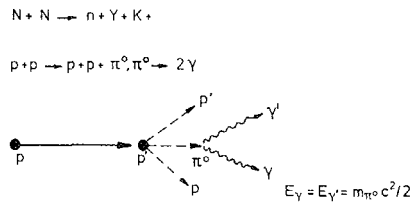


Fig. 1. Schematische presentatie van de belangrijkste produktiemechanismen van gammastraling in het energiegebied boven 10 MeV. Voor verklaring zie tekst.

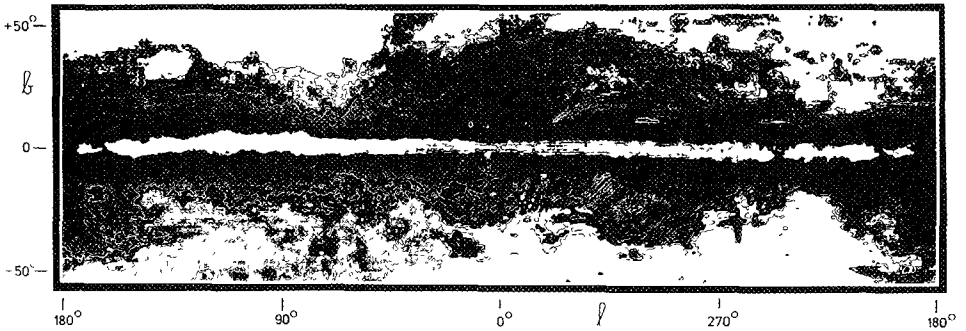


Fig. 2. Hemelkaart in galactische coördinaten van de verdeling van atomaire waterstofgas in ons melkwegstelsel. De kaart is samengesteld uit metingen van de 21 cm-straling, waargenomen met radiotelescopieën in Amerika en Australië. De grijsschaal geeft voor toenemende zwarting een grotere hoeveelheid gas langs de gezichtslijn weer, terwijl voor de grootste dichtheden langs  $b \approx 0^\circ$  (de melkwegschijf) de kaart wit is gelaten.

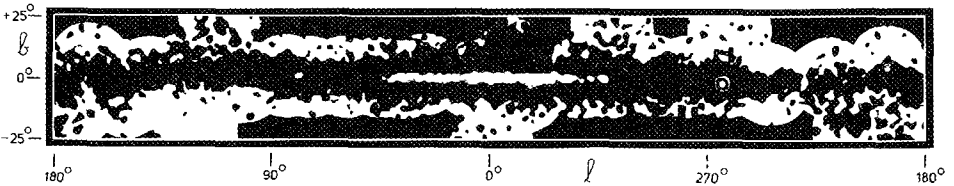


Fig. 3. Hemelkaart in galactische coördinaten van de intensiteitsverdeling van de gammastraling, in het energiegebied tussen 70 MeV en 5 GeV, waargenomen m.b.v. de COS-B satelliet. De niet waargenomen gebieden langs de rand van de kaart zijn zwart gelaten. Voorop het verloop van de grijsschaal zie bijschrift van figuur 2.

kosmische stralingsdeeltjes en de interstellaire materie zou door het Bremsstrahlungsproces en kerninteracties (Figuur 1b en 1c) gammastraling produceren tot in het energiegebied boven 50 MeV:

$$I_\gamma = (q_\gamma/4\pi) N(H_{TOT}), \quad (1)$$

waarin  $I_\gamma$  is de intensiteit van de gammastraling,  $q_\gamma$  de gammaproductie per waterstof atoom (evenredig aan de kosmische stralingsdichtheid) en  $N(H_{TOT})$  is de totale kolomdichtheid van het interstellaire gas. Men verwachtte dat de te meten intensiteitsverdeling van de gammastraling (gammaverdeling) sterke gelijkenis zou

vertonen met de verdeling in figuur 2 (aangenomen dat de toen slecht bekende verdeling over ons melkwegstelsel van de *moleculaire* waterstof vergelijkbaar is met die van de *atomaire* waterstof). Omgekeerd werd algemeen aanvaard dat de waarneming van gammastraling een unieke mogelijkheid zou bieden om de verdeling van de dichtheid van de kosmische straling (electronen en atoomkernen) en interstellaire materie, ongeacht de vorm (stof of gas; atomaire, moleculaire of geioniseerde) te bestuderen. Vooral dit laatste argument leverde oorspronkelijk de belangrijkste motivatie voor het ontwikkelen

van de gammasterrenkunde. Daarentegen waren de voorspellingen omtrent de te verwachten intensiteiten aan gammastraling afkomstig van specifieke galactische objecten (b.v. supernovaresten) of extragalactische objecten (b.v. radiostelsels, quasars) extreem laag, dus vanuit een experimenteel gezichtspunt ontmoedigend.

