

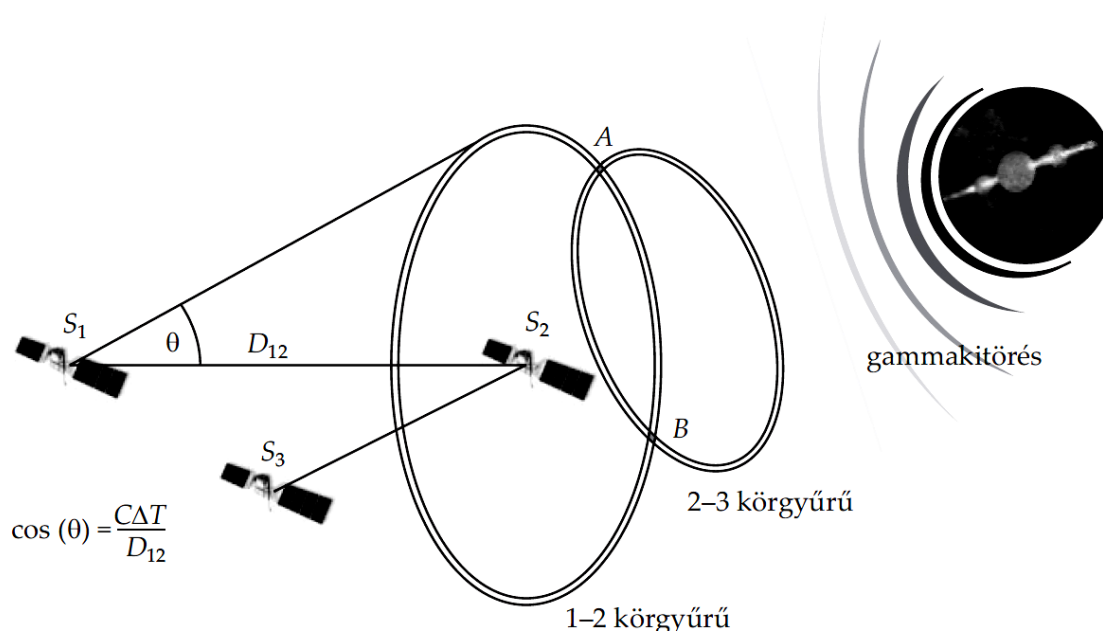
Horváth István az MTA Doktora cím elnyeréséhez benyújtott Gammakitörések című értekezésével kapcsolatos kérdéseire

1. Csörgő Tamás első kérdése:

Kérem, hogy ismertesse röviden, lehetőleg a nem szakmai közönség számára is jól érthetően a gamma-kitörések iránymeghatározásának 1.2.1 ábrán illusztrált módszerét, a változók pontos meghatározásával.

Válaszom:

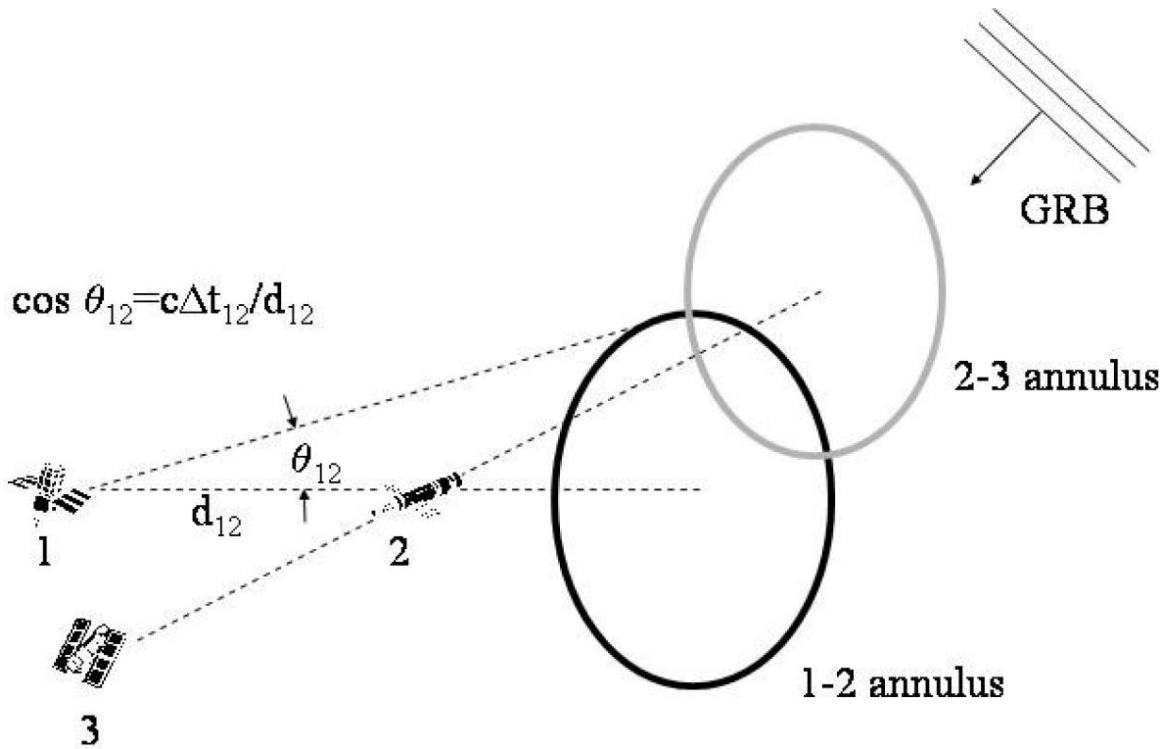
Az 1. ábra mutatja dolgozatom 1.2.1 ábráját a háromszögeléses iránymeghatározással kapcsolatban.



