

ÚRCSILLAGÁSZAT

GAMMACSILLAGÁSZAT

Összeállította: Szabados László

Szegedi Tudományegyetem
2020

A gammafotonok

1900: Paul Villard felfedezi a radioaktív bomlás során keletkező harmadik komponenst; korábban Rutherford észlelte az általa α - és β -sugárzásnak nevezett komponenseket, innen ered az elnevezése: γ -sugárzás. A csillagászatban e sugárzásnak csak kis hányada radioaktív eredetű, ezért elterjedtebb a latin betűs írásmód: gammasugárzás.

A gammafotonok a legnagyobb energiájúak, mégis elnyelődnek a légkörben.

Hivatalos határ nincs: 511 keV a szokásos érték (az e^- nyugalmi tömege). 12 nagyságrendet fog át a gammatartomány (az elektromágneses színekép többi része ugyanennyit!), de 10 GeV fölött már igen kevés foton van. Azok kimutatása nem üresközökről történik, hanem a légkörrel való kölcsönhatásuk során kaszkádszerűen keletkező részecskezápór által.

A fotonok hullámhossza rövidebb az atomok közötti távolságnál, ezért nem verődnek vissza sehonnan. A detektálás nehézségei:

- Nem lehet fókuszálni, ezért a detektornak a lehető legnagyobbnak kell lennie.
- Az űrbeli detektort kozmikus sugarak is bombázzák (erős háttérzajt okozva).
- Kis fotonszám (bármilyen is a forrás), hosszú élettartamú szondák kellene.

Ezek miatt csak az 1990-es évtizedre ért be a gammacsillagászat.

Gammafoton emissziójával járó folyamatok

100 millió K fölötti ***hőmérsékleti sugárzás*** (de a csillagok belseje opak).

Erős gravitációs vonzásnál (pl. fekete lyuk) a behulló anyag *gravitációs energiája hővé* alakul (kompakt objektumok kölcsönhatása a környezetükkel).

Nemtermikus gammafotonok keletkeznek nagy energiájú részecskék kölcsönhatásakor: pl. *nagy energiájú elektronok kölcsönhatása* atommagokkal (fékezési sugárzás), fotonokkal (inverz Compton-szórás), erős mágneses térrel (szinkrotronemisszió). És a plazma még forró is lehet!

1,2 GeV-nél nagyobb energiájú protonok *nukleáris kölcsönhatásai* instabil részecskéket (pion, mezon) keltenek, azok *bomlása* gammafotonok kilépésével jár. A sugárzásnak jellegzetes maximuma van 70 MeV körül.

Diszkrét energiájú gammasugárzást keltő folyamat: atommagok gerjesztettségének megszűnése (MeV energiájú gammavonalak).

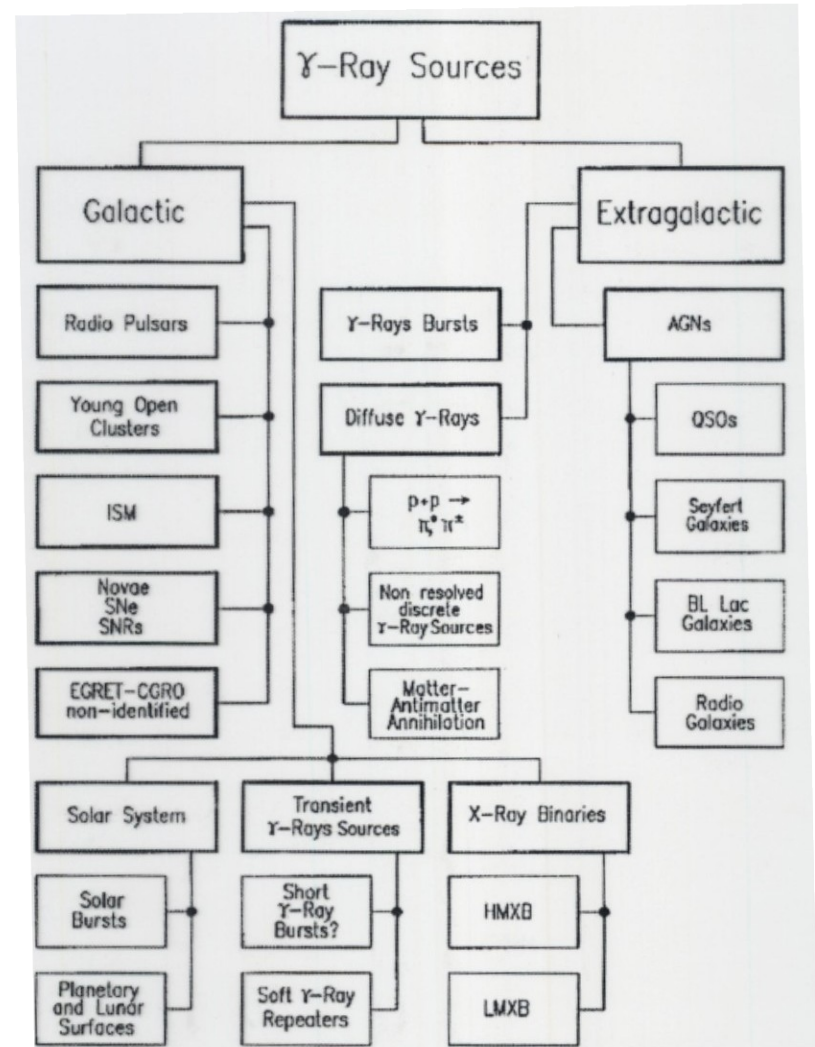
Gammaaspektroszkópia:

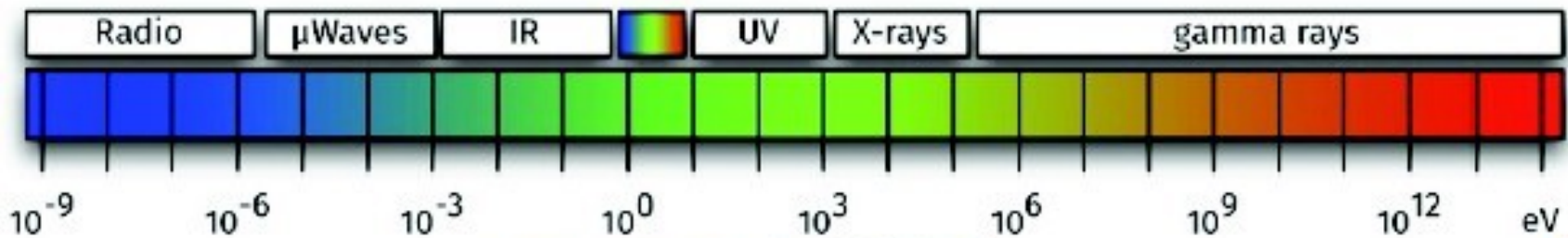
A nukleáris asztrofizika diagnosztikus eszköze, alkalmas az ***izotóp***azonosításra (az elektronátmenetek vonalaiból csak maga az elem azonosítható).

A gammacsillagászatban fontos asztrofizikai folyamatok, objektumok

- Nukleoszintézis
- Nóva- és szupernóva-robbanás
- A csillagközi anyag és a kozmikus sugárzás kölcsönhatása
- Neutroncsillagok
- Fekete lyukak
- Pulzárszél
- Nagy tömegű csillagok kompakt kettős rendszerben
- Aktív galaxismagok
- Gammakitörések
- Kozmikus gammaháttér-sugárzás

A fő gond a gyenge szögfelbontás. Az 1990-es évek elején kis energiánál kb. $1'$, nagy energiánál $5-10'$ (míg az optikai felbontás kb. $0,1''$). Ezért sokáig nehéz volt a forrás azonosítása. Az időbeli változás utalhat a forrás méretére.

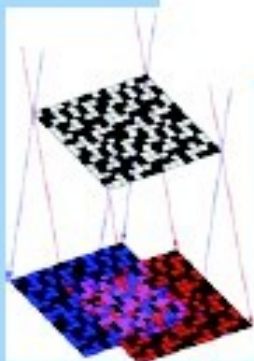




photoelectric effect



lenses



coded masks

Compton scattering



Compton telescopes

pair creation



pair converters



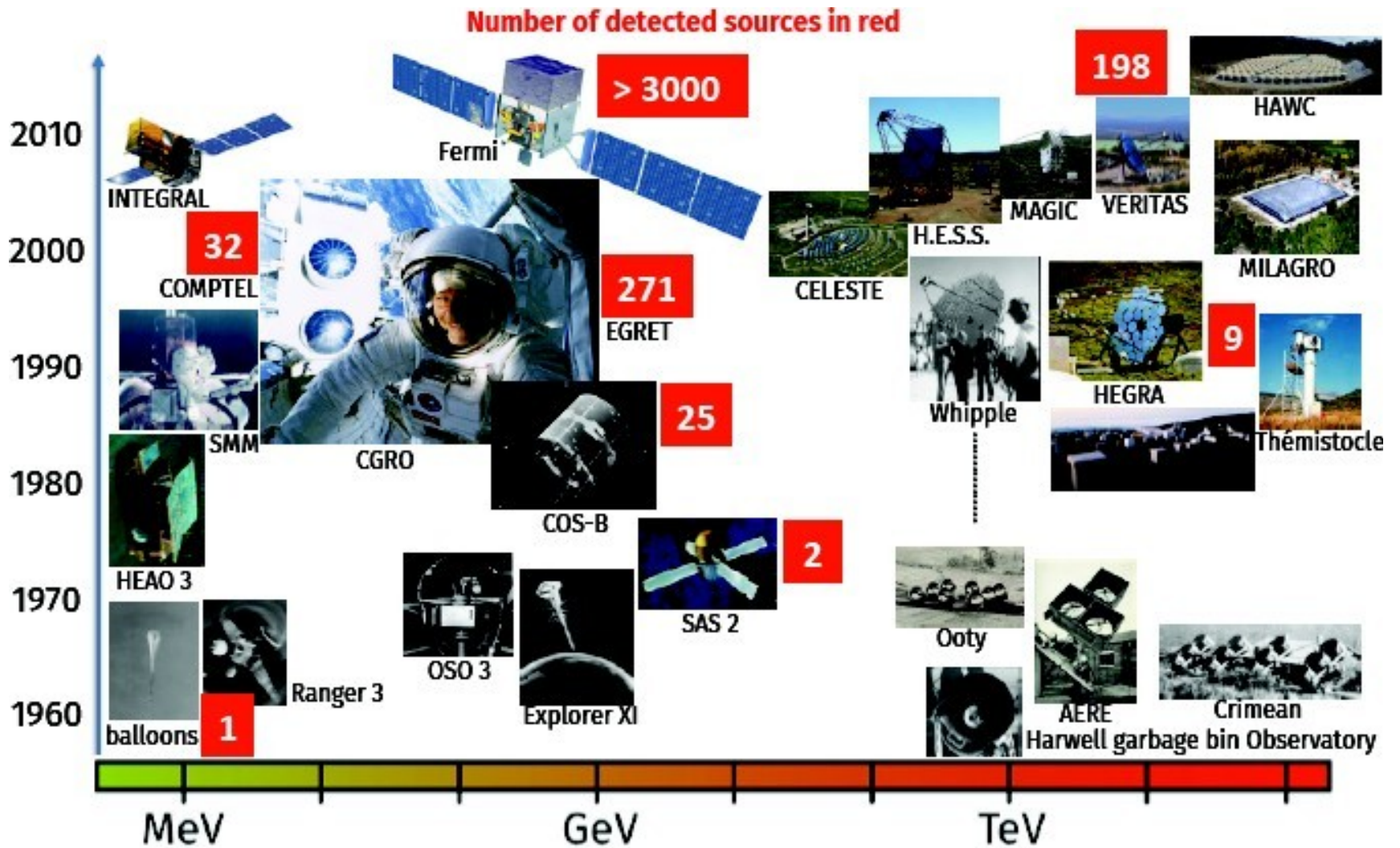
Cherenkov telescopes



Particle detectors

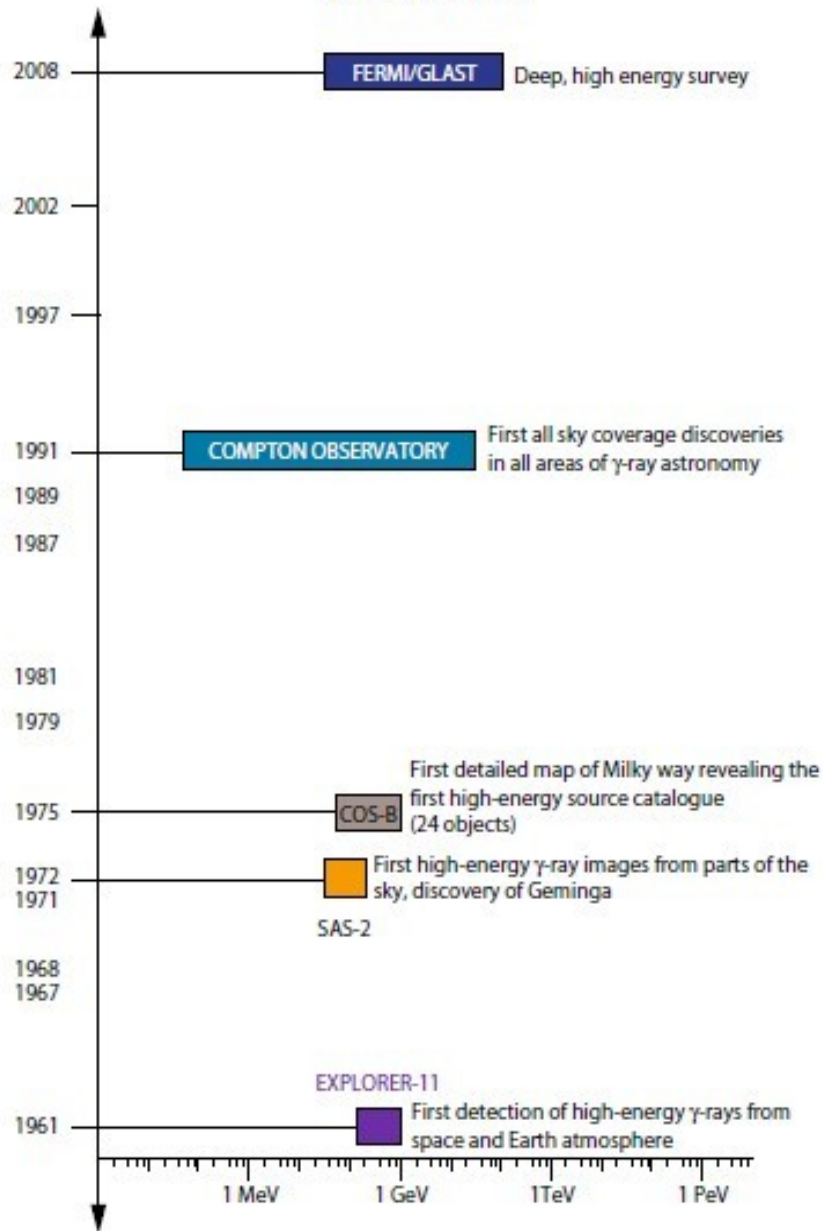
space-based

ground-based

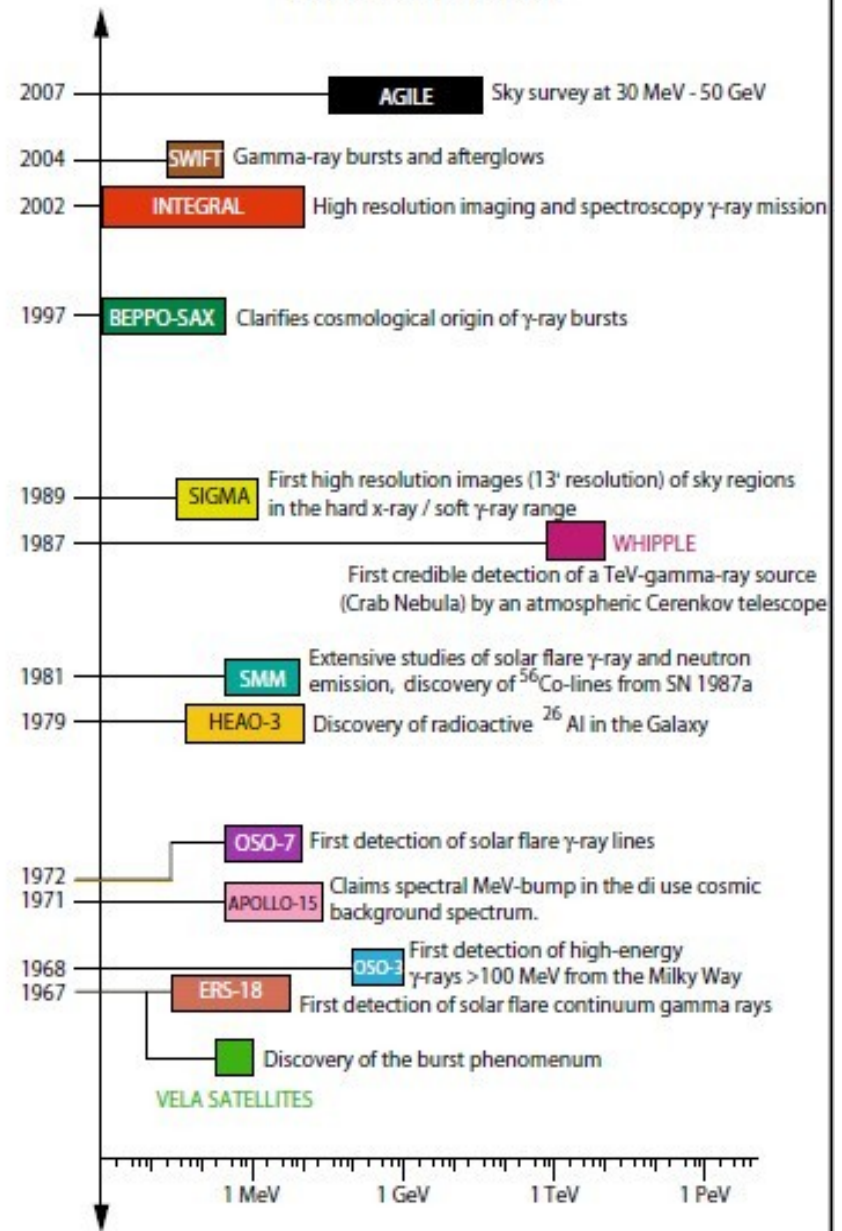


Knödseder nyomán

Observatories



Dedicated Missions



A gammacsillagászat kronológiája

- 1950-es évek: a kozmikus sugárzás a csillagközi anyaggal kölcsönhatva gammafoton kibocsátásával jár (részecske- és magfizikusok elméleti jóslata);
- 1958. márc.: a Nap az első kozmikus gammaforrás (fler);
- 1960-as évek eleje: az első ballon-kísérletek során és az Explorer–11 szondával 100 MeV-es galaktikus eredetű gammafotonokat észlelnek (1961), de a jel nem egyértelmű (optimista volt a jóslat);
- Az első földi Cserenkov-távcsövek is ekkor kezdtek működni (USA, SZU), de eleinte nem detektáltak;
- 1960-as évek vége: a Vela-holdak gammakitöréseket észlelnek (1967-től), ám 1973-ig titkolták;
- 1967–1969: OSO–3 már 621 galaktikus gammafotont és diffúz gammaháttérrel is észlelt (az utóbbit hamar igazolták ballonra szerelt detektorokkal is);
- 1970-es évek eleje: a Hold felé tartó Apollo–15 és –16 kis energiájú diffúz gammaháttérrel észlel;
- 1972: SAS–2 (NASA) igazolja az OSO–3 által felfedezett gammaháttér létét; a galaktikus emisszió a Tejútrendszer szerkezetéhez kötődik; Rák- és Vela-pulzárók észlelése, a Geminga felfedezése (neutroncsillag); az OSO–7-tel az első gammaszínkép a Napról;
- 1973: a gammakitörések létének publikálása után gammadetektorok kerülnek minden bolygószondára.

A gammacsillagászat kronológiája

- 1975–1981: COS-B (ESA) további 25 pontforrást fedez fel (néhány pulzár); az első extragalaktikus gammaforrás: 3C273; diffúz galaktikus emisszió;
- 1979–1981: HEAO-3 (NASA) felfedezi a Tejútrendszer centruma felől érkező annihilációs sugárzást (511 keV) – antianyag képződik ott;
- 1980–1989: Solar Maximum Mission (NASA): lágygamma-fotonok a Nap flerjeiből;
- 1980-as évek vége: 2. generációs földi Cserenkov-teleszkópok (10 m-es Whipple, Arizona: a Rák-ködből [nem a pulzárból] érkező keménygamma-fotonok közvetett detektálása);
- 1980-as évek vége: ballonra szerelt detektorral kimutatják az SN1987A radioaktív elemeinek gamma-sugárzását, igazolva a SN-robbanás elméletét.
- 1991–2000: CGRO: több mint 2700 gammakitörés távoli forrásokból, 271 pontforrás (nagy részt blazárok), Al^{26} lokális eloszlása;
- 1990-es évek eleje: Cserenkov-távcsövekkel blazárok keménygamma-sugárzása; perces-órás időskálájú változás;
- 1997–2003: BeppoSAX: hosszú gammakitörések utófényének első észlelése;
- 2000–2007: HETE-2: megerősíti a szupernóvák és a hosszú gammakitörések közötti kapcsolatot;
- 2002–: INTEGRAL: Al^{26} galaktikus eloszlása (tejútrendszerbeli SN kb. ötvenévenként);
- 2004–: Swift: évente kb. 100 gammakitörés, gyors azonosítással;
- 2000-es évek: több új földi Cserenkov-detektor (pl. HESS, VERITAS, MILAGRO)
- 2007–: AGILE
- 2008–: Fermi-GLAST

A gammacsillagászat kiteljesedése

Experiment	Energy range	Date	γ candidates
Explorer XI	> 50 MeV	1961	22
OSO-3	> 50 MeV	1967–1968	621
SAS-2	20 MeV–1 GeV	1972–1973	13,000
COS-B	30 MeV–3 GeV	1975–1983	200,000
EGRET	30 MeV–10 GeV	1991–1999	1,500,000
<i>Fermi</i> -LAT	20 MeV–> 1 TeV	2008–??	500,000,000

TABLE III: Total number of gamma-ray candidates collected by specific space-born detectors through their missions. Note that the energy ranges for the various experiments are purely indicative.

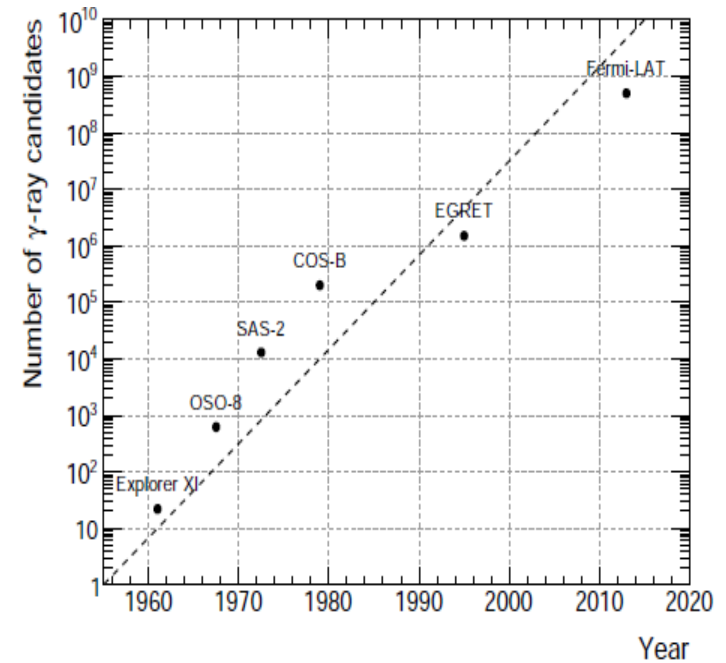
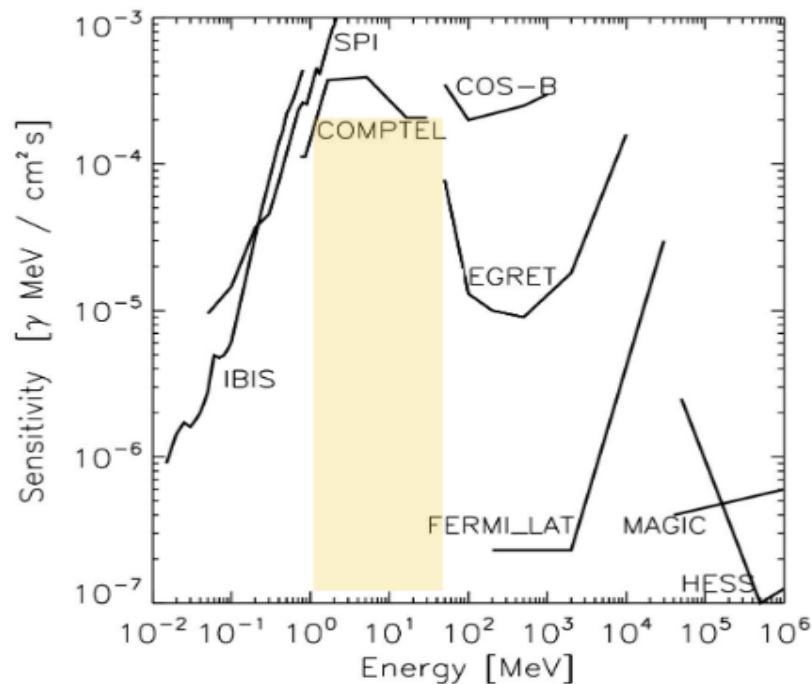


FIG. 11: Total number of gamma-ray candidates collected by specific space-born detectors through their missions. The points on the x -axis are the average values between the mission start and stop times.

Gammacsillagászati projektek ábécében

Experiment	Technique	Location	Launch date	Web site
ACE		Satellite	1997	http://www.srl.caltech.edu/ACE/CRIS_SIS/index.html
AESOP	MS	Balloon	1994	http://www.bartol.udel.edu/gp/balloon
AGILE	PCT	Satellite	2007	http://agile.rm.iasf.cnr.it/
ALICE	CR	Balloon	1987	http://ida1.physik.uni-siegen.de/alice.html
AMS-01	MS	Shuttle	1998	http://ams.cern.ch/AMS/Welcome.html
AMS-02	MS	ISS	2011	http://www.ams02.org
ATIC	IC	Balloon	2000	http://atic.phys.lsu.edu/index.html
BESS	MS	Balloon	1993	http://astrophysics.gsfc.nasa.gov/astroparticles/programs/bess/BESS.html
BETS	IC	Balloon	1997	
CAPRICE	MS	Balloon	1994	http://ida1.physik.uni-siegen.de/caprince.html
CREAM	IC	Balloon	2004	http://cream.uchicago.edu
CRISIS		Balloon	1977	
CRN		Shuttle	1985	
CRRES		Satellite	1990	http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1990-065A
EGRET	PCT	Satellite	1991	https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/egret/
Fermi	PCT	Satellite	2008	http://fermi.gsfc.nasa.gov
HEAO		Satellite	1979	http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heao3/heao3_about.html
HEAT	MS	Balloon	1994	http://stratocat.com.ar/fichas-e/1994/FSU-19940503.htm
HEIST		Balloon	1988	
IMAX	MS	Balloon	1992	http://ida1.physik.uni-siegen.de/imax.html
IMP	SC	Satellite	1963	http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/sats_n_data/missions/imp7.html
ISEE		Satellite	1978	http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/missions/isee3.html
ISOMAX	MS	Balloon	1998	http://astrophysics.gsfc.nasa.gov/astroparticles/programs/isomax
JACEE	EC	Balloon	1979	http://marge.phys.washington.edu/jacee
MASS	MS	Balloon	1989	http://ida1.physik.uni-siegen.de/mass2.html
MUBEE		Balloon	1975	
OGO5		Satellite	1968	http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/sats_n_data/missions/ogo.html
OSO-3		Satellite	1967	http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/missions/oso3.html
PAMELA	MS	Satellite	2006	http://pamela.roma2.infn.it/index.php
Pioneer		Satellite	1967	http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1972-012A
RICH		Balloon	1997	
RUNJOB	EC	Balloon	1995	http://runjob.boom.ru
SAS-2		Satellite	1972	http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/sas2/sas2.html
SMILI		Balloon	1989	
SOKOL	IC	Satellite	1984	
TRACER		Balloon	2003	http://tracer.uchicago.edu
TS	MS	Balloon	1993	
Trek		ISS	1991	
Ulysses		Satellite	1990	http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=11
Voyager		Satellite	1977	http://voyager.jpl.nasa.gov

De csak
2011-ig.
Ráadásul
a Swift
szondát
egyszerűen
kifelejtették.

Gammateleszkópok, észlelési technológia

A nagy energia és a nagy hatáskeresztmetszet kedvez a detektálásnak. Már a kozmikus röntgensugarak előtt tudták detektálni, mégis ezerszer több ismert röntgenforrás van az égen, mint gammaforrás.

Kis energiákon a röntgenével azonos a detektálás módszere. MeV fölötti energiákon nem érhető el a reflexió, a detektor mérete azonos a

teleszkópéval. Ezért is volt a CGRO a legnagyobb méretű és tömegű űrszonda.

A nyalábot koncentrálni kell, hogy a háttérzaj (pl. kozmikus sugárzás) kevésbé zavarjon.

Nagy energiákon földi teleszkópok: a légizáporok gammafotonjait érzékelik a Cserenkov-effektus alapján.

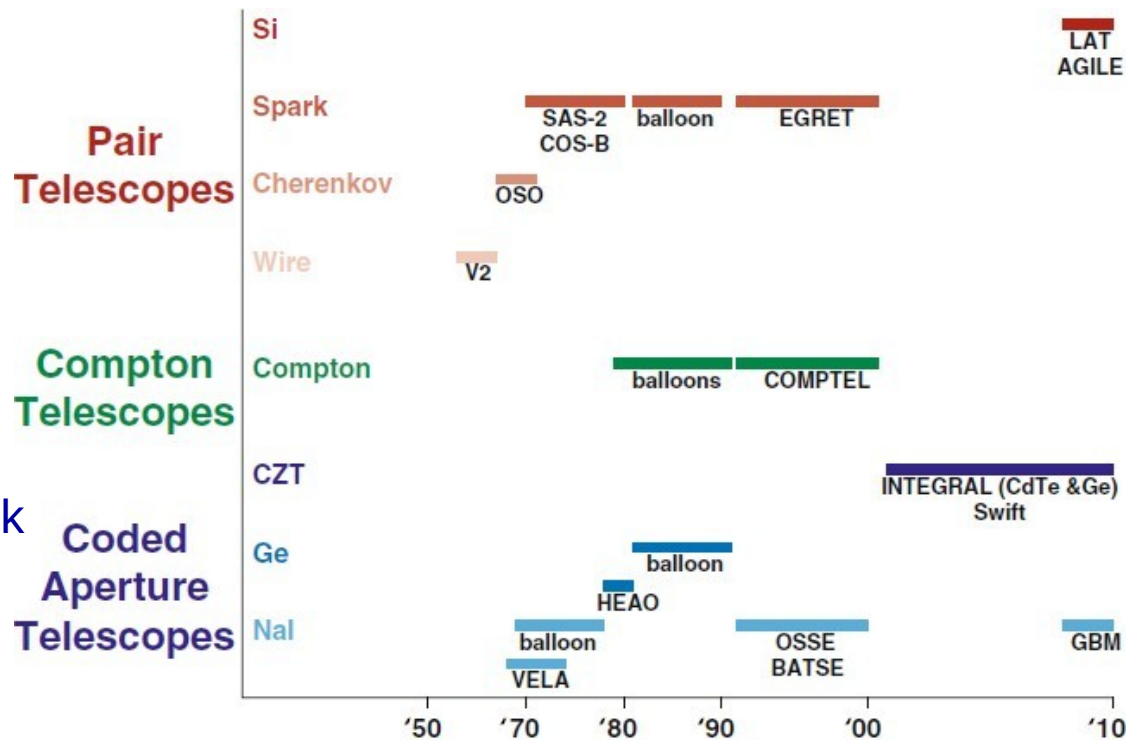


Fig. 2 A history of γ -ray telescope technology

Table 1: Strongest spectral lines in the nuclear-physics part of the gamma-ray domain between $\simeq 0.1$ and 10 MeV, and their characteristics

energy (MeV)	source process	astrophysical origin (source type)
0.078	radioactive decay: ^{44}Ti	ccSN interior nucleosynthesis
0.122	radioactive decay: ^{57}Ni	supernova nucleosynthesis
0.478	radioactive decay: ^7Be	nova nucleosynthesis
0.511	positron annihilation	nucleosynthesis, compact stars, dark matter
0.847	radioactive decay: ^{56}Ni	supernova nucleosynthesis
1.157	radioactive decay: ^{44}Ti	ccSN interior nucleosynthesis
1.173	radioactive decay: $^{60}\text{Fe}, \text{Co}$	ccSN ejected nucleosynthesis
1.275	radioactive decay: ^{22}Na	nova nucleosynthesis
1.332	radioactive decay: $^{60}\text{Fe}, \text{Co}$	ccSN ejected nucleosynthesis
1.634	nuclear excitation: ^{20}Ne	cosmic ray / ISM interactions
1.809	radioactive decay: ^{26}Al	massive-star and ccSN nucleosynthesis
2.230	neutron capture by H	energetic nucleon interactions
2.313	nuclear excitation: ^{14}N	cosmic ray / ISM interactions
2.754	nuclear excitation: ^{24}Mg	cosmic ray / ISM interactions
4.438	nuclear excitation: ^{12}C	cosmic ray / ISM interactions
6.129	nuclear excitation: ^{16}O	cosmic ray / ISM interactions

Gammavonalak

Nagyon fontos az $e^- + e^+$ annihilációs vonala 511 keV-nél.

Nucleosynthesis Lines				
Decay Chain	Mean Life (Yrs)	Emission (MeV)	Origin	Observed from
$^7\text{Be} \rightarrow ^7\text{Li}$	0.145	e-capt, 0.478	Novae	
$^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$	0.31	e^+ , 0.847, 1.238	Supernovae	SN1987a SN1991T(?)
$^{57}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{57}\text{Fe}$	1.1	0.014, 0.122	Supernovae	SN1987a
$^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne}$	3.8	e^+ , 1.275	Novae, WR-stars	
$^{44}\text{Ti} \rightarrow ^{44}\text{Sc} \rightarrow ^{44}\text{Ca}$	78	e^+ , 0.068, 0.078, 1.156	Supernovae	Cas A, RX 0852-4622(?)
$^{60}\text{Fe} \rightarrow ^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni}$	$2.2 \cdot 10^6$	0.059, 1.173, 1.332	Supernovae	
$^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg}$	$1.1 \cdot 10^6$	e^+ , 1.809	Supernovae, WR-stars	Galactic Plane, RX 0852-4622(?)

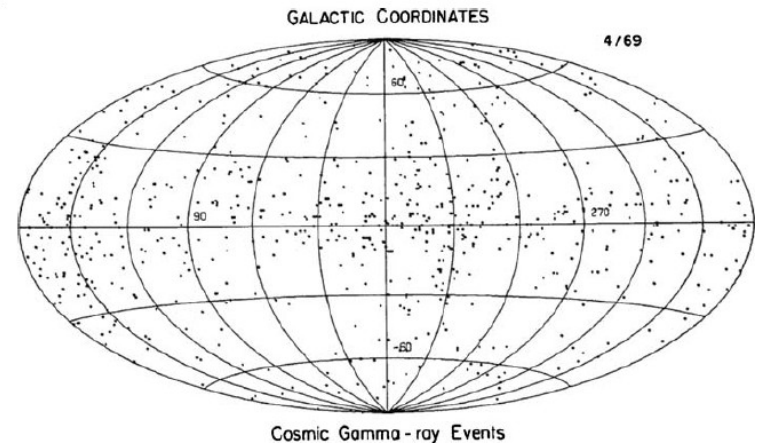
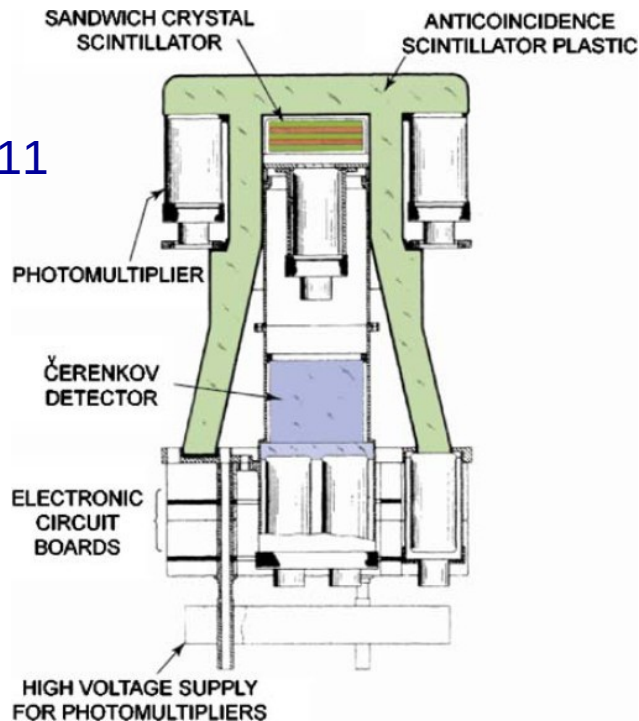
Az első gammacsillagászati űrszondák

Explorer-11: 1961. ápr. – nov., az első gammacsillagászati távcső;
22 foton észlelt (+ 22000 részecskét a kozmikus sugárzásból).