#### 4. De waarnemingen; COS-B

De verklaring voor de late ontwikkeling van de gammasterrenkunde moet gezocht worden in een aantal factoren die de waarnemingen zeer moeilijk hebben gemaakt; deze zijn:

- a) Absorptie en produktie van gammastraling in de aardse dampkring (de hoogte is equivalent aan ongeveer 20 cm Pb) maken het onmogelijk de buitenaardse gammastraling vanaf het aardoppervlak te bestuderen. Daarom moeten gammatelescopen buiten de dampkring gebracht worden. Oorspronkelijk gebeurde dit alleen met behulp van ballonnen en na het aanbreken van het "ruimtetijdperk" ook met kunstmanen.
- b) Op theoretische grond werden lage intensiteiten verwacht, dus lange waarnemingstijden zouden nodig zijn om een voldoende groot aantal fotonen te kunnen registreren. De metingen hebben dit bevestigd. Vooruitlopend op de resultaten een voorbeeld: de gammatelescoop aan boord van de kunstmaan COS-B ontvangt van een sterke gamma-bron één foton per uur en van een zwakke bron één per dag! Daarom moet zo'n kunstmaan minstens één maand in dezelfde richting kijken (gelijktijdig wordt evenwel een groot gebied met een straal van effectief ongeveer  $20^\circ$  aan de hemel bekeken).
- c) De betrouwbaarheid waarmee de gammastraling gemeten kan worden, hangt sterk af van de discriminatie van achtergrond effecten. Vooral hoogenergetisch geladen deeltjes kunnen de meting verstoren door een gammagebeurtenis in de telescoop te simuleren. De achtergrondintensiteit is een factor  $10^4$  hoger dan de te meten fotonen intensiteit.

d) Er is geen eigenschap van de gammastraling die het mogelijk maakt om deze rechtstreeks waar te nemen. Het is daarom noodzakelijk om gebruik te maken van secundaire deeltjes die geproduceerd worden bij interacties van de te meten gammastraling met geschikt detector materiaal. Uit de informatie over deze deeltjes, zoals energie en richting waarin zij zich voortbewegen, kunnen gegevens over de invallende gammastraling berekend worden. Door dit alles verschilt een gammatelescoop zeer sterk van kijkers die toegepast worden bij metingen in andere (langere) golflengtegebieden van het electromagnetisch spectrum.

De OSO-3 was de eerste uit een serie van drie kunstmanen waarmee in dit golflengtegebied baanbrekend werk is verricht. Deze NASA kunstmaan detecteerde evenwel tussen augustus 1967 en juli 1968 slechts 621(!) gammafotonen. De volgende is weer een Amerikaanse kunstmaan, namelijk SAS-2 die in 1972-1973 ongeveer 8000 fotonen registreerde, gevolgd door de Europese (ESA) kunstmaan COS-B. De gammatelescoop aan boord van COS-B heeft meer dan  $10^5$  gammafotonen waargenomen. De resultaten die in dit verhaal getoond worden, zijn alleen afkomstig van COS-B en zijn voornamelijk gebaseerd op de gegevens verzameld gedurende de eerste 4 jaar in zijn baan om de aarde. De gegevensverwerking is nog in volle gang. Dit gebeurt in 5 Europese wetenschappelijke groepen, waaronder de Werkgroep Kosmische Straling in Leiden, die gezamenlijk verantwoordelijk zijn voor het COS-B project.

Het hart van de gammatelescoop, zowel bij OSO-3, SAS-2 als COS-B, wordt gevormd door een vonkenkamer, waarin de gammafotonen omgezet worden in een electron - positron paar (z.g. paarvormig), waarvan de sporen (geïoniseerd gas) zichtbaar worden gemaakt. Het voert ons in dit verhaal te ver om de werking van een gammatelescoop te beschrijven. Daarom zullen we ons concentreren op de meetresultaten.

## 5. Grootchalige structuur

Ons melkwegstelsel zoals dat is waargenomen door COS-B in de gammaband van het electromagnetische spectrum voor energien tussen 70 MeV en 5 GeV is weergegeven in figuur 3. De figuur toont het volledige vlak van de Melkweg in galactische lengte en breedte coördinaten ( $l, b$ ) in de vorm van een kaart met iso-intensiteitscontouren. Dit is de meest complete en meest gedetailleerde hemelkaart in dit energiegebied. In totaal zijn 36 waarnemingen samengevoegd, elk ongeveer vijf weken lang en opgeteld bijna de totale waarnemingsduur van de eerste vier jaren dat COS-B zich in een baan om de aarde bevond.

Vergelijken we figuur 3 met de overeenkomstige breedte ( $b$ ) band in figuur 2, dan zijn inderdaad duidelijk overeenkomsten te zien in de algemene structuur. In beide figuren manifesteert het melkwegvlak zich als een hoge rug langs  $b \cong 0^\circ$ , een z.g. "lijn-bron". Daarnaast worden ook in de gammaverdeling de hoogste intensiteiten langs de equator bereikt in het gebied rond het centrum van de Melkweg, in welke richtingen we nu door middel van de gammastraling over de langste afstanden door ons melkwegstelsel kijken.