1. ábra. Dolgozatom 1.2.1. ábrája a háromszögeléses iránymeghatározás illusztrálására.

Mint azt dolgozatomban is írtam, a helymeghatározás egy detektor esetén nem lehetséges, mivel a műszerek csak a fotonok beérkezését rögzítik. Az irányérzékenység lényegében egy koszinusz függvény. A háromszögelés módszerét a Nobel-díjas röntgencsillagász Giacconi vetette fel 1972-ben ([Giacconi, R., 1972]). Giacconi eredetileg röntgen források pontos helymeghatározására dolgozta ki különböző műholdak/műbolygók által megfigyelt (gyorsan változó) jelenségek égi pozíciójának a meghatározását, két vagy több műszer jelei közti időeltérésből. Giacconi eredeti elgondolását röntgen források esetén először csak 2003-ban sikerült alkalmazni (konkrétan a Cygnus X-1-re [Golenetskii, S. et al., 2003]). Gammaforrások és gammakitörések esetében azonban az 1970-es évektől folyamatosan alkalmazzák napjainkig.

A módszert a bolygóközi hálózati (Inter Planetary Network, IPN) helymeghatározásokon évtizedekig dolgozó Kevin Hurley egyik cikke alapján ismertetem ([Hurley, K., 2010]). Síkhullám halad át a Naprendszeren, melyet több műhold illetve műbolygó is megfigyel (2. ábra).



2. ábra. A 13.1 ábra Kevin Hurley dolgozatából ([Hurley, K., 2010]) a háromszögeléses iránymeghatározással kapcsolatban.

Három műbolygó esetén ismernünk kell ezek térbeli helyzetét (koordinátáit), a síkhullám áthaladásakor. Jelölje ezeket a pontokat a térben P1, P2 és P3 (az ábrán 1, 2 és 3). Megfigyeljük a beérkezési időket, melyeket jelöljön t_1 , t_2 és t_3 . Legyen $\Delta t_{12} = t_1 - t_2$, valamint $\Delta t_{32} = t_3 - t_2$. Feltételezzük, hogy a síkhullám fénysebességgel halad. Jelölje d_{12} a P1 és P2 pontok távolságát, d_{32} pedig a P3 és P2 pontok távolságát. Ekkor a következőt tudjuk a síkhullám haladási irányáról mondani (pontosabban az ezzel ellentétes irányú beérkezési irányról). A

