

Seminarvortrag zur Astrophysik WS 07/08



Thema: Satellitengebundene Gammastrahlungsexperimente (CGRO, INTEGRAL, GLAST)

Referent: Fritz-Walter Schwarm



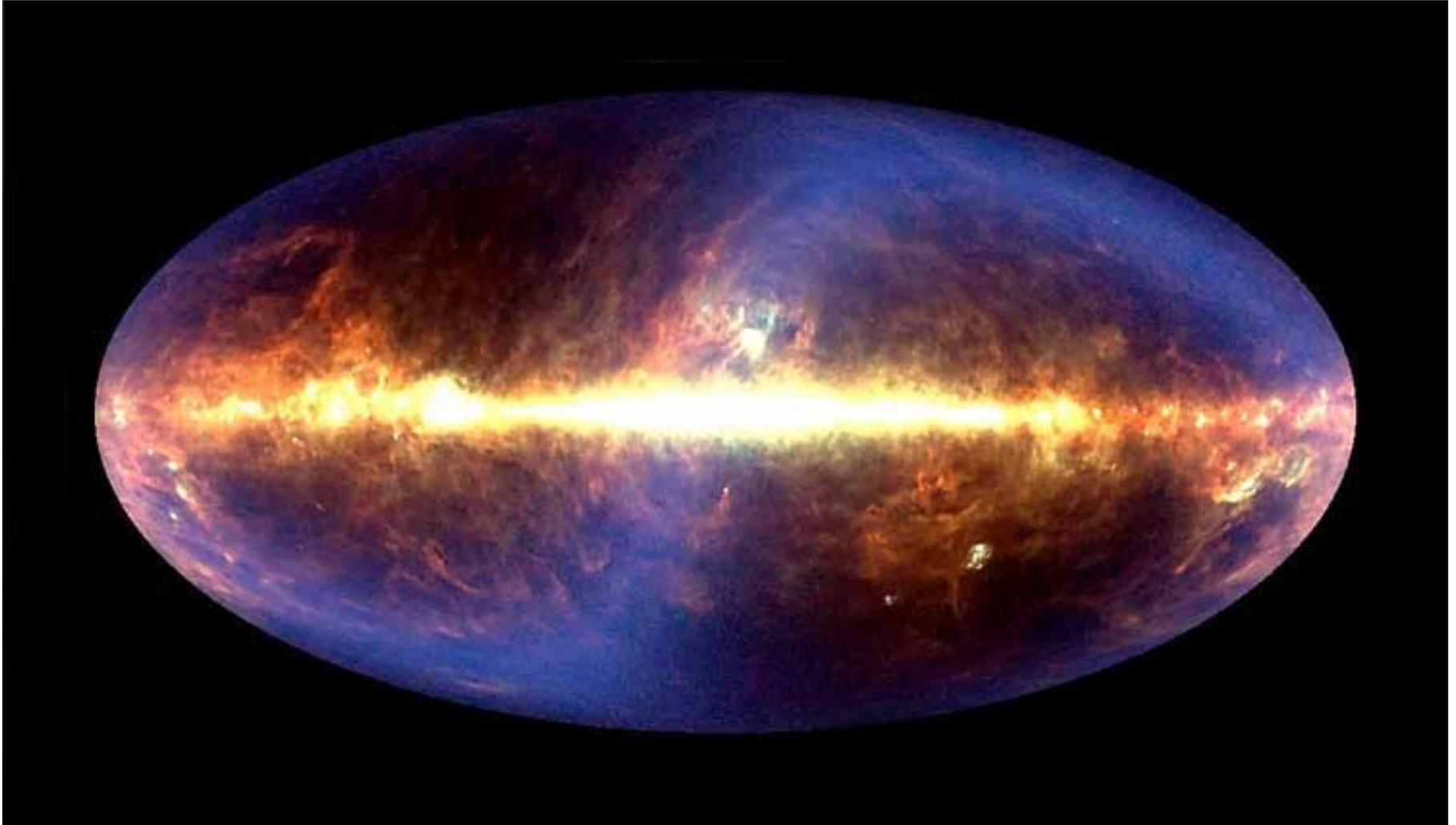
Inhaltsverzeichnis

- 1.) Quellen kosmischer Gammastrahlung
- 2.) Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie
- 3.) Detektoren
- 4.) Detektoren an Bord von INTEGRAL
- 5.) Ergebnisse der INTEGRAL Mission
- 6.) Ausblick: GLAST

Gammastrahlung:

- Energie > 10 keV
- vollständig durch Atmosphäre absorbiert
- schwer nachzuweisen:
 - indirekt durch Cherenkowstrahlung
 - Ballons
 - Satelliten
- Astronomische Quellen:
 - Elektron-Positron-Annihilation (511 keV Linie)
 - Radioaktiver Zerfall (z.B. von ^{26}Al)
 - Supernovaüberreste
 - Synchrotron-Selbst-Compton (von stark beschleunigten geladenen Teilchen)

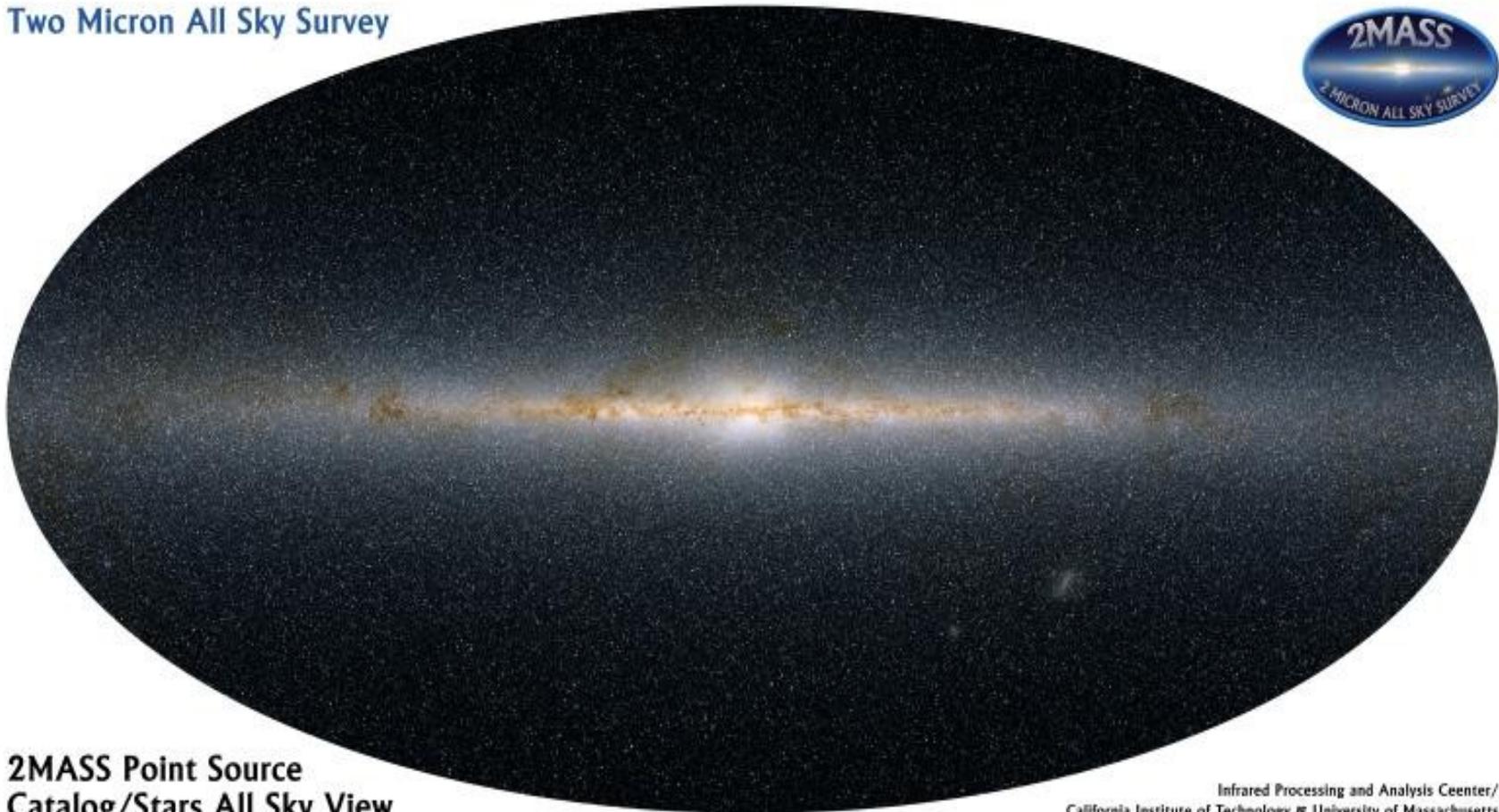
Die Milchstraße ($60 \mu\text{m} < \lambda < 240 \mu\text{m}$)



- blau entspricht $60 \mu\text{m}$
- grün entspricht $100 \mu\text{m}$
- rot entspricht $240 \mu\text{m}$

Die Milchstraße ($\lambda = 2 \mu\text{m}$)

Two Micron All Sky Survey

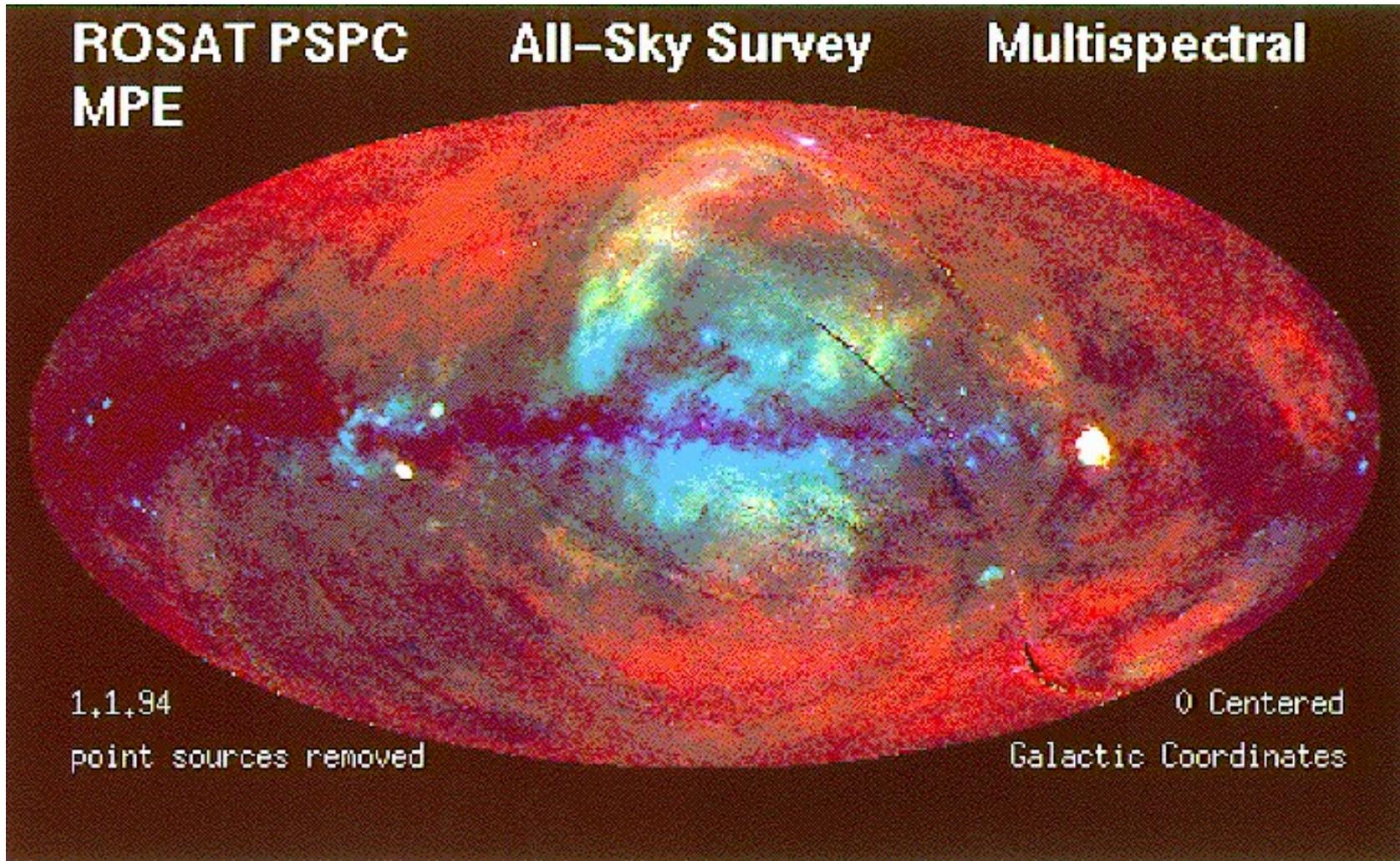


2MASS Point Source
Catalog/Stars All Sky View

Infrared Processing and Analysis Center/
California Institute of Technology & University of Massachusetts

