

Röntgen- und Gammateleskope auf Satelliten

Seminar zur Astro-und Teilchenphysik

Philip Beran

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

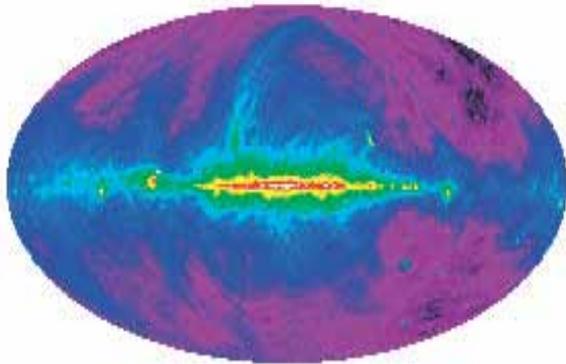
11.01.2010

Gliederung

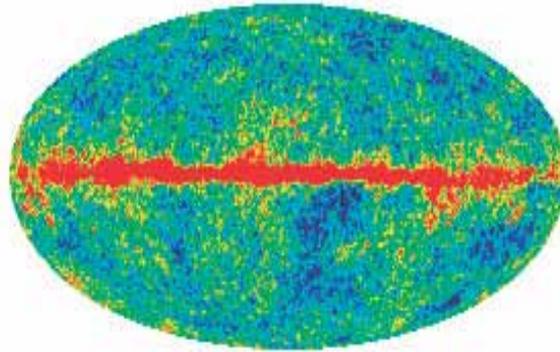
- Motivation für Röntgen- und Gammaastronomie mit Satelliten
- Historie
- Nachweis von hochenergetischen Photonen
- Aktuelle Satelliten
- Ausblick in die Zukunft

Motivation für Röntgen- und Gammaastronomie mit Satelliten

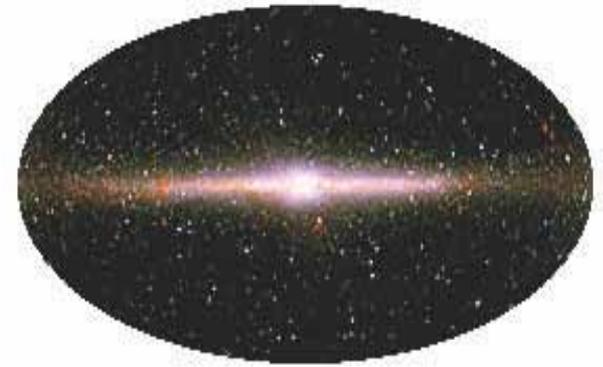
Der Kosmos in verschiedenen Spektralbereichen



Radiobereich



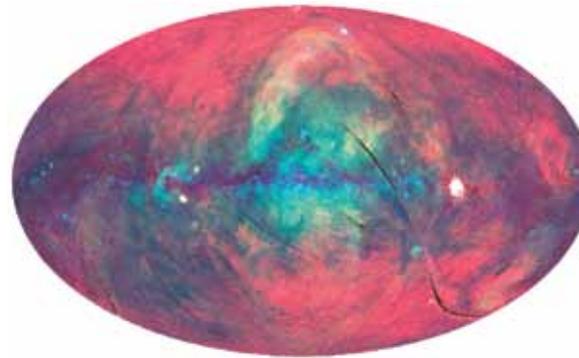
Mikrowellenbereich



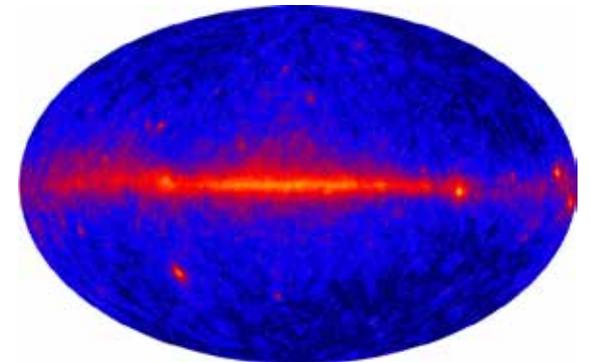
Infrarotbereich



Sichtbares Licht



Röntgenbereich

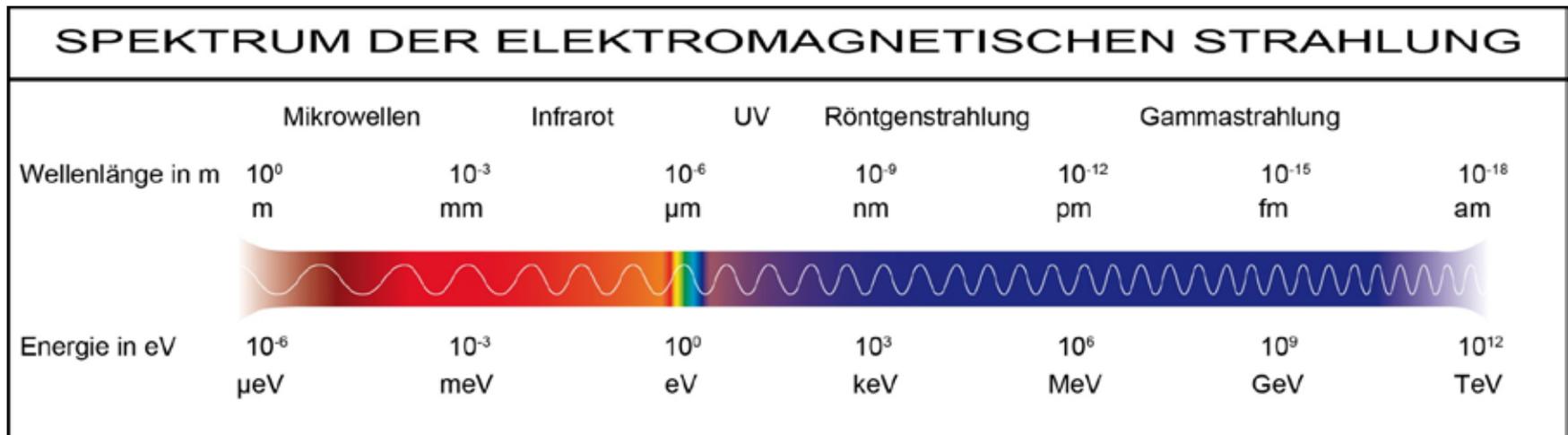


Gammabereich

Motivation für Röntgen- und Gammaastronomie mit Satelliten

Einordnung ins elektromagnetische Spektrum

- Röntgenstrahlung ca. im Bereich von 10nm bis 10pm
 - Unterteilung in weiche (>100pm) und harte (<100pm) Röntgenstrahlung
- Gammastrahlung ab Wellenlängen kleiner 10pm

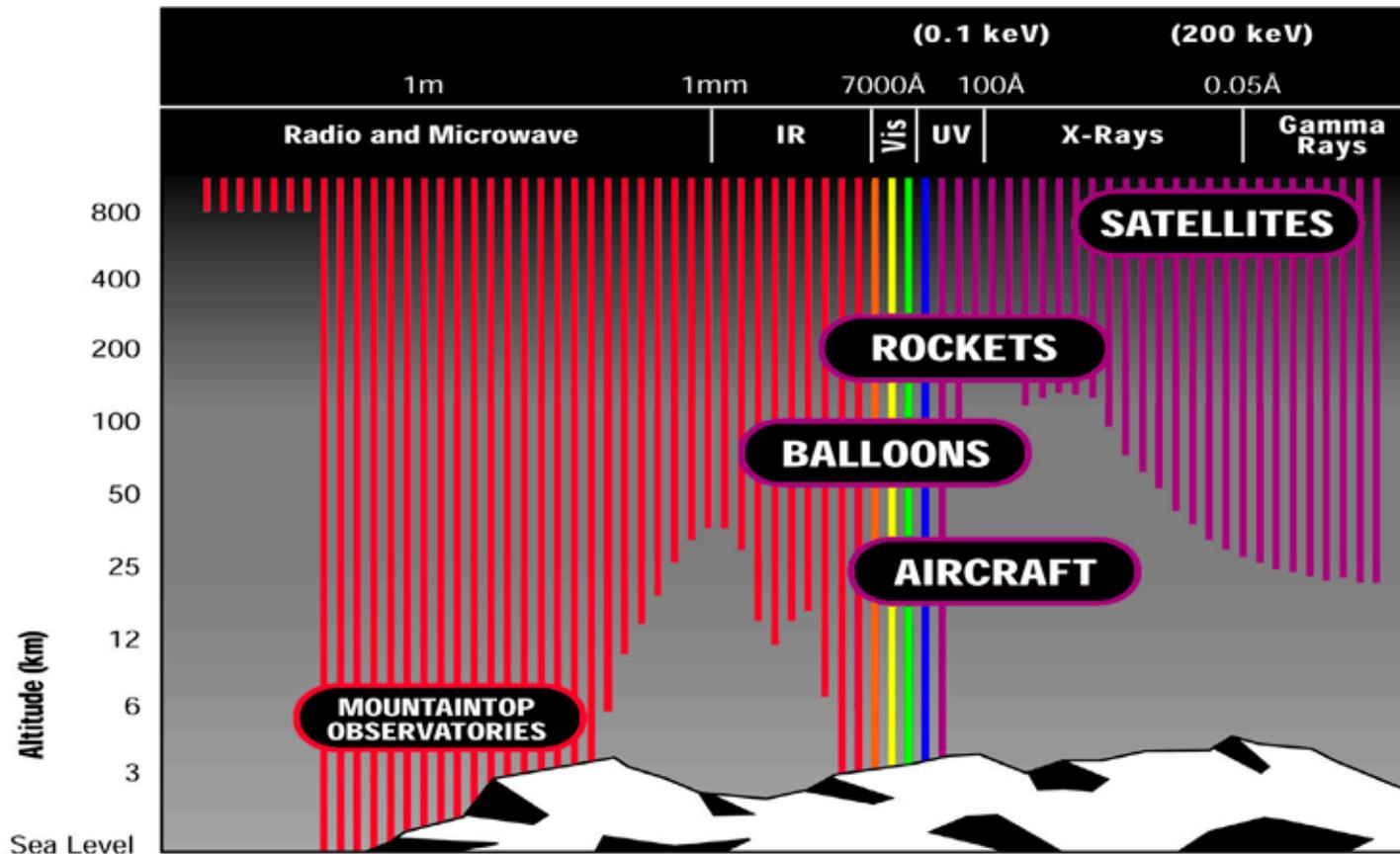


- Röntgenstrahlung bei Energien von 120eV bis 120keV
 - Gammastrahlung bei Energien größer als 120keV
- ∅ Beobachtungen in diesen Bereichen entsprechen den energiereichsten Prozessen im Kosmos