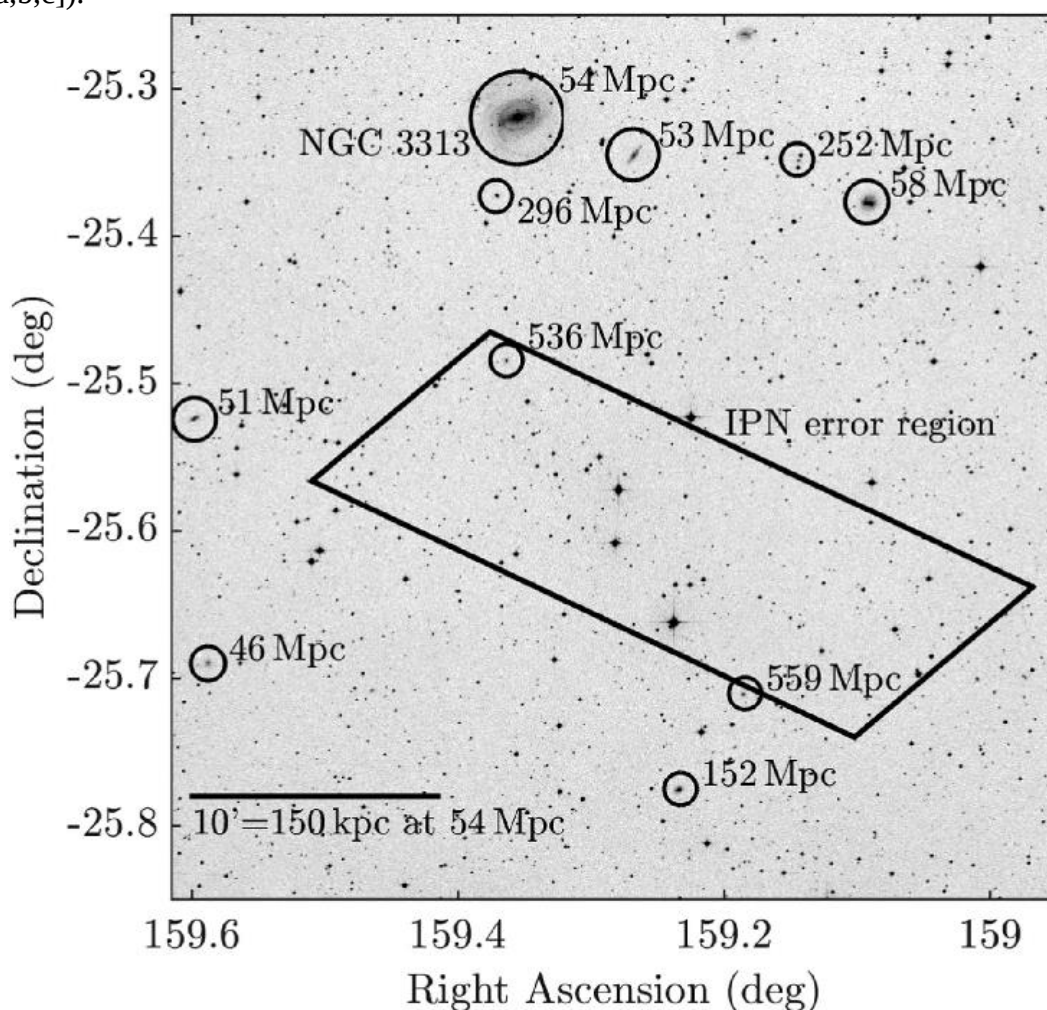
$$\cos \theta_{12} = \frac{c \Delta t_{12}}{d_{12}}$$

egyenlettel meghatározott θ_{12} szög jelenti azt a szöget, amit a beérkező síkhullám érkezési iránya bezár a P1 és P2 pontok által meghatározott egyenes irányával. Hasonlóan, a következő egyenletben szereplő θ_{32} szög jelenti azt a szöget, amit a beérkező síkhullám érkezési iránya bezár a P3 és P2 pontok által meghatározott egyenes irányával

$$\cos \theta_{32} = \frac{c \Delta t_{32}}{d_{32}}$$

Ezek az éggömbön két kört határoznak meg. Az egyik kör középpontja a P1 pontból a P2 felé mutató félegyenes által kijelölt pont, a sugara pedig θ_{12} (az éggömbön a távolságokat szögekben mérjük). A másik kör középpontja a P3 pontból a P2 felé mutató félegyenes által kijelölt pont, a sugara pedig θ_{32} . A két kör metszéspontja határozza meg az égen a forrás helyét. A mérési pontatlanság miatt két kör helyett két körgyűrű az eredmény. (A körök/körgyűrűknek két metszéspontjuk van. Ezek egyike a forrás helye. A kettő közül egy negyedik űrszonda adataival vagy más módszerrel kell választani. Például, ha az egyik szonda bolygó közelében van, akkor a bolygó takarhatja az egyik metszéspontot.) Két ilyen körgyűrű metszetét mutatja a 3. ábra a GRB150906B gammakitörés esetében.

Sajnálatos, hogy gammakitörések esetén ez a háromszögelési eljárás nem vezetett el az optikai utófények felfedezéséhez (az első gammakitörés utófény azonosítását mint dolgozatomban is írom a BeppoSax műhold végezte el [Costa, E., et al., 1997]). Más gammaforrások esetén azonban sikeres volt. Például az SGR0525-66 óriáskitörése alapján tudták megállapítani, hogy ennek forrása a Nagy Magellán-felhő N49 területén található ([Cline, T., et al., 1980], [Evans, W. D., et al., 1980]). Majd sikerült felfedezni egy új lágy gamma ismétlőt ([Atteia, J-L., et al., 1987]), valamint meghatározták a többi lágy gamma ismétlő helyzetét is ([Cline, T., et al., 1980], [Evans, W. D., et al., 1980], [Hurley, K., et al., 1999a,b,c]).



3. ábra. Az IPN helymeghatározás eredménye a GRB150906B gammakitörés esetén ([Ligo, Virgo and IPN collaborations, 2017]).