- Infrarotstrahlung
- Galaktische Ebene
- Bulge

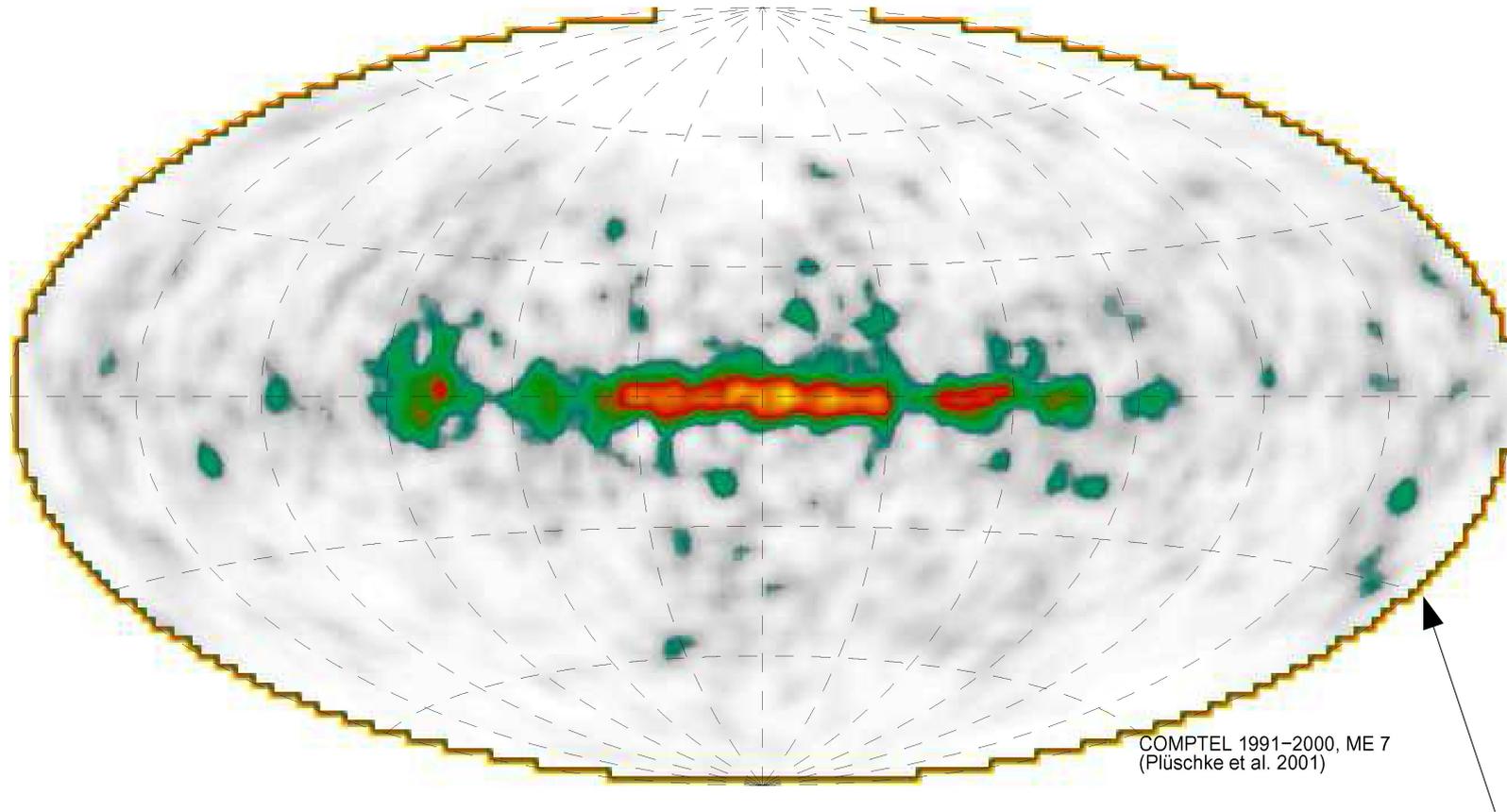
Die Milchstraße ($0.1 \text{ keV} < h\nu < 2 \text{ keV}$)



- blau entspricht 0.9 – 2 keV
- gelbgrün entspricht 0.5 – 0.9 keV
- rot entspricht 0.1 – 0.4 keV (Halo)

Vela-Supernovaüberrest

Die Milchstraße ($h\nu = 1808.65 \text{ keV}$)

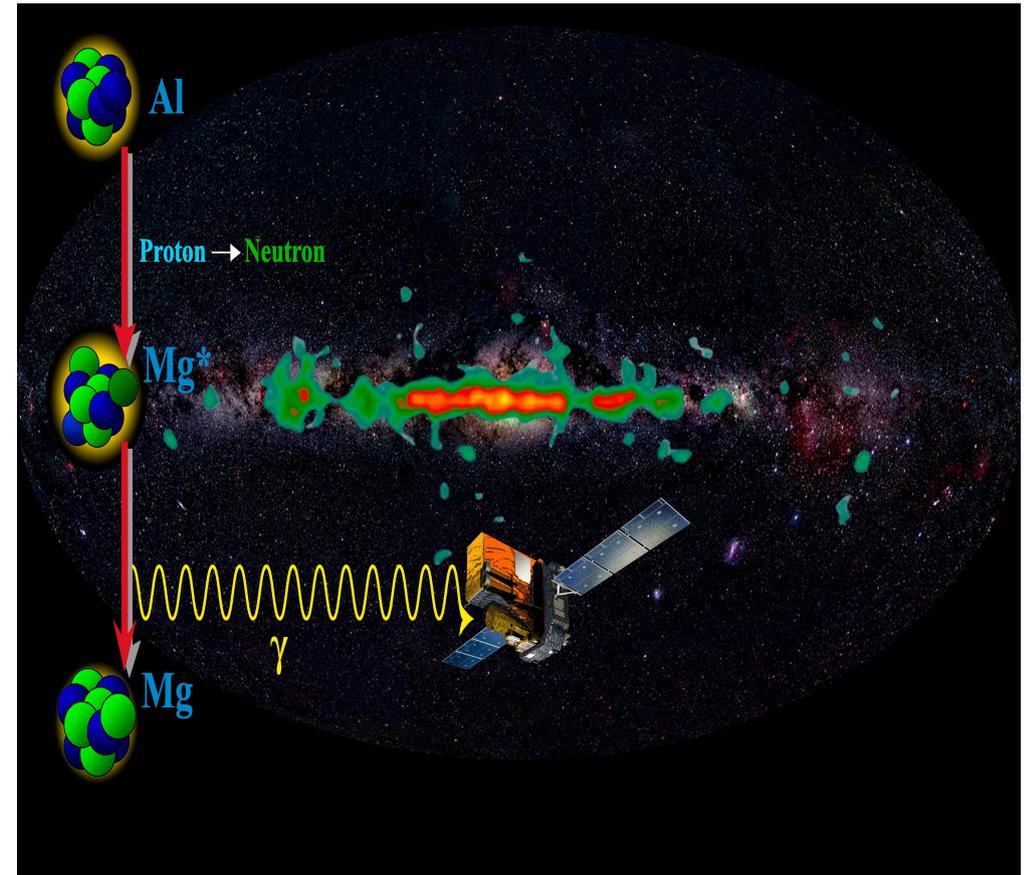


Orionnebel

- ^{26}Al Linie
- Entstehungsort sind junge massereiche Sterne
- Hauptsächlich im gal. Zentrum
- Sternentstehungsregionen

Die ^{26}Al -Linie

- Junger massereicher Stern
- Es entstehen schwere Elemente wie ^{26}Al
- Beim Zerfall von ^{26}Al ($T=720000\text{a}$) entsteht ein angeregter Mg-Kern
- $\text{Mg}^* \Rightarrow \text{Mg} + \gamma$
- Galaxie:
 - 2.8 Sonnenmassen ^{26}Al , daher SN Rate von 1.9 / 100 Jahre



Die 511 keV - Linie

- „heiße“ Positronen entstehen z.B. durch:
 - radioaktiven Zerfall
 - Schwarze Löcher
 - rotierende Neutronensterne
 - eventuell aus der Annihilation dunkler Materie
- Positronen werden auf etwa 100 eV abgebremst
- Es bilden sich „Positroniumatome“ mit einer Lebensdauer von etwa 100 ns
- Positronen zerstrahlen mit Elektronen zu Photonen
- auf den Zentralbereich der Milchstraße konzentriert

Active Galactic Nuclei (AGN)

- sehr helles galaktisches Zentrum emittiert Strahlung aller Wellenlängen
- Seyfert – Galaxie
- Quasar (Quasi-Stellar-Radiosource)
- „Jets“ geladener Teilchen
- ein Blazar ist ein Quasar dessen Jet genau auf das Teleskop gerichtet ist

CGRO – INTEGRAL – GLAST

CGRO (Compton Gamma Ray Observatory)

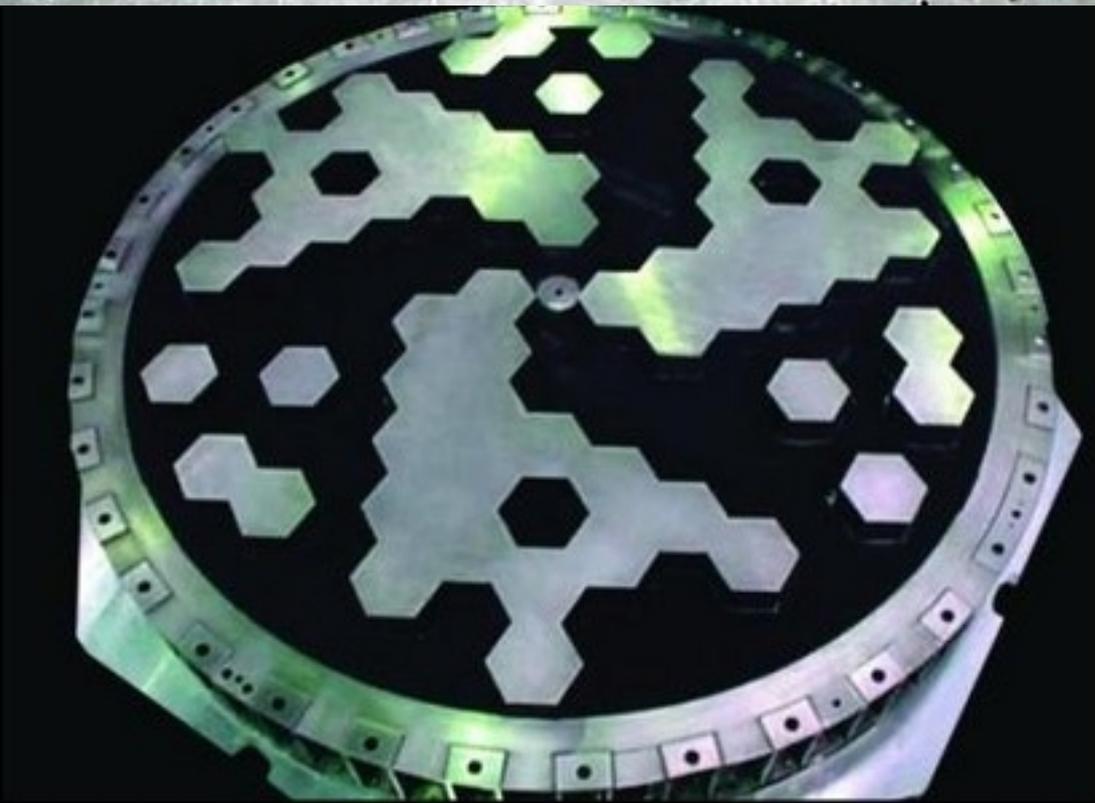
- ausgesetzt am 05. April 1991 vom Spaceshuttle Atlantis
- 16329 kg schwer!
- Teleskope EGRET und COMPTEL
- 04. Juni 2000 kontrolliert zum Absturz gebracht

INTEGRAL (International Gamma Ray Astrophysics Laboratory)

- Start am 17. Oktober 2002 auf russischer PROTON Rakete
- 3954 kg

GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope)

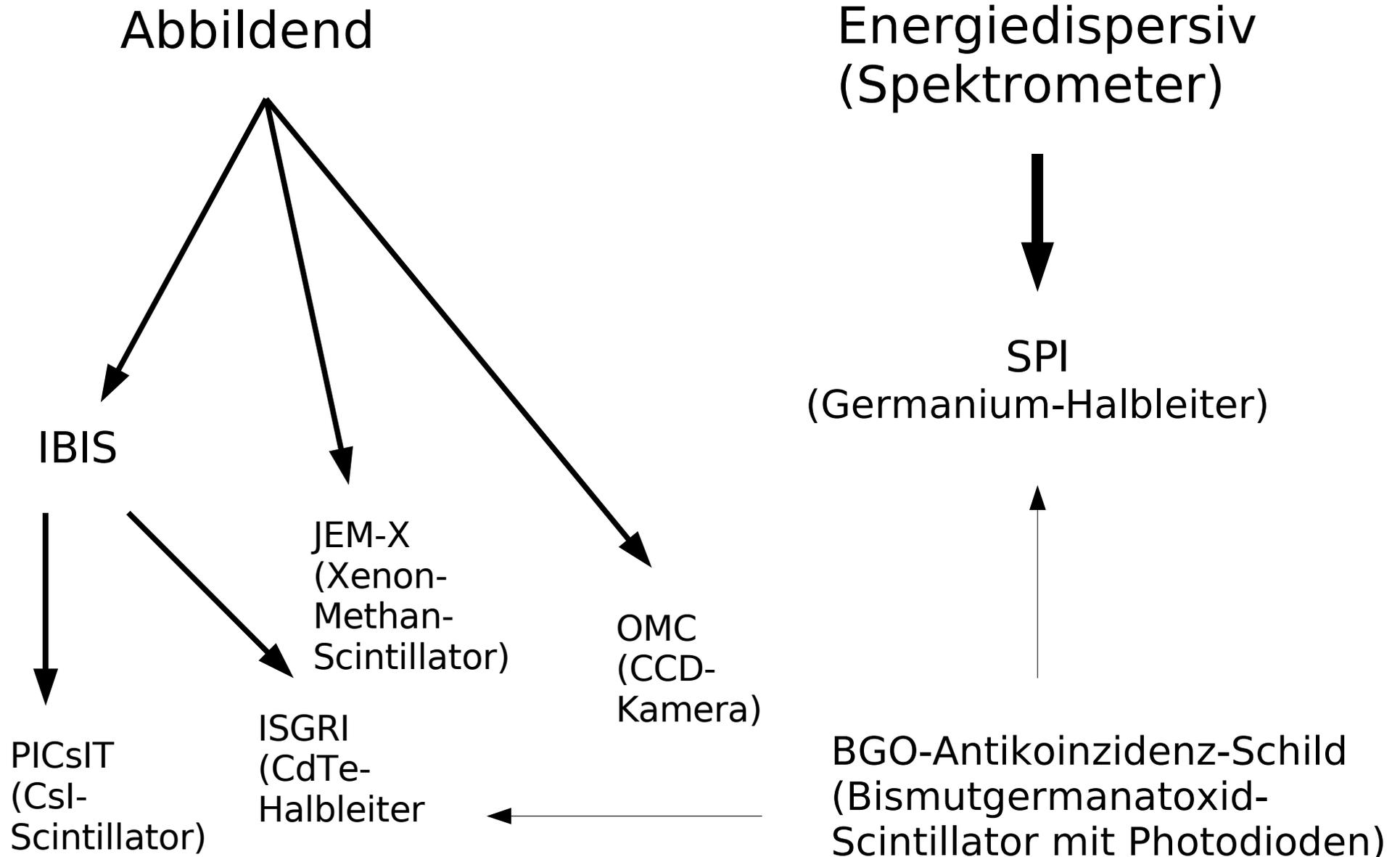
- etwa 4 Tonnen schwer
- an Bord befinden sich das LAT (Large Area Teleskop) und der GBM (Glast Burst Monitor)
- voraussichtlicher Start im >Mai 2008