Motivation für Röntgen- und Gammaastronomie mit Satelliten

Gründe für die Stationierung im All

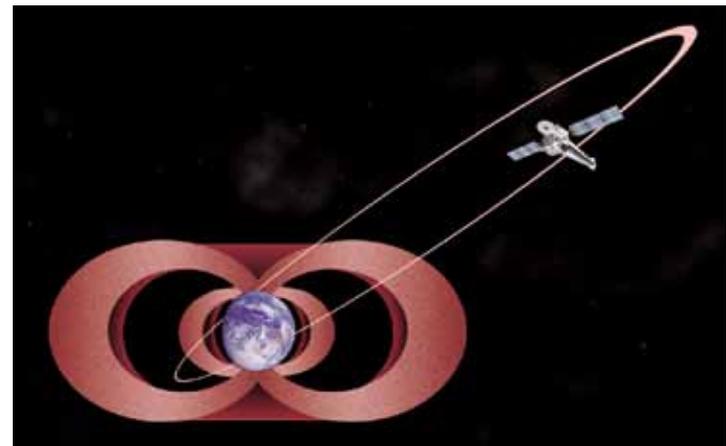
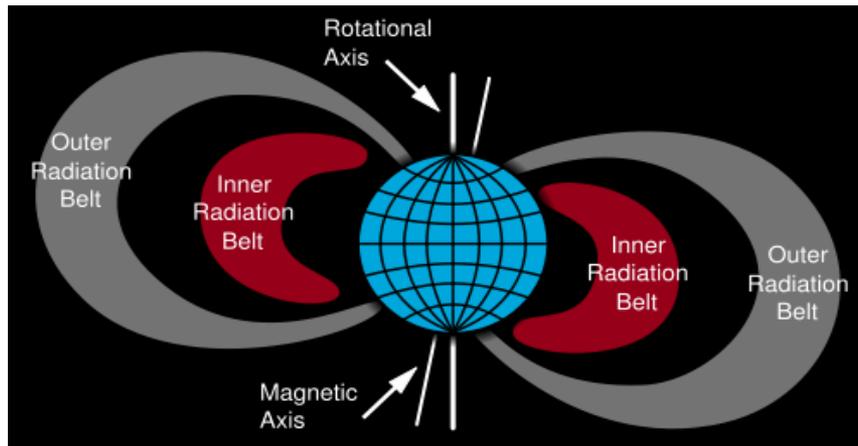
- Abschirmung der Strahlung durch Erdatmosphäre
 - Ø Auf Erde nur indirekt über Luftschauer beobachtbar (Cherenkov-Teleskope)



Motivation für Röntgen- und Gammaastronomie mit Satelliten

Gründe für die Stationierung im All

- Vermeidung von Luftunruhe (seeing) und Brechung der Strahlung in der Atmosphäre
- Längere Beobachtungszeiträume als auf Erdboden möglich
- Allerdings neues Problem: Strahlungsgürtel der Erde in bis zu 45000km Höhe
 - Kann ordnungsgemäße Funktion der Instrumente beeinträchtigen
 - Vermeidung durch hohen und inklinierten Orbit der Satelliten
 - Störungsfreie Messungen ab einer Höhe von 50000km möglich



Historie

Vermutung und Entdeckung erster Quellen

- Existenz von Röntgenquellen bereits in 30er Jahren vermutet
 - Ø Korona der Sonne als Erzeuger von Röntgenstrahlung
- Fund von Röntgenquellen führte zur Annahme von Gammaquellen in 50er Jahren
- Entdeckung von Mikrowellen aus dem All in den 30er Jahren ließ außerdem auf hochenergetische Prozesse schließen

- 1949: Erster Versuch zum Nachweis von Röntgenstrahlung im Weltraum
- Ø Nachweis der Korona der Sonne als erste kosmische Röntgenquelle mit umgebauter V2 Rakete
 - Ø Viele weitere Experimente mit Raketen und Ballons



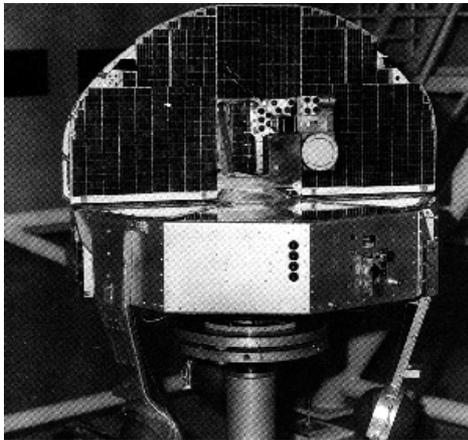
1951: Experiment mit V2 Rakete in New Mexico

- 1961: Erste gezielte Suche nach Gammaquellen mit Forschungssatellit Explorer XI: Entdeckung von isotropem Gamma-Hintergrund, da Auflösung zu gering

Historie

Wichtigste Missionen

1962: Raketenexperiment zur Suche nach vom Mond reflektiertem Röntgenlicht;
Entdeckung der ersten anderen Röntgenquelle als Sonne:
Doppelstern Scorpius X-1 (stärkste extrasolare Röntgenquelle)
Entdeckung 2002 mit Nobelpreis ausgezeichnet



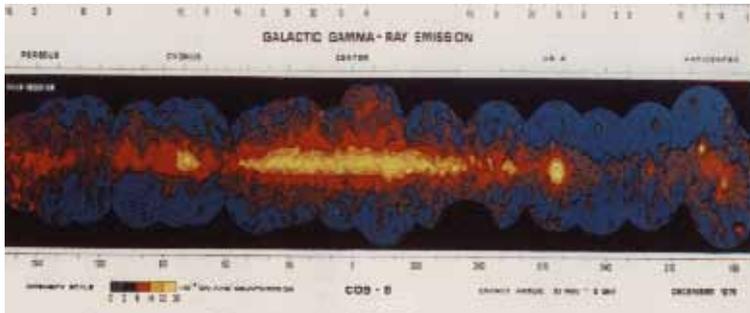
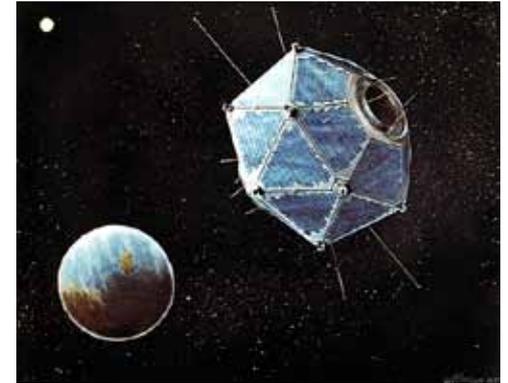
1967: OSO-3 (Orbiting Solar Observatory der NASA):
Beobachtung von Sonnen-Flares, isotropem
Gammahintergrund und erste Identifikation
von Quellen entlang der Milchstraße

1970: Uhuru-Satellit der NASA durchmustert
gesamten Himmel nach Röntgenstrahlung
und findet neue 339 Quellen



Historie

1969-79: Vela-Satelliten des US-Militärs entdecken erste Gammablitz (Gamma-Ray Bursts)



1972-75: SAS 2 (NASA) und COS-B (ESA): Erste Himmelskarten im Gammabereich

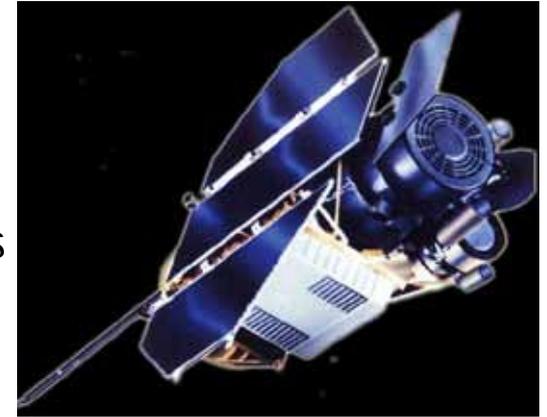
1978: HEAO-2 (Einstein-Observatorium): Erstes Röntgenteleskop mit guter Abbildungsleistung (2 arcsec bei 2keV) durch Wolter-Teleskop



1983: Erster Röntgensatellit der ESA EXOSAT: Durch hohen Orbit (190000km Erdferne) lange Beobachtungszeiten von bis zu 76h

Historie

1990: Erster deutscher Röntgensatellit ROSAT:
„Glatteste Spiegel der Welt“ (auf 0,35nm genau)
ermöglichen Auflösung des Röntgenhintergrundes
in Emission von Quasaren und Galaxien



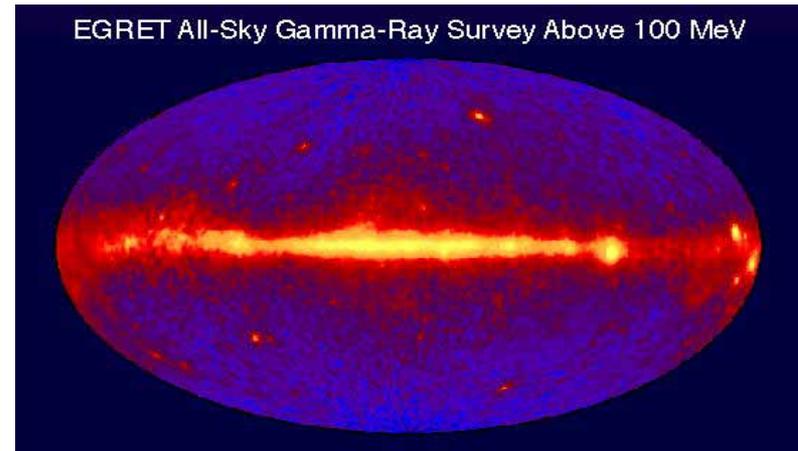
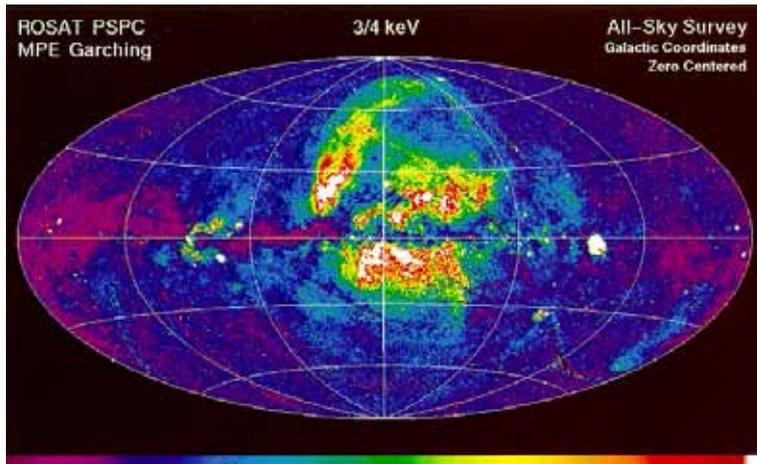
1991: Compton-Gamma-Ray-Observatory der NASA:
Erste Karte für Gammaquellen über 100MeV,
Erforschung von GRBs, mit 17t schwerster
wissenschaftlicher Satellit

1996: Italienischer Satellit BeppoSAX:
Deckt drei Größenordnungen Energie ab,
ermöglicht schnelle und genaue Ortung
sowie Untersuchung von GRBs durch
automatisierte Ausrichtung



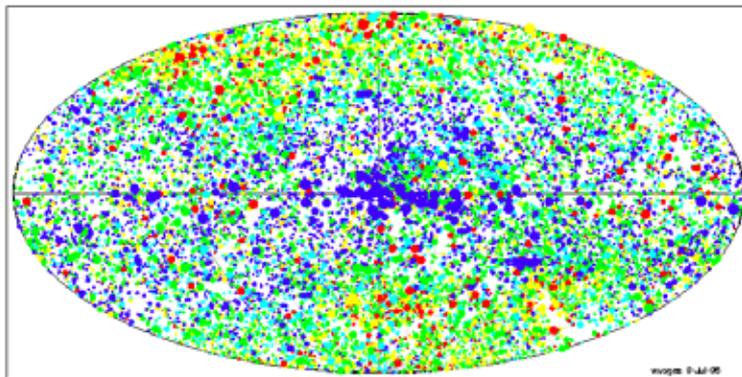
Historie

1999: Himmelskarten nach ROSAT und CGRO (EGRET)



ROSAT ALL-SKY SURVEY Bright Sources

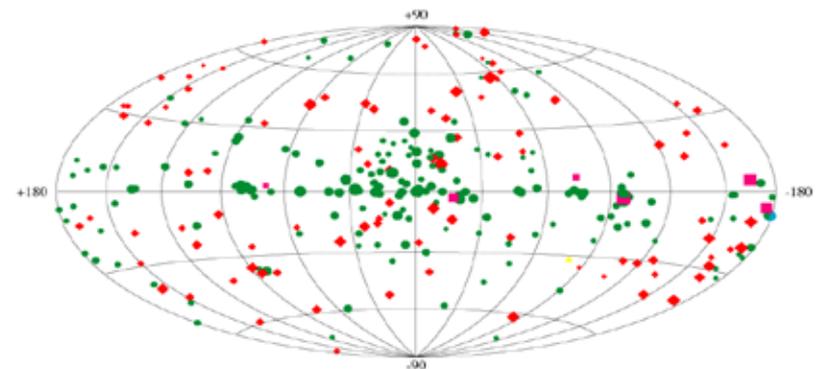
Aitoff Projection
Galactic II Coordinate System