Az említett cikkében Hurley megfogalmazza a sikeresség követelményeit gammakitörések esetére.

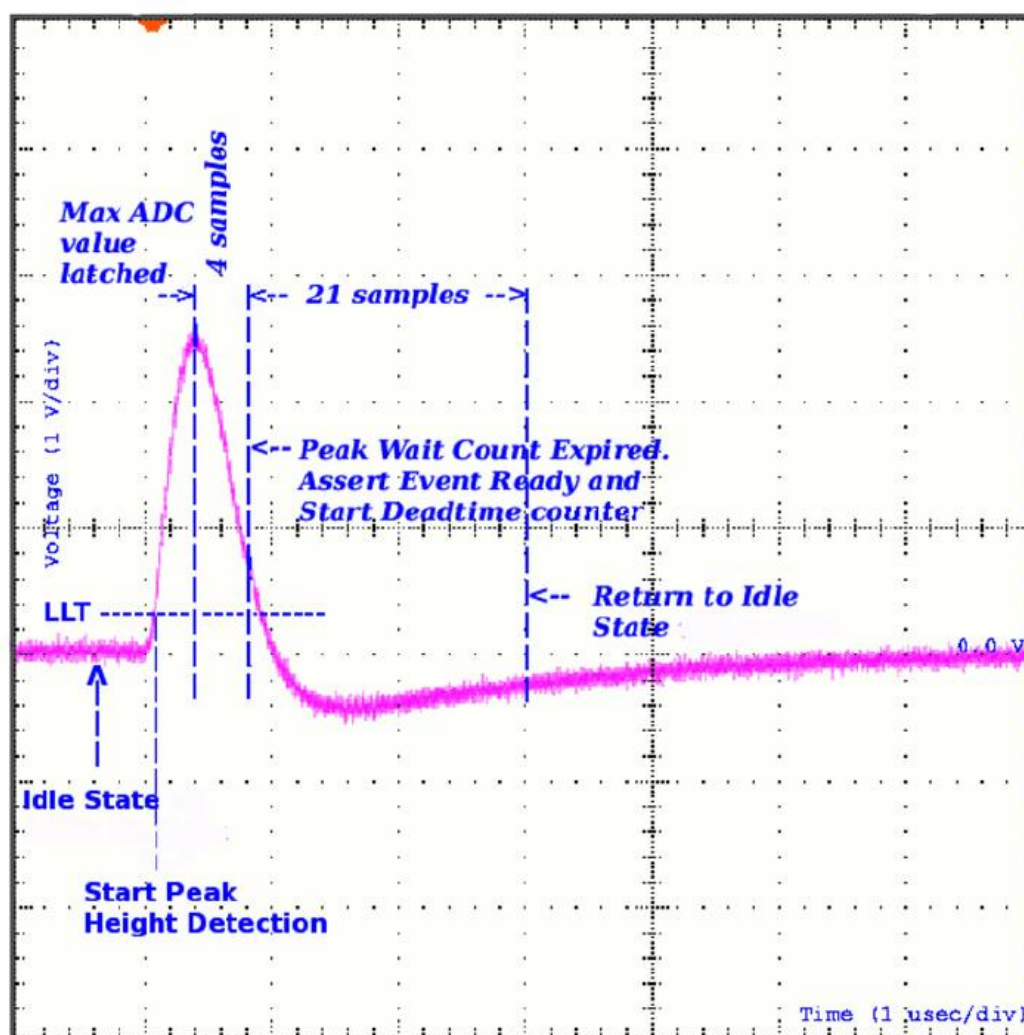
- a szögperces felbontáshoz műbolygók szükségesek minimálisan 100 millió km távolságban egymástól.
- az űrszondákon lévő detektoroknak nem kell azonosnak lenniük, de szükséges, hogy a 25-100 keV tartomány legalább egy részét lefedje az érzékenységük, ugyanis az időbeli lefolyása a gammakitöréseknek általában lényegesen különbözik 25 keV alatt és 100 keV felett.
- az időbeli lefolyás befolyásolja az eredményt, hiszen a detektorok méréseinek a keresztkorrelációjából számolják az időeltérést.

2. Csörgő Tamás második kérdése:

A 19. oldalon említi a szerző a Fermi műhold gammasugarakat észlelő GBM aldetektorát, és a 3.4.3 ábrán mutatott elektromágneses kalorimétereinek (NaI, BGO) időfelbontását és energiafelbontását. A modern nagyenergiás fizikában jelenleg 50 psec időfelbontású detektorok működnek (PHENIX, TOTEM), az LHC CMS és a TOTEM kísérletének Precision Proton spektrométerében a megcélzott időbeli felbontás 10 psec. Várható-e hasonlóan jó időfelbontású detektorok megjelenése a gammakitöréseket detektáló műholdakon? Mi a jelenleg elérhető legjobb időfelbontás?

