

A gammakitörések eredetének és mechanizmusának megfejtéséhez elengedhetetlen a kitörések forrásainak megtalálása. Az első próbálkozás a kitörések helyének meghatározására a bolygóközi hálózat volt. A második kísérlet pedig a BATSE nyolc detektorának felhasználásával történt, de ez sem hozott eredményt. A gammakitörések optikai utófényeit végül a Beppo-SAX műhold azonosította.

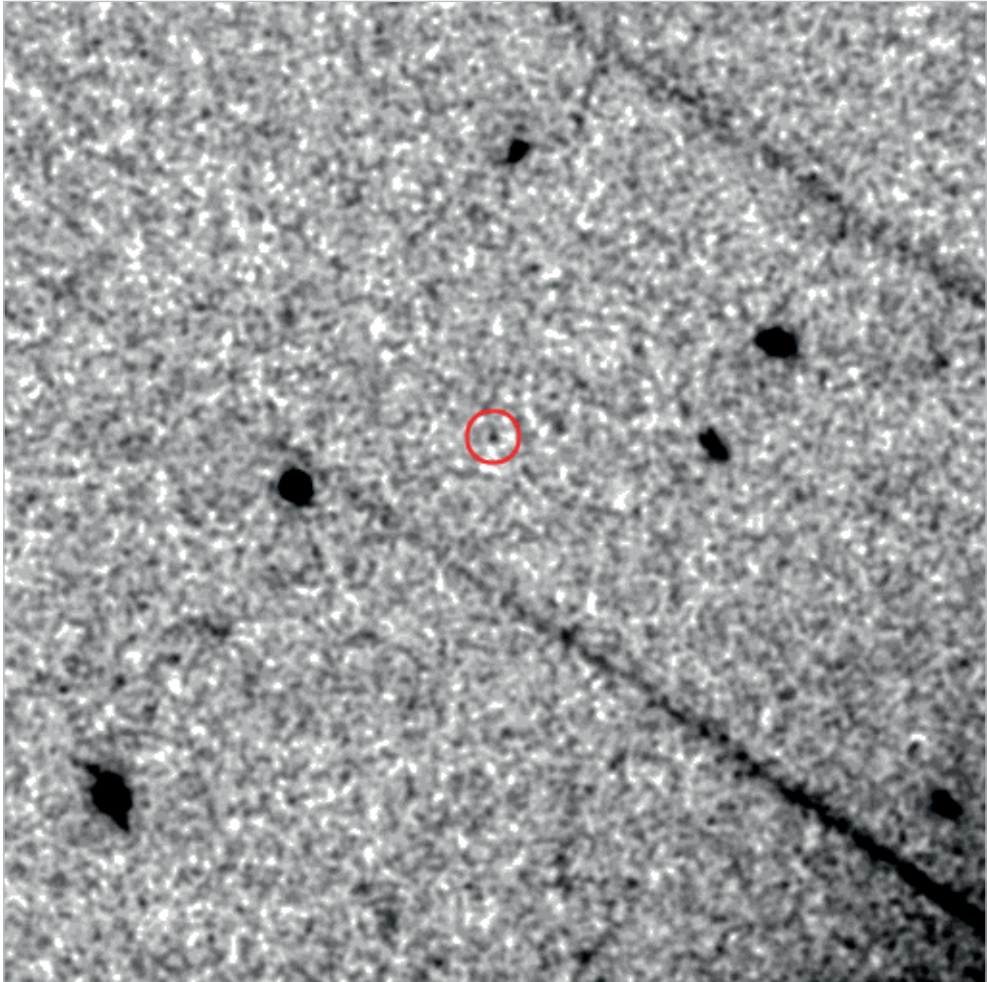
Kulcsszavak: csillagászat, gammakitörések, kutató műholdak

A források keresése

A gammakitörések eredetének és mechanizmusának megfejtéséhez elengedhetetlen volt a kitörések forrásainak megtalálása. Az első próbálkozás a kitörések helyének meghatározására a bolygóközi hálózat lokalizációja volt. [2] A helyet sikerült viszonylag pontosan meghatározni, de sajnos csak napok múlva tudták távcsövekkel is megvizsgálni a kérdéses területet. Ma már tudjuk, hogy ennyi idő alatt egy tipikus gammakitörés-utófény nagyon elhalványodik.