Energy range: 0.1 - 2.4 keV
Number of RASS-II sources: 18811
Hardness ratio: -1.0 | -0.41 | -0.21 | 0.21 | 0.61 | 1.0 (soft -> hard : magenta - red - yellow - green - cyan)

Third EGRET Catalog

E > 100 MeV

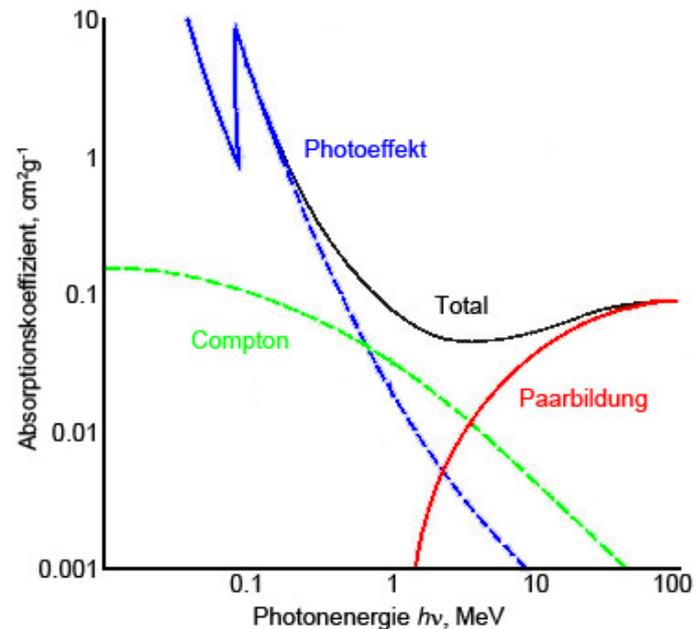


- ◆ Active Galactic Nuclei
- Unidentified EGRET Sources
- ◆ Pulsars
- ▲ LMC
- Solar FLare

Nachweis von hochenergetischen Photonen

Physikalische Nachweismethoden

- Wechselwirkung von Photonen mit Materie von charakteristischen Effekten dominiert und über diese nachweisbar
 - Photoeffekt
 - Compton-Streuung
 - Paarbildung
- Wirkungsquerschnitt stark abhängig vom Photonenenergie
- Nachweis und Spektroskopie über:
 - Szintillatoren, Kalorimeter
 - Photomultiplier, Micro-Channel-Plates
 - Halbleiter-Detektoren (CCD-Kameras, Photodioden)
 - Compton-Streuungs-Detektoren (Einsatz nur auf CGRO)
 - Funkenkammern
 - Mikrostreifen-Zähler



Nachweis von hochenergetischen Photonen

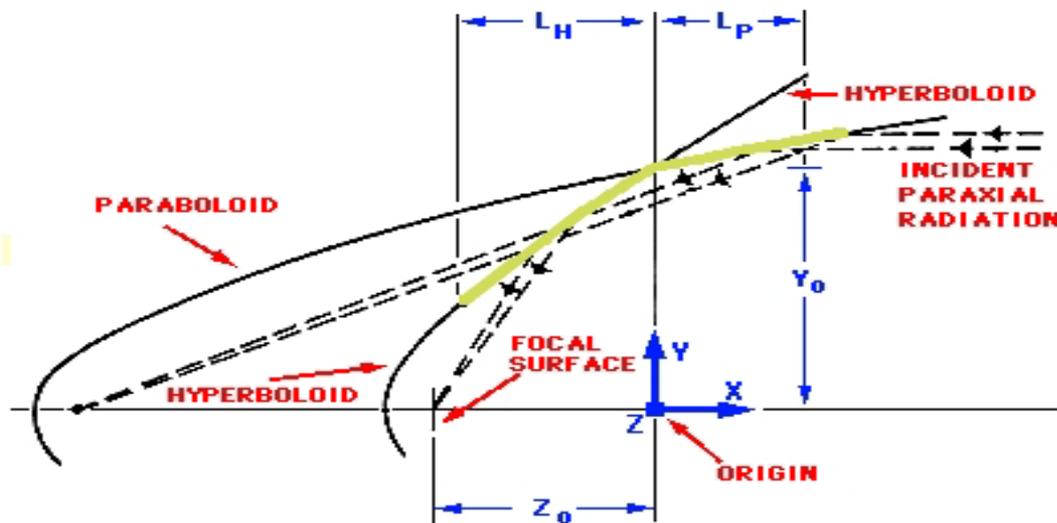
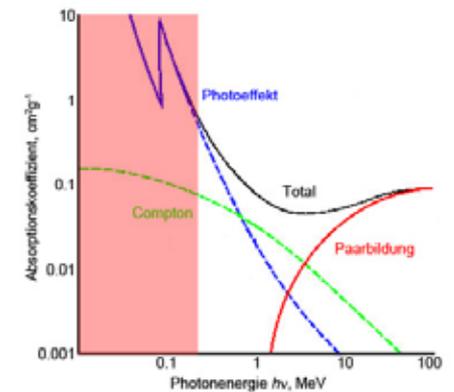
Funktionsweise von Röntgen- und Gammateleskopen

- Aufbau von Satellit-Teleskopen
 - Verschiedene Teleskop-Typen schauen in selbe Richtung
 - Oftmals durch optisches Teleskop zur Positionsbestimmung ergänzt
- Röntgen- und Gammastrahlung nicht mit Linsen oder Spiegeln fokussierbar
 - Ø Absorption bzw. Transmission von hochenergetischer Strahlung in gewöhnlichen optischen Teleskopen
 - Ø Bestimmung der Herkunft des Photons durch andere Methoden
- Entwicklung geeigneter Methoden für Teleskope:
 - Wolter-Teleskope (erstmalig 1978 bei HEAO-2)
 - Kodierten Masken (coded mask)
 - Bestimmung der Herkunft des Photons über Paarbildung
- Grundsätzlich bestimmt Wirkungsquerschnitt der Wechselwirkung von Photon und Materie wann welche Methode angewandt wird
 - Ø Für größere Wirkungsquerschnitte höhere Nachweiswahrscheinlichkeit

Nachweis von hochenergetischen Photonen

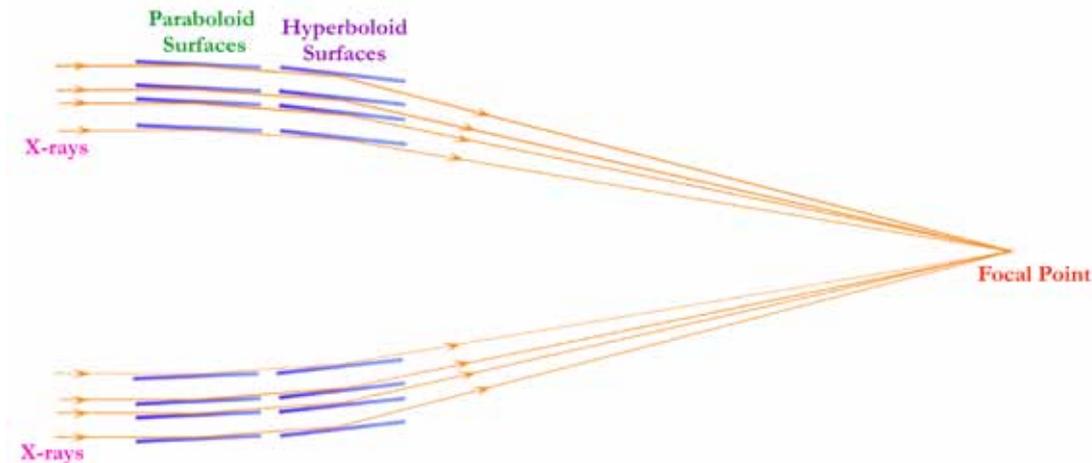
Funktionsweise von Wolter-Teleskopen

- Erfunden 1952 von Hans Wolter, technisch realisierbar erst 1978
- Beruht auf Prinzip der Totalreflexion
 - Ø Für Röntgenstrahlung Einfallswinkel nahe bei 90°
- Fokussierung über rotationssymmetrische Oberflächen (Paraboloide, Hyperboloide)

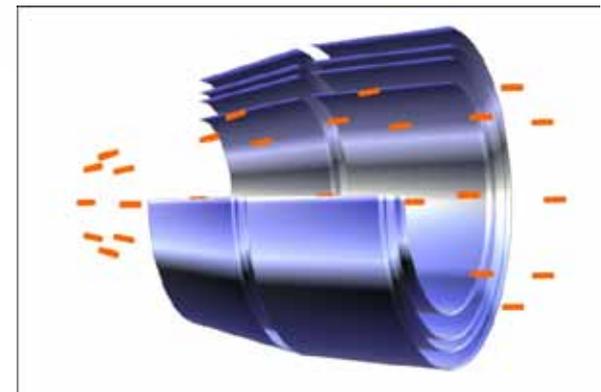
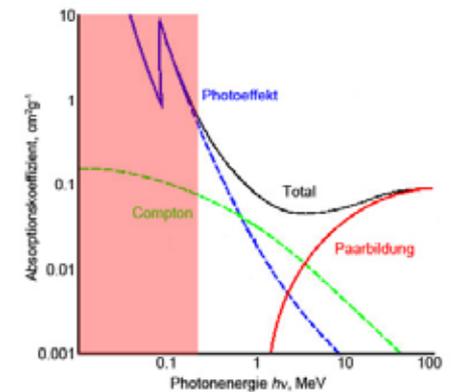


Nachweis von hochenergetischen Photonen

- Effektive Sammelfläche durch mehrere ineinander verschachtelte (genestete) Teleskope vergrößerbar
- Abbildung und Spektroskopie der Quelle im Fokus möglich (typischer Weise mit CCD-Kamera)



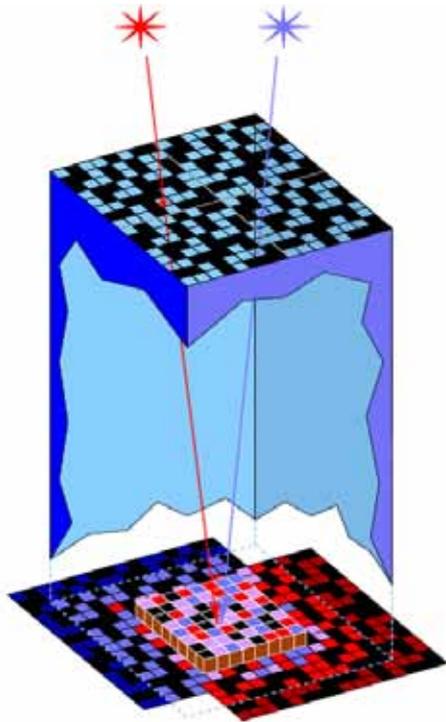
- Erfordert höchste Genauigkeit bei Fertigung der Spiegel und der Montage
 - ØGlattheit der Oberfläche auf wenige nm genau
- Eingesetzt für Energien bis ca. 100keV