Válaszom:

Jelenleg a Fermi GBM detektorok időfelbontása 2 mikroszekundum. A GBM technikai leírását tartalmazó cikkben ([Meegan, C., et al., 2009]) megtalálhatók azok a korlátok amik az időfelbontást behatárolják. A Data Processing Unit (DPU) alakítja át a fotoelektron-sokszorozó jelét beütésszámmá. Bár a kiolvasás frekvenciája 9,6 MHz, a jel utáni holtidő $2,6 \mu\text{s}$ (lásd a 4. ábrát). Ez nem teszi lehetővé a 2 mikroszekundumnál pontosabb időfelbontást. A másik tényező, az abszolút idő-meghatározása. Minden másodpercben szinkronizálják az időt GPS segítségével, melynek pontossága $1,5 \mu\text{s}$. Az ezt osztó DPU óra 1,5 MHz frekvenciájú, mely kismértékben hőmérsékletfüggő. Ennek maximális hibája $20 \mu\text{s}$ lehet. Amennyiben szükség lenne rá, erre visszakorrigálnának. A LAT és a GBM órák összehangolása is $2 \mu\text{s}$ pontosságú.



4. ábra. Egy GBM fotoelektron-sokszorozóban kapott jelalak ([Meegan, C., et al., 2009]).

A 20 évvel ezelőtti CGRO műholdon a BATSE műszernél is $2 \mu\text{s}$ volt a pontosság. A legerősebb kitöréseknél egy detektorban kb. 6000 fotont figyeltek meg másodpercenként. A legintenzívebb szakaszban 15 maximum 20 foton ezredmásodpercenként. Az időfelbontást akkor érdemes és szükséges is növelni, ha nem elhanyagolható az esélye, hogy két foton érkezik egy detektorba $2 \mu\text{s}$ alatt. Ez talán minden ezredik gammakitörés esetén előfordulhat a legintenzívebb szakaszban, de a kitörések 99,9 százalékánál ez a valószínűség elhanyagolható. Mivel a GBM NaI detektorok érzékenysége kisebb, mint a BATSE detektoroké volt, ezért nem volt szükség az időfelbontás fejlesztésére.

3. Csörgő Tamás harmadik kérdése:

Mi a magyarázata a 76. oldalon a 7.3.2. ábrán ismertetett Amati-relációnak? Ismereteink szerint miért tesznek eleget ennek az összefüggésnek a hosszú gammakitörések, és miért nem tesznek eleget a rövid kitörések?

Válaszom:

A gammakitörések azonnali megfigyelt paraméterei között több empirikus korrelációt vélnek a kutatók felfedezni ([Kumar, P. and Zhang, B., 2015]). Ilyen az Amati és a hozzá hasonló Ghirlanda reláció ([Ghirlanda, G., Ghisellini, G. and Lazzati, D., 2004]). De a prompt megfigyelésekkel kapcsolatos a Liang-Zhang reláció ([Liang, E. and Zhang, B., 2005]), a Firmani reláció ([Firmani, C., et al., 2006]), a Frail reláció ([Frail, D. A., et al., 2001]), a Norris -féle luminozitás – spektrum-késés összefüggés ([Norris, J. P., Marani, G. F. and Bonnell, J. T., 2000]) valamint további feltételezett korrelációk ([Reichart, D. E., et al., 2001], [Liang, E.-W., et al., 2010], [Ghirlanda, G., et al., 2011], [Lü, J., et al., 2012], stb.).