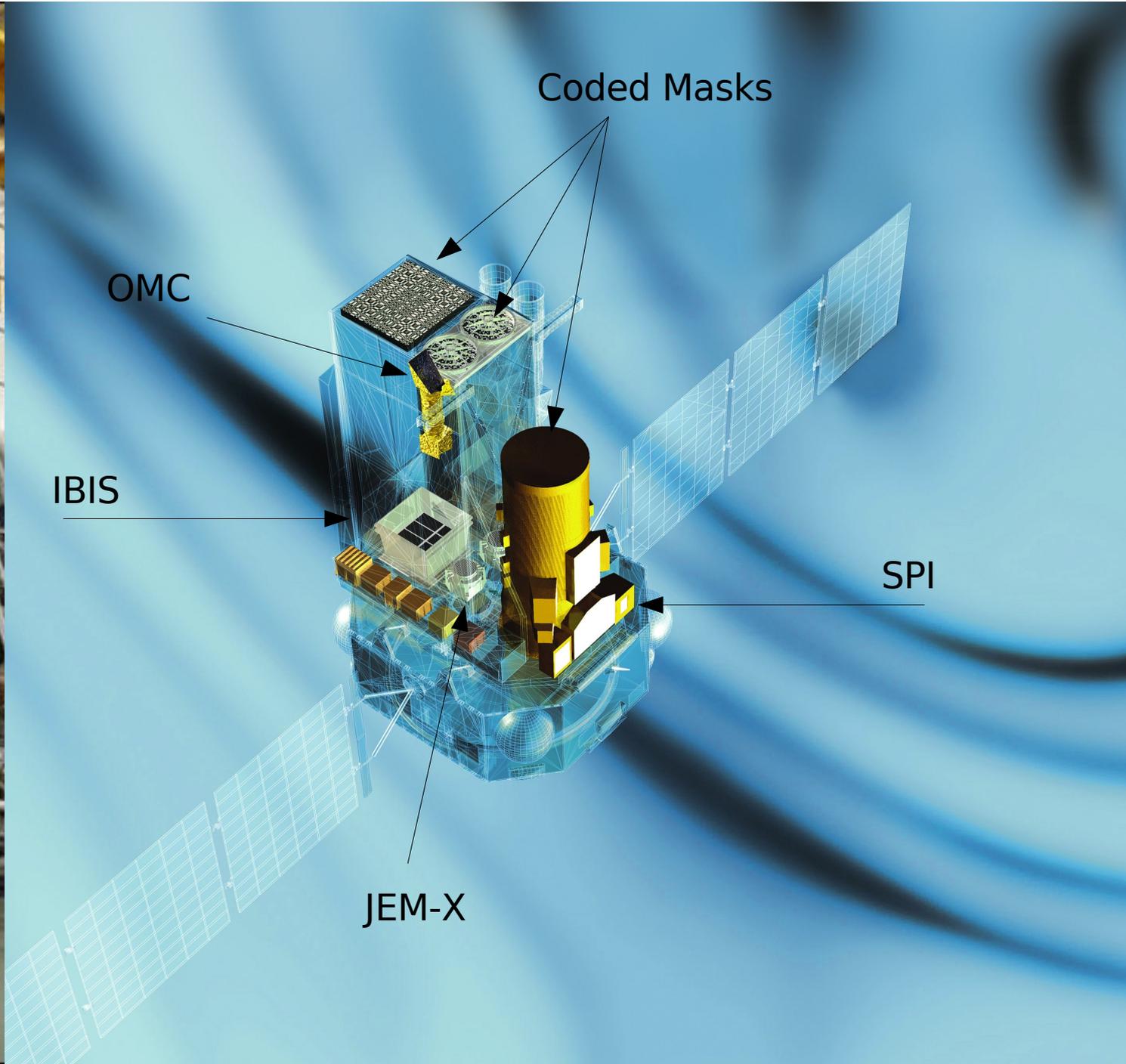
Coded Mask

- Abbildung durch Linsen unmöglich
- dichte Maske (Wolfram)
 - oben: IBIS
 - unten: SPI
- Schattenbild
- Nachteil: Auflösung
- Alternative: Comptonteleskope

Detektoren an Bord von INTEGRAL

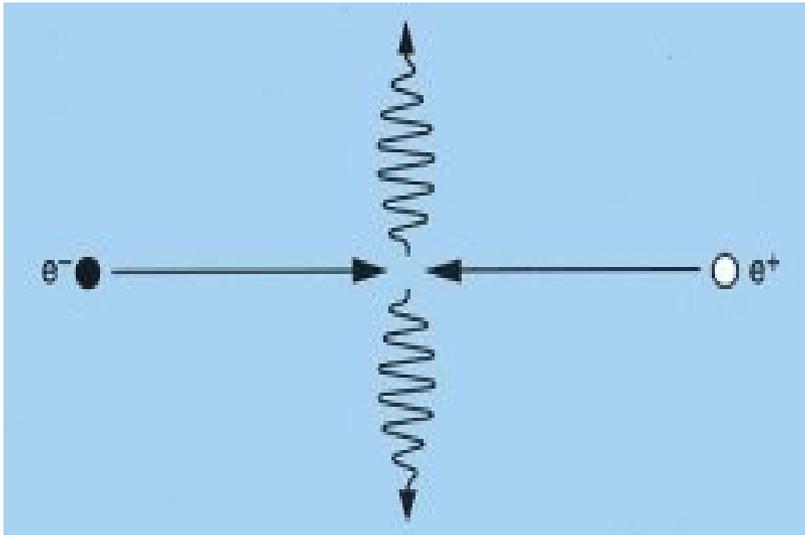


INTEGRAL

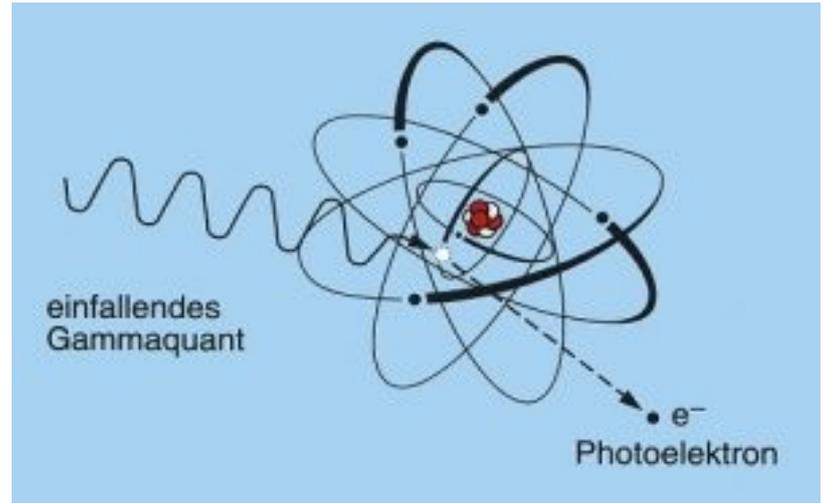


Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie

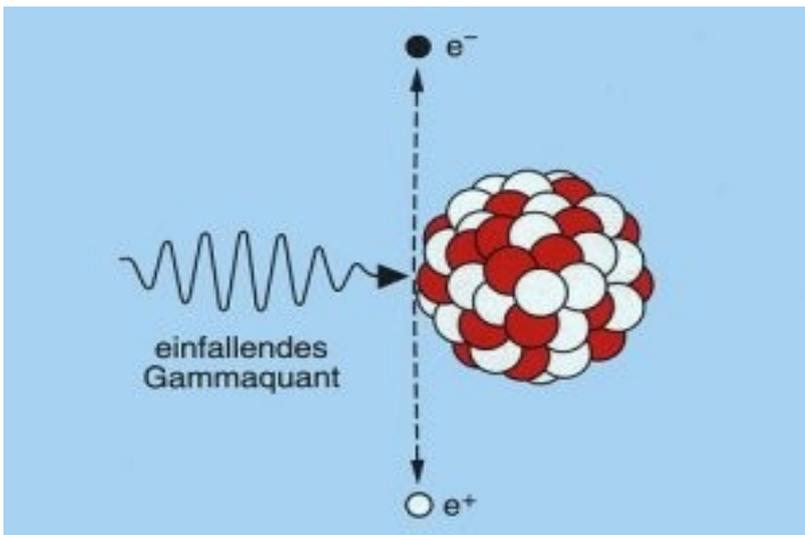
Elektron-Positron-Vernichtung



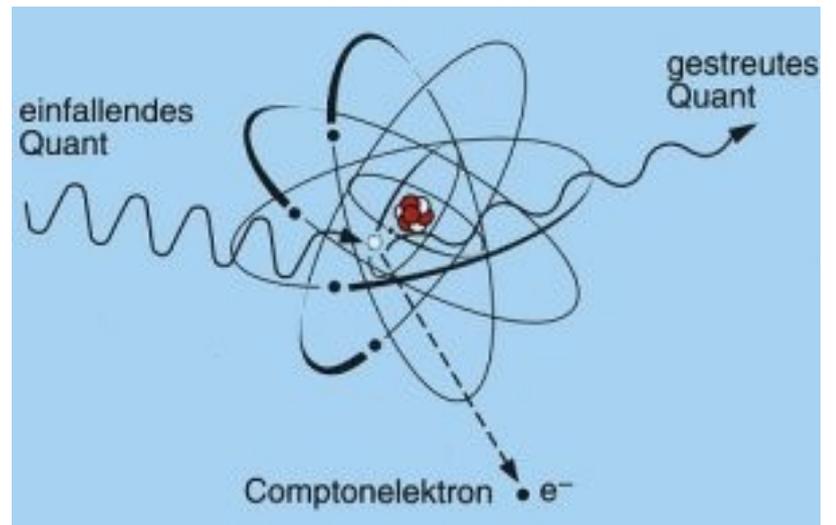
Photoeffekt



Paarbildung

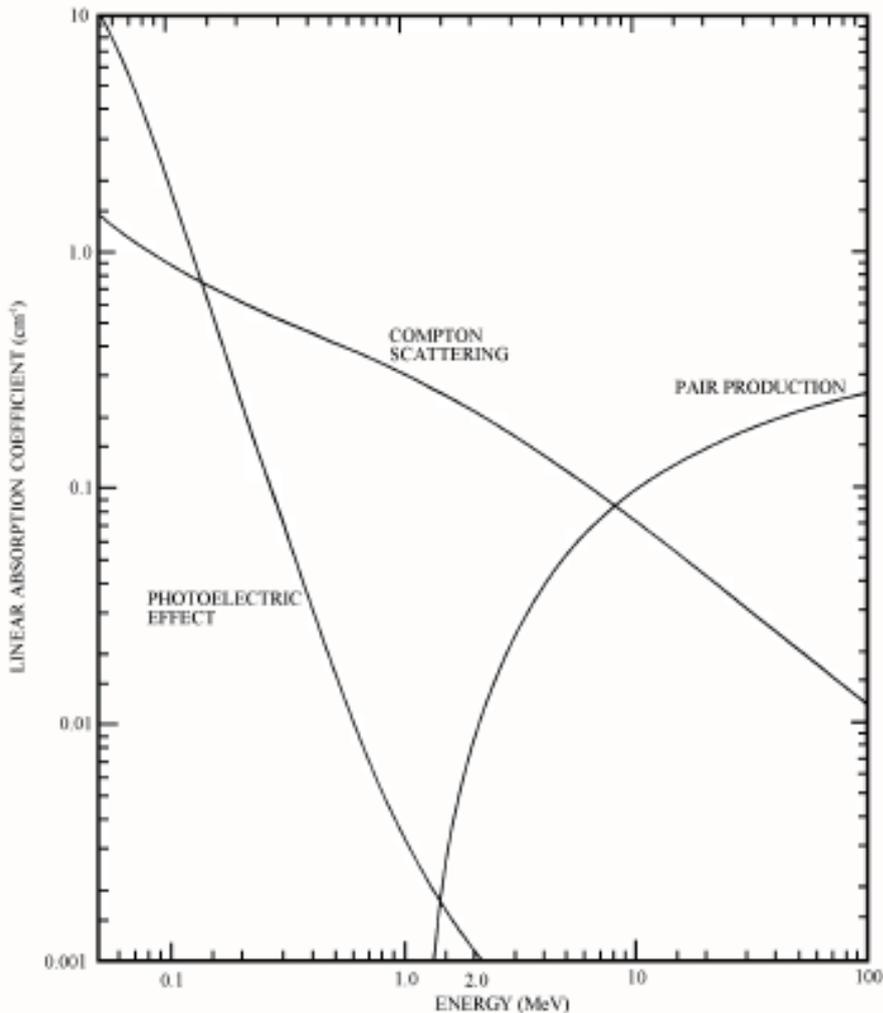


Comptoneffekt



Wechselwirkung (WW) von Gammastrahlung mit Materie

Absorptionskoeffizient von Germanium



Photoeffekt

- WSKT $\sim \frac{Z^5}{E^{3.5}}$

- Photon wird vollständig absorbiert

Comptonstreuung

- WSKT $\sim Z$

- Photon verliert max. die Energie

$$E_{\gamma,0} - E_{\gamma} = \frac{E_{\gamma,0}}{1 + \frac{mc^2}{2E_{\gamma,0}}}$$

Paarbildung

- WSKT $\sim \sqrt{Z}$

- Sekundärphotonen aus der Annihilation des Positrons

Allgemeine Detektoreigenschaften

Energieauflösung

- FWHM (Full Width at Half Maximum)
- Gaußverteilung: $FWHM = 2.35\sigma$
- Energieauflösung: $R = \frac{FWHM}{E_0}$
- dimensionslose Größe (z.B. 5-10% bei Szintillationsdetektoren im Gammabereich)
- Auflösung durch statistische Schwankungen begrenzt:

$$R_{Stat. Limit} = 2.35 \sqrt{\frac{F}{N}}$$

mit dem Fano Faktor F:

- $F \ll 1$ für Halbleiterdetektoren
- $F \approx 1$ für Szintillationsdetektoren