Er zijn evenwel ook duidelijke verschillen tussen figuur 2 en figuur 3:

i) Opvallend in figuur 3 zijn b.v. drie 'puntbronnen' van gammastraling. Voor één daarvan wordt de hoogste intensiteit in de kaart bereikt, namelijk op  $l = 263,6^\circ$  en  $b = -2,8^\circ$  (met de gekozen schaalverdeling treedt hier zelfs verzadiging op). Deze gammabron is geïdentificeerd met de z.g. Vela radiopulsar (Radiopulsars zijn periodiek knipperende radiobronnen met een periode van enkele tientallen milliseconden tot seconden. Ze zijn verklaard met roterende zware neutronensterren die stralen als een zwaailicht). De uitgebreidheid van het bronprofiel in figuur 3 is een goede maat voor het beperkte oplossend vermogen in de gammakaart. De twee andere bronnen zijn duidelijk zichtbaar op  $l = 184,6^\circ$ ,  $b = -5,8^\circ$ , geïdentificeerd met de radiopulsar in de Krab nevel, en op  $l = 195,1^\circ$  en  $b = 4,2^\circ$ . Deze laatste bron is bij andere golf lengten nog niet met

zekerheid geïdentificeerd. Ongetwijfeld dragen nog meer bronnen bij aan de gammaverdeling. Hierop komen we later terug.

ii) Het contrast in de gemeten intensiteiten langs het vlak tussen het lengte interval binnen  $60^\circ$  van het centrum van onze Melkweg en daarbuiten is aanmerkelijk groter in de gammaverdeling dan in de waterstof kolomdichtheidverdeling. Het verschil kan verklaard worden met de verdeling van de moleculaire waterstof, die veel sterker geconcentreerd is in het binnengebied van ons melkwegstelsel (d.w.z. op kortere afstanden van het galactisch centrum dan ons zonnestelsel) en eveneens een bijdrage levert aan de gammaverdeling. Deze verdeling van de moleculaire waterstof ( $H_2$ ) is evenwel nog nauwelijks in kaart gebracht. Dit komt voornamelijk omdat de  $H_2$  verdeling niet rechtstreeks waar te nemen is. Op die plaatsen waar  $H_2$  aanwezig is, bevinden zich evenwel ook minuscule hoeveelheden andere moleculen, zoals het koolmonoxide (CO) molecuul. Deze moleculen zenden straling uit bij millimeter golf lengten (waar te nemen met aangepaste radiotelescopie) na botsingen met waterstofmoleculen. CO wordt daarom gebruikt om moleculair waterstof op te sporen en in kaart te brengen. Deze waarnemingen vergen veel tijd en zijn nog verre van compleet. Het contrast in de grootchalige gammaverdeling tussen het binnen- en buitengebied zou gedeeltelijk ook verklaard kunnen worden met een concentratie van gamma puntbronnen in het binnengebied.

Sinds het begin van de zestiger jaren is de kennis over de structuur van ons melkwegstelsel, met o.a. zijn spiraalarmen, sterk toegenomen. Wanneer figuur 3 in meer detail bestudeerd wordt, kan veel van deze structuur in de gammaverdeling worden teruggevonden. Namelijk

— Er is een duidelijke asymmetrie in de lengteverdeling aan weerszijden van het galactisch centrum tuseen  $l \cong 0^\circ - 50^\circ$  en  $l \cong 360^\circ - 310^\circ$ . In het laatste interval is meer structuur zichtbaar in de verdeling. Dit stemt overeen met de bekende spiraalstructuur, want voor de richtingen  $310^\circ < l < 360^\circ$  kijkt

- men afwisselend in de lengte-richting dóór en langs de spiraal armen.
- De aanwezigheid van een "galactisch gat" of een tekort aan straling uit richtingen van het sterrenbeeld het Vosje rond  $l = 60^\circ$ . Dit is een richting waarvoor bekend is dat over grote afstanden door een relatief "leeg" gebied tussen spiraalarmen doorgekeken wordt.
  - De aanwezigheid van maxima in de gammaverdeling in de omgeving van het sterrenbeeld de Zwaan ( $l \cong 77^\circ - 85^\circ$ ) en Carina ( $l \cong 284^\circ$ ), waar zich eveneens bekende galactische structuren bevinden (lokale spiraalarm en Carina arm resp.).
  - De relatief lage intensiteiten in de omgeving van de sterrenbeelden Eenhoorn, Achterstevan en Vela ( $l \cong 210^\circ - 260^\circ$ ). Dit zijn richtingen in de Melkweg waarin in totaal weinig gas is aangetroffen over de vrij lange afstand waarover het melkwegstelsel zich daar uitstrekt.

De hierboven genoemde overeenkomsten met de uit waarnemingen in andere golf-lengtegebieden bekende structuur van onze Melkweg, betreffen correlaties met structuur gelegen op grote afstanden van het

zonnestelsel ( $\geq 3$  kpc, 1 kiloparsec =  $3 \times 10^{16}$  km). Recentelijk uitgevoerde, gedetailleerde analyse aan de gammaverdeling, gebruikmakend van afstands-informatie beschikbaar in de 21 cm-lijn metingen van de atomaire waterstof, heeft aangetoond dat de atomaire waterstof structuur gelegen op afstanden tot ongeveer 18 kpc van het galactisch centrum herkenbaar is in de gammaverdeling (De zon bevindt zich op ongeveer 10 kpc van het centrum). D.w.z. gammastraling wordt tot op deze afstanden van het galactisch centrum geproduceerd, dus ook kosmische stralingsdeeltjes zijn tot op ongeveer 18 kpc aanwezig.