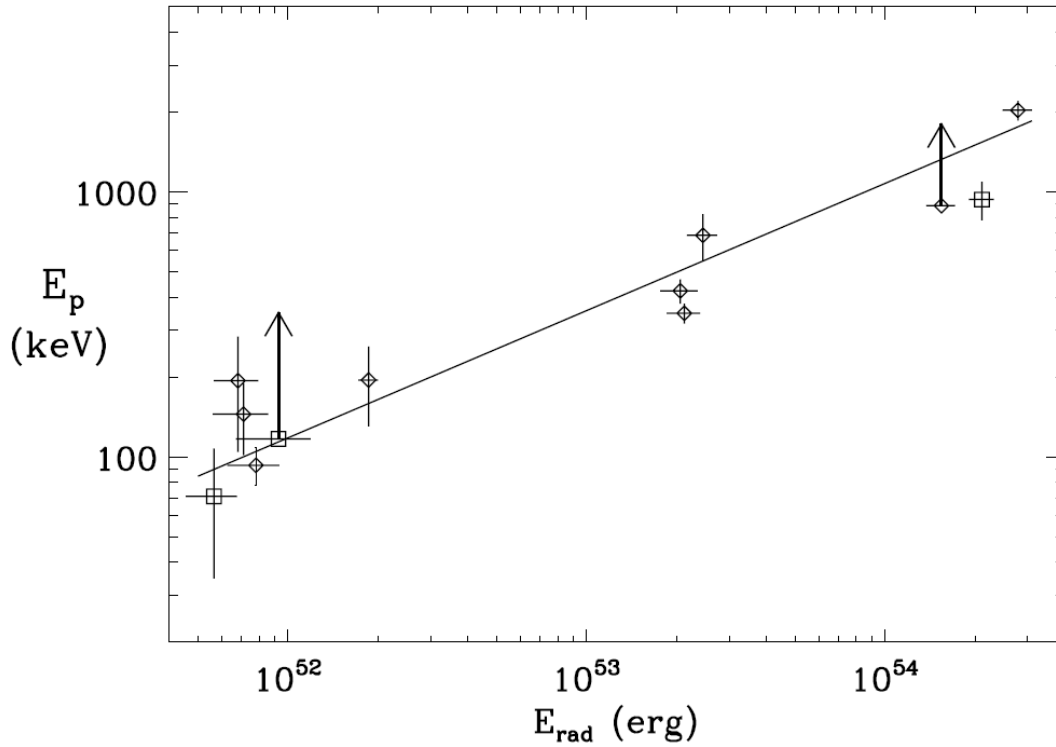
Ezen korrelációk elméleti magyarázata a legtöbb esetben még vitatott kérdés, sőt többen megkérdőjelezik egyes összefüggések létét. Például a megfigyelt korrelációt kiválasztási vagy műszereffektussal magyarázzák, ilyen az Amati-reláció esetén többek között [Nakar, E. and Piran, T., 2005], [Butler, N. R., et al., 2007] és [Kocevski, D., 2012]. Miközben Kumar és Zhang (2015) elfogadja a relációt, de nagyobb szórással. A relációt eredetileg Amati és munkatársai ([Amati, L., et al., 2002]) javasolták (lásd az 5. ábrát) a következő formában

$$\frac{E_p(1+z)}{100\text{keV}} = C \left(\frac{E_{\gamma,iso}}{10^{52}\text{erg}} \right)^m$$

ahol E_p a gammaspektrumban megfigyelt törési energia (az az energia ahol a spektrumra illesztett hatványfüggvény kitevője megváltozik), $E_{\gamma,iso}$ izotróp sugárzást feltételezve a kibocsájtott energia az 1 keV – 10 MeV tartományban, C körülbelül 0,9, m pedig 0,5.

Valamelyest jobb korrelációt kapott Ghirlanda ([Ghirlanda, G., Ghisellini, G. and Lazzati, D., 2004]). Amennyiben a jet nyílásszögét meg lehetett becsülni, úgy az $E_{\gamma,iso}$ helyett használhatjuk a valójában kisugárzott gammaenergiát E_γ -t. Az ún. Ghirlanda reláció ekkor a következő alakú

$$\frac{E_p(1+z)}{100\text{keV}} = 4,8 \left(\frac{E_\gamma}{10^{51}\text{erg}} \right)^{0,7}$$



5. ábra. Amati eredeti ábrája az Amati relációról ([Amati, L., et al., 2002]).

Természetesen vannak próbálkozások az irodalomban a fenti relációk magyarázatára, de nagyobb részük továbbra is empirikus reláció, így az Amati reláció is az. Egy egyszerű gondolatmenet szinkrotron sugárzás esetén a következő. A Schwinger formula alapján

$$P \sim E^4$$

ahol E az elektron energiája, P a kisugárzott teljesítmény, lásd például Balerna, A. and Mobilio, S., 2015. Ugyanitt néhány oldallal később szerepel