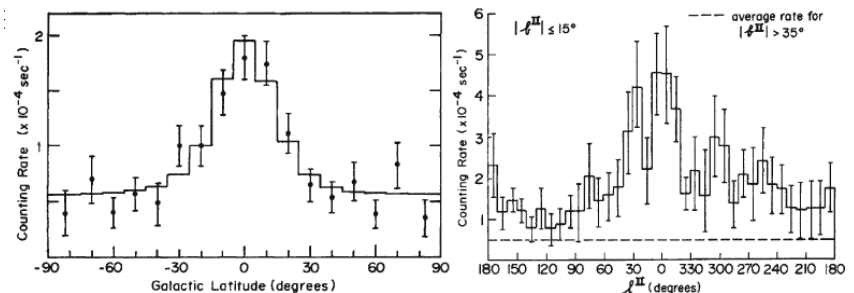
OSO-3: 1967. márc. – 1969. nov.: gammaforrások + diffúz háttér.

SAS-2 (Explorer-48): 1972-ben indítva 8 hónapig működött LEO-pályán.
20–200 MeV között égtérképezés. Kirajzolódott a Tejút.

Explorer-11



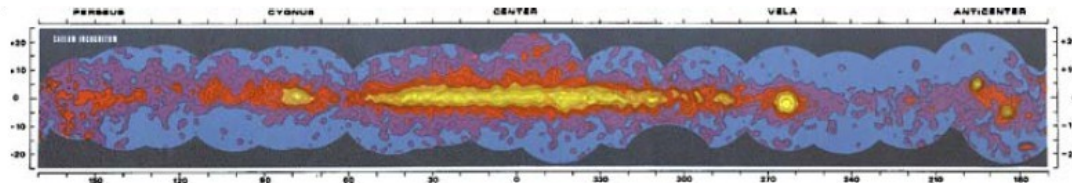
Az OSO-3 eredményeiből



Az első gammacsillagászati űrszondák

COS-B: Celestial Observation Satellite (ESA), 1975–1982, 340–100000 km közötti pályán 25–1000 MeV tartományban észlelt, $0,5^\circ$ pontos pozícióval. A Tejútrendszer nagyenergiás képe, az ismert gammapulzárók részletes vizsgálata, az első extragalaktikus gammaforrások (3C273).

Közben: **Vela**-szondák (USA) az eltitkolt nukleáris robbantások felderítésére. Földi gammaforrások helyett kozmikus eredetűeket talált (1968), de évekig titkolniuk kellett, mert a kéműholdakról „hivatalosan” nem lehetett tudni.



COS-B: 1975-82

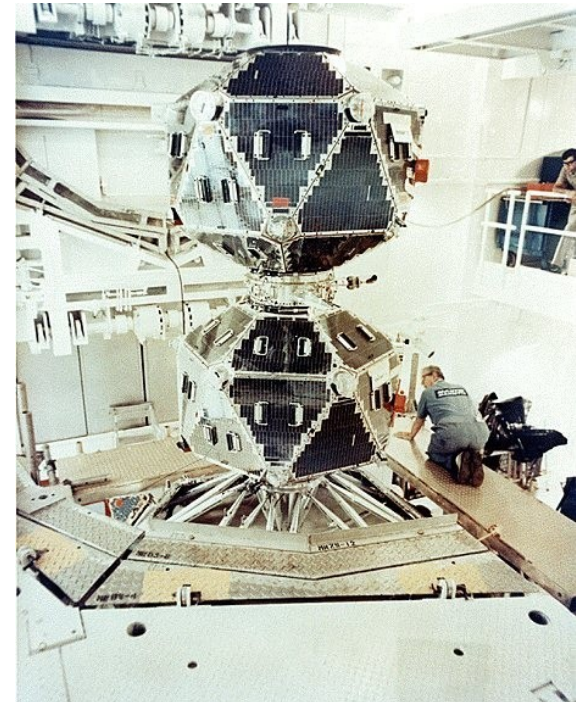
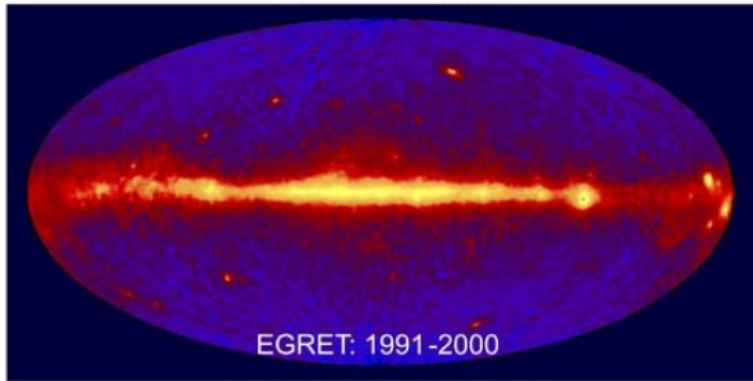


Fig. 5 Imaging with pair telescopes > 100 MeV. In the COS-B map, the Cygnus Region, Inner Galaxy, Vela Pulsar and Crab and Geminga Sources beyond the “galactic hole” between 210° and 250° galactic longitude are visible. In the EGRET map, extragalactic sources are added, like 3C279, PKS 0524 + 134, the LMC, PKS 0208-512, or 3C454.3

Újabb gammacsillagászati szondák

HEAO-3: 1979. szept. – 1981. máj. (NASA); 10 MeV-ig észlelt LEO-pályán. Közöséges csillagnál is kimutatott nukleáris emissziós vonalat.

Speciális gammaszonda híján ezután a felfedezések üteme lassult. A SN 1987A új lendületet adott. Akkor még működött a SMM, és léggömböket, rakétát is felküldtek.

Gammavonalak (0,847 és 1,238 MeV) a radioaktív ^{56}Co bomlásakor. Korábbi jóslat szerint a SN optikai fénygörbéje ennek az energiájából származik ($^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$). A legerősebben kötött stabil mag az ^{56}Fe .

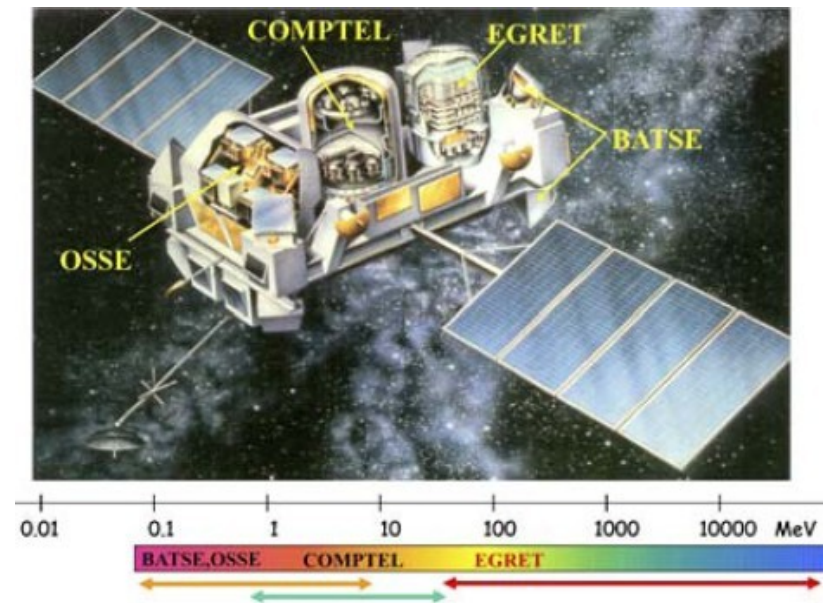
SIGMA műszer a **Granat** szondán (SZU + Franciaország): 1989–1999 között HEO pályán. Kódolt maszkos teleszkóp röntgen- és gamma-sugárzás detektálására 30 keV és 2 MeV között. Gammakitörés-detektor is volt rajta.

A gammacsillagászat áttörése az 1990-es években következett be a Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) működésével.

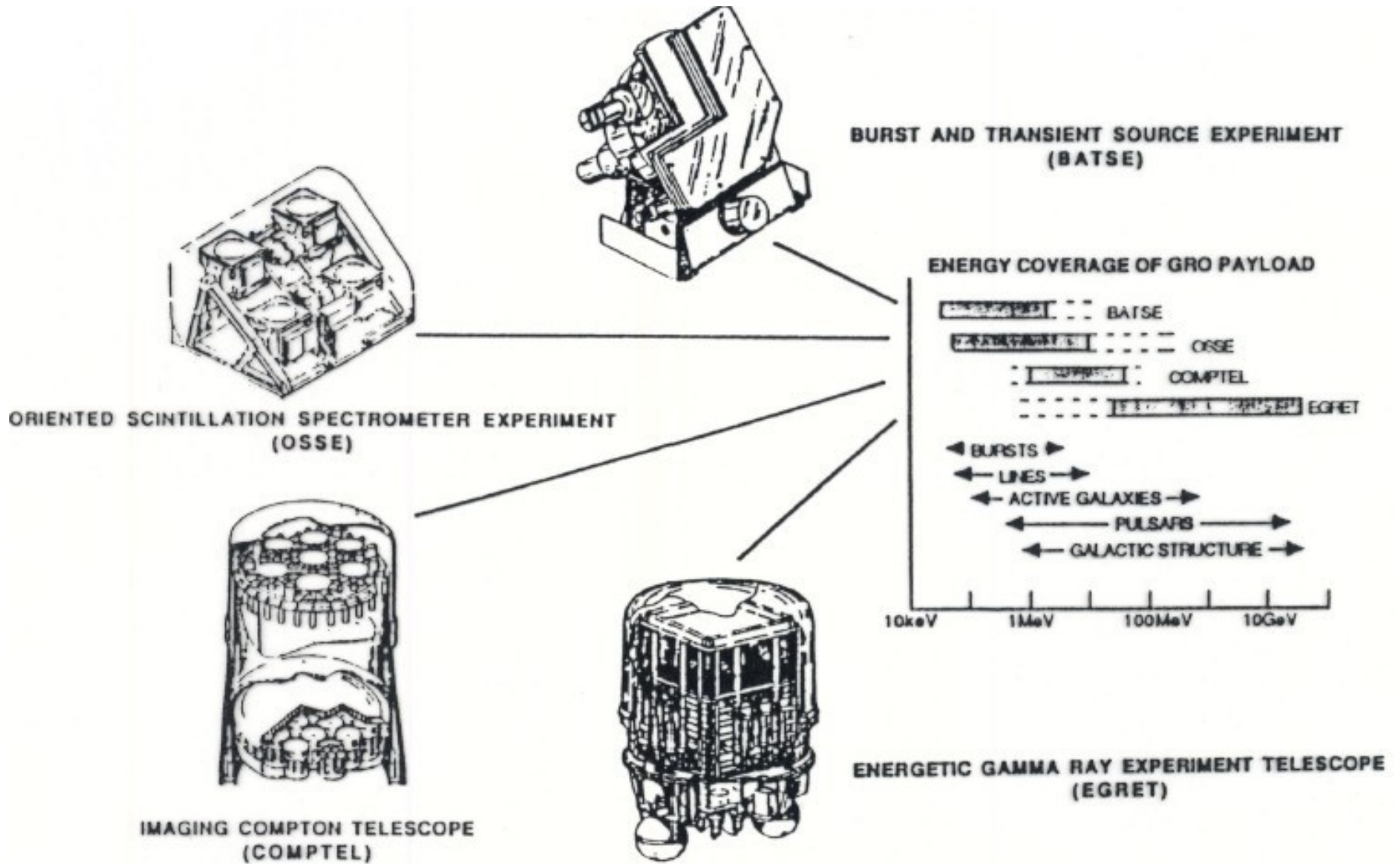
Compton Gamma Ray Observatory

CGRO: a NASA 2. nagy obszervatóriuma, 1991. ápr. – 2000. jún. Négy műszere (OSSE, COMPTEL, EGRET, BATSE) 6 dekádot fogott át (30 keV – 3 GeV). A legnagyobb tömegű (17 tonnás) űreszköz űrrepülőgéppel feljuttatva. 360–460 km-es LEO-pályán (azaz a magnetoszféra alatt).

Minden műszere tízszer érzékenyebb a korábbiaknál. Fékeződése miatt két Pályakorrekció kellett, majd az egyik giroszkóp tönkremenetele után befejezték a missziót (a szonda irányítva a Csendes-óceánba zuhant).



Compton Gamma Ray Observatory



CGRO

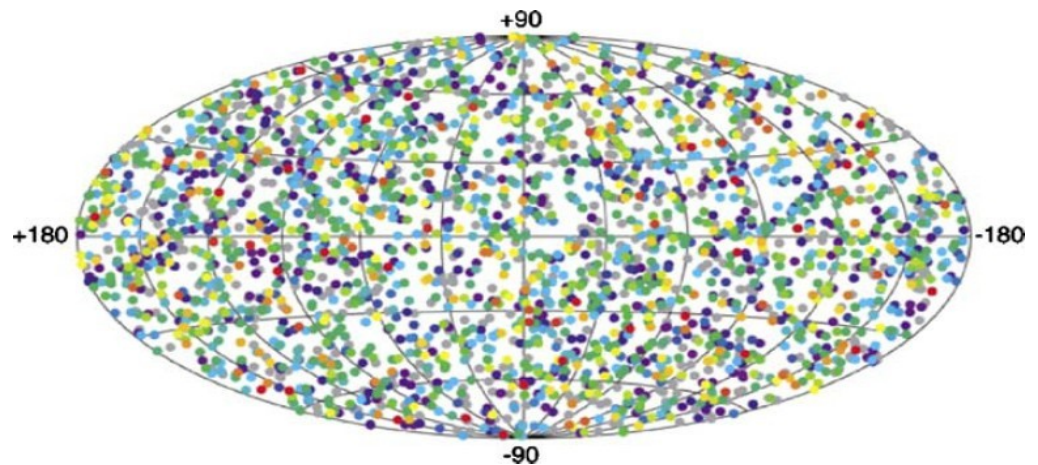
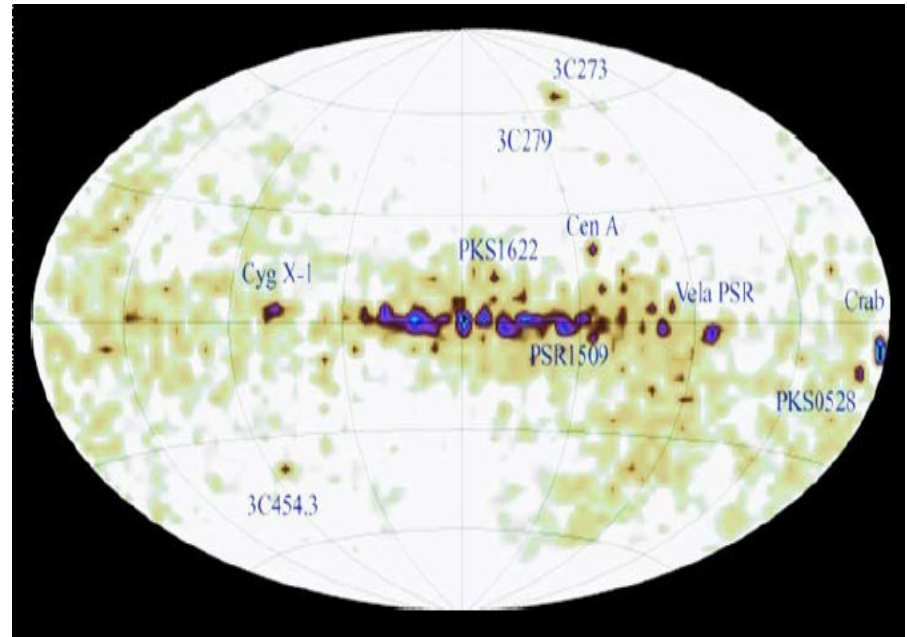
COMPTEL: ^{26}Al -térkép (717000 év felezési idő, 1,809 MeV energia) (felső kép);

BATSE: 2704 gammakitörés (alsó kép);

OSSE: a galaktikus centrum alapos vizsgálata;

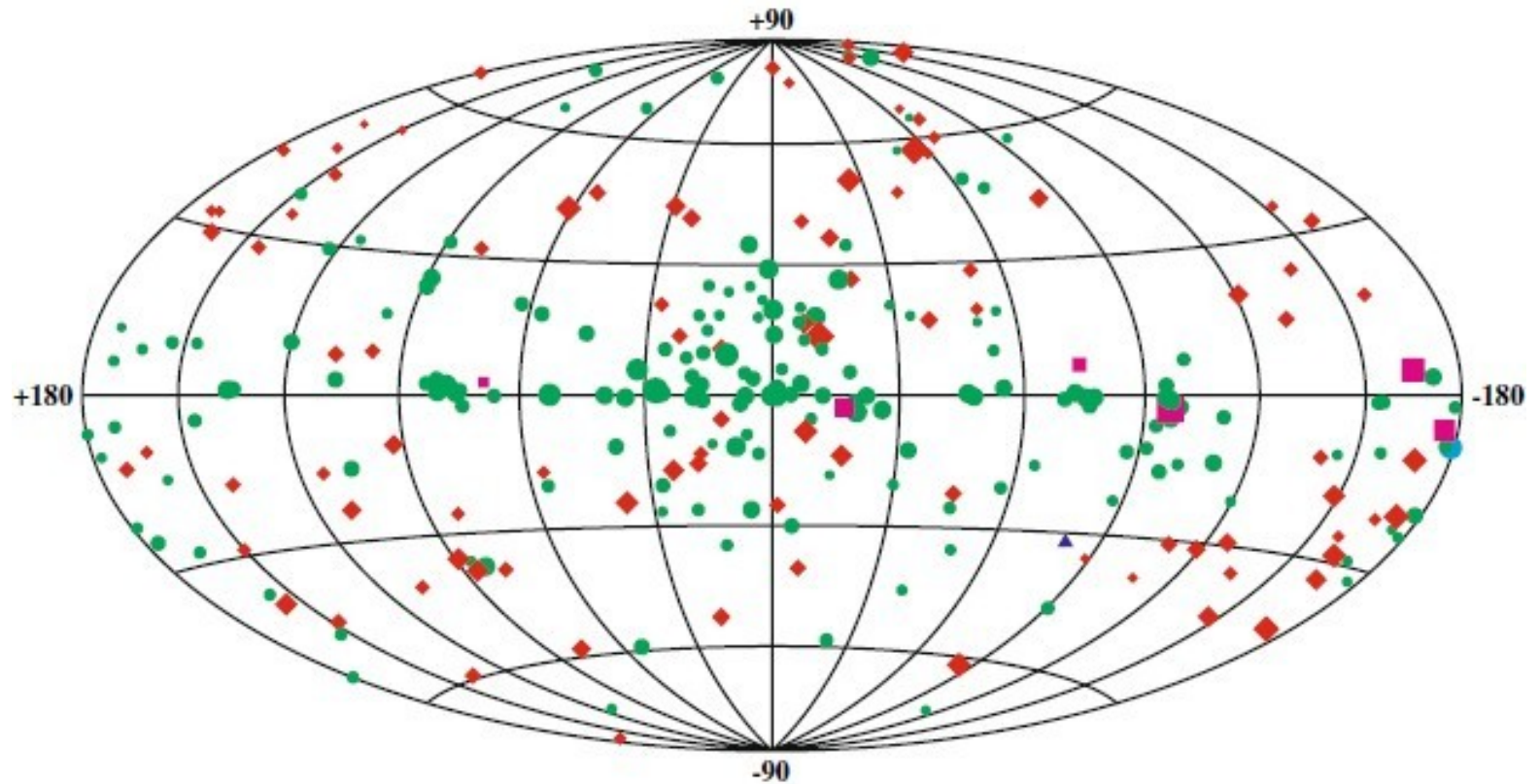
EGRET: az első teljes égfelmérés 100 MeV felett; a 3. katalógusban 271 gammaforrás szerepel (a következő dián), a kis fotonszám miatt „valószínűségi” térképek.

- Lágygamma-ismétlők (<100 keV) felfedezése;
- Pulsár- és SNR-felmérés;
- Földi zivatarfelhők gammasugárzása.



Third EGRET Catalog

$E > 100 \text{ MeV}$



▲ LMC

■ Pulsars

● Solar Flare

◆ Active Galactic Nuclei

● Unidentified EGRET Sources

Csillagrobbanások, gammapulzárók

A radioaktív magok nukleáris reakciókban keletkeznek, de olyan mélyen, ahol az anyag opak a gammasugárzásra. A bomláskor felszabaduló fotonok kölcsönhatnak az elektronokkal (Compton-szórás), a környezet felmelegszik, a kisugárzás hosszabb hullámhosszon történik.

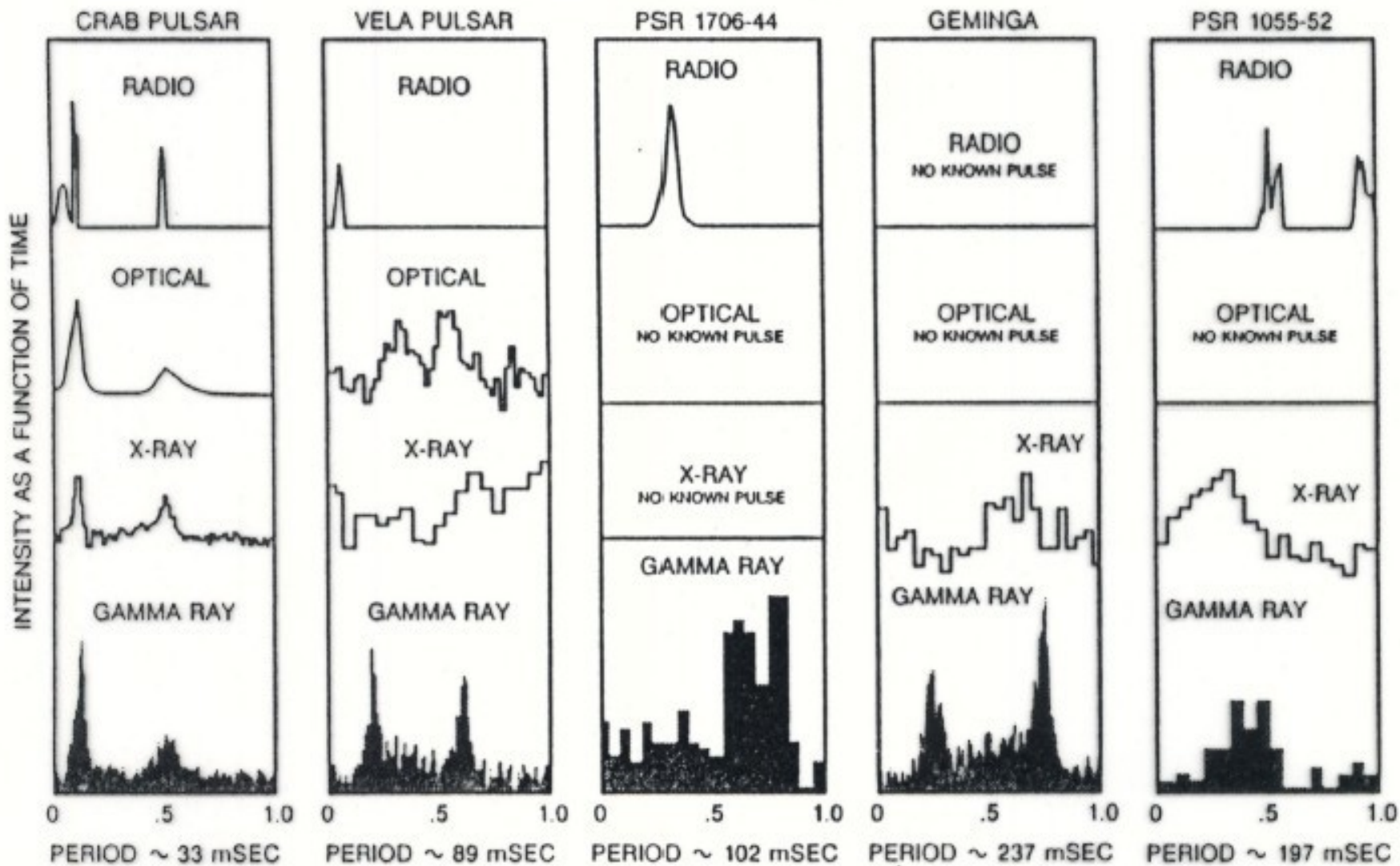
Gammafoton csak hirtelen tágulás során (erős csillagszél) vagy robbanás (szupernóva) során kerülhet ki, mivel az opacitás kisebb sűrűségnél lecsökken.

A gammasugarak energiájából (a színeképvonalakból) azonosíthatók az izotópok, a vonalprofilból pedig a ledobott anyag sebesség- és sűrűségprofiljára lehet következtetni.

Hosszú felezési idejű radioaktív izotópokból az elmulasztott szupernóvák utólag felfedezhetők (pl. a Cas A több mint 300 év után).

Évezredekkel a robbanás után pedig a relativisztikus elektronok és protonok kölcsönhatása a környező anyaggal kelthet gammasugárzást (pl. Rák-köd és 4 másik SNR a CGRO észlelései alapján). Ezek a gammapulzárók. A Geminga a legközelebbi ismert neutroncsillag (100 fényévre).

EGRET PULSARS



Akkréció kompakt égitesteknél

Kettőscsillagoknál a tömegbefogási korong belső szélénél forró az anyag (a gravitációs energia rovasára hő fejlődik. *Neutroncsillag* körül legfeljebb 100 millió K lehet az anyag hőmérséklete (röntgentartományba eső hőmérsékleti sugárzás), *fekete lyuk*nál forróbb is lehet. Az 1 milliárd K hőmérsékletű anyag lágygammában sugároz néhány száz keV-ig. Így meghatározható a kompakt égitest típusa.

Az akkréció instabilitása miatt változhat a gammasugárzás erőssége.

Tranziens gammaforrásra példa a Nova Mus 1991. A robbanás után gammában fényesebb volt a Rák-ködnél is (pedig az a legerősebb gammaforrás az égen).

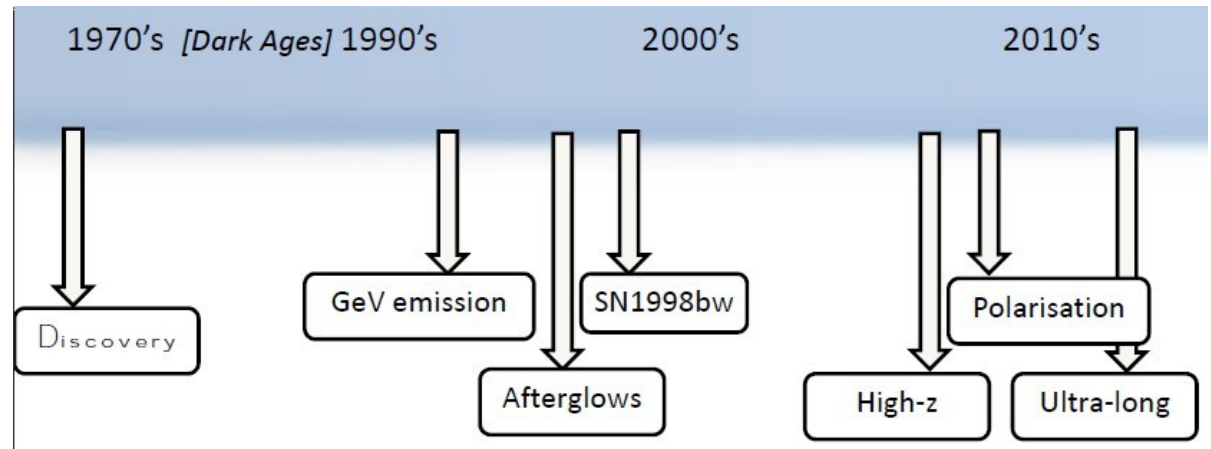
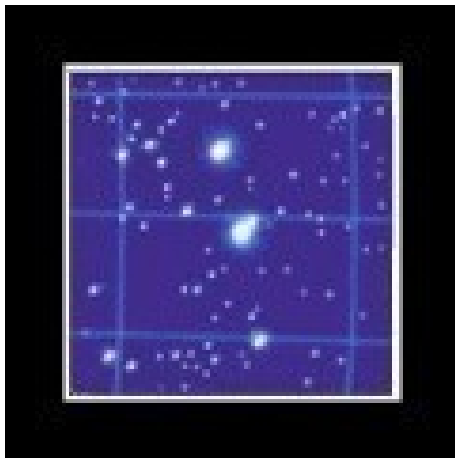
Változó gammaaktivításra példa az 1E 1740.7-2942 a 300–600 keV közötti emissziós többletével (a Tejútrendszer centrumának irányában van). 1990 októberében két napig erősen sugárzott (a SIGMA műszerrel mérték). Oka: az $e^- + e^+$ annihilációja a fekete lyuk környezetében. Rádiótartományban feltérképezve szinkrotronemissziós jellegű kilövéseket találtak. Kompakt gammakitörés és relativisztikus sebességű rádiókilövések együtt máshol is előfordulnak a Tejútrendszerben. Ezek a *mikrokvazárok*.

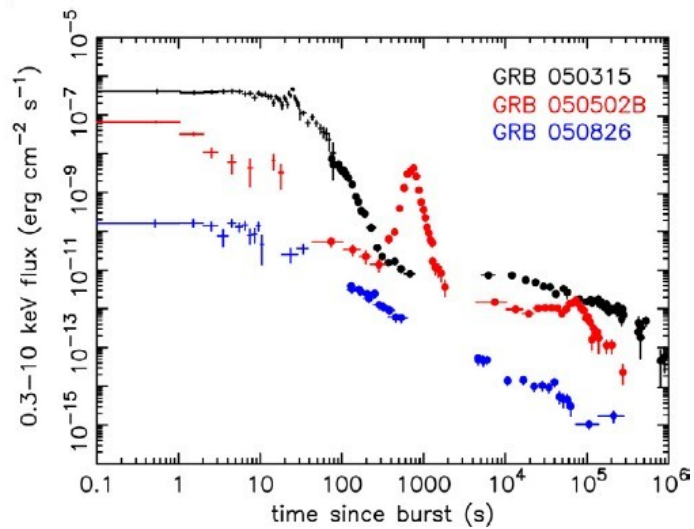
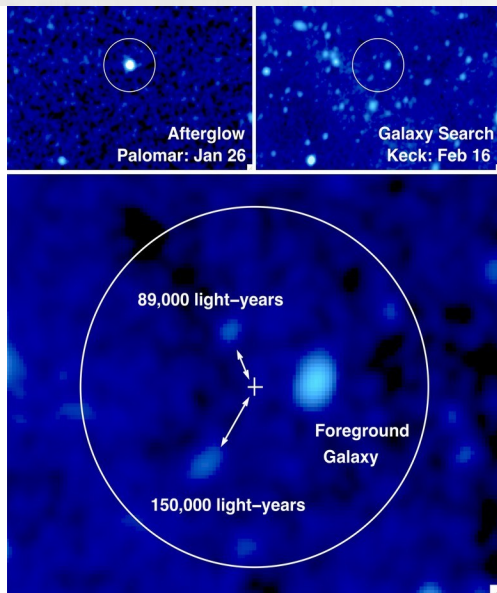
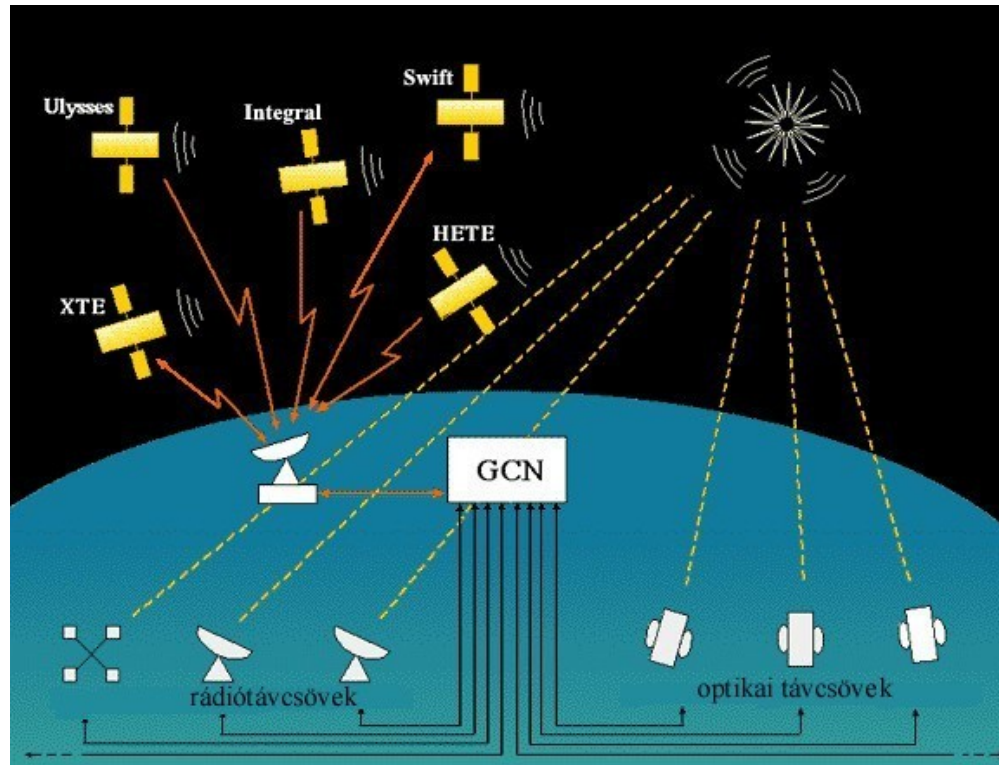
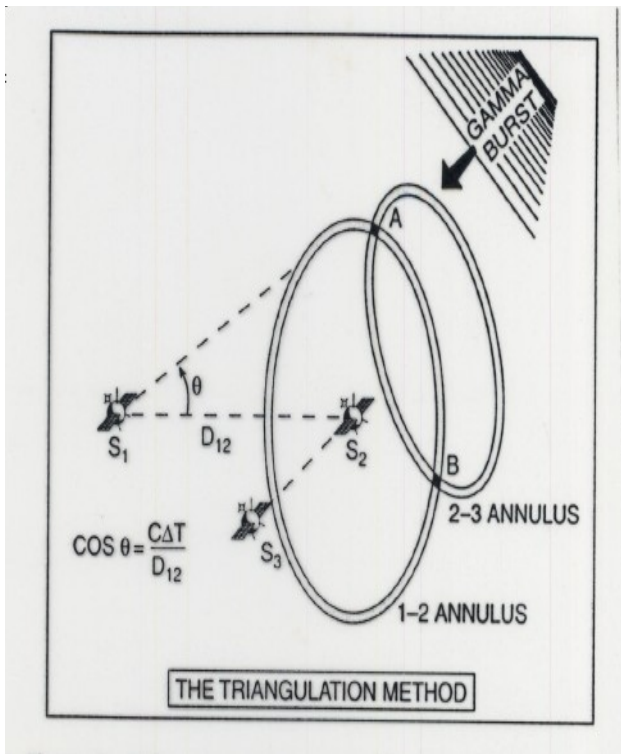
Diffúz gamma sugárzás

- A csillagaktivitás termékei áthatják a csillagközi teret. A kozmikus sugarak, a radioaktív magok és a pozitronok diffúz gamma sugárzást keltenek. Először az OSO-7 észlelt ilyen 1968-ban. A Tejútrendszert először a COS-B és a CGRO térképezte fel. A gammaemisszió korrelál a Tejútrendszer más hullámhosszokról ismert szerkezetével (molekulagyűrű a centrumtól 10-15 ezer fényévre, spirálkarok, molekulafelhők, vagyis a gázban gazdag és aktív csillagkeletkezési tartományok).
- A gamma színkép energiaeloszlása szerint kis (1–30 MeV) energián a fékezési sugárzás dominál (a kozmikus sugárzás elektronjai), nagyobb energián a Π^0 pion emissziója.
- A Nagy-Magellán-felhőben hasonló diffúz gamma sugárzást észleltek. A szupernóvákból és WR-csillagokból származó ^{26}Al 1,8 MeV-es vonalát a HEAO-3 észlelte 1984-ben, és a CGRO térképezte fel. Eloszlása jól mutatja a Tejútrendszerben jelenleg zajló nukleoszintézist.
- A 0,511 MeV-es annihilációs vonalat (elektron+pozitron találkozás) ballonokról fedezték fel az 1970-es években. A Tejútrendszerben 80%-a a dudorból jön, 20%-a a korongból. A ^{26}Al , ^{44}Sc és ^{56}Co β^+ -bomlásakor keletkező pozitronok okozhatják.