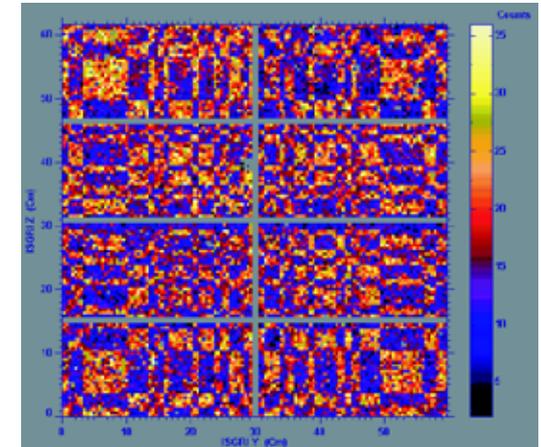
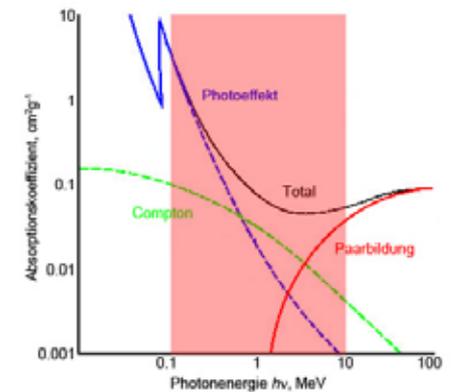
Nachweis von hochenergetischen Photonen

Funktionsweise von kodierten Masken

- Aus Schattenwurf einer bekannten Maske lässt sich Position der Quelle bestimmen
- Spezielles (kodiertes) Muster der Masken ermöglicht Rückrechnung für jede Quellenposition
- Detektion des Schattens über Szintillatoren



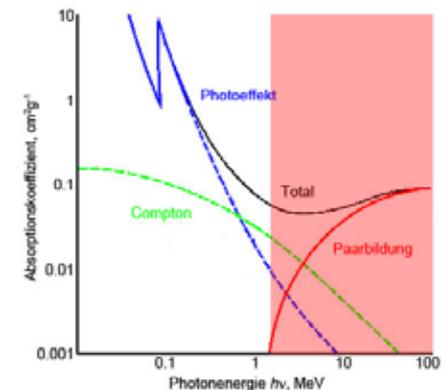
Kodierte Maske des Satellits INTEGRAL und ihr Schatten



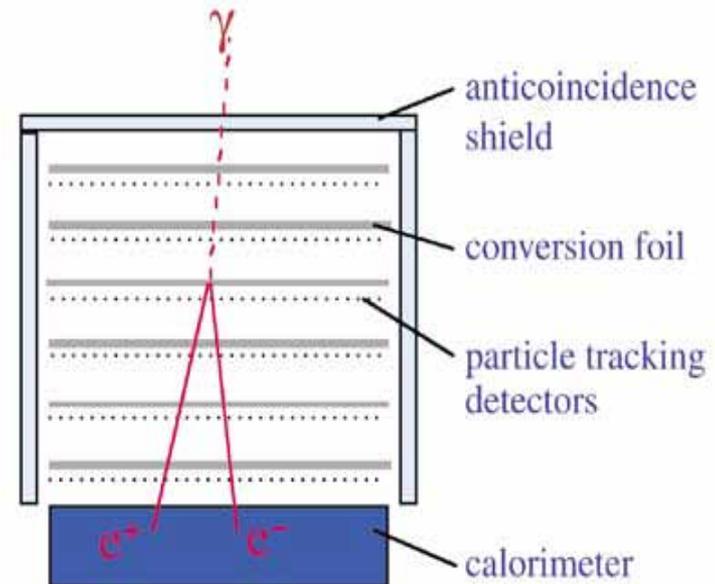
Nachweis von hochenergetischen Photonen

Bestimmung der Herkunft des Photons über Paarbildung

- Paarbildung von höchstenergetische Photonen erzeugt leicht nachweisbare Sekundärteilchen (e^+e^-)
- Über Spurrekonstruktion (tracking) der Sekundärteilchen Position der Quelle sehr genau bestimmbar



- Wechselwirkung des Photons durch Konversionsfolien provoziert
- Detektion der Sekundärteilchen über Streifen- oder Pixeldetektoren
- Zusätzliches Kalorimeter erlaubt Energiemessung der e^+e^- Paare



Aktuelle Satelliten



Chandra (NASA) und XMM-Newton (ESA)

- 1999 gestartete Missionen für Untersuchungen im Röntgenbereich
- Ausgerüstet mit Wolter-Teleskopen und CCD-Kameras
- Chandra (benannt nach Chandrasekhar) entworfen für bestmögliche Auflösung (<0,5 arcsec bei 1keV)
- XMM-Newton (X-Ray Multi-Mirror) gebaut für große Sammelfläche (3x 58-fach genestete Wolterteleskope) und großes Gesichtsfeld
- Sehr hoher Orbit beider Satelliten um Strahlungsgürtel zu verlassen



Chandra X-ray Observatory



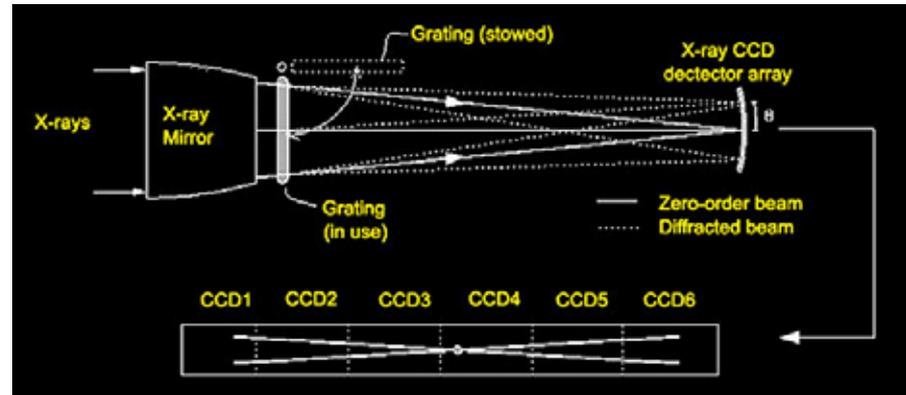
XMM-Newton

Aktuelle Satelliten

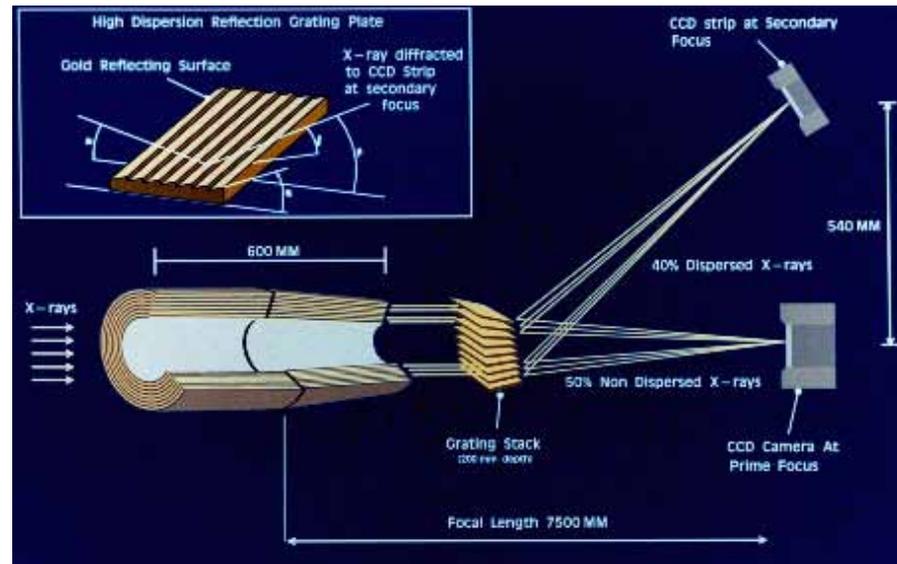


- Spektroskopie möglich über CCD-Kameras und zusätzlich über spezielle Beugungsapparaturen zur besseren Auflösung der Energie

- Bei Chandra:
Klappbare Transmissions-Beugungsgitter hinter Teleskop ermöglichen genauere Spektroskopie durch verschiedene Beugungswinkel



- Bei XMM-Newton:
Permanente Reflexions-Beugungsgitter lenken Strahlen energieabhängig ab

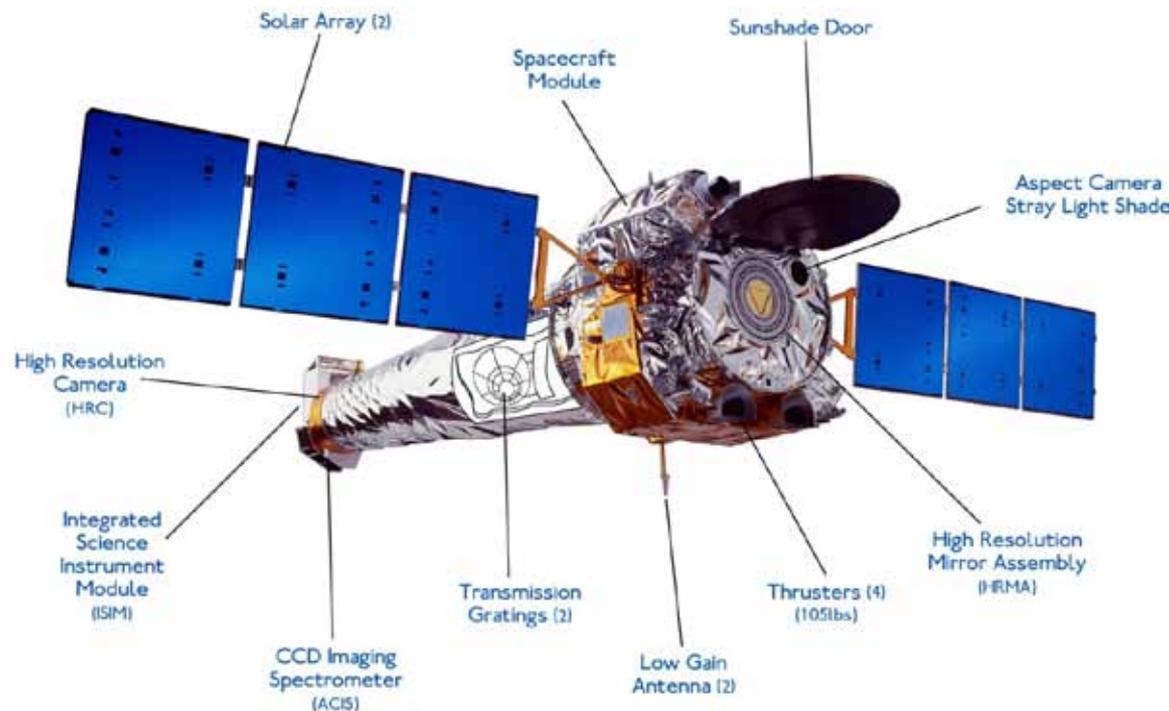


Aktuelle Satelliten



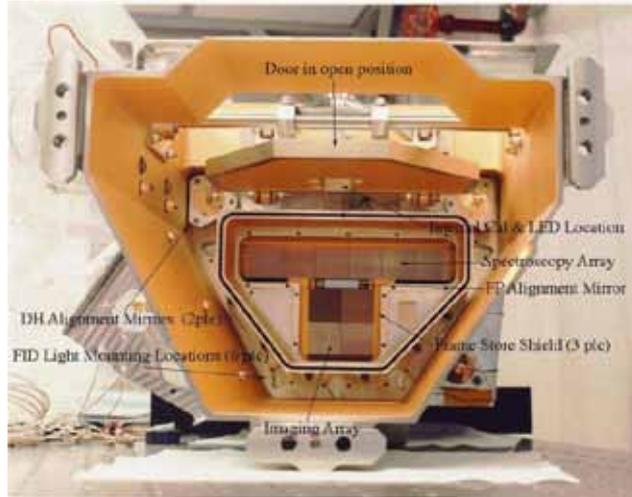
Instrumente von Chandra

- ACIS: CCD-Kamera für Bildgebung und Spektroskopie
- HRC: Hochauflösende Kamera aus 2 Micro-Channel-Plates
 - ØAuflösung von $<0,5$ arcsec bei 1keV in einem Gesichtsfeld von 31×31 arcmin
- HRMA: 4-fach genestetes Wolterteleskop, Iridiumbeschichtet, 960kg schwer
- 2 Transmissions-Beugungsgitter für niedrige und hohe Energien (LETGS und HETGS)