Ook 'dichtbij', d.w.z. op afstanden  $\lesssim 1$  kpc (= lokaal), wordt overeenstemming gevonden met de verdeling van lokale gordels, bestaande o.a. uit jonge sterren en allerlei typen diffuse nevels en materie. Dit geldt o.a. voor de bekende Gould Belt, duidelijk zichtbaar op hogere breedten in figuur 3, nl.: voor  $10^\circ < b < 20^\circ$  binnen  $30^\circ$  aan weerszijden van  $l=0^\circ$  en  $-20^\circ < b < -10^\circ$  met  $170^\circ < l < 220^\circ$ . Juist in dit breedte interval,  $10^\circ < |b| < 20^\circ$ , hebben we een goede mogelijkheid om vergelijking (1) te verifiëren:

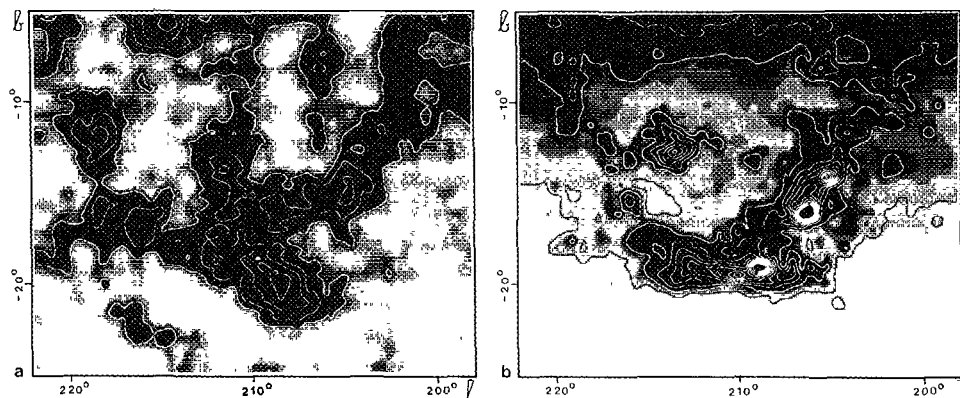


Fig. 4. Hemelkaarten van het gebied aan de hemel waar zich het Orion wolkencomplex bevindt. a) Verdeling van gammastraling (100 MeV-5 GeV) waargenomen door COS-B. b) Totale gasverdeling, samengesteld uit waarnemingen van atomaire waterstofgas en van het koolmonoxide molecuul. De kaarten mogen niet in detail vergeleken worden (zie tekst).

i) De bijdrage van puntbronnen kan op deze breedte worden verwaarloosd, zoals later zal blijken

ii) De dichtheid van de kosmische stralingsdeeltjes mag op deze relatief korte afstanden constant en gelijk aan de waarde in ons zonnestelsel verondersteld worden.

iii) O.a. op deze breedten zijn voor het noordelijk halfrond tellingen beschikbaar van het aantal melkwegstelsels dat waar te nemen is in het zichtbare licht. Onder de aanname dat de werkelijke verdeling van stelsels uniform is, vormen deze tellingen een goede maat voor de absorptie van het zichtbare licht en daarmee een goede maat voor de totale hoeveelheid interstellaire materie (atomaire en moleculair). Voor lagere breedten is de totale massa te groot en daardoor de absorptie te volledig om nog informatie over de massaverdeling te geven.

Inderdaad blijkt de gammaverdeling goed te correleren met de verdeling van de totale kolomdichtheid, zoals bepaald uit de melkwegtellingen. De gemeten gammaverdeling kan in het breedte interval  $10^\circ < |b| < 20^\circ$  inderdaad verklaard worden als zijnde evenredig met het produkt van een constante kosmische stralingsdichtheid en de totale kolomdichtheid (vergelijking 1).

Tot slot nog één voorbeeld van een correlatie tussen de gemeten gammaverdeling en lokale structuur, nml. voor het moleculaire wolken-complex in het sterrenbeeld Orion. Figuur 4a geeft een iso-intensiteit contourplot, met grijschaal, voor de gemeten gammastraling en figuur 4b toont de verdeling van de totale kolomdichtheid, zoals die bepaald kan worden voor de atomaire waterstof uit de 21 cm-lijn metingen en voor de moleculaire waterstof uit de, in dit geval beschikbare, CO waarnemingen. Alhoewel het oplossend vermogen in de gammakaart aanmerkelijk slechter is dan in figuur 4b, en het aantal gedetecteerde gammafotonen relatief klein, is er toch een verrassend goede ruimtelijke overeenstemming. Het interessante is dat een massabepaling van het wolken-complex met behulp van alleen de gammagegevens tot hetzelfde resultaat leidt als

een bepaling door middel van radiometingen. Hierbij is aangetoond dat de kosmische stralingsdichtheid in Orion dezelfde is als die in ons zonnestelsel.

Een probleem voor de verklaring van de gammaverdeling langs het melkwegvlak is de onbekende grootte van de bijdrage van puntbronnen aan de totale hoeveelheid gemeten gammastraling. Hoogst waarschijnlijk kan deze bijdrage niet groter zijn dan enkele tientallen procenten. Als voorlopige conclusie kunnen we constateren dat er zover twee zekere typen van gammabronnen zijn gepresenteerd, nml. moleculaire wolken (bv. in Orion) en radiopulsars (de Vela en Crab pulsars, duidelijk herkenbaar in figuur 3).

## 6. De tweede COS-B catalogus van gammabronnen

De voorspellingen omtrent de helderheid van puntbronnen in de gammaband gaven, zoals eerder vermeld, waarden aan die beneden de gevoeligheidsdrempel van de

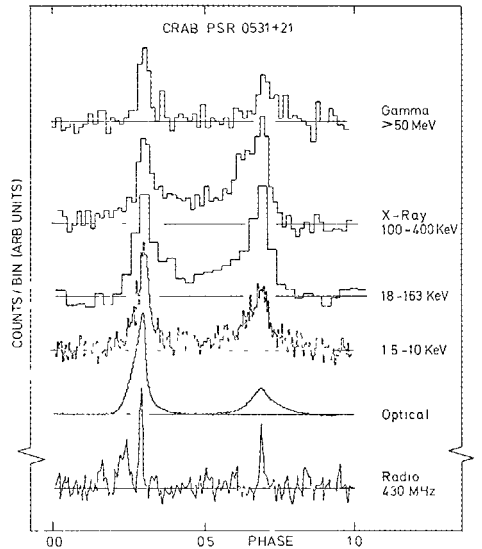


Fig. 5. Lichtkrommen van de Krabpulsar PSR0531 + 21 in het gamma-, optische-, röntgen- en radiogebied

huidige gammadetektoren lagen. Daarom was het een verrassing dat in de gegevens van de Amerikaanse kunstmaan SAS-2, ondanks het geringe aantal waargenomen fotonen, de aanwezigheid van drie gamma-bronnen aangetoond kon worden. Dit zijn de bronnen die in figuur 3 al direct opvielen. Van twee van deze drie bronnen kon met zekerheid gesteld worden dat het puntbronnen zijn, nml. de Vela en Krab radiopulsars.

Men ontdekte dat de gammabronnen die aangetroffen waren in de richtingen van de Vela en Krab radiopulsars hetzelfde periodieke karakter vertoonden, dus geïdentifi-

ceerd konden worden met deze radiopulsars. De COS-B gegevens bevestigen dit resultaat.

Figuren 5 en 6 tonen voor resp. de Krab en de bron z.g. "lichtkrommen", gemeten in verschillende banden van het electromagnetische spectrum. De lichtkrommen zijn verkregen door de fotonen als functie van de fase van de periode van de pulsars op te tellen. Voor de Krab pulsar is deze periode ongeveer 33 ms en voor de Vela pulsar ongeveer 89 ms (in figuren 5 en 6 genormeerd op de fase van de periode van 0 tot 1). Bij vergelijking van de twee figuren valt direct het verschillende gedrag van de twee pulsars als functie van de golflengteband op. De Krab pulsar vertoont ongeveer dezelfde pulsform over het totale electromagnetische spectrum, terwijl dit niet het geval is voor Vela (van de Vela pulsar is zelfs nog helemaal geen gepulste röntgenstraling waargenomen). Daarentegen vertonen Vela en Krab in de gamma-band de volgende interessante gelijkens: de afstand tussen de twee pieken in de lichtkrommen is voor beide ongeveer 0,42 in fase!

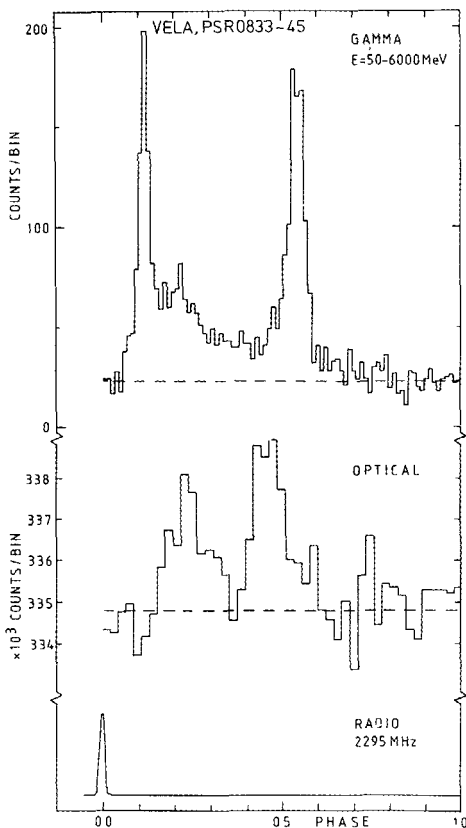


Fig. 6. Lichtkrommen van de Velapulsar PSR0833-45 in het gamma-, optische- en radiogebied.

Het verschillende gedrag van deze "gelijke" objecten wordt nog raadselachtiger als we de waargenomen flux van Krab en Vela in verschillende banden vergelijken. Tabel 1 laat zien dat de twee pulsars zich totaal afwijkend ten opzichte van elkaar gedragen. Opvallend is echter dat beide pulsars hun hoogste helderheid bereiken in de gammaband! Een algemeen aanvaarde verklaring voor de hierboven samengevatte experimentele resultaten is er nog niet. De overeenkomsten in de gammaband, vergeleken met de verschillen in gedrag van de Krab en Vela pulsar bij andere golflengten, maken het evenwel duidelijk dat de gammasterrenkunde belangrijke nieuwe gegevens over radiopulsars toevoegt aan de reeds bekende.

De COS-B gegevens bieden een goede mogelijkheid om verder te zoeken naar gammabronnen, vooral omdat nu een veel groter aantal fotonen is waargenomen dan b.v. door SAS-2. Een speciale methode is ontwikkeld om, op zoek naar gammabronnen, de fijnstructuur in de hemel-



TABEL 1

Spectraal gebied	Gemiddelde flux Krab/gemiddelde flux Vela
Radio: 400 MHz	0,4
1400 MHz	0,01
Optisch: m <sub>B</sub>	3000
Röntgenstraling : 1- 10 keV	> 30
Gammastraling : > 50 MeV	0,38
> 200 MeV	0,25

kaarten te bestuderen. Hierbij wordt de fijnstructuur vergeleken (gecorrleerd) met het verwachte bronprofiel. Wanneer een gepiekte verdeling wordt gevonden die een vorm heeft overeenkomstig het bronprofiel én voldoende sterk boven de achtergrond uitsteekt, dan wordt dat een gammabron genoemd. Het hoekscheidend vermogen van de COS-B telescoop is een functie van de fotonenergie. Voor energieën onder ongeveer 100 MeV is dit te slecht om deze analyse uit te voeren. Daarom hebben we ons beperkt tot energieën boven 100 MeV. In het algemeen kunnen voor deze energieën een echte puntbron en een bron met een doorsnede  $\lesssim 2^\circ$  niet onderscheiden worden.

Na analyse van 32 waarnemingsperiodes, metingen tussen augustus 1975 en december 1978, leverde dit het verrassende resultaat op van een lijst van 25 bronnen: de tweede COS-B catalogus van gammabronnen. De bronnen worden daarin aangeduid met de naam 2CGI + b. De verdeling van deze bronnen over de hemel is weergegeven in figuur 7, tesamen met het deel van de hemel dat is afgezocht. De gevoeligheid waarmee gezocht kon worden, is in dat gebied niet overal gelijk. Deze kan bijv. laag zijn in een bepaald gedeelte doordat daar de effectieve waarnemingstijd laag is of doordat de achtergrond (bijv. de galactische grootschalige structuur in de gammaverdeling) hoog is. Dit laatste is het geval langs het melkwegvlak ( $b \approx 0^\circ$ ).

Het is daarom des te opvallender dat het merendeel (22) van de bronnen geconcentreerd ligt langs het melkwegvlak. Dit is een aanwijzing dat deze bronnen galactisch zijn.

Drie bronnen liggen duidelijk op afstand van  $b = 0^\circ$ . In volgorde van oplopende galactische breedte.

*2CG353 + 16*; deze bron valt samen met het  $\rho$  Ophiuchus donkere wolkencomplex. De afstand van dit complex is ongeveer 160 pc, ongeveer drie maal dichterbij dan het Orion complex. Meer meetgegevens zijn ondertussen beschikbaar gekomen en, net als in het geval van Orion, de structuur van het wolkencomplex is nu herkenbaar geworden in de gammaverdeling. Daarmede is *2CG353 + 16* als zodanig geïdentificeerd.

*2CG010-31*, over deze bron is nog niets bekend, met name zijn er in de richting van deze bron geen opvallende objecten bekend. Deze bron is één maal waargenomen in de gammagegevens en zou daarom een keer bevestigd moeten worden

*2CG289 + 64*; geïdentificeerd met de quasar 3C273. Dit is de eerste extragalactische gammabron die in de band van de hoogenergetische gammastraling is waargenomen. Ook deze identificatie stelt ons direct weer voor problemen, nml.: hoe en waar in de quasar wordt de gammastraling geproduceerd?

Een röntgenkijker met een hoog hoekscheidend vermogen aan boord van de kunstmaan Einstein (de z.g. High Resolution Imager) heeft aangetoond dat de kern van 3C273 een variabele röntgenbron is. Uit de gegevens van deze kijker kan berekend worden dat de dichtheid van de röntgenfotonen in de kern zo groot is, dat eventueel in de kern geproduceerde gammafotonen door foton-foton interacties met de röntgenfotonen de kern niet kunnen verlaten. Hierdoor zouden de variabele röntgenbron in 3C273 en de gamma-bron niet kunnen samenvallen. De hoeveelheid straling door 3C273 uitgezonden in de gammaband is niet te verwaarlozen t.o.v. de totale hoeveelheid straling uitgezonden over het elektromagnetische spectrum. De maximale helderheid van 3C273 wordt bereikt voor gammastraling van ongeveer 10 MeV. In ieder geval is de totale hoeveelheid energie uitgezonden in de radioband slechts een kleine fractie van die welke uitgezonden wordt in het gamma-gebied.

## 7. Niet-geïdentificeerde galactische gammabronnen

Bij de bespreking van figuur 7 was reeds opgemerkt dat 22 gammabronnen binnen een nauwe band langs  $b = 0^\circ$  liggen. Op het eerste gezicht lijken deze bronnen vrij uniform verdeeld langs het melkwegvlak. Wanneer we evenwel alleen de verdeling van de sterkere bronnen bekijken (bijv. alle bronnen met flux  $\geq 1,3 \times 10^{-6}$  foton  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , de volle cirkels in figuur 7) dan zien we een duidelijke concentratie in het lengte interval binnen  $90^\circ$  van het galactisch centrum. Dit is in het bijzonder waar omdat deze verdeling alleen in het interval  $90^\circ < l < 270^\circ$  als volledig beschouwd kan worden. Daar is namelijk de achtergrondstructuur zo laag in intensiteit dat bronnen met flux  $\geq 1,3 \cdot 10^{-6}$  foton  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  niet gemist kunnen worden. Zo'n concentratie is kenmerkend voor veel galactische populaties van hemellichamen.

Van deze 22 gammabronnen zijn tot nu toe slechts twee bronnen geïdentificeerd (de Krab en Vela pulsar). Voor de overige 20 bronnen bestaat nog geen enkele

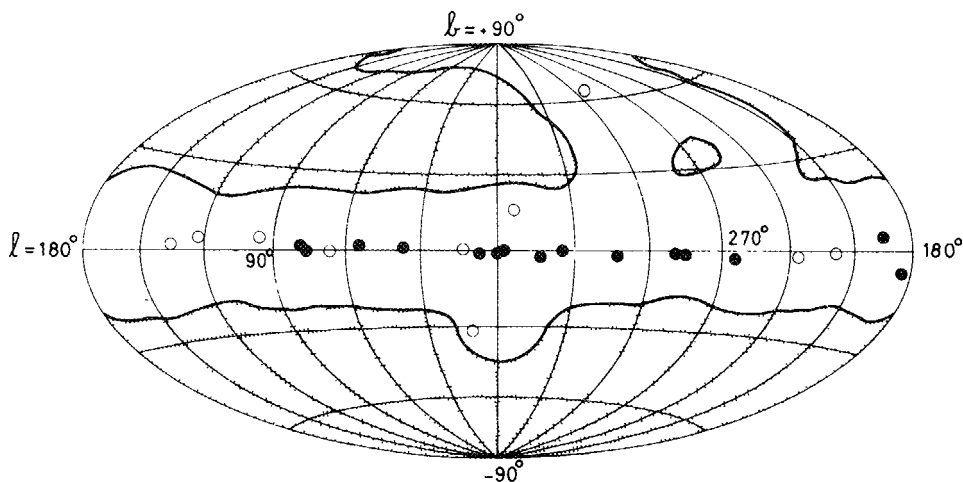


Fig. 7. Hemelkaart in galactische coördinaten met het gebied dat afgezocht is naar gammabronnen (wit) en bronnen waargenomen voor energien boven 100 MeV. De dichte cirkels geven bronnen aan met waargenomen fluxen  $\geq 1,3 \times 10^{-6}$  foton  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Open cirkels geven zwakkere bronnen aan.

zekerheid omtrent hun identiteit. Men moet zich daarbij realiseren dat het typische vermogen dat bij de aarde ontvangen wordt boven 100 MeV van de orde van grootte is van  $10^{-12} \text{Wm}^{-2}$ ; gamma-bronnen overschaduwden de helderste radiobronnen!

We zullen ons in de discussie nu beperken tot de 20 niet-geïdentificeerde bronnen. Bij het zoeken naar tegenhangers van deze gammabronnen in andere golfengtegebieden zijn natuurlijk eerst de meest voor de hand liggende mogelijkheden bekeken, nml.:

- Moleculaire wolken; de sterkte van de waargenomen gammabronnen zou zeer grote massa's vereisen van deze wolken, temeer daar de gemiddelde afstand zeker groter zal zijn dan de afstand van het Orion complex. Dit maakt de identificatie met moleculaire wolken moeilijk, tenzij bronnen van hoogenergetische kosmische stralingsdeeltjes een sterke lokale verhoging van de deeltjes dichtheid veroorzaken. Dit vereist zeer complexe mechanismen. Goede metingen van de  $\text{H}_2$  verdeling zijn nodig om de conclusie te bereiken of mogelijk een deel van de bronnen met zeer zware moleculaire wolken verklaard kunnen worden.
- Bekende radiopulsars; in de richtingen van de waargenomen gammabronnen staan als regel géén bekende radiopulsars.
- Onbekende radiopulsars; omdat de hemel nog onvoldoende is afgezocht naar radiopulsars, is het gebied rond verschillende gammabronnen afgezocht naar radiopulsars. Tot nu toe zonder resultaat.
- "UHURU" röntgenbronnen (röntgenbronnen, waargenomen door de eerste kunstmaan voor onderzoek in de röntgenband; "sterke" röntgenbronnen); er is geen duidelijk correlatie tussen deze röntgenbronnen en de gammabronnen.
- "Einstein" röntgenbronnen (röntgenbronnen, waargenomen door de zeer gevoelige recente kunstmaan Einstein,

"zwakke" röntgenbronnen); het aantal zeer zwakke röntgenbronnen dat door de röntgenkijkers aan boord van deze kunstmaan wordt waargenomen is zo groot, dat het niet verwonderlijk is dat steeds dicht bij een gammabron een röntgenbron wordt aangetroffen. Dit houdt evenwel in dat geen enkele zekerheid bestaat dat de röntgenbron en de gammabron hetzelfde object vertegenwoordigen.

- "Sterke" radiobronnen; er is geen duidelijke correlatie aangetroffen tussen "sterke" radiobronnen en gammabronnen.
- "Zwakke" radiobronnen, hiervoor geldt hetzelfde als voor de "Einstein" röntgenbronnen.
- Supernova resten; geen correlatie met de verzameling van alle supernova resten.

Nadat de meest voor de hand liggende mogelijkheden uitgeput leken, is men gaan zoeken naar heel specifieke deelpopulaties of zeer specifieke combinaties van bijv. objecten en grote dichtheden aan materie. Omdat nog steeds geen *zekere* identificatie voor een deel van de gammabronnen of zelfs voor één enkele bron is gevonden, zullen we nu niet verder ingaan op de pogingen om waarnemingen bij andere golfengtegebieden, wel of niet aan de hand van bronmodellen, te vergelijken met de *verzameling* van niet-geïdentificeerde gammabronnen. We zullen ons beperken tot een fascinerend geval, de gammabron 2CG195 +04, genaamd Geminga.

**8. Geminga: een neutronenster op de stoep of een quasar in het oneindige?**  
De naam van deze zeer sterke gammabron heeft een Italiaanse oorsprong: het object bevindt zich in het sterrenbeeld tweelingen (*Gemini*) en het is een gammabron; het betekent in het dialect van de stad Milaan "bestaat niet" of "het is niet aanwezig". Dit is een zeer toepasselijke naam, want hoewel de gammabron de op een na sterkste is (alleen de Vela gammabron is sterker), was er tot voor kort bij andere golfengten niets opvallends te vinden.

De gammabron was reeds genoemd bij figuur 3, waarin hij op  $l = 195,1^\circ$  en  $b = 4,2^\circ$  duidelijk te zien is. De onzekerheid in de positie is  $\approx 0,4^\circ$ , dus binnen een cirkel met een straal van  $\sim 0,4^\circ$  zou een tegenhanger gevonden moeten worden in metingen bij andere golflengten. Binnen een dergelijk grote cirkel bevinden zich natuurlijk vele sterren en is het ondoenlijk hieruit een keuze te maken. Met de röntgentelescoop aan boord van de Amerikaanse satelliet Einstein zijn binnen deze cirkel echter slechts 2 röntgenbronnen ontdekt. Eén is erg zwak en is geïdentificeerd met een ster met een hete corona. Van dit soort röntgensterren zijn er veel meer gevonden aan de hemel en de kans dat er zich één binnen de cirkel bevindt is dan ook erg groot. Dat zo'n ster gammastraling produceert is hoogst onwaarschijnlijk. De tweede bron is aanzienlijk sterker, zij het dat de hoeveelheid door Geminga uitgezonden energie in de gamma-band minstens 1000 maal groter is, dan de energie uitgezonden door de röntgenbron in röntgenstraling. Uit het zeer zachte spectrum van de röntgenbron kan worden afgeleid dat er vrijwel geen röntgenstraling wordt geabsorbeerd door het interstellair medium. Dit betekent dat de afstand niet veel groter is dan ongeveer 100 pc.

De onzekerheid op de röntgenpositie is slechts  $3''$  (boogseconden), voldoende nauwkeurig voor een optische identificatie. Recentelijk is met een CCD camera aan een 3,6 meter telescoop een heel zwak object gevonden met magnitude  $m_V \approx 21,2^m$ , dat sterker in het blauwe gedeelte van het zichtbare licht straalt, dan andere objecten in de directe omgeving. Als de identificatie juist is, dan is het object ongeveer 200 maal

sterker in röntgenstraling dan in het zichtbare licht.

Er is geen enkel extragalactisch object bekend met een dergelijke extreme eigenschap. Van de galactische objecten zou alleen een radiopulsar aan alle eigenschappen kunnen voldoen. Ondanks verscheidene pogingen is er echter nog geen radiopulsar gevonden! Er is zelfs helemaal geen radiobron gevonden op de positie van de röntgenbron in lage waarnemingen met de Westerbork radiotelescoop en de VLA (Very Large Array) in Amerika.

Het object is volkomen uniek en een goede kandidaat voor de Geminga gammabron. Samenvattend, Geminga zou kunnen zijn een zeer nabijgelegen ( $\sim 100$  pc als bovenlimiet op de afstand) neutronenster, waarvan geen pulsatie is waargenomen.

Het verhaal betreffende Geminga is evenwel nog niet volledig. In de cirkel met een straal van  $0,4^\circ$  om de positie van de gammabron zijn wel verscheidene radiobronnen waargenomen, die niet samenvallen met de röntgenbronnen. De sterkste radiobron is optisch geïdentificeerd met een quasar. Omdat de quasar 3C273 reeds waargenomen is in gammastraling, lijkt het niet onredelijk om de nieuwe quasar te beschouwen als kandidaat voor de Geminga gammabron. Ook nu weer ontmoeten we grote problemen: de afstand van de quasar is bepaald op ongeveer  $10^{10}$  pc (!), en de bron zou dan een helderheid hebben van ongeveer  $5 \times 10^{42} W$  in gammastraling! Dit is zelfs drie orden van grootte meer dan de nog onverklaarde gammahelderheid van 3C273. Het is volstrekt duidelijk dat de Geminga gammabron een mysterie vertegenwoordigt, zelfs nu nog, acht jaar na zijn ontdekking.