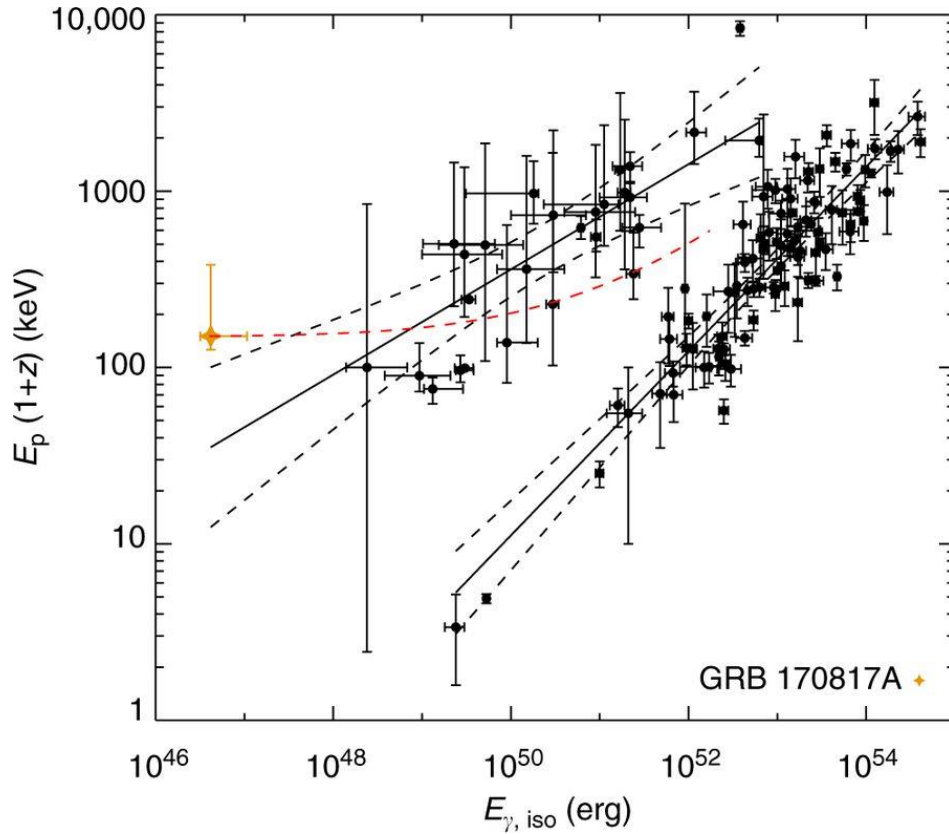
$$\lambda_c \sim E^{-3}$$

ahol λ_c a kritikus hullámhossz, aminek a reciprokjával arányos E_{peak} , tehát

$$E_{peak} \sim P^{3/4}$$

Ez a 0,75-ös kitevő közel áll a Ghirlanda reláció 0,7-es kitevőjéhez. Természetesen ez várható is, hiszen a jetre korrigált energia a valójában kibocsátott energia és nem az Amati relációban szereplő $E_{\gamma,iso}$.

Kérdéses továbbá, hogy ezen relációk minden gammakitörésre érvényesek-e, vagy csak egyes alcsoportokra. A rövid gammakitörések valóban nem illeszkednek az Amati ábrán a hosszú kitörések eloszlására (lásd 6. ábra). Többen azonban ezt úgy magyarázzák, hogy a rövid gammakitörések egy párhuzamos egyenesen helyezkednek el ([Zhang, B.-B., et al., 2018]).



6. ábra. A rövid gammakitörések (balra fent) és a hosszú gammakitörések (jobbra lent) eloszlása egy 2018-ban megjelent cikk ([Zhang, B.-B., et al., 2018]) Amati diagramján.

A 6. ábrán látszik, hogy a hasonló E_p -vel rendelkező kitöréseknél a rövid kitörések izotrópikus energiája 10-20-szor kisebb mint a hosszúaké. Ez utalhat arra, hogy a két fajta kitörés másképp működik. De hasonló működést feltételezve, az $E_{\gamma,iso}$ -k közötti eltérés magyarázata lehet, hogy a jetek nyílásszöge 3-4-szer nagyobb rövid kitörések esetén ([Kumar, P. and Zhang, B., 2015]).

HIVATKOZÁSJEGYZÉK

- Amati, L., et al.: Intrinsic spectra and energetics of BeppoSAX Gamma-Ray Bursts with known redshifts. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 390, pp. 81-89. (2002)
- Atteia, J.-L., et al.: Localization, time histories, and energy spectra of a new type of recurrent high energy transient source. *The Astrophysical Journal*, Volume 320, pp. L105–110. (1987)
- Balerna, A. and Mobilio, S.: Introduction to Synchrotron Radiation. In: *Synchrotron Radiation*. Mobilio, S., Boscherini, F. and Meneghini, C. (Eds.) Springer. (2015)
- Butler, N. R., Kocevski, D., Bloom, J. S. and Curtis, J. L.: A complete catalog of swift gamma-ray burst spectra and durations: Demise of a physical origin for pre-swift high-energy correlations, *The Astrophysical Journal*, Volume 671, pp. 656–677. (2007)
- Cline, T., et al.: Detection of a fast, intense and unusual gamma ray transient. *The Astrophysical Journal*, Volume 237, pp. L1–5. (1980)
- Costa, E., et al.: Discovery of an X-ray afterglow associated with the γ -ray burst of 28 February 1997. *Nature*, Volume 387, Issue 6635, pp. 783-785. (1997)
- Evans, W. D., et al.: Location of the gamma-ray transient event of 1979 March 5. *The Astrophysical Journal*, Volume 237, pp. L7–9. (1980)