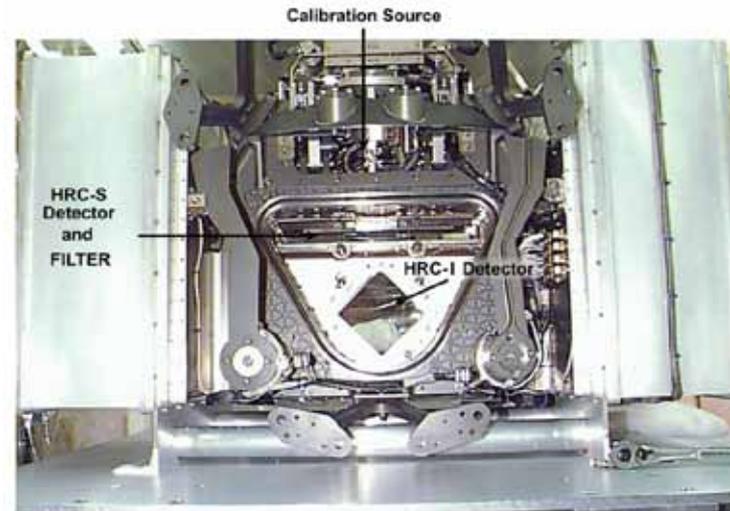


Aktuelle Satelliten

ENERGIEBEREICH



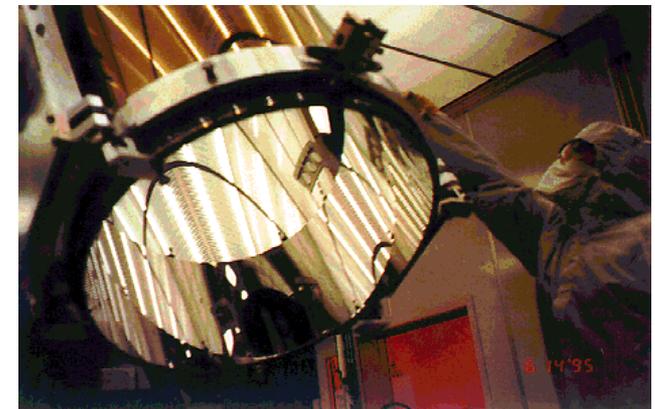
CCD Spektrometer



Hochauflösende Micro-Channel-Plates Kamera



Transmissionsgitter-Spektrometer



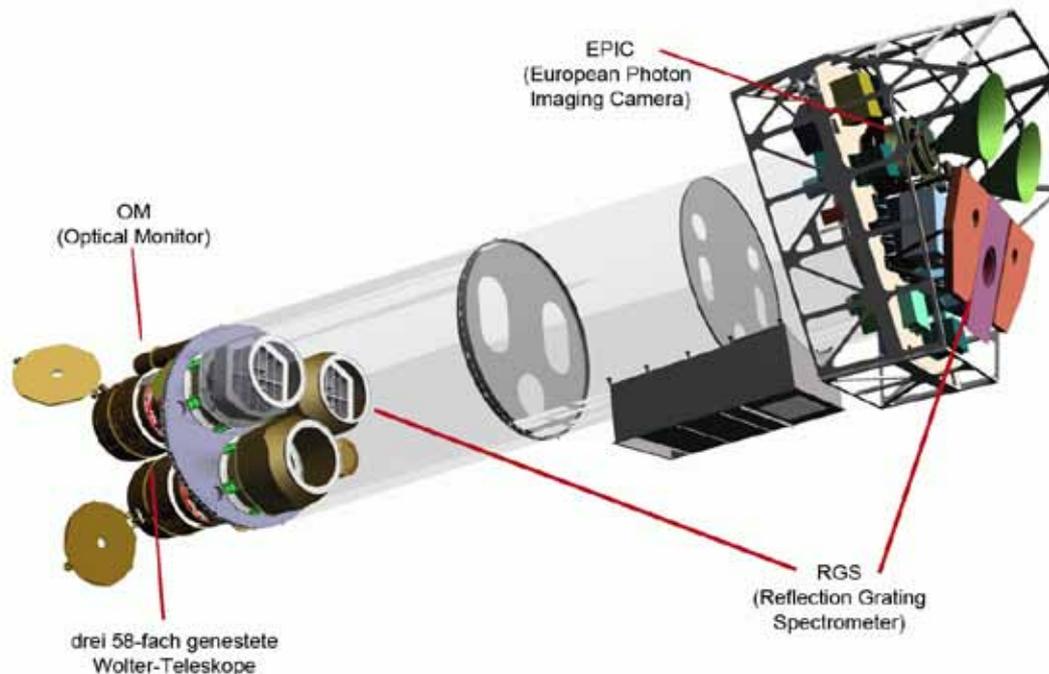
Beschichtung eines Spiegels des Wolterteleskops

Aktuelle Satelliten

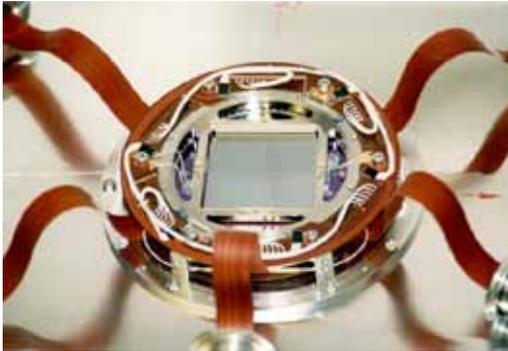


Instrumente von XMM-Newton

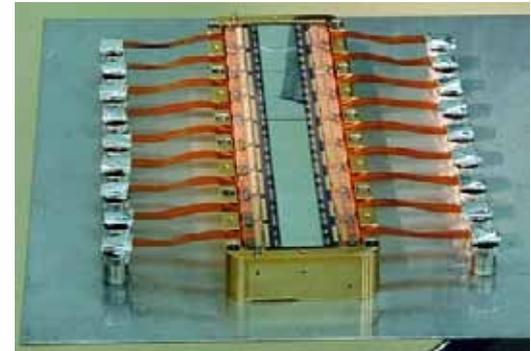
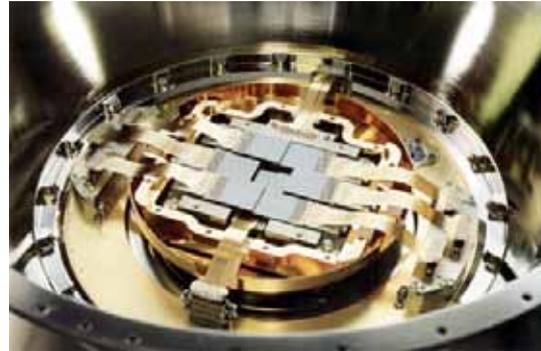
- EPIC: 3 CCD-Kameras im Fokus der 3 Wolterteleskope
- RGS: 2 Reflexionsgitter lenken Teil der Strahlung auf Spektroskopie-CCDs ab
 - ØErmöglichen sehr genaue Energieauflösung
- 3 58-fach genestete Wolterteleskope, Goldbeschichtet, 520kg pro Stück schwer
- OM: Optisches Teleskop für Beobachtungen im sichtbaren Licht und Positionierung



Aktuelle Satelliten



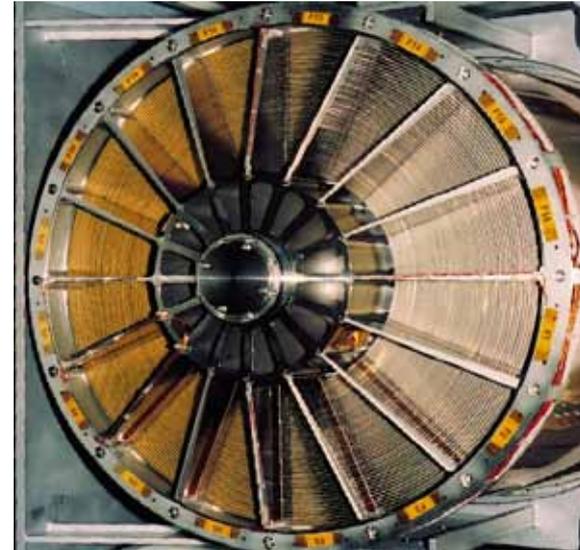
Verschiedene CCD-Kameras von EPIC



CCD-Spektrometer von RGS



Transmissionsgitter von RGS



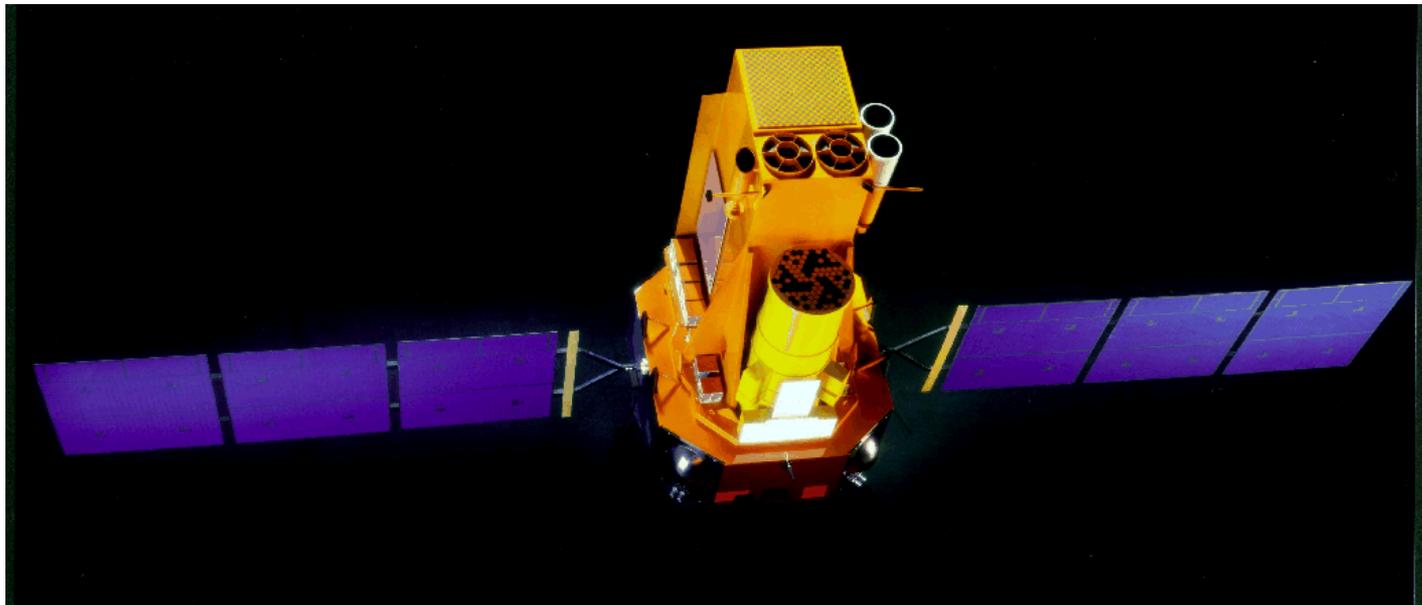
Eines der Wolterteleskope

Aktuelle Satelliten



INTEGRAL (International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory) der ESA

- 2002 gestartete Mission zur Erforschung von Röntgen- und Gammastrahlung
- Ausgestattet mit 3 Instrumenten basierend auf kodierten Masken
- Sehr hoher Orbit (150000km) ermöglicht fast 70h ununterbrochene Beobachtung