A második kísérlet a BATSE nyolc detektorának felhasználásával történt. 3-4 triggerelt detektor esetén a hozzávetőleges irány meghatározható. [13] Ismerjük a detektorok megfigyeléseinek intenzitásarányait, és ezt a detektorok érzékenységének szögfüggésével kombinálva a forrás égi pozíciója kiszámítható. Sajnos a rendszer 1,6 fokos szisztematikus hibával volt terhelt, amihez hozzáadódott az intenzitástól függő statisztikus hiba. Ez utóbbi nagyon erős kitörések esetén kb. egy fok volt, erős kitöréseknél 3–5 fokos, de a halványaknál meghaladhatta a 20 fokot is. [12] Az adatok továbbítása órákat vett igénybe, tehát a legjobb esetben is csak egy napon belül lehetett földi megfigyelést végezni.

A tipikus források viszont napok alatt 20 magnitúdónál halványabbá válnak. Mivel a második elgondolás sem segített a kitörések forrásait megtalálni, a probléma kezdett egyre érthetlenebbé és éppen ezért egyre érdekesebbé válni. A nagyon nagy távcsövek megfigyelési ideje már nem volt elérhetetlen. Most már csak egy műszerre volt szükség, amely nagyon gyorsan (órák alatt) pontos koordinátát szolgáltat.



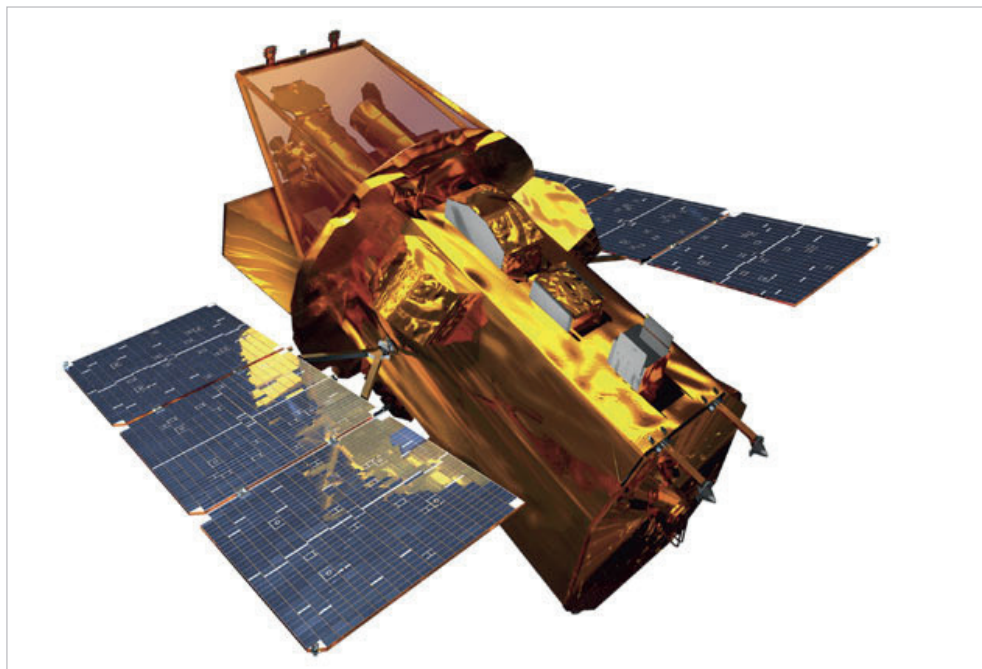
1. ábra: Egy gammakitörés utófénye ([6] alapján)

Az amerikai kutatók legnagyobb bánatára, a tragikus 1996-os évben (sikertelen volt a Cluster és az orosz Mars szonda fellövése is), a fellövés után elvesztették a HETE űrszondát. A HETE II-t csak 2000-ben bocsátották fel, így a holland–olasz Beppo-SAX műholdé lett a felfedezés dicsősége. 1997-ben sikerült a gammakitörések röntgensugárzásának forrását néhány ívperc pontossággal meghatározni. [6] Az első esetben 8 órával a kitörés után.