Einige verschiedene Detektortypen

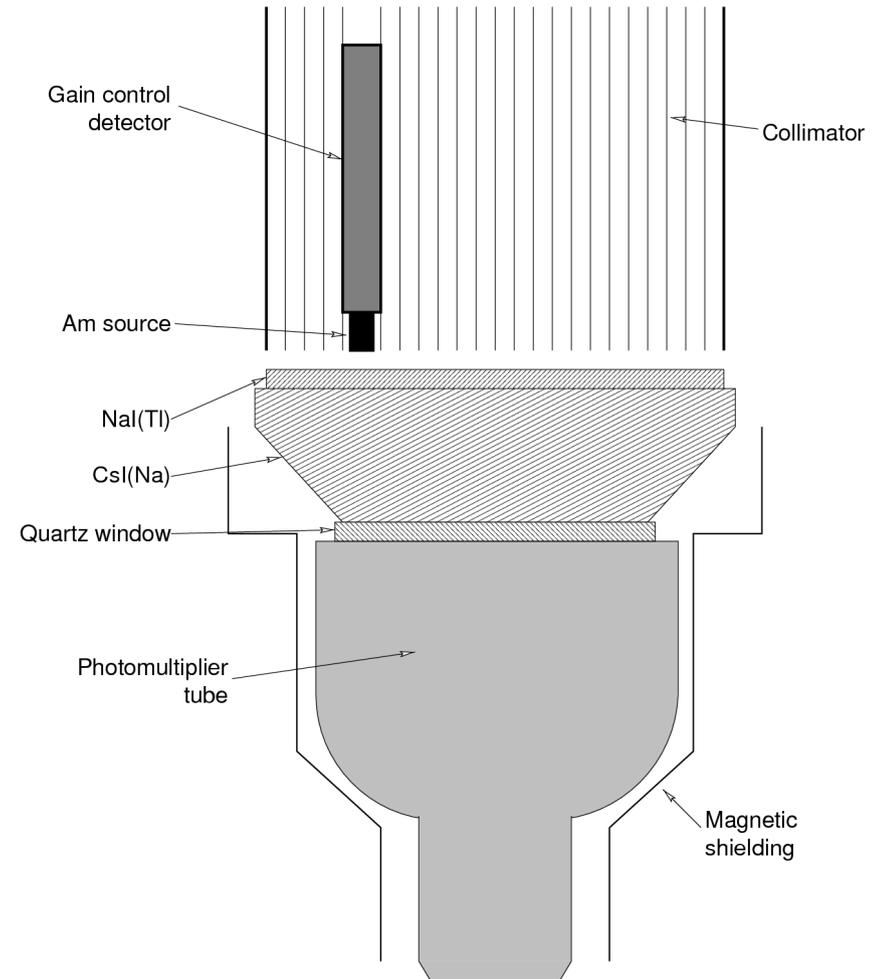
- Ionisationskammer
- Proportionalzähler
- Geigermüllerzählrohr
- **Szintillationsdetektoren**
 - organisch
 - **anorganisch**
- **Halbleiterdetektoren**

Szintillations - Detektoren

- Szintillationskristall (z.B. NaI(Tl))
- hochenergetische Photonen erzeugen Szintillationen
- Photomultipliertubes (PMT) registrieren Sekundärlicht

Vorteile:

- vergleichsweise günstig
- PMT liefern ein starkes Ausgangssignal



Nachteile:

- geringe Energieauflösung

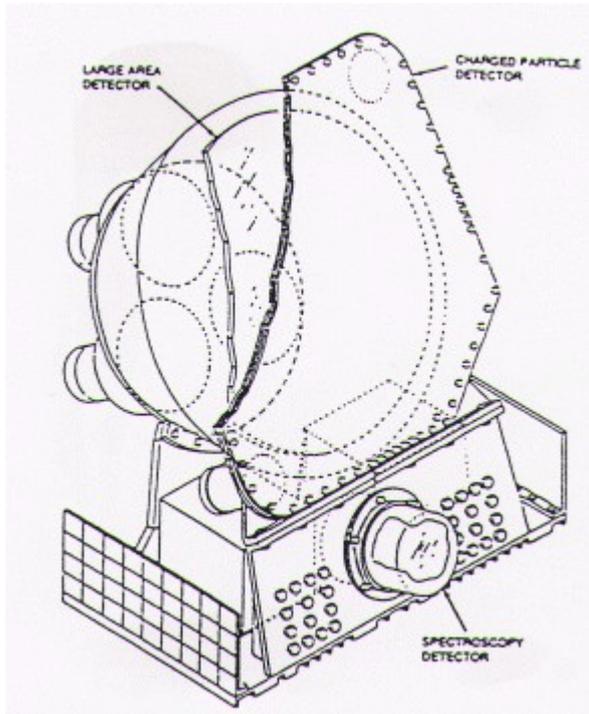
Szintillationskristalle

NaI (TI)

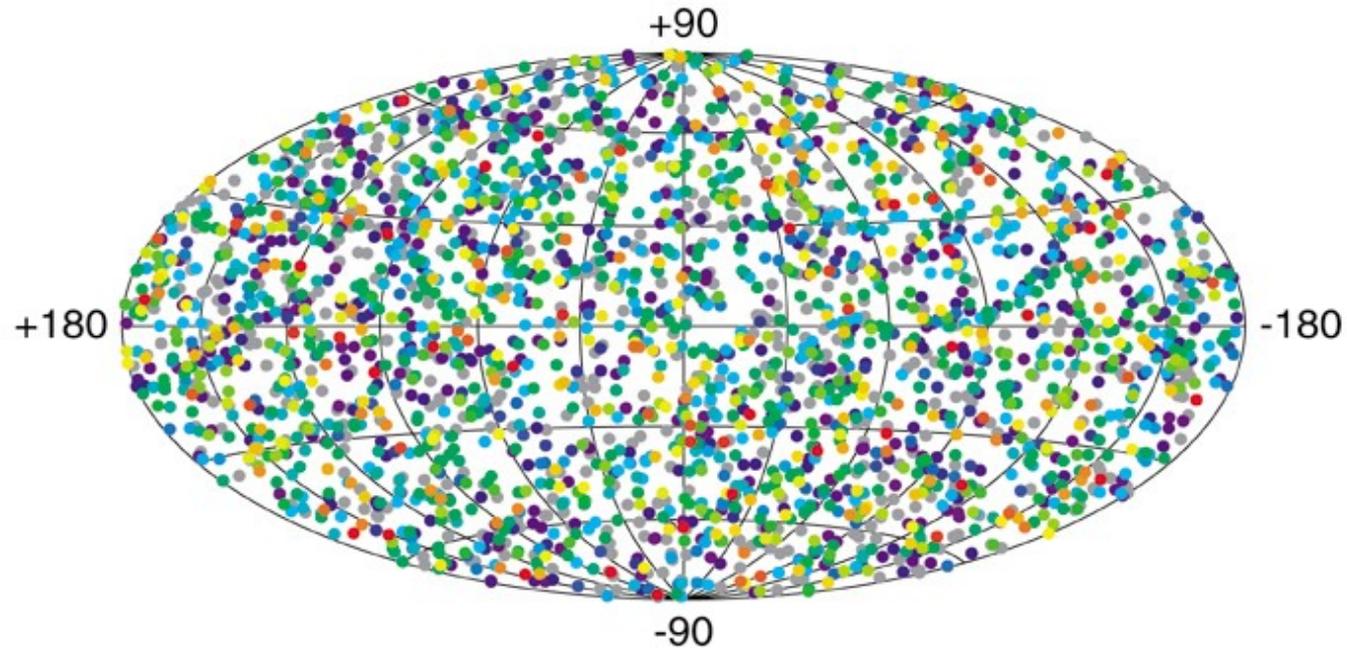
- am gebräuchlichsten
- sehr gute Lichtausbeute
- enorme Wasser-, Stoß- und Hitzeempfindlichkeit
- lange Abklingzeit von etwa 230ns

BATSE (Burst And Transient Source Experiment)

- GRB
- 8 identische Module
- gesamter Himmel abgedeckt



2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

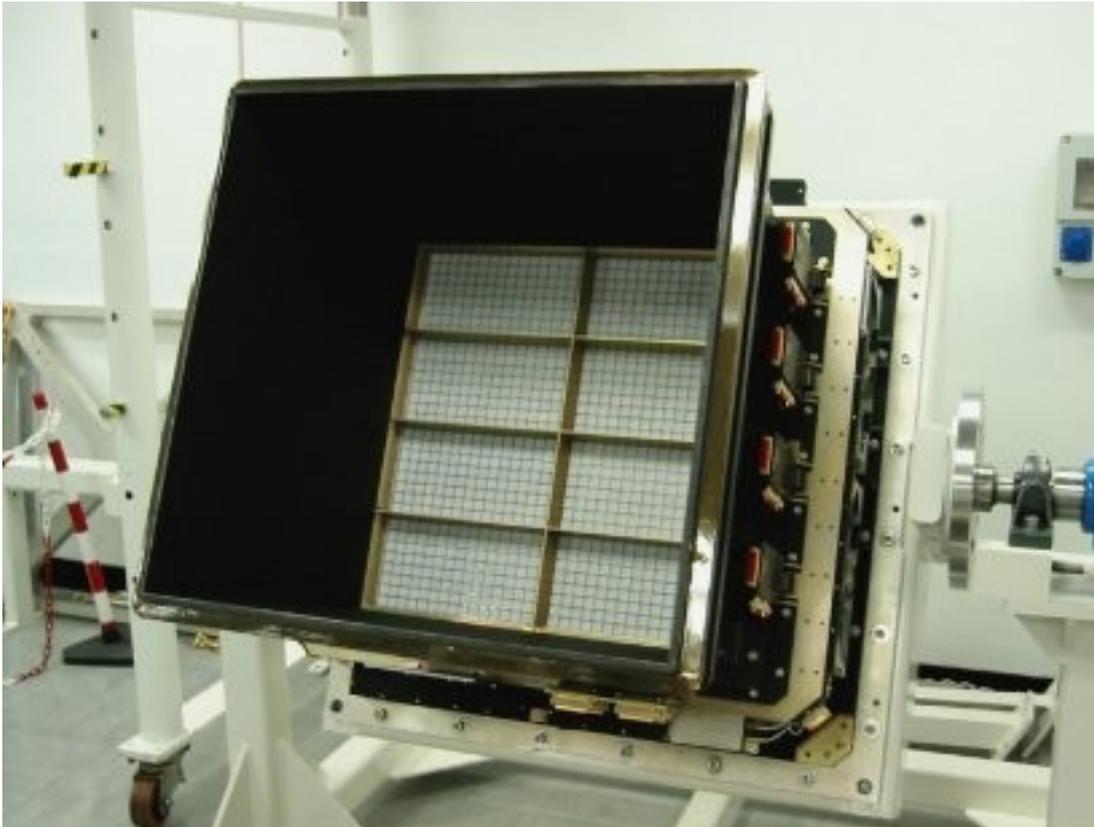


Szintillationskristalle

CsI (TI) (thallium-dotiertes Cäsium Iodid)

- größerer Absorptionskoeffizient für Gammastrahlung als NaI (TI)
 - weniger zerbrechlich als NaI (TI)
 - Abklingzeit hängt vom detektierten Teilchen ab
 - Emissionsspektrum hin zu grösseren Wellenlängen verschoben
-
- nicht ausgelegt für Standard – PMT
 - jedoch effizienter als NaI, unter Verwendung spezieller Photodioden

IBIS (Imager on Board of Integral Satellite)



- 2 Detektorschichten
 - 2600 cm² (CdTe)
 - 3100 cm² (CsI)
- Coded Mask
- 15 keV – 10 MeV
- Winkelauflösung 12'