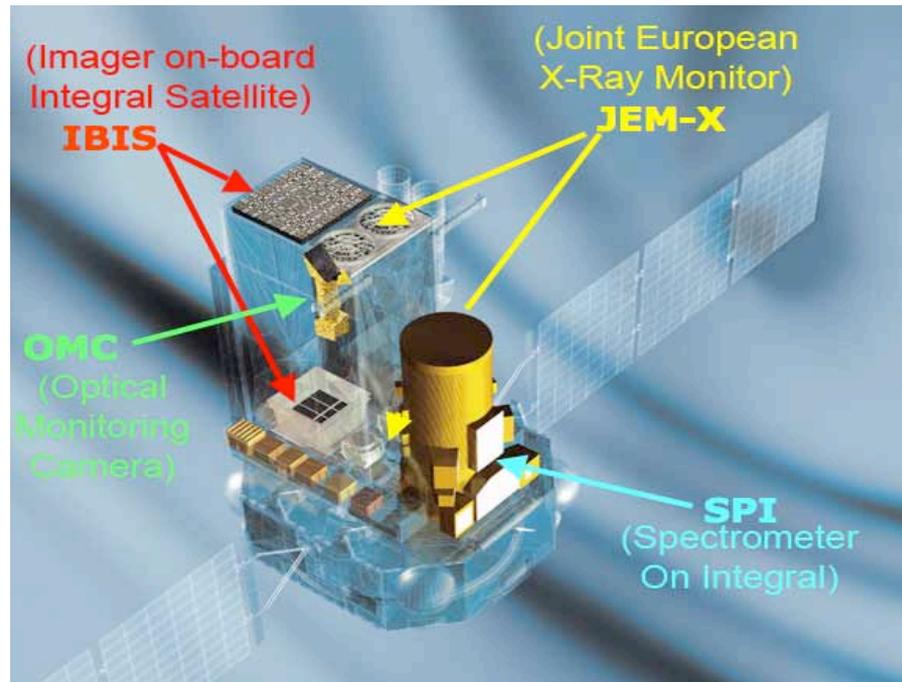
International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory

Aktuelle Satelliten



Instrumente von INTEGRAL

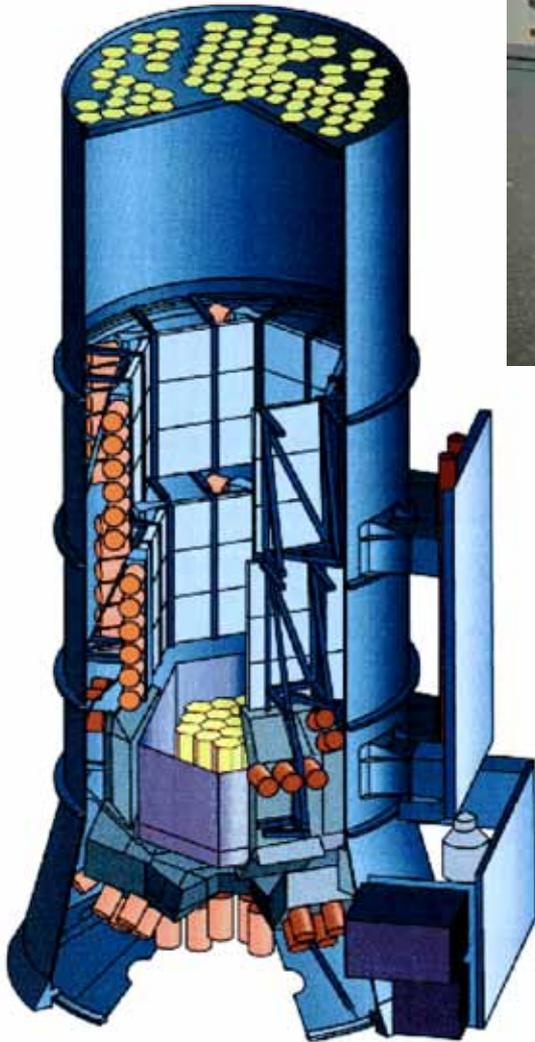
- SPI: 19 Germanium-Detektoren zur Spektroskopie
 - Ø Abgeschirmt durch Anti-Koinzidenz Bismut-Germanat-Detektoren (BGO)
- IBIS: 20000 Kristall-Szintillatoren in 2 Schichten als Pixel zur Bildgebung
 - Ø 9° x 9° Gesichtsfeld mit 12 arcmin Auflösung
- Jem-X: Mikrostreifen-Zähler für Röntgenstrahlung
- OMC: Optisches Teleskop mit CCD-Kamera



Aktuelle Satelliten

ENERGIEBEREICH

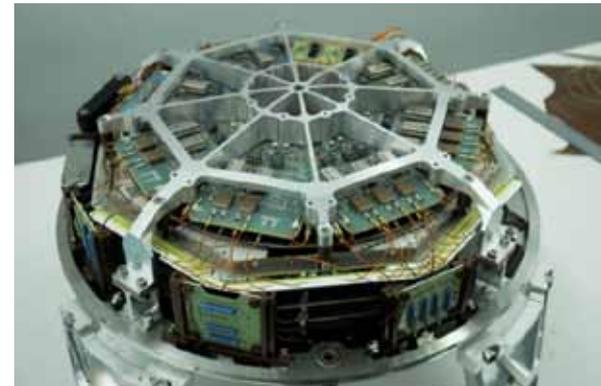
1eV	1keV	1MeV	1GeV	1TeV
-----	------	------	------	------



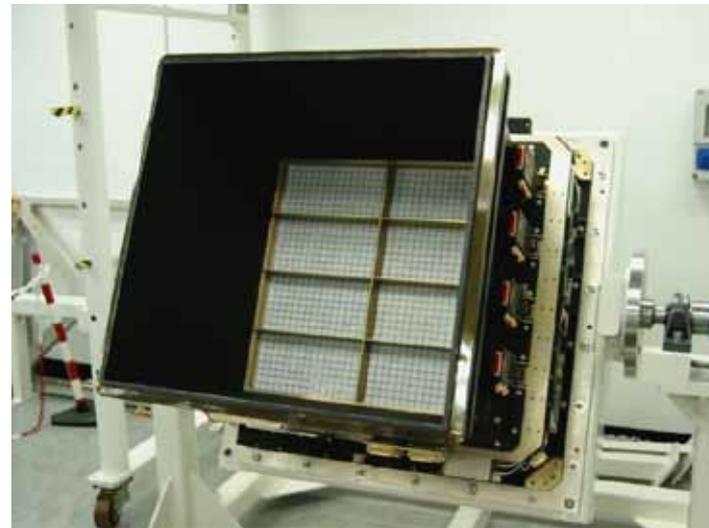
Aufbau von SPI



Kodierte Maske von SPI



Mikrostreifen-Zähler Jem-X



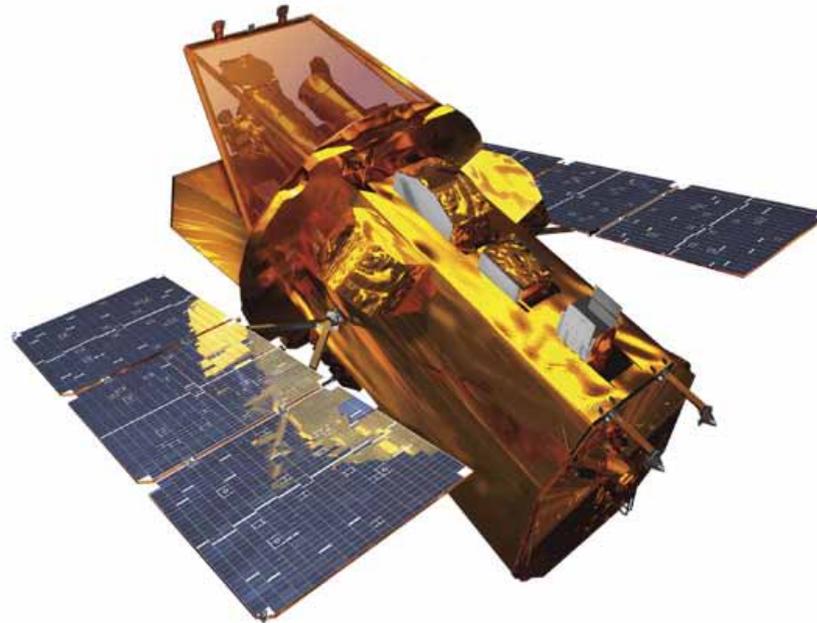
Kristall-Szintillatoren von IBIS

Aktuelle Satelliten



SWIFT (bedeutet „Mauersegler“) der NASA

- 2004 gestartete Mission zur Erforschung von Gamma-Ray Bursts
 - Ø Automatische Ausrichtung auf detektierte GRBs
- In niedrigem zirkularen Orbit
 - Ø Eine Erdumrundung in 90min
 - Ø Gesamter Himmel in kurzer Zeit abgesucht
 - Ø Rauschen durch den Strahlungsgürtel elektronisch kompensiert