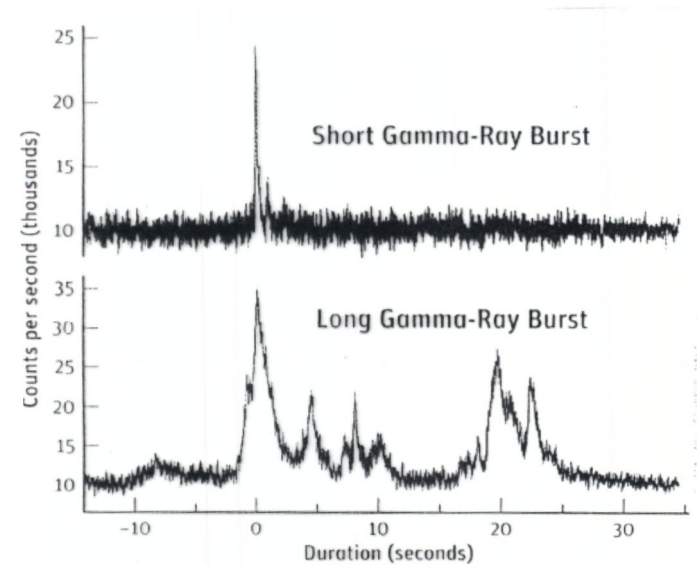
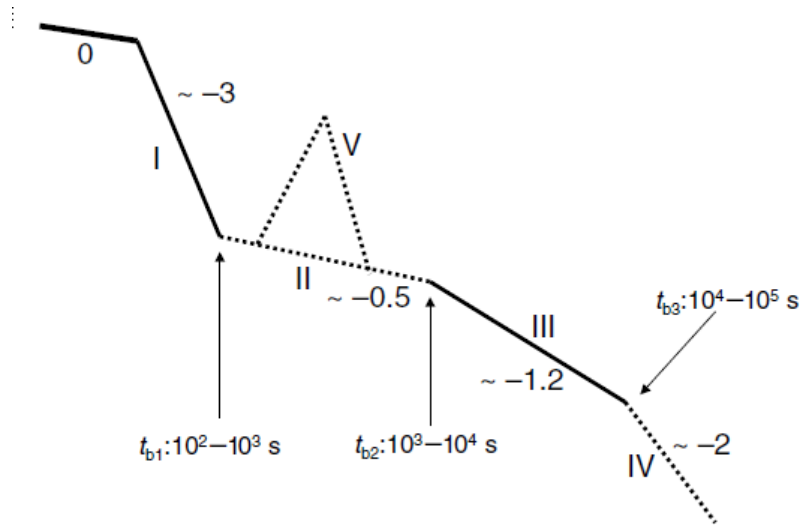
Gammakitörések

Az 1960-as évek végén a Vela-holdakkal fedezték fel. Nagy energiájú tranziensek véletlenszerű időben és irányból. Kitöréskor túlragyogja a gammaégboltot, időtartama néhány ezred másodperc és néhány másodperc közötti, de észleltek ultrarövid gammakitöréseket is. Azonosításuk és távolságuk meghatározása akkor sikerült, amikor hosszabb hullámhosszakon is tudták észlelni. A **gammakitörés (GRB)** energiája 10^{53} erg nagyságrendű. A CGRO BATSE kb. napi 1 kitörést észlelt. Eloszlásuk az égen izotrop, tehát kozmológiai távolságban keletkeznek. Gyakoriságuk: galaxisonként és évmilliónként 1 kitörés, tehát ritkábbak a szupernóva-robbanásoknál. A BeppoSAX azonosított néhányat a röntgenutófényük alapján (később optikai és rádióutófényt is észleltek) – lásd később.





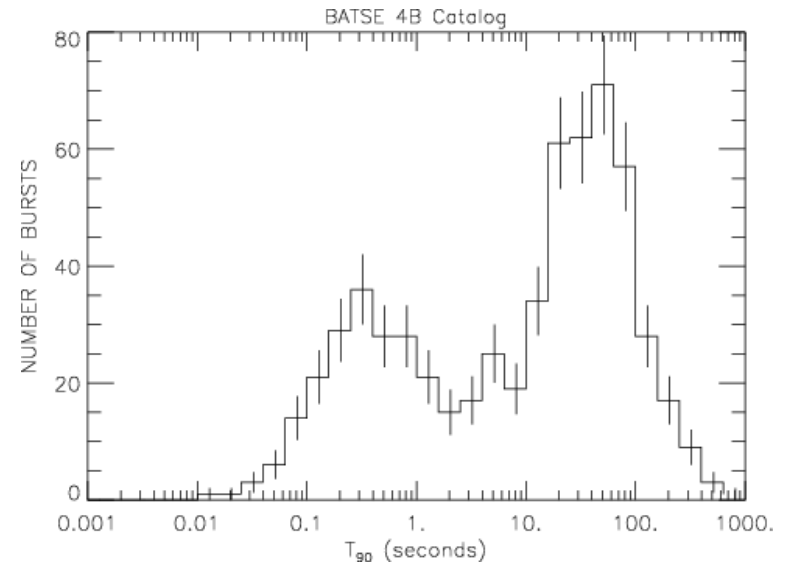
Gammakitörések



A GRB-k két típusa: rövid és hosszú. Egy közbülső típus léte vitatott. Egy igazi 3. típust (ULGB) csak 2010 után fedeztek fel.

Rövid GRB: idős populációjú helyeken (pl. elliptikus galaxisban), kompakt kettősök összeolvadásakor.

Hosszú GRB: hipernóva + nyalábolás.
„Fénygörbe”: I: gyors halványodás; II: lassú halványodás; III: normális halványodás; IV: kilövellés becsapódása utáni fázis; V: röntgenfler (a GRB-k közel felénél).



HETE-2

A HETE = Explorer-79 indítása 1996. novemberben nem sikerült.

High Energy Transient Explorer = HETE-2: 2000. okt. – 2007. márc. (a NiCd-elemek lemerültek). Az első szonda gammakitörések több hullámhosszú vizsgálatára.

A pozíciómeghatározás pontossága $10''$ (a legjobb addig), riasztás 10 másodpercen belül. A GRB-ről spektrum felvétele az 1–400 keV tartományban.

Összesen 84 GRB-t észlelt. Gyors és pontos pozíciómeghatározás (a BeppoSAX-nál a 6 év alatt 52 esetben sikerült a lokalizálás). A pontos pozíciót ismerve az utófény is észlelhető különféle hullámhosszakon. Lehetővé válik a vöröseltolódás meghatározása is.

2003-ban a GRB-SNIc magkollapszus-szupernóva kapcsolat biztossá tétele (GRB 030329 = SN2003dh). A színeképvonalakból 36000 km/s tágulási sebesség jön ki, sokkal nagyobb, mint a tipikus SNIc-knél. Az ultrarelativisztikus kilövellés gyors forgást feltételez. Emiatt is aszimmetrikus a kitörés (+ mágneses mező). Az utófény lineáris polarizációja is aszimmetriára utal. Hipernóva-modell.

Rövid GRB: a HETE-2 talált ilyen, a BeppoSAX nem. Optikai utófényt is észleltek.

Sötét GRB: utófény nélküli hosszú GRB. Oka: por általi extinkció csillagkeletkezési környezetben, $z > 5$ esetén az intergalaktikus HI látóvonal menti elnyelése.

Röntgenkitörések (flash) detektálása (a GRB kisebb energiájú fajtája).

INTEGRAL

INTEGRAL: International Gamma Ray Astrophysical Laboratory, ESA-szonda, 4 tonnás. Indítás: 2002. okt., Proton hordozórakétával Bajkonurból. Működését az ESA 2020 végéig támogatja, és utána is szándékozik. Elnyúlt elliptikus (13000 és 153000 km közötti), de geoszinkron pálya 72 órás keringési periódussal. A háttérsugárzás miatt csak kb. 50000 km fölött végez méréseket. Az idő 90%-ában tud így mérni.

Real time adattovábbítás (108 kbps) egyidejűleg mind a 4 műszeréről. Két főműszere + két kiegészítő műszere:

SPI (Spectrometer on INTEGRAL): nagy felbontásra képes 20 keV és 8 MeV között, 16 fok átlójú látómezőről.

IBIS (Imager on Board the INTEGRAL Satellite): képalkotás nagy szögfelbontással 15 keV és 10 MeV között $9^\circ \times 9^\circ$ -os látómezőről.

JEM-X (Joint European X-ray Monitor): 3 és 35 keV között érzékel.

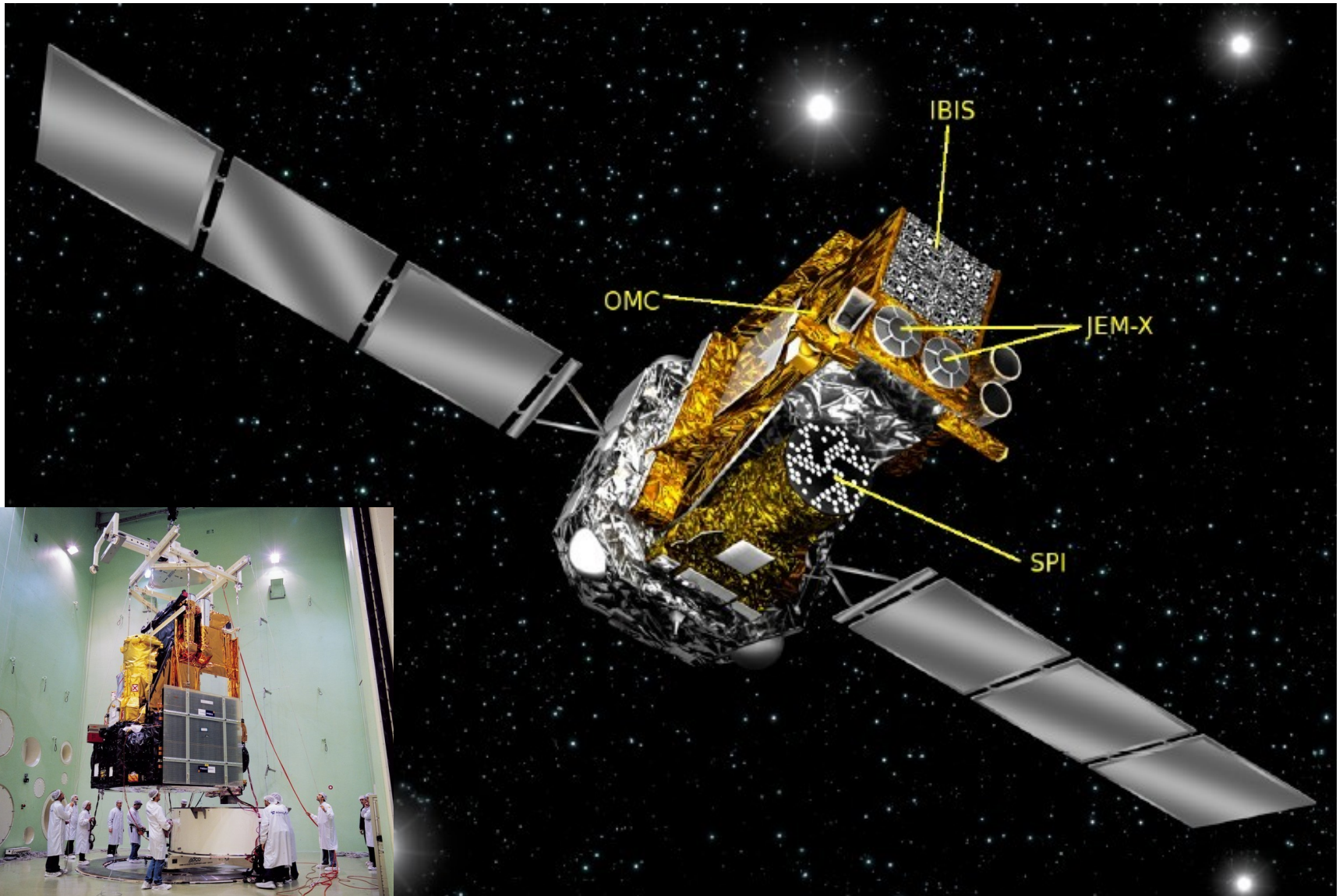
OMC (Optical Monitoring Camera): optikai fotometria Johnson V-ben $5^\circ \times 5^\circ$ -os látómezőről.

Nagyenergiás műszerei kódolt maszkú berendezések. A maszk a háttérlevonást is lehetővé teszi (a maszk anyaga által felfogott jelet is kiolvassák, és azt tekintik háttérnek).

Obszervatórium típusú misszió, az idő múlásával egyre több műszeridő jut a csillagászközösségnek.

Egy-egy észlelés tipikus tartama 20-30 ezer és 2 millió másodperc közötti.

INTEGRAL



INTEGRAL

Parameter	JEM-X	OMC
Energy range	4 keV–35 keV	500 nm–600 nm
Detector	Microstrip Xe/CH ₄ –gas detector (1.5 bar)	CCD + V-filter
Detector area (cm ²)	500 for each of the two JEM-X detectors ^a	CCD: (2061 × 1056) pixels Imaging area (1024 × 1024) pixels
Spectral resolution (FWHM)	2.0 keV @ 22 keV	–
Continuum sensitivity ^b (photons cm ⁻² s ⁻¹ keV ⁻¹) (3σ, 10 ⁶ s)	1.2 × 10 ⁻⁵ @ 6 keV 1.3 × 10 ⁻⁵ @ 30 keV	–
Line sensitivity ^b (photons cm ⁻² s ⁻¹) (3σ, 10 ⁶ s)	1.9 × 10 ⁻⁵ @ 6 keV 8.5 × 10 ⁻⁵ @ 30 keV	–
Limiting magnitude (mag) (3σ, 5000 s)	–	17.8
Field of view (fully coded)	4.8°	5° × 5°
Angular resolution (FWHM)	3'	25''
10σ source location (radius)	≤30''	6''
Absolute Timing accuracy (3σ)	≤200 μs	≥1 s
Mass (kg)	65	17
Power [max/average] (W)	50	

Parameter	SPI	IBIS
Energy range	18 keV–8 MeV	15 keV–10 MeV
Detector	19 Ge detectors, each (6 × 7) cm cooled @ 85 K	16384 CdTe dets, each (4 × 4 × 2) mm 4096 CsI dets, each (8.4 × 8.4 × 30) mm
Detector area (cm ²)	500	2600 (CdTe), 2890 (CsI)
Spectral resolution (FWHM)	3 keV @ 1.7 MeV	8 keV @ 100 keV
Continuum sensitivity (photons cm ⁻² s ⁻¹ keV ⁻¹) (ΔE = E/2, 3σ, 10 ⁶ s)	5.5 × 10 ⁻⁶ @ 100 keV 1.2 × 10 ⁻⁶ @ 1 MeV	6 × 10 ⁻⁷ @ 100 keV 5 × 10 ⁻⁷ @ 1 MeV
Line sensitivity (photons cm ⁻² s ⁻¹) (3σ, 10 ⁶ s)	3.3 × 10 ⁻⁵ @ 100 keV 2.4 × 10 ⁻⁵ @ 1 MeV	1.9 × 10 ⁻⁵ @ 100 keV 3.8 × 10 ⁻⁴ @ 1 MeV
Field of view (fully coded)	16° (corner to corner)	9° × 9°
Angular resolution (FWHM)	2.5° (point source)	12'
Source location (radius)	≤1.3° (depending on source strength)	≤1' (for 10σ source)
Absolute timing accuracy (3σ)	≤200 μs	≤200 μs
Mass (kg)	1309	746
Power [max/average] (W)	385/110	240/208

Az INTEGRAL és a korábbi gammadetektorok

Table 2. INTEGRAL and some previous gamma-ray experiments.

Parameter	OSSE	COMPTEL	EGRET	BATSE	SIGMA ^c	HEAO-3	INTEGRAL
Energy range (MeV)	0.05–10	0.7–30	20–30 000	0.03–1.9	0.035–1.3	0.05–10	0.004–10 (JEM-X, SPI, IBIS)
Energy resolution (%)	5–12	4–15	~20	20–32	8–16	0.2 @ 1.8 MeV	0.16 @ 1.8 MeV (SPI)
Source position localization	10'	0.5° – 1°	≤10'	1°	~1'	none	≤1'–1.5' (IBIS)
Field of View	3.8° × 11.4°	1 sr	0.6 sr	Earth occultation	4.7° × 4.3° fully coded	30° × 30°	16° fully coded (SPI)
Narrow line sens. (ph cm ⁻² s ⁻¹) (3σ, 10 ⁶ s)	7 × 10 ⁻⁵ @ 1 MeV	5 × 10 ⁻⁵ @ 1 MeV	n/a	–	~8 × 10 ^{-4b} @ 511 keV	~2 × 10 ^{-4c}	2.4 × 10 ⁻⁵ @ 1 MeV (SPI)
Continuum sens. (ph cm ⁻² s ⁻¹ keV ⁻¹) (3σ, 10 ⁶ s)	2 × 10 ⁻⁷ @ 1 MeV 5 × 10 ⁻⁷ @ 100 keV	1.7 × 10 ⁻⁷ @ 1 MeV	5 × 10 ⁻⁸ ≥100 MeV	~2 × 10 ^{-3a} 25–35 keV	7 × 10 ⁻⁶ @ 100 keV	~1 × 10 ⁻⁵ entire survey @ 100 keV ^d	5 × 10 ⁻⁷ @ 1 MeV (IBIS)
Years of operation	1991–2000	1991–2000	1991–2000	1991–2000	1989–1998	1979–1981	2002 →

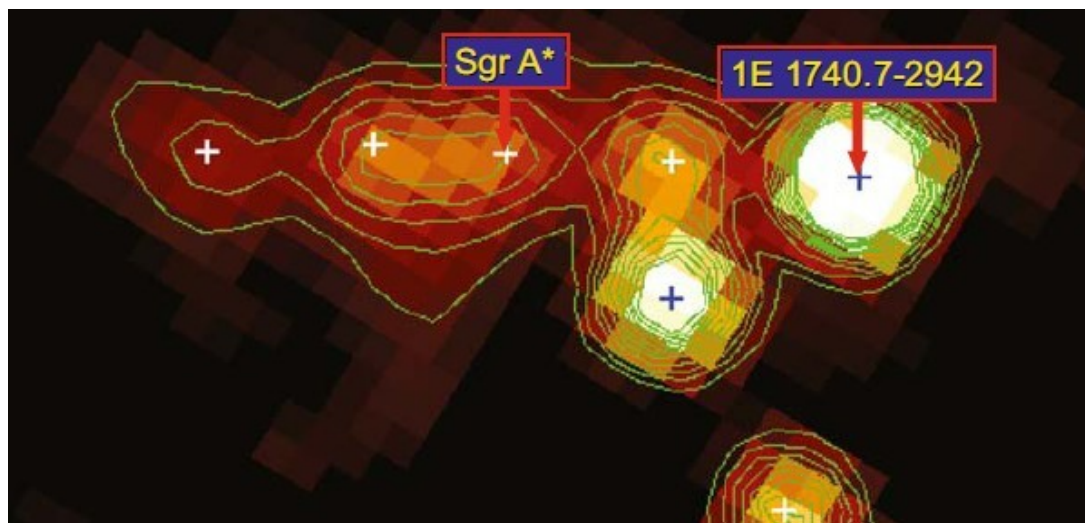
INTEGRAL

A pályázható műszeridő mellett központi (core) programok voltak. Azokra az első évben 35% műszeridő jutott, a 2.-ban 30%, a 3. évtől 25%.

A központi programok:

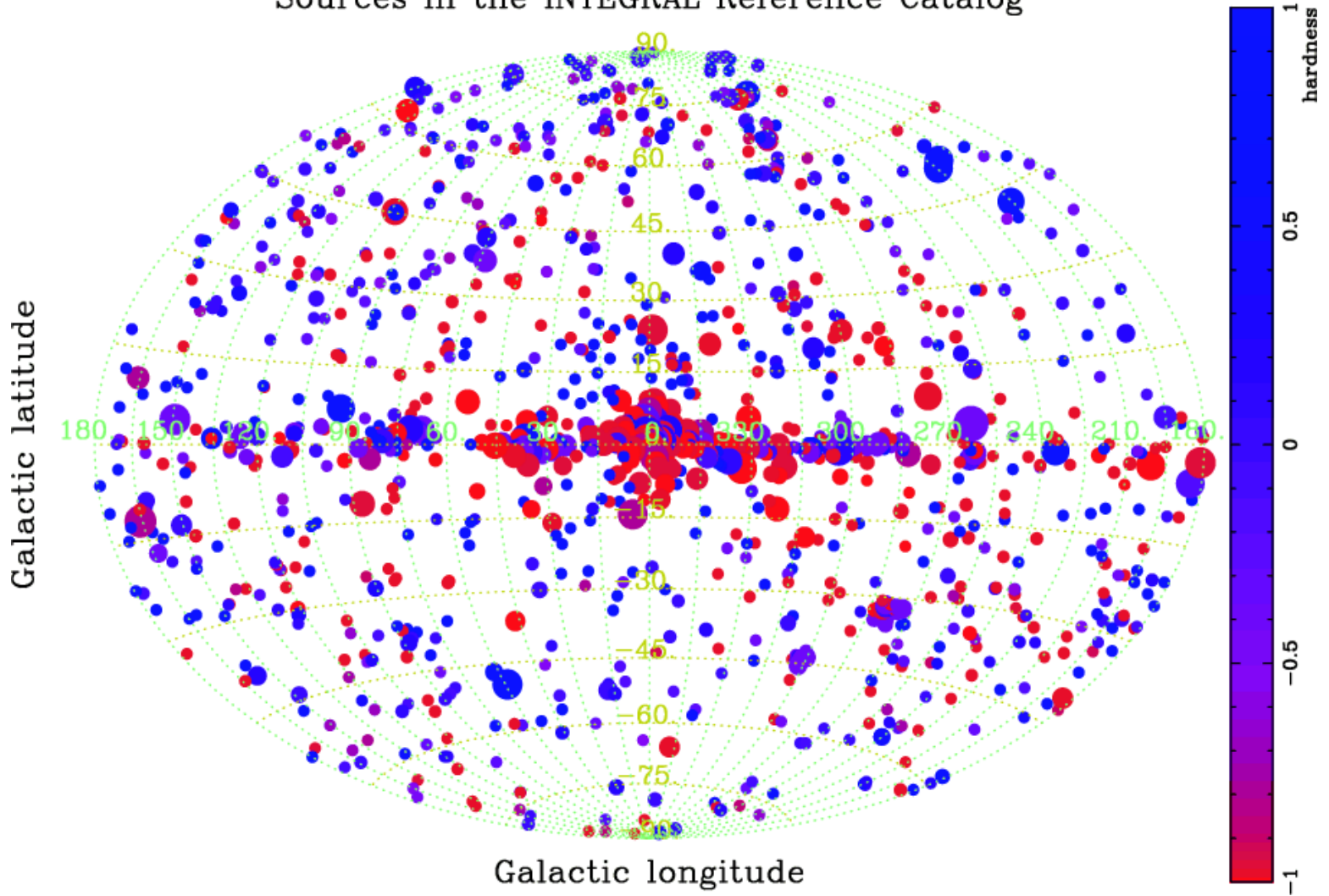
- A Tejútrendszer központja környékének mélyvizsgálata (az 1. évben 4,3 millió s) (kép);
- A galaktikus fősík mezőinek felmérése (az 1. évben összesen 2,3 millió s);
- Célzott észlelések, pl. a Vela-régió (az első évben 2,5 millió s);
- Éppen aktuális objektumok követése.

A költségcsökkentés érdekében az INTEGRAL Science Operation Centre (ISOC) Noordwijkból Villafrancába költözött (a többi ESA-szondát is onnan irányítják [XMM-Newton, korábban ISO, IUE]). Az INTEGRAL adatközpontja a genfi obszervatóriumban van.



INTEGRAL

Sources in the INTEGRAL Reference Catalog



Az INTEGRAL eredményeiből

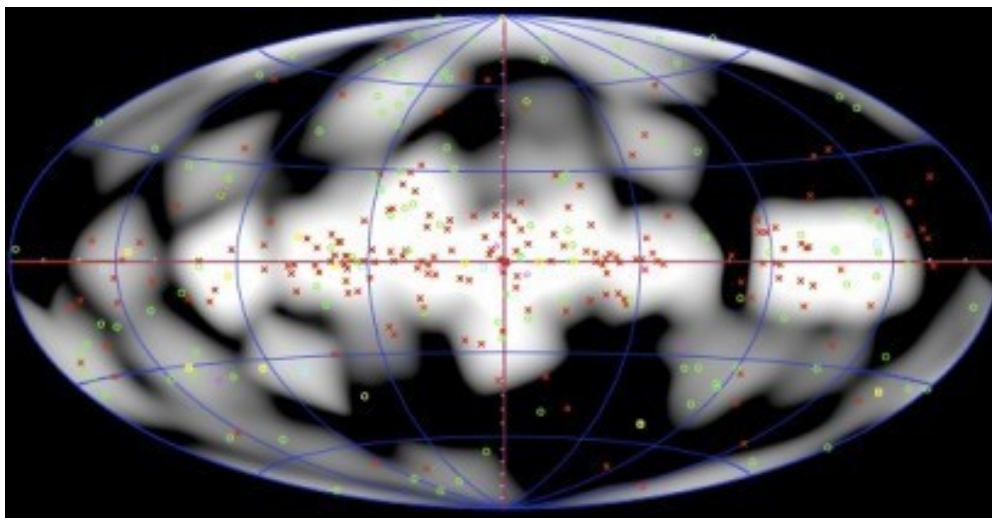
A központi programok eredményei:

- A Tejútrendszer centruma környékéről érkező gamma-sugárzást sok száz diszkrét forrásra bontotta.
- A Tejútrendszer centruma körül pozitronfelhő van, nem szimmetrikusan.
- Az SgrA* korábbi aktivitása a Compton-echó alapján.
- A ^{26}Al galaktikus térképe alapján 50 évente van 1 SN a Tejútrendszerben.
- A röntgenkettősök között új típus: szuperóriás, gyors röntgentranziensek (gyakoriak lehetnek).
- A Cas A kialakulásakor (SN 1671) 0,00016 naptömegnyi titán keletkezett, sokkal több a SN-modellek alapján várt értéknél. Vagy nagyon nagy energiájú, vagy nagyon aszimmetrikus volt a robbanás.
- Szupernagy tömegű fekete lyukak vannak a távolabbi galaxisokban, de a közeliekben nemigen (csak fiatal galaxisokban vannak, vagy rejtve vannak).

Az IBIS 4. katalógusában (2009) levő új források.

Zöld körök:

120 extragalaktikus forrás.



INTEGRAL

Table 1. Catalogue of hard X-ray sources detected in the 150–300 keV band at $S/N \geq 5\sigma$. For a description of table columns, see Section 5.

ID	Name	Ra deg	Dec deg	Flux _{150-300keV} erg cm ⁻² s ⁻¹	Type	Ref. ¹	Notes ²
1	Crab	83.63	22.02	657.7 ± 1.2	PSR/PWN		TeV J0534+220;
2	NGC 2110	88.05	-7.46	13.7 ± 2.3	AGN		Sy2 z=0.007579;
3	NGC 4151	182.63	39.41	17.9 ± 1.5	AGN		Sy1 z=0.003262;
4	NGC 4388	186.45	12.66	6.3 ± 1.1	AGN		Sy2 z=0.008426;
5	3C 273	187.28	2.05	15.7 ± 1.0	AGN		Blazar; z=0.15834;
6	Cen A	201.36	-43.02	47.0 ± 2.0	AGN		Sy2 z=0.001830;
7	PSR B1509-58	228.48	-59.14	13.3 ± 1.5	PSR		
8	XTE J1550-564	237.76	-56.46	14.0 ± 1.3	LMXB	1	BHC;
9	4U 1630-47	248.52	-47.39	7.7 ± 0.9	LMXB	2	C; BHC;
10	GX 339-4	255.71	-48.79	33.0 ± 0.9	LMXB	3	BHC;
11	4U 1700-377	255.98	-37.84	10.6 ± 0.8	HMXB		NS;
12	IGR J17091-3624	257.29	-36.41	5.3 ± 0.8	LMXB	4,5,6	C; BHC;
13	GX 354-0	262.99	-33.83	4.7 ± 0.7	LMXB		burster;
14	1E 1740.7-294	265.98	-29.73	23.1 ± 0.7	LMXB	7	C; BHC;
15	Swift J174510.8-262411	266.30	-26.40	14.3 ± 0.8	LMXB	8	BHC;
16	IGR J17464-3213	266.56	-32.23	10.0 ± 0.7	LMXB	9,10	H1743-322/XTE J1746-322; BHC;
17	SWIFT J1753.5-0127	268.37	-1.45	63.4 ± 1.5	LMXB	11,12	BHC;
18	GRS 1758-258	270.30	-25.74	40.8 ± 0.7	LMXB	13	BHC;
19	M 1812-12	273.78	-12.09	8.6 ± 1.0	LMXB	14	burster;
20	GS 1826-24	277.37	-23.80	12.5 ± 0.9	LMXB		
21	GRS 1915+105	288.80	10.95	32.9 ± 1.0	LMXB		
22	Cyg X-1	299.59	35.20	416.1 ± 1.1	HMXB		
23	Cygnus A	299.87	40.74	7.2 ± 1.2	AGN		
24	Cyg X-3	308.11	40.96	11.2 ± 1.1	HMXB		
25	3C 454.3	343.49	16.15	15.9 ± 2.2	AGN		

IBIS teljes égfelmérés 100 keV felett. 11 év alatt 132 objektum: 28 AGN, 38 LMXB, 10 HMXB, 12 XRP. A röntgenkettősök közül 12 feketelyuk-jelölt.

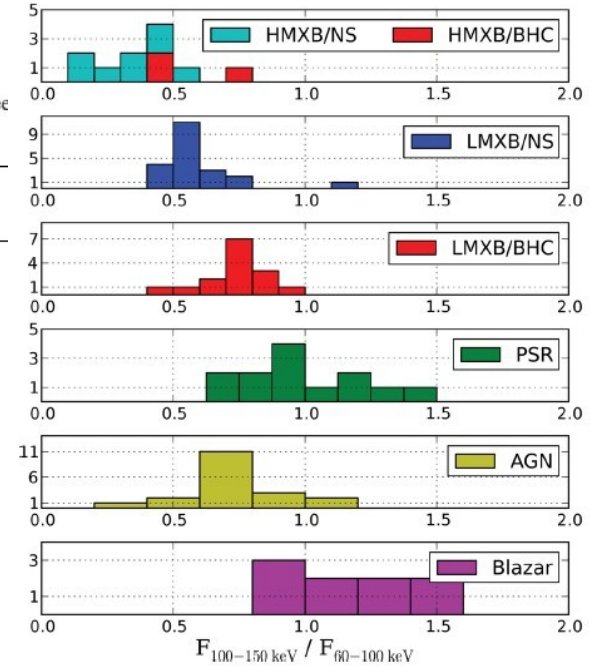


Figure 4. Histogram of X-ray hardness (100–150 keV/60–100 keV) for different types of sources. The width of bins has been adjusted in accordance with the uncertainty of hardness measurements.

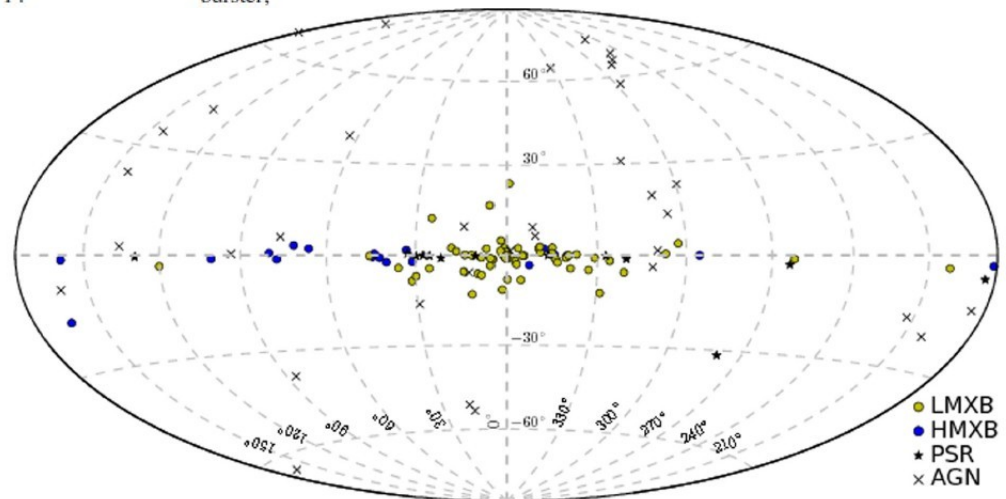


Figure 7. All-sky map showing the four basic types of X-ray source detected in the 100–150 keV survey: 65 LMXBs, 19 HMXBs, 13 PSRs (mostly in the Galactic plane) and 35 AGNs. The map was produced according to the Hammer-Aitoff projection in galactic coordinates.