Az első három azonosított forrás is nagyon messze volt Földünkől (a vöröseltolódásuk $[z]$ 0,5 és 1 közé esett), de a negyedik azonosított forrás már túl volt az ismert világegyetem felén ($z = 3,42$). [8] [9] Az 1. ábrán mutatott forrás az ötödikként azonosított GRB980326 utófénye a látható tartományban.

További források keresése: a Swift műhold

A következő mérföldkő a gammakitörések kutatásában a Swift műhold (lásd a 2. ábrát) 2004. november 20-i fellövése volt. A műholdat kifejezetten arra a célra tervezték, hogy gyorsan ráfordulva a kitörés irányára (a gyorsaságra utal a neve is, ami „fecskét” jelent), röntgen-, majd optikai tartományban is mérve a sugárzást, pontos iránykoordinátákat szolgáltatson. [7] A műhold meg is felelt a várakozásoknak, hiszen egy percen belül a Földre tudta küldeni a megfigyelési adatokat. A gammakitörések távolságadatainak több mint kétharmadát a Swiftnek köszönhetjük. [16] [9]



2. ábra: A Swift műhold (forrás: NASA)

A Swift műhold főműszereit a következőkben ismertetjük.

- BAT (Burst Alert Telescope): a műszer gammatartományban érzékeny, a 32 768 darab $4 \times 4 \times 2$ mm-es CdZnTe detektorból álló műszer felülete $1,2 \times 0,6$ méterre terjed ki. [7] A detektor előtt egy méterre egy D alakú, 54 ezer elemből álló kódolt maszk helyezkedik el. Az 54 ezer elem fele fedett (nem engedi át a 15 és 150 keV közötti energiájú fotonokat), fele üres, melyek véletlenszerűen helyezkednek el. A maszk teljes felülete 2,7 négyzetméter. A maszk detektorra vetett árnyékával érik el, hogy a félig kódolt látómező $100^\circ \times 60^\circ$, azaz 1,4 szteradián legyen. A fe-

délzeti program néhány másodpercnyi adatból közel ívperc pontossággal adja meg a forrás égi koordinátáit.

- UVOT (Ultra-Violet and Optical Telescope): ha a fedélzeti program egy jelenség követéséről dönt, akkor a Swift műhold „ráfordul” a forrásra, és az ultraibolya távcsővel is megfigyeli azt. Az UVOT egy 30 cm átmérőjű Ritchey-Chrétien típusú, két detektorral is felszerelt távcső. A 256×256 pixeles detektorok $17' \times 17'$ látómezővel bírnak. A hat különböző szűrővel a 170–600 nm-es tartományt képes vizsgálni. A pozíciót ívmásodperc pontossággal tudja meghatározni.
- Az XRT (X-ray Telescope) egy súrolótükrös röntgentávcső, mely 110 cm^2 effektív felülettel és 23 ívperces látómezővel rendelkezik. A megfigyelt energiatarományban (0,2–10 keV) 18 ívmásodperces felbontást tud elérni. Működési hőmérséklete, csakúgy, mint az UVOT-nak, $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

A Swift műhold másik fő célja a rövid kitörések forrásainak megtalálása volt, ugyanis az 1997 és 2003 között megmért néhány tucat gammakitörés mind a hosszú kitörésekhez tartozott. Mind osztályozási, mind elméleti kutatási szempontból fontos megvizsgálni, hogy a két kitöréstípus azonos távolságra van-e, illetve hasonló források bocsátják-e ki őket.