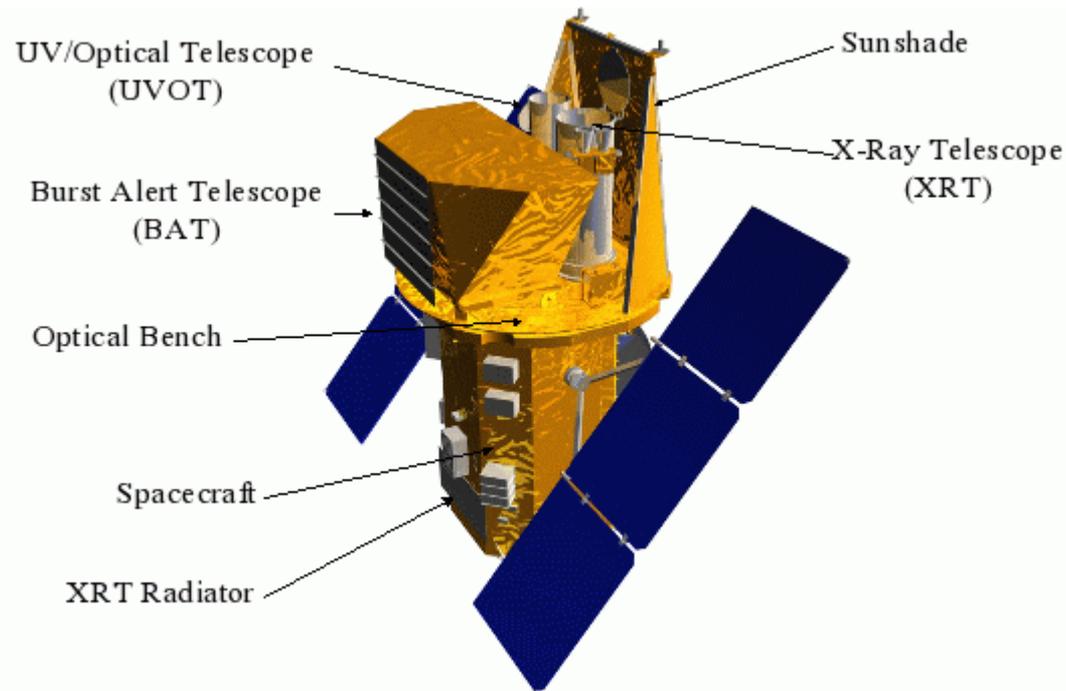


Aktuelle Satelliten

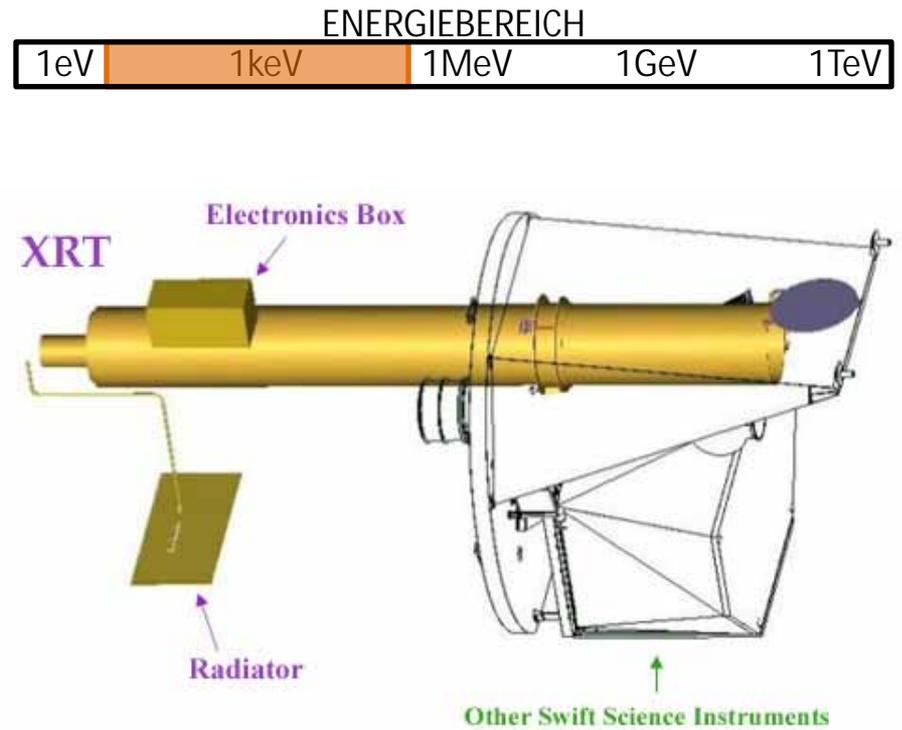
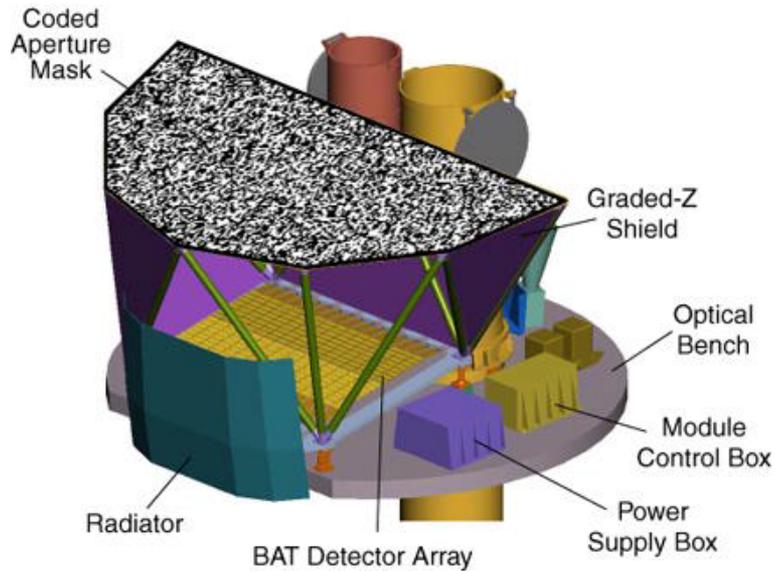


Instrumente von SWIFT

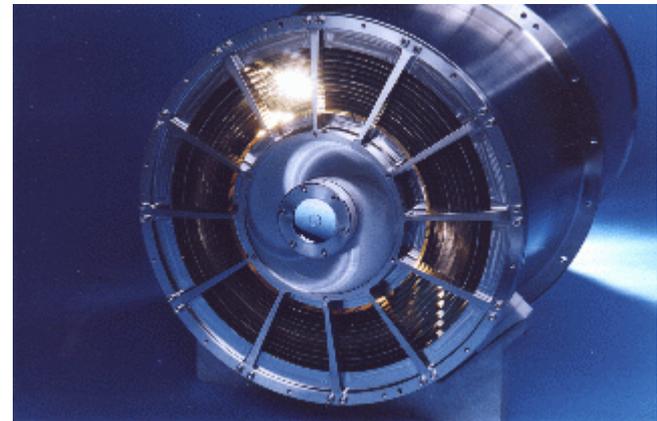
- BAT: 33000 Szintillatoren mit kodierter Maske für Energiebereich von 15-150keV
ØBestimmt Burst-Position auf 1-4 arcmin genau in 10 Sekunden
- XRT: Wolter-Teleskop zur Untersuchung des Afterglows im Röntgenbereich
ØAuflösung bis zu 3,5 arcsec
- UVOT: Teleskop für optischen und UV-Bereich



Aktuelle Satelliten



Kodierte Maske des BAT



Wolter-Teleskop XTR

Aktuelle Satelliten



Fermi Gamma-Ray Space Telescope der NASA

- 2008 gestartete Mission, vorher GLAST (Gamma Large Area Space Telescope)
- Für sehr große Gesichtsfelder ausgelegt
 - ØSucht gesamten Himmel nach GRBs ab
 - ØSieht 1/5 des gesamten Himmels im Bereich 30MeV bis 300GeV
- In niedrigem zirkularen Orbit
 - ØEine Erdumrundung in 90min
 - ØGesamter Himmel in kurzer Zeit abgesucht
 - ØRauschen durch den Strahlungsgürtel elektronisch kompensiert



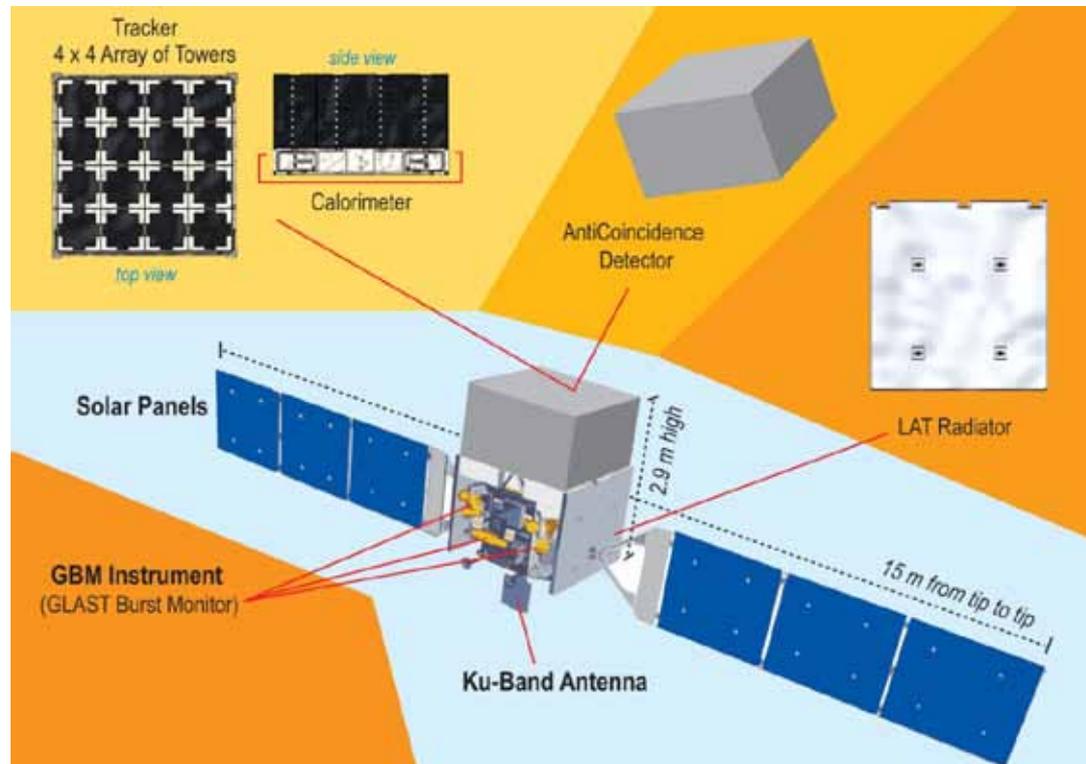
Aktuelle Satelliten

ENERGIEBEREICH

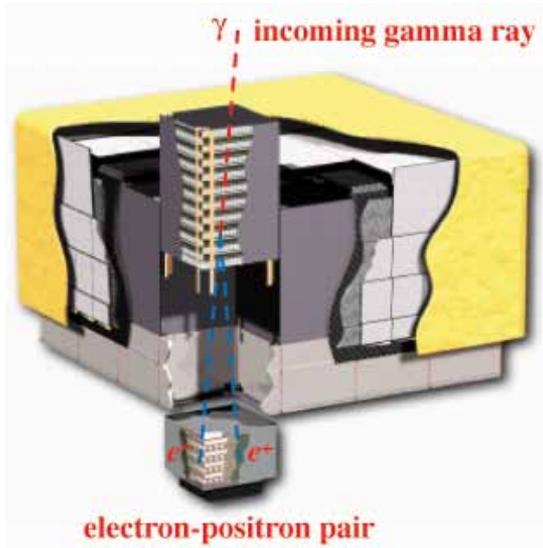


Instrumente von Fermi

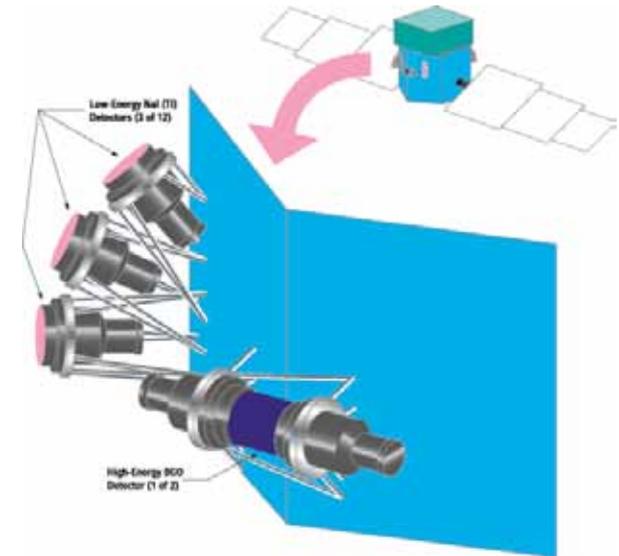
- LAT: Teleskop bestehend aus Tracker und Kalorimeter; nutzt Paarbildung
 - Ø Abgeschirmt durch Anti-Koinzidenz Schild
- GBM: 14 Kristall-Szintillatoren sehen gesamtes All (bis auf von Erde verdecktes)
 - Ø Kann Position des GRB auf 15° selbst bestimmen