INTEGRAL

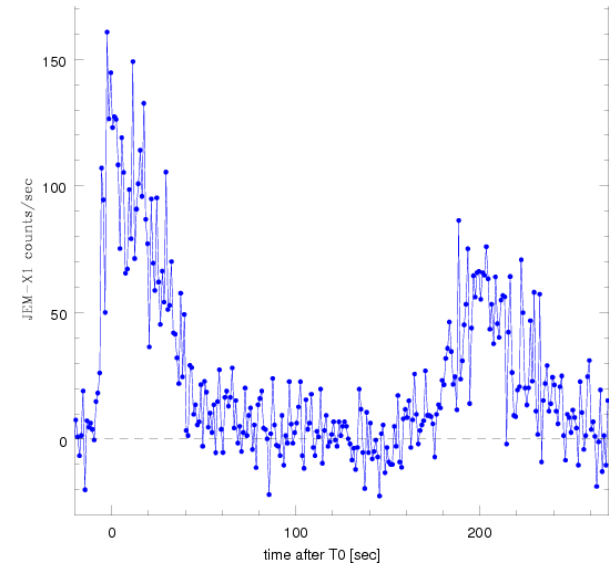
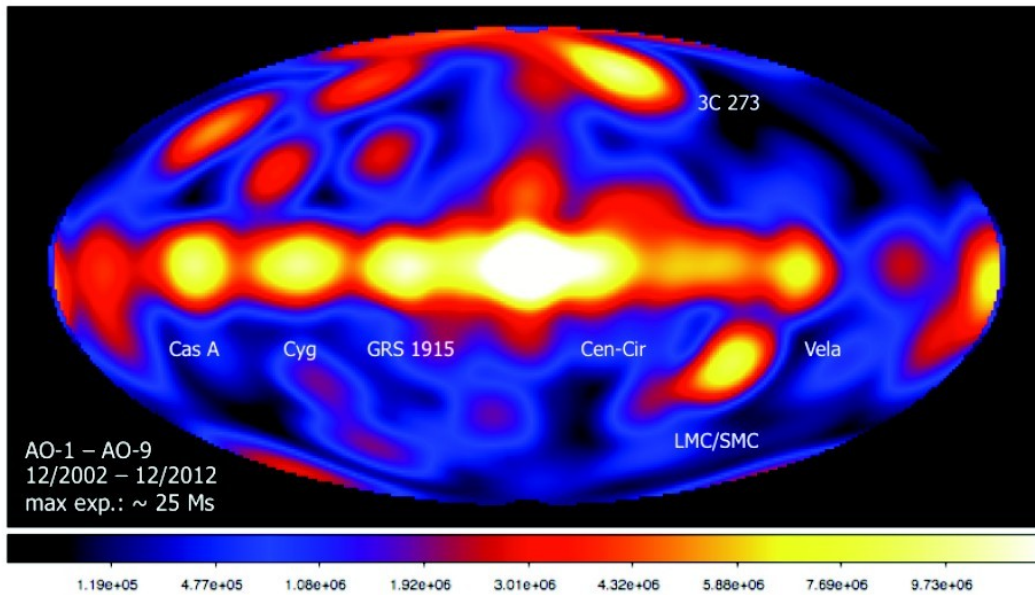
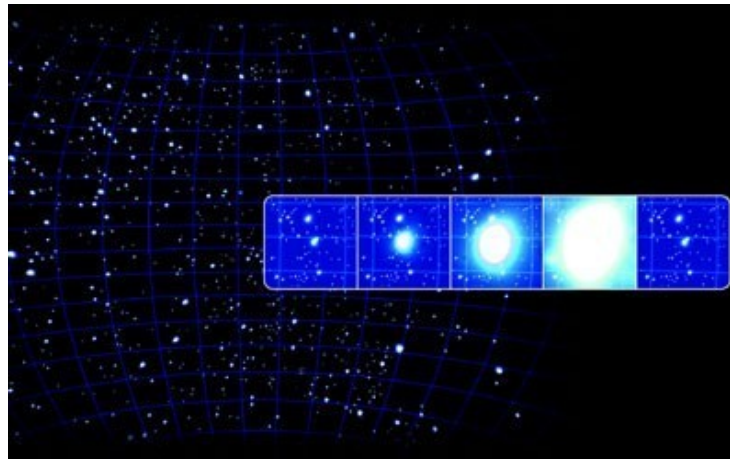
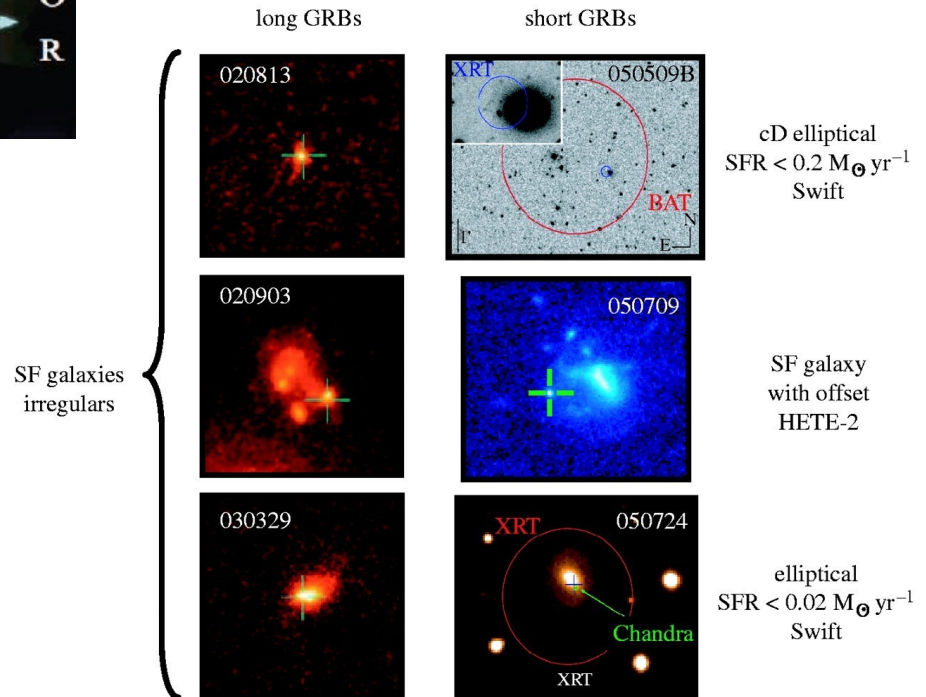
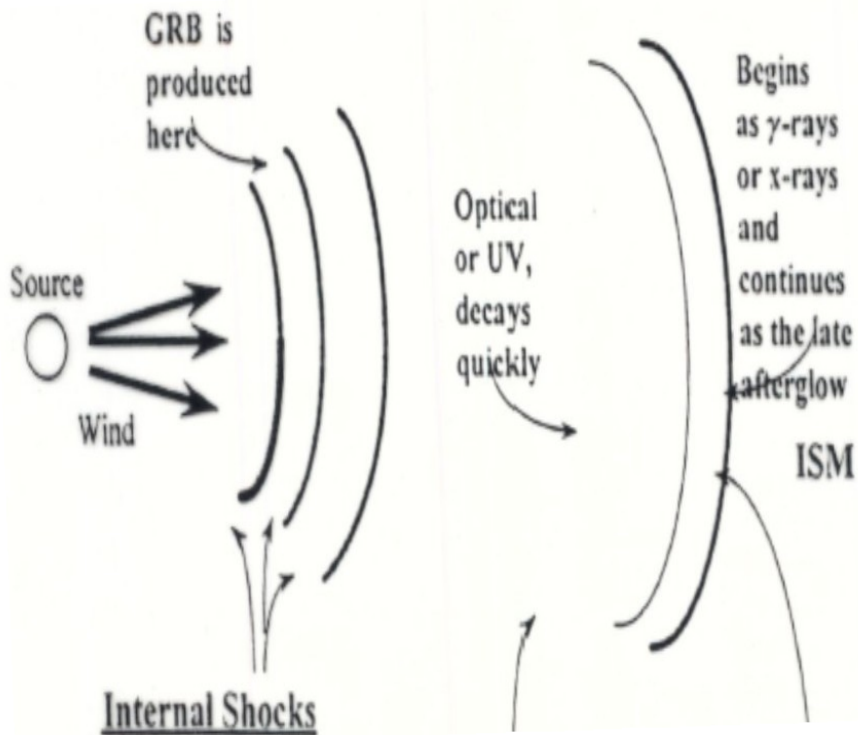
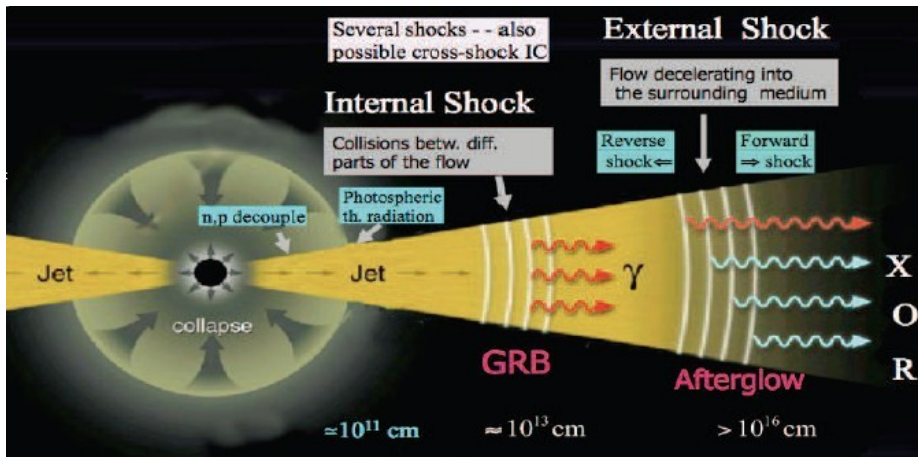
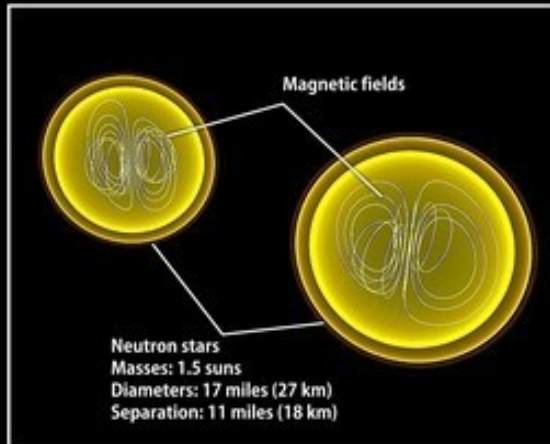


Figure 2: The total exposure map for observations from Dec 2002 until Dec 2012 (AO-1 until AO-9) in galactic co-ordinates. The color-scale units are seconds. Courtesy ESA/ISOC (G. Bélanger).

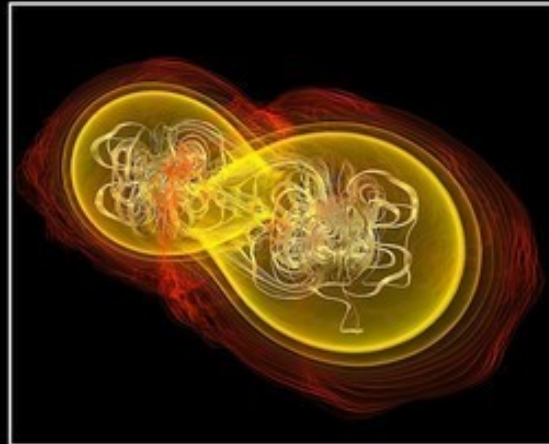




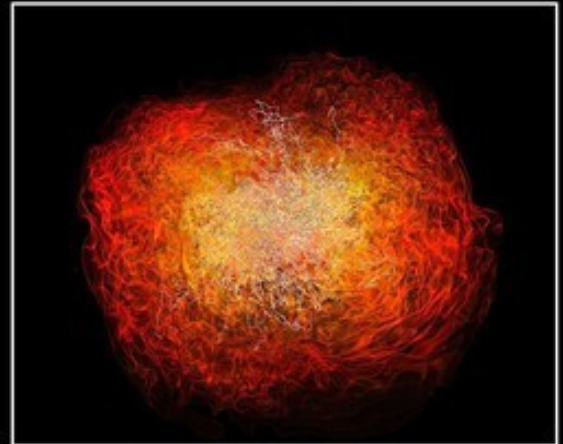
Crashing neutron stars can make gamma-ray burst jets



Simulation begins



7.4 milliseconds



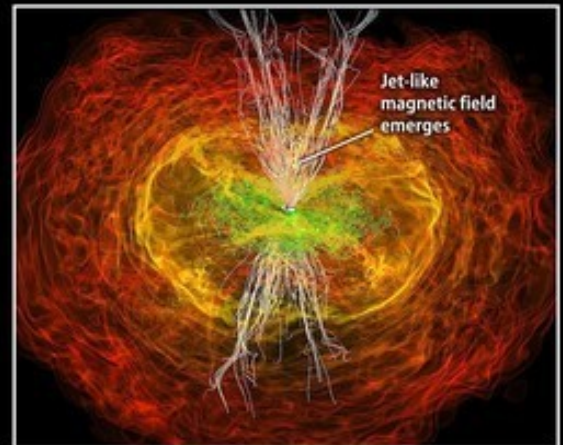
13.8 milliseconds



15.3 milliseconds



21.2 milliseconds



26.5 milliseconds

Swift

Swift Gamma-ray Burst Mission (Explorer–84): a NASA MIDEX típusú szondája olasz és brit közreműködéssel. Indítás: 2004. nov., 550 km-es LEO-pályára.

Kétéves üzemidőt terveztek, de jelenleg is működik. A PennState irányítja. 2018-tól Neil Gehrels Swift Observatory, a program akkor elhunyt tudományos vezetőjének tiszteletére.

Műszerei:

- Burst Alert Telescope (BAT)
- X-Ray Telescope (XRT)
- UltraViolet/Optical Telescope (UVOT), az XMM-Newton OM javított kiadása.

A műszerek jellemzőit lásd a következő dián.

A BAT riaszt, az XRT és az UVOT két percen belül arra fordul. A Swift név a gyors mozgathatóságra utal. A Swift az első tíz évben ezernél több GRB-t észlelt.

Célok: a GRB-k és utófényük észlelése több hullámhosszon; a GRB-k eredetének meghatározása; az Univerzum régmúltjának tanulmányozása GRB-k segítségével; az előzőeknél érzékenyebb teljes égfelmérés; általános gamma-, röntgen- és optikai obszervatóriumként más tranziens jelenségek (pl. szupernóvák) azonnali vizsgálata.

Swift

BURST ALERT TELESCOPE	
Aperture	Coded Mask
Detecting Area	5200 cm ²
Detector	CdZnTe
Detector Operation	Photon Counting
Field of View	2.0 sr (partially coded)
Detection Elements	256 modules of 128 elements
Detector Size	4mm x 4mm x 2mm
Telescope PSF	17 arcminutes
Location Accuracy	1 - 4 arcminutes
Energy Range	15 - 150 keV
Burst Detection Rate	>100 bursts/year

X-RAY TELESCOPE	
Telescope	Wolter I
Detector	XMM EPIC CCD
Effective Area	135 cm ² @ 1.5 keV
Detector Operation	Photon Counting, Integrated Imaging, & Rapid Timing
Field of View	23.6 x 23.6 arcminutes
Detection Element	600 x 600 pixels
Pixel Scale	2.36 arcsec/pixel
Telescope PSF	18 arcsec HPD @ 1.5 keV
Location Accuracy	3 - 5 arcseconds
Energy Range	0.2 - 10 keV
Sensitivity	2×10^{14} ergs cm ⁻² s ⁻¹ in 10 ⁴ sec

ULTRAVIOLET/OPTICAL TELESCOPE	
Telescope	Modified Ritchey-Chrétien
Aperture	30 cm diameter
F-number	12.7
Detector	Intensified CCD
Detector Operation	Photon Counting
Field of View	17 x 17 arcminutes
Detection Element	2048 x 2048 pixels
Telescope PSF	0.9 arcsec @ 350 nm
Location Accuracy	0.3 arcseconds
Wavelength Range	170 nm - 650 nm
Colors	6
Spectral Resolution (Grisms)	$\lambda/\Delta\lambda \sim 200$ @ 400 nm
Sensitivity	B = 24 in white light in 1000 sec
Pixel Scale	0.48 arcseconds
Bright Limit	$m_v = 7$ mag

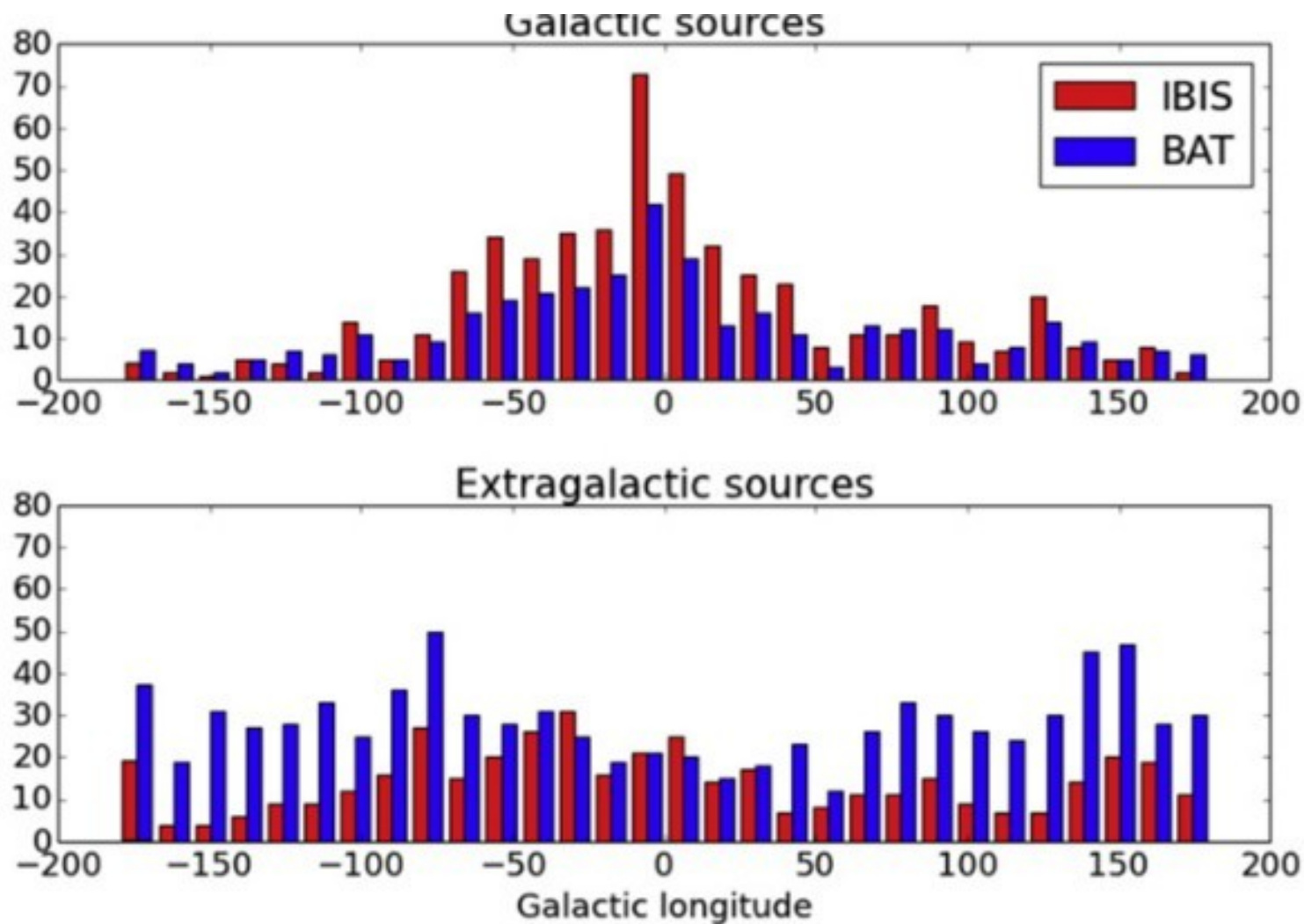


Figure 9. (Upper panel) Distribution of sources detected by *INTEGRAL*/IBIS (red) and *Swift*/BAT (blue) as a function of Galactic longitude. (Upper panel) sky region within 10° of the Galactic Plane; (lower panel) sky more than 10° from the Plane.

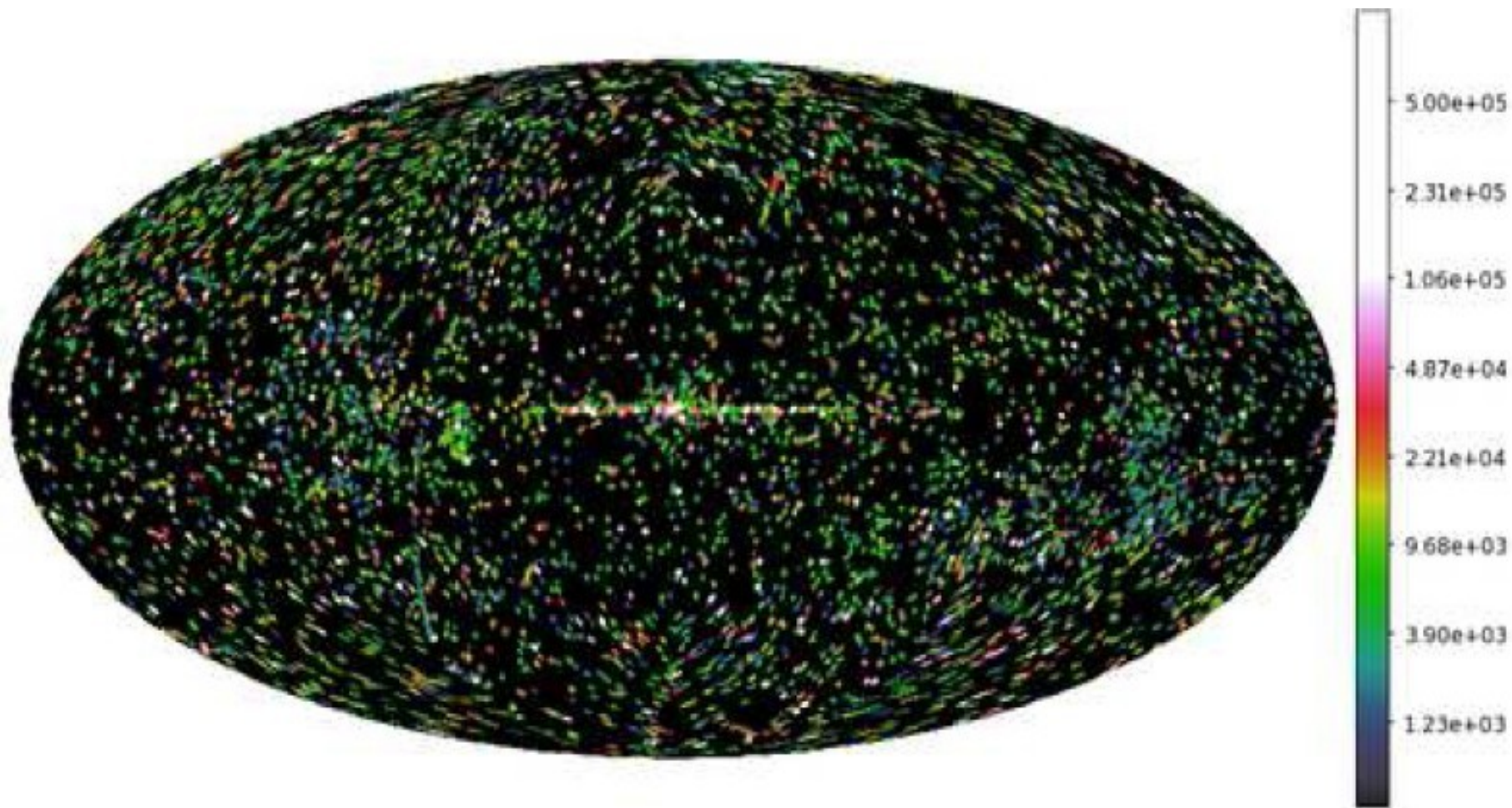


Figure 1: Swift pointings from 2005-2010, colour coded by the total UVOT exposure time in seconds

Swift

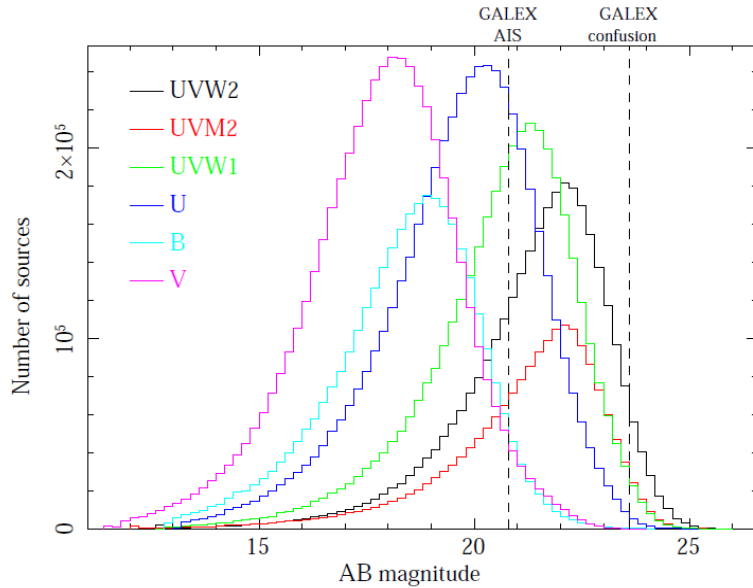


Figure 5: Distributions of source magnitudes in the six imaging filters used for the UVOTSSC. The GALEX All-sky Imaging Survey (AIS) depth, and the GALEX near-UV confusion limit are indicated.

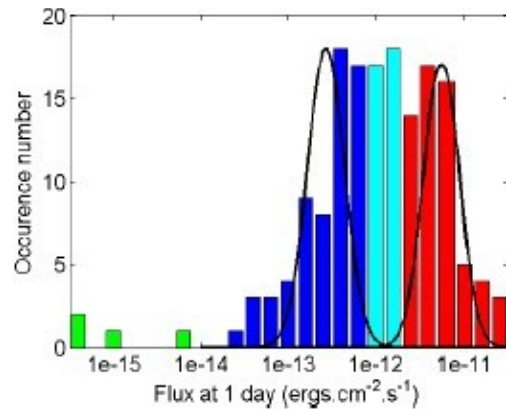
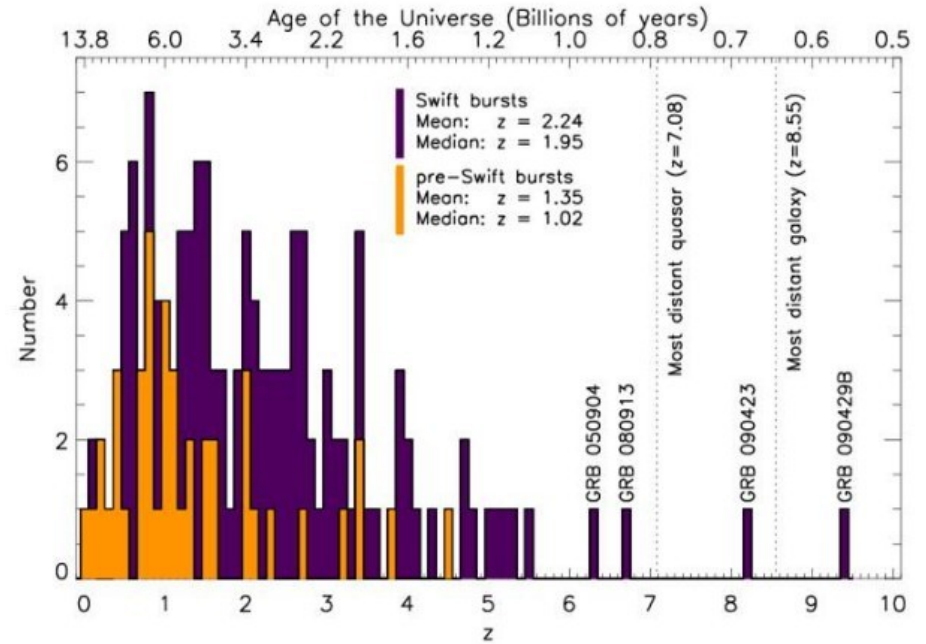
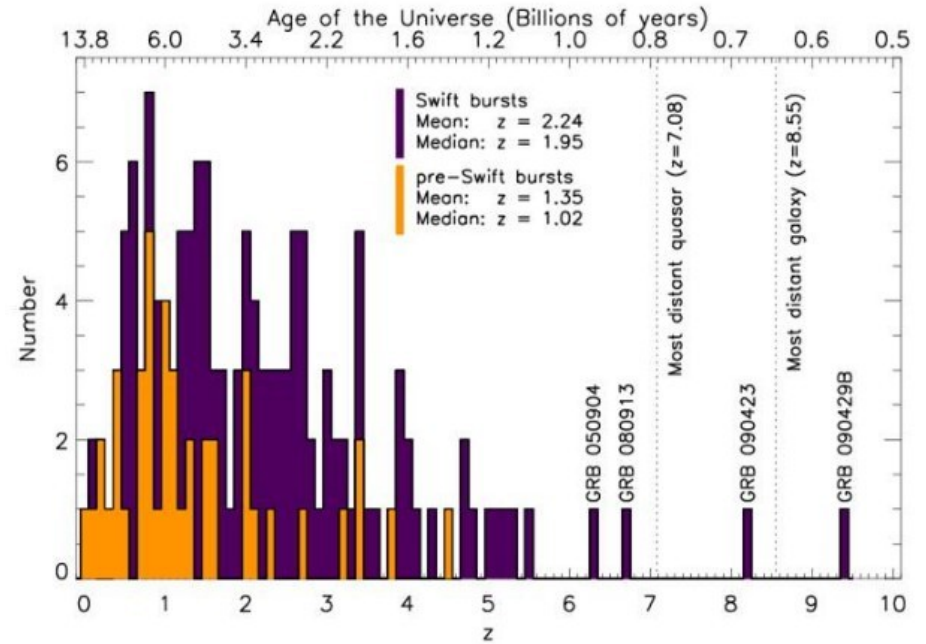
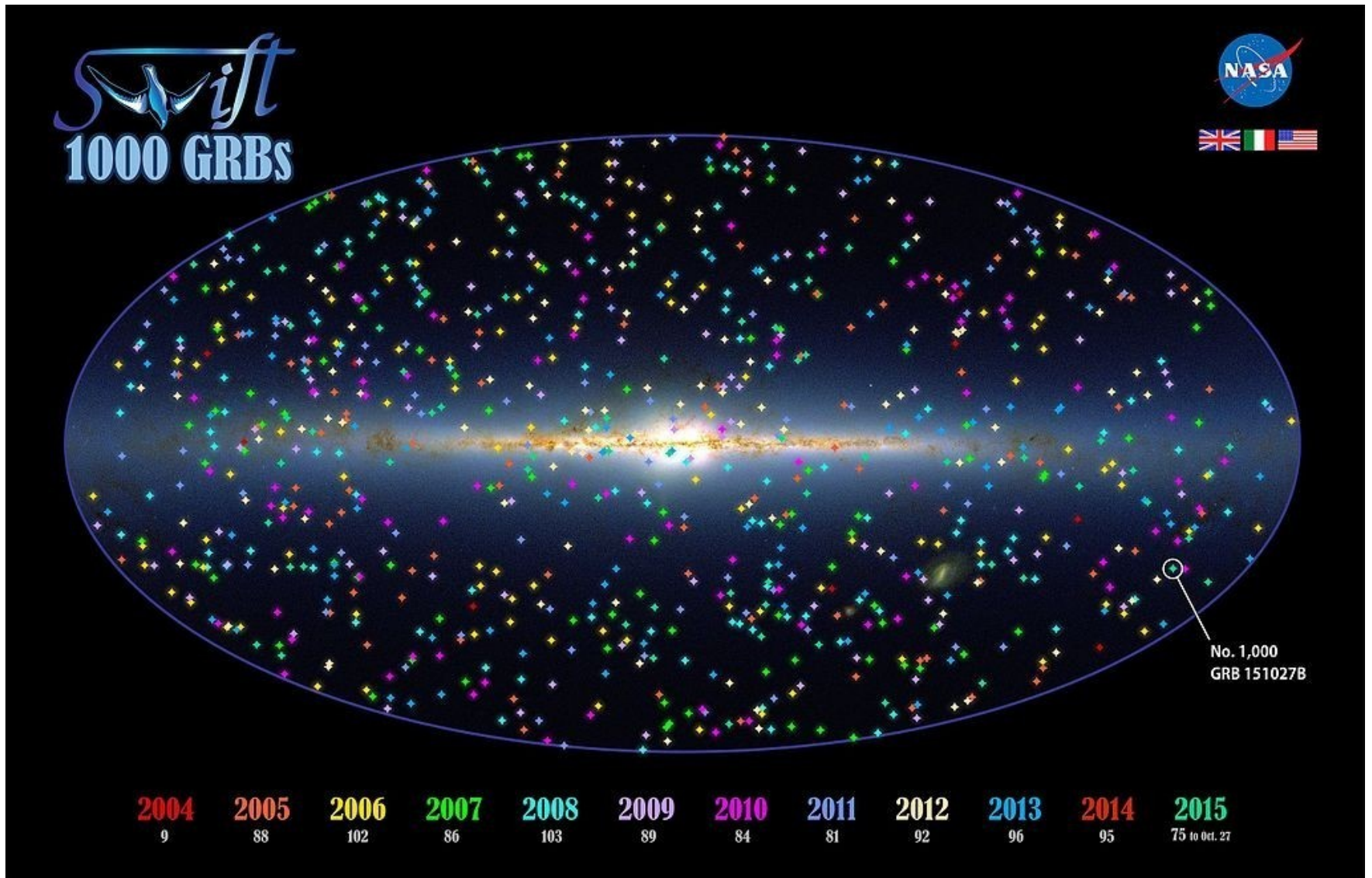


Figure 1: Flux distribution at 1 day after the burst. Left: our sample. Right: for comparison, the sample of [5]. Red, blue, and green bars show groups I, II, and III respectively. The cyan bars show the GRBs between Groups I and II. The black line shows the best-fit Gaussian distribution of [5].



Swift



Swift

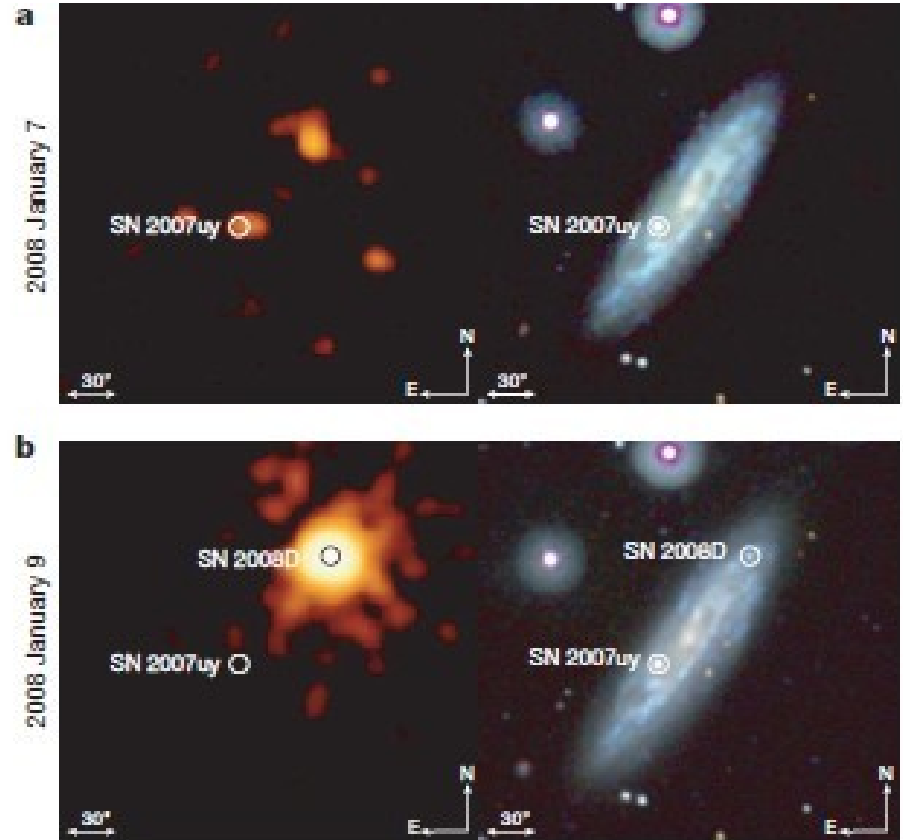
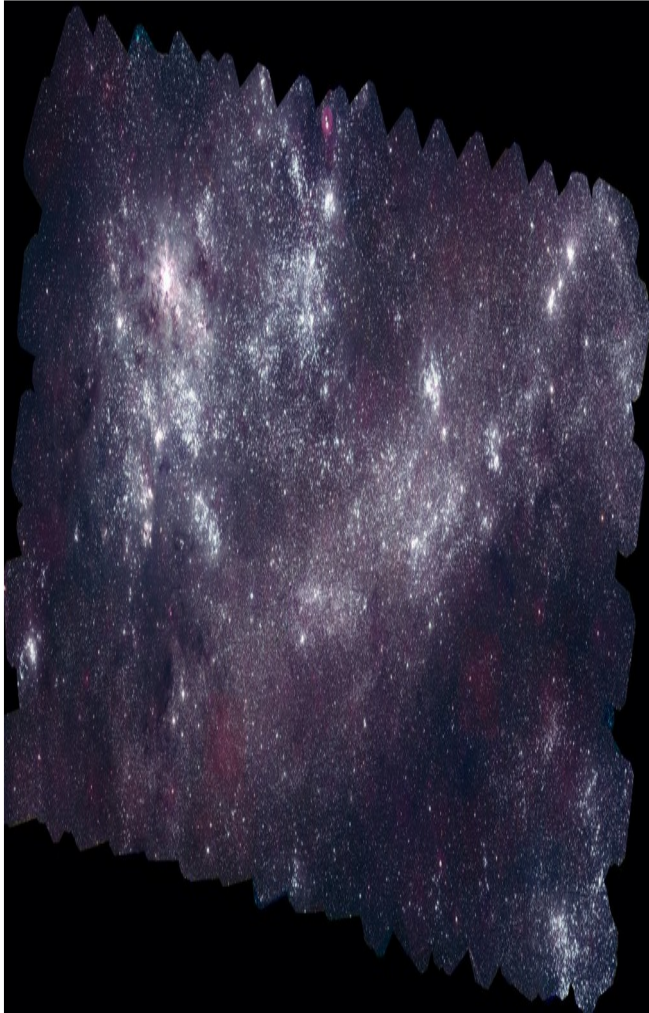


Figure 6. X-ray (left) and optical (right) discovery images for SN2008D (Soderberg et al. 2008).

Swift

Galaktikus n{ov}ak vizsgálata hosszú id{os}k{al}n t{ob}b hull{am}hosszon. A kit{or}es az optikai tartom{a}nyban kezd{od}dik, k{es}obb a r{ont}genfluxus meger{os}odik, es a maximum a l{ag}yr{ont}gen tartom{a}nyba esik (supersoft source, SSS). Jobbra a piros g{or}be a kem{en}ys{e}gi ar{a}ny. Az RS Oph ism{e}tl{od}d{ o} (rekurrens) n{ov}a.