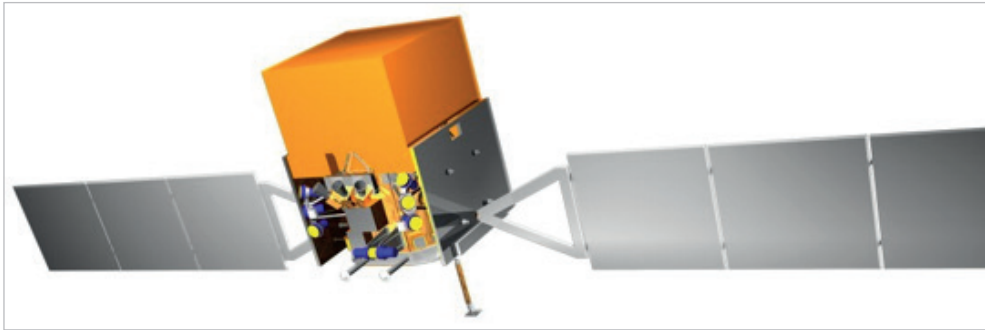
A Swift e témában is kiválóan vizsgázott. Megtalálta a rövid kitörések forrásait. [3] Kiderült, hogy tipikusan közelebb vannak hozzánk, mint a hosszú kitörések. [4] Az anyagalaxisaikban is sokkal kisebb a csillagkeletkezési ráta. [11]

Érdemes még megemlíteni, hogy a Swift által mért vöröseltolódások átlaga ($z = 2,6$) jelentősen eltér a más műholdak által mért vöröseltolódások átlagától ($z = 1,2$). [4]

A Fermi űrtávcső

A 2008-as év nagy áttörést hozott a nagyenergiás fizikában, földön és égen egyaránt. A CERN huszonnégy kilométer kerületű köralagútjában beindult (aztán sajnos gyorsan le is állt) a valaha épített legnagyobb részecskegyorsító, a Nagy Hadronütköztető (LHC, azaz Large Hadron Collider), és Föld körüli pályára állt a szintén nemzetközi együttműködésben megépült GLAST kutatóműhold (3. ábra), amellyel olyan nagy energián nézhetünk körül a világegyetemben, amire eddig nem volt lehetőségünk. [14] A rövidítés a Gamma-ray Large Area Space Telescope (Nagylátóterű Gamma Űrtávcső) nevet takarja, ami néhány hónappal a fellövés után megváltozott, ugyanis a küldetést irányító NASA pályázatot írt ki egy, a széles közönség által is jobban megjegyezhető névre. A műhold neve azóta Fermi. Lehet, hogy az eredeti elnevezés piaci szempontból nem a legszerencsésebb, viszont kellőképpen beszédes. A GLAST egyszerre az égbolt igen nagy hányadáról képes

összegyűjteni a felé tartó, nagyon nagy energiájú gammafotonokat, keményebbeket, mint amilyeneket eddig észlelhettünk.