Aktuelle Satelliten



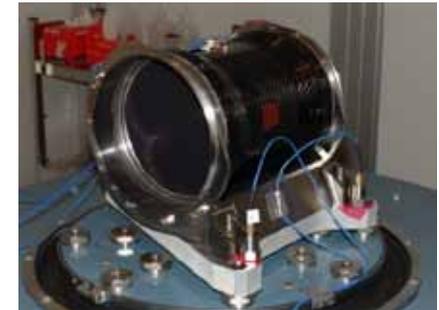
Funktionsweise des LAT



Anordnung der Detektoren des GBM



Tracking-Detektoren des LAT



Detektoren des GBM

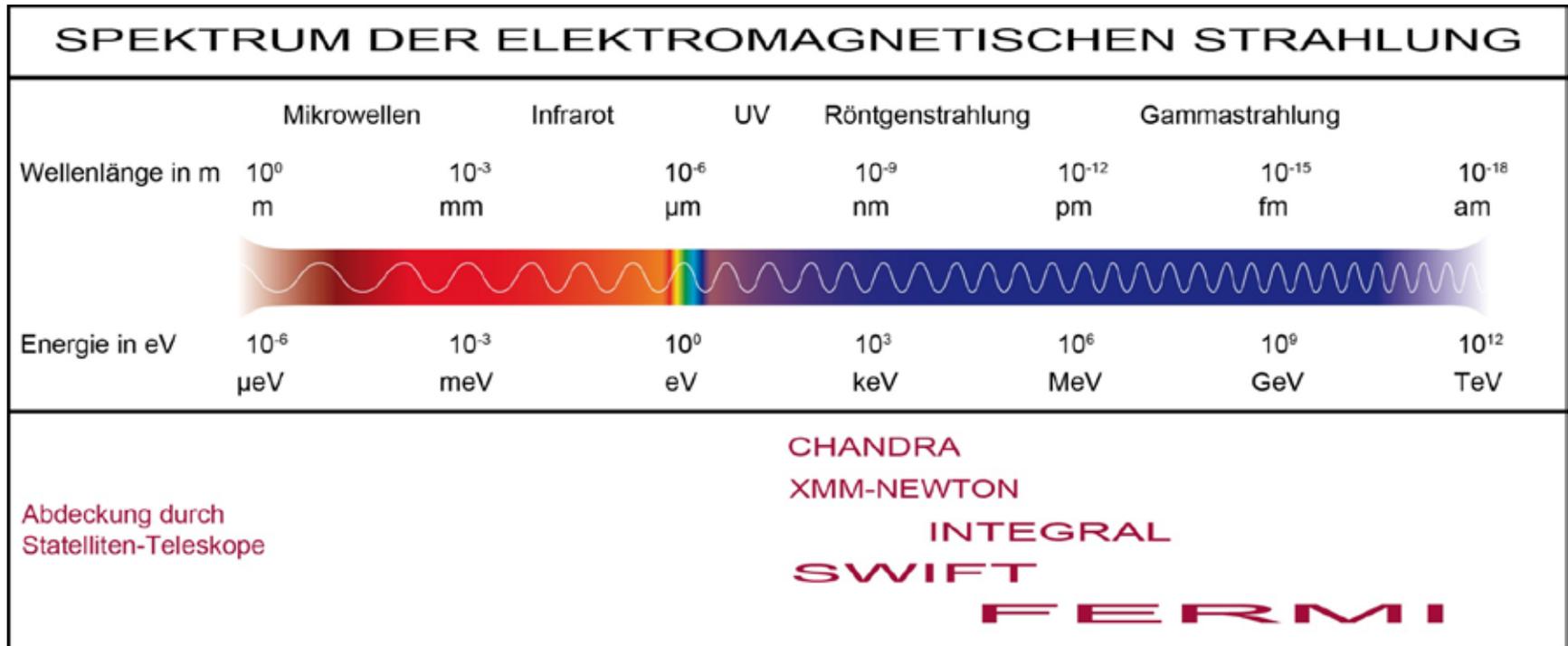
Aktuelle Satelliten

Übersicht aktueller Röntgen- und Gammasteleskope auf Satelliten

	Gewicht und Maße	Orbit	Energiebereich	Gesichtsfeld (maximal)
Chandra	4,8t schwer, 13,8m lang	Elliptisch bis zu 140000km, 28,5° Inklination, 64h Dauer	0,08keV-10keV	HRC: 31' ACIS: 16'
XMM-Newton	3,8t schwer, 10m lang	Elliptisch bis zu 114000km, 40° Inklination, 48h Dauer	0,1keV-15keV	EPIC: 33'
INTEGRAL	4t schwer, 5m lang	Elliptisch bis zu 153000km, 59,7° Inklination, 72h Dauer	3keV-10MeV	SPI: 35° IBIS: 29° Jem-X: 5°
SWIFT	1,5t schwer, 5,6m hoch	Kreisförmig bei 600km, 22° Inklination, 1,5h Dauer	0,2keV-150keV	BAT: 78° XRT: 24°
Fermi	4,5t schwer, 2,9m hoch	Kreisförmig bei 560km, 28,5° Inklination, 1,5h Dauer	8keV-300GeV	GBM: 360° LAT: 94°

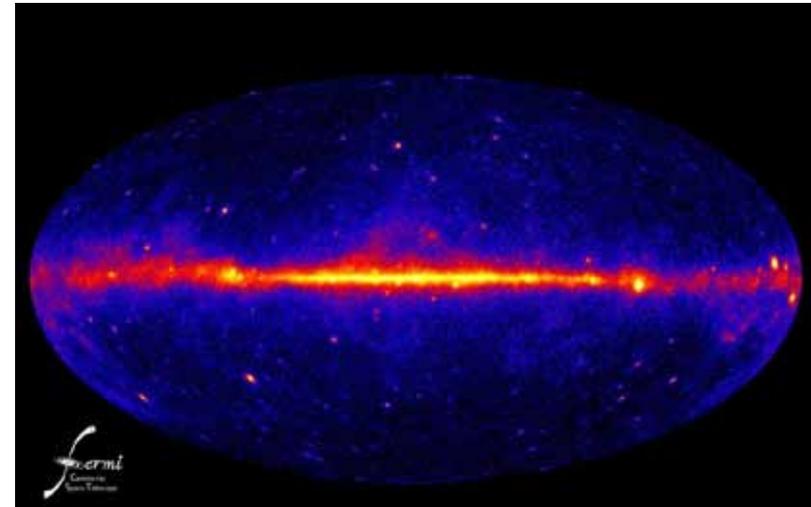
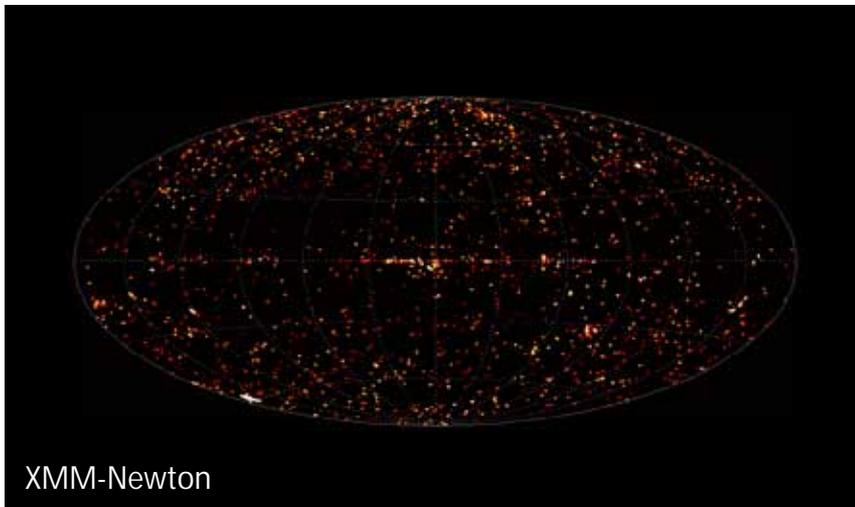
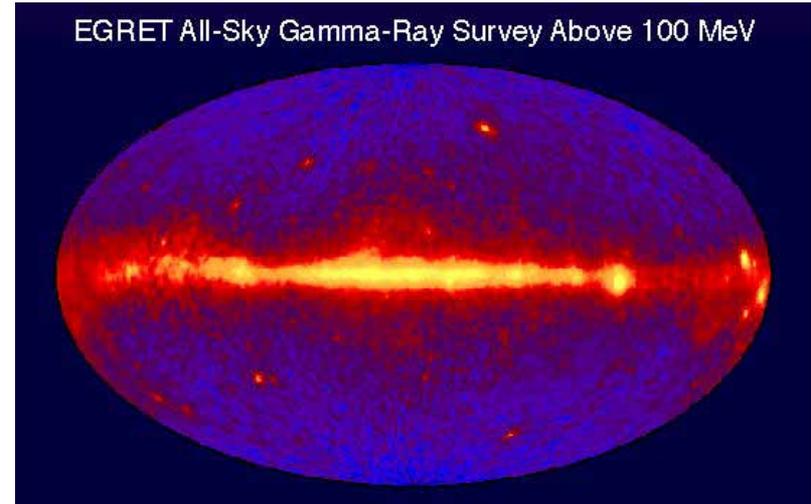
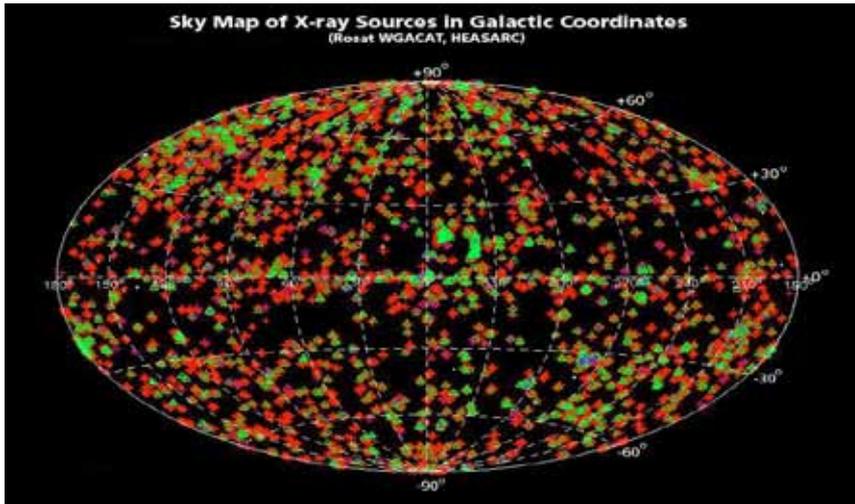
Aktuelle Satelliten

Abdeckung des Spektrums



Aktuelle Satelliten

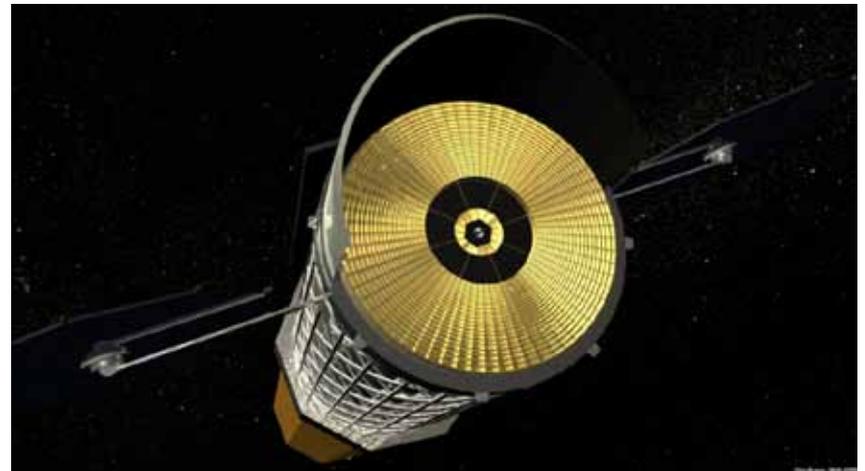
Vergleich mit alten Himmelskarten



Ausblick in die Zukunft

International X-Ray Observatory IXO

- Gemeinschaftsprojekt von NASA, ESA und JAXA (Japan) für 2021
- Röntgensatellit mit 20m Fokuslänge und 3,3m Durchmesser
- Beobachtungsbereich von 0,1-40keV mit 5 arcsec Auflösung
- Positionierung an Lagrangeunkt
- Forschungsinstrumente:
 - Hochauflösendes Energie-Spektrometer
 - Abbildender Röntgen-Detektor
 - Beugungsspektrometer
 - Hochauflösendes Zeit-Spektrometer
 - Polarimeter
- Forschungsziele:
 - Dunkle Energie und Materie
 - Schwarze Löcher
 - Galaxien, Neutronensterne
 - Entstehung schwerer Elemente



Quellen

- <http://chandra.harvard.edu/>
- <http://xmm.esac.esa.int/>
- <http://www.sciops.esa.int/index.php?project=INTEGRAL&page=index>
- <http://www.esa.int/esaMI/Integral/index.html>
- <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/swift/swiftsc.html>
- <http://fermi.gsfc.nasa.gov/>
- <http://www.nasa.gov/missions/index.html>
- <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=1>
- <http://www.esa.int/SPECIALS/Operations/index.html>
- <http://ixo.gsfc.nasa.gov/>
- <http://sci.esa.int/ixo>