ISGRI

- 15 keV – 1 MeV
- 128 x 128 Pixel (CdTe)
- Energieauflösung: 3%

PICsIT

- 175 keV – 10 MeV
- 64 x 64 Pixel (CsI)
- Energieauflösung: 10 – 16 %

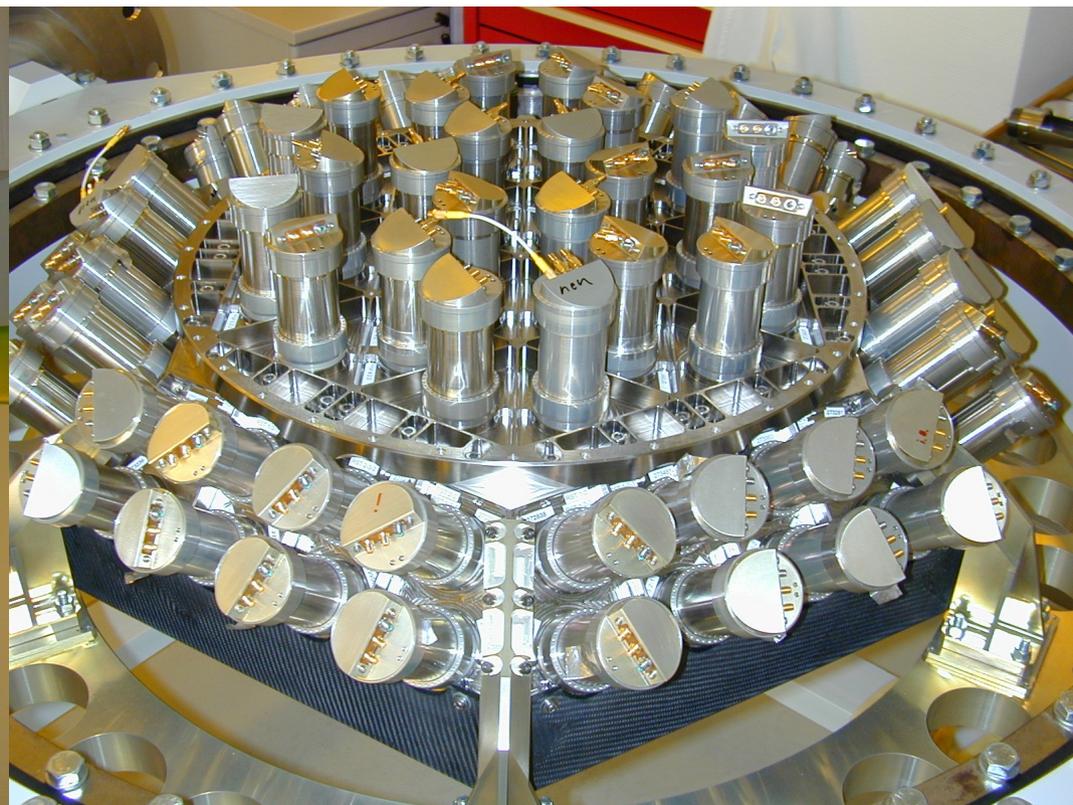
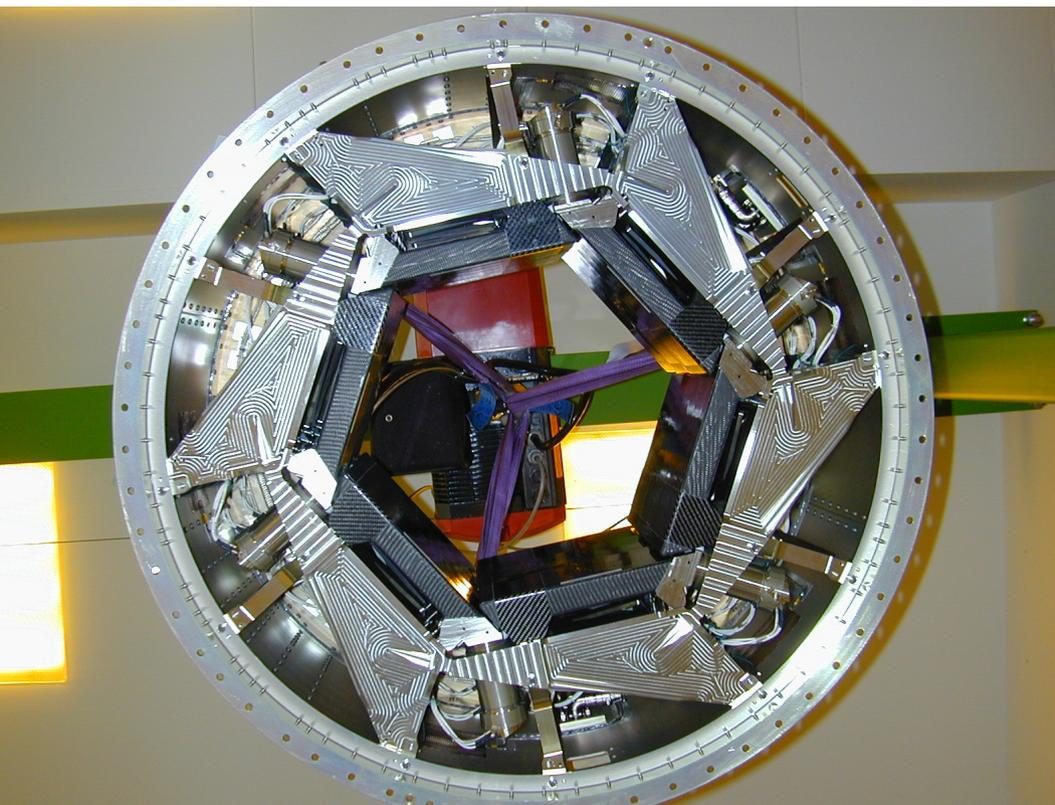
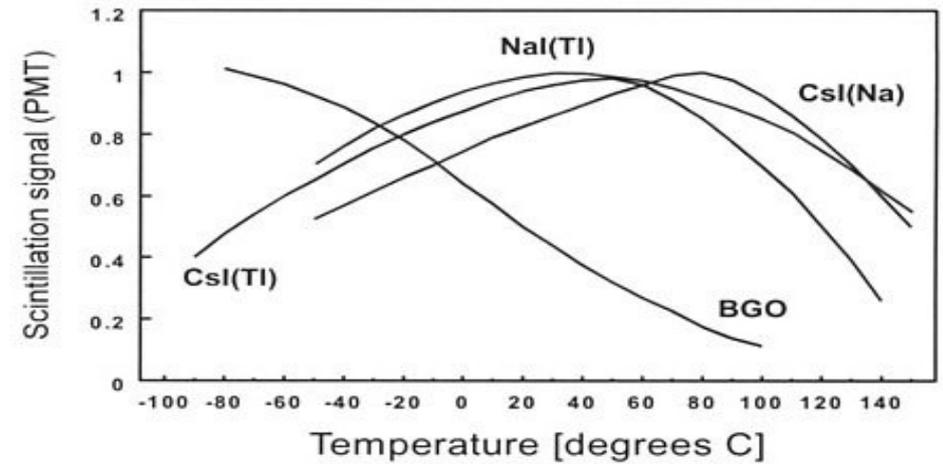
Szintillationskristalle

BGO (Bismut Germanat Oxid)

- hohe Dichte von 7.3 g/cm^3 und hohe Ordnungszahl der Bismutkomponente (83)
- Szintillatormaterial mit der grössten Gammaabsorptionswahrscheinlichkeit
- vergleichsweise unempfindlich
- dafür nur etwa 10-20% der Lichtausbeute von NaI (und damit schlechte Energieauflösung)
- etwa 2-3 mal so teuer wie NaI

BGO Antikoinzidenz Schild

- registriert unerwünschte Photonen von der Seite
- in Antikoinzidenz geschaltet mit SPI

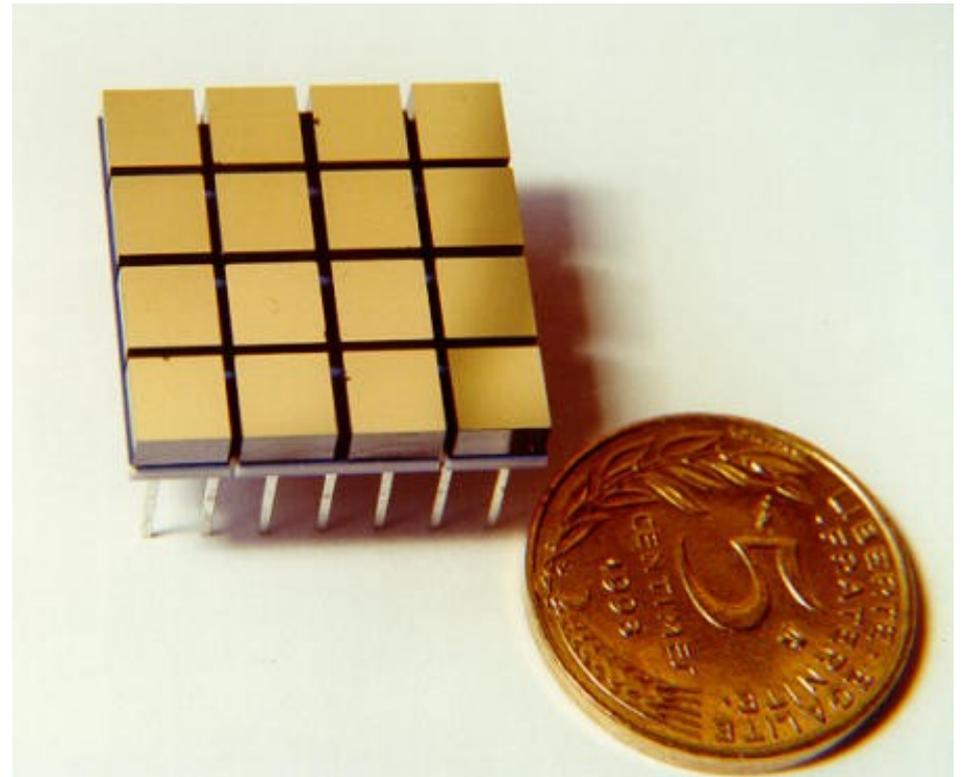


Halbleiter - Detektoren

- Gammaphotonen erzeugen Elektron – Loch Paare
- die Elektron – Loch Paar werden getrennt und können ins Leitungs- bzw. Valenzband gelangen
- es entsteht ein zur Energie des Gammaquants proportionaler Strom

Vorteile:

- sehr gute Energieauflösung
- Germanium hat hohe Dichte



16 CdTe Detektoren (IBIS/ISGRI)

Nachteile:

- Kühlung nötig
- Ausgangssignal ist schwach
- geringere Effizienz

SPI (Spectrometer on Integral)

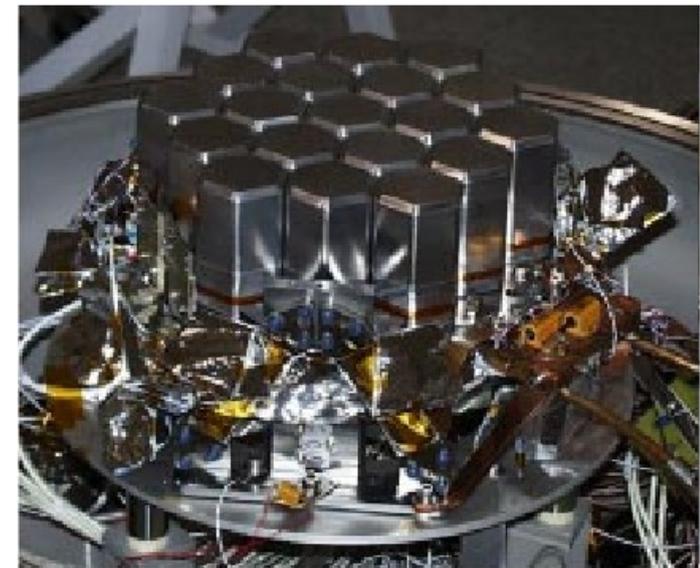
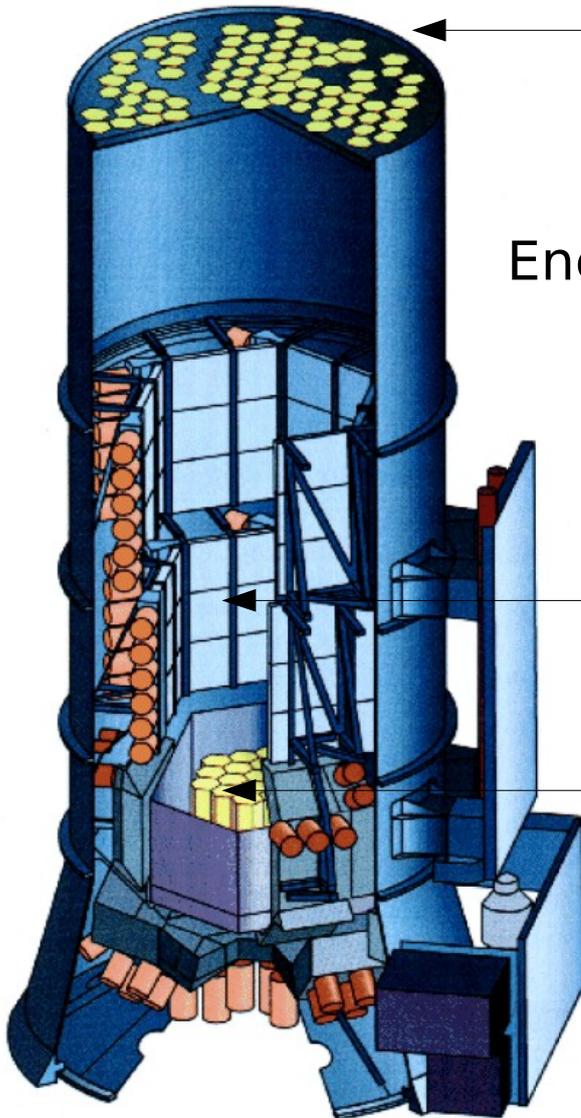
Maske aus 127 hexagonalen Wolfram Elementen