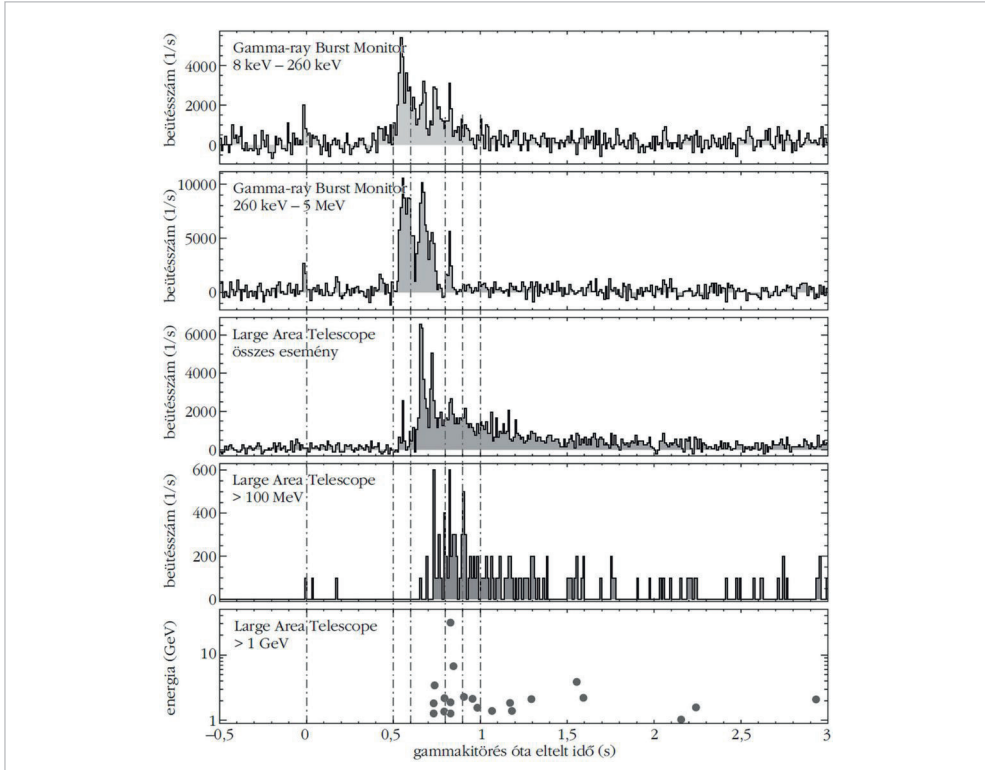
3. ábra: A Fermi (eredeti nevén GLAST) műhold (forrás: NASA)

Az amerikai, francia, japán, német, olasz és svéd költségvetésből elkészült GLAST űr-obszervatórium újabb lendületet adott a nagyenergiás asztrofizikának, amely terület az utóbbi évtizedben – megfelelő műszer híján – kevés új felfedezéssel szolgált. A GLAST nemcsak pótolja elődjét, de felül is múlja annak képességeit. Két műszere közül a Large Area Telescope (LAT) az, amelytől nagyon sokat vártak. Mérési tartományának felső határa 300 GeV fölött van, és az égboltnak egyszerre igen jelentős részét, nagyjából az egyötödét tudja megfigyelés alatt tartani. Ez utóbbi azért rendkívül fontos, mert a pontos méréshez sok detektált fotonra van szükség, ami halvány, de folyamatosan emittáló források esetében évekig tartó megfigyelést is igényelhet. Kiegészítő műszere a Fermi Gamma-ray Burst Monitor (előző megnevezése: GLAST Burst Monitor, GBM) detektorrendszere, amely főként a gammakitörések megfigyelésében jut fontos szerephez.

A LAT mindenben felülmúlja egy évtizeddel korábban, hasonló céllal készült elődjét, a CGRO Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET) műszerét. [1] Jóval halványabb forrásokat is képes azonosítani, és egy teljes nagyságrenddel magasabb energiahatárig tud mérni, akár 300 GeV feletti fotonokat is detektál (az észlelés alsó határa 20 MeV). A két foton detektálása közötti holtidő 100 mikroszekundum, ez ezerszer kisebb, mint az EGRET-é volt, és képessé teszi arra, hogy gyorsan változó jelenségek emisszióját is nagy pontossággal megmérje. [15]

A Fermivel végzett egyik legérdekesebb kísérlet a Lorentz-invariancia érvényességének ellenőrzése volt. Bizonyos kvantumgravitációs elméletek szerint a Lorentz-invariancia sérülhet, és azt jóslják, hogy a fotonok sebessége függ az energiájuktól. E függés következtében két különböző energiájú foton, amely egyébként egyszerre indult el egy távoli forrásból, nem ugyanabban az időben érkezik a Földre. Az effektus nagysága függ az úgynevezett kvantumgravitációs tömegtől (quantum-gravity mass, MQG), attól a paramétertől, amely meghatározza azt az energiatartományt, amelyben a kvantumgra-

vitációs effektusok a Lorentz-invariancia jelentős sérülését okozzák. Úgy gondolják, hogy nagysága a Planck-tömeg környékén van (ami kb. 10^{19} GeV/c²), és nagyon valószínű, hogy annál kisebb.