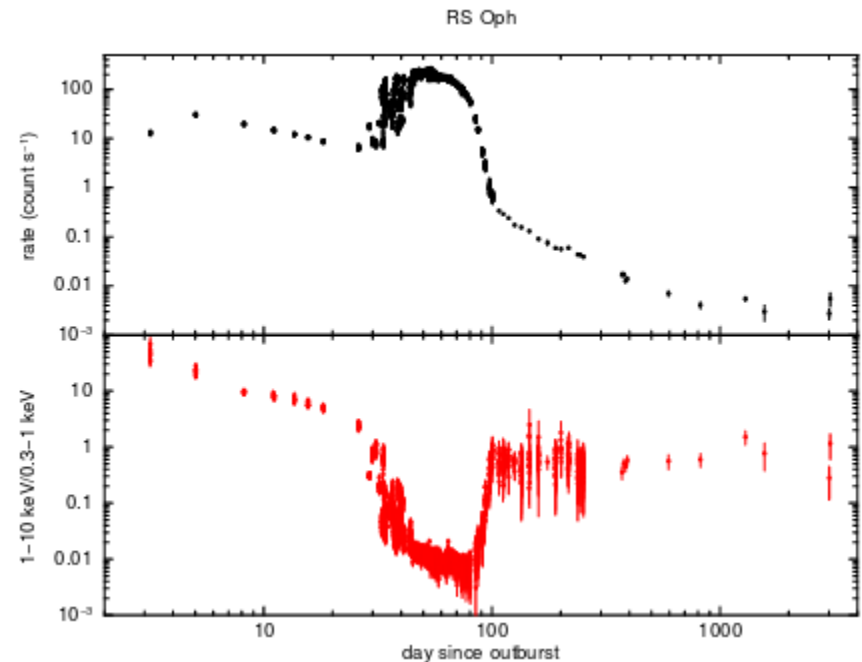
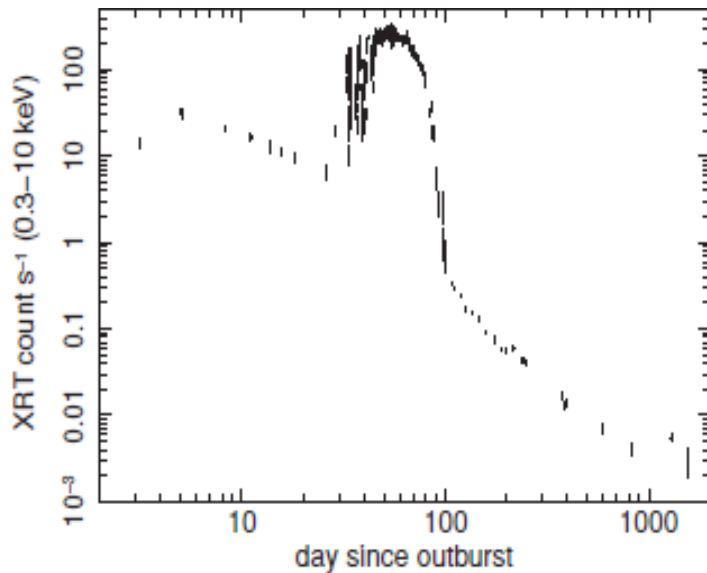


Figure 4. Entire 0.3 – 10 keV *Swift*/XRT light curve of the 2006 outburst of the recurrent nova RS Oph (Osborne et al. 2011). The supersoft phase is prominent between days 29 and 100.

Swift

A ROSAT méréseivel összehasonlítva látszik, hogy milyen részletes a Swift adataiból kapott fénygörbe (jobbra).

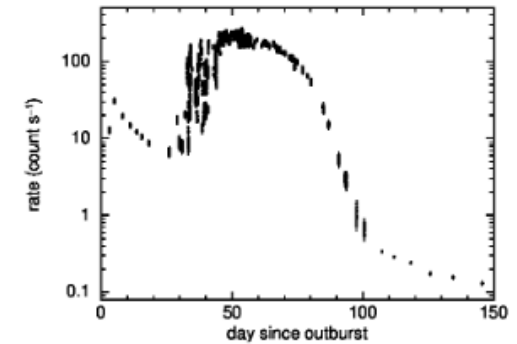
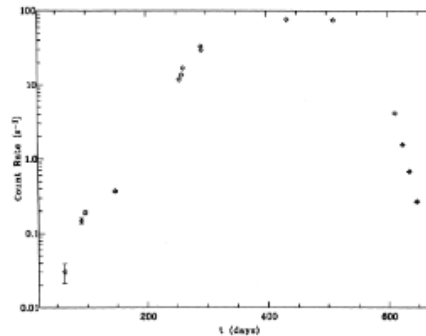
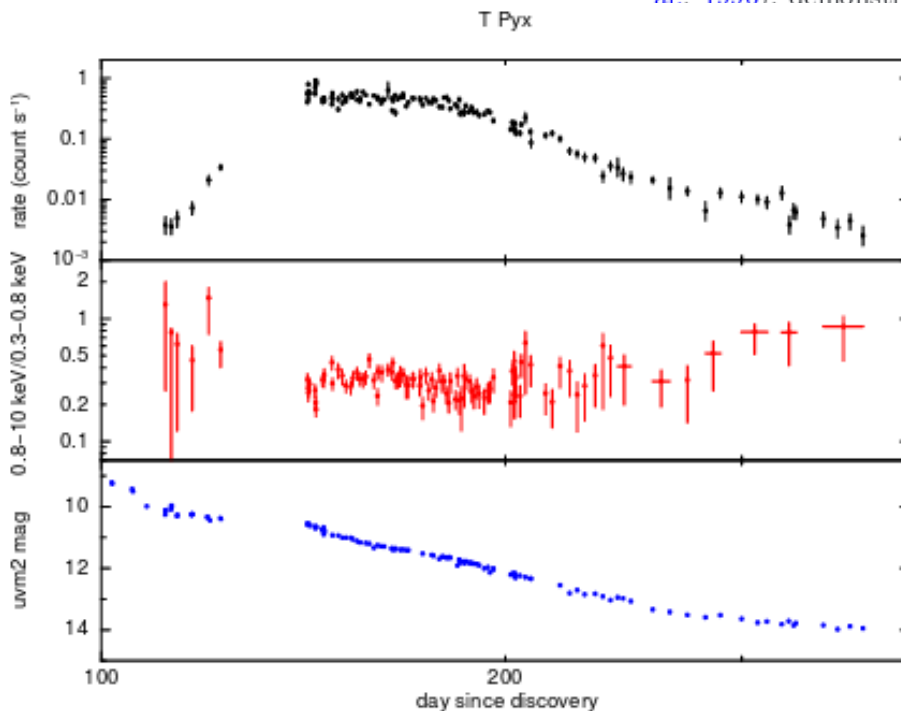


Figure 1: Left: *ROSAT* light-curve (0.1–2.4 keV) of V1974 Cyg (taken from Krautter et al., 1996), demonstrating the most detailed X-ray light-curve of a nova obtained before Swift. Right: The X-ray light-curve (0.3–10 keV) of RS Oph (Osborne et al., 2005) from the first detailed *Swift* monitoring campaign of a nova. Only the first 150 days since outburst are shown.



A T Pyx ábrája (balra) a röntgenfluxus, a keménységi arány (hardness ratio) és az ultraibolya fényesség változását mutatja.

A következő dia a vizsgálatba vont nóvák táblázatos összesítése.

Nova	Alternative names	Date of outburst UT	Reference
RS Oph*	—	2006-02-12.8	Narumi et al. (2006)
V2362 Cyg	Nova Cyg 2006	2006-04-02.807	Nakano et al. (2006)
V1280 Sco	Nova Sco 2007	2007-02-04.8624	Yamaoka et al. (2007a)
V1281 Sco	Nova Sco 2007 No. 2	2007-02-19.8593	Yamaoka et al. (2007b)
V458 Vul	Nova Vul 2007	2007-08-08.54	Nakano et al. (2007)
V598 Pup	XMMSL1 J070542.7-381442	2007-10-09	Read et al. (2007, 2008)
V597 Pup	Nova Pup 2007	2007-11-14.23	Pereira et al. (2007)
V2468 Cyg	Nova Cyg 2008a	2008-03-07.801	Nakano et al. (2008a)
V2491 Cyg	Nova Cyg 2008 No. 2	2008-04-10.728	Nakano et al. (2008b)
HV Cet	CSS 081007:030559+054715	2008-10-07.381	Beardmore et al. (2012)
Nova LMC 2009a*	Nova LMC 1971b	2009-02-05.067	Liller (2009)
V1213 Cen	Nova Cen 2009	2009-05-08.235	Pojmanski et al. (2009)
V2672 Oph	Nova Oph 2009	2009-08-16.515	Nakano et al. (2009)
KT Eri	Nova Eri 2009	2009-11-14.632	Yamaoka et al. (2009)
U Sco*	—	2010-01-28.4385	Schaefer et al. (2010)
V407 Cyg	—	2010-03-10.797	Nishiyama & Kabashima (2010)
T Pyx*	—	2011-04-14.2391	Waagen et al. (2011)
Nova LMC 2012	TCP J04550000-7027150	2012-03-26.397	Seach (2012)
V5589 Sgr	Nova Sgr 2012; PNV J17452791-2305213	2012-04-21.011	Korotkiy et al. (2012)
V959 Mon	Nova Mon 2012; PNV J06393874+0553520	2012-06-22 ¹	Fujikawa et al. (2012) Cheung et al. (2012)
Nova SMC 2012	OGLE-2012-NOVA-002	2012-06-05 ²	Wyrzykowski et al. (2012)
V339 Del	Nova Del 2013; PNV J20233073+2046041	2013-08-14.584	Nakano (2013)
V1369 Cen	Nova Cen 2013; PNV J13544700-5909080	2013-12-02.692	Seach (2013)
V745 Sco*	—	2014-02-06.694	Waagen & Pearce (2014)
V1534 Sco	Nova Sco 2014; TCP J17154683-3128303	2014-03-26.84867	Nishiyama & Kabashima (2014)
V1535 Sco	Nova Sco 2015; PNV J17032620-3504140	2015-02-11.8367	Nakano (2015)
V5668 Sgr	Nova Sgr 2015 No. 2; PNV J18365700-2855420	2015-03-15.634	Seach (2015)
Nova LMC 1968-12a*	OGLE-2016-NOVA-01	2016-01-21.2094	Mroz & Udalski (2016a)
V407 Lup	Nova Lup 2016; ASASSN-16kt	2016-09-24.00	Stanek et al. (2016)
Nova SMC 2016	—	2016-10-09-09.2	Mroz & Udalski (2016b)
V5855 Sgr	Nova Sgr 2016 No. 3; TCP J18102829-2729590	2016-10-20.383	Nakano et al. (2016)
V549 Vel	Nova Vel 2017; ASASSN-17mt	2017-09-24.39	Stanek et al. (2017)

Más objektumok időbeli viselkedése a Swifttel

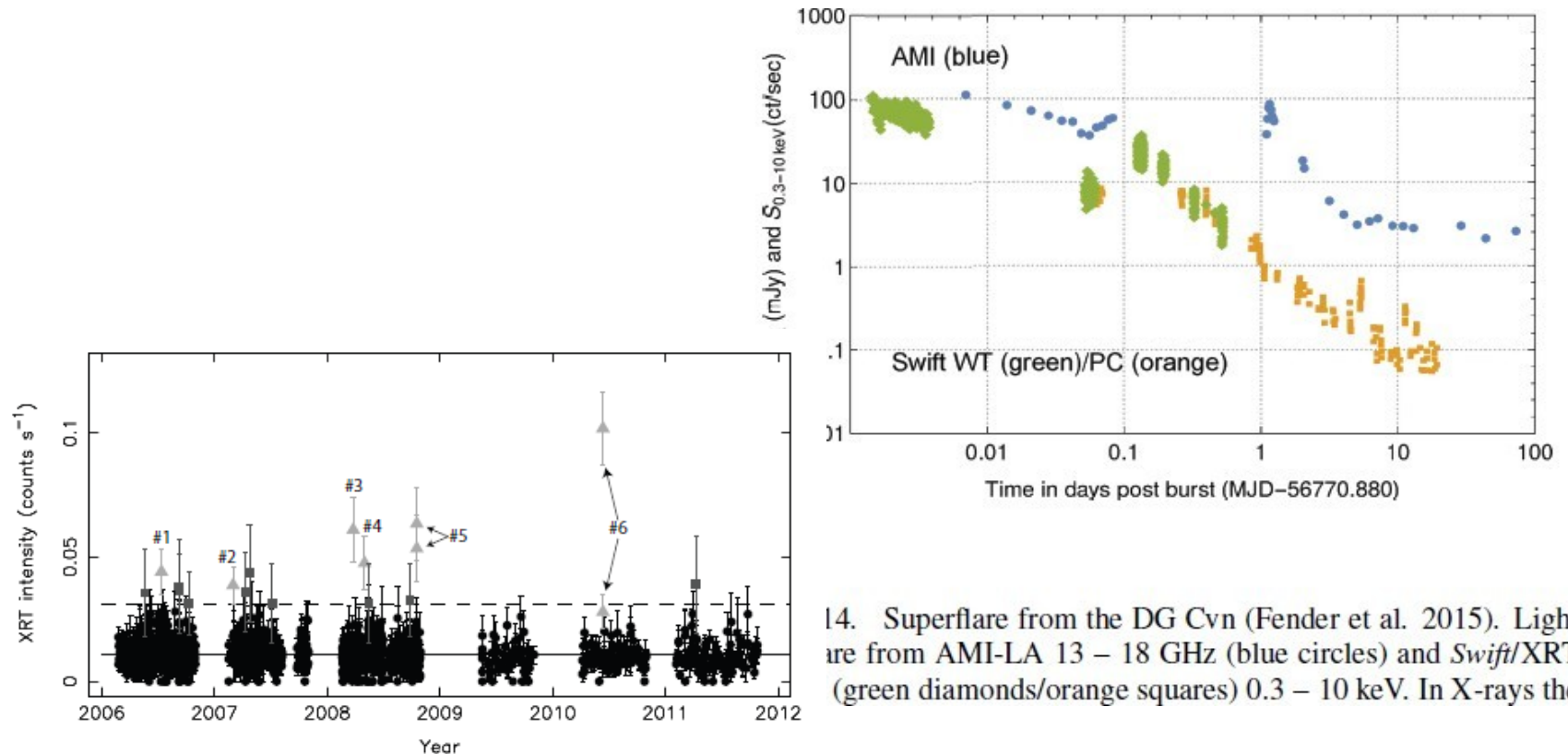


Figure 13. Long term 0.3 – 10 keV *Swift*/XRT light curve of Sgr A* (Degenaar et al. 2013). Solid horizontal line indicates the mean count rate observed in 2006-2011, whereas the dashed line indicates the 3σ level. The six confirmed X-ray flares are numbered and indicated by light gray triangles.

14. Superflare from the DG Cvn (Fender et al. 2015). Light ire from AMI-LA 13 – 18 GHz (blue circles) and *Swift*/XRT (green diamonds/orange squares) 0.3 – 10 keV. In X-rays the

Swift

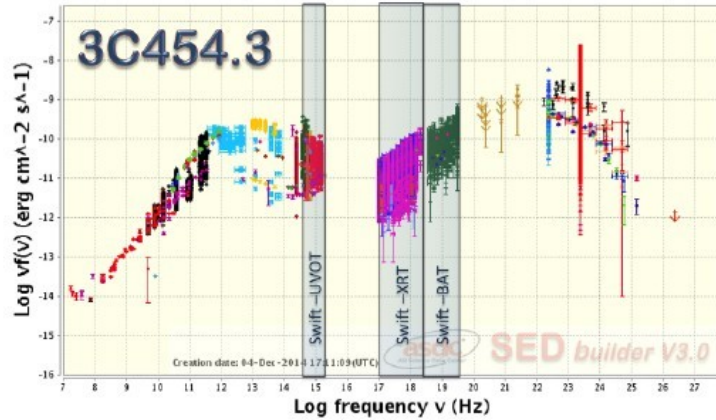


Figure 1. The SED of the blazar 3C454.3 assembled with over 60,000 flux measurements obtained with many space and ground-based observatories. The contribution of all Swift instruments (UVOT, XRT and BAT) is highlighted by the three grey vertical bands.

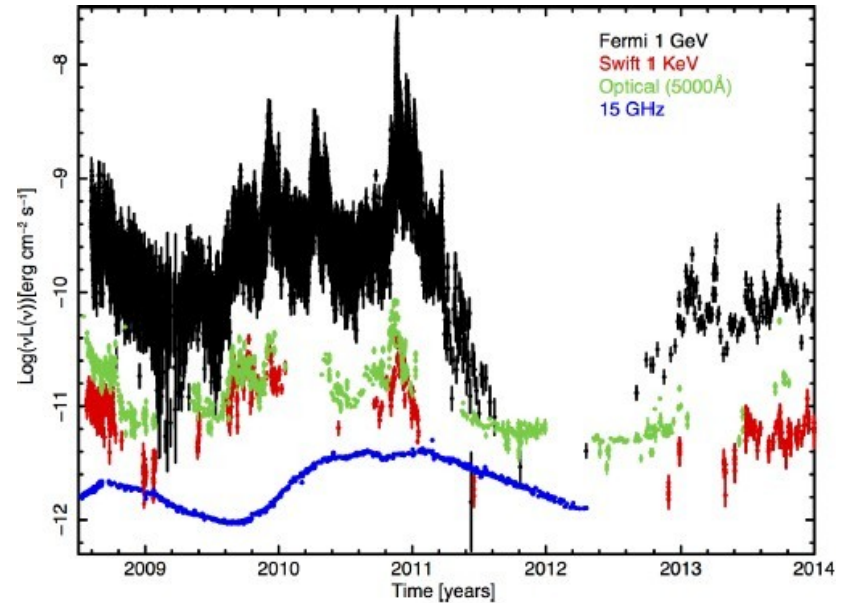
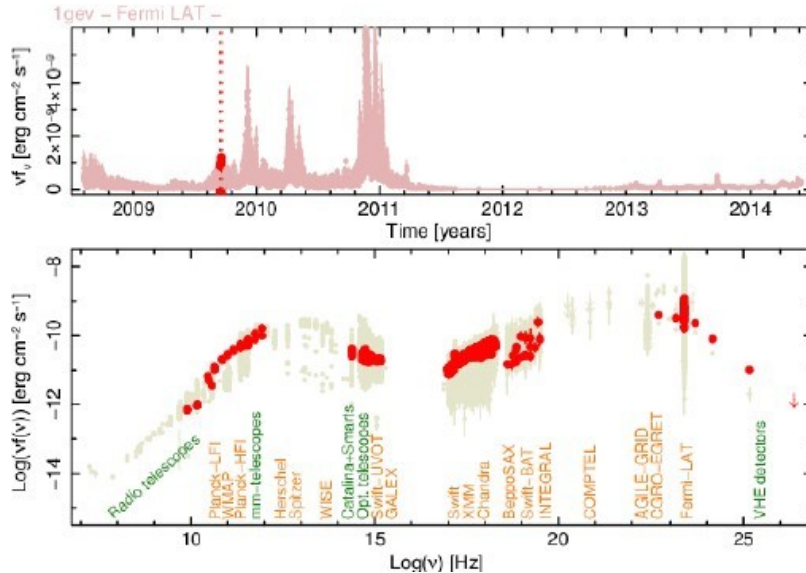


Figure 6. Multi-frequency light curve of the blazar 3C454.3. In this plot the same γ -ray, X-ray, optical and radio data extracted from the data set used for the SED of fig 1 is used to illustrate the different behaviour in this source at different energies.

Swift

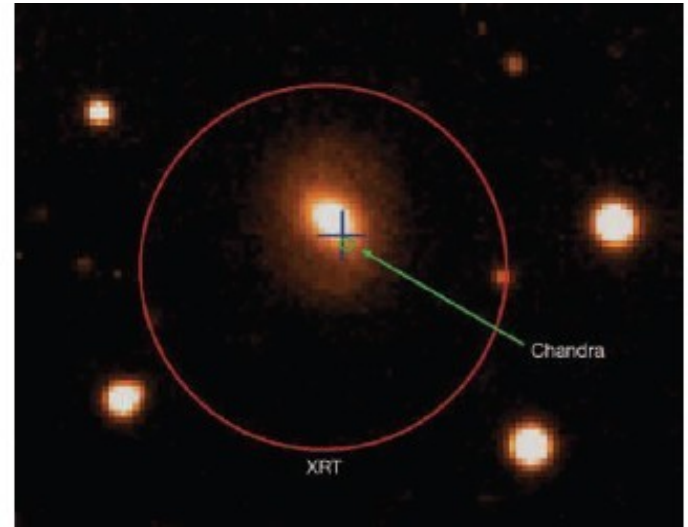
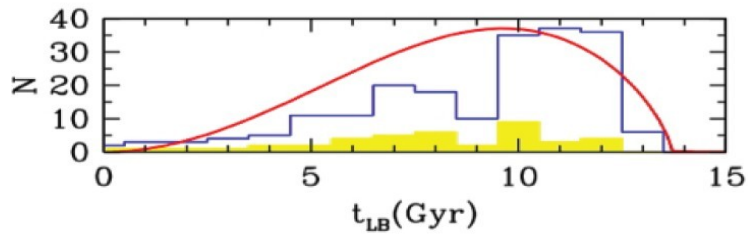
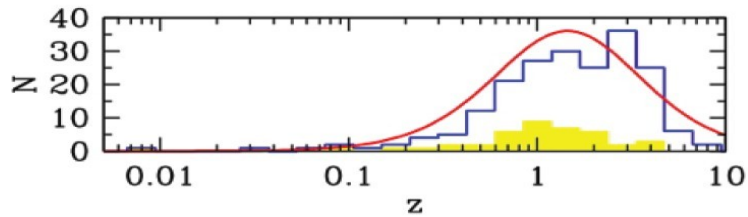
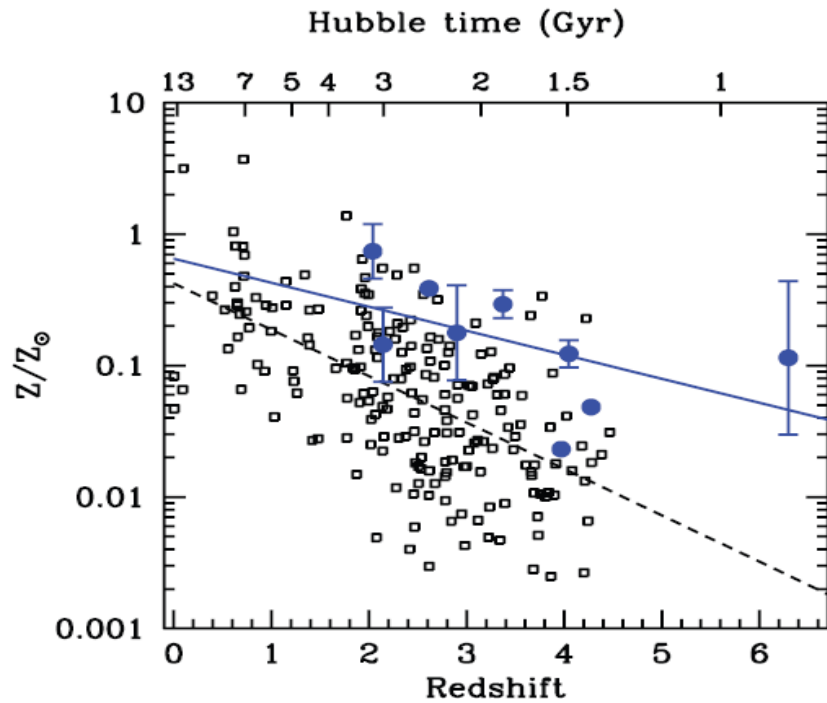
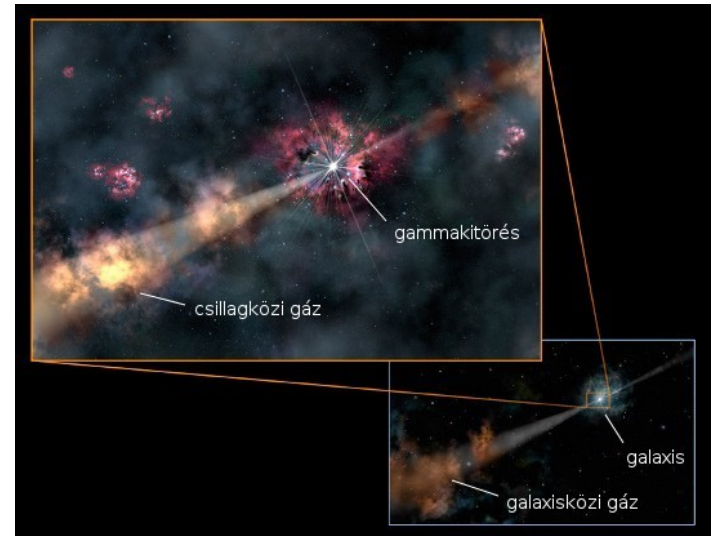
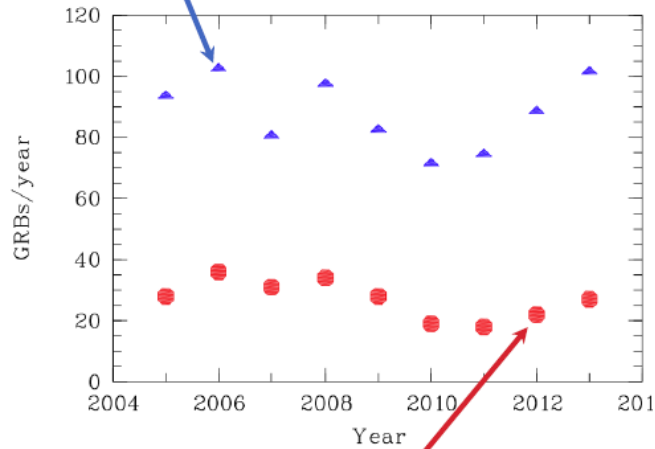


Figure 1. VLT optical image (D'Avanzo et al. 2005) showing the association of the short GRB 050724 with a galaxy (Barthelmy et al.

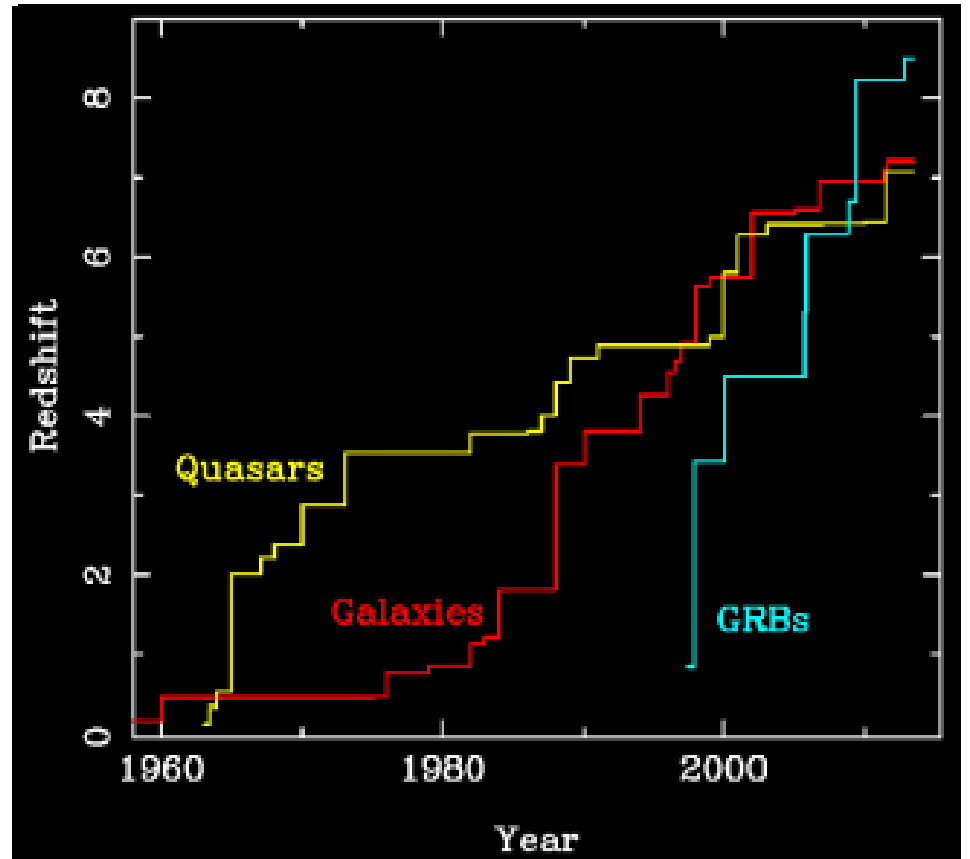
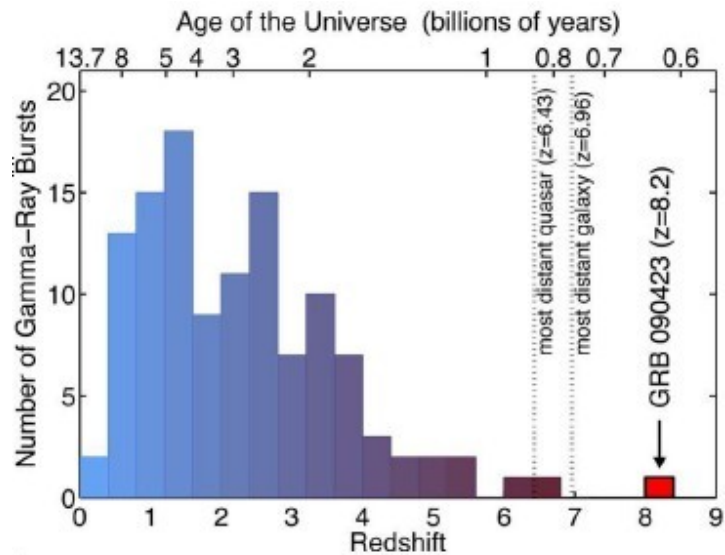


Swift

GRB detections by Swift

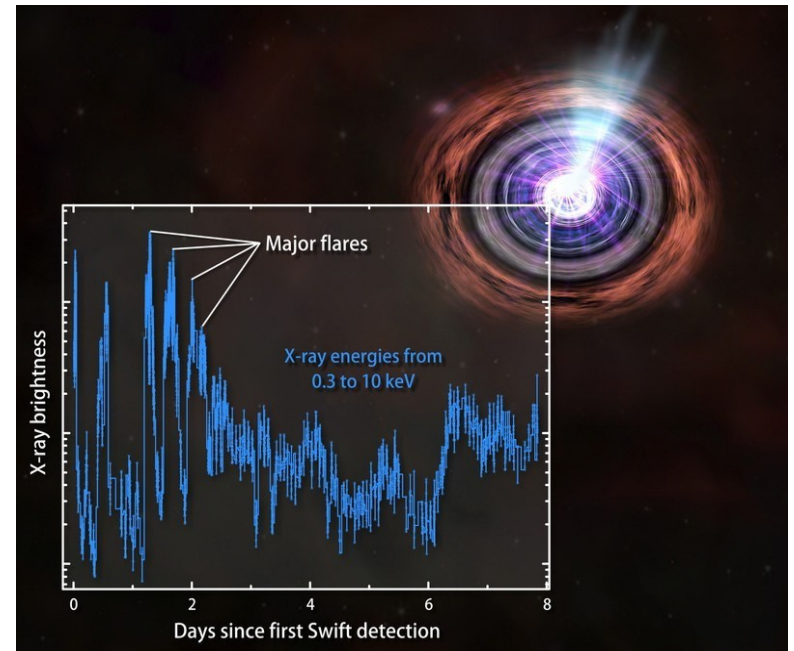
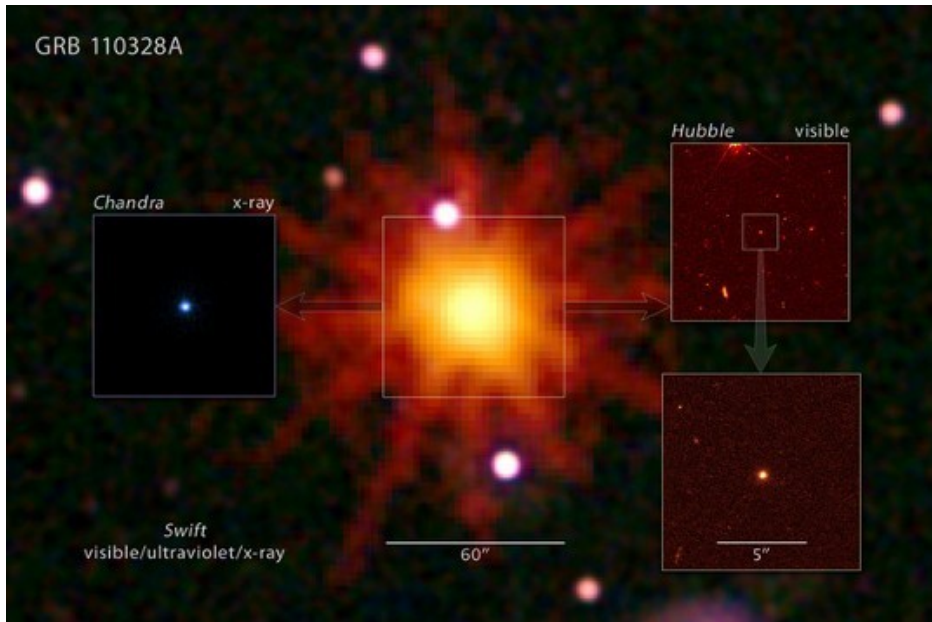


GRB redshift measurements



Swift

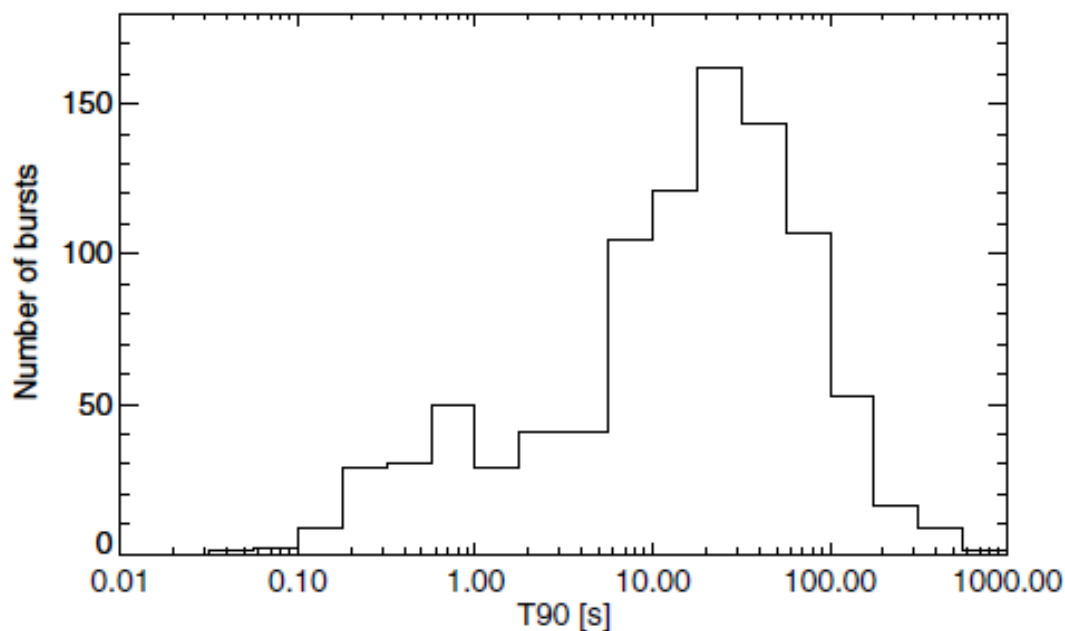
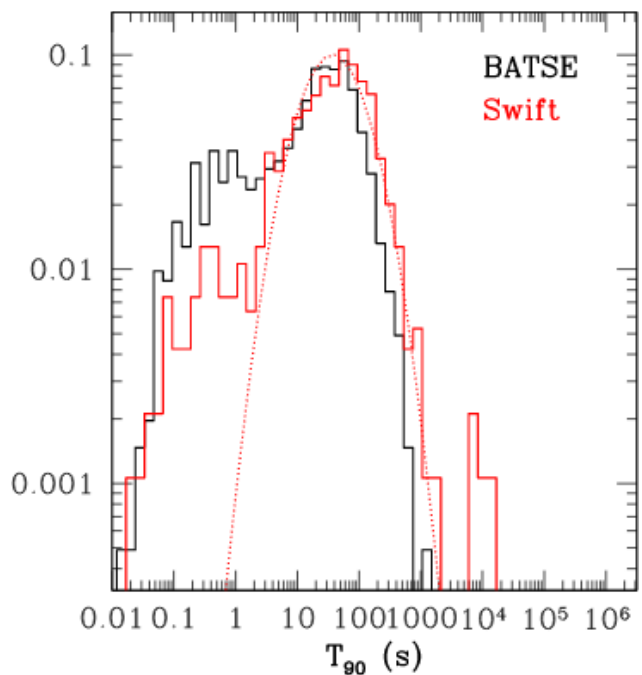
GRB 110328A: csillag zuhant a központi fekete lyukba, korábban nem találtak ilyen jelenséget.



Ultrahosszú gammakitörések

Váratlan új jelenség: ultrahosszú gammakitörések felfedezése. Nem egyedi, de ritka (**balra lent**). Eddig néhány ilyen találtak, közte a GRB 101225A, GRB 111209A, GRB 121027 és a GRB 130925A. Ezeknél a $T_{90} > 10000$ s (a T_{90} a gammabeütések 5%-ától 95%-áig eltelő időtartam). Hónapokig követi rádiósugárzás (csillagszél létére utal). Gyaníthatóan III. populációs kék szuperóriás az elődcsillag.