Energieauflösung: $\approx 0.1\%$

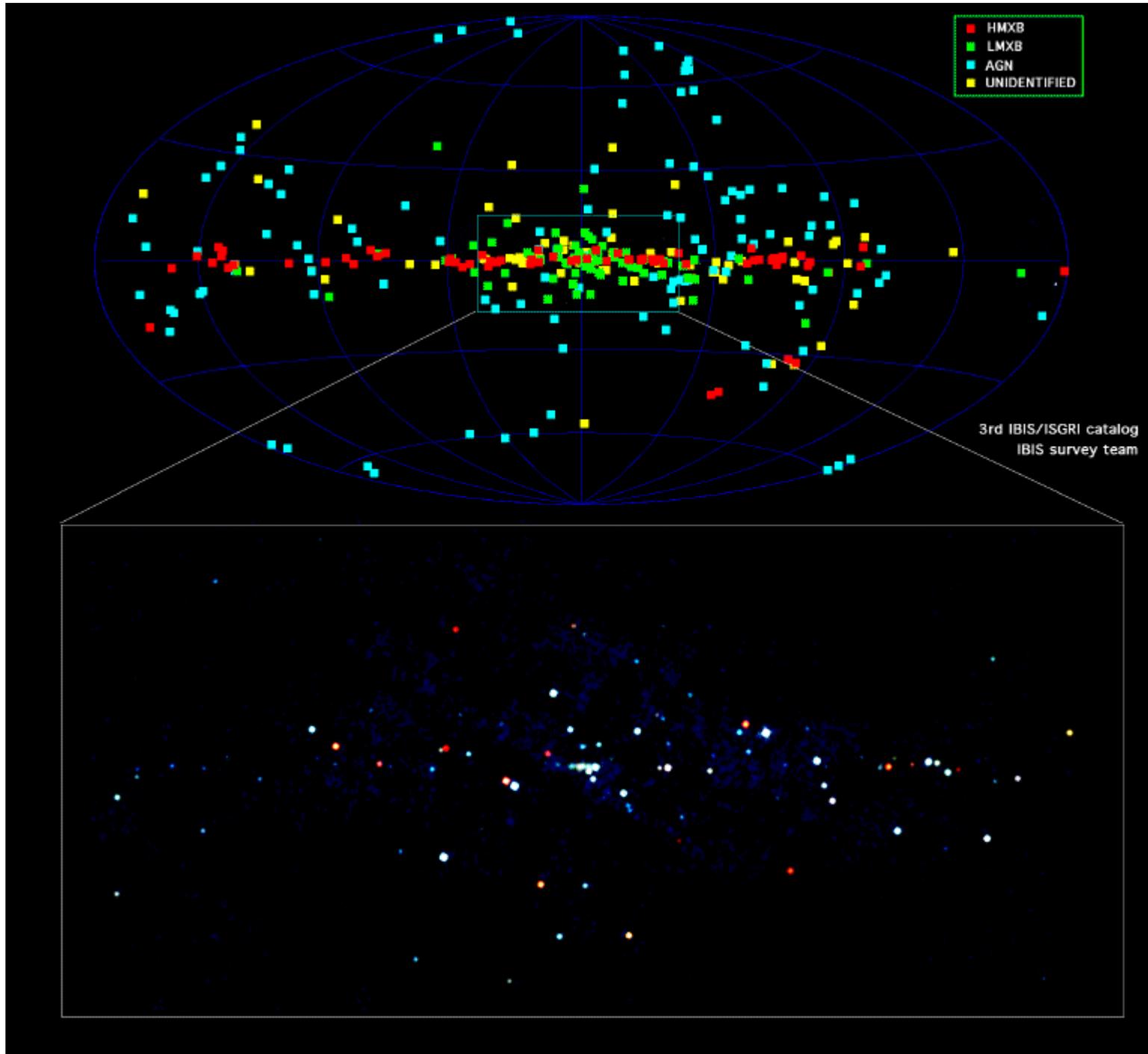
Antikoinzidenz-Schild

19 Germaniumdetektoren

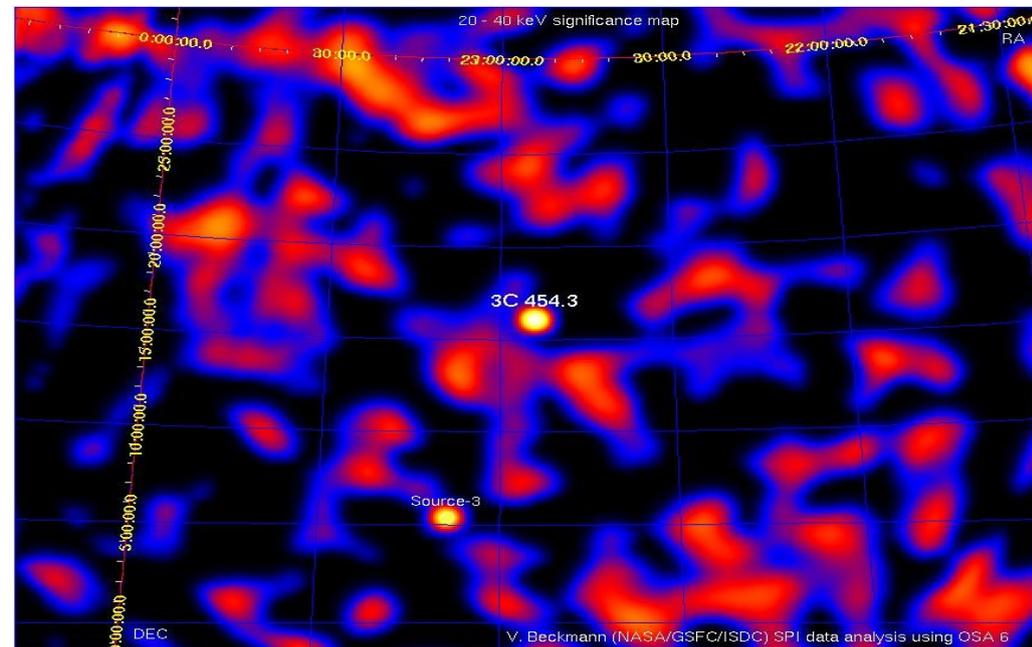
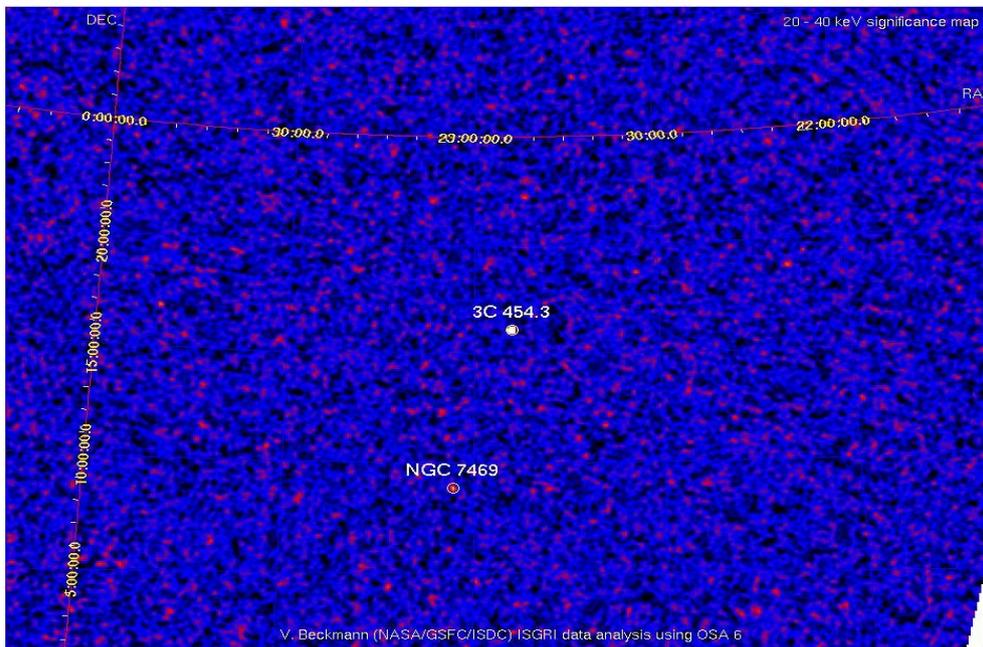
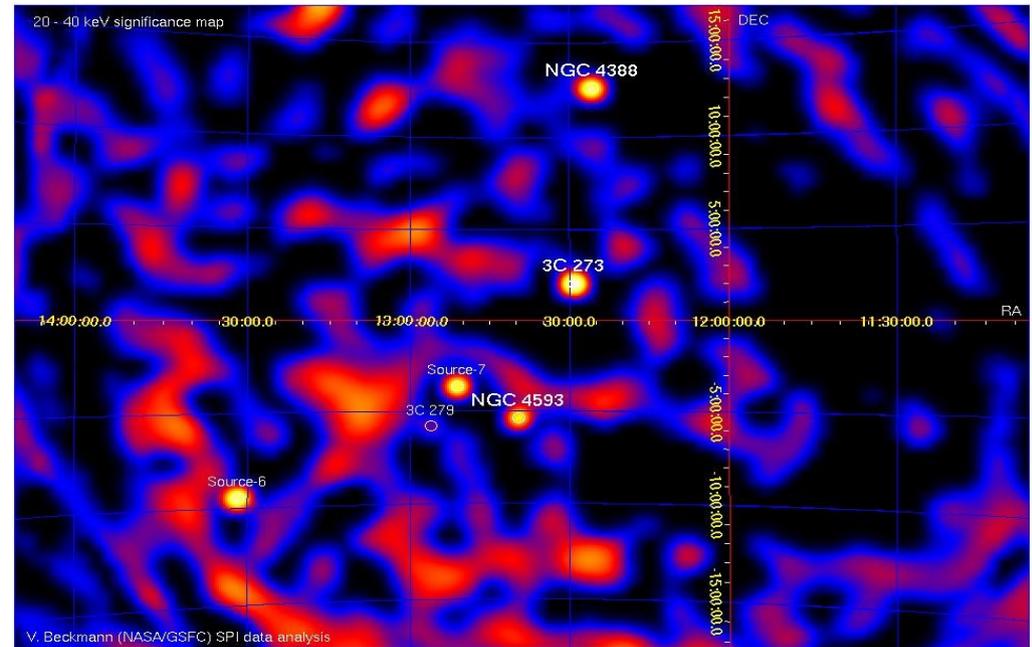
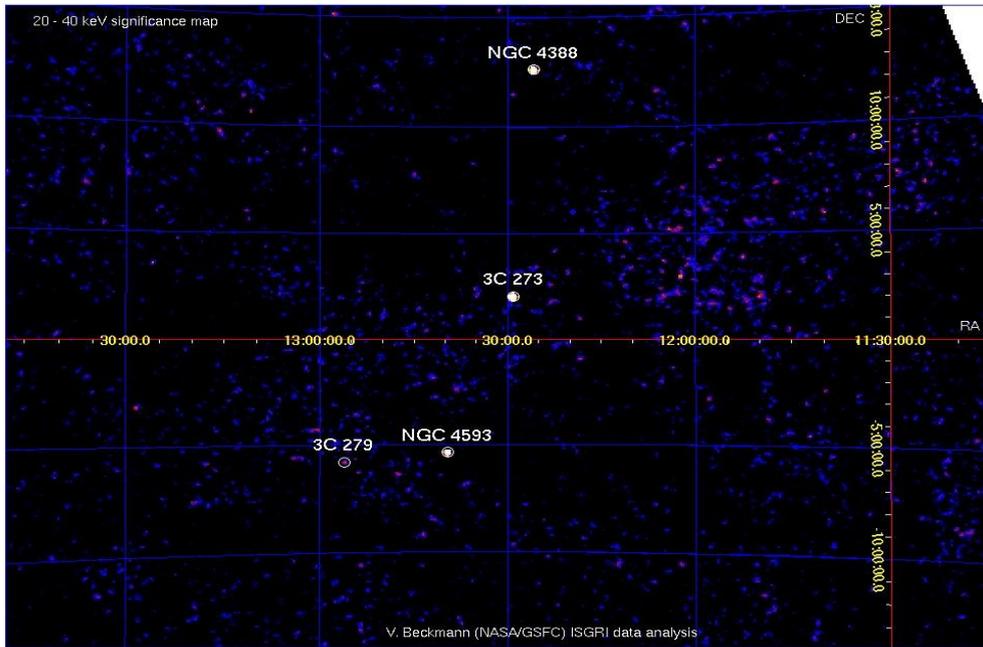
Der Detektor wird durch
4 Stirlingkühler unter der
Bodenplatte auf 85K
gekühlt



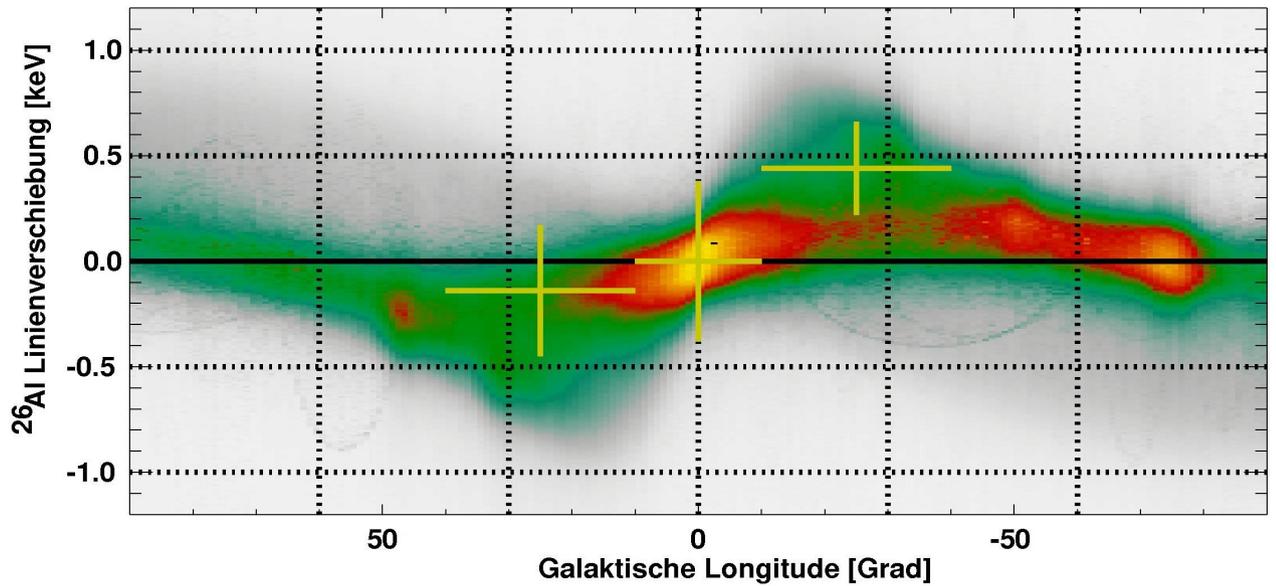
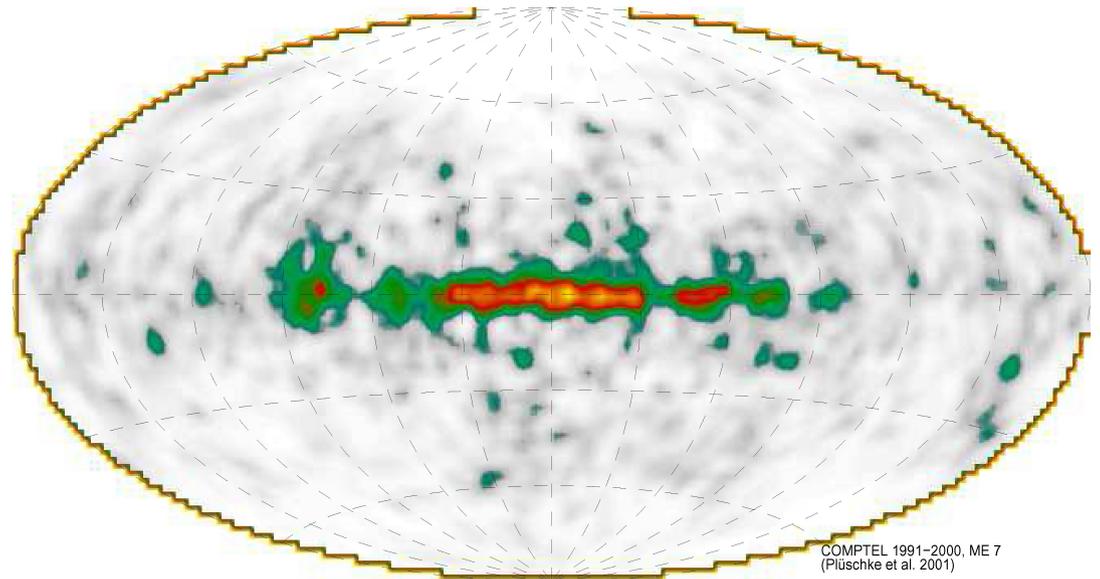
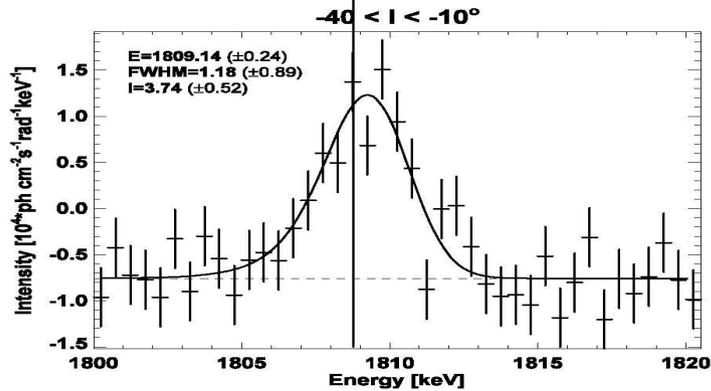
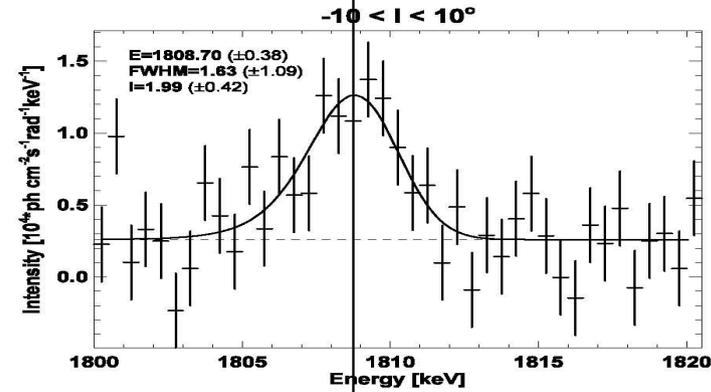
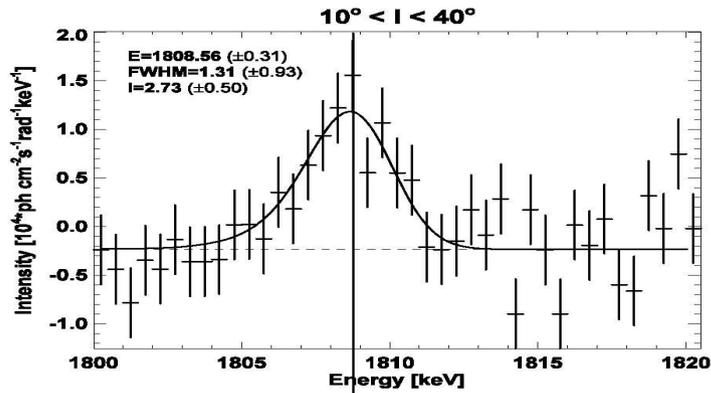
Helle Gammaquellen mit INTEGRAL