4. ábra: A GRB090510 gammakitörés fénygörbéje különböző energiasávokban a Fermi műhold adatai szerint. A nagyobb energiájú fotonok bizonyos időkésséssel érkeznek ([5] alapján)

A fény sebességének akár a legkisebb energiafüggése is kimutatható kozmológiai távolságokon, [10] ahol a hatás az út során összegződik, és például a gammakitörések fénygörbéjében megfelelő időfelbontás esetén mérhetővé válhat. A LAT- és GBM-műszerekkel észlelt, GRB090510 jelű kitörés segítségével az eddigieknél sokkal pontosabb korlátot sikerült adni a fénysebesség fotonenergiától való függésére.

A GRB090510, illetve GRB080916c jelű kitörésekről a GBM-, valamint LAT-műszerekkel kapott széles sávú (8 keV-től 300 GeV-ig) mérések (4. ábra) segítségével alsó korlátot kaptak az MQG értékére, amely nagyobbak adódott, mint a Planck-tömeg. A Planck-tömegnél nagyobb MQG-érték segítségével ki lehetett zárni az ennél kisebb értéket jósoló elméleteket.

A GLAST másik műszere, a GBM a NASA Marshall Space Flight Center (MSFC) kutatóközpontjában épült meg. A kísérlet vezetői Charles Meegan és Jochen Greiner. [14] A gammakitörések vizsgálatára készült GBM tizennégy darab szcintillációs detektorból áll, amelyek mérési tartománya 8 keV és 25 MeV közé esik. Ezeket úgy helyezték el a műhold oldalain, hogy együttes látóterük teljesen lefedje az égboltnak azt a részét, amelyet a Föld éppen nem árnyékol le. Az elrendezés további sajátossága, hogy bármely irányból érkező felvillanást egyszerre legalább négy detektor is észlel. Ez lehetővé teszi, hogy a detektorokban mért intenzitásokból rövid idő alatt nagy pontossággal meghatározzuk a hirtelen felvillanó gammakitörések helyzetét. A tizenkét nátrium-jodid (NaI) detektor és a két darab, nagyobb energiatarományban megbízhatóbb bizmut-germanát (BGO) szcintillátor igen jó időbeli és energia szerinti felbontással szolgál a megfigyelt kitörések lefolyásáról.

A GBM hasonló funkciót tölt be a GLAST fedélzetén, mint az egy évtizeddel korábbi elődje, a CGRO Burst and Transient Source Experiment (BATSE) műszere, amelynek máig a legnagyobb összefüggő gammakitörés-adatbázist köszönhetjük. A két műszer közötti különbség leginkább abban nyilvánul meg, hogy a GBM hamarabb és pontosabban tudja meghatározni a kitörések irányát, mint a BATSE, így jelzésére a LAT és más egyéb távcsövek hamarabb tudnak az adott irányba fordulni.

A gammacsillagászat fontosságát mutatja, hogy jelenleg igen sok további műhold figyeli ezt a tartományt.

Az Olasz Űrügynökség műholdja az AGILE (Astro-Rivelatore Gamma a Immagini Leggero), mely a galaktikus gammaforrásokon kívül az aktív galaxismagokat és a gammakitöréseket figyeli meg.

Az Európai Űrügynökség (European Space Agency) gammaműholdja az INTEGRAL (INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory), melyet 2002-ben bocsátottak fel. Három fő műszere van: az OMC (Optical Monitor) optikai tartományban, a JEM-X röntgentartományban (3–35 keV), míg a főműszer gammatartományban (15 keV – 10 MeV) végez megfigyeléseket.