A „közönséges” GRB-k T_{90} gyakorisági eloszlása (a Fermi mérései alapján – l. később) **jobbra lent** látszik.



Ultrahosszú gammakitörések

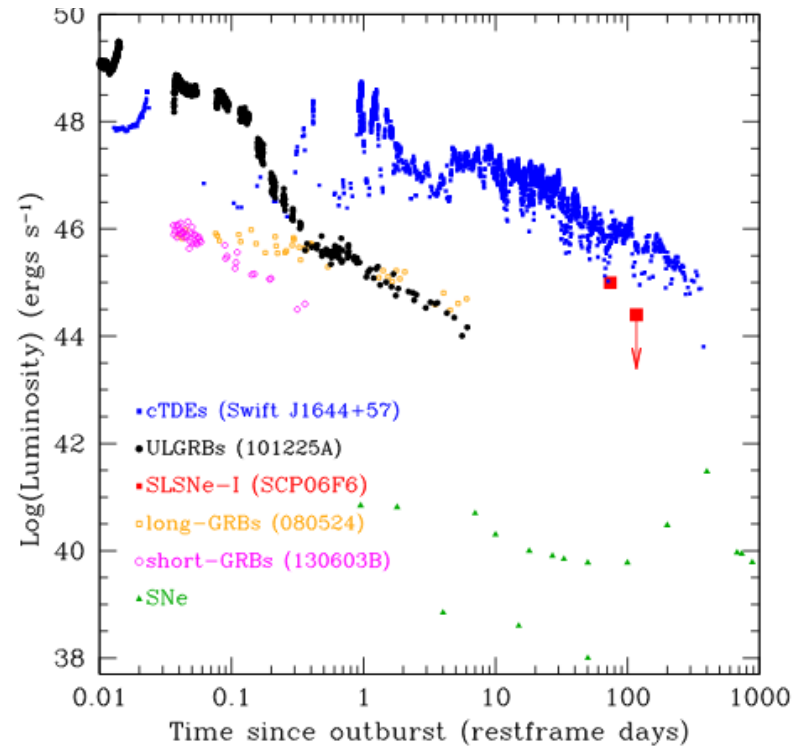
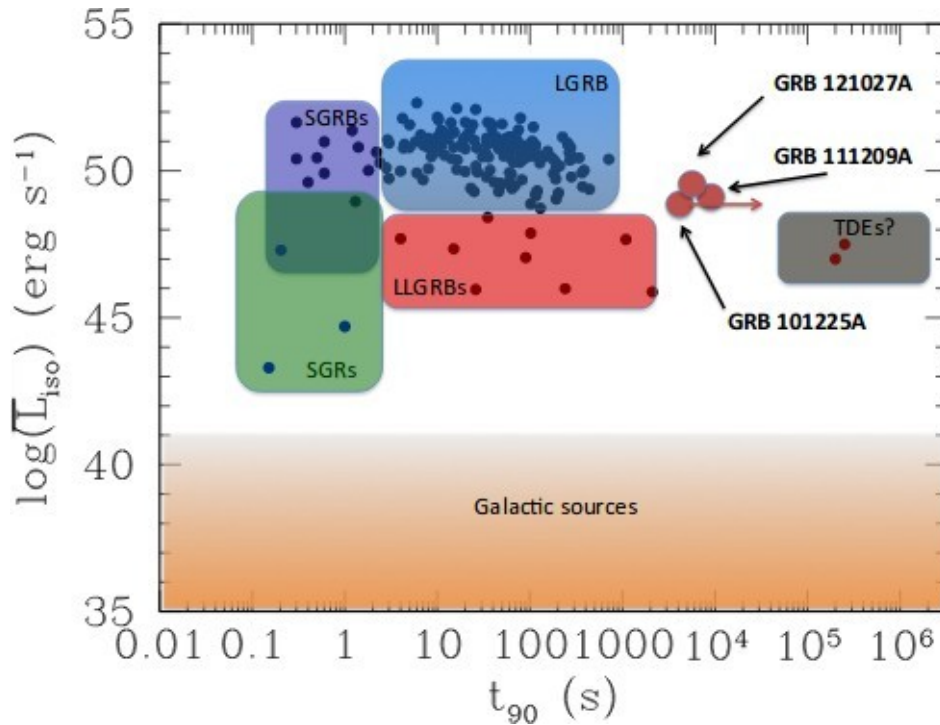


Figure 4: X-ray luminosity light curves of various categories of X-ray emitting transient, including supernovae, long-GRBs and short-GRBs. The new classes of very long lived and energetic transient are shown at the top of the plot. ULGRBs (black) show pronounced X-ray emission beyond $10^{48} \text{ erg s}^{-1}$ for hours

AGILE

AGILE (Astro-Rivelatore Gamma a Immagini Leggero): az Olasz Űrügynökség kis tömegű gammaaszondája. Indítás: 2007. áprilisban Indiából 540 km-es LEO-pályára. Jelenleg is működik.

Célobjektumok:

- AGN
- GRB
- Galaktikus röntgen- és gammaforrások
- Nem azonosított gammaforrások
- Galaktikus diffúz gammasugárzás
- Diffúz extragalaktikus gammasugárzás.

Műszerei:

GRID (Gamma Ray Imaging Detector):

30 MeV – 50 GeV között;

SA (Super AGILE): keményröntgen-monitor

18–60 keV között;

MCAL (Mini-Calorimeter): szcintillációs gammadetektor (nem képképző)

350 keV – 100 MeV között;

AC (Anti-coincidence System): műanyag szcintillátorral a háttéresemények levonására.

Eddig ismeretlen gammaforrásokat talált, napflereket és földi légköri gammafelvillanásokat is észlelt.

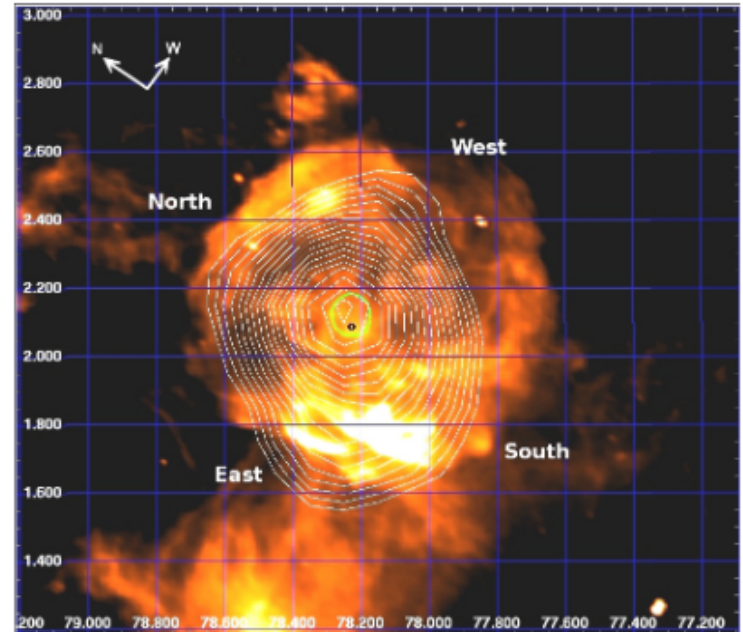


Figure 1. Gamma Cygni SNR (G78.2+2.1) in Galactic coordinates. Image obtained with the Dominion Radio Astrophysical Observatory (DRAO), from the Canadian Galactic Plane Survey (CGPS), wavelength = 21.1 cm (frequency = 1420 MHz, bandwidth = 30 MHz), pixel size = 20'' (Taylor et al. 2003). *White* contour levels: AGILE-GRID intensity contour levels above 100 MeV – related to data integrated between 2007-November-02 and 2009-July-29 – (pixel size 0.1°), starting from 0.00085 in steps of 0.00002 (intensity per pixel); *green* contour: AGILE-GRID 95% confidence level for $E \geq 100$ MeV; *black* circle: PSR J2021+4026. Orientation

AGILE-észlelések térképe

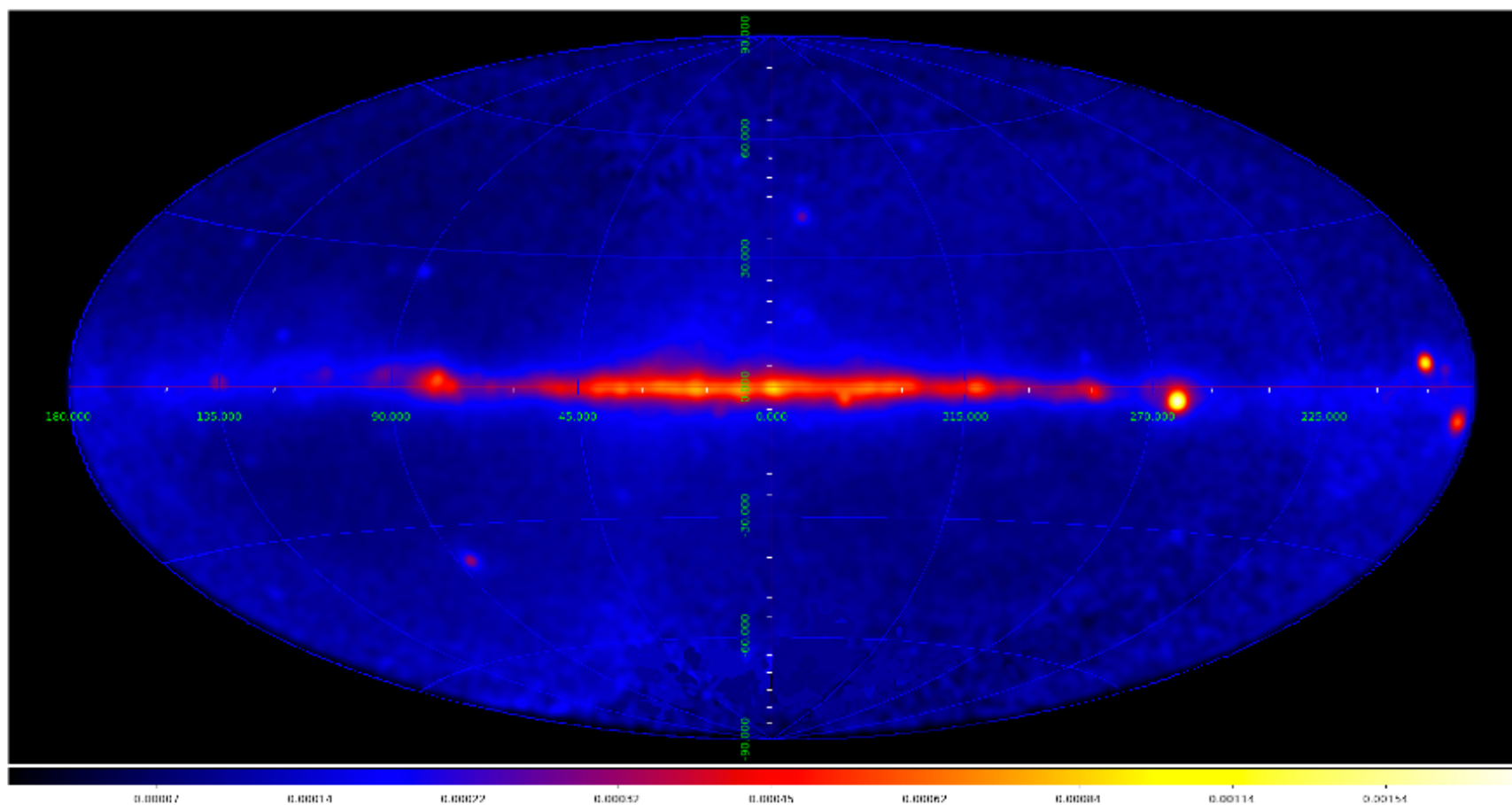


Fig. 2: The intensity map in the 100 MeV – 10 GeV energy band in Galactic coordinates and Hammer-Aitoff projection for the 2.3-year period analysed for the 2AGL Catalog (expressed in units of $\text{ph cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$). Bin size = 0.1° .

Fermi-GLAST

Fermi Gamma-ray Space Telescope (eredetileg GLAST, Gamma-ray Large Area Space Telescope, az indítás után nevezték át): NASA-szonda (francia, német, olasz, japán és svéd közreműködéssel).

Indítás: 2008. jún., 545 km-es LEO-pályára. 5 éves működést terveztek, de még 2020-ban is működik. 2013. április 30-án 30 ms híján ütközött a Kozmosz-1805-tel, emiatt hetekkel előtte enyhén módosították a pályáját.

Műszerei:

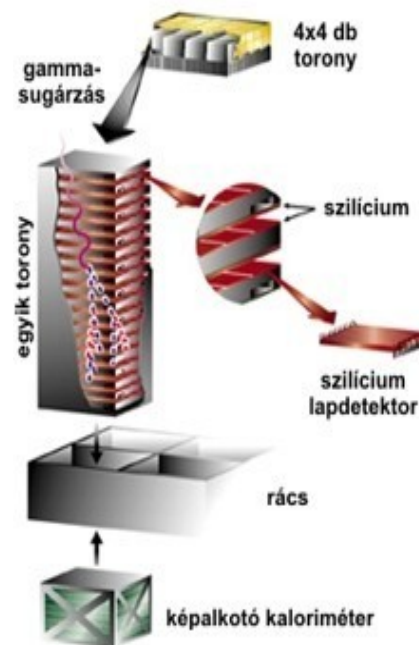
LAT (Large Area Telescope)

(a képen):

égfelmérés képalkotással (párkeltés alapján) 20 MeV – 300 GeV között, látómező az égbolt 20%-a;

GBM (Gamma Burst Monitor):

gammakitörések észlelése 14 szcintillációs detektorral (12 Na-jodid-kristály a 8 keV – 1MeV tartományra, 2 Bi-germanát kristály 150 keV – 30 MeV között). A teljes eget érzékeli egyszerre

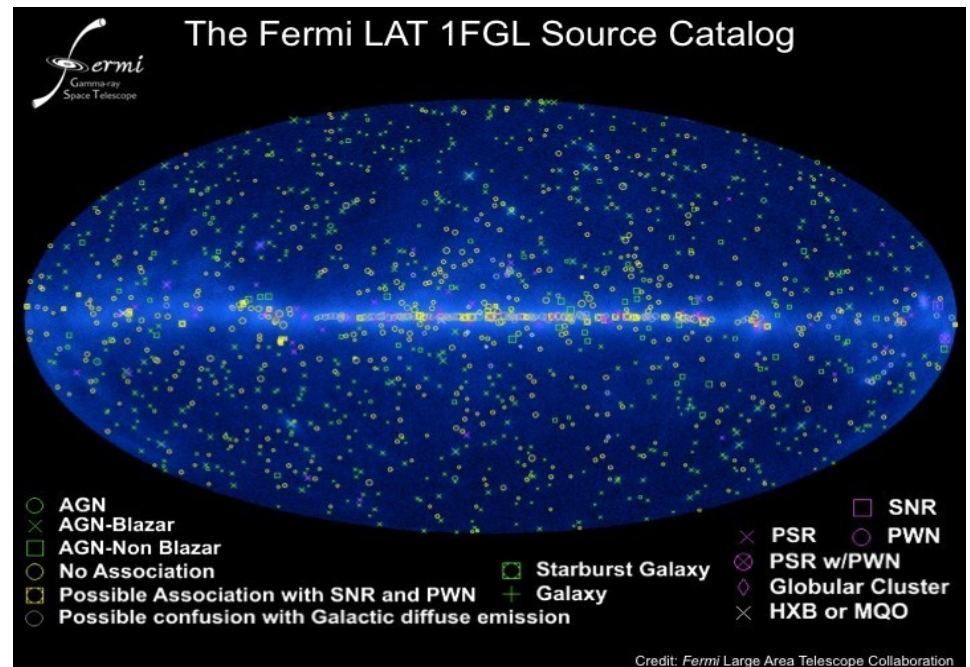
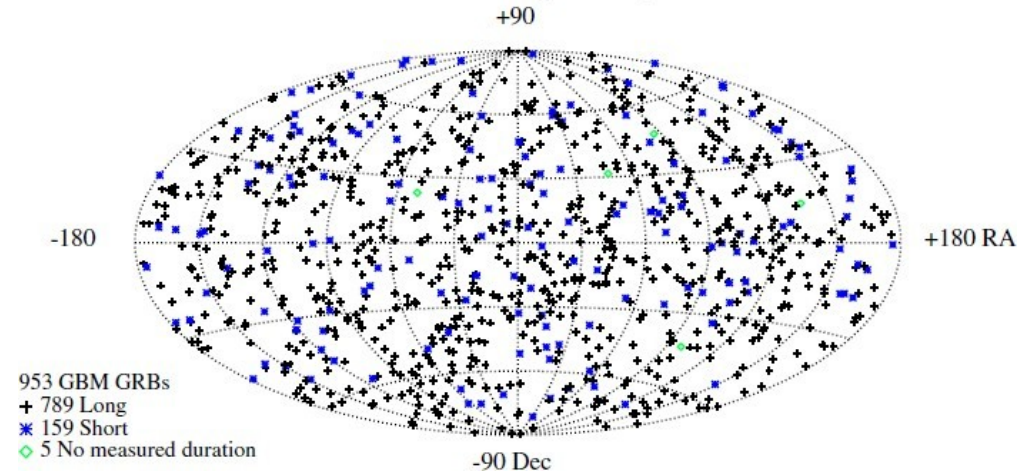


Fermi-GLAST

A misszió fő céljai:

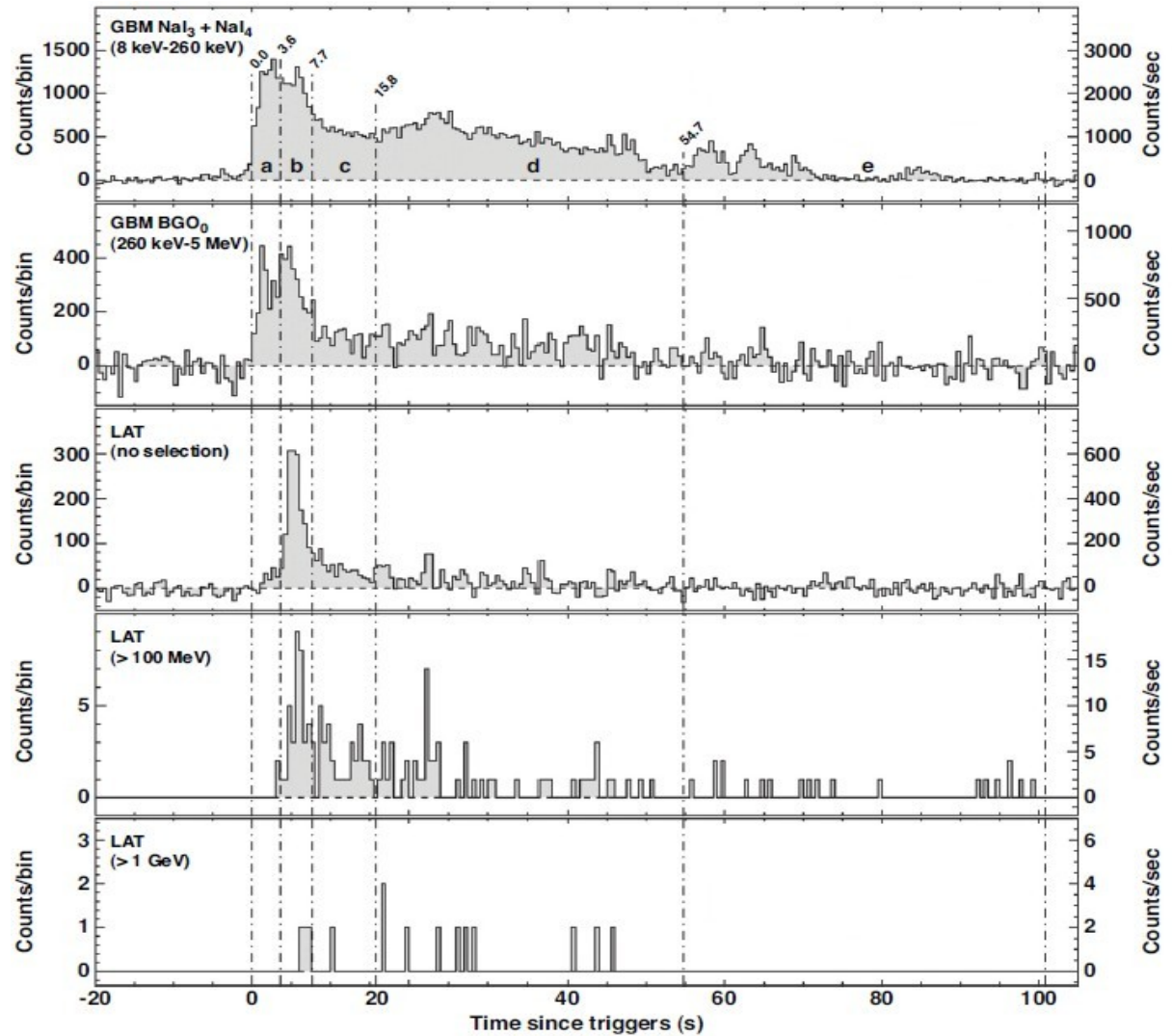
- A részecskegyorsítás mechanizmusának megértése az AGN-ek, pulzárak és szupernóva-maradványok esetében;
- A gammaégbolt nagy felbontással (diffúz emisszió, azonosítatlan források);
- GRB-k és más tranziensek nagyenergiás viselkedésének megértése;
- A sötét anyag és a korai Univerzum vizsgálata;
- Elpárolgó ősi mikro-feketelyukak keresése a várt gammasugárzásuk kimutatásával.

Fermi GBM GRBs in first four years of operation



Fermi-GLAST

A gammakitörés
felfutása
hullámhosszfűgő.



Fermi-GLAST

A gammakitörés előjelét (prekurzor) is sikerült már detektálni (jobbra).

GRB-k keménységi aránya a T_{90} függvényében (lent).

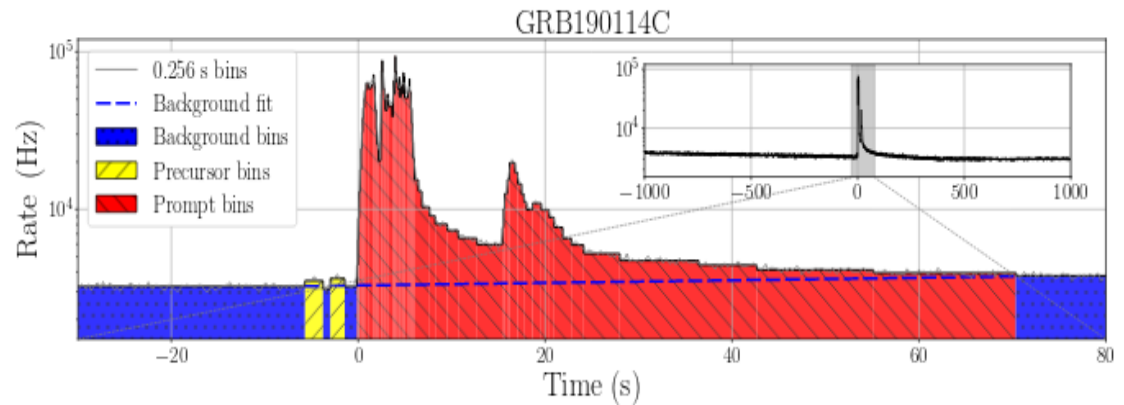
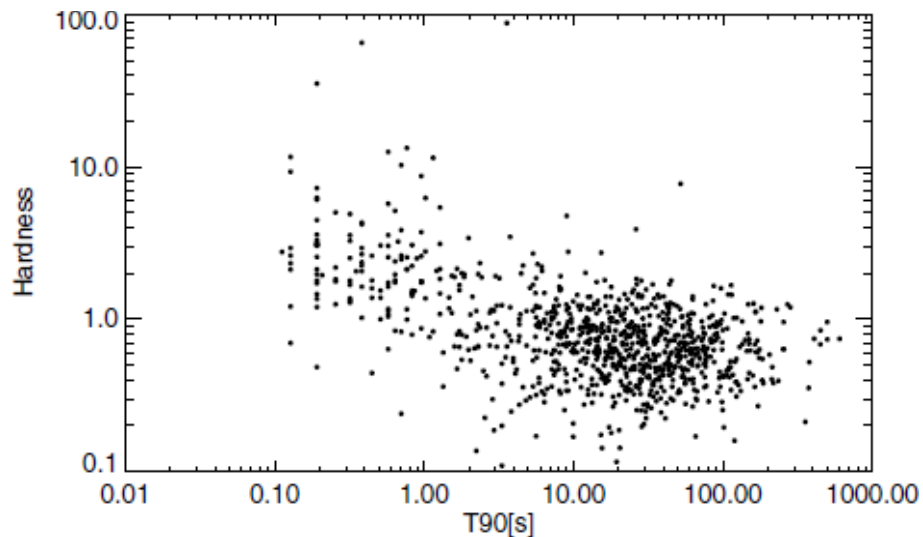


FIG. 1. Illustration of the Bayesian block light curve of GRB 190114C. Two dim precursors (yellow) are observed 5.57 s and 2.85 s before the onset of the prompt emission (red). The time range displayed in this figure corresponds to the grey shaded area in the inset image, which displays the full light curve.



Egy érdekes Fermi-eredmény

PSR J0002+6216 (6500 fényévre van a Cassiopeiában): négymillió km/óra sebességgel száguldó pulzár a Fermi + VLA mérései alapján. A 13 fényév hosszú rádiócsóva éppen a CTB 1 szupernóva-maradvány 53 fényévre levő centruma felé mutat, a pulzár tehát onnan repült ki a kb. 10 ezer évvel ezelőtti bekövetkezett robbanás során. A pulzár tengelyforgási periódusa 1/8,7 s. A rettentő nagy sebességre egyelőre nincs magyarázat. A pulzárt önkéntesek fedezték fel az einstein@home projekt során a Fermi adatait feldolgozva. Húsznál több másik gammapulzárt is találtak.



Fontos és emlékezetes gammakitörések

Egy 2019-es preprintben már **6000-nél több GRB** statisztikai analízise szerepel. Ezek közül néhány nagyon fontos vagy tudományos szempontól érdekes kitörés szerepel az alábbi listában.

GRB 670702: az elsőként észlelt gammakitörés (Vela-4)

GRB 781104: az elsőként azonosított forrású kitörés (Venyera-11, -12, Prognosz-7, ISEE-3, Pioneer Venus Orbiter, Vela)

GRB 820405: a legrövidebb ideig (12 ezredmásodpercig) tartó kitörés

GRB 970228: az első utófény, halvány galaxissal esik egybe, extragalaktikus eredet (BeppoSAX)

GRB 970508: az első vöröseltolódás ($z=0,835$) és első rádióutófény, biztos az extragalaktikus eredet (BeppoSAX)

GRB 971214: az első GRB, amelyre $z>1$ (BATSE)

GRB 980425: GRB első azonosítása SN-val (SN 1998bw), az addig legközelebbi GRB ($z=0,008$) (BATSE)

GRB 990123: optikaiban nagyon fényes (8,9 magnitúdós) GRB, pedig 10 milliárd fényévre volt (BeppoSAX)

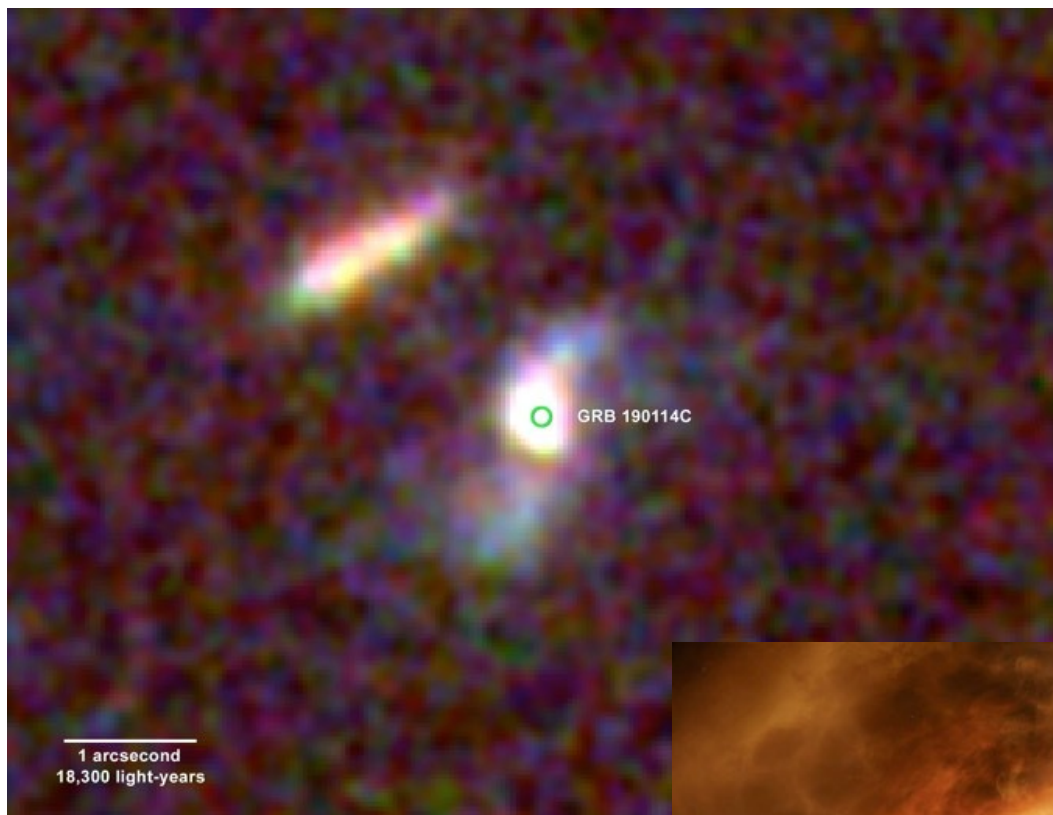
GRB 991216: a Chandra által is észlelt első GRB (BATSE)

GRB 030329A: nagyon közeli GRB ($z=0,168$), ionizálta a Föld felsőléggörét, SN-val azonosították, az addig legalaposabban vizsgált utófény (HETE-2)

GRB 050509B: egy rövid GRB első optikai azonosítása (Swift)

Fontos és emlékezetes gammakitörések

- GRB 050904: az addig legtávolabbi GRB ismert vöröseltolódással ($z=6,29$) (13 milliárd fényév)
- GRB 060218: az első olyan GRB, amelyet keltő szupernóva-robbanást azonnal képesek voltak észlelni ($z = 0,033$) (Swift)
- GRB 060505: nagyon alaposan észlelt GRB szupernóva nélkül (Swift)
- GRB 060614: ugyancsak nagyon alaposan észlelt GRB szupernóva nélkül (Swift)
- GRB 080319B: az eddigi legerősebb GRB, szabad szemmel is látható (5,3 magnitúdós) utófényvel a Bootesben (Swift). Másik rekord: 24 órán belül 5 GRB-t észleltek
- GRB 080916C: az addigi legnagyobb energiakibocsátású GRB (9000 SN-nak felelt meg), anyagkilövellés a fénysebesség 99,9999%-ával (Fermi)
- GRB 090423: újabb GRB-távolsági rekord: $z=8,2$ (13 milliárd fényévre) (Swift)
- GRB 101225A: 28 perc időtartamú gammakitörés ($z = 0,33$) (Swift)
- GRB 110918A: a legnagyobb luminozitású kitörés, $L_{\text{izotr}} = 4,7 \times 10^{47}$ watt
- GRB 111209A: a leghosszabb ideig (7 óránál tovább) tartó GRB
- GRB 130427A: az addig észlelt legnagyobb energiájú kitörés (Fermi LAT, 94 GeV), a Swift 6 hónapig észlelte a röntgenutófényét
- GRB 170817A: kilonóva, 2 neutroncsillag összeolvadása az NGC 4993-ban, a GW170817 forrása, az eddigi legközelebbi GRB ($z = 0,009727$) (Fermi)
- GRB 190114C: a valaha észlelt legnagyobb energiájú kitörés (Fermi és Swift)

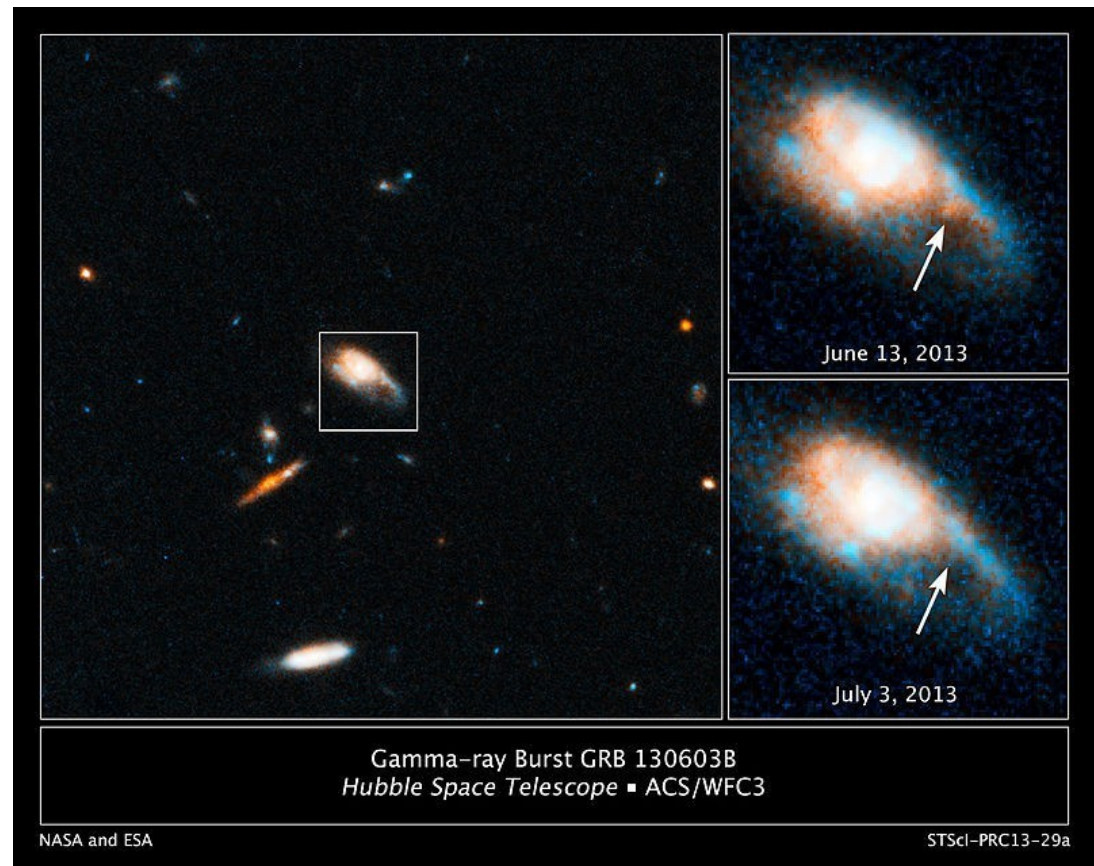


GRB 190114C:
fantáziakép (**lent**)
és a HST felvétele
(**balra**)

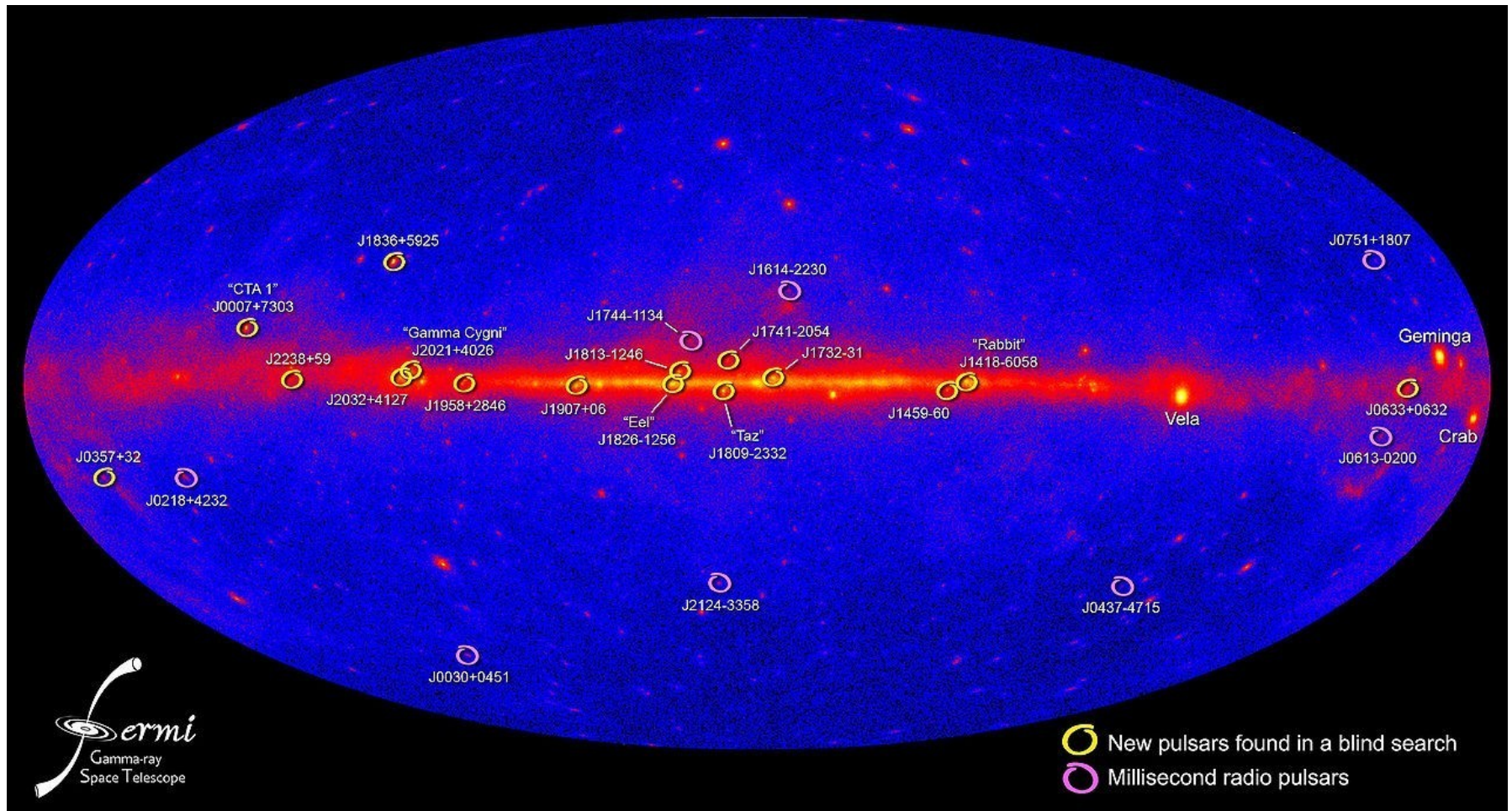


„Sötét” gammakitörések

A gammakitörések egy részét más hullámhosszakon nem lehet megfigyelni. Ezek az ún. „sötét” kitörések a por elnyelő hatásával magyarázhatók. A Chandra és a HST legújabb vizsgálatai szerint azonban az ilyen kitörések utófénye is megfigyelhető sok esetben. Ez megszorítást jelent a távoli galaxisok portartalmára.

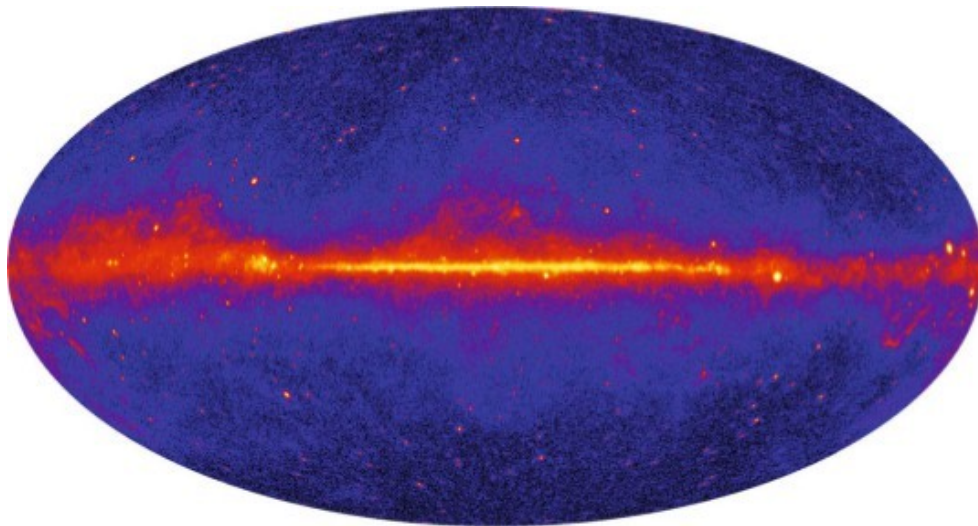


Fermi-GLAST

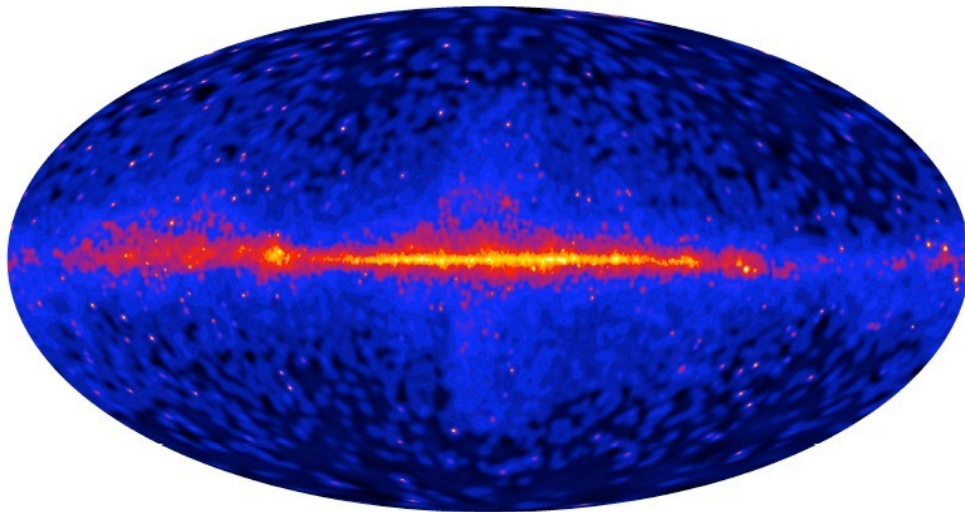


A Fermi által észlelt pulzárak eloszlása

Fermi-GLAST



1 GeV feletti energiájú
források eloszlása
2014-es térképen

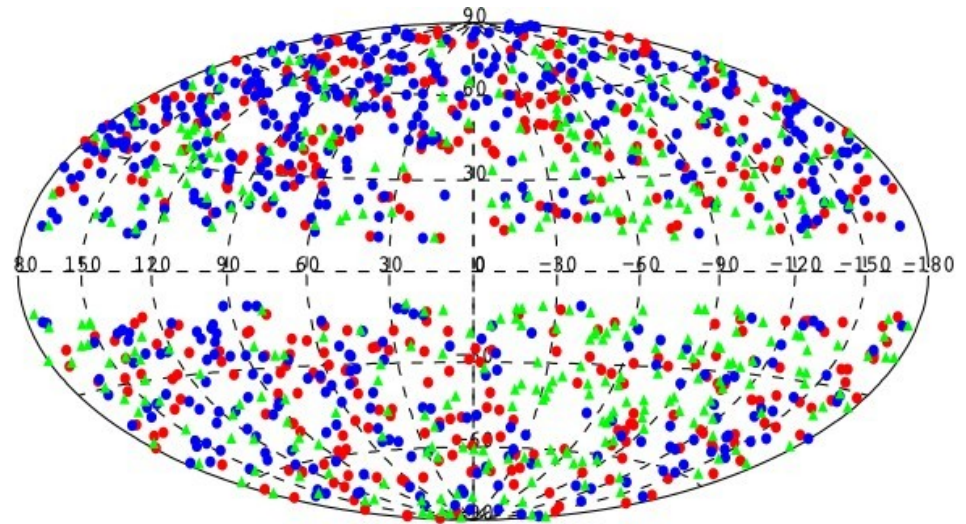
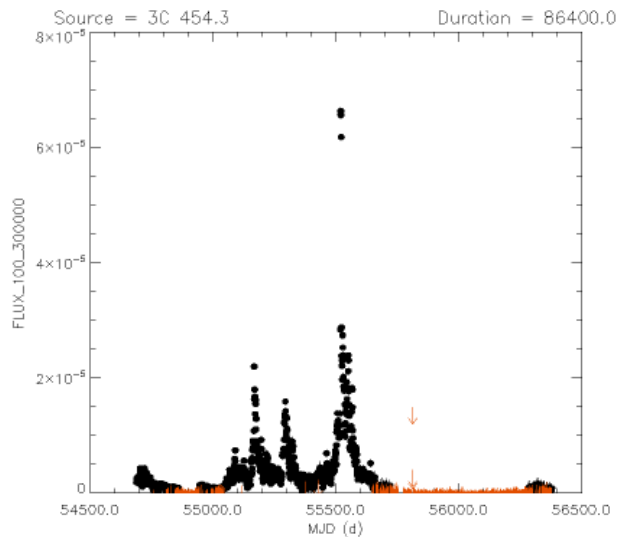


10 GeV feletti
energiájú források

Fig. 1. Brightness map of the sky at energies above 10 GeV, shown in Galactic coordinates, adaptively smoothed to reduce statistical fluctuations in regions of low gamma-ray intensity. Figure courtesy of the *Fermi* LAT Collaboration.

Fermi-GLAST

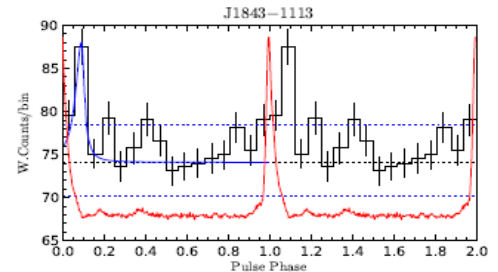
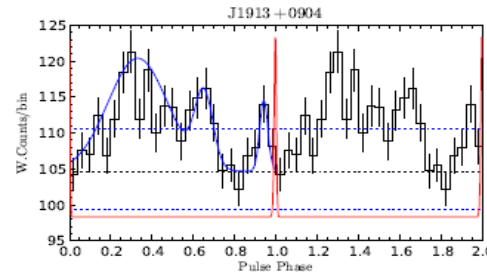
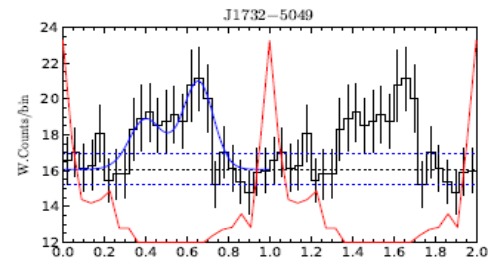
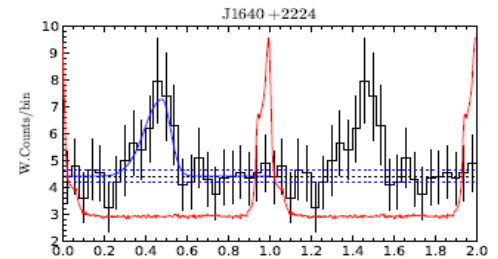
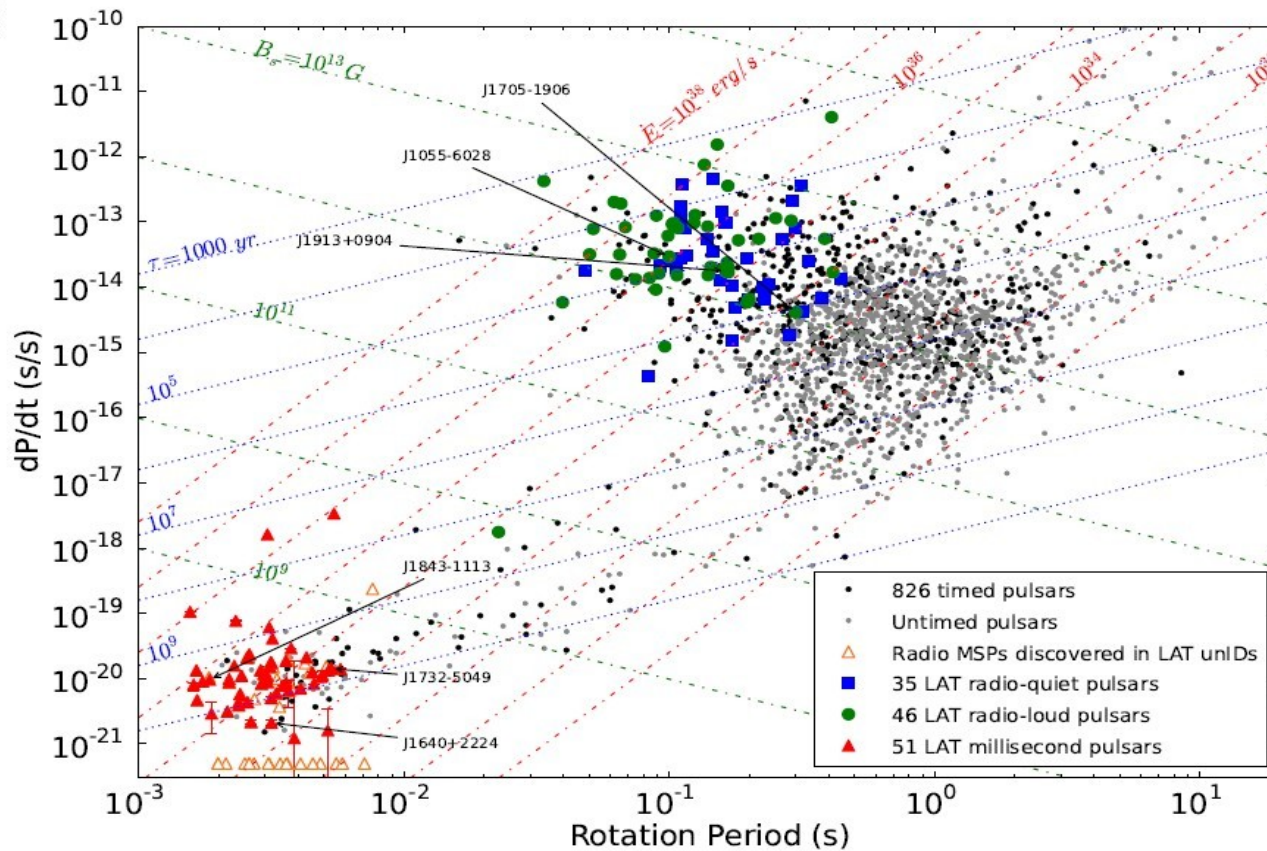
A 3C 454.3 blazár
gammafénygörbéje (lent)
és az észlelt blazárok
égi eloszlása (jobbra)



3 The sky distribution of the blazars listed in the 3LAC (Hammer-Aitoff projection), shown in galactic coordinates (Ackermann et al. 2015a). Red circles FSRQs, blue circles BL Lacs, green triangles candidates of uncertain type (BCUs)

Fig. 3. Average daily flux ($E > 100$ MeV) seen by the *Fermi* LAT for blazar 3C 454.3 from the start of the *Fermi* science mission (2008 August) until 2013 March. Red arrows (primarily clustered along the x-axis with the arrowheads invisible) indicate days in which the blazar was not detected[†].

Fermi-GLAST



Pulzárak gammafénygörbéje
(**jobbra**) és diagnosztikus
diagramja (**fent**)

Fermi-GLAST

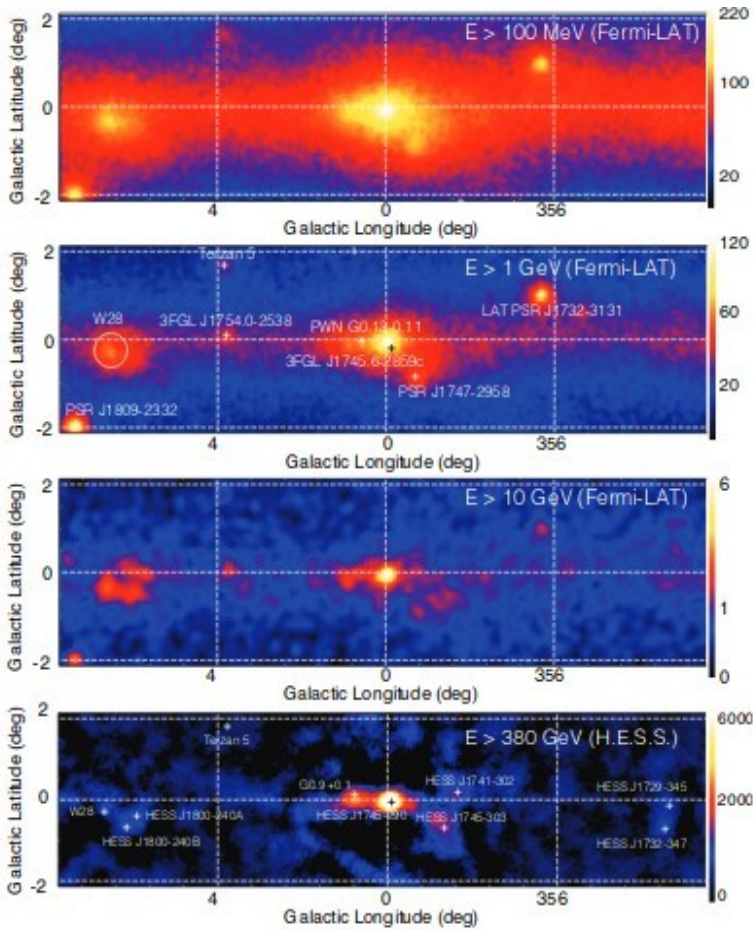


Figure 11
 Region around the GC ($|l| < 8^\circ$, $|b| < 2^\circ$) in gamma rays for different minimum energies. The region corresponds to a size of $1100 \times 280 \text{ pc}$. The top three panels are smoothed gamma-ray

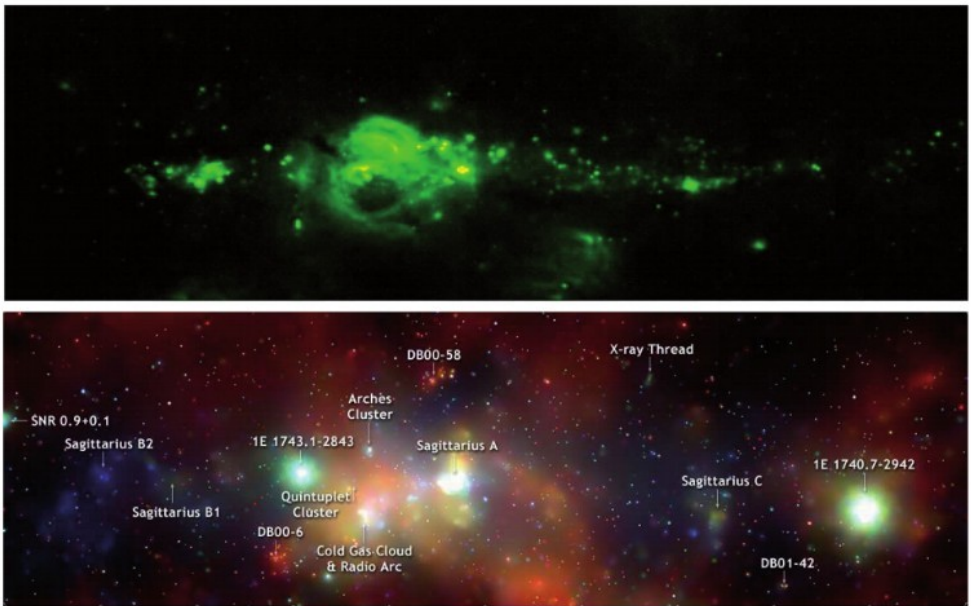
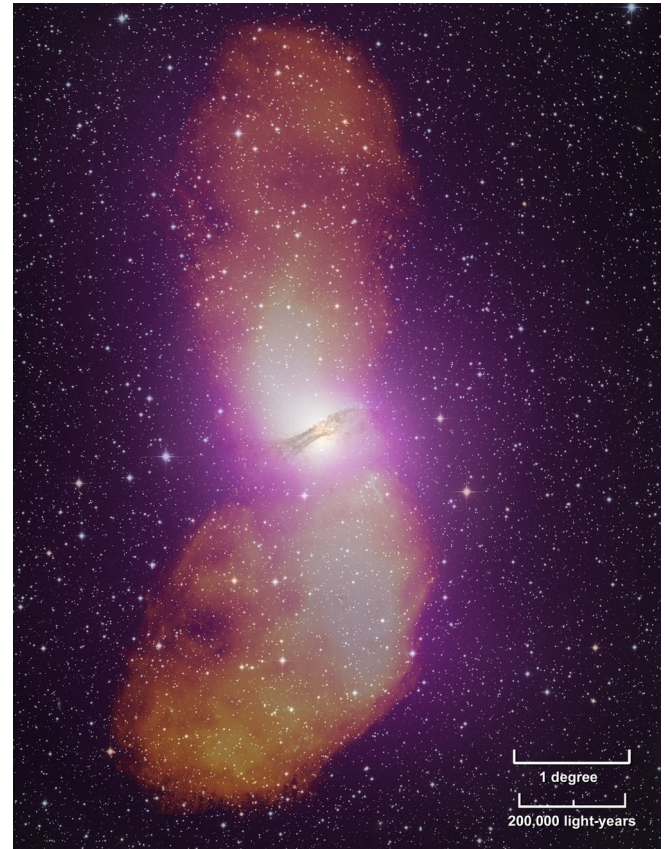
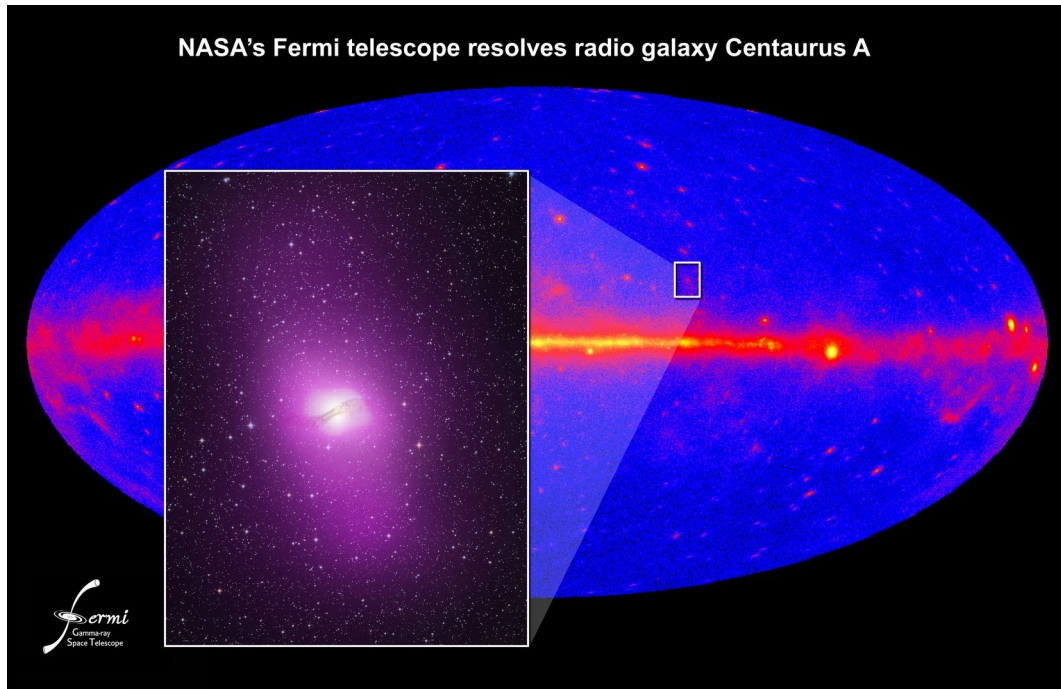


Figure 4: Spitzer infrared (top) and Chandra X-ray (bottom) maps (in Galactic coordinates) of a $2^\circ \times 0.8^\circ$ region around the GC. The infrared emission traces warm dust and stellar activity, while the keV photons (red: 1-3 keV, green: 3-5 keV, blue: 5-8 keV) trace high energy phenomena of the start and end points of stellar life (such as particle acceleration at stellar wind shocks or in large magnetic fields of rotating neutron stars) and extended regions where relativistic electrons produce synchrotron or bremsstrahlung radiation. Images after [31] and [37].

A galaktikus centrum környékének sugárzása különféle hullámhosszokon

Fermi-GLAST



A Cen A galaxis a gammatartományban is különleges objektum.

Röviden a Fermi LAT 4. katalógusáról

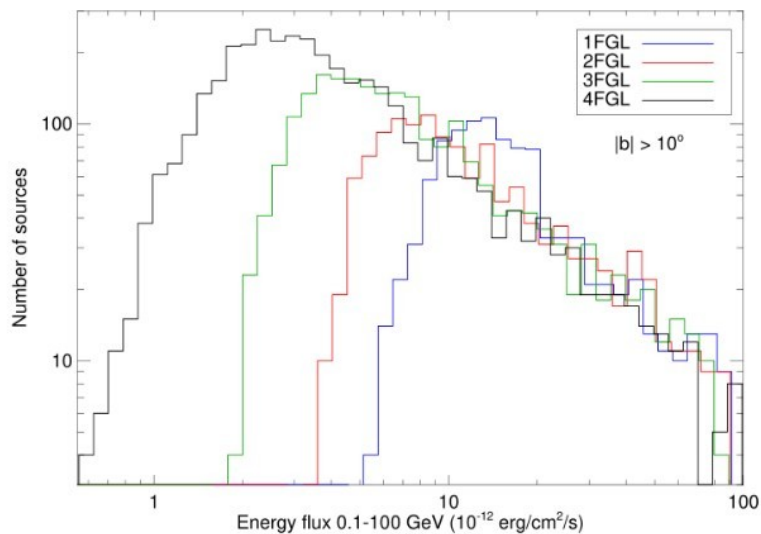
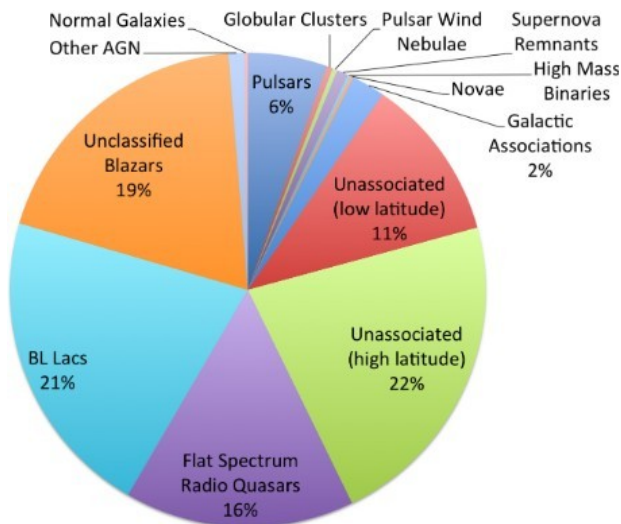


Figure 3. Distributions of the energy flux for the high-latitude sources ($|b| > 10^\circ$) in the 1FGL (1043 sources, blue), 2FGL (1319 sources, red), 3FGL (2193 sources, green) and 4FGL (3663 sources, black) catalogs, illustrating the approximate detection threshold.

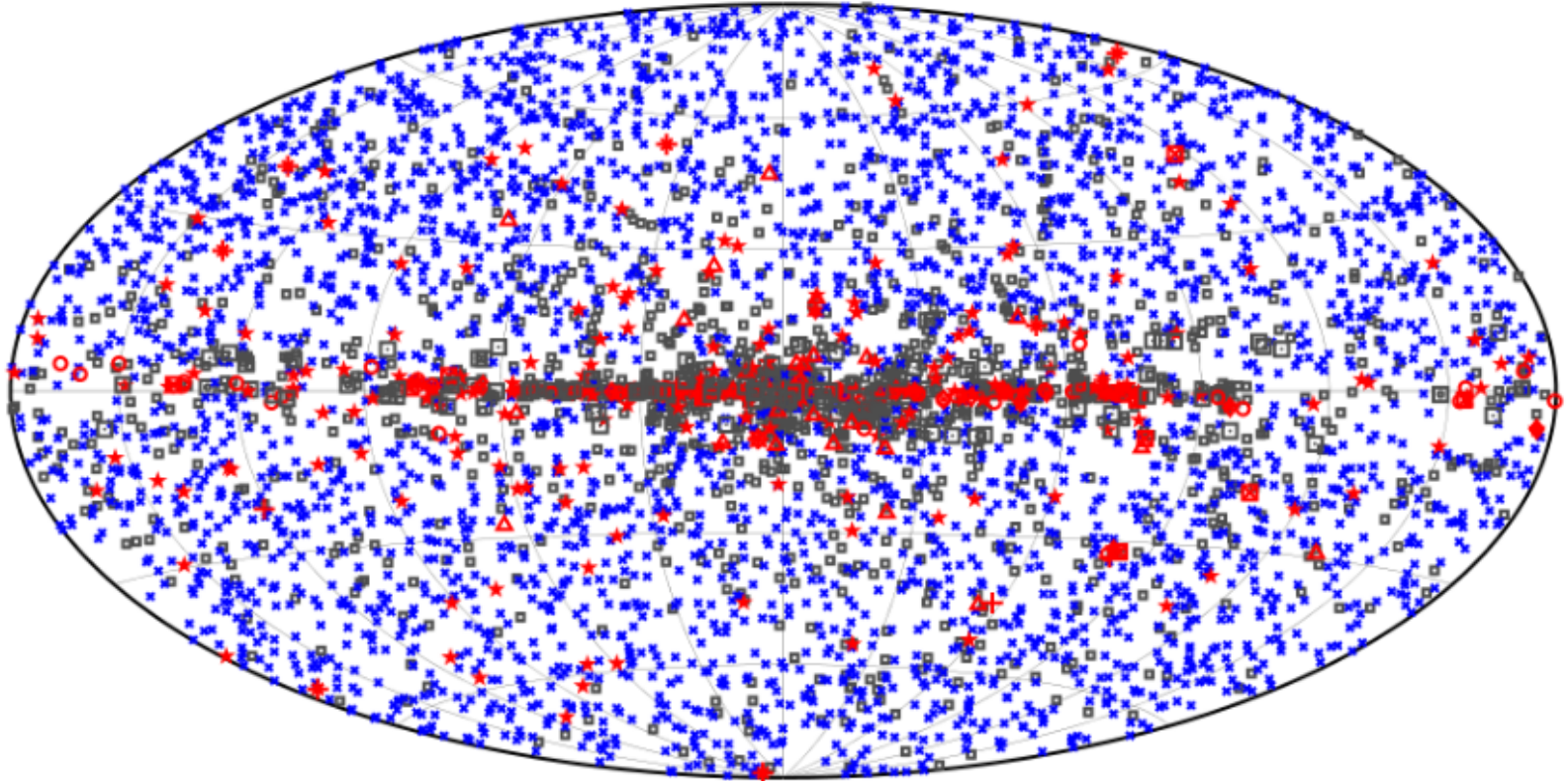
Table 7. LAT 4FGL Source Classes

Description	Identified		Associated	
	Designator	Number	Designator	Number
Pulsar, identified by pulsations	PSR	231	...	...
Pulsar, no pulsations seen in LAT yet	...	...	psr	10
Pulsar wind nebula	PWN	12	pwn	6
Supernova remnant	SNR	24	snr	16
Supernova remnant / Pulsar wind nebula	SPP	0	spp	92
Globular cluster	GLC	0	gle	30
Star-forming region	SFR	3	sfr	0
High-mass binary	HMB	5	hmb	3
Low-mass binary	LMB	1	lmb	1
Binary	BIN	1	bin	0
Nova	NOV	1	nov	0
BL Lac type of blazar	BLL	22	bll	1080
FSRQ type of blazar	FSRQ	42	fsrq	639
Radio galaxy	RDG	6	rdg	32
Non-blazar active galaxy	AGN	1	agn	16
Steep spectrum radio quasar	SSRQ	0	ssrq	2
Compact Steep Spectrum radio source	CSS	0	css	5
Blazar candidate of uncertain type	BCU	3	bcu	1152
Narrow line Seyfert 1	NLSY1	3	nlsy1	5
Seyfert galaxy	SEY	0	sey	1
Starburst galaxy	SBG	0	sbg	7
Normal galaxy (or part)	GAL	2	gal	2
Unknown	UNK	0	unk	118
Total	...	357	...	3217
Unassociated	...	...	...	1525

NOTE—The designation ‘spp’ indicates potential association with SNR or PWN. Designations shown in capital letters are firm identifications; lower case letters indicate associations.

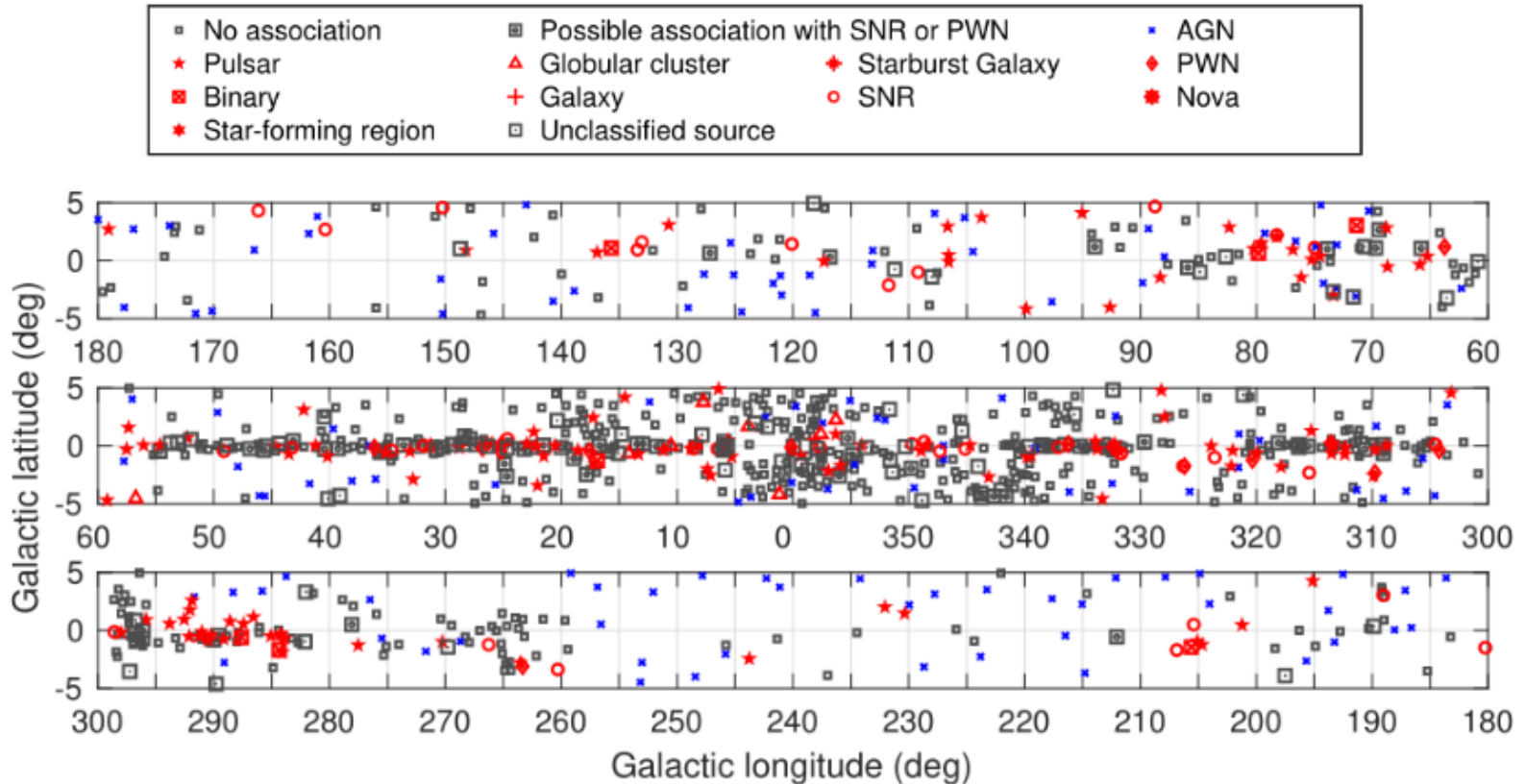
2019-es állapotot tükröző információk

Fermi 4FGL



◻ No association	◻ Possible association with SNR or PWN	• AGN
★ Pulsar	▲ Globular cluster	◆ PWN
◼ Binary	+ Galaxy	○ SNR
★ Star-forming region	◻ Unclassified source	★ Nova

Fermi 4FGL



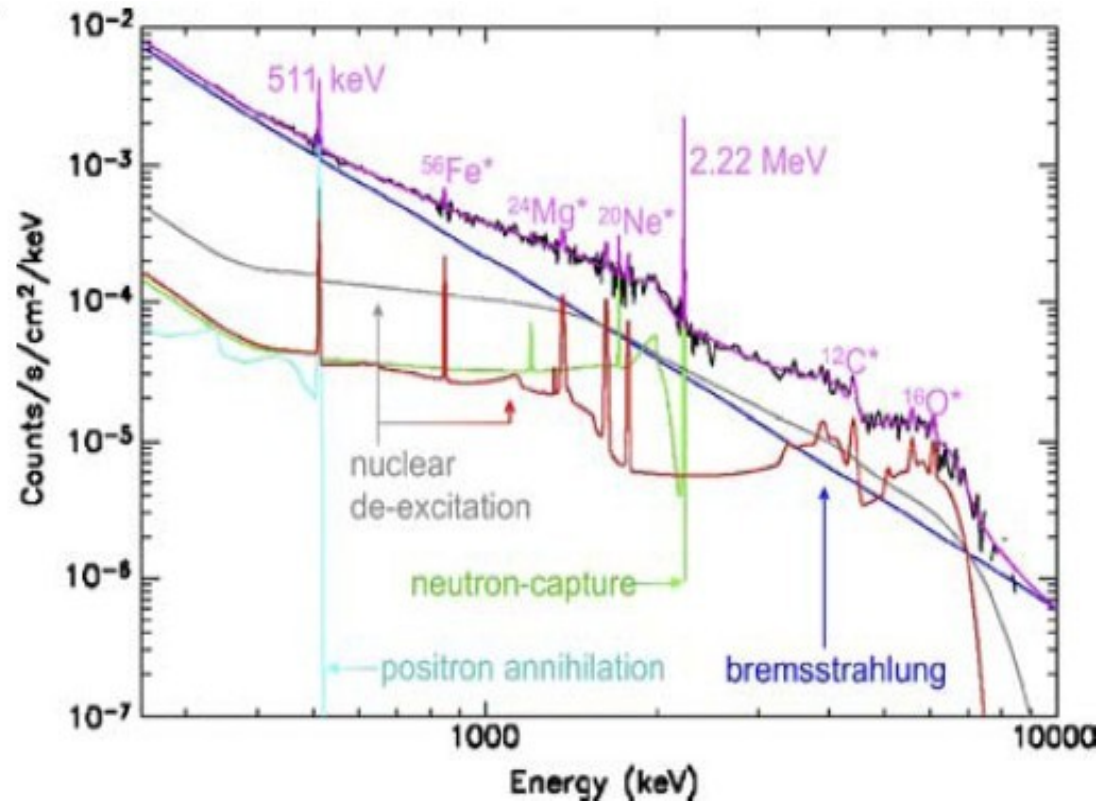
2020-ra kissé módosultak az adatok. A tejútrendszerbeli gammaforrások között 239 pulzár, 40 szupernóva-maradvány, 17 pulzárszél gerjesztette köd, 30 gömbhalmaz, 3 csillagkeletkezési tartomány, 15 kettőscsillag van. Extragalaktikus források: LMC, SMC, M31, 7 csillagontó galaxis. Törpegalaxis gammasugárzását eddig nem detektálták.

RHESSI

Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) = Explorer-81: eredetileg HESSI, a NASA SMEX típusú szondája LEO-pályán. Indítás: 2002. febr. Kifejezetten a Nap kutatására szolgál. Két évig tartó missziót terveztek, de 2018-ig működött.

Érdekes eredményei:

- Az első képalkotás a napflerek során felszabaduló gammastrugálzásról (a képen a spektrum).
- A földi légköri gammavillanások zivatartevékenység során gyakoribbak és nagyobb az energiájuk, mint korábban gondolták.

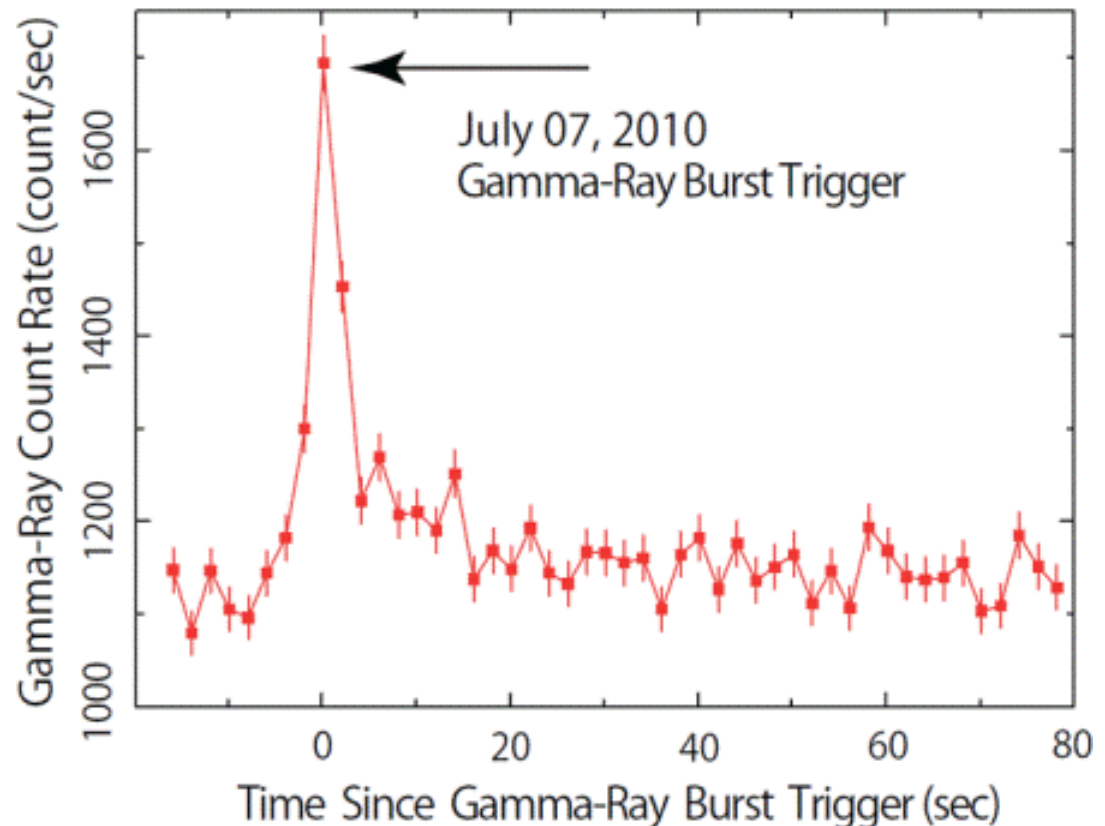


GAP műszer az IKAROS szondán

IKAROS (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun): a JAXA bolygóközi szondája, amit a sugárnyomás gyorsít (napvitorlás). 2010 decemberében indították kísérleti céllal.

A rajta levő
gammadetektor a
GAP (Gamma-ray
burst Polarized light
detector):
3,7 kg tömegű,
17 cm magas,
17 cm átmérőjű,
henger alakú
eszköz.

A képen az
elsőként detektált
gammakitörésének
fénygörbéje.



A gammaégbolt 600 MeV felett

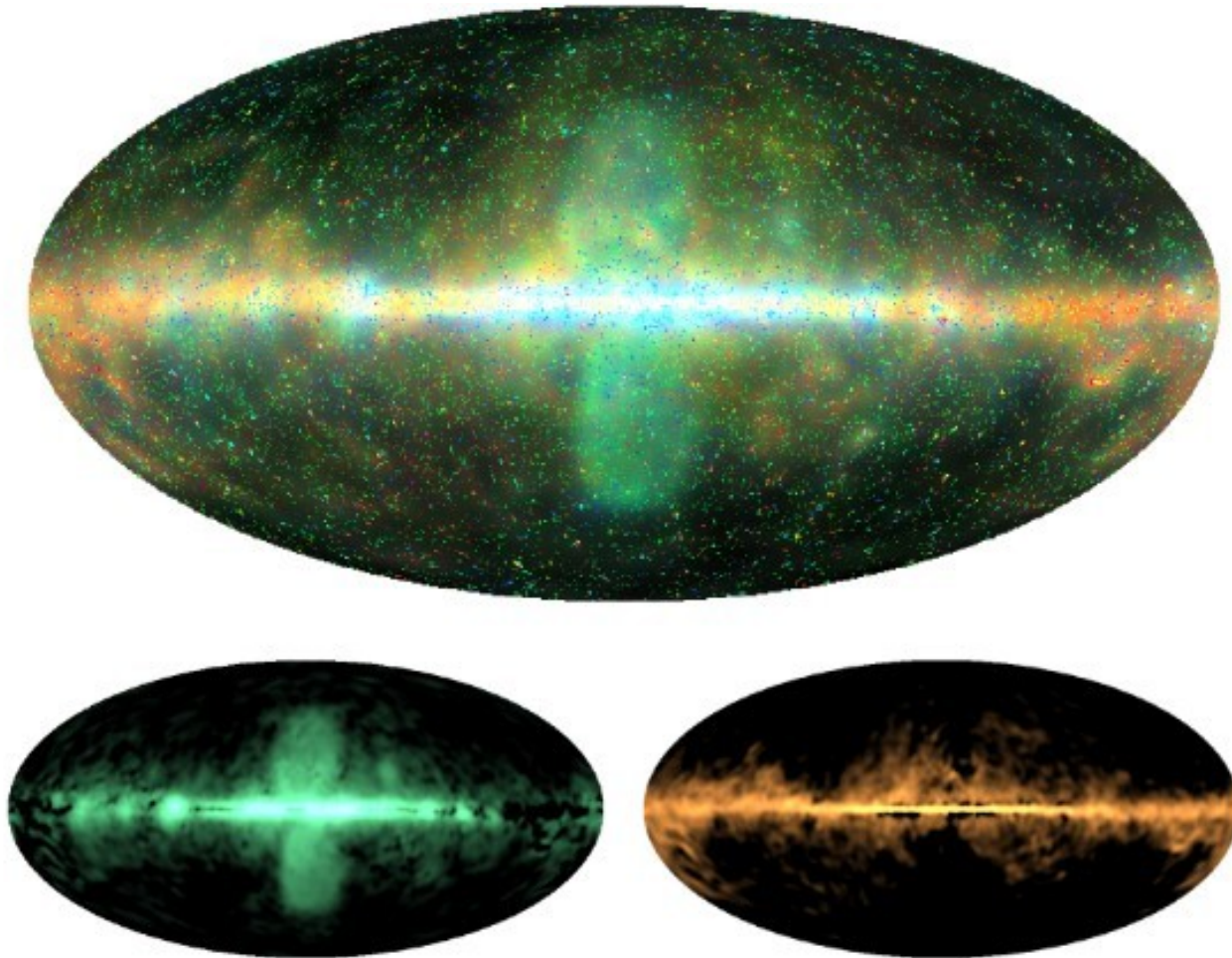
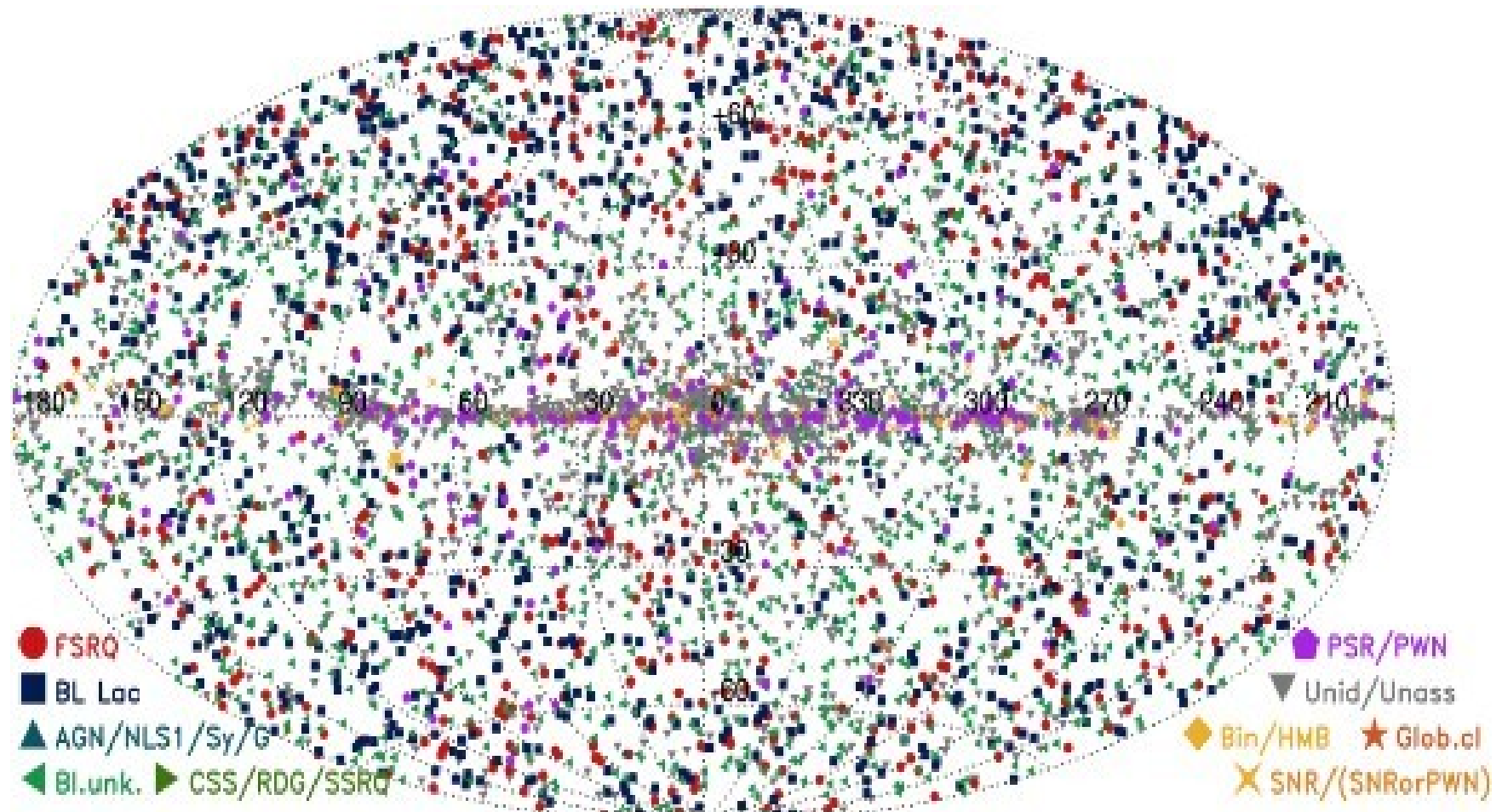
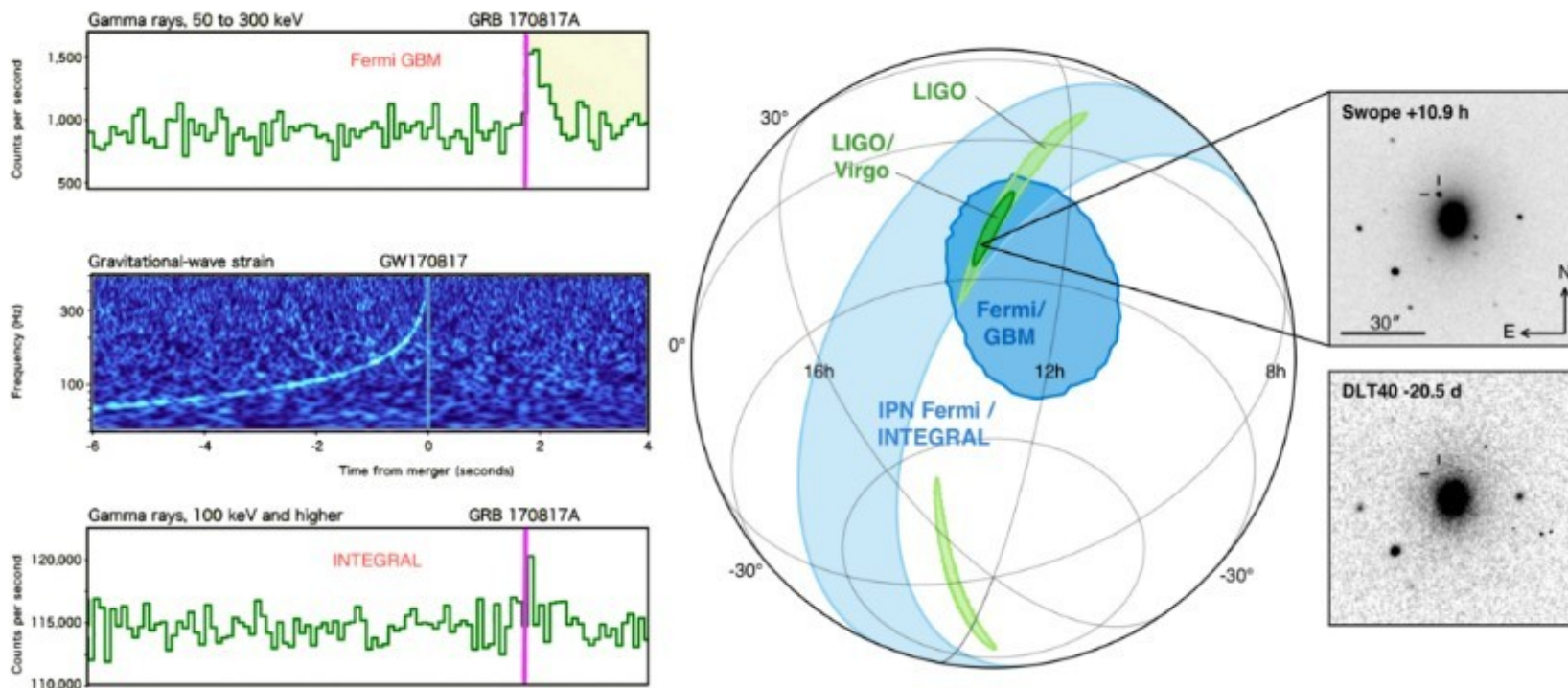


Figure 1: The gamma-ray sky above 600 MeV in galactic coordinates. **Top panel:** Diffuse galactic emission and point sources; **bottom left panel:** Hard component of the galactic diffuse emission; **bottom right panel:** Soft component of the galactic diffuse emission. The images have been de-noised and deconvolved using

Pontforrások a gammaégbolton >600 MeV



Gravitációshullám-forrás gammában



Az emlékezetes, elsőként azonosított gravitációshullám-forrás 2017-ből

Gamma sugarak földi detektálása

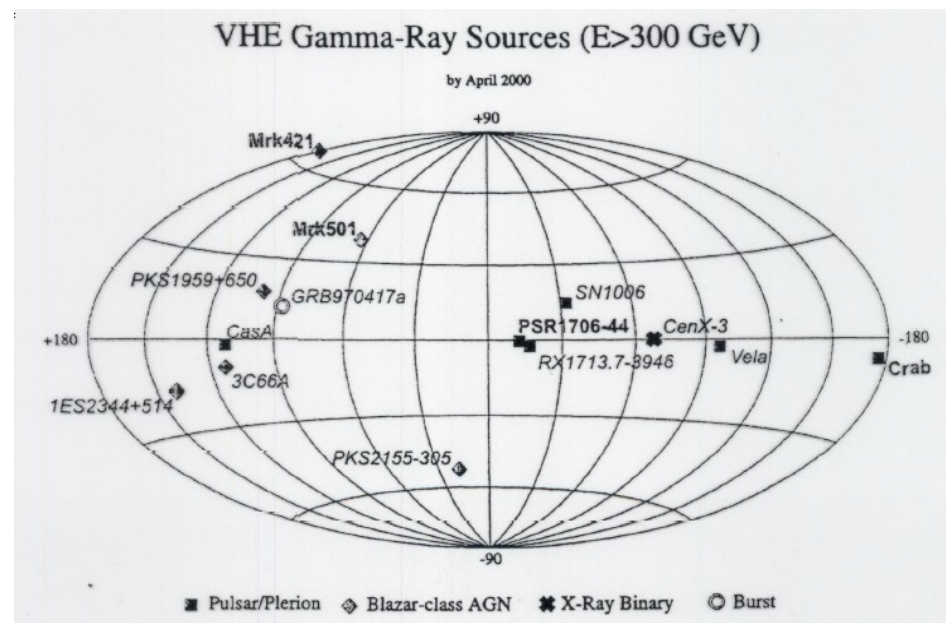
A legnagyobb energiájú gamma sugarakat földi Cserenkov-távcsövekkel észlelik. *Cserenkov-sugárzás*: a közegbeli fénysebességet meghaladó sebesség esetén a molekulák polarizálódnak a gamma sugárzástól, és fényemisszióval jutnak vissza alapállapotba. A haladási irány menti kúpszögét a sebesség és az energia szabja meg. Nagyobb sebességnél csökken a nyílásszög. A detektorral a kúpszögét kell meghatározni.

A kozmikus sugárzás hatására kialakuló légizápor Cserenkov-sugárzása 1 m vastag, 200 m átmérőjű korongként éri el a felszínt.

Tükör + fotomultiplier + gyors impulzusszámláló elektronika kell a detektáláshoz.

A Whipple-teleszkóp (Mt Hopkins, Arizona) 10 m átmérőjű, híres gammatávcső.

Alig kéttucat kozmikus forrást detektáltak eddig a Földről.



Gamma sugarak földi detektálása

A MAGIC rendszer
Cserenkov-távcsövei
a Kanári-szigeteken
(lent).

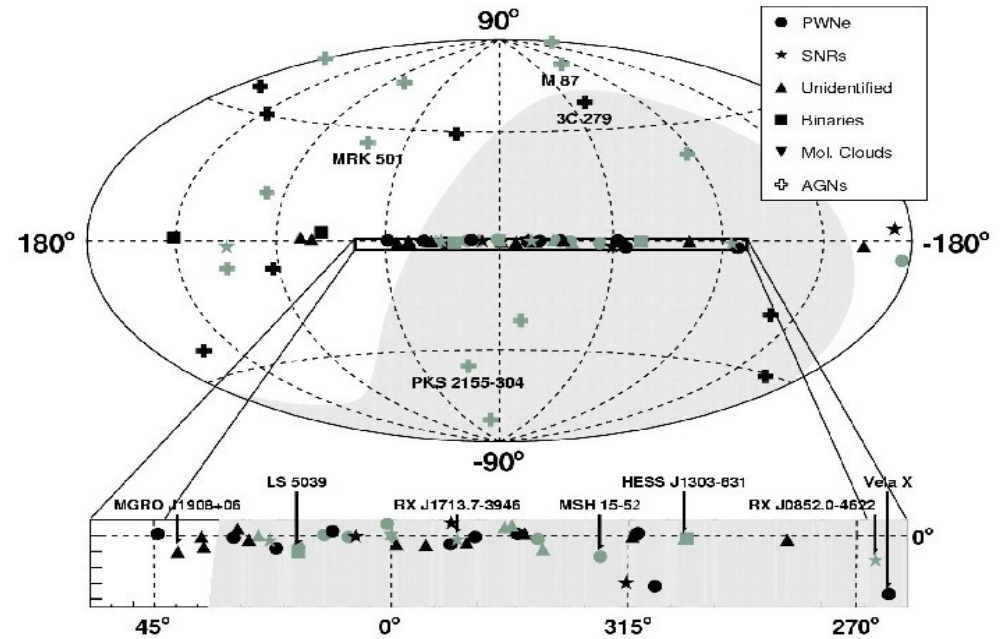


Figure 12: The catalogue of known TeV sources as of the 30th ICRC. The positions of known TeV emitters are shown in galactic coordinates. Darker symbols indicate discoveries since the 29th ICRC in 2005. The shaded region indicates the part of the sky more readily accessible from the southern hemisphere

Tervezett gammaszonda

SVOM (Space Variable Objects Monitor): francia–kínai együttműködésben (2006-ban egyeztek meg). Az indítás tervezett ideje 2021.

900 kg tömegű, 1 m × 1 m × 2 m méretű, 600 km-es LEO-pályára kerül.

3 + 2 éves élettartamot várnak.

Műszerei:

- ECLAIRs: nagy látómezejű teleszkóp GRB-k röntgen- és lágygamma-tartománybeli észlelésére;
- MXT (Microchannel X-ray Telescope): 1 fokos látómező lágyröntgenben (0,2–10 keV) a GRB-k azonosítására;
- GRM (Gamma-Ray burst Monitor): (kínai) keményröntgen + lágygamma (30 keV – 5 MeV);
- VT (Visible Telescope): (kínai) kis látómezejű optikai távcső (400–650 nm, ill. 650–950 nm között).

GRB esetén az ECLAIRs jelzésére a VT automatikusan a kitörés felé fordul.

A projekt része több földi távcső is az optikai utófény azonnali észlelésére:

- GWAC: Ground Wide Angle Cameras
- GFT: Ground Follow-up Telescopes, két 1 m átmérőjű robottávcső, a franciáké Dél-Amerikában, a kínaiaké Kínában.

Tervezett gammaszondák

GAMMA-400 (orosz)

	Fermi-LAT	GAMMA-400
Orbit	Circular, 565 km	Highly elliptical, 500-300000 km (without the Earth's occultation)
Operation mode	Sky-survey (3 hours)	Point observation (up to 100 days)
Source exposition	1/7	1
Energy range	20 MeV - 300 GeV (γ , e)	\sim 20 MeV - 1 TeV (γ) 1 GeV - 10 TeV (e)
Effective area ($E_\gamma > 1$ GeV)	\sim 6500 cm ² (total) \sim 4000 cm ² (front)	\sim 4000 cm ²
Coordinate detectors - readout	Si strips (pitch 0.23 mm) digital	Si strips (pitch 0.08 mm) analog
Angular resolution	\sim 4° ($E_\gamma = 100$ MeV) \sim 0.2° ($E_\gamma = 10$ GeV) \sim 0.1° ($E_\gamma > 100$ GeV)	\sim 2° ($E_\gamma = 100$ MeV) \sim 0.1° ($E_\gamma = 10$ GeV) \sim 0.01° ($E_\gamma > 100$ GeV)
Calorimeter - thickness	CsI(Tl) \sim 8.5 X_0	CsI(Tl) + Si \sim 25 X_0
Energy resolution	\sim 10% ($E_\gamma = 10$ GeV) \sim 10% ($E_\gamma > 100$ GeV)	\sim 3% ($E_\gamma = 10$ GeV) \sim 1% ($E_\gamma > 100$ GeV)
Proton rejection factor	$\sim 10^3$	$\sim 5 \times 10^5$
Mass, kg	2800	4100
Telemetry downlink volume, Gbytes/day	15	100

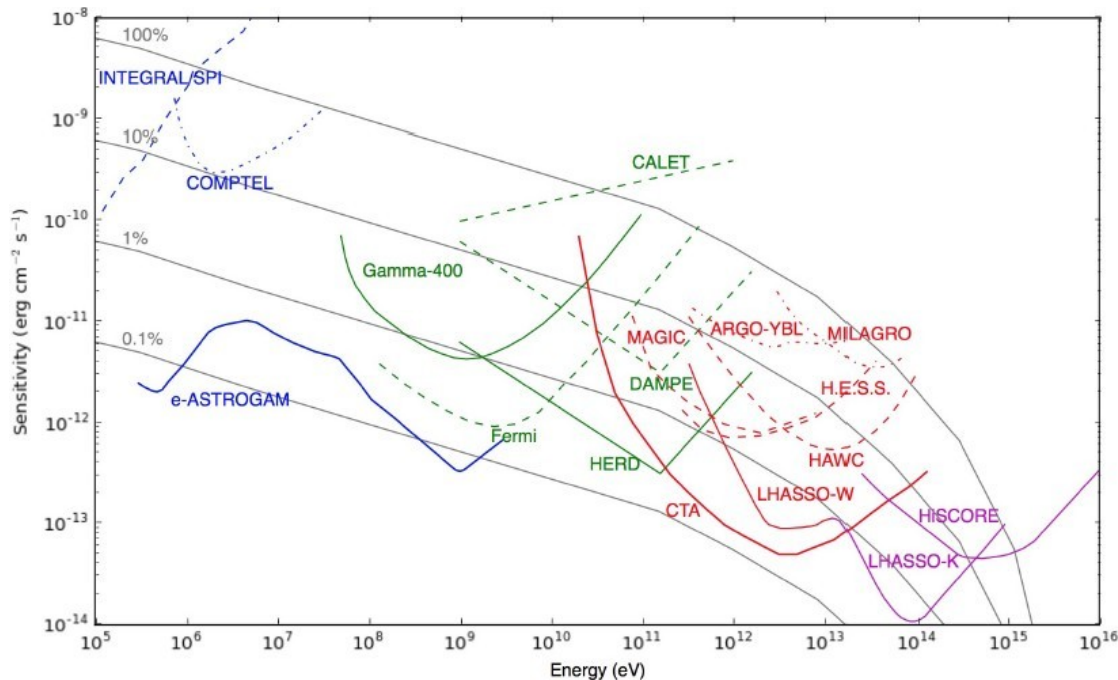
	SPACE-BASED GAMMA-RAY INSTRUMENTS				GROUND-BASED GAMMA-RAY INSTRUMENTS			
	Fermi-LAT	DAMPE	CALET	GAMMA-400	H.E.S.S.	MAGIC	VERITAS	CTA
Particles	γ , e	e, nuclei, γ	e, nuclei, γ	γ , e, nuclei	γ	γ	γ	γ
Operation period	2008-	2015	2015	\sim 2023	2012-	2009-	2007-	\sim 2020
Energy range, GeV	0.02-300	5-10000	10-10000	0.02-10000	> 30	> 50	> 100	> 20
Angular resolution ($E_\gamma > 100$ GeV)	0.1°	0.1°	0.1°	\sim 0.01°	0.07°	0.07° ($E_\gamma = 300$ GeV)	0.1°	0.1° ($E_\gamma = 100$ GeV) 0.03° ($E_\gamma = 10$ TeV)
Energy resolution ($E_\gamma > 100$ GeV)	10%	1.5%	2%	\sim 1%	15%	20% ($E_\gamma = 100$ GeV) 15% ($E_\gamma = 1$ TeV)	15%	20% ($E_\gamma = 100$ GeV) 5% ($E_\gamma = 10$ TeV)

POLAR2: kínai polariméter GRB-k monitorozására, a kínai űrállomáson Kb. 2024-től. (Elődje, a POLAR már működött a Tiangong–2 űrállomáson 2016–2017-ben.)

A **polarimetria** lényeges új eredményekhez vezethet a gammacsillagászatban is.

A (közel)jövő gammaszondái

Parameter	AdEPT	e-ASTROGAM	CALET	DAMPE	GAMMA-400	HARPO	HERD	PANGU
Context	R&D	M5?	ISS	China	Russia	R&D	China	ESA/CAS?
Launch date	-	2029?	launched	launched	~2021	-	>2020	2021?
Energy range (GeV)	0.005–0.2	0.0003–3	0.02–10000	2–10000	0.1–3000	0.003–3	0.1–10000	0.01–5
Ref. energy (GeV)	0.07	0.1	100	100	100	0.1	100	1
$\Delta E/E$	30%	30%	2%	1.5%	1%	10%	1%	30%
A_{eff} (cm ²)	500	1500	t.b.d.	3000	5000	2700	t.b.d.	180
Sensitivity (mCrab)	10	10	1000	100	100	1	10	t.b.d.
Field of view (sr)	t.b.d.	2.5	1.8	2.8	1.2	t.b.d.	t.b.d.	2.2
Angular resolution	1°	1.5°	0.1°	0.1°	0.02°	0.4°	0.1°	0.2°
MDP (10 mCrab)	10%	20%	-	-	-	t.b.d.	-	t.b.d.
Technology	TPC	Si + CsI	fib. + PbWO ₄	Si + BGO	Si + CsI	TPC	Si + LYSO	Si (fib.) + B



A (közel)jövő gammaszondái

TABLE V. e-ASTROGAM line sensitivity (3σ in 10^6 s) compared to that of *INTEGRAL*/SPI[118].

E (keV)	FWHM (keV)	Origin	SPI sensitivity ($\text{ph cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	e-ASTROGAM sensitivity ($\text{ph cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Improvement factor
511	1.3	Narrow line component of the e^+/e^- annihilation radiation from the Galactic center region	5.2×10^{-5}	4.1×10^{-6}	13
847	35	^{56}Co line from thermonuclear SN	2.3×10^{-4}	3.5×10^{-6}	66
1157	15	^{44}Ti line from core-collapse SN remnants	9.6×10^{-5}	3.6×10^{-6}	27
1275	20	^{22}Na line from classical novae of the ONe type	1.1×10^{-4}	3.8×10^{-6}	29
2223	20	Neutron capture line from accreting neutron stars	1.1×10^{-4}	2.1×10^{-6}	52
4438	100	^{12}C line produced by low-energy Galactic cosmic-ray in the interstellar medium	1.1×10^{-4}	1.7×10^{-6}	65

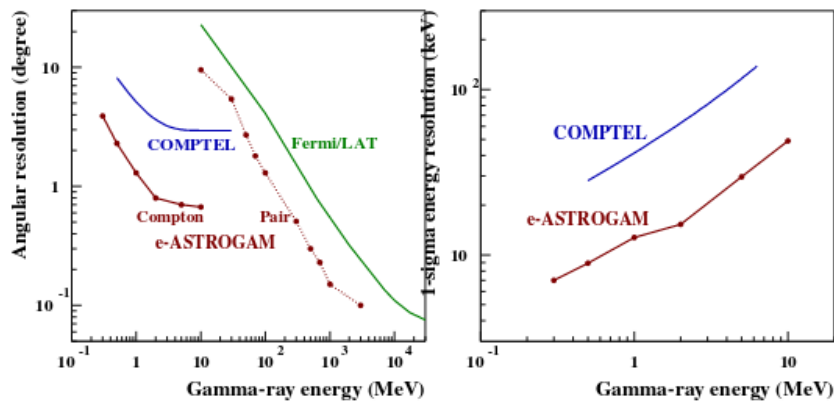


FIG. 19. *Left panel* – e-ASTROGAM on-axis angular resolution compared to that of COMPTEL and *Fermi*/LAT.

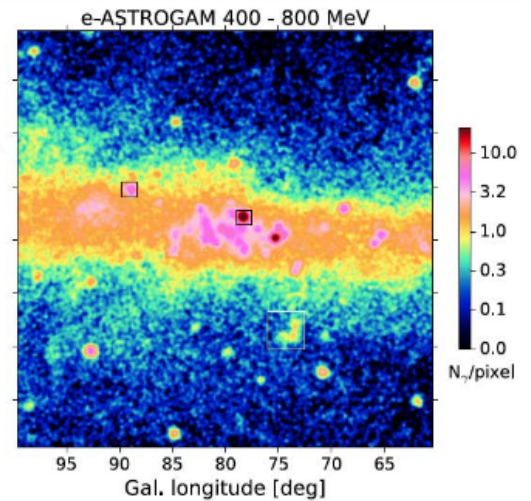
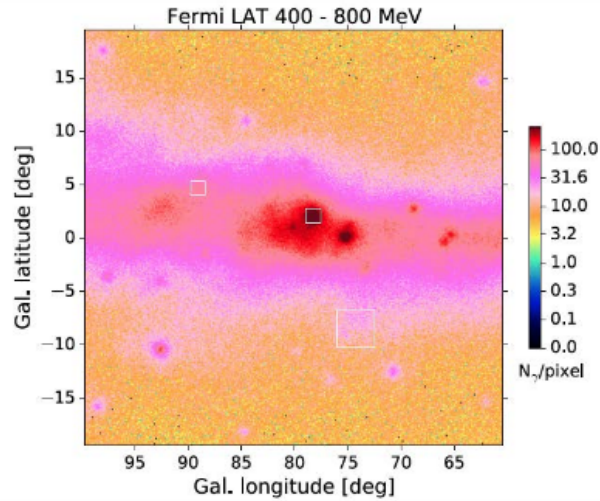
e-ASTROGAM:
enhanced ASTROGAM, az ESA
M5 küldetése, tervezett indítása
2029.

Műszerei:

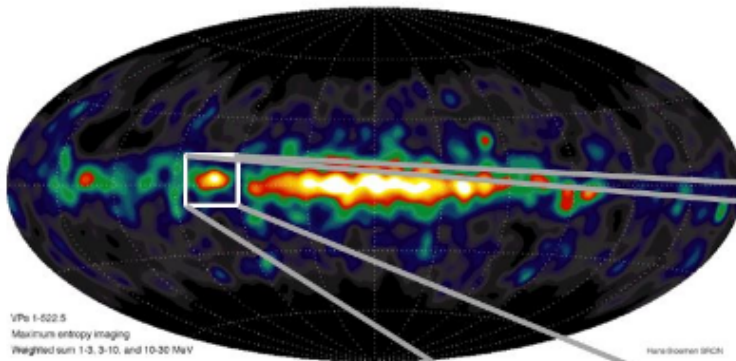
- Követő (Tracker),
- Kaloriméter
- Antikoincidencia-rendszer

A (közel)jövő gammaszondái

Az e-ASTROGAM
összehasonlítása
korábbi
gammadetektorokkal



COMPTEL 1-30 MeV



e-ASTROGAM (1-30 MeV)