- Firmani, C., Ghisellini, G., Avila-Reese, V. and Ghirlanda, G.: Discovery of a tight correlation among the prompt emission properties of long gamma-ray bursts, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 370, pp. 185–197. (2006)
- Frail, D. A. et al.: Beaming in gamma-ray bursts: Evidence for a standard energy reservoir, *The Astrophysical Journal*, Volume 562, pp. L55–L58. (2001)
- Giacconi, R.: On the use of long-base time-delay measurements in the study of rapidly varying X-ray stars. *The Astrophysical Journal*, Volume 173, pp. L79–81. (1972)
- Ghirlanda, G., Ghisellini, G., Nava, L. and Burlon, D.: Spectral evolution of Fermi/GBM short gamma-ray bursts, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 410, pp. L47–L51. (2011)
- Ghirlanda, G., Ghisellini, G. and Lazzati, D.: The collimation-corrected gamma-ray burst energies correlate with the peak energy of their νF_ν spectrum, *The Astrophysical Journal*, Volume 616, pp. 331–338. (2004)
- Golenetskii, S.; Aptekar, R.; Frederiks, D.; Mazets, E.; Palshin, V.; Hurley, K.; Cline, T.; Stern, B.: Observations of giant outbursts from Cygnus X-1. *The Astrophysical Journal*, Volume 596, pp. 1113–1120. (2003)
- Hurley, K., et al.: Reactivation and precise interplanetary network localization of the soft gamma repeater SGR1900+14. *The Astrophysical Journal*, Volume 510, pp. L107–109. (1999a)
- Hurley, K., et al.: Precise interplanetary network localization of a new soft gamma repeater, SGR 1627-41. *The Astrophysical Journal*, Volume 519, pp. L143–145. (1999b)
- Hurley, K., et al.: Where is SGR1806-20? *The Astrophysical Journal*, Volume 523, pp. L37–40. (1999c)
- Hurley, K.: All-sky monitoring of high-energy transients. In: *Observing Photons in Space* / M.C.E. Huber, A. Pauluhn, J.L. Culhane, J.G. Timothy, K. Wilhelm, and A. Zehnder (eds.). ISSI Scientific Reports Series, ESA/ISSI, p. 235-240. (2010)
- Kocevski, D.: On the Origin of High-energy Correlations in Gamma-Ray Bursts, *The Astrophysical Journal*, Volume 747, pp. 146. (2012)
- Kumar, P. and Zhang, B.: The physics of gamma-ray bursts & relativistic jets. *Physics Reports*, Volume 561, pp. 1-109. (2015)
- Liang, E.-W., et al.: Constraining Gamma-ray Burst Initial Lorentz Factor with the Afterglow Onset Feature and Discovery of a Tight $\Gamma_0 - E_\gamma$ iso Correlation, *The Astrophysical Journal*, Volume 725, pp. 2209–2224. (2010)
- Liang, E. and Zhang, B.: Model-independent Multivariable Gamma-Ray Burst Luminosity Indicator and Its Possible Cosmological Implications, *The Astrophysical Journal*, Volume 633, pp. 611–623. (2005)
- Ligo, Virgo and IPN collaborations: Search for Gravitational Waves Associated with Gamma-Ray Bursts during the First Advanced LIGO Observing Run and Implications for the Origin of GRB 150906B. *The Astrophysical Journal*, Volume 841, Issue 2, article id. 89, pp. (2017)
- Lü, J., et al.: Lorentz-factor-Isotropic-luminosity/Energy Correlations of Gamma-Ray Bursts and Their Interpretation, *The Astrophysical Journal*, Volume 751, pp. 49. (2012)
- Meegan, C., et al.: The Fermi Gamma-ray Burst Monitor. *The Astrophysical Journal*, Volume 702, Issue 1, pp. 791-804. (2009)
- Nakar, E. and Piran, T.: Outliers to the peak energy-isotropic energy relation in gamma-ray bursts, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 360, pp. L73–L76. (2005)
- Norris, J. P., Marani, G. F. and Bonnell, J. T.: Connection between Energy-dependent Lags and Peak Luminosity in Gamma-Ray Bursts, *The Astrophysical Journal*, 534, pp. 248–257. (2000)
- Reichart, D. E., et al.: A possible cepheid-like luminosity estimator for the long gamma-ray bursts, *The Astrophysical Journal*, Volume 552, pp. 57–71. (2001)
- Zhang, B.-B., et al.: A peculiar low-luminosity short gamma-ray burst from a double neutron star merger progenitor. *Nature Communications*, Volume 9, id. 447. (2018)

Horváth István

Budapest, 2018. június 14.