Röntgenben figyeli meg a világegyetemet a japán Suzaku (eredeti nevén ASTRO-EII) és az európai (ESA) XMM-Newton vagy más néven X-ray Multi-Mirror Mission.

A földfelszínen megfigyelhetjük a nagyon nagy energiás fotonok légkörbe csapódását (pl. részecskezéporok vagy Cserenkov-sugárzás formájában). Ilyen megfigyeléseket végez a STACEE (Solar Tower Atmospheric Cherenkov Effect Experiment) Albuquerque közepében, a MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescopes) a Kanári-szigeteken, a CACTUS (Converted Atmospheric Cherenkov Telescope Using Solar-2) Kaliforniában és a VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) Arizonában.

Irodalomjegyzék

- [1] Atwood, W. B. et al.: The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission. *The Astrophysical Journal*, Vol. 697, Issue 2, 2009, 1071–1102.
- [2] Atteia, J.-L. et al.: A Second Catalog of Gamma-Ray Bursts: 1978–1980. Localizations from the Interplanetary Network. *The Astrophysical Journal*, Vol. 64, 1987, 305–382.
- [3] Berger, E. et al.: The afterglow and elliptical host galaxy of the short γ -ray burst GRB 050724. *Nature*, Vol. 438, Issue 7070, 2005, 988–990.
- [4] Bagoly Z. et al.: The Swift satellite and redshifts of long gamma-ray bursts. *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 453, Issue 3, 2006, 797–800.
- [5] Balázs L. G. – Horváth I. – Kelemen J.: Gammakitörések. *Fizikai Szemle*, 2011/11, 371–377.
- [6] Costa, E. et al.: Discovery of an X-ray afterglow associated with the γ -ray burst of 28 February 1997. *Nature*, Vol. 387, Issue 6635, 1997, 783–785.
- [7] Gehrels, N. et al.: The Swift Gamma-Ray Burst Mission. *The Astrophysical Journal*, Vol. 611, Issue 2, 2004, 1005–1020.
- [8] Greiner, J.: *Localized GRBs*. www.mpe.mpg.de/~jcg/grbgen.html
- [9] Greiner, J.: Discoveries enabled by multi-wavelength afterglow observations of gamma-ray bursts. In: Kouveliotou, C. – Wijers, R. A. M. J. – Woosley, S. (eds.): *Gamma-Ray Bursts*. Cambridge University Press, Cambridge, 2012, 169–190.
- [10] Holba, A., et al.: Once more on quasar periodicities. *Astrophysics and Space Science*, Vol. 222, 1994, 65–83.
- [11] Horváth I. – Hakkila, J. – Bagoly Z.: Possible structure in the GRB sky distribution at redshift two. *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 561, Paper L12, 2014, 4.
- [12] Koshut, T. M. et al.: Systematic effects on Duration Measurements of Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, Vol. 463, 1996, 570–592.
- [13] Meegan, C. A. et al.: The Third BATSE Gamma-ray Burst Catalog. *The Astrophysical Journal Supplement*, Vol. 106, 1996, 65–110.
- [14] Meegan, C. A. et al.: The Fermi Gamma-ray Burst Monitor. *The Astrophysical Journal*, Vol. 702, Issue 1, 2009, 791–804.
- [15] Mészáros P.: Gamma Ray Bursts. *Astropart. Phys.*, Vol. 43, 2013, 134–141.
- [16] de Ugarte Postigo, A. et al.: Searching for differences in Swift’s intermediate GRBs. *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 525, 2011, A109.

The Afterglow of Gamma-Ray Bursts

ISTVÁN HORVÁTH

The finding of the source of gamma-ray bursts is essential to unravelling the mechanism and origin of these phenomena. The first attempt to determine the location of the bursts was the interplanetary network. The second attempt was the eight detectors of the BATSE, but they still brought no results. The gamma-ray bursts optical afterglow was finally identified by the Beppo-SAX satellite.

Keywords: astrophysics, gamma-ray bursts, scientific satellites