IBIS - Blazars

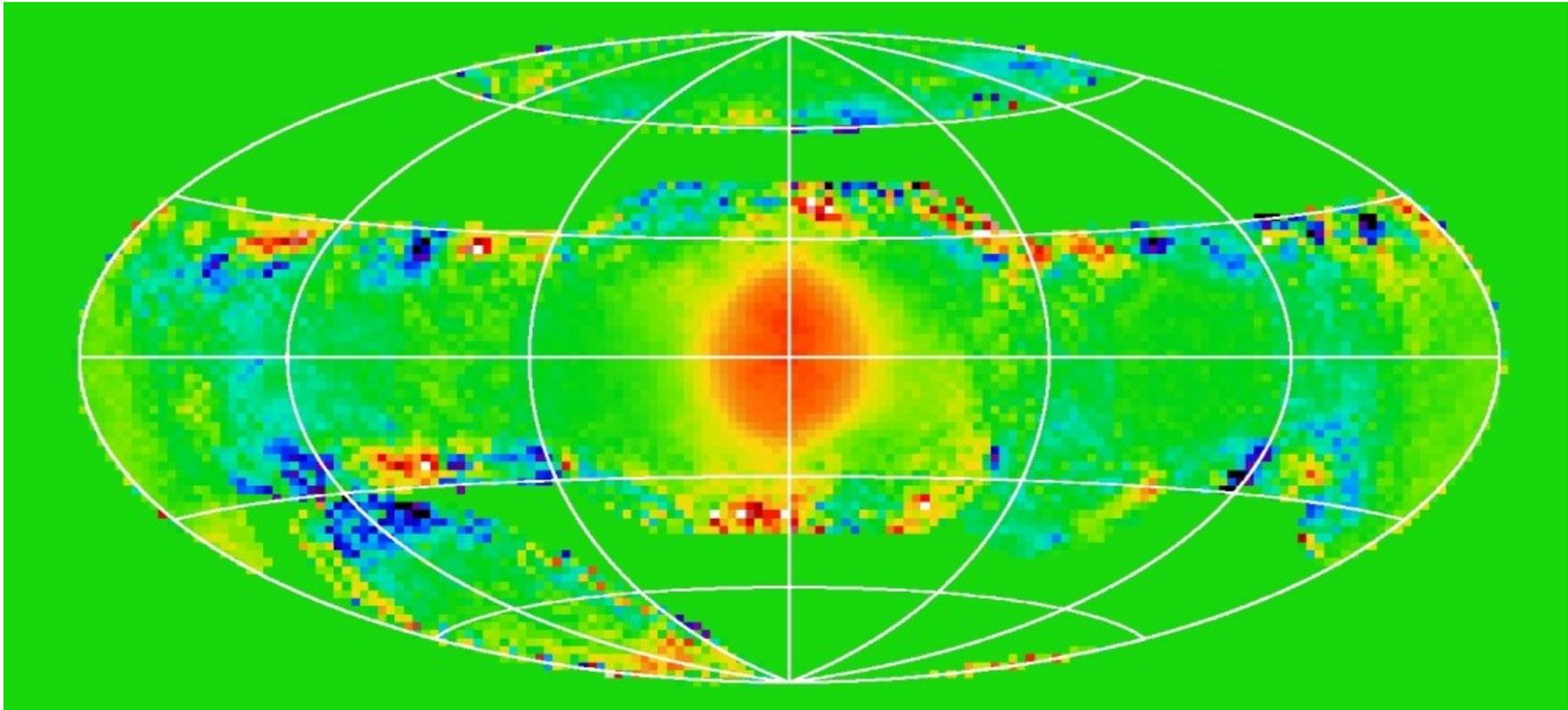


SPI - Die ^{26}Al -Linie



SPI - Die 511 keV – Linie

- INTEGRAL detektierte im ersten Jahr bereits etwa 200000 Photonen aus Annihilationsprozessen
- Annihilation in warmem ($T \approx 8000$ K) schwach ionisiertem Gas

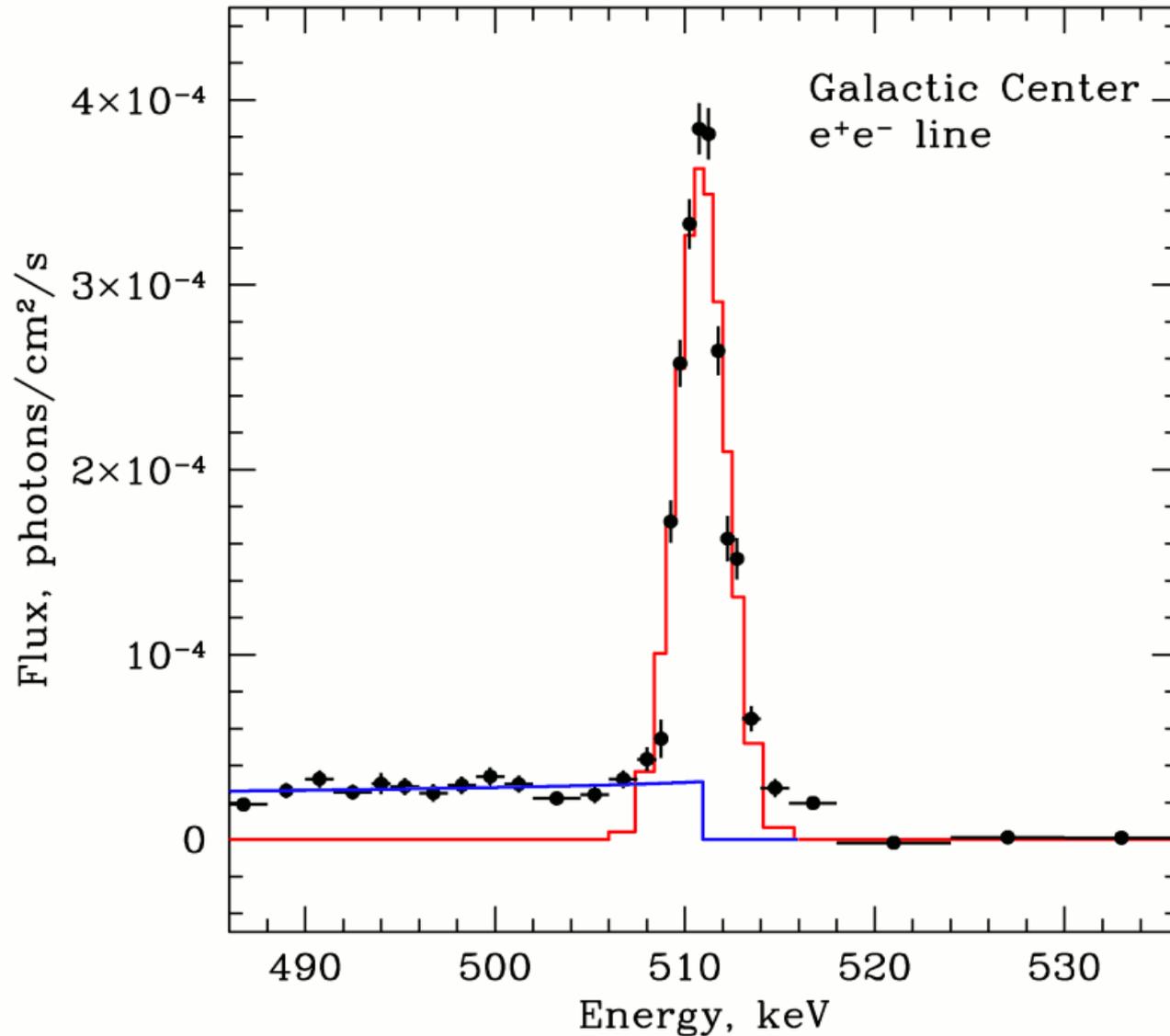


SPI - Die 511 keV – Linie

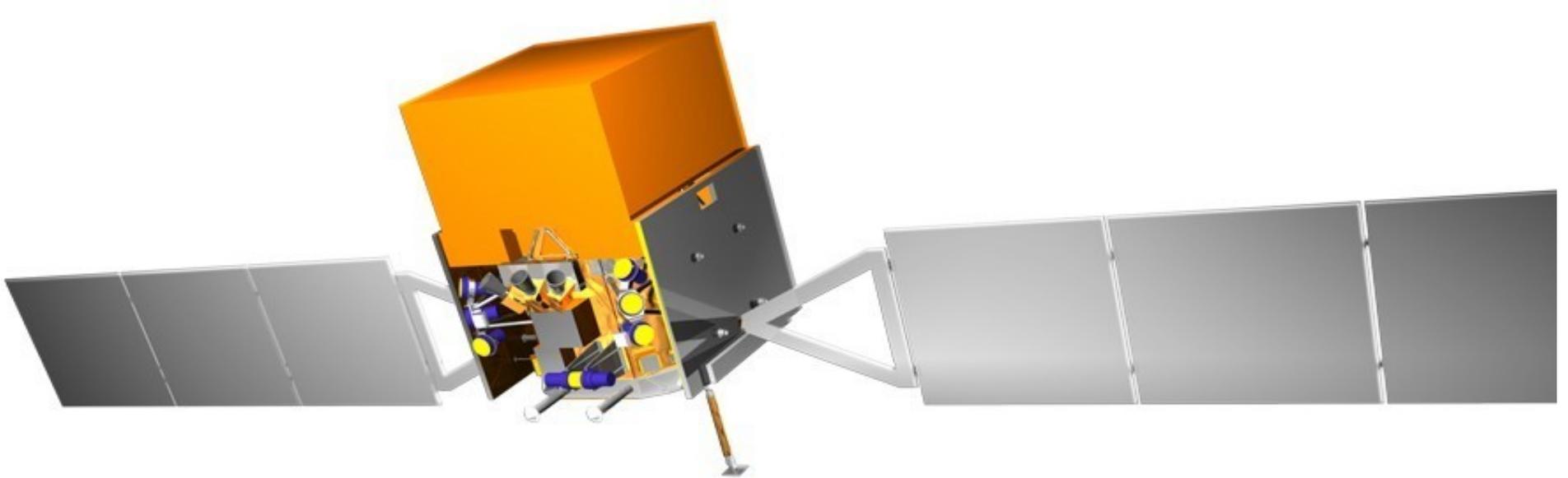
Rote Linie: Positronen-Elektron Annihilationlinie (Para-Positronium)

Blaue Linie: Kontinuumsspektrum (Ortho-Positronium)

SPI



GLAST

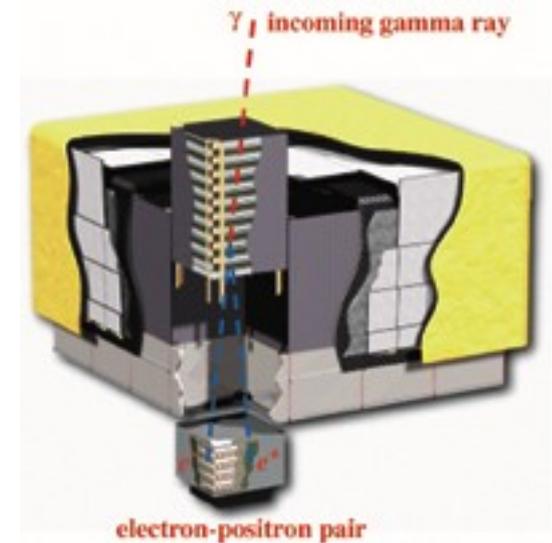


- Energiebereich: 10 MeV – 100 GeV
- 50 mal empfindlicher als Vorgänger EGRET (CGRO)
- LAT (Large Area Telescope)
- GBM (Gamma-ray Burst Monitor)

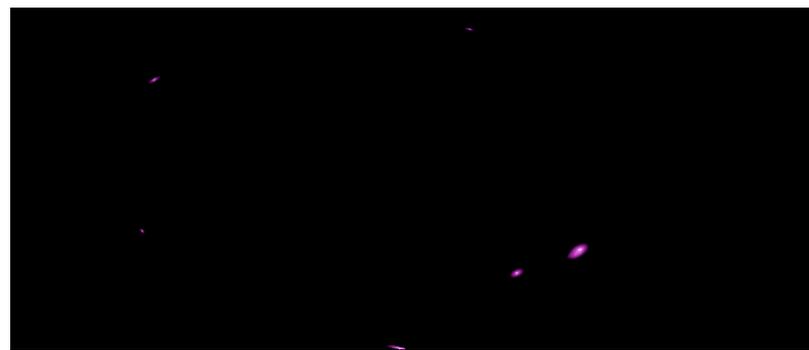
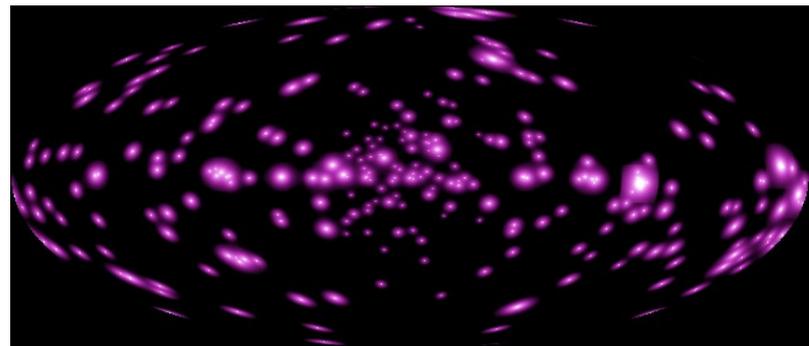
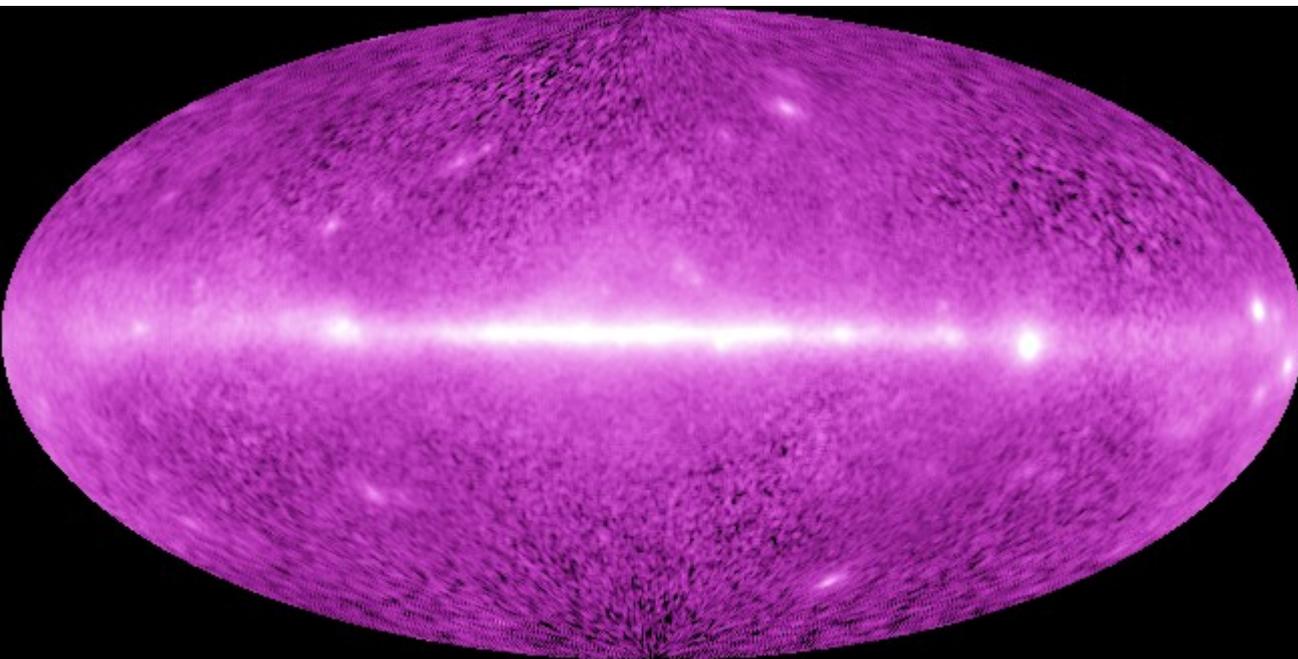
GLAST - LAT

LAT:

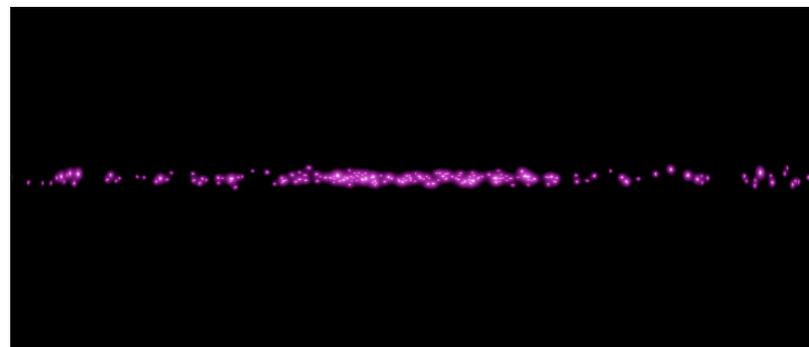
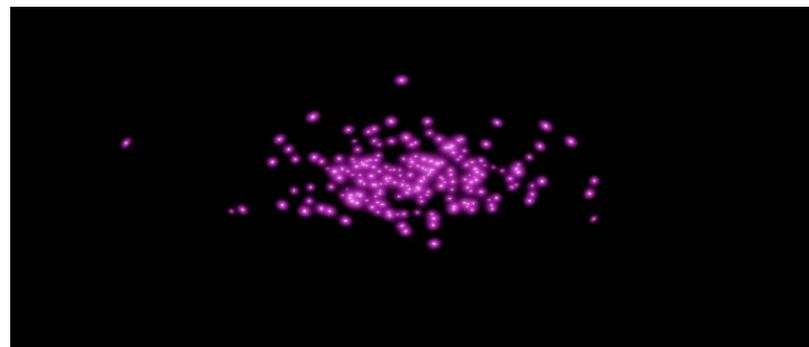
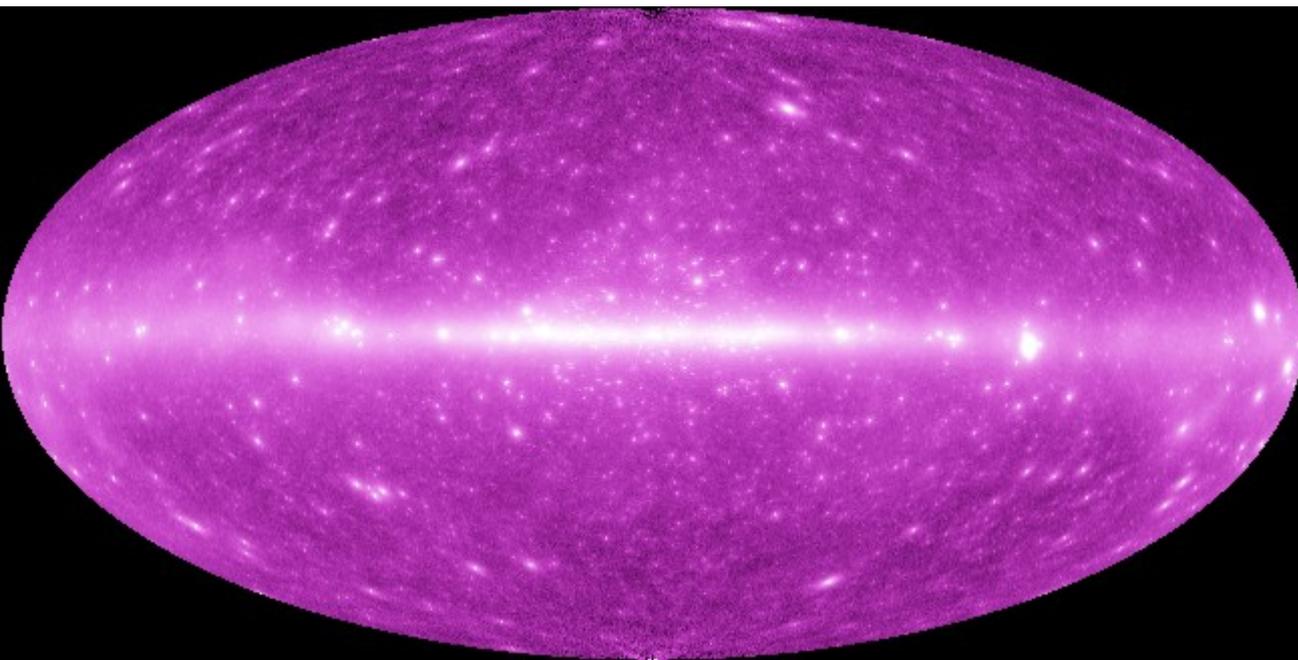
- Anti-Koinzidenz-Schild
 - Kunststoff - Szintillatoren
- Tracker
 - Silicon-Strip-Detektorschichten
 - basierend auf Paarbildung
- Kalorimeter
 - CsI (TI) - Szintillationsdetektor



EGRET (CGRO)



GLAST Simulation



Zusammenfassung

- Gammaastronomie verschafft uns Einblick ins „violent universe“
- CGRO, INTEGRAL, GLAST
- Besonderheiten der Gammaastronomie
- Detektortypen
- galaktische Gammaquellen
- AGNs

Die 511 keV - Linie

Elektron

Positron

Positronium

```
graph TD; Elektron --> Positronium; Positron --> Positronium; Positronium --> Ortho-Positronium; Positronium --> Para-Positronium;
```

Ortho-Positronium:

- etwa 25 %
- Spins entgegengesetzt
- min. 3 Photonen
- Lebensdauer: 140 ns

Para-Positronium:

- etwa 75 %
- Spins gleichgerichtet
- 2 Photonen
- Lebensdauer: 0.125 ns

Photoeffekt

- Ein Photon wird von einem Atomkern absorbiert
- im Gegenzug wird ein gebundenes Elektron „befreit“
- die Energie hf des Photons teilt sich auf in:
 - Beitrag zur Überwindung der Bindungsenergie
 - kinetische Energie des Elektrons

$$E_{kin} = hf - E_{bin}$$

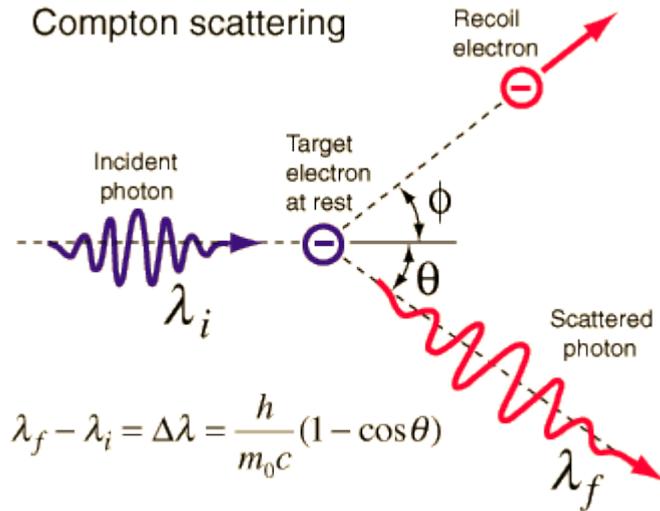
- typische Bindungsenergie einige keV für kleines Z
- WSKT photoelektrischer Absorption

$$P_{Photo} = C \frac{Z^5}{E_{\gamma}^{3.5}}$$



Detektormaterial sollte hohe Kernladungszahl Z besitzen

Compton Streuung



- ein Photon wird an einem quasi ruhenden Elektron gestreut
- dabei wird ein Teil seiner Energie auf das Elektron übertragen

$$E_{\gamma}' = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{E_{e0}} (1 - \cos\theta)}$$

Differentieller Wirkungsquerschnitt ist gegeben durch Klein-Nishina-Formel:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left(\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right)^2 \left(\frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right) \left(1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)(1 + \alpha(1 - \cos\theta))} \right)$$

mit $\alpha = \frac{hf}{m_0 c^2}$ und klassischem Elektronenradius r_0

Paarbildung

- ein Photon „verwandelt“ sich in ein Positron und ein Elektron
- mindestens 1022 keV ($= 2mc^2$) nötig
- die übrige Photonenergie wird in Form von kinetischer Energie gleichermaßen auf Elektron und Positron verteilt
- Positron legt in kurzer Zeit maximal einige mm zurück, bevor es mit einem Elektron des Absorbermaterials zerstrahlt ($2 * 0.511 \text{ MeV}$)
- WSKT steigt mit wachsender Energie und ist etwa proportional zu \sqrt{Z}

Halbleiterdetektoren

Ladungsfreie Zone

- Effektives Detektorvolumen
- Dicke der LZ d ist gegeben durch:

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon V}{eN}}$$

mit der „net impurity concentration“ N
und der Sperrvorspannung V

- $N = 10^{10}$ Atome/cm³ ergibt bei einer Spannung unter 1000 V eine Dicke der LZ von $d \approx 1$ cm



- etwa 1 Atom von 10^{12} !
- bei Germanium machbar (HPG)

Allgemeine Detektoreigenschaften

Detektoreffizienz

- absolute Effizienz: $\epsilon_{abs} = \frac{\text{Anzahl gemessener Pulse}}{\text{Anzahl emittierter Lichtquanten}}$
- intrinsische Effizienz:

$$\epsilon_{int} = \frac{\text{Anzahl gemessener Pulse}}{\text{Anzahl der am Detektor einfallenden Quanten}} = \epsilon_{abs} \frac{4\pi}{\Omega}$$

- peak Effizienz: nur die Wechselwirkungen, die die gesamte Energie der einfallenden Strahlung enthalten werden gezählt
- für isotrope Strahlung einer Punktquelle bestimmt sich die Anzahl der emittierten Quanten S aus:

$$S = N \frac{4\pi}{\epsilon_{ip} \Omega} \quad \text{mit der Anzahl } N \text{ der „full-energy-events